

Alexander Löffler

***Entwicklung einer modellbasierten In-
the-Loop-Testumgebung für
Waschautomaten***

***Development of a Model-Based In-
the-Loop Test Environment for
Washing Machines***

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

Band 358 der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

© Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn – Paderborn – 2016

ISSN (Print): 2195-5239

ISSN (Online): 2365-4422

ISBN: 978-3-942647-77-9

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

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

Satz und Gestaltung: Alexander Löffler

Hersteller: Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG
Druck Buch Verlag
Münster

Printed in German

**Entwicklung einer modellbasierten
In-the-Loop-Testumgebung für Waschautomaten**

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

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Alexander Löffler
aus Semipalatinsk

Tag des Kolloquiums: 1. August 2016
Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Ansgar Trächtler
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier

Zusammenfassung

Im Maschinenbau (z.B. Automotiv, Hausgeräte, Raumfahrt) werden neue Funktionen für mehr Sicherheit, geringere Umweltbelastung und mehr Komfort zunehmend durch elektronische Steuergeräte realisiert. Als Folge nimmt der Entwicklungs- und Testaufwand zu. Modellbasiertes Testen und die Zuhilfenahme von Echtzeitsimulationen (Hauptausprägung HiL-Simulationen) bieten die Möglichkeit, die Testtiefe und den -umfang zu erhöhen, um die Steuergerätequalität sicherzustellen und weiter zu verbessern.

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung einer modellbasierten In-the-Loop-Testumgebung für Waschautomaten, im speziellen einer HiL-Simulation. Die Herausforderung beim Erstellen eines echtzeitfähigen Gesamtmodells des Waschautomaten liegt darin, das gesamte, implizit vorhandene domänenübergreifende Prozess- und Systemwissen explizit abzubilden. Für eine effektive Nutzung wurde die HiL-Simulation in bestehende Werkzeugketten und Entwicklungsprozesse integriert. Damit wurden die grundlegenden Rahmenbedingungen für eine Nutzung der In-the-Loop-Technologien geschaffen. Abschließend wurde exemplarisch der Nutzen einer MiL-Simulation anhand von zwei Beispielen verdeutlicht.

Abstract

In mechanical engineering (e.g. automotive, appliance, aerospace) new features for more safety, less pollution and greater comfort are more and more implemented with electronic control units. This increases the development and testing effort. Model-based testing and real-time simulations (mainly HiL simulation) offer the possibility to increase the test depth and scope to ensure and improve the quality of the control devices.

The aim of this study was to develop a model-based in-the-loop test environment for washing machines, in particular a HiL simulation. The challenge in creating a real-time model of the washing machine is to extract the whole, implicit knowledge of the cross-domain process and system and to make it explicit. For an effective use, the HiL simulation has been integrated into existing tool chains and development processes. Thus, the basic framework for the use of the in-the-loop technologies was established. Finally, the advantages of MiL simulations were illustrated by means of two examples. [1em]

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Regelungstechnik und Mechatronik (RtM) und in der Fraunhofer Projektgruppe „Entwurfstechnik für Mechatronik“. Bedanken möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. habil. Ansgar Trächtler, der mir die Möglichkeit gegeben hat diese Arbeit an seinem Lehrstuhl durchführen zu können. Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier danke ich für die Übernahme des Korreferats. Ich bedanke mich auch bei Prof. Dr.-Ing. Detmar Zimmer und Prof. Dr.-Ing. Rainer Koch für Ihr Mitwirken in der Promotionskommission.

Bedanken möchte ich mich bei allen Kollegen des Lehrstuhls für eine gute und hilfreiche Arbeitsatmosphäre. Besonders bedanken möchte ich mich bei den Mitgliedern der „Promotionsrunde“, Julia Timmermann, Peter Reinold und Martin Krüger. Wir haben uns gegenseitig unterstützt, kritisiert und in der Summe vorangebracht. Dank gebührt auch meinen Kollegen Semir Osmic, Hendrik Amelunxen, Dirk Koert, Viktor Fast, Jan Michael und Christoph Schweers für die häufigen und langen Gespräche sowie ihren fachlichen Rat. Katharina Mulhaupt danke ich für ihre sorgfältigen Korrekturen. Aus dem Hause Miele & Co. Cie. danke ich herzlich den Herren Sieding, Bicker, Steiner, Pohl, Fritzenkötter, Beinert und Templin für die Anregungen, die fachkundige Unterstützung sowie die unzähligen wertvollen Diskussionen. Weiterhin danke ich den studentischen Hilfskräften, Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeitern für ihre Unterstützung und Beiträge.

Mein Dank gilt auch meinen Eltern, die mein Studium erst ermöglicht haben, sowie meinen Schwiegereltern. Mein größter und besonderer Dank gilt meiner Frau Renate, die maßgeblich zum Erfolg der Arbeit beigetragen hat: für die große Geduld, die vielen Korrekturschleifen bezüglich Struktur und Argumentationsaufbau und nicht zuletzt, weil sie mir im Familienalltag die Zeit für die Arbeit freigeräumt hat.

Paderborn, im August 2016

Alexander Löffler

Liste der veröffentlichten Teilergebnisse

LÖFFLER, Alexander; MICHAEL, Jan; TIMMERMANN, Julia; KRÜGER, Martin; TRÄCHTLER, Ansgar: *Modellbasierte Parameteridentifikation des Durchströmungswiderstandes der Wäsche im Waschprozess*. 9. Paderborner Workshop: „Entwurf mechatronischer Systeme“, April 2013

GAYK, Karsten; BICKER, Rainer; LÖFFLER, Alexander: *Anwendung von „Hardware-in-the-Loop (HiL)“ Simulationen bei Waschmaschinen*. Virtuelle Instrumente in der Praxis 2012,

LÖFFLER, Alexander; SCHWEERS, Christoph; FAST, Viktor; KRUSE, Daniel; TRÄCHTLER, Ansgar: *Multidomänen-Modell eines Waschvollautomaten für einen Hardware-in-the-Loop-Prüfstand*. 8. Paderborner Workshop: „Entwurf mechatronischer Systeme“, Mai 2011

LÖFFLER, Alexander; KOERT, Dirk; SCHWEERS, Christoph; TRÄCHTLER, Ansgar: *Einführung in die modellbasierte Entwicklung im Bereich der Hausgerätektechnik*. VDI Mechatronik , Tagungsband Mechatronik 2011: S. 321-326, März. 2011

ZEINELDIN, Tarek; KOERT, Dirk; LÖFFLER, Alexander; TRÄCHTLER, Ansgar: *Entwicklung einer Hardware-in-the-Loop-Umgebung für den Steuergerätetest von Kondenstrocknern*. VDI Mechatronik, Mai 2009

KOERT, Dirk; LÖFFLER, Alexander; ZEINELDIN, Tarek; TRÄCHTLER, Ansgar: *Echtzeitsimulation für den modellbasierten Steuergerätetest von Haushaltsgeräten*. 6. Paderborner Workshop: „Entwurf mechatronischer Systeme“, März. 2009

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Zielsetzung	2
1.2	Modellbasierte Entwicklung und Test von mechatronischen Systemen	4
1.3	Aufbau der Arbeit	8
2	Grundlagen und Stand der Technik	11
2.1	Modellbasierte Testmethoden	11
2.1.1	Model-in-the-Loop	13
2.1.2	Software-in-the-Loop	14
2.1.3	Processor-in-the-Loop	14
2.1.4	Rapid Control Prototyping	15
2.1.5	Hardware-in-the-Loop	16
2.2	Modellbildung mechatronischer Systeme	17
2.2.1	Modellbildung in der Mechatronik	18
2.2.2	Echtzeitfähige Modelle	23
2.3	Der Waschprozess	24
2.3.1	Aufbau eines Waschautomaten	25
2.3.2	Prozessbeschreibung	26
2.3.3	Begriffsdefinitionen	32
2.3.4	Verwandte Arbeiten zur Modellierung des Waschprozesses	39
2.3.5	Diskussion und Handlungsbedarf	41
3	Modellbildung des Waschautomaten	43
3.1	Modellstruktur	43
3.1.1	Systemabgrenzung	43
3.1.2	Gesamtmodell	45
3.2	Streckenmodell des Waschautomaten	47
3.2.1	Fluidmechanik	48
3.2.2	Wärmeübertragung	59
3.2.3	Wärme- und Stoffübertragung	66
3.2.4	Mechanik	69

3.2.5	Aktoren und Sensoren	71
3.3	Modellierung der Regelung und Steuerung des Waschautomaten	73
3.4	Zusammenfassung	77
4	Simulation und Validierung	79
4.1	Vorstellung des Waschprozesses	80
4.2	Modellvalidierung der Teilmodelle	81
4.2.1	Fluidmechanik	81
4.2.2	Wärmeübertragung	91
4.2.3	Wärme- und Stoffübertragung	93
4.3	Validierung des Gesamtmodells und Diskussion	96
4.3.1	Gesamtmodell	96
4.3.2	Modelleigenschaften	97
4.4	Analyse des Gesamtenergieverbrauchs	99
4.5	Zusammenfassung	102
5	HiL-Simulation für Waschautomaten	105
5.1	Modellbasiertes Testen in der Hausgeräteindustrie	105
5.1.1	Eingesetzte Software beim Unternehmen	107
5.1.2	Eingesetzte Hardware beim Projektpartner	108
5.2	HiL-Prüfstandsarchitektur	110
5.2.1	Prüfstandsanforderungen	110
5.2.2	Auswahl der HiL-Prüfstandskomponenten	112
5.2.3	Architektur der HiL-Simulation	114
5.2.4	Vergleich HiL-Simulation und Prototypentest	120
5.2.5	Zusammenfassung	121
5.3	Anwendung der HiL-Simulation	122
5.3.1	HiL-Funktionstests	123
5.3.2	HiL-Verfahrenstest	128
5.3.3	Ausblick	132
6	Anwendungsbeispiele für MiL-Simulationen	135
6.1	Modellbasierte Auslegung einer Neupositionierung des Füllstand- sensors	135
6.1.1	Der intelligente Wasserzulauf	136
6.1.2	Auslegung der Rückschaltpunkte	139
6.1.3	Anwendung der Sensitivitätsanalyse	141
6.2	Waschwirkungsmodell	143
6.2.1	Anschmutzungsstreifen	143
6.2.2	Anschmutzarten	144
6.2.3	Abbildung der Waschwirkung	146

6.3	Mehrzieloptimierung	148
6.3.1	Optimierungsproblem	148
6.3.2	Optimierungsergebnisse	149
7	Zusammenfassung und Ausblick	153
7.1	Zusammenfassung	153
7.2	Ausblick	154
8	Notation	157
9	Literaturverzeichnis	161

1 Einleitung

Die Entwicklung des Waschautomaten begann im Jahr 1767 (siehe Bild 1-1¹) mit einem Rührflügel-Waschapparat, um die körperliche Anstrengung und die Versprödung der Hände durch das Seifenwasser zu reduzieren und die Beanspruchung des Gewebes zu senken [And99]. Es dauerte 100 Jahre, bis eine Weiterentwicklung zur Trommelwaschmaschine vorgenommen wurde, und weitere 50 Jahre bis die Muskelkraft beim Antrieb durch einen elektrischen Antrieb ersetzt wurde. Mit der Einführung des ersten computergesteuerten Waschautomaten mit Sensor-Elektronik im Jahr 1978 durch die Firma Miele kamen in immer kürzeren Innovationszyklen immer mehr Funktionen hinzu, wie z. B. Unwuchtkontrolle, Wollprogramme, Aquastop und viele weitere Zusatzprogramme. Durch die intelligente Vernetzung in Form von Smart-Home und Grid werden Interaktionschnittstellen zur Umgebung geschaffen, welche die Gerätefunktionen direkt und indirekt beeinflussen.

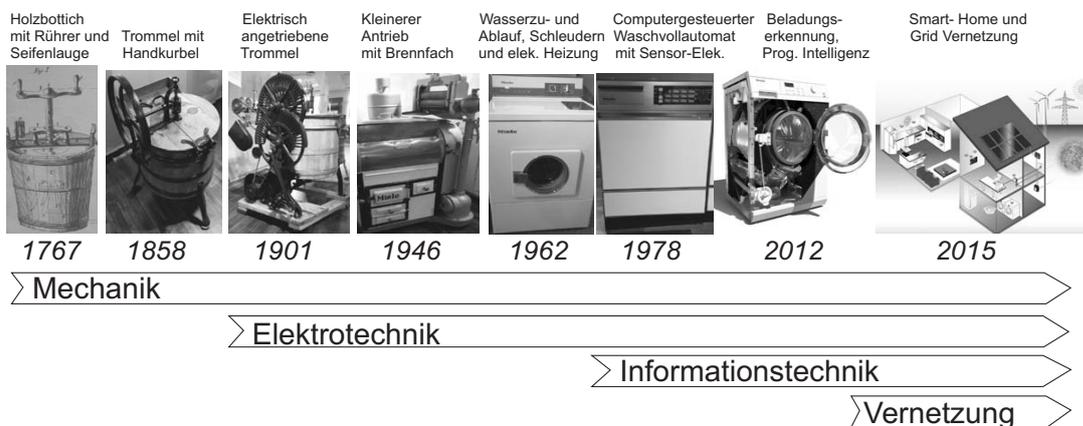


Bild 1-1: Vom Rührflügel-Waschapparat zum mechatronischen System „Waschautomat“

Mit jeder neuen Funktion, jedem Aktor und Sensor steigt der Umfang der benötigten Steuergeräte. Damit erhöht sich der Aufwand und die Komplexität für die Entwicklung und das Testen der Waschautomaten, gleichzeitig verkürzt sich der Zeitraum, indem diese stattfinden müssen.

Zusätzlich steigen die Anforderungen an aktuelle Steuergeräte immer weiter: Sie müssen bei jedem Waschprozess den Ressourcen- und Energieeinsatz anpassen;

¹Eigene Photographien von Exponaten aus dem Miele-Museum.

darüber hinaus müssen sie auch die Betriebssicherheit gewährleisten. Ungeachtet der erreichten Effizienz (in den vergangenen 15 Jahren: -35 % beim Energieverbrauch und -50 % beim Wasserverbrauch) steigen die Anforderungen an zukünftige Hausgeräte weiter: „... *exzellenter Bedienkomfort, intelligente Technologien und – fast schon selbstverständlich – der effiziente Umgang mit den Ressourcen Wasser und Energie kennzeichnen die neuen Hausgeräte der Top-Marken. ... Bei modernen Waschmaschinen sorgt eine Vielzahl spezieller Programme für saubere Wäsche*“ [Hof10, Seite 1].

Die permanente Zunahme an Funktionalitäten erhöht den Druck auf die Entwicklung und das Testen. Ungeachtet der zunehmenden Komplexität erwartet man im Betrieb eine zuverlässige Gewährleistung aller Funktionen über den kompletten Produktlebenszyklus und darüber hinaus. Im Besonderen bei Premiumprodukten ist dies ein wettbewerbsrelevanter Faktor. Um den steigenden Aufwand zu bewältigen, werden modellbasierte Testmethoden eingeführt. Das modellbasierte Testen und die Zuhilfenahme von Echtzeitsimulationen bietet die Möglichkeit, Testtiefe und -umfang zu erhöhen, um die Steuergerätequalität sicherzustellen und weiter zu verbessern. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Aufbau einer modellbasierten Testumgebung für Waschautomaten-Steuergeräte.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

In der Hausgeräteindustrie gewinnen die elektronischen Komponenten zunehmend an Bedeutung. Dies ist auf zwei wesentliche Gründe zurückzuführen: zum einen auf die immer strenger werdenden Gesetze zur Gestaltung energiebetriebener Produkte und zum anderen auf die zunehmend spezifischen Anforderungen der Kunden. Neue Funktionen für mehr Sicherheit, geringere Umweltbelastung und mehr Komfort werden größtenteils durch Steuergeräte ermöglicht. Als neue Entwicklungen werden in [Wen07] Energieeinsparung, Wassereinsparung, Optimierung des Waschprozesses/Einsatz von Sensorik, Verbesserung der Sicherheit und einfache Bedienung genannt. Der aktuelle Trend geht zu mehr Funktionalitäten, wie z. B. die Energie-Verbrauchs-Anzeige, das Glätten bzw. Auflockern der Wäsche mittels Dampf, die integrierte Waschmitteldosierung sowie die intelligente Vernetzung der Geräte untereinander und mit dem Internet.

Ein aktueller Waschautomat der Firma Miele hat zur Zeit ca. 35 Anwahl-Programme. Die Beladungsmenge kann beispielsweise von ein bis acht Kilogramm variiert werden, wobei es ca. acht Beladungsarten gibt. Nur zur Prüfung dieser normierten Standardfälle in 1-kg-Schritten sind $35 \cdot 8 \cdot 8 = 2240$ Waschgänge notwendig. Bei diesem einfachen Beispiel wurden weitere Faktoren nicht berücksichtigt: Gemischte Beladungsarten, 47 verschiedene Ländervarianten, 70 individuell verstellbare Kundendienstparameter und verschiedene Unwuchtausbildungen bei

jedem Schleudern. Für eine ausschöpfende Prüfung wäre das Abtesten aller Szenarien notwendig. Um die hohen Qualitätsziele zu erreichen, werden mit dieser Arbeit die modellbasierten Methoden beim Projektpartner Miele eingeführt, im Speziellen die HiL-Simulation².

Der Einsatz von HiL-Simulationen hat viele Vorteile:

- das Erkennen von Fehlern bereits in der Entwicklung,
- wiederholbare Testbedingungen,
- Testen von Rand- und/oder Extrembereichen,
- Kostenreduktion,
- Verkürzung von Entwicklungszeiten und
- die Erhöhung der Testtiefe durch eine Automatisierung der Testreihen.

Durch die HiL-Simulation entfallen die am realen Prüfstand erforderlichen aufwendigen Zusatzarbeiten und Unterbrechungen, wie z. B. Abkühlpausen, Be- und Entladen des Waschautomaten und Aufbereitung der Wäsche. Aufgrund dieser Vorteile ist der Einsatz von HiL-Tests in der Automobilindustrie seit Längerem zum Standard geworden [KH08]. In anderen Industriebereichen, wie auch dem der Haushaltsgeräte, werden HiL-Simulationen dagegen bisher nur wenig genutzt, obwohl auch hier angesichts der zunehmenden Komplexität der Steuergeräte die Integration der HiL-Simulation in den Entwicklungsprozess erhebliche Vorteile verspricht [KLZT09].

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer HiL-Simulation für Waschautomaten. Dafür soll ein physikalisches Streckenmodell eines Waschautomaten aufgestellt werden. Die Herausforderung beim Erstellen eines echtzeitfähigen Gesamtmodells des Waschautomaten liegt darin, das gesamte, implizit vorhandene und domänenübergreifende Prozess- und Systemwissen über den Waschautomaten explizit in einem Modell abzubilden. Die Wahl der Modellierungstiefe ist hierbei entscheidend, da das Modell den Echtzeitanforderungen zum Einsatz in HiL-Simulationen genügen sowie alle erforderlichen dynamischen Effekte beinhalten muss. Für die technische Realisierung der HiL-Simulation ist eine systematische Einbindung in etablierte Werkzeugketten notwendig.

Die wichtigste Komponente der HiL-Simulation stellt das physikalische Modell dar. Das physikalische Modell ist ein abstraktes Abbild eines realen Systems, das

²Hardware-in-the-Loop (HiL) ist eine Möglichkeit, Hardware, insbesondere Steuergeräte, in einer virtuellen Umgebung zu testen. Die Kopplung des Steuergeräts und des Modells erfolgt dabei über Sensor- und Aktorsignale. Mit HiL können Teilsysteme unter realistischen Bedingungen getestet werden, ohne dass bereits das gesamte System vorhanden sein muss.

dieses so weit wie möglich vereinfacht, aber dessen interessierende Eigenschaften so korrekt wie nötig bzw., je nach Aufgabenstellung, auch so korrekt wie möglich wiedergibt. Mit Hilfe von Modellen kann man in Simulationen mit relativ wenig Zeit- und Kostenaufwand nützliche Daten über zu optimierende Parameter (wie z. B. Material- und Energieaufwand, Resonanzen usw.) erhalten oder Informationen über Ursachen von Störfällen sammeln, ohne teure Versuche oder Messungen durchführen zu müssen [Dre06]. Durch eine detaillierte physikalische Modellierung wird das Prozessverständnis verbessert. Wie z. B. bei der Modellierung der Wärmeübertragung, wo bei physikalischen Modellen das Wärmeübertragungsverhalten von der Art der Übertragung, der Masse und der Temperatur abhängen. Bei empirischen Modellen sind diese sehr häufig nur von der Temperatur abhängig. Zudem bieten die physikalischen Modelle bessere Extrapolationsmöglichkeiten. Daher sind sie den empirischen³ Modellen prinzipiell vorzuziehen. Außerdem ermöglicht ein gutes Modell schon weit vor der eigentlichen Realisierung eines technischen Systems eine Analyse des dynamischen Verhaltens und damit eine bessere Systemauslegung.

Mit dem validierten physikalischen Streckenmodell fehlt nur noch ein Steuergerätemodell für eine MiL-Simulation. Hierfür wird ein ereignisdiskretes Steuergerätemodell erstellt. Damit können, abhängig von der Modellierungstiefe des Streckenmodells, verschiedene Optimierungs- und Analyseverfahren zur Weiterentwicklung des Gesamtsystems angewendet werden. Dieses Potenzial der modellbasierten Entwicklung gilt es mit dieser Arbeit in die Entwicklung des Waschautomaten, hier im Speziellen das Testen, einzubringen und am Beispiel einer HiL-Simulation aufzuzeigen.

1.2 Modellbasierte Entwicklung und Test von mechatronischen Systemen

Das modellbasierte Testen ist heute ein fester Bestandteil der modellbasierten Entwicklung von mechatronischen Systemen. Für die thematische und chronologische Einordnung der Arbeit wird im Folgenden die Entwicklung mechatronischer Systeme nach dem V-Modell⁴ (Bild 1-2) vorgestellt. Ein besonderes Merkmal mechatronischer Systeme ist das interdisziplinäre Zusammenwirken der verschiedenen Ingenieursdisziplinen. Dabei werden mechanische, elektrotechnische und informationstechnische Komponenten miteinander verbunden, sodass diese sich

³Ein empirisches Modell gibt das Ein- und Ausgangsverhalten des Systems wieder, ohne die inneren Strukturen und Zusammenhänge zu kennen. Dabei werden diese in der Regel an Versuchsdaten angeglichen, sodass diese sie widerspiegeln.

⁴Das V-Modell der Mechatronik ist angelehnt an das V-Modell zur Softwareentwicklung aus der Informatik, welches 1979 von Barry Boehm [Boe79] vorgestellt wurde.

gegenseitig beeinflussen. In der Literatur finden sich dazu viele ähnliche, aber im Detail unterschiedliche Definitionen zum Begriff der Mechatronik. Dabei gibt ISERMANN für diese Arbeit die weitreichendste Definition: „*Mechatronische Systeme entstehen durch simultanes Entwerfen und die Integration von folgenden Komponenten/Prozessen*

- *Mechanische und mit ihr gekoppelte Komponenten/Prozesse*
- *Elektronische Komponenten/Prozesse*
- *Informationstechnik (einschließlich Automatisierungstechnik)*

Die Integration erfolgt durch die Komponenten (Hardware) und durch die informationsverarbeitenden Funktionen (Software). Ziel ist dabei, eine optimale Lösung zu finden zwischen der mechanischen Struktur, Sensor- und Aktor-Implementierung, automatischer digitaler Informationsverarbeitung und Regelung. Zusätzlich werden synergetische Effekte geschaffen, die erweiterte Funktionen und innovative Lösung ergeben“ [Ise08, Seite 18].

Mit den genannten Vorteilen steigt auch die Komplexität des Gesamtsystems. Um diese zu beherrschen, sind sorgfältig strukturierte und systematische Entwicklungsabläufe notwendig, die auch kritische Bedingungen berücksichtigen – wie das V-Modell aus der VDI-Richtlinie 2206 [VDI2206]. Die VDI-Richtlinie 2206 beschreibt einen domänenübergreifenden Systementwurf und die Systemintegration mechatronischer Systeme. Als modellbasierte Testmethoden werden in der Richtlinie die Software-in-the-Loop (SiL)- und Hardware-in-the-Loop (HiL)-Simulation vorgestellt. ISERMANN greift das bestehende V-Modell auf und erweitert dieses, indem er weitere Zwischenschritte einführt. Er unterscheidet „...zwischen Systementwurf bis zu einem Labormuster, der Systemintegration bis zu einem Funktionsmuster und Systemtests bis zum Vorserienprodukt“ [Ise08]. In seinem Modell wird eine weitere Testmethode eingeführt: das Rapid Control Prototyping⁵ (RCP). In der Wissenschaft und Industrie hat sich das V-Modell aus der VDI-Richtlinie 2206 Bild 1-2 erfolgreich etabliert. Im Folgenden wird dieses V-Modell im Fokus der modellbasierten Testmethoden zusammengefasst. Zusätzlich werden darin die modellbasierten Testmethoden eingeordnet und um zwei weitere Methoden, Model-in-the-Loop⁵ (MiL)- und Processor-in-the-Loop⁵ (PiL)-Simulationen, ergänzt.

Der Entwicklungsauftrag bildet den Ausgangspunkt, mit ihm beginnt das Zusammenstellen von Anforderungen und das Festhalten von Spezifikationen in Form eines Anforderungsdokuments. Darauf aufbauend findet ein erster Systementwurf statt; dazu wird das System in verschiedene Komponenten unterteilt, um die Wirkprinzipien zu analysieren. Das Ziel ist ein domänenübergreifendes Lösungs-

⁵Die Definition und die Beschreibung ist in Kapitel 2.1 nachzulesen.

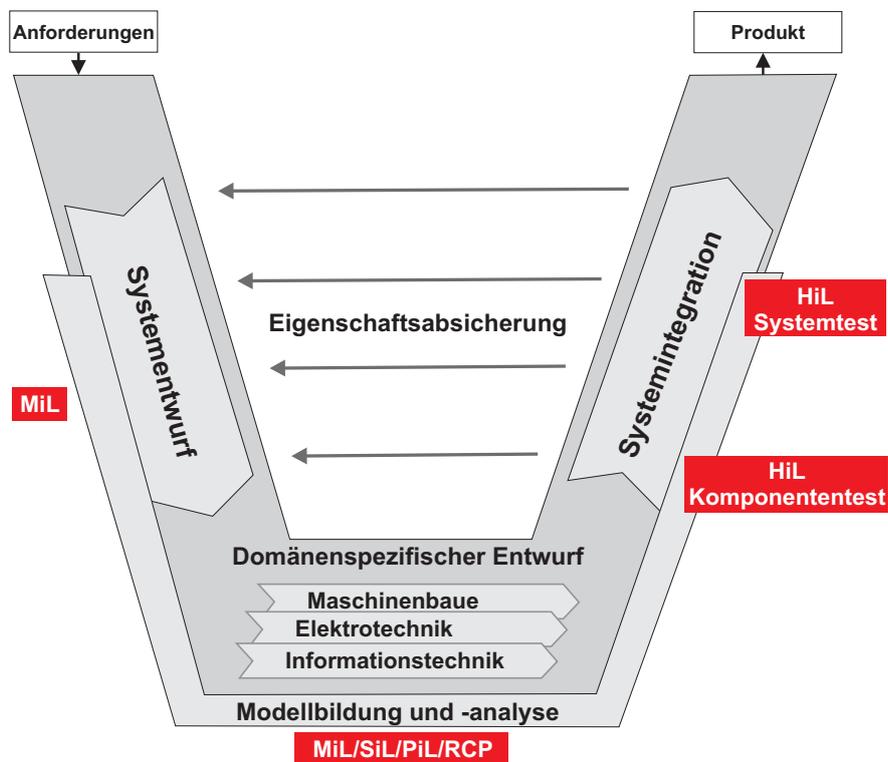


Bild 1-2: Entwurfsschritte für mechatronische Systeme in der V-Modell-Darstellung, angelehnt an die VDI-Richtlinie 2206 [VDI2206]

konzept, welches die vorhandenen Synergien im Systemkonzept darstellt und berücksichtigt. Für die Modellbildung und -analyse steht das dynamische Gesamtsystemverhalten im Vordergrund. Die Gesamtsystemauslegung erfolgt aus Analyseergebnissen des dynamischen Gesamtsystems⁶. Dabei wird das dynamische Streckenmodell mit dem Steuer- und Regelalgorithmus zu einer MiL-Simulation verbunden.

Die gesammelten Erkenntnisse werden im nächsten Schritt, dem fachdisziplinspezifischen Entwurf, zum Komponentenentwurf verwendet, in dem die einzelnen Komponenten domänenspezifisch detailliert ausgearbeitet werden. Wird der Steuer- und Regelalgorithmus in Form von Target-Code eingebunden, handelt es sich um eine SiL-Simulation. In dieser Phase wird der entwickelte Steuer- und Regelalgorithmus auf ein Evaluierungsboard gebracht und gegen das Streckenmodell getestet; dieses bezeichnet man als PiL-Simulation. Zur Inbetriebnahme und schnellen Anpassung des Steuer- und Regelalgorithmus an die jeweiligen Komponenten werden Rapid Control Prototyping Systeme eingesetzt. Mit den fertigen

⁶Vertiefende und weiterführende Literatur dazu: [JTIZ10], [Föl94], [Har10] und [Hes06].

Komponenten endet der fachdisziplinspezifische Entwurf und die Systemintegration beginnt.

Die Systemintegration beginnt mit der Komponentenprüfung mittels Beanspruchungs- und Belastungstest und auf Basis von HiL-Simulationen. Beim HiL-Komponententest liegt nur ein Teilsystem real vor. Dieses wird lediglich gegen einen bestimmten Teil des Streckenmodells getestet. Nach erfolgreichem Test kommt es zur Systemintegration der mechanischen mit den elektrischen Komponenten. Darauf aufbauend folgt eine Systemintegration der Software, sodass nach Abschluss der Systemintegration ein Funktionsmuster vorliegt. Das entstandene Funktionsmuster wird ausführlichen Systemtests unterzogen. An dieser Stelle kommen wiederum HiL-Simulationen zum Einsatz. Getestet wird dabei das reale Seriensteuergerät gegen das Streckenmodell des Gesamtsystems, hierbei handelt es sich um einen HiL-Systemtest. Die Ergebnisse aus der Systemintegration werden dabei kontinuierlich mit den Anforderungen und dem spezifizierten Systemkonzept verglichen, sodass permanent eine Eigenschaftsabsicherung stattfindet. Das Ergebnis einer erfolgreichen Systemintegration ist das Produkt, welches einen Makrozyklus des V-Modells erfolgreich abgeschlossen hat. Das Produkt kann ein Labormuster, Prototyp, Produktionsmuster, eine Vorserie, eine A0- oder B0-Serie sein. Um ein ausgereiftes mechatronisches System zu entwickeln sind in der Regel mehrere Durchläufe der V-Modell-Zyklen notwendig.

Zusammenfassend lassen sich die modellbasierten Testmethoden in drei Kategorien unterteilen: Zum einen die MiL-Simulation in der Systementwurfsphase, dann RCP, MiL-, SiL- und PiL-Simulation im fachdisziplinspezifischen Entwurf und die HiL-Simulationen in der Systemintegrationsphase.

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der HiL-Simulation, um beim Unternehmen möglichst schnell ein Nutzen für die Serienentwicklung zu generieren, indem die Testumgebung am Ende des Entwicklungsprozess für HiL-Systemtests zum Einsatz kommt. Die Voraussetzung dafür ist ein echtzeitfähiges Streckenmodell des Waschautomaten mit einer entsprechenden Modellierungstiefe. Bei einer konsequenten Einhaltung des Entwicklungsprozesses nach dem V-Modell würde aus der Systementwurfsphase ein Streckenmodell für die HiL-Simulation übergeben. Dieses in der Systementwurfsphase entwickelte und validierte Modell würde die notwendige Systemdynamik enthalten und müsste nur noch gegebenenfalls auf seine Echtzeitfähigkeit untersucht werden bzw. reduziert werden. Dazu müsste die Modellbildung einen kompletten Entwicklungsprozess, von einem bereits entwickeltem Seriengerät, durchlaufen. Der Vorteil der Fokussierung der Arbeit auf HiL-Simulation ist aber, dass das Modell nicht die Modellierungstiefe eines MiL-Streckenmodells erreichen muss. Nichtsdestotrotz muss dieses Streckenmodell die wichtigsten Systemdynamiken abbilden, um den notwendigen Gültigkeitsbereich für die HiL-Simulation abzudecken, welcher zu Beginn in einem Lasten-

und Pflichtenheft festgehalten wird. Dafür wird ein vorhandener Waschautomat modelliert. Damit liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der rechten Seite des V-Modells, dem Systemtest des Gesamtsystems mittels einer HiL-Simulation.

1.3 Aufbau der Arbeit

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die einzelnen Kapitel dieser Arbeit gegeben.

In Kapitel 2 werden die zum Verständnis der Arbeit notwendigen Grundlagen dargestellt. Es werden die unterschiedlichen modellbasierten Testmethoden vorgestellt und definiert. Die Grundlage dieser Methoden sind entsprechende Strecken- und Steuerungsmodelle, auf deren Modellbildung anschließend eingegangen wird. Das zu modellierende System Waschautomat wird im letzten Abschnitt vorgestellt. Dabei werden die speziellen Begriffe und Eigenschaften des Waschprozesses vorgestellt.

Die Modellbildung des Waschautomaten wird im dritten Kapitel vorgestellt. Diese hat das Ziel, strukturiert das domänenübergreifende Prozess- und Systemwissen um den Waschautomaten explizit in einem echtzeitfähigen Modell abzubilden. Dazu wird der Waschautomat zur Komplexitätsreduktion in seine Komponenten zerlegt. Die einzelnen Komponenten werden über die Stoff-, Energie- und Informationsflüsse miteinander verbunden. Diese Struktur wird für eine domänenspezifische Modellierung genutzt. Die einzelnen Modelle werden sukzessive zu einem Gesamtmodell verbunden.

Um die Simulation und die Validierung des Modells geht es im vierten Kapitel. Hier wird das Streckenmodell in *MATLAB/Simulink* parametrisiert, simuliert und anhand von Messungen validiert. Im Rahmen der Identifikation wird ein Vorgehen zur Bestimmung von schwer messbaren Systemgrößen, wie dem massenspezifischen Durchströmungswiderstand, vorgestellt.

Im fünften Kapitel wird die Umsetzung einer HiL-Simulation für Waschautomaten beschrieben. Dazu werden die vorhandenen Randbedingungen analysiert und daraus eine Prüfstandsarchitektur festgelegt und umgesetzt. Anschließend wird die HiL-Simulation anhand von Verfahrens- und Funktionstests beispielhaft vorgestellt.

Nach der erfolgreichen Umsetzung der In-the-Loop-Testumgebung für Waschautomaten gibt das sechste Kapitel einen Einblick in Anwendungsmöglichkeiten für die MiL-Simulation. Im ersten Teil wird modellbasiert eine Neupositionierung des Drucksensors ausgelegt. Der zweite Teil befasst sich mit der Modellierung der Waschwirkung und den Möglichkeiten das Modell zu einer Verfahrensauslegung

zu nutzen. Dafür wird ein Mehrzieloptimierungsverfahren angewendet, um eine Paretofront mit den Zielgrößen Energie und Waschzeit zu berechnen.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und einem Ausblick auf das weitere Vorgehen.

2 Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel werden zunächst unterschiedliche modellbasierte Testmethoden vorgestellt, um die Testtiefe zu erhöhen. Aufbauend auf der Einordnung der Testmethoden in das V-Modell der Mechatronik in Kapitel 1 werden diese in Abschnitt 2.1 detaillierter vorgestellt. Die Anwendung dieser Testmethoden setzt auf vorhandene Modelle vom Steuer- und Regelalgorithmus oder der Strecke. Im darauffolgenden Abschnitt 2.2 wird das grundlegende Vorgehen zur Modellbildung mechatronischer Systeme vorgestellt. Zur Modellbildung mechatronischer Systeme ist ein grundlegendes Systemverständnis des zu modellierenden Systems notwendig. Abschnitt 2.3 beschreibt den Aufbau und den Prozessablauf des Waschvorgangs in einem Waschautomaten, welches die Grundlage für die Modellbildung in Kapitel 3 darstellt. Dieses Kapitel schließt mit einer Diskussion über verwandte Arbeiten und einer Zusammenfassung.

Zur Anwendung der modellbasierten Testmethoden sind Grundlagen aus verschiedenen Fachdisziplinen notwendig: Prozesswissen um das System, welches systematisch in ein Modell überführt werden muss. Dazu ist neben entsprechenden Werkzeugkenntnissen das Einhalten von speziellen Modellierungsrichtlinien notwendig, um die Echtzeitfähigkeit der Modelle zu gewährleisten. Zur Umsetzung der Testmethoden sind einfache oder spezielle Hardwareaufbauten in Abhängigkeit der Testmethode notwendig. In diesem Kapitel werden die nötigen Grundlagen für den Einsatz der modellbasierten Techniken vorgestellt. Durch die Anwendung der modellbasierten Techniken können die System Neu- und Weiterentwicklungen wie z. B. Berechnung von optimalen Trajektorien, Entwicklung von Umschaltstrategien, System- und Reglerauslegung, Aufstellen von detaillierten Komponenten-Anforderungen, Erstellen von ausführbaren Spezifikationen, Dokumentation des Systems und der Schnittstellen effizienter und systematischer durchgeführt werden.

2.1 Modellbasierte Testmethoden

Die modellbasierten Testmethoden sind ein fester Bestandteil im modellbasierten Entwurf mechatronischer Systeme. Sie lassen sich in zwei Hauptgruppen unterteilen: In-the-Loop- und Open-Loop-Testmethoden. Bei den Open-Loop-Testmethoden handelt es sich um einfache Laboraufbauten, bei denen anhand von Eingangsgrößen die Funktionsüberprüfung stattfindet. Dabei hat die zu testende Komponente keine Rückwirkung auf das Restsystem. Damit können Teilkomponenten wie z. B. Sensoren und Aktoren getestet werden. Im Gegensatz da-

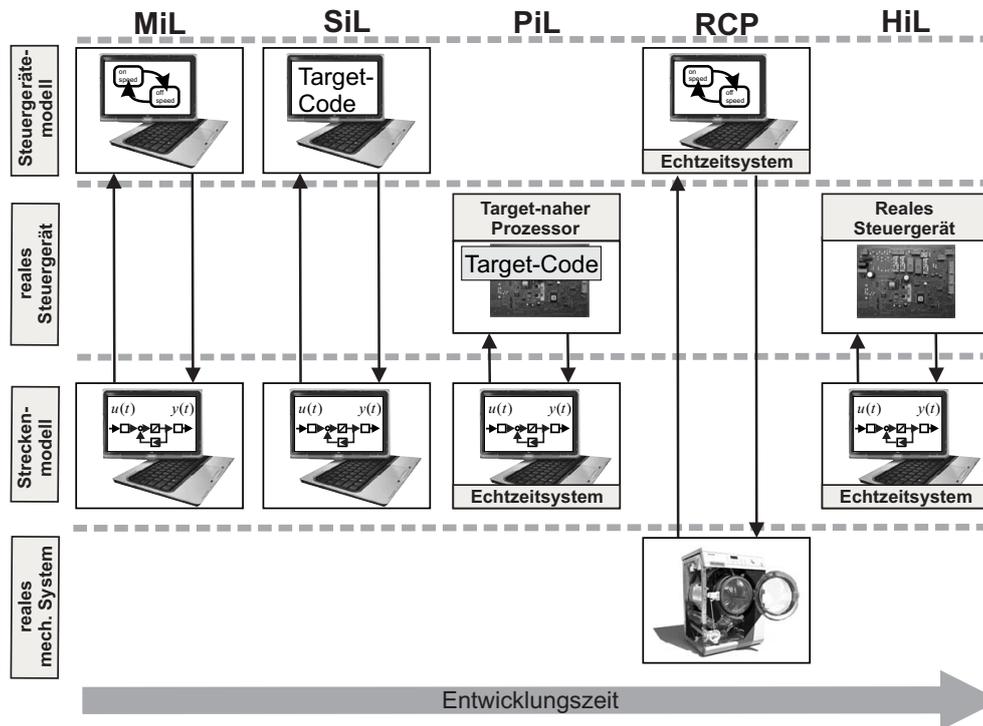


Bild 2-1: Einsatzreihenfolge der In-the-Loop-Testmethoden über die Entwicklungszeit

zu werden bei In-the-Loop-Testmethoden komplexe Zusammenhänge und deren Rückwirkung auf das Restsystem untersucht. Im Rahmen dieser Arbeit werden im Folgenden die modellbasierten In-the-Loop-Testmethoden vorgestellt. Diese lassen sich in fünf Methoden unterteilen: Model-in-the-Loop (MiL), Software-in-the-Loop (SiL), Processor-in-the-Loop (PiL), Rapid Control Prototyping (RCP) und Hardware-in-the-Loop (HiL). Bild 2-1 zeigt eine Übersicht, in der die Testmethoden über die Entwicklungszeit den entsprechenden Regelkreisen zugeordnet sind. Dabei wird zwischen den real vorliegenden Komponenten und den jeweiligen Modellen unterschieden.

Bei einer modellbasierten Entwicklung (Bild 1-2) wird zunächst das Streckenmodell zur Analyse des dynamischen Gesamtsystemverhaltens entwickelt. Um dieses Streckenmodell steuern und regeln zu können, wird parallel dazu ein Steuerungs- und Regelungsmodell erstellt, also ein Steuergerätemodell. Wird das Steuergerätemodell gegen das Streckenmodell getestet oder umgekehrt, dann handelt es sich um eine MiL-Simulation. Durch die immer spezifischer werdenden Anforderungen und die Festlegung von Komponenten werden beide Modelle kontinuierlich weiterentwickelt und immer konkreter. Im nächsten Schritt wird das Steuergerätemodell in Target-Code übersetzt. Der Test des Steuergerätemodells in Form

eines Target-Codes gegen das Streckenmodell wird als SiL-Simulation bezeichnet. Wird dieser Target-Code auf einem Evaluierungsboard ausgeführt und gegen das Streckenmodell getestet, so spricht man von einer PiL-Simulation.

Wenn das mechanische System mit den zugehörigen Aktoren und Sensoren zur Verfügung steht, kann dieses gegen das Steuergerätemodell getestet werden. Dies wird als Rapid Control Prototyping (RCP) System bezeichnet. Dabei wird primär der Steuer- und Regelalgorithmus am realen mechanischen System getestet. Im letzten Schritt wird das fertige Steuergerät (Hardware) gegen das Streckenmodell in einer HiL-Simulation getestet. Im Folgenden werden die einzelnen modellbasierten Testmethoden genauer vorgestellt.

2.1.1 Model-in-the-Loop

Die MiL-Simulation ist ein Verfahren in der Systementwurfsphase, welches sowohl bei der Modellbildung und Simulation als auch bei der domänenspezifischen Komponentenentwicklung angewendet wird. Eine allgemeine Definition einer MiL-Simulation ist schwierig, da diese im domänenspezifischen Entwurf unterschiedlich eingesetzt wird, jedoch mit dem gleichen Ziel: Simulationsgestützte Analyse und Entwicklung der Komponenten bzw. des Gesamtsystems. Für einen Software-Ingenieur wird dabei eine ausführbare Spezifikation (Funktionsmodell) in einer Simulation getestet. Dabei werden Ergebnisse der Simulation mit dem generierten Code verglichen, sodass Referenzergebnisse zur Verfügung stehen [WR06]. Als Funktionsmodell wird hier das Steuerungs- und Regelungsmodell bezeichnet. Die Ergebnisse dienen zur Überprüfung des generierten Target-Codes. Dies findet in einer SiL-Simulation statt.

Für einen Systementwicklungsingenieur, dies kann ein Mechatroniker oder ein Regelungstechniker sein, ist die MiL-Simulation ein wichtiges Werkzeug zur Systemanalyse und zur Reglerauslegung. Die MiL-Simulation steht für die klassische Funktionsentwicklung. Neue Funktionen werden in einem Modell simuliert, dies kann entweder die Logik oder das Bauteil sein, sodass diese bereits in einer sehr frühen Entwicklungsphase gefahrlos am Rechner untersucht werden können [Mar04].

Die MiL-Simulation findet in der Regel auf einem normalen PC statt, welcher keinen besonderen Anforderungen genügen muss. Die eingesetzte Softwareumgebung richtet sich dabei nach dem Anwendungszweck und unterliegt keinen speziellen Anforderungen. Sowohl aus der Sicht des Software-Ingenieurs als auch aus der des Mechatronikers bietet die Anwendung der MiL-Simulation alle Vorteile der modellbasierten Entwicklung. Neben den bereits zu Beginn des Kapitels erwähnten Vorteilen kommen die kürzere Entwicklungszeit, die Funktions- und die Parameteroptimierung, ausführliche Gesamtsystemanalysen, Systemverständ-

nis und Transparenz in der Entwicklung, Sensitivitäts- und Robustheitsanalysen, Erkennen von Fehlern und Problemen in einer frühen Entwicklungsphase, höhere Testabdeckung und damit auch eine höhere Qualität des Produkts hinzu.

2.1.2 Software-in-the-Loop

Die SiL-Simulation findet primär in der domänenspezifischen Komponententwicklung der Systementwurfphase statt. Bei einer SiL-Simulation wird der entwickelte Steuer- und Regelalgorithmus in Target-Code übersetzt und gegen das Streckenmodell getestet. Dadurch kann der geschlossene Regelkreis bereits in einer sehr frühen Phase der Entwicklung getestet und analysiert werden. Die SiL-Simulation erfordert keine reale Hardware. Dabei wird der Target-Code als ausführbare Datei oder als Quellcode in die Simulation mit dem Streckenmodell eingebunden, z. B. in *MATLAB/Simulink* als *S-Funktion* oder *dll-Datei*. Hier besteht die Möglichkeit den ganzen Steuergerätecode oder auch nur Teile davon gegen das Streckenmodell zu testen. Abhängig vom Simulationswerkzeug bedarf die Einbindung des Target-Codes weiterer Anpassungen bezüglich Variablen, Typisierung und des Wertebereichs. Um komplette Steuergeräteobjekte mittels SiL-Simulation testen zu können, bedarf es weiterer aufwendiger Anpassungen. So müssen die steuergerätespezifischen Funktionen, Task-Steuerungen und Unterschiede bezüglich Ganzzahl- und Fließkommaarithmetik speziell angepasst werden [Mar04].

Die SiL-Simulation bedarf keiner Echtzeithardware und kann auf dem PC stattfinden. In Abhängigkeit des Steuergeräteumfangs und des damit verbundenen Testumfangs sollte hierbei eine Automatisierung der SiL-Simulation in Betracht gezogen werden.

2.1.3 Processor-in-the-Loop

Nachdem der Target-Code erfolgreich in der SiL-Simulation getestet und die Funktion nachgewiesen wurde, folgt die PiL-Simulation. Dazu wird der Target-Code auf einem Evaluierungsboard mit einem typischen Steuergeräteprozessor gegen das Streckenmodell getestet. Dazu wird der erzeugte Code mit einem Target-Compiler übersetzt. Der Test der Steuergerätescodes auf einem Evaluierungsboard gegen das Streckenmodell wird als Processor-in-the-Loop-Simulation bezeichnet [WR06]. Dieses Verfahren wird ebenfalls in der domänenspezifischen Komponententwicklung der Systementwurfphase eingesetzt.

Der Aufbau einer PiL-Simulation unterliegt keinen festen Definitionen. Er ist abhängig vom Evaluierungsboard. Das Evaluierungsboard und der darauf befindliche Steuer- und Regelalgorithmus laufen in Echtzeit ab. In Abhängigkeit der Schnittstellen kann das Streckenmodell auf einem normalen PC ausgeführt

werden, welcher mit dem Evaluierungsboard verbunden ist. Abhängig von der Anwendung kann das Streckenmodell auch auf einem Echtzeitsystem ausgeführt werden.

2.1.4 Rapid Control Prototyping

Das Rapid Control Prototyping (RCP) findet in der letzten Phase des Systementwurfs statt, in der Prototypen aufgebaut bzw. einzelne Komponenten in Betrieb genommen werden. RCP ist eine effiziente Testmethode, um den entwickelten Steuer- und Regelalgorithmus am realen System zu überprüfen und weiterzuentwickeln. Dabei wird der Steuer- und Regelalgorithmus direkt auf ein Echtzeitsystem ausgeführt. Die Ressourcen des Echtzeitsystems und die Komplexität der Algorithmen müssen dabei aufeinander abgestimmt werden, um die Echtzeit garantieren zu können. In Abhängigkeit der Echtzeitsystemhardware sind in diesem Bus-Systeme, digitale und analoge I/O-Schnittstellen vorhanden. Dadurch entfällt die aufwendige Programmierung des Prozessorboards, bei der der Speicherüberlauf, die Task-Steuerungen und die Unterschiede bezüglich Ganzzahl- und Fließkommaarithmetik beachtet werden müssen.

Bei RCP-Systemen wird zwischen Fullpass- und Bypassing-Lösungen unterschieden. Bei einem Fullpass-System werden alle Sensoren und Aktoren über das Echtzeitsystem erfasst bzw. angesteuert. Das Bypassing ist ein effizienter Ansatz zur Optimierung und zur Entwicklung neuer Steuergeräte-Funktionen sowie bereits existierender Reglerfunktionen. Dabei werden Teilfunktionen des Steuergeräts auf das RCP-System ausgelagert, welches über eine Echtzeitschnittstelle zum Datenaustausch mit dem Steuergerät synchronisiert wird. Der Einsatz von RCP-Systemen erstreckt sich über die Entwicklung einzelner Reglerfunktionen in isolierten Steuergeräten auf Steuergeräte-Verbundnetzen, in welchen die gesamte Kommunikation getestet wird [WR06].

Der Einsatz von RCP ist aufgrund seiner vielen Vorteile etabliert und ein fester Bestandteil in der Entwicklung von Steuer- und Regelalgorithmen. Der Hauptvorteil eines RCP-Systems ist die einfache und schnelle Realisierung des bereits in der MiL-Simulation entwickelten Steuer- und Regelalgorithmus am realen System. Die Aktor- und Sensoranbindung erfolgt durch die vom Hersteller mitgelieferten Standard-Bibliotheken, sodass nicht für jeden neuen Aktor bzw. Sensor die Ansteuerung bzw. Auswertung neu programmiert werden muss. Während des Tests besteht die Möglichkeit zur Laufzeit das Systemverhalten zu visualisieren, zu analysieren und anzupassen. Durch die Anwendung des RCP wird der Entwicklungsprozess flexibler, schneller und standardisiert.

2.1.5 Hardware-in-the-Loop

Hardware-in-the-Loop (HiL) bezeichnet ein Verfahren in der Integrations- und Testphase eines Entwicklungsprozesses, bei dem eine oder mehrere reale Komponenten eines Gesamtsystems in einer Simulationsumgebung getestet werden. Dabei wird zwischen HiL-Komponententest und HiL-Systemtest unterschieden. Der HiL-Komponententest (Bild 2-2 a) findet in der Systemintegrationsphase statt. Dabei wird mindestens eine Hardware-Komponente an das Steuergerät angeschlossen. Die Übrigen werden im Streckenmodell simuliert. Dagegen liegen bei einem HiL-Systemtest (Bild 2-2 b) nur die Steuergeräte als reale Hardware vor. Diese werden gegen das Streckenmodell getestet. Der HiL-Systemtest findet nach der Systemintegrationsphase in der Systemtestphase statt.

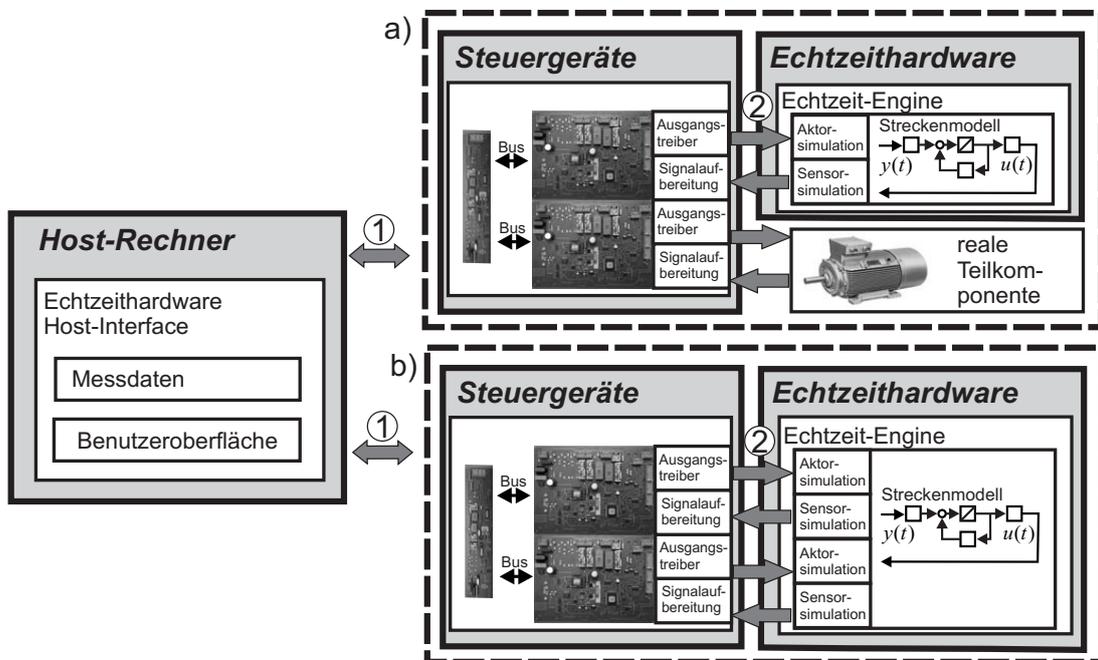


Bild 2-2: Grundaufbau einer HiL-Simulation; links ein HiL-Komponententest und rechts ein HiL-Systemtest

Eine HiL-Simulation besteht aus drei bis vier Grundkomponenten: Steuergerät, Echtzeithardware, Host-Rechner und eventuell reale Teilkomponente. Im Host-Rechner wird in der Regel der HiL-Test konfiguriert und gesteuert. Hier wird eine Benutzeroberfläche zur Simulationssteuerung und Visualisierung erstellt. Darüber hinaus werden hier die Messdaten nach der Simulation ausgewertet und abgespeichert. Die Schnittstelle zwischen der Echtzeithardware und dem Host-Rechner unterliegt keinen Echtzeitanforderungen. Dabei handelt es sich in der Regel um

eine TCP/IP-Ethernet-Verbindung (Bild 2-2 Punkt 1). Die wichtigste Komponente bei einer HiL-Simulation ist die Echtzeithardware, welche den Echtzeitbetrieb sicherstellen muss. Nach *DIN 44300* ist der Echtzeitbetrieb wie folgt definiert: „*Unter Echtzeitbetrieb versteht man den Betrieb eines Rechnersystems, bei dem Programme zur Verarbeitung anfallender Daten ständig betriebsbereit sind, derart, dass die Verarbeitungsergebnisse innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne verfügbar sind. Die Daten können je nach Anwendungsfall nach einer zufälligen zeitlichen Verteilung oder zu vorbestimmten Zeitpunkten auftreten*“ [DIN44300].

Auf der Echtzeithardware wird das Streckenmodell inklusive der Aktoren und Sensoren simuliert. Darüber hinaus befinden sich hier die unterschiedlichen I/O-Schnittstellen, welche im geschlossenen Regelkreis unter Echtzeitbedingungen mit dem Steuergerät kommunizieren (Bild 2-2 Punkt 2). Eine wichtige Voraussetzung für die HiL-Simulation ist ein echtzeitfähiges Streckenmodell. Dabei wird die Echtzeitfähigkeit des Modells in der Turnaround-Zeit angegeben, siehe dazu Abschnitt 2.2.2.

Sobald ein Echtzeitsystem die Berechnung in Echtzeit nicht mehr gewährleisten kann, wird die Simulation abgebrochen, weil die Grundbedingung für einen reproduzierbaren Test verletzt wird. Der Steuergerätestest mittels HiL-Simulation hat sich aufgrund seiner Vorteile in der Entwicklung mechatronischer Systeme etabliert. Der Einsatz einer HiL-Simulation bietet folgende Vorteile:

- reproduzierbare Tests,
- Fehlerinjektion zur Laufzeit,
- zerstörungsfreies Testen von Rand- und Extrembereichen,
- Test der Diagnosefunktionalität,
- Automatisierung von Testreihen,
- Erkennen von Fehlern in der Integrations- und Testphase,
- Standardisierung von Testreihen und
- höhere Testabdeckung und damit auch eine höhere Qualität des Produkts.

2.2 Modellbildung mechatronischer Systeme

Die Modellbildung mechatronischer Systeme kann in zwei Hauptfelder unterteilt werden: die experimentelle und die theoretische Modellbildung. Vollständigkeithalber sei an dieser Stelle angemerkt, dass zwischen theoretischen und experimentellen Modellen noch hybride Modelle existieren, siehe dazu [Ise08]. Die theoretische Modellbildung erfolgt auf Grundlage von Naturgesetzen. Solche Modelle werden auch als „*white-box model*“ bezeichnet. Im Gegensatz dazu wird bei

der experimentellen Modellbildung („*black-box model*“) nur das Ein- und Ausgangsverhalten abgebildet. Diese Form der Modellbildung kommt bei komplexen Systemen zum Einsatz, bei denen die inneren Systemgrößen nicht bekannt oder messbar sind. Für diese Systeme finden sich in der statischen Versuchsplanung und Auswertung (*Design of Experiments (DoE)*) fundierte Methoden und Verfahren ([SBH08, GK08, Ulr99]). Anhand dieser kann auf Grundlage von Versuchen das parameterabhängige Ein- und Ausgangsverhalten des Systems bestimmt werden. Diese Zusammenhänge werden in einer mathematischen Funktion abgebildet, welche nur für den Messbereich gültig ist. Diese Funktion berücksichtigt die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Parametern. Dabei wird nicht in physikalischen Größen gerechnet. Dies hat zur Folge, dass die physikalische Bedeutung verloren geht. Selbst bei kleinen Veränderungen, z. B. der Geometrieparameter, verliert das Modell seine Gültigkeit und ein neuer Versuchsplan zur Modellbildung muss durchgeführt und ausgewertet werden.

In dieser Arbeit wird die theoretische Modellbildung verwendet. Diese fördert das Prozessverständnis, da die Modelle auf physikalischen Grundlagen beruhen, sodass auf etablierte Methoden und Werkzeuge zur Systemanalyse zurückgegriffen werden kann. Ein weiterer Vorteil ist die Verwendung physikalischer Größen. Dadurch können Schnittstellen zu anderen Modellen realisiert werden, was bei mechatronischen Modellen besonders wichtig ist, weil sich diese aus mehreren Domänen zusammensetzen. Darüberhinaus lassen theoretische Modelle Extrapolationen und Erweiterungen zu. Im Folgenden wird zunächst das grundsätzliche Vorgehen bei der physikalischen Modellbildung beschrieben (Abschnitt 2.2.1). Anschließend wird im Hinblick auf die HiL-Simulation auf die notwendigen Eigenschaften echtzeitfähiger Modelle eingegangen (Abschnitt 2.2.2).

2.2.1 Modellbildung in der Mechatronik

Im Kontext mechatronischer Systeme versteht man unter einem Modell: Ein Abbild eines realen Gegenstands bzw. Systems, dies beinhaltet auch Originalgegenstände und Teilsysteme unter möglichst guter Beibehaltung der Eigenschaften, die für die jeweilige Aufgabenstellung von Bedeutung sind. Bei der Modellierung von mechatronischen Systemen gibt es kein allgemein gültiges Vorgehensmodell und keine Richtlinie. Stattdessen werden in der Literatur unterschiedlichste, durch die jeweilige Fachdisziplin geprägte Vorgehensweisen empfohlen, wie z. B. die Konstruktion [VDI2211, PB07] und die Mechatronik [Avg07]. Im Folgenden wird ein allgemeines Vorgehen zur Modellierung von mechatronischen Systemen nach TRÄCHTLER vorgestellt (Bild 2-3). Dieses Vorgehen zeigt übersichtlich die Entwicklung von domänenübergreifenden Modellen. Wie auch bei den anderen Vorgehensweisen hängt dieses Vorgehen von den Modellerierungs- und den Systemkenntnissen des Modellierers ab.

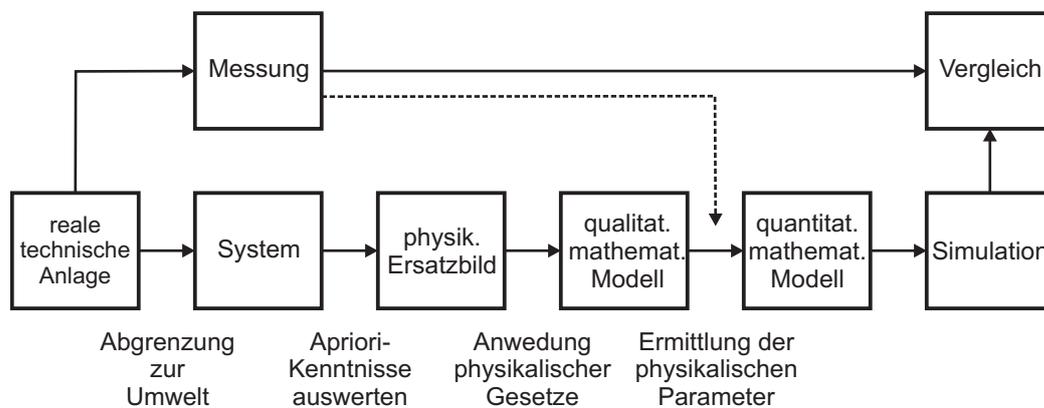


Bild 2-3: Vorgehen bei der Modellbildung in der Mechatronik, vergleiche [Trä12]

Zunächst gilt es, die zu modellierende, reale technische Anlage zu spezifizieren. Wenn die Anlage noch nicht existiert, so sollten die vorliegenden Spezifikationen verwendet werden.

System

Nachdem die zu modellierende technische Anlage festgelegt wurde, müssen die Systemschnittstellen gegenüber der Umwelt abgegrenzt werden. Dadurch wird nur noch der für die Aufgabe relevante Systemteil mit definierten Ein- und Ausgängen betrachtet. Ein System bezeichnet die DIN19226 als „[die] abgegrenzte Anordnung von aufeinander einwirkenden Gebilden, [diese werden] durch eine Hüllfläche von der Umgebung abgegrenzt. Durch die Hüllfläche werden Verbindungen des Systems mit seiner Umwelt geschnitten (Stoff-, Energie- und Informationsflüsse).“ Die Schnittstellen zur Umwelt sollten relevante Umgebungseinflüsse beinhalten. Bei der Abgrenzung und den Schnittstellen sollten die Modellvalidierungsmöglichkeiten berücksichtigt werden. Z. B. nur Effekte berücksichtigen die messbar sind und validiert oder identifiziert werden können.

Physikalisches Ersatzbild

Nachdem die Schnittstellen des Systems zur Umwelt klar definiert sind, beginnt die physikalische Modellbildung. Dazu werden zunächst die Apriori-Kenntnisse gesammelt, um die wesentlichen physikalischen Vorgänge zu beschreiben und das System zu analysieren. Bei komplexen Systemen wird durch das Aufbrechen des Systems in Teilsysteme die Komplexität reduziert. Dadurch sollen die inneren Zusammenhänge übersichtlich dargestellt werden. Um die Übersichtlichkeit trotz der hohen Komplexität zu erhalten, sollte das System geeignet strukturiert werden. Dabei wird in [Jan10] zwischen drei Strukturierungsprinzipien unterschieden.

- Qualitative Systemmodelle stellen die grundlegenden Zusammenhänge (Verhalten, Ablauf) durch klar abgegrenzte Subsysteme dar.
- Die Top-Down-Modellierung beginnt mit der Hauptfunktion und wird mit jeder Subebene detaillierter. Diese Modellierung lässt sich weiter in funktionsorientierte und objektorientierte Methoden unterteilen. Dieses Strukturierungsprinzip ist in der Informatik verbreitet.
- Die Funktionsorientierte Modellierung erfolgt anhand der Wirkflüsse und der Ein- und Ausgangsbeziehungen. Die Modelle aus der Regelungstechnik und Mechatronik werden nach diesem Prinzip strukturiert.

Abhängig von der Aufgabenstellung wird mit diesen Strukturierungsprinzipien ein physikalisches Ersatzbild aufgestellt. Dieses Ersatzbild sollte nach [Rod06] den folgenden drei Anforderungen genügen:

- Die Modellelemente sollten genau definiert, widerspruchsfrei und präzise beschrieben sein (physikalische Transparenz).
- Das Modellverhalten sollte im Rahmen des Modellzwecks (Gültigkeitsbereich) dem realen Systemverhalten entsprechen (Modellgültigkeit). Dies gilt insbesondere für die Schnittstellen der Subsysteme zueinander.
- Bestehen mehrere Möglichkeiten zur Systemdarstellung, welche den ersten beiden Forderungen genügen, so sollte die einfachste gewählt werden (Effizienz).

Ist das reale technische System für den Anwendungszweck physikalisch hinreichend genau modelliert, erfolgt der nächste Schritt.

Qualitatives mathematisches Modell

Bei diesem Schritt wird aus dem physikalischen Ersatzbild ein qualitatives mathematisches Modell abgeleitet. Dabei werden die wesentlichen Effekte und Zusammenhänge aus dem physikalischen Ersatzbild den jeweiligen physikalischen Grundgesetzen zugeordnet und mit diesen beschrieben. Solche Grundgesetze sind z. B.:

- Newtonsche Axiome,
- Ohmsches Gesetz und
- Hauptsätze der Thermodynamik.

Mittels dieser lassen sich unterschiedliche Arten von mathematischen Modellen aufstellen:

- Gewöhnliche Differentialgleichungen (linear/nichtlinear, zeitinvariant, zeitvariant),

- Übertragungsfunktion / Frequenzgang (nur für lineare, zeitinvariante Systeme),
- Differenzgleichungen (zeitdiskrete Systeme, Totzeitglied),
- Algebraische Gleichungen, Kennlinien, Kennfelder,
- Partielle Differentialgleichungen (Systeme mit örtlich verteilten Parametern) und
- Deskriptorsysteme (Differential-algebraische-Systeme).

Quantitatives mathematisches Modell

Nachdem ein qualitatives mathematisches Modell vorliegt, gilt es dieses zu parametrieren. Die Parametrierung des Modells erfolgt durch eine geeignete Bestimmung der physikalischen Parameter. Die Parameterbestimmung kann durch Messungen, Literaturrecherche und Teilmodellierung in speziellen Tools erfolgen. Der gestrichelte Pfeil in Bild 2-3 zeigt, dass unbekannte Parameter anhand von Messungen identifiziert werden können. Dieses quantitative Modell soll im nächsten Schritt in einer geeigneten Softwareumgebung simuliert werden.

Simulation

Zur Simulation mechatronischer Systeme stehen diverse Softwarewerkzeuge zur Verfügung. Die unterschiedlichen Werkzeuge können auch zu einer unterschiedlichen Darstellung der Systemgleichungen führen (DAE-System oder Zustandsmodell). Darüber hinaus setzen die Werkzeuge unterschiedliches Wissen des Modellierers voraus. Bild 2-4 zeigt eine unvollständige Übersicht kommerzieller Softwarewerkzeuge zur Multidomänenmodellierung von mechatronischen Systemen auf Basis von Verhaltensbeschreibungen.

Dabei geht [Jan10] von einer Systembetrachtung mit konzentrierten Systemelementen und allgemeingültigen Energieerhaltungssätzen aus. Als konzentrierte Systemelemente sind einzelne Subsysteme/Objekte gemeint, welche örtlich und funktionell abgegrenzt sind und sich über ihre Schnittstellen mit anderen Elementen austauschen. Anhand dieser Elemente erfolgt die Modellbildung und die damit verbundene Simulation auf zwei unterschiedlichen Wegen: der energiebasierten und der mehrpolbasierten Modellbildung. Beide Ansätze berücksichtigen die rückwirkungsbehafteten Interaktionen zwischen den Teilsystemen auf unterschiedliche Arten.

Bei der energiebasierten Modellierung werden skalare Energiefunktionen mittels Lagrange-Formalismus oder Hamilton Gleichungen aufgestellt und mittels CAE Computeralgebra wie z. B. Mathematica oder Maple modelliert. Im Rahmen dieser Arbeit wird der mehrpolbasierte Ansatz verwendet, auf den im Folgenden

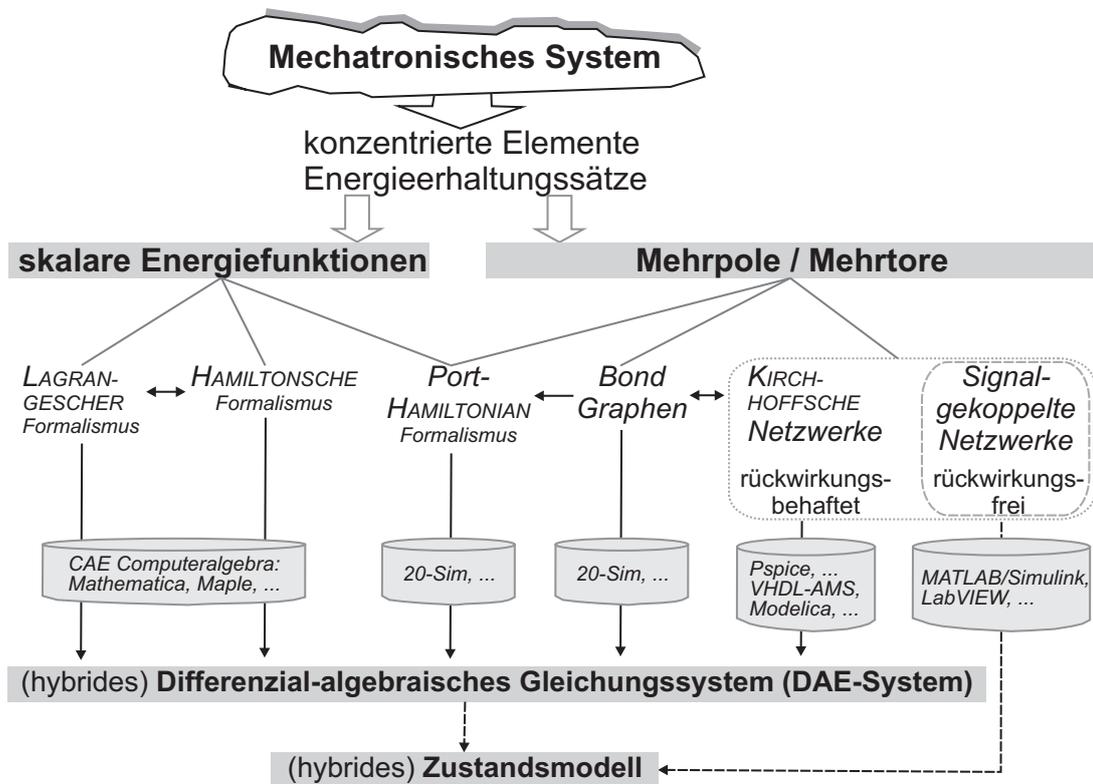


Bild 2-4: Kommerzielle Softwarewerkzeuge für die Multidomänenmodellierung von mechatronischen Systemen auf Basis von Verhaltensbeschreibungen [Jan10]

näher eingegangen wird. Die mehrpolbasierte Modellbildung nutzt komponentenbasierte Systemmodelle mit leistungserhaltenden Verschaltungsgesetzen wie die kirchhoffschen Netzwerke und Bondgraphen. Die kirchhoffschen Netzwerke sind rückwirkungsbehaftet (ungerichtet), bekannte Softwarewerkzeuge sind dafür: *Pspice*, *VHDL-AMS* und *Modelica*. JANSCHKE zählt die rückwirkungsfreien (gerichteten) signalgekoppelten Netzwerke ebenfalls zu den Mehrpolmodellen, bekannte Softwarewerkzeuge dafür sind *MATLAB/Simulink* und *LabVIEW*).

Beide Wege erzeugen mittels unterschiedlicher Modellierungswerkzeuge ein Differenzialalgebraisches Gleichungssystem (DAE-System) bzw. ein Zustandsmodell. Dieses Modell wird auf dem Simulationsrechner ausgeführt. In Abhängigkeit des eingesetzten Softwarewerkzeugs, der Systemkenntnis und des Modellzwecks kann das Softwarewerkzeug beim Aufstellen des qualitativen oder des quantitativen mathematischen Modells eingesetzt werden.

Mit der Simulation beginnt die Modellanalyse. In der Modellanalyse wird das Modell zunächst verifiziert, d. h. formal überprüft, ob die Implementierung mit den

Spezifikationen übereinstimmt. Dabei wird das Modell hinsichtlich seiner mathematischen Korrektheit, der Startbedingung, der Endwerte und der Plausibilität überprüft. Bei der Modellanalyse findet immer eine kritische Betrachtung der während der Modellbildung getroffenen Annahmen statt. Wurde das Modell erfolgreich verifiziert, beginnt die Validierung.

Vergleich mit der Messung (Validierung)

Im letzten Schritt, der auch als Validierung bezeichnet wird, werden die Simulationsergebnisse mit aufgenommenen Messreihen verglichen, also validiert. Dabei wird verglichen, ob die wesentlichen Effekte richtig erfasst werden und inwieweit das Modell das tatsächliche System abbildet. Dadurch findet eine Absicherung der Eigenschaften statt. Entspricht die Modellgenauigkeit nicht den Anforderungen, muss der Modellbildungsprozess hinsichtlich der Abweichungen kritisch analysiert werden.

Mit der Modellvalidierung endet die Modellbildung. Es steht nun ein physikalisches Modell mit den für die Aufgabenstellung erforderlichen Eigenschaften zur Verfügung.

2.2.2 Echtzeitfähige Modelle

In diesem Abschnitt wird auf die Echtzeiteigenschaften von mechatronischen Modellen eingegangen. Zunächst wird die wichtigste Kenngröße zur Beurteilung der Echtzeitfähigkeit von Modellen vorgestellt: die Turnaround-Zeit. Anschließend wird auf die konstante Berechnungszeit eingegangen, welche eine essenzielle Eigenschaft von echtzeitfähigen Modellen darstellt. Darüber hinaus werden Ansätze vorgestellt, wie die Simulationszeit von Modellen unter Beibehaltung ihrer Eigenschaften durch Modellordnungsreduktion beschleunigt werden kann.

Turnaround-Zeit

Die Turnaround-Zeit ist eine wichtige Kennzahl zur Beurteilung der Echtzeitfähigkeit von Modellen auf der Echtzeithardware. Diese gibt an, wie lange ein Programm oder eine Anfrage vom Beginn der Verarbeitung bis zum Ende benötigt. Die Antwortzeit ist die Zeit, die vom Absetzen eines Kommandos bis zum Eintreffen des Ergebnisses verstreicht [Wäl09]. Damit ist die Turnaround-Zeit eine hardwarespezifische Kennzahl zur Beurteilung der Echtzeitfähigkeit von Simulationsmodellen und kann damit nicht allgemein angegeben werden. Die Ermittlung der Turnaround-Zeit kann entweder mittels der Herstellersoftware erfolgen oder aus den Tast-Logfiles der Echtzeithardware bestimmt werden. Alternativ kann die Modellechtzeitfähigkeit auch grob geschätzt werden. Zur Schätzung wird die

CPU-Auslastung der Echtzeithardware ausgewertet. Wenn diese während der gesamten Simulationszeit unter 66 % liegt, dann kann von einer sicheren Einhaltung der Echtzeit ausgegangen werden. Neben der Hardware hängt die Turnaround-Zeit vom Modell ab. Dabei sind Modellierungstiefe und Modellierungsart entscheidend. Diese hängen von der Anzahl der Zustände und der Rechenoperationen sowie der Eigenfrequenzen, der Nichtlinearitäten, der Integratoren, der Zeitkonstanten und von der Umsetzung ab.

Begrenzte Berechnungszeit

Die begrenzte Berechnungszeit ist ein wichtiges Merkmal von echtzeitfähigen Modellen. Im Wesentlichen bedeutet es, dass iterative Algorithmen vermieden werden sollen, da diese die Berechnungszeit unbestimmt verlängern können. Wenn diese nicht vermieden werden können, so sollten sie effizient umgesetzt und die Iterationsschritte begrenzt werden, um die Echtzeitfähigkeit der Modelle zu gewährleisten. Häufig können die iterativen Algorithmen durch Kennfelder und Kurven ersetzt werden, wie z. B. die kontaktabhängigen Reibungskräfte. Bereits bei der Modellierung sollte ein Integrator mit einer festen Schrittweite verwendet werden, um die Rechenzeit und Simulationsergebnisse besser beurteilen zu können.

Bei der Modellbildung sollten algebraische Schleifen ebenfalls vermieden werden. Diese können nicht auf einem Echtzeitsystem gelöst werden. Eine algebraische Schleife stellt ein Gleichungssystem dar, welches vor der Integration gelöst werden muss. Die meisten Modellierungssprachen beherrschen dies. Sobald jedoch das Modell zu Target-Code abgeleitet wird, steht diese Funktion nicht mehr zur Verfügung und das Modell kann nicht mehr simuliert werden. Abschließend sei noch auf die Modellvereinfachung durch die Modellreduktion hingewiesen. Die Anwendung dieser Verfahren zur Erzeugung echtzeitfähiger Modelle wurde bislang noch wenig untersucht, wird aber mit der zunehmend anspruchsvolleren Modellbildung immer interessanter. Für eine genaue Beschreibung der Methoden und Verfahren sei an dieser Stelle auf folgende Fachliteratur verwiesen [Ant05, Krü13].

2.3 Der Waschprozess

Die Modellierung des Waschautomaten mit dem Waschprozess bildet den Kern dieser Arbeit, deshalb wird in diesem Abschnitt der Grundaufbau und die damit verbundenen notwendigen Prozessgrundlagen vorgestellt. Der Waschprozess wurde bislang noch in keiner bekannten Arbeit als durchgängiger Prozess beschrieben. Zu Beginn wird der Aufbau des Waschautomaten des Industriepartners mit den wichtigsten Bauteilen vorgestellt (Abschnitt 2.3.1). Darauf aufbauend wird der Waschprozess in drei Phasen strukturiert und allgemeingültig beschrieben (Abschnitt 2.3.2). Im Anschluss werden in Abschnitt 2.3.3 die etablierten Begriffe und

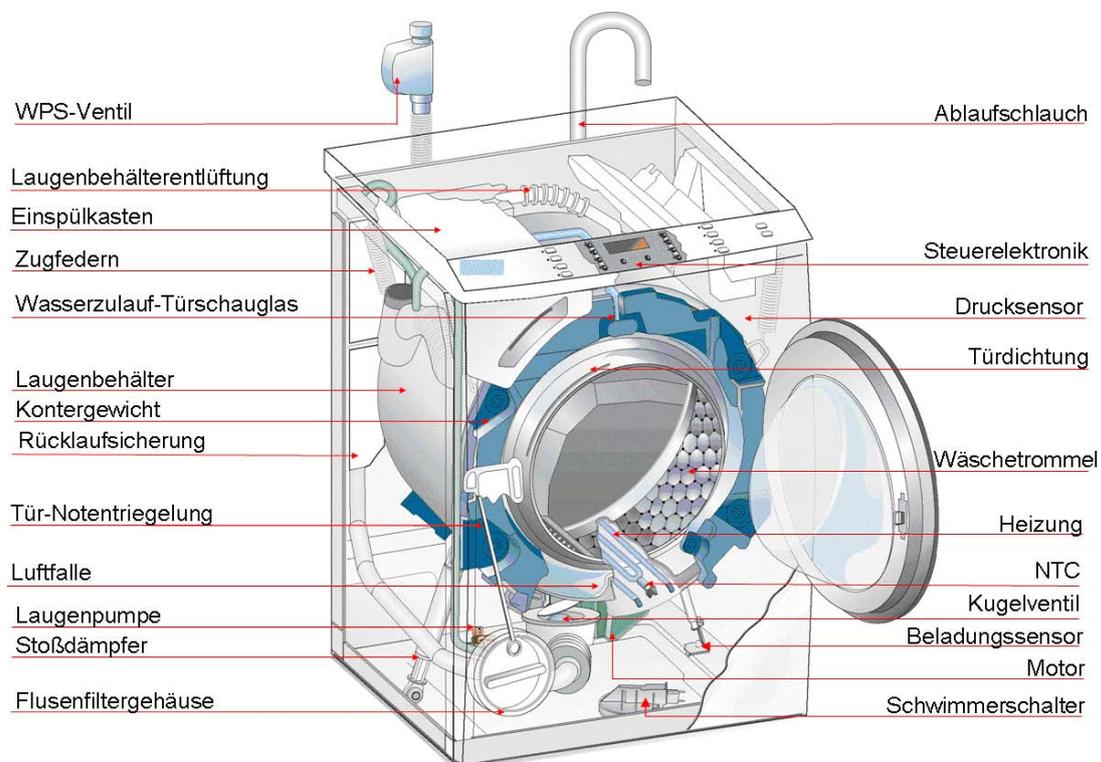


Bild 2-5: Übersicht der Bauelemente

Definitionen der Hausgeräteindustrie erläutert. Abschließend werden im letzten Abschnitt 2.3.4 die verwandten Arbeiten bzw. die bereits vorhandenen Modelle vorgestellt.

2.3.1 Aufbau eines Waschautomaten

Der hier betrachtete Waschautomat, siehe Bild 2-5, wird in Rahmenbauweise hergestellt. Im Rahmen wird das Aggregat über Federn und Stoßdämpfer eingehängt, sodass die nötige Schwingfreiheit beim Durchlaufen der Resonanzdrehzahlen gewährleistet wird. Das schwingende Aggregat besteht aus dem Laugenbehälter, der Waschtrommel, dem Lagerkreuz, den Kontergewichten und dem Motor. Über den Türdichtring, dem Faltenbalg, wird der Laugenbehälter mit der Front verbunden. Um den Schwerpunkt des schwingenden Aggregates in die Nähe seines geometrischen Mittelpunktes zu legen, wird das schwingende Aggregat mit Kontergewichten (Gusseisengewichte) versehen. Ein weiterer Effekt dieser Kontergewichte ist die Erhöhung der Masse des schwingenden Aggregates und damit der Unwuchtaufnahme des Waschautomaten. Über das Lagerkreuz wird die Waschtrommel in den Laugenbehälter eingebaut. Die Waschtrommel hat einen stabilen Zapfen, der

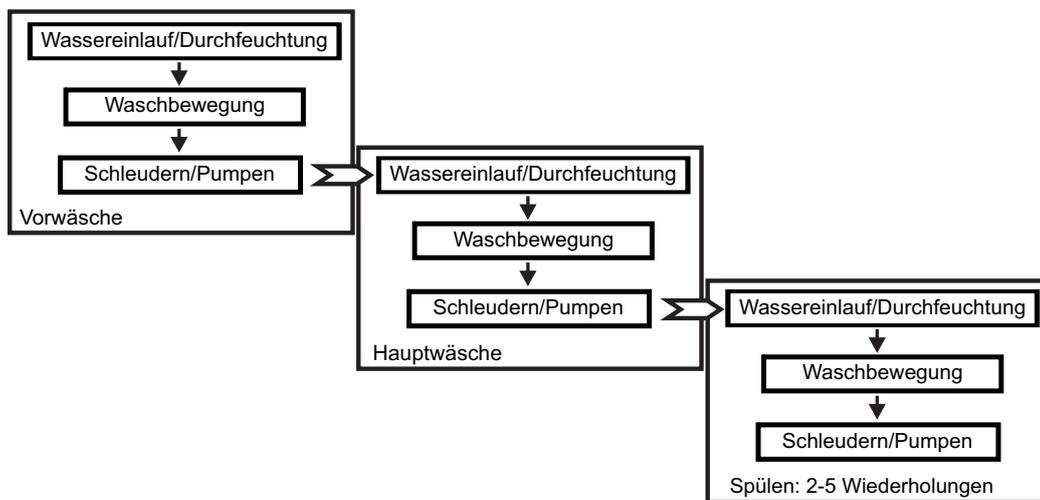


Bild 2-6: Drei Phasen des Waschprozesses: Vorwäsche, Hauptwäsche und Spülen

sich in den Lagern des Lagerkreuzes dreht. Auf diesem Zapfen sitzt das Antriebsrad, das über einen Riemen mit dem Motor verbunden ist, welcher sich unter dem Laugenbehälter befindet. Ein Steuergerät regelt den Motor, sodass während eines Waschvorganges die benötigten Drehzahlen realisiert werden. Die Waschtrommel aus Edelstahl ist gelocht und hat innenliegend drei Schöpfrippen, welche die Beladung anheben und wieder fallen lassen und sie so durch die Waschlauge oder das Spülwasser bewegen, um auf diesem Wege die mechanische Energie für den Waschvorgang bereitzustellen [Tem02].

Der Rohrheizkörper ist im Laugenbehälter unter der Waschtrommel angebracht. Unter dem Laugenbehälter befindet sich eine kleine Pumpe, welche die Aufgabe hat, das Laugengemisch aus dem Laugenbehälter in das Abwassersystem zu befördern. Darüber hinaus sind im Waschautomaten mehrere Schläuche und Ventile verbaut, welche über das Steuergerät (Steuerleistungsteil) geregelt und gesteuert werden, siehe auch 4.3.1.

2.3.2 Prozessbeschreibung

Der Waschprozess gliedert sich in die drei Phasen: Vorwäsche, Hauptwäsche und Spülen, die je nach Waschprogramm hintereinander geschaltet werden. Jede Phase besteht aus drei sich wiederholenden Unterprozessen: dem Wassereinlauf mit der Durchfeuchtung, dem Waschprozess und dem abschließenden Schleudern mit dem Abpumpen. Das Bild 2-6 zeigt die modulare Struktur des Waschprozesses. Jede Waschphase beginnt mit dem Wassereinlauf, wobei das Wasser in den Laugenbehälter und in die Beladung gelangt. Über unterschiedliche Wasserwege besteht für den Benutzer die Möglichkeit, Waschsubstanzen (Waschmittel, Blei-

che, Stärke und Weichspüler) dem Waschprozess zuzuführen. Die Wassermenge, die in die Maschine einläuft, ist vom Programm, der Beladungsmenge und der Beladungsart abhängig. Sobald ein Mindestfüllniveau erreicht wird, startet der Aufheizvorgang. Nimmt die Beladung kein weiteres Wasser mehr auf, so gilt der Wassereinlauf als abgeschlossen. Die Heizung bringt das eingelaufene Wasser auf die programmspezifische Temperatur. Sobald diese Temperatur erreicht ist, wird die Heizung abgestellt. Durch das Zusammenwirken der Waschsubstanzen, der Waschmechanik, der Einwirkzeit und der Temperatur wird die Beladung gereinigt. Ist der Waschvorgang abgeschlossen, wird kurz zwischengeschleudert und abgepumpt.

Nach dem Waschprozess müssen die Waschsubstanzen und der gelöste Schmutz aus der Beladung entfernt werden. Dies erfolgt in mehreren Spülgängen. Zwischen den Spülvorgängen findet ein Zwischenschleudern statt. Dadurch werden Rückstände in der Beladung reduziert, sodass nach jedem Spülprozess die Laugenkonzentration sinkt. Mit dem Endschleudern endet das Spülen und damit der Waschprozess. Im Endschleudergang wird auf mechanischem Weg möglichst viel Laugen-Wassergemisch aus der Beladung getrieben, um dafür zu sorgen, dass die Textilbeladung schnell trocknet. Während des Schleuderns wird das ausgeschleuderte Gemisch abgepumpt. In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Phasen detaillierter beschrieben.

Wassereinlauf/Durchfeuchtung

Jede Programmphase beginnt mit dem Wassereinlauf und dem Durchfeuchten der Beladung. Ziel ist es, die benötigte Wassermenge und die Waschsubstanzen in den Prozess zu bringen. Das Wasser gelangt über zwei unterschiedliche Wege in den Trommelbehälter: über das Türschauglas und durch den Spülkasten. Im Spülkasten verbindet sich das Wasser mit der Waschsubstanz und fließt weiter in den Laugenbehälter. Aus dem Laugenbehälter gelangt das Gemisch in die Waschtrommel und die Beladung. Der andere Wasserweg führt am Spülkasten vorbei, über eine Düse oberhalb des Schauglases, direkt in die Waschtrommel und damit auf die Beladung. Programmphasenabhängig fließt das Wasser über unterschiedliche Einlaufwege in den Laugenbehälter und die Waschtrommel. Das Bild 2-7 zeigt die unterschiedlichen Einlaufwege sowie die beteiligten Komponenten Spülkasten, Motor, Heizung, Laugenbehälter und Waschtrommel.

Beim Wassereinlauf besteht immer ein Zielkonflikt zwischen Wasserverbrauch und Waschkdauer. Zur Minimierung der Waschkdauer muss der Sättigungspunkt der Beladung mit Wasser in kürzester Zeit erreicht werden, z. B. durch die Beigabe von reichlich Wasser; dabei soll aber nicht mehr Wasser aufgewendet werden als nötig (dies ließe sich durch geringe Wasserzufuhr und häufiges Überprüfen der Sättigung erreichen). Um diesen Zielkonflikt zu lösen, wird der Wassereinlauf

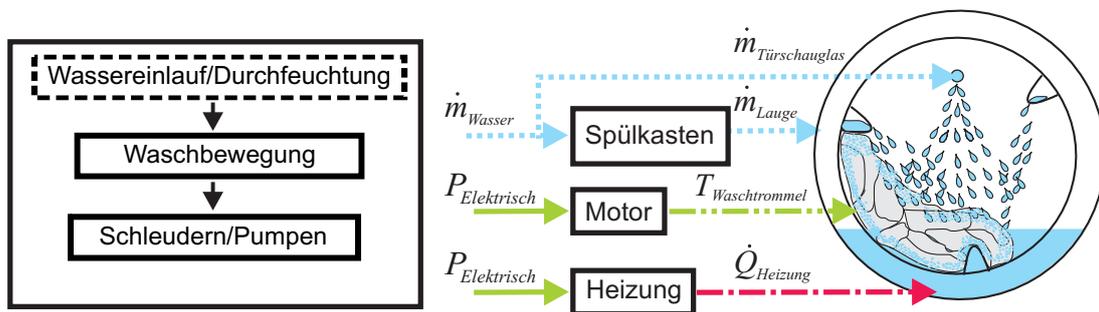


Bild 2-7: Wassereinfluss und Durchfeuchtung im Waschprozess

programmabhängig in zwei bis vier Wasserzulaufe mit anschließenden Saugphasen eingeteilt. Der Wassereinfluss kann über die Wassermenge, die Einlaufzeit, das Wasserstands-niveau im Laugenbehälter oder über die intelligente Wasserzulaufsteuerung¹ geregelt werden. Im Folgenden wird exemplarisch der niveaugesteuerte Wassereinfluss vorgestellt.

Das Bild 2-8 zeigt exemplarisch den niveaugesteuerten Wasserzulauf. Dabei stellt die schwarze Linie den Wasserstand im Laugenbehälter dar und die gestrichelte Linie den Einlaufvolumenstrom in den jeweiligen Wassereinflussphasen. Zu Beginn des Wasserzulaufs wird der Laugenbehälter bis auf einen definierten Wasserstandspegel, Hinschaltpunkt (HSP 1), gefüllt. Nach diesem ersten Zulauf sinkt der Wasserstand durch das Saugverhalten der Beladung, bis er einen vordefinierten Wasserstand, Rückschaltpunkt (RSP 1), erreicht. Damit beginnt die zweite Wasserzulaufphase. Es fließt neues Wasser in den Laugenbehälter bis der HSP 2 erreicht wird. Der Wechsel zwischen Wassereinfluss und Saugzeit endet, wenn die Beladung an Wasser gesättigt ist und der Rückschaltpunkt nicht mehr erreicht wird.

Im Waschprogramm sind für jeden einzelnen Zulauf der maximale Hinschaltpunkt und der minimale Rückschaltpunkt festgelegt. Der eigentliche Hinschaltpunkt muss nicht unbedingt erreicht werden; beim Überschreiten einer bestimmten Zeit oder Wassermenge kann der Wasserzulauf vorzeitig beendet werden. Wie stark der Wasserstand fällt, ist u. a. abhängig von der Beladungsart, der Beladungsmenge und der gebundenen Wassermenge in der Beladung. Die Saugfähigkeit, siehe Abschnitt 2.3.3, und die Menge eines Beladungspostens bestimmen dessen

¹Die modernen Waschautomaten verfügen über eine intelligente Wassereinflusssteuerung, welche aus der Wassermenge, der Einlaufzeit, dem Wasserstands-niveau im Laugenbehälter und dem Saugverhalten der Beladung die optimale Wassermenge für den Waschprozess berechnet.

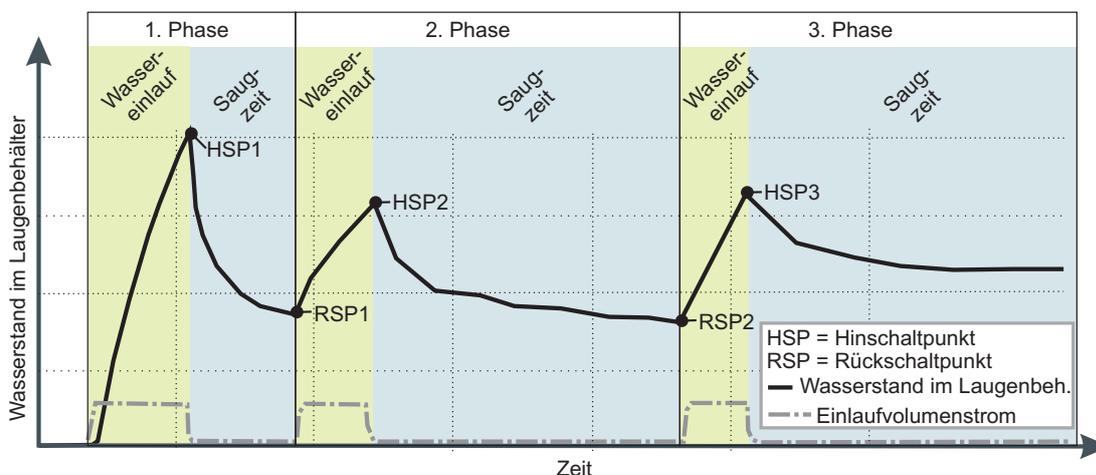


Bild 2-8: Niveaugesteuerter Wassereinlauf in den Laugenbehälter

Sauggeschwindigkeit². So kann die Steuerung über den Wassereinlauf die Menge und die Art der Beladung abschätzen und das Programm danach ausrichten.

Beispiel: Fällt der Wasserstand von Beginn an sehr langsam und wird insgesamt nur eine kleine Menge Wasser aufgenommen, so wird die Beladung klein und wenig saugfähig sein. Eine große und saugfähige Beladung liegt vor, wenn der Wasserstand sehr schnell wieder abfällt und eine große Menge Wasser aufgenommen wird. Diese Bestimmung der Beladungsart wird problematisch, wenn der Benutzer schon nasse Beladung in die Maschine füllt. Auch hier wird nur noch wenig und langsam Wasser aufgenommen; trotzdem könnte sehr viel Beladung in der Maschine sein.

Nachtanken: Sobald während der Laufzeit ein gewisser Wasserstand im Laugenbehälter unterschritten wird, findet ein Nachtanken statt. Durch die Wasserzufuhr sinkt die Temperatur im Laugenbehälter ab, sodass nachgeheizt werden muss. Damit entwickelt sich der Wassernachlauf zu einer Störgröße. Die Temperaturkurve ändert sich in Abhängigkeit der eingelaufenen Wassertemperatur. Das Nachtanken kann sich verzögern, wenn die Beladungsteile in der Mitte, z. B. bei der Einlaufphase nicht genug Wasser bekommen, da um sie herum Beladungsposten gelagert sind, die Wasser nur schlecht durchlassen.

Die Durchfeuchtungsphase wird durch die Waschtrommeldrehung unterstützt. Diese dreht immer in einem bestimmten Rhythmus. Programmphasenabhängig kann die Heizung nach einer bestimmten Zeit eingeschaltet werden, um die Laugentemperatur im Laugenbehälter zu erhöhen. Die Heizung kann erst ab einem

²Aus der gesaugten Wassermenge pro Zeitintervall lässt sich eine mittlere spezifische Saugfähigkeit für jeden Beladungsposten bestimmen, d. h. eine hohe Sauggeschwindigkeit entspricht einer großen Saugfähigkeit oder einer hohen Beladung.

definierten Mindestwasserstand eingeschaltet werden, damit ein Trockenheizen und damit eine Zerstörung der Heizung verhindert wird.

Waschbewegung

In der Waschbewegungsphase soll der Schmutz möglichst schonend von der Beladung gelöst werden. Dabei findet durch die Drehbewegung der Waschtrommel eine kontinuierliche Durchmischung der Beladung und des Laugengemisches statt. Die Waschtrommelrotation bewirkt ein Anheben der Beladungsstücke, das durch die Mitnehmerrippen noch unterstützt wird. Die Beladung fällt ab einer bestimmten Höhe in der Trommel auf einer schrägen Bahn wieder nach unten zurück und kollidiert dabei mit anderen Beladungsstücken, der Waschtrommelwand oder taucht in die Waschlauge ein. Über die Drehbewegung der Waschtrommel wird der Beladung kinetische Energie zugeführt.

In Bild 2-9 werden die in der Waschbewegungsphase beteiligten Komponenten dargestellt: der Motor, die Heizung, der Laugenbehälter und die Waschtrommel. Während der Durchmischung erwärmt die Heizung das Laugengemisch. Der Wärmestrom \dot{Q}_{Heizung} wird dabei von der Heizung direkt auf das Laugengemisch in dem Laugenbehälter übertragen und erwärmt dieses. Über die Durchmischung im Prozess wird diese Wärme auf die Beladung übertragen. Die Wärme aktiviert bestimmte chemische Verbindungen der Waschsubstanz, welche u. a. zur Schmutzlösung aus der Beladung notwendig sind.

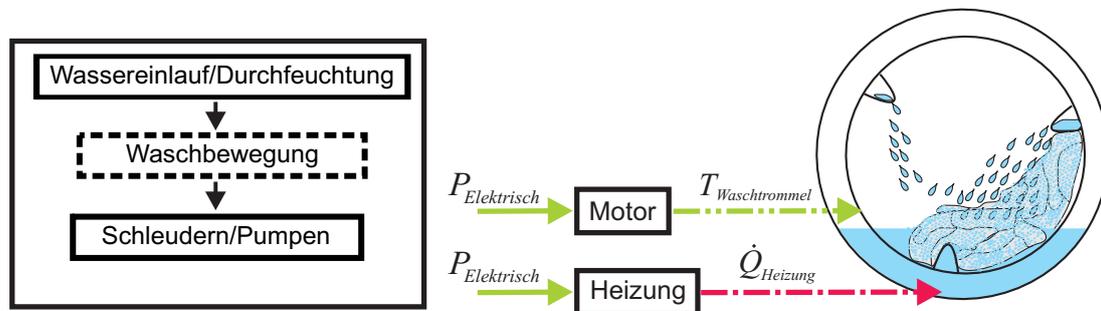


Bild 2-9: Die Waschbewegung im Waschprozess

Um für die verschiedenen Beladungsarten ein gutes Waschergebnis bei optimaler Wäscheschonung zu erzielen, variieren in den einzelnen Programmen die Geschwindigkeit und die Häufigkeit der Waschtrommeldrehung. So dreht sich die Waschtrommel in Programmen für empfindliche Textilien, z. B. Seide, langsamer als im Programm Koch-/Buntwäsche. Dabei werden über verschiedene Waschparameter unterschiedliche Einflüsse auf den Wäscheverschleiß und die Waschwirkung eingestellt. Der Wäscheablösepunkt von der Waschtrommel mit der damit

verbundenen Stauchung bzw. Streckung des Textils ist z. B. ein solcher Parameter. Die Trommelbewegung verursacht ebenfalls eine Durchströmung der Beladung, welche zu einer verbesserten Schmutzlösung oder zu einem höheren Verschleiß der Beladung führen kann. Der Wasserstand und die Beladungsmenge sind ebenfalls entscheidend für die Waschwirkung. Ein hoher Wasserstand verbessert die Durchmischung. Bei sehr kleinen Beladungen erfolgt die Waschmechanik weitestgehend über das Heben und Fallen der Wäsche. Bei Teilbeladungen kommt die Bewegung der Beladungsstücke untereinander positiv hinzu, weil diese mehr Platz haben. Bei sehr hohen Beladungen reduziert sich die Waschmechanik aufgrund des fehlenden Platzes für den freien Fall der Wäschestücke und der damit reduzierten Stauchung bzw. Streckung. Diese Einstellungen sind programmspezifisch und haben maßgeblichen Einfluss auf das Waschergebnis und die Wäscheschonung.

Der Ablauf in der Waschbewegungsphase ist zwar in der Vorwäsche, der Hauptwäsche und dem Spülen ähnlich, dennoch gibt es dort unterschiedliche Ziele. Grobe Oberflächenverschmutzungen sollen in der **Vorwäsche** gelöst werden. In der **Hauptwäsche** werden die übrigen Verschmutzungen gelöst. Dazu kommen noch eine eventuelle chemische Desinfektion (40 °C) und eine thermische Desinfektion (> 85 °C). Abhängig vom angewählten Programm findet in der Hauptwäsche der Aufheizvorgang in zwei Stufen statt. In der ersten Stufe wird auf 40 °C geheizt, um die Enzyme im Waschmittel zu aktivieren. Erst danach erfolgt die Erwärmung auf „Anwahltemperatur.“ Der Aufheizvorgang in dieser Phase kann relativ lang sein und wird eventuell mit Nachheizzyklen versehen, um die eingestellte Temperatur konstant zu halten. Beim **Spülen** werden die Waschsubstanzzrückstände und der Schmutz aus der Wäsche entfernt. Die Menge der Restsubstanzen hängt von mehreren Faktoren ab: der Menge der beladenen Wäsche, der Menge und der Konzentration des Waschmittels, der Faserzusammensetzung und dem Waschprogramm. Weiter kann auch die Art des Schmutzes dabei eine Rolle spielen. Wenn der pH-Wert auf ein neutrales Niveau (ca. *pH* 7) sinkt, dann wurden die Waschsubstanzzreste weitestgehend aus der Wäsche entfernt.

Schleudern/Pumpen

Im Schleudergang wird auf mechanischem Weg möglichst viel Wasser und Waschlauge aus der Wäsche getrieben und aus dem Waschautomaten abgepumpt. Um eine möglichst geringe Restfeuchte zu erzielen, sind hohe Schleuderdrehzahlen erforderlich. Diese führen in Verbindung mit entstehenden Unwuchten zu einer Belastung der Bauteile. Zur Minimierung der mechanischen Belastung der Bauteile findet eine Unwuchtsensierung statt. Hat die Unwuchtsensierung eine Unwucht erkannt, welche die zulässige Grenze überschreitet, so wird versucht die Wäsche zu lockern und neu zu verteilen. Falls dies nicht gelingt, wird das Schleuderprogramm variiert, um die Belastungen der Bauteile zu begrenzen. Beim Schleu-

dern/Pumpen sind folgende Komponenten beteiligt: Motor, Waschtrommel, Laugenbehälter und Pumpe, siehe Bild 2-10. Mit der Zeit und der Drehzahl ändert sich die Restfeuchte in Abhängigkeit von Wäschemenge, Wäscheart, Lochfläche und Geometrie der Waschtrommel.

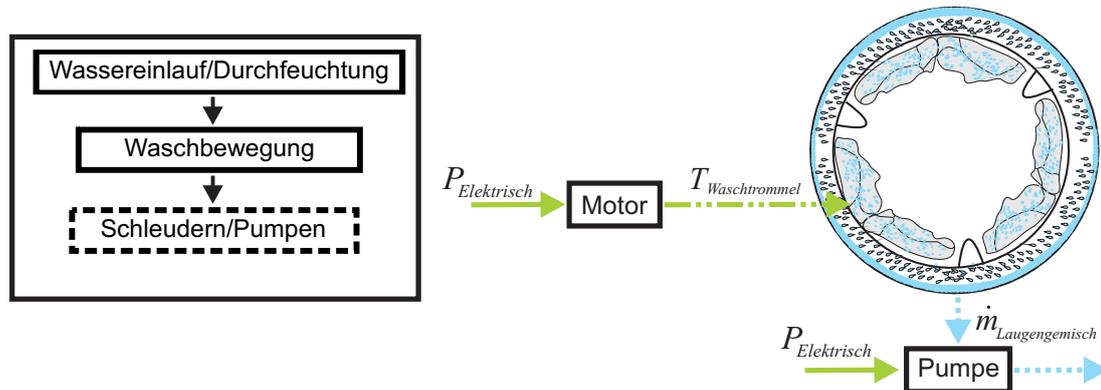


Bild 2-10: Schleudern und Abpumpen im Waschprozess

Zu Beginn des Schleudergangs wird immer ein charakteristischer Drehrhythmus ausgeführt. Dabei wird die Wäsche immer wieder gelockert. Nachdem die Beladung durch das Reversieren gleichmäßig gelockert wurde, beginnt der Hochlauf. Beim Hochlauf wird die Waschtrommel nur noch in eine Richtung gedreht. Zunächst wird die Drehzahl gleichmäßig erhöht, um die Wäschestücke möglichst gleichmäßig zu verteilen. Beim Verteilen wird über mehrere Sensoren die vorliegende Unwucht bestimmt und entschieden, ob neu verteilt wird oder welches Schleuderprofil abgefahren wird.

Während des Hochschleuderns ist die Pumpe immer eingeschaltet. Beim Verteilen der Wäsche wird die Pumpe erst ab einem bestimmten Wasserstand im Laugenbehälter eingeschaltet. Nach Beendigung des Schleudergangs wird die Wäsche durch das Reversieren gelockert.

2.3.3 Begriffsdefinitionen

Um den Waschprozess und dessen Modellbildung korrekt im Fachvokabular beschreiben zu können, werden die zum Verständnis der Arbeit notwendigen Fachbegriffe in diesem Abschnitt vorgestellt und erläutert.

Flotte

Als Flotte wird die Flüssigkeitsmenge, in der die Textilien beim Waschen behandelt werden, bezeichnet [KM02]. Abhängig von der aktuellen Arbeitsstufe wird

diese auch als Wasch- oder Spülflotte bezeichnet. Es kann auch eine weitere Unterteilung in gebundene und freie Flotte getroffen werden. Als gebundene Flotte wird die vom Waschgut aufgenommene Flüssigkeitsmenge bezeichnet. Die freie Flotte ist die über die gebundene Flotte hinaus vorhandene Flüssigkeitsmenge im Laugenbehälter und der Waschtrommel.

Im Waschprozess findet ein ständiger Austausch zwischen freier und gebundener Flotte statt. Dabei werden durch die gebundene Flotte die Schmutzpartikel vom Textil gelöst. Durch den Austausch mit der freien Flotte gelangen die Schmutzpartikel in die freie Flotte. Wenn dieser Austausch stattgefunden hat, sind die Schmutzpartikel vom Textil gelöst und können mit der Flotte aus der Maschine abgepumpt werden. Darüber hinaus verbindet die Flotte die verschiedenen Faktoren des Sinnerischen Kreises³, welche den Wascherfolg entscheidend beeinflussen:

- die Bewegung der Beladung in der Waschtrommel,
- die Flugbahn und das Auftreffen der Beladung,
- die Durchströmung durch die Beladung und entlang der Beladung,
- das Schwimmen der Beladung,
- die Schmutzentfernung und Schädigung der Beladung,
- die Dauer des Aufheizvorgangs,
- den Energieverbrauch im Prozess,
- die Waschmittelkonzentration im Waschprozess und
- die Spülwirkung [Bun12].

Beladungsspezifische Wasserbindung

Im Waschautomaten wird die Beladung mit Wasser bzw. durch die Zugabe von Waschsubstanzen mit Lauge durchmischt. Dabei bindet die Beladung eine gewisse Wassermenge in ihren Strukturen. Dies wird auch als das Saugen der Beladung bezeichnet. Das Saugverhalten ist primär abhängig von der Beladung, dem Drehrhythmus, der Einwirkzeit, dem Wasserstand im Laugenbehälter, der Grenzflächenspannung des Wassers bzw. des Laugengemisches, der Temperatur und dem Füllgrad der Waschtrommel. In diesem Abschnitt wird auf das beladungsspezifische Saugverhalten der Beladung und die Art der Wasserbindung eingegangen. Anschließend werden die unterschiedlichen Zusammensetzungen der genormten Wäscheposten vorgestellt.

Im Folgenden wird auf die häufigste Beladungsart der Waschmaschine eingegangen – die Textilien, darüber kann der Waschautomat mit Leder- und Gummi-Bekleidungen beladen werden wie z. B. Schuhe, Stiefel und Lederhosen.

³Genau Beschreibung im Abschnitt: Waschkreis nach Sinner.

Das Textilgut bindet das Wasser auf verschiedene Arten. Die Ausprägung hängt dabei unter anderem von den Filamenteigenschaften und der Gewebeart ab [Aib05]. Die Wasserbindung ist umso stärker, je tiefer das Wasser ins Textil eindringt. In Bild 2-11 sind die im Textil gebundenen Wasserarten anschaulich dargestellt. Es wird zwischen Oberflächentropfwasser, Haftwasser in Zwickeln, Kapillarwasser und Quellwasser bzw. chemisch gebundenem Wasser unterschieden.

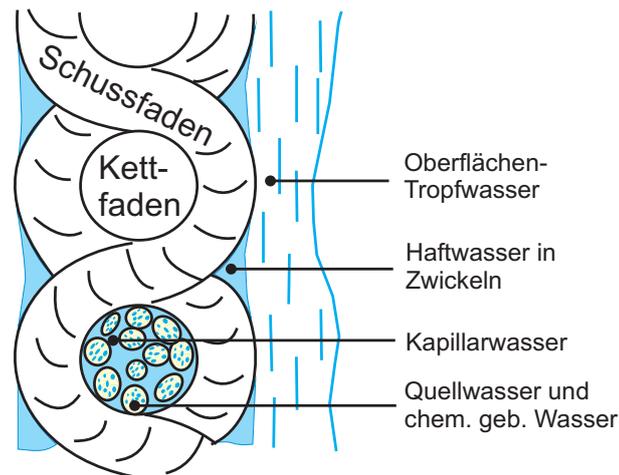


Bild 2-11: Wasserbindungen in Textilien, angelehnt an [Rou07]

Das Oberflächentropfwasser ist charakteristisch für einen hohen Durchfeuchtungsgrad des Textils. Es befindet sich auf der Oberfläche des Textils und weist keine Bindung zum Textil auf. Daher tropft es bereits durch Einwirkung der Schwerkraft ab. Als Haftwasser wird die makrokapillare Bindung des Wassers in den Zwickeln (Textilporen) von Ketten bezeichnet. Die Bindung in Haufwerkskapillaren (als Zwischenraumflüssigkeit) erfolgt infolge der Grenzflächenspannung und der Benetzungseigenschaften des Textils. Durch Adhäsion besteht eine Bindung zum Textil. Somit ist das Haftwasser nicht so leicht wie das Oberflächentropfwasser zu lösen. Die mikrokapillaren Feuchtebindungen in den Feststoffkapillaren mit Radien kleiner $10^{-6} m$ werden als Kapillarwasser charakterisiert. Die Kapillaren werden durch parallel liegende Fasern sowie mikroskopisch kleine Risse und Poren in den Fasern gebildet. Das Kapillarwasser befindet sich zwischen den Fasern und damit in vielen kleinen Zwischenräumen, in denen es stark gebunden ist.

Das Quellwasser und das chemisch gebundene Wasser sind wiederum in den Textilfasern selbst gebunden. Quellwasser bezeichnet die sorptive Bindung an den äußeren und inneren Faseroberflächen in mono- oder polymolekularen Schichten. Adhäsionskräfte bewirken die sorptive Flüssigkeitsbindung. Diese sorptive Bindung erfolgt an den amorphen Oberflächen der kristallinen Anteile der Fasern durch die Nebenvalenzkräfte. Sie hat also neben der physikalischen Bindung auch

einen chemischen Effekt. Das über Anker-moleküle an die Textilien gebundene Wasser kann als chemisch gebundenes Wasser bezeichnet werden. [Tög71, Rou07]

Saugfähigkeit

Die über die verschiedenen Bindungseigenschaften der Textilien gebundene Wassermasse wird prozentual auf die Textilmasse angegeben und wird auch als Saugfähigkeit bezeichnet. Diese gibt die maximale Wassermenge an, die das Textil binden kann, bis es gesättigt ist. Im Wesentlichen wird zwischen drei Textil-Beladungsarten für Waschmaschinen unterschieden:

- Standard Load A mit einer Saugfähigkeit von ca. 200 %,
- Standard Load B mit einer Saugfähigkeit von ca. 150 % und
- Frottier mit einer Saugfähigkeit von ca. 300 %.

Das Prüfgewebe *Standard Load A* besteht aus Baumwoll-Flachgewebe-Bettlaken, Baumwoll-Flachgewebe-Kopfkissenbezügen und Gerstenkorntüchern, siehe Tabelle 2-1. Eine Abweichung von 10 *Gramm* pro Wäschestück ist zulässig. Hierbei handelt es sich um eine Normbeladung, wie sie auch bei Prüfinstituten verwendet wird. Bei *Standard Load B* handelt es sich um Mischgewebe, welches z. B. aus pflegeleichten Textilien wie Hemden bestehen kann. Der Frottier-Wäscheposten setzt sich aus großen, kleinen und mittelgroßen Frottiertüchern, die aus 100 % Baumwolle bestehen, zusammen. Die letzten beiden Wäscheposten sind nicht genormt.

Tabelle 2-1: Anzahl der Beladungsstücke und Anschmutzungsstreifen bei einer *Standard Load A* Beladung nach IEC 60456

Masse [kg]	Anschmutzungs- streifen	Decken- bezüge	Kissen- bezüge	Gerstenkorn- tücher
1	2	0	2	4
2	2	0	4	9
3	3	2	4	5
4	4	2	4	14
5	5	2	6	18
6	6	2	8	23
7	7	2	12	23
8	8	3	12	25

Restfeuchte

Die Restfeuchte gibt den Feuchtigkeitsgehalt des Textils in Prozent an. Die Restfeuchte lässt sich wie folgt berechnen:

$$\text{Restfeuchte} = \frac{m_{\text{nass}} - m_{\text{trocken}}}{m_{\text{trocken}}} \cdot 100, \quad (2-1)$$

mit m (Masse). Der Trocknungsaufwand ist maßgeblich vom Restfeuchtegehalt nach dem Endschleudern abhängig. Um diesen zu minimieren wird eine möglichst geringe Restfeuchte beim Endschleudern angestrebt.

Waschmittel

Ein Waschmittel besteht aus verschiedenen chemischen Verbindungen, die in unterschiedlichen Formen (flüssig, fest oder pulverförmig) vorliegen können. Entsprechend den Anforderungen gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Waschmittel. Diese variieren in der Zusammensetzung und der Qualität. Ein pulverförmiges Vollwaschmittel besteht ungefähr zu jeweils einem Viertel aus: Wasserenthärter, Bleichmittel, Tensiden sowie Hilfs- und Füllstoffen. Im Folgenden werden die wichtigsten Bestandteile von Waschmitteln und deren Einfluss auf die Waschwirkung beschrieben.

Tenside, auch waschaktive Substanzen genannt, bilden die Grundlage jeder Waschmittelrezeptur. Sie setzen die Oberflächenspannung des Wassers herab, wodurch die Fasern besser mit Wasser benetzt werden und sich besonders öl- und fetthaltiger Schmutz löst. Außerdem halten sie den gelösten Schmutz in der Schwebelage und verhindern, dass er sich wieder auf den Textilien ablagert.

Bleichmittel werden zum Lösen von farbigen und hartnäckigen Verschmutzungen wie Rotwein- oder Kaffeeflecken eingesetzt. Das Bleichen erfolgt durch die Freigabe von Sauerstoff. Durch die Oxidation werden die Bakterien abgetötet und gleichzeitig der Schmutz gelöst. Natriumperborat setzt Wasserstoffperoxid frei, sobald es in Wasser gelöst wird. Vor allem bei höheren Temperaturen (ab 60 °C) zerfällt das Wasserstoffperoxid zu Wasser und Sauerstoff. Die Bleichwirkung hängt auch vom pH-Wert ab. Eine optimale Wirkung wird bei einem pH-Wert von 10-11 erzielt.

Aufgabe der Wasserenthärter ist es, den Wasserhärtegrad zu senken, um die Waschwirkung der Tenside zu verstärken. Wasserenthärter enthalten Phosphate, welche die im Wasser enthaltenen Kalzium- und Magnesiumsalze binden.

Zu den Hilfs- und Füllstoffen gehören: Enzyme, optische Aufheller, Inhibitoren, Stabilisatoren, Schauminhibitoren und sonstige Inhaltsstoffe (Duftstoffe, Farbstoffe, Korrosionsinhibitoren und Konservierungsstoffe). Jeder dieser Stoffe wird

in einer bestimmten Waschphase aktiviert und trägt zum Waschergebnis bei. Im Folgenden wird nur kurz auf die Enzyme und Schauminhibitoren eingegangen.

Enzyme gehören zu den Zusatzstoffen und werden zur Lösung von Eiweißverbindungen dem Waschmittel zugefügt. Enzyme arbeiten nur bis ca. 40°C und sollen Eiweiße und Blut von der Wäsche lösen. Waschmittelenzyme machen einen Anteil von weniger als 1% der Waschmittelmasse aus. Die Eiweißverbindungen müssen nach Möglichkeit bis 40°C von der Wäsche gelöst werden; bei höheren Temperaturen verfestigen sich diese in der Wäsche und können schlechter entfernt werden.

Schauminhibitoren bestehen aus Silikonen und Parafinen. Sie sollen die Schaumbildung hemmen. Mit Schaum bezeichnet man ein disperses System aus Gas und Flüssigkeit bzw. Gas und Feststoff, wobei der Volumenanteil der Gasphase überwiegt [PM89]. Eine Schaumbildung im Waschprozess wirkt sich negativ auf die Waschwirkung aus, weil die Waschsubstanzen darin gebunden werden und so ihre Wirkung in und am Textil nicht entfalten können. Zusätzlich dämpft der Schaum die Wäsche, sodass der mechanische Anteil verringert wird. Zur Untersuchung der Waschwirkung gibt es ein normiertes Waschmittel mit einer normierten Dosierung, genau beschrieben in der *IEC 60456* [IEC10].

Waschkreis nach SINNER

Der Waschprozess ist ein komplexer Vorgang, da eine Reihe physikalischer, chemischer und mechanischer Vorgänge mit zum Teil gegenläufigen Wirkungen und Erfordernissen gleichzeitig ablaufen. Der Waschkreis nach SINNER beschreibt die Interaktion dieser Faktoren und deren Einfluss auf die Waschwirkung qualitativ. Der Waschvorgang stellt also immer einen Kompromiss dar, z.B. muss die Schmutzentfernung durch möglichst viel Reibung erfolgen, aber die Textilien verlangen eine möglichst milde Behandlung. Am Waschvorgang sind folgende Elemente immer beteiligt: das Wasser, der Schmutz, das Textilgut, das Waschmittel und der Waschautomat.

Der Waschautomat steuert den Waschprozess über die Größen: Mechanik, Temperatur, Wasser, Einwirkzeit und Waschmittel. Die Interaktion dieser Größen untereinander beschreibt der SINNERSche Kreis. Die Summe der Einflussfaktoren, die über das Wasser zusammenwirken, ergibt den Wascherfolg. Um einen konstanten Wascherfolg zu gewährleisten, kann der Anteil der einzelnen Einflussfaktoren unterschiedlich groß gewählt werden. Die Veränderung des Anteils eines Faktors zieht aber zwangsweise eine Veränderung der anderen Faktoren nach sich. Anschaulich dargestellt werden diese Zusammenhänge durch den Waschkreis nach SINNER in Bild 2-12 [Wag10].

Im Wasser lösen sich die waschaktiven Substanzen des Waschmittels und werden von diesem zum Textil transportiert. Weiter wird über das Wasser die Wärme-

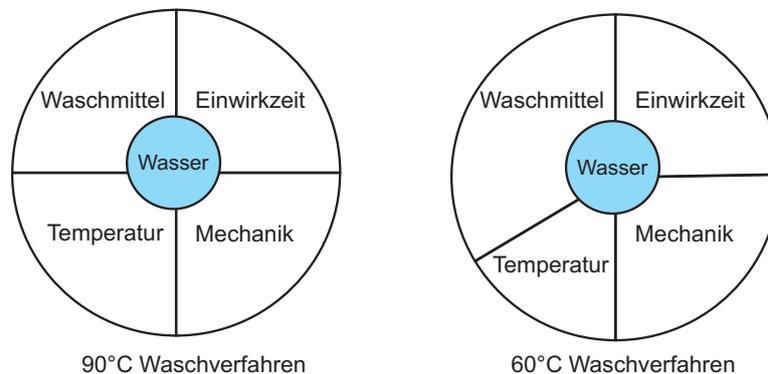


Bild 2-12: SINNERScher Kreis für eine 60°C und 90°C Wäsche

energie (Faktor Temperatur) auf die Wäsche und den Schmutz übertragen. Dabei nimmt der Wasserstand Einfluss auf die Mechanik und schafft mit dem Waschbad im Laugenbehälter die Voraussetzung für das Lösen und den Abtransport des Schmutzes. Die im Waschmittel enthaltenen Wirkstoffe lösen den Schmutz und halten ihn in der Schwebelage. Je nach Grad der Verschmutzung und der Beladungsart gibt es unterschiedliche Waschrhythmen. Einerseits harte Rhythmen, die viel Mechanik in den Prozess einbringen und mehr Energie verbrauchen, und andererseits schonende Rhythmen, die bei empfindlichen Textilarten eingesetzt werden. Mechanik, Temperatur und Einwirkzeit beeinflussen sich gegenseitig, indem bei höheren Temperaturen die chemischen Reaktionen schneller ablaufen als bei niedrigeren und somit auch weniger mechanische Energie oder Einwirkzeit erforderlich ist, um die Textilien zu waschen. Im SINNERSchen Kreis wird die Abnutzung bzw. die Schädigung der Textilien vernachlässigt.

In Bild 2-12 werden die Waschkreise für eine 90°C und eine 60°C Wäsche gegenübergestellt. Beide Wäschen werden in der Trommelwaschmaschine ausgeführt; die zu leistende mechanische Arbeit und die Einwirkzeit bleiben gleich. Folgendes ist erkennbar:

- Da die 60°C Wäsche bei einer niedrigeren Temperatur sauber werden muss, und der Anteil der „Temperatur“ abnimmt, wird dieser durch einen erhöhten Einsatz der Waschmittel kompensiert.
- Durch die niedrige Temperatur laufen einzelne Waschvorgänge langsamer ab. Um diese zu kompensieren und um einen gleichwertigen Wascherfolg zu bekommen, besteht die Möglichkeit die Anteile der Temperatur auch durch die Einflussgrößen Mechanik und Einwirkzeit zu kompensieren. Dies wird hier nicht gezeigt.

In den Abschnitten 6.2 und 6.3 werden die Themen Waschwirkung und SINNERScher Kreis im Rahmen einer Verfahrensoptimierung detaillierter betrachtet.

2.3.4 Verwandte Arbeiten zur Modellierung des Waschprozesses

In diesem Abschnitt werden bereits vorhandene Arbeiten zur Modellierung des Waschautomaten vorgestellt. Die Arbeiten beschäftigen sich immer mit speziellen Teilbereichen und den darin auftretenden Problemen und Lösungen. Dabei besteht der Waschprozess aus verschiedenen Teilaspekten: Mechanik, Elektrotechnik, der Wärme- und Stoffübertragung. Zunächst werden die Arbeiten zum fluidmechanischen Teilsystem des Waschprozesses vorgestellt. Anschließend werden Arbeiten zum mechanischen Teilsystem der Schwingungsanalyse betrachtet. Die Arbeiten zur elektrotechnischen Teilsystem beschäftigen sich mit der Auslegung spezieller Teilkomponenten der jeweiligen Hersteller. Damit sind diese zu speziell für eine allgemeine Betrachtung und werden in dieser Untersuchung vernachlässigt.

Fluidmechanische Modelle

Als verwandte Arbeiten zur Frontlader-Waschmaschine sind nur die Arbeiten von VAN DE BREKEL [Bre87] und von WARD [War99] zum Waschprozess bekannt.

In der Dissertation von *Van de Brekel* wird die Durchströmung der Textilien im Waschautomaten untersucht. Dazu wurden zwei Tanks mit jeweils einer Strömungsmaschine aufgebaut. Mit diesem Aufbau wurden die Massenströme zwischen dem Laugenbehälter und der Waschtrommel nachgebildet. Damit sollten die unterschiedlichen Transportphänomene im Waschautomaten nachgestellt werden, insbesondere die Adsorption und die Durchströmung des Textils sowie der Massentransport im System. Mit den Erkenntnissen sollte der Waschprozess verbessert werden. Bei der Textilmodellierung und der Durchströmung des Textils wurden unterschiedliche Ansätze untersucht, ein Kapillar-Modell nach KOZENY-CARMAN [Chr10] und BLASS [Bla64], Oberflächen-Widerstandsmodell nach IBERALL [Sch60] und HAPPEL [Hap58] und ein Poren-Modell nach PAYATAKES [PTT73]. Als Eingangsgröße für diese Modelle wurde die *Kozeny-Konstante* experimentell bestimmt, welche eine Funktion der Form und Struktur der Kanäle in den Textilien beschreiben soll. Dabei unterschritten die experimentell ermittelten Werte den Gültigkeitsbereich dieser Kennzahl in den Gleichungen. Damit waren diese Ansätze ungeeignet die Transportmechanismen im Waschprozess zu beschreiben und genaue Zusammenhänge zwischen der Durchströmung und der Waschwirkung zu ermitteln. Eine weitere Erkenntnis der Arbeit war, dass die chemischen Reaktionen im Waschprozess nicht abgebildet werden konnten. Eine wichtige experimentelle Erkenntnis war, dass durch eine intensive Durchströmung bei geringen Temperaturen das gleiche Waschergebnis erzielt werden konnte wie bei einer geringen Durchströmung und hohen Temperaturen.



Bild 2-13: 16 Textilien mit einer fixen eulerschen Gittergröße von $1,2 \cdot 10^3$ werden in einer CFD-Simulation eines Frontladers simuliert [Akc07]

WARD beschreibt in seiner Veröffentlichung die Umwandlung von kinetischer und potenzieller Energie am Textil während des Waschens. Dabei vernachlässigt er die Reibungs- und Kontaktkräfte. In beiden Arbeiten wurden keine Simulationstools eingesetzt. Die Auswertung erfolgte analytisch und beschränkte sich auf die Teilprozesse der Durchströmung und die Wäschebewegung.

Abschließend gilt es, auf eine aktuelle Dissertation von AKCABAY [Akc07] zur Kopplung einer Strömungssimulation mit einer Textilsimulation zu verweisen (Bild 2-13). In dieser Arbeit wird die Textilbewegung in einem Toplader aufgrund der erzeugten Strömungen simuliert. Die Simulation besteht aus vier Teilen: der plastischen Deformation der Textilien nach LOVE [Lov11], einem rechteckigen-kartesischen-Netz zum Lösen der Navier-Stokes-Gleichungen nach BROWN [Bro01], der Immersed Boundary Methode nach PESKIN [Pes72] für Textil/Fluid-Wechselwirkungen und einer Verknüpfungstechnik für irreguläre Feld-Grenzen in kartesischen Gittern. Die Ergebnisse konnten zwar nicht validiert werden, aber es ist die erste erfolgreiche Simulation von Textilien in Strömungen.

Mechanische Modelle

Das mechanische Teilmodell stellt einen wichtigen Teil der Waschautomaten dar, welcher bei einer ganzheitlichen Betrachtung des Waschprozesses nicht vernachlässigt werden darf. In diesem Teilmodell steht die Systemdynamik, in Form der Aggregatsschwingungen, im Vordergrund und ist eine der wichtigsten Kenngrößen des Waschautomaten. Zu diesem Thema gibt es diverse Veröffentlichungen, deshalb werden hier nur die aktuellen stellvertretend für die Forschungsrichtung behandelt.

Zur Minimierung der Vibroakustik wird versucht, die Schwingungen aus der Aggregatsauslenkung an das Gehäuse zu minimieren, da diese maßgeblich für die Geräuschentwicklung verantwortlich sind. Dabei steht das Schleudern im Mittelpunkt, weil hier die größten Schwingamplituden entstehen und an das Gehäuse übertragen werden können. Um diese zu analysieren, stellen BECKMANN ET AL. ein vollständiges vibroakustisches Simulationsmodell für eine Waschmaschine auf [BDE⁺04]. Das vibroakustische Modell ist eine elastische Mehrkörpersimulation, bei der *Ansys*- und *ADAMS*-Modelle gekoppelt werden. Die Ergebnisse der Simulation wurden mittels *MATLAB* und Fortran-Skripten in Akustikmodelle

(*SYSNOISE* und *Virtual.Lab*) übertragen und ausgewertet. Im Gegensatz zu BECKMANN ET AL. untersuchte SPELTA[SPS⁺09] die Auswirkung von magnetorheologischen Dämpfern auf die Geräuschentwicklung beim Schleudern experimentell. Dabei konnte eine Reduktion der Geräuschentwicklung um 5 dB bei 1400 1/min durch verschiedene Regelstrategien der Dämpfer gemessen werden. Weitere Veröffentlichungen zu diesem Thema sind [CC01, SSFG08].

Der andere Ansatz zur Reduzierung der Aggregatsauslenkungen stellt das aktive Auswuchten dar. Dabei wurden experimentell mehrere Ansätze verfolgt. BAE [BLK⁺02] versucht das Auswuchten mit Fluiden (Wasser, Öl oder Salzwasser). Im Gegensatz dazu wuchtet LEE [Lee97, LJK⁺98] mit festen Körpern in Form eines Rings aus, welcher mit freilaufenden Kugeln gefüllt ist. Aufgrund der Unwucht bewegen sich die Kugeln, in Abhängigkeit der Reibung untereinander und des Rings, gegenüber der Unwucht und können diese so reduzieren. Das Auswuchten mit den Fluiden funktioniert nach dem gleichen Prinzip.

In den Veröffentlichungen wird die Modellierung der nichtlinearen Systemdynamik mit MKS-Tools verfolgt [NYC⁺06]. Anhand der Erkenntnisse soll das System optimiert werden. Dies könnte in Form besserer Nutzung der Schwingräume, Einsparungen oder Lebensdauerabschätzungen genutzt werden.

Aktuell werden beide Ansätze zum Auswuchten mittels MKS-Modellierung, neuer Aktor- und Sensorkonzepte mit unterschiedlichen Regel- und Steuerstrategien, entwickelt [CJZ⁺11, KKM12, KDSDL13, KKL⁺13].

2.3.5 Diskussion und Handlungsbedarf

Modellabhängig verfügt ein moderner Waschautomat über eine Vielzahl von Sensoren, Aktoren und eine Informationsverarbeitung. Durch das interdisziplinäre Zusammenwirken der verschiedenen mechanischen, elektrotechnischen und informationstechnischen Elemente und Module stellt die Waschmaschine ein mechanisches System dar. Der Systementwickler benötigt zur Weiterentwicklung des Gesamtsystems ein domänenübergreifendes Gesamtmodell des Waschautomaten. Ein solches Modell, das den gesamten Waschprozess abbildet, fehlt bislang. Der Waschautomat mit dem Waschprozess wurde in den vorhergehenden Arbeiten als gesamtes System weder beschrieben noch modelliert, was zum Teil auf die Komplexität des Gesamtsystems zurückzuführen ist.

Die verwandten Arbeiten zeigen eine starke Fokussierung auf die Entwicklung des mechanischen Teilsystems. Dabei wird die Gesamtsystemanalyse vernachlässigt; es gibt kein Gesamtmodell des Waschautomaten. Um ein Gesamtmodell zu entwickeln, sind Wärme- und Stoffübertragungsmodelle notwendig. Die vorgestellten Teilmodelle für den Waschprozess sind nicht vollständig und nicht echtzeitfähig.

Für den Einsatz in „In-the-Loop-Anwendungen“ ist die Echtzeitfähigkeit ein zentrales Kriterium. Darüber hinaus haben die verwandten Arbeiten gezeigt, dass modellbasierte Testmethoden für ganzheitliche Systemtests bislang nicht existieren. Damit besteht hier ebenfalls ein Bedarf die Methodik voranzubringen. Zur Anwendung der modellbasierten Techniken ist ein domänenübergreifendes Waschautomatenmodell notwendig. Die Entwicklung eines solchen Modells auf Basis der vorgestellten Vorgehensweise wird im folgenden Kapitel erläutert.

3 Modellbildung des Waschautomaten

Die Herausforderung beim Erstellen eines Gesamtmodells des Waschvollautomaten liegt darin, das gesamte, implizit vorhandene, domänenübergreifende Prozess- und Systemwissen um den Waschautomaten explizit in einem Modell abzubilden. Um ein solch komplexes System abzubilden, ist ein strukturiertes und systematisches Vorgehen bei der Modellbildung erforderlich, wie es bereits in Abschnitt 2.2 vorgestellt wurde.

Eine notwendige Anforderung bei der Modellbildung ist die Echtzeitfähigkeit des Modells, da dieses in einer In-the-Loop-Test- und Entwicklungsumgebung eingesetzt werden soll. Dabei bestehen zwar bei MiL- und SiL-Simulationen keine Echtzeitanforderungen, aber da das Modell für alle In-the-Loop-Anwendungen durchgängig genutzt werden soll, müssen diese Anforderungen eingehalten werden.

Die Modellbildung beginnt mit einer Strukturierung des Systems „Waschautomat“. Dazu wird das System freigeschnitten und die Schnittstellen zur Umwelt spezifiziert. Anhand dieser wird in Abschnitt 3.1 ein physikalisches Ersatzbild des Gesamtsystems beschrieben. In Abschnitt 3.2 wird die Überführung des Ersatzbildes in ein qualitatives Streckenmodell dargestellt. Die Modellierung des Steuer- und Regelungsmodells wird in Abschnitt 3.3 vorgestellt. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung und Diskussion der erzielten Ergebnisse.

3.1 Modellstruktur

In diesem Abschnitt werden die Randbedingungen und Strukturen für die Modellbildung festgelegt. Zunächst wird das System zu seiner Umwelt abgegrenzt. Damit werden die ersten Schnittstellen festgelegt, sodass ein klar definiertes System zur Verfügung steht, mit dem ein physikalisches Ersatzbild erstellt wird. Dabei wird zunächst das Gesamtsystem mit dem Ziel der durchgängigen Beschreibung des Gesamtsystems inklusive der Schnittstellen für die domänenspezifische Modellierung betrachtet.

3.1.1 Systemabgrenzung

Bei der Systemabgrenzung soll der aufgabenrelevante Systemteil unter realistischen Umgebungseinflüssen betrachtet werden. Dabei gilt es, die Schnittstellen und Abhängigkeiten zur Umgebung zu spezifizieren.

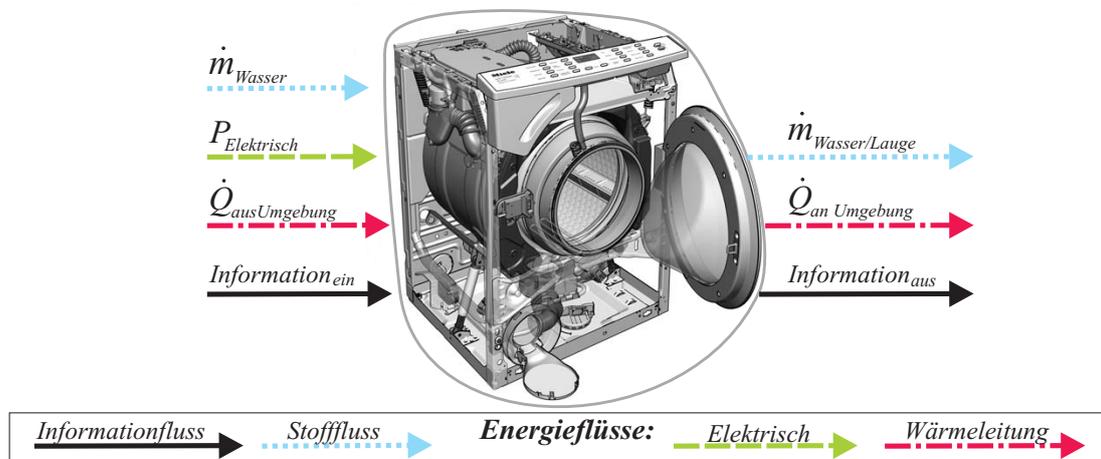


Bild 3-1: Freischnitt des Systems Waschautomat mit den Stoff-, Energie- und Informationsflüssen

Zu den realistischen Umgebungseinflüssen zählt der Betrieb im Haushalt und in haushaltsähnlichen Aufstellbedingungen, jedoch nicht im Außenbereich oder in instationären Zuständen (z. B. auf Schiffen). Als Anschlussbedingung wird ein Frischwasseranschluss angenommen. Der Wasserablauf soll an ein wasserabführendes System angeschlossen werden, sodass kein Wasser in den Waschautomaten zurückfließt. Ein Transport bzw. Fluss der Beladung in das Gerät und abschließend aus dem Gerät wird nicht betrachtet. Die Beladung stellt also unbekannte Parameter da (Masse und Saugverhalten). Der Betrieb des Waschautomaten ist nur in einem Temperaturbereich von $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ vorgesehen, außerhalb dieses Bereichs ändert sich der Aggregatzustand des Wassers, sodass kein Waschen mehr möglich ist. Als Energieversorgung wird ein idealisiertes Stromnetz vorausgesetzt, welches keinen Stromnetzschwankungen unterliegt. Im Waschautomaten dürfen nur Textilien gereinigt werden, welche als waschbar ausgewiesen sind.

Beim Freischnitt des Systems werden die Schnittstellen in Stoff-, Energie- und Informationsflüsse unterteilt, siehe Bild 3-1. Beim Energiefluss wird nochmals zwischen elektrischer Energie und Wärmeenergie unterschieden. Die Wärmeenergie kann dem System über die Umgebungswärme und Stoffströme zugeführt und abgegeben werden. Durch den Stofffluss \dot{m}_{Wasser} findet gleichzeitig ein Energiefluss in das System statt. Dieser ist abhängig von der Stofftemperatur. Die während des Waschprozesses in der Lauge bzw. im Wasser gespeicherte Energie fließt über den Stofffluss $\dot{m}_{\text{Wasser/Lauge}}$ an die Umgebung. Darüber hinaus wird dem System Energie aus der Umgebung $\dot{Q}_{\text{aus Umgebung}}$ und in Form von elektrischer Leistung $P_{\text{Elektrisch}}$ zugeführt und zu Teilen über den Wärmetransport $\dot{Q}_{\text{an Umgebung}}$ an die Umgebung abgegeben. Der Informationsfluss $\text{Information}_{\text{ein}}$ stellt unter anderem

Beladungsmenge, Art und Bedieneinstellungen am Waschautomaten dar. Als Informationsfluss aus dem System $Information_{aus}$ werden die Einstellungen und die Verläufe der simulierten Systemgrößen übergeben.

3.1.2 Gesamtmodell

Durch die Systemabgrenzung hat das System definierte Ein- und Ausgänge zur Umgebung. Anhand dieser Randbedingungen erfolgt die Aufstellung des physikalischen Ersatzbildes. Es gilt, das Systemwissen geeignet zu strukturieren, sodass die wesentlichen physikalischen Vorgänge beschrieben und erfasst werden können.

Die Strukturierung mechatronischer Systeme (siehe auch Abschnitt 2.2.1) kann mittels qualitativer Systemmodelle, Top-Down-Modellierung oder funktionsorientierter Modelle erfolgen. Die qualitativen Systemmodelle werden in der Entwurfsphase eingesetzt, um die grundlegenden Zusammenhänge und Wirkstrukturen darzustellen und damit die Entwurfsvarianten analysieren zu können. Die Top-Down-Modellierung wird vor allem zur Informationsmodellierung eingesetzt. Dabei beginnt die Modellierung mit einer abstrakten Hauptfunktion, welche in den Folgeschritten konkretisiert und partitioniert wird. Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass direkt am Anfang ein ausführbares Modell entsteht. Dieses wird mit der Zeit immer detaillierter, was zur Folge hat, dass die Strukturierung sehr stark von den Abstraktionsebenen abhängt. Um neue Funktionen und Erweiterungen einzubinden, muss wieder von oben angefangen und die gesamte Struktur mit den Schnittstellen überprüft werden, siehe auch [Lüd03].

Bei einer funktionsorientierten Modellbildung stehen das Ein- und Ausgangsverhalten sowie die Wirkflüsse im Mittelpunkt. Diese sind für mechatronische und regelungstechnische Systembetrachtungen und Darstellungen besonders geeignet. Mit dem Waschautomaten ist ein komplexes und bereits hochentwickeltes System vorhanden, welches für die In-the-Loop-Anwendungen in einem Modell abgebildet werden soll. Dafür wird im Folgenden die funktionsorientierte Systemdarstellung verwendet, weil diese die Zusammenhänge des bestehenden Systems in bekannter und pragmatischer Weise darstellt. Durch die funktionsorientierte Strukturierung können weitere Funktionen einfach erweitert werden, ohne das vorhandene Strukturierungskonzept zu ändern.

Auf Grundlage der Systemabgrenzung wird eine Wirkstruktur des Waschautomaten nach [VDI2211] erstellt, in der die Stoff-, Energie- und Signalflüsse zwischen den Komponenten dargestellt werden. Das Bild 3-2 zeigt die Wirkstruktur des Waschautomaten mit den Komponenten: Ventil, Volumenstromzähler, Wasserweiche, Spülkasten, Laugenbehälter, Waschtrommel, Motoren, Untersetzung, Türschloss, Heizung, Wassersensor, Strömungsmaschine, Leiteinrichtung, Informations- und Leistungsverarbeitung. Diese Komponenten sind über Stoff-,

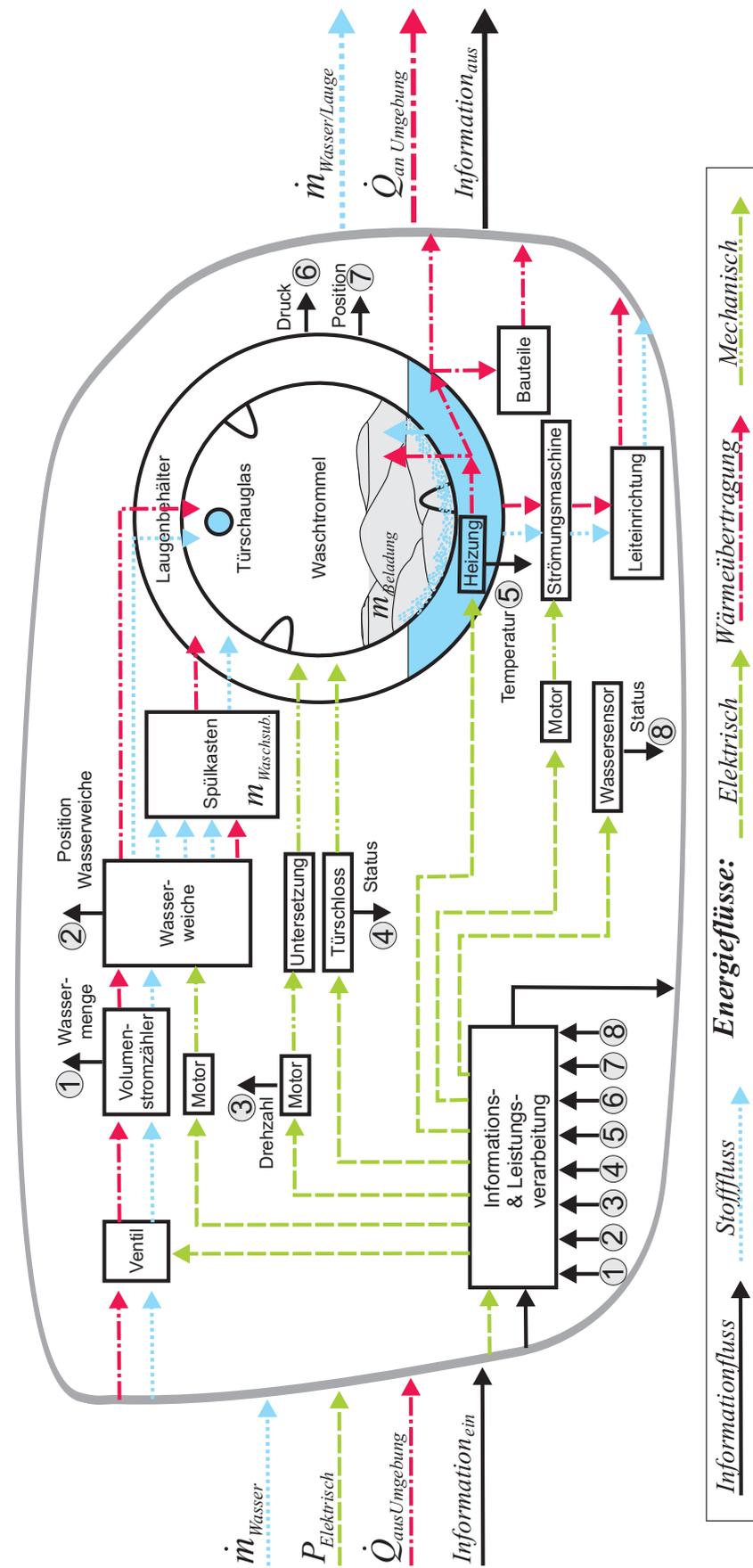


Bild 3-2: Wirkstruktur eines Waschautomaten mit den Schnittstellen zur Umgebung

Energie- und Signalflüsse miteinander verbunden. Dabei wird bei den Energieflüssen zwischen elektrischen, mechanischen und wärmeübertragenden unterschieden. In einer vereinfachten Darstellung dieser Wirkstruktur wurde in Abschnitt 2.3.2 der Waschprozesses erläutert.

Anhand der Wirkstruktur erfolgt die Modellbildung der einzelnen Komponenten. Über die Schnittstellen werden die domänenspezifischen Modelle, bestehend aus Teilmodellen der Fluidmechanik, der Wärmeübertragung, der Mechanik, der Elektrotechnik und der Informationsverarbeitung zu einem domänenübergreifenden Gesamtmodell des Waschautomaten zusammengeführt. Für den Einsatz des Modells für die In-the-Loop-Techniken wird das Modell in ein Strecken- und Regelungs- und Steuerungsmodell unterteilt. Im Folgenden werden zur Modellbildung die einzelnen Komponenten beschrieben.

3.2 Streckenmodell des Waschautomaten

Im Streckenmodell des Waschautomaten sind Modelle der Fluidmechanik, der Wärme- und Stoffübertragung, der Mechanik und der Elektrotechnik enthalten. Die Elektrotechnikmodelle werden den Aktoren und Sensoren zugeordnet. Die Beschreibung des Streckenmodells beginnt mit einem physikalischen Modell, welches anschließend in ein qualitatives und ein quantitatives mathematisches Modell überführt wird. Die Modellbildung erfolgt zunächst in den einzelnen Domänen. Dabei wird jedes dieser Teilmodelle nach seiner Modellierung in das Gesamtmodell integriert.

Bei der Modellbildung ist die Wahl der Modellierungstiefe eine zentrale Aufgabe, welche die Modellgüte maßgeblich beeinflusst. Die domänenspezifische Modellierungstiefe ist nach [JTIZ10] von folgenden Randbedingungen abhängig: Systemkenntnis des Modellierers, Möglichkeiten der Modellvalidierung und Anwendungsanforderungen. In diesem Fall muss das Ein- und Ausgangsverhalten des Systems alle erforderlichen dynamischen Effekte berücksichtigen und die Echtzeitanforderungen erfüllen. Die Systemkenntnis des Modellierers ist relativ hoch, weil dieser auf das Systemwissen der Entwickler zugreifen kann. Zur Modellvalidierung stehen viele Messungen zur Verfügung. Diese beschränken sich größtenteils auf die vom Steuer- und Leistungsteil ausgewerteten Größen.

Eine rein physikalische Modellierung ist für mechatronische Systeme häufig zu rechenintensiv. Einen Lösungsansatz bieten „halbempirische“ Modelle [WR06], die den physikalischen Modellen entsprechen. Dabei werden einige rechenintensive Phänomene vereinfacht. So wird z. B. die Wärmeübergangszahl experimentell und anhand komplexer Modelle ermittelt und in dem Echtzeitmodell als konstanter Parameter verwendet. Ähnliches gilt auch für Kontaktkräfte bei mechanischen Modellen und Strömungssimulationen von Fluiden.

3.2.1 Fluidmechanik

Das fluidmechanische Modell stellt beim Waschautomaten das zentrale System dar. Es verbindet alle vier Elemente des SINNERSchen-Kreises zur Textilreinigung (siehe Abschnitt 2.3.3). Beim Schleudern sorgt die diskontinuierliche Entfeuchtung und die Beladungsverteilung maßgeblich für die Schwinganregung des Systems.

In diesem Abschnitt werden ausschließlich die Stoffflüsse im System betrachtet, siehe fluidmechanisches Teilmodell in Bild 3-3. Grau hinterlegt sind die Einflüsse der Informations- und Leistungsverarbeitung, weil über diese die Stoffflüsse geregelt und gesteuert werden. Der Wassermassenstrom \dot{m}_{Wasser} stellt die Eingangsgröße in das System dar. Die beiden wichtigsten Eingangsparameter, die Massen der Waschsubstanz $m_{Waschsub.}$ und der Beladungsmenge $m_{Beladung}$, sind ebenfalls dargestellt. Die Beladung wird vor Beginn des Waschprozesses in die Waschtrommel gelegt. Die Waschsubstanzen werden direkt in die Waschtrommel gegeben oder in den Spülkästen gefüllt.

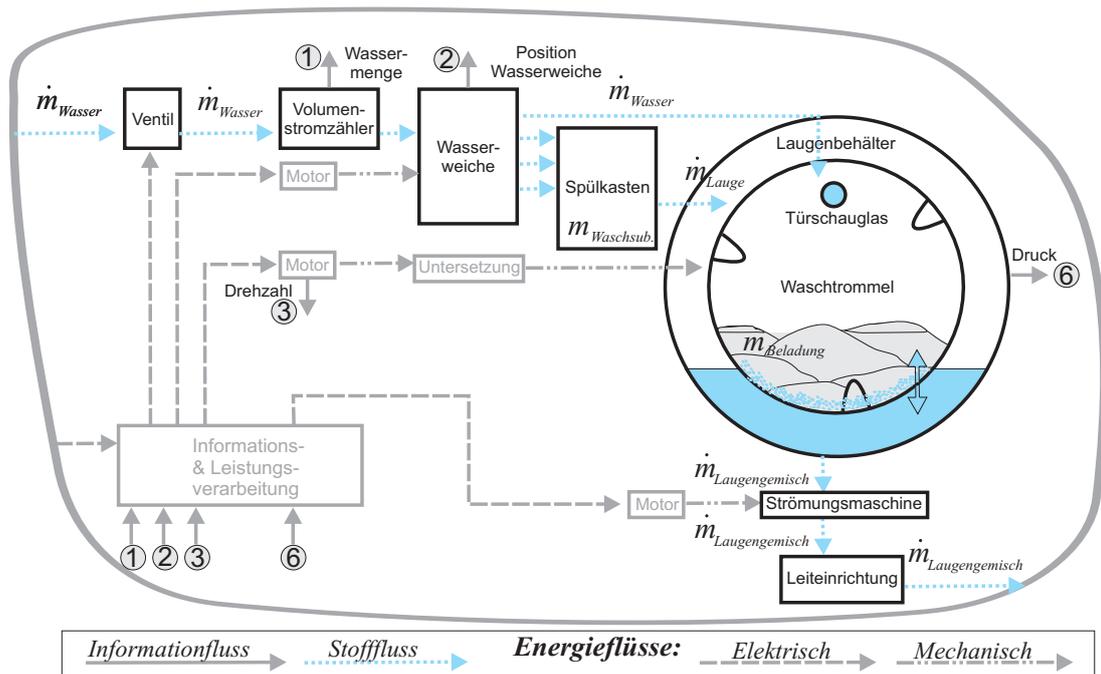


Bild 3-3: Fluidmechanisches Teilmodell des Waschautomaten

Aus dem Leitungsnetz strömt das Wasser mit einem Volumenstrom von 1-20 l/min in das System und wird vor dem Ventil auf 10 l/min begrenzt. Durch das Schalten des Ventils fließt der Wassermassenstrom in das System und durch den Volumenstromzähler. Dieser misst die eingelaufene Wassermenge. Anschließend

gelangt das Wasser in die Wasserweiche. Hier besteht die Möglichkeit, das Wasser durch vier verschiedene Kanäle in den Laugenbehälter zu lenken. Die Positionsverstellung der Kanäle erfolgt über einen kleinen Motor, dabei wird die aktuelle Kanalposition über einen Kontaktsensor an das Steuergerät gesendet. In Abhängigkeit der Kanalwahl fließt der Wassermassenstrom z. B. über das Türschauglas direkt auf die Beladung. Die anderen Positionen führen durch den Spülkasten. In diesem werden die drei Fächer Vorwäsche, Hauptwäsche und Spülen ausgespült, sodass die darin enthaltenen Waschsubstanzen in dem Wasser gelöst werden und in den Laugenbehälter gelangen. Durch das Lösen ändert das Wasser seinen pH-Wert und wird zu einer Lauge.

Die Lauge sammelt sich im Laugenbehälter. Über einen Füllstandsensor, die sogenannte Luftfalle (Einbauposition siehe Bild 2-5), wird der Wasserstand gemessen. Mit steigendem Füllstand gelangt die Lauge durch die Löcher der Waschtrommel an die Beladung, welche sie über die verschiedenen Wasserbindungseigenschaften aufsaugt (siehe Abschnitt 2.3.3 unter beladungsspezifische Wasserbindung). Die Waschtrommelbewegung, welche über einen Motor mit einer Untersetzung realisiert wird, unterstützt diesen Durchmischungsprozess. Hier findet ein permanenter Austausch zwischen der freien und gebundenen Flotte statt. Bei diesem Durchmischungsprozess wird Schmutz aus der Beladung gelöst und in der Lauge gehalten. So entsteht hier ein Laugengemisch.

Nach Beendigung der Waschphase wird das Laugengemisch über das Ablaufsystem abgepumpt. Dazu befindet sich unterhalb des Laugenbehälters die sogenannte Laugenpumpe, siehe Bild 2-5. Mittels dieser wird das Laugengemisch aus dem Waschautomaten in das Abwassersystem befördert. Dazu muss die Laugenpumpe genügend Druck aufbauen, um die verschiedenen hydraulischen Widerstände zu überwinden.

Damit wurde das Strukturbild des fluidmechanischen Teilmodells des Waschautomaten beschrieben. Dieses stellt die Grundlage für weitere Betrachtungen und Modellierungen dar.

Nachdem die einzelnen Komponenten wie Ventil, Volumenstromzähler oder Waschtrommel im fluidmechanischen Teilmodell vorgestellt wurden, soll an dieser Stelle die Modellierungstiefe dieser Komponenten und die darin stattfindenden Effekte festgelegt werden. Da dieses Modell im Rahmen einer modellbasierten Entwicklung eingesetzt werden soll, müssen zum einen die Schnittstellen für die Sensoren und Aktoren berücksichtigt werden. Zum anderen gilt es, die Systemdynamik hinreichend genau, unter Einhaltung der Echtzeitanforderungen, für diesen Anwendungsfall abzubilden. In diesem Fall sind die Prozesse im Aggregat entscheidend für die Systemdynamik. Beim Teilmodell des Laugenbehälters ist es die Druckänderung, weil diese den gesamten Waschprozess überwacht und bei Über- und Unterschreitung von Grenzwerten nachgeregelt wird. Die Druckände-

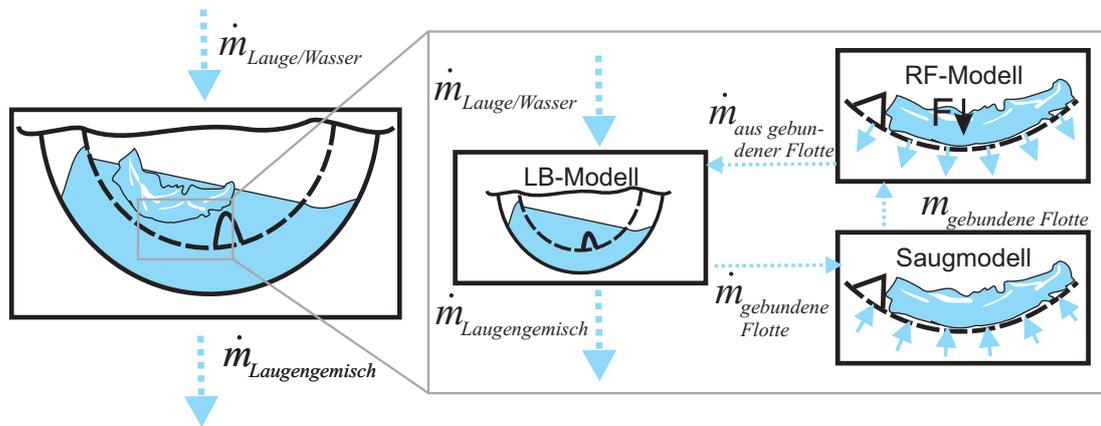


Bild 3-4: Fluidmechanisches Modell im Aggregat des Waschautomaten

Die freie Flotte im Laugenbehälter stellt die wichtigste fluidmechanische Größe dar, weil diese die Prozessgestaltung des Waschautomaten beeinflusst. Im Folgenden wird diese detailliert betrachtet, siehe dazu auch Abschnitt 2.3.3 unter Waschflotte. Im Gegensatz dazu spielen die hydraulischen Verluste in den Zulaufleitungen eine untergeordnete Rolle und werden zunächst als ideal modelliert, d. h. es werden Kontinuitätsgleichungen zur Massenerhaltung verwendet. Die Modellierung der beschriebenen Sensoren und Aktoren findet in Abschnitt 3.2.5 statt. Im Folgenden wird zunächst das Aggregat und anschließend das Ablaufsystem modelliert.

Um die Dynamik im Aggregat darzustellen und analysieren zu können, wird das System Aggregat in drei Teilsysteme aufgebrochen (Bild 3-4): den Laugenbehälter (LB-Modell), das Saugverhalten der Beladung (Saugmodell) und die Restfeuchte (RF-Modell). Die drei Teilsysteme werden über den Massenstrom direkt miteinander verbunden. Dabei wird im Saugmodell die beladungsspezifische Wasseraufnahme und im Restfeuchtemodell die Fest-Flüssig-Trennung modelliert. Im Laugenbehältermodell wird auf Basis von Geometrieparametern der Druck bzw. der Wasserstand im Laugenbehälter modelliert.

Laugenbehältermodell

Das Laugenbehältermodell berechnet die freie Flotte in Abhängigkeit der Massenströme aus dem Wasserzu- und ablauf und den Massenströmen in die und aus der gebundenen Flotte (Bild 3-4). In diesem Teilmodell wird auf Basis der vorhandenen freien Flotte der daraus resultierende hydraulische Druck am Laugenbehälterboden berechnet, um daraus das Sensorsignal zu generieren. Dieses Drucksignal stellt die wichtigste verfahrenstechnische Größe zur Waschprozesssteuerung des Waschautomaten dar. Der Laugenbehälter ist ein liegender Kreiszyylinder, welcher mit der freien Flotte gefüllt wird. Das Drucksignal der freien Flotte ist abhängig

von der Füllhöhe h und dem gefüllten Volumen des Laugenbehälters V_{fuell} . Über die geometrischen Zusammenhänge kann das gefüllte Volumen in einem liegenden Kreiszyylinder, eine Querschnittsdarstellung zeigt Bild 3-5, über die folgende Gleichung beschrieben werden:

$$V_{fuell} = t_{LB} \cdot r^2 \left(\arccos \left(\frac{r - h_1}{r} \right) - \frac{\sqrt{2rh_1 - h_1^2} \cdot (r - h_1)}{r^2} \right). \quad (3-1)$$

Dabei ist das gefüllte Volumen von der Tiefe des Laugenbehälters (t_{LB}), dem Radius des Laugenbehälters (r) und der Füllhöhe (h_1) abhängig. Das Umstellen der Gleichung (3-1) nach h_1 ist analytisch nicht möglich. Deshalb ist hier eine numerische Lösung notwendig. Die hier verwendete Lösung besteht darin (3-1) in ein Nullstellenproblem umzuschreiben und dies iterativ mit dem Newton-Verfahren zu lösen. Diese Lösung wird mittels einer Kennlinie in das Modell integriert. Durch diesen Lösungsansatz wird die konstante Berechnungszeit sichergestellt.

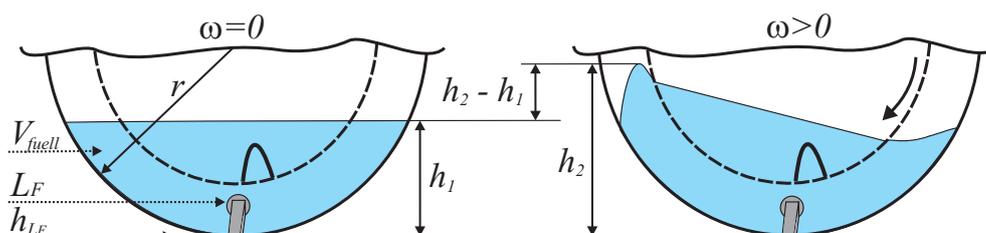


Bild 3-5: Links: Querschnitt des Laugenbehälters mit der Einbauposition des Drucksensors Luftfalle (L_F), sowie die Einlaufhöhe (h_{LF}); Bild rechts: Fluidodynamik im Laugenbehältermodell

Zur Berechnung des Drucks gilt bei idealen Fluiden¹ der Energieerhaltungssatz der Mechanik, aus dem durch Kürzen der Masse die *Bernoulli*-Gleichung (3-2) wird. Diese stellt für reibungsfreie, isolierte, adiabate Systeme bei isochorer Zustandsänderung einen Sonderfall des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik dar. Die *Bernoulli*-Gleichung (3-2) setzt sich aus dem statischen und dynamischen Druck zusammen [Böc04, ZB08]:

$$p_{Gesamt} = p_{stat} + p_{dyn} = \rho \cdot g \cdot h_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c^2, \quad (3-2)$$

mit p = Druck, ρ = Dichte des Wassers, g = Erdbeschleunigung, h_1 = Füllhöhe und c = Fluidgeschwindigkeit an der Waschtrommel. Das Bild 3-5 zeigt den statischen Druck links und die Überlagerung des statischen und dynamischen Drucks

¹Ideale Fluide zeichnen sich durch Inkompressibilität und Reibungsfreiheit im Fluid und an Wänden aus.

rechts. Diese Gleichung stellt eine grobe Näherung für die ersten Untersuchungen dar und ist nur in der Waschphase für Nichtanlegedrehzahlen gültig. Dabei ist der statische Druck in Flüssigkeiten oder Gasen im Schwerfeld für ein ruhendes Medium ($\rho = konst.$) linear. Der dynamische Druck bewirkt im Gegensatz zum statischen Druck keine Kraft senkrecht zur Strömung. Er ist immer dann vorhanden, wenn eine Strömung eine Geschwindigkeit hat. Der dynamische Druck ist von der Füllhöhe h_1 abhängig, was in der vereinfachten Gleichung (3-2) nicht dargestellt wurde. Die statische Füllhöhe h_1 des Laugenbehälters wird an das Saugmodell übergeben und p_{Gesamt} an die Sensorsimulation.

Saugmodell

Das Saugverhalten der Beladung wird von einer Vielzahl an Parametern beeinflusst: Beladungsart, Beladungsmenge, Feuchtegrad der Beladung, Wasserstand im Laugenbehälter, Drehrhythmus der Trommel, Einlaufweg, Lochfläche der Waschtrommel, Wasserhärte, pH-Wert der Lauge und Temperatur. Die physikalische Modellbildung des Wäschesaugverhaltens ist bislang wenig erforscht. In der Fachliteratur werden nur die Wasserbindungseigenschaften beschrieben (siehe Abschnitt 2.3.3), aber kein Modell zur Wasserbindung und zum Massentransport innerhalb des Textils. Die Wasserbindungsmechanismen sind stark von der Struktur, der Zusammensetzung, der Oberflächen- und Benetzungseigenschaften abhängig. Diese müssten für eine Modellbildung bekannt sein und auch validiert werden können. Aus diesen Gründen wird das Textilsaugverhalten phänomenologisch modelliert und an die bekannten Grundlagen angelehnt.

Zur Bestimmung des Saugverhaltens wird die Massenzunahme der unterschiedlichen Textilien während der Durchfeuchtungsphase messtechnisch erfasst. Die Messungen zeigen immer den gleichen charakteristischen Verlauf (Bild 3-6). Zu

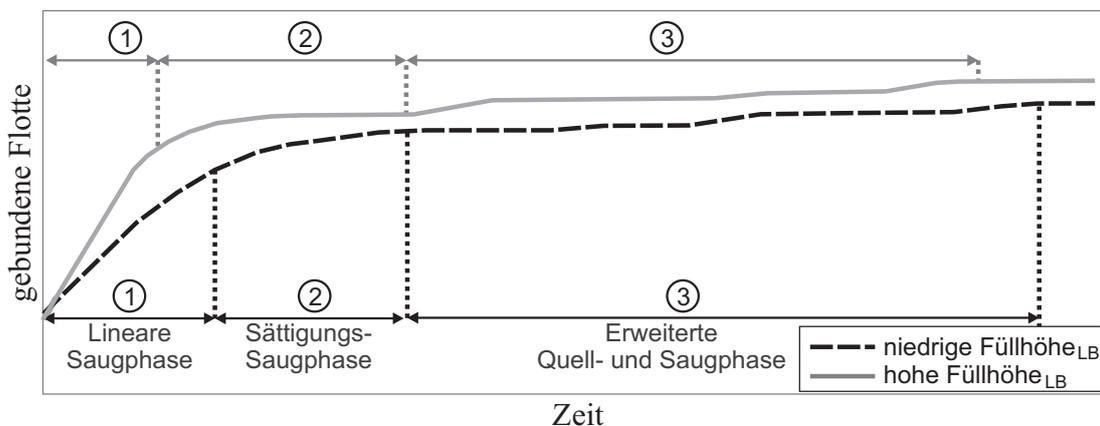


Bild 3-6: Saugverhalten der Beladung bei unterschiedlichen Füllhöhen

Beginn der Durchfeuchtungsphase nimmt die Masse der gebundenen Flotte linear zu. Dies ist der erste Bereich. Dem folgt die Sättigungs-Saugphase im zweiten Bereich. Sie findet so lange statt, bis die Masse der gebundenen Flotte unregelmäßig zunimmt. Dies geschieht im dritten Bereich und wird als erweiterte Quell- und Saugphase bezeichnet.

Das Bild 3-6 stellt zwei unterschiedliche Saugverläufe dar. Die graue Linie zeigt die Masse der gebundenen Flotte bei hoher Füllhöhe, die schwarz-gestrichelte bei niedriger Füllhöhe. Diese Verläufe haben zu Beginn unterschiedliche lineare Steigungen, also Sauggeschwindigkeiten. Der erhöhte Füllstand im Laugenbehälter führt zu größeren Kontaktflächen, wodurch mehr Lauge in den Laugenbehälter fließt. Dadurch erhöht sich der Massenstrom an die gebundene Flotte. Darüber hinaus zeigen die Verläufe, dass eine höhere Füllhöhe zu einer größeren gebundenen Flotte führt. Dass das Wasseraufnahmevermögen der einzelnen Textilien begrenzt ist, deutet auf eine Erhöhung des Oberflächentropfwassers am einzelnen Beladungsstück hin.

Die physikalische Interpretation der gemessenen Verläufe ist, dass zunächst im linearen Bereich das Wasser als Oberflächenwasser und Haftwasser in den Zwickeln gebunden wird. Während der erweiterten Saugphase dringt dieses Wasser in Kapillare, wodurch Wasser aus der freien Flotte langsamer nachgesaugt wird. In der erweiterten Quell- und Saugphase quellen die Fasern (unregelmäßig) auf und binden dadurch zusätzliches Wasser, also das Quellwasser. Die Übergänge zwischen den einzelnen Phasen lassen sich nicht exakt bestimmen. Daher wurden bei der Auswertung die verschiedenen Messungen in ein charakteristisches Schema überführt. Ziel war, daraus ein beladungsspezifisches allgemeingültiges Kennfeld für das Saugverhalten der Wäsche zu erstellen.

Anhand des beladungsspezifischen Saugverhaltens wurde für jede Beladungsmasse und -art ein Kennfeld erstellt. Das Bild 3-7 zeigt exemplarisch eine solche Kennlinie. Dabei wird der Massenstrom an die gebundene Flotte in Abhängigkeit des Füllstands $_{LB}$ und der Restfeuchte der Beladung berechnet. Erst ab einem Mindestdruck, bei dem die Beladung in Kontakt mit dem Laugengemisch kommt, wird ein Massenstrom berechnet. Im Restfeuchteverlauf sind die drei Bereiche aus Bild 3-6 erkennbar: die lineare, die Sättigungs- und die erweiterte Saugphase. In der linearen Saugphase nimmt der Saugmassenstrom mit steigender Füllhöhe zu. Ab einer bestimmten Restfeuchte ist die Beladung gesättigt und der Saugmassenstrom nimmt ab (Sättigungs-Saugphase). Nach dem Erreichen einer bestimmten Restfeuchte (erweiterte Quell- und Saugphase) ist die Beladung vollständig gesättigt und nimmt kein weiteres Wasser mehr auf. Die aufgenommene Masse an Lauge, also die gebundene Flotte, wird an das Restfeuchtemodell übergeben.

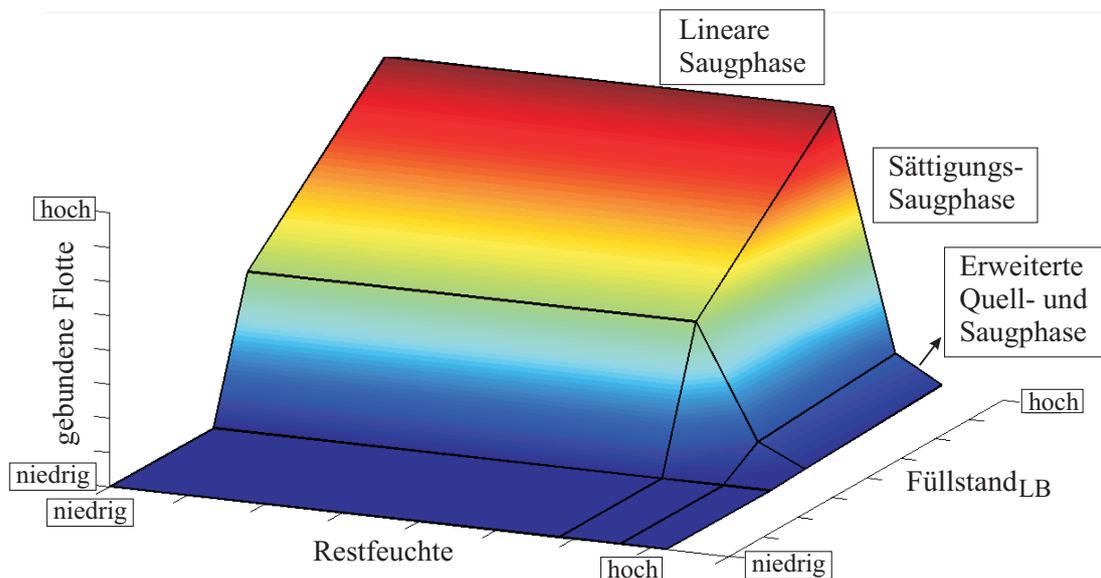


Bild 3-7: Saugmodell für eine Kleinbeladung Standard Load A

Restfeuchtemodell

Das Restfeuchtemodell berechnet als Teil des fluidmechanischen Modells die Restfeuchte der Beladung während der Simulation. Hierzu wird ein Massenstrom an Fluid berechnet, welcher aus der gebundenen Flotte an die freie Flotte ausgetrieben wird ($\dot{m}_{aus\ gebundener\ Flotte}$). Die dabei wirkenden Kräfte sind die Trommelkraft, die Zentrifugal-, die Gewicht-, die Rippenstoß- und die Fluidwiderstandskraft. Dabei wird die Beladung in neun Punktmassen aufgeteilt. Für jede Punktmasse wird aus den wirkenden Kräften eine Betragskraft gebildet, welche auf die Beladung wirkt. Abhängig von der wirkenden Kraft und dem Durchströmungswiderstand der gebundenen Flotte (α) wird der Massenstrom aus der gebundenen Flotte berechnet. Bild 3-8 zeigt die Beladung inklusive der wirkenden Kräfte.

Die Berechnung des Massenstroms an die freie Flotte erfolgt anhand der Fest-Flüssig-Trennung in einer diskontinuierlichen Zentrifuge. Das ausgetriebene Fluid berechnet sich nach [AA03] durch

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\bar{F}}{\eta \cdot R_c} = \frac{\bar{F} \cdot A_{Trommel}}{\eta \cdot \alpha \cdot m_{gebundeneFlotte}}. \quad (3-3)$$

Hierbei stellt η die dynamische Viskosität des Fluides dar, diese ist temperaturabhängig und wird aus der Fachliteratur [VDI06] übernommen. Der hydraulischen Gesamtwiderstand R_c ist anwendungsspezifisch, für diesen Anwendungsfall setzt er sich aus dem Durchströmungswiderstand der gebundenen Flotte (α), der Masse der gebundenen Flotte $m_{gebundeneFlotte}$ und der Waschtrommelfläche

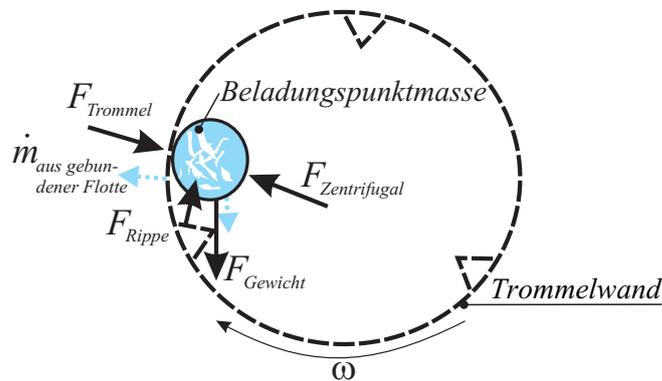


Bild 3-8: Wirkende Kräfte auf die Beladung im Restfeuchtemodell

$A_{Trommel}$ zusammen. Die Waschtrommelfläche mit der dazugehörigen Lochfläche ist ein Geometrieparameter, wohingegen der Durchströmungswiderstand durch eine Identifikation bestimmt werden muss, siehe Abschnitt 4.2.1. Die Kraft \bar{F} stellt den Betrag der resultierenden Punktkraft der im Bild 3-8 gezeigten Kräfte dar. Sie wird aus den noch folgend beschriebenen Kräften gemittelt. Die Trommel- und Rippenkontaktkräfte werden idealisiert als Feder-/ Dämpferelemente modelliert und berechnen sich nach

$$F_{Trommel} = c_i \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + d_i \cdot \begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ \Delta \dot{y} \end{bmatrix}. \quad (3-4)$$

und

$$F_{Rippe} = c_i \cdot \begin{bmatrix} x_{Beladung} - x_{Rippe} \\ y_{Beladung} - y_{Rippe} \end{bmatrix} + d_i \cdot \begin{bmatrix} \dot{x}_{Beladung} - \dot{x}_{Rippe} \\ \dot{y}_{Beladung} - \dot{y}_{Rippe} \end{bmatrix}. \quad (3-5)$$

Hierbei gehen die Auslenkungen der Beladungsmasse im Waschtrommelkoordinatensystem Δx und Δy in x - und y - Richtung ebenso wie die Geschwindigkeiten \dot{x} und \dot{y} in beide Raumrichtungen mit in die Berechnung ein. Die Auslegung der Feder-/ Dämpferelemente erfolgt so, dass ein künstliches Schwingen der Beladungsmasse verhindert wird. Dies entspricht in der Realität einer plastischen Verformung der Beladung. Die Federkonstante c und die Dämpfungskonstante d werden zusammen mit der Punktmasse nach diesem Kriterium ausgelegt. Das Wirken der Kräfte unterliegt gewissen Bedingungen, so wirkt die Trommelkraft nur auf die Beladung, wenn diese die Trommelwand berührt. Diese Bedingung wird über die Position der Beladung abgefragt.

$$\begin{aligned} F_{Trommel} > 0 \text{ wenn } & \sqrt{x_{Beladung}^2 + y_{Beladung}^2} = r_{Trommel} \\ F_{Rippe} > 0 \text{ wenn } & |x_{Beladung} - x_{Rippe}| < 0,02m \text{ und} \\ & |y_{Beladung} - y_{Rippe}| < 0,02m \end{aligned} \quad (3-6)$$

Unter Zuhilfenahme bedingter Anweisungen wird durch Rückführung der Position die Kraft aktiviert bzw. deaktiviert. Ebenso geschieht dies mit der Rippenkraft. Bei annähernd gleicher Position von Rippe und Beladung wird auch diese Kraft aufgeschaltet.

Um eine gleichmäßige Fluidwiderstandskraft zu berechnen, wird eine laminare Strömung angenommen und mittels

$$F_{\omega} = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot v \cdot r_{Beladung} \quad (3-7)$$

berechnet [OBU09]. Neben der dynamischen Viskosität (η) wird die Geschwindigkeit der Beladung (v) und der Radius der Beladungspunktmasse ($r_{Beladung}$) zur Berechnung genutzt. Die Wirkung der Fluidkraft ist abhängig vom Füllstand. Der Füllstand wird demnach zur Aufschaltung der Kraft genutzt. Wenn sich die Beladung unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche befindet, wird im Modell diese Kraft aufgeschaltet, wenn

$$F_{\omega} > 0 \text{ wenn } y \leq -|r_{Trommel} - h_1| \quad (3-8)$$

erfüllt ist. Durch diese kontinuierliche Bewegung der Beladungsmasse inklusive der Kontaktkräfte entfällt die zusätzliche Modellierung der Zentrifugalkraft, da diese sich durch die Trägheit der Masse und die Beschleunigung durch die Rippen ergibt.

Der ausgetriebene Volumenstrom ermöglicht dann, die noch in der Beladung verbleibende gebundene Flotte zu berechnen. Durch (2-1) kann letztendlich die Restfeuchte berechnet werden. Bild 3-9 zeigt das Restfeuchtemodell in einem Blockschaltbild. Der Massenstrom aus der gebundenen Flotte wird dabei in Abhängigkeit der gebundenen Flotte und der Winkelgeschwindigkeit der Trommel berechnet.

In Kombination mit dem Laugenbehälter- und Saugmodell kann so eine Mengengleichung des Fluids im Laugenbehälter aufgestellt werden, um zu jedem Simulationsschritt die Restfeuchte in der Beladung sowie die Massen der gebundenen und freien Flotte berechnen zu können.

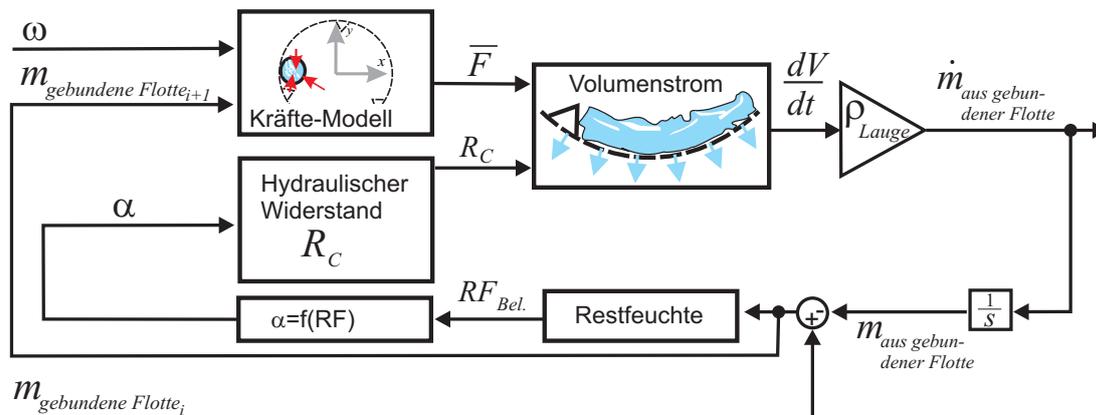


Bild 3-9: Blockschaltbild des Restfeuchtemodells

Blockschaltbild des Aggregats

Die beschriebenen Teilmodelle des Laugenbehälters, des Saugverhaltens und der Restfeuchte werden in einem vereinfachten Blockschaltbild des Aggregats in Bild 3-10 zusammengefasst. In diesem werden die ein- und auslaufenden Massenströme des Aggregats über eine Massenbilanz abgebildet. Die Eingänge Massenstrom, Wasser (\dot{m}_{Wasser}) und Lauge (\dot{m}_{Lauge}) kommen aus dem Einlaufsystem. Abhängig von der Befüllung und Programmanwahl wird hier zwischen Wasser und Lauge unterschieden. Den dritten Eingang stellt der Fördermassenstrom der Pumpe dar ($\dot{m}_{Laugenpumpe}$), welcher die freie Flotte abpumpt. Die freie Flotte wird

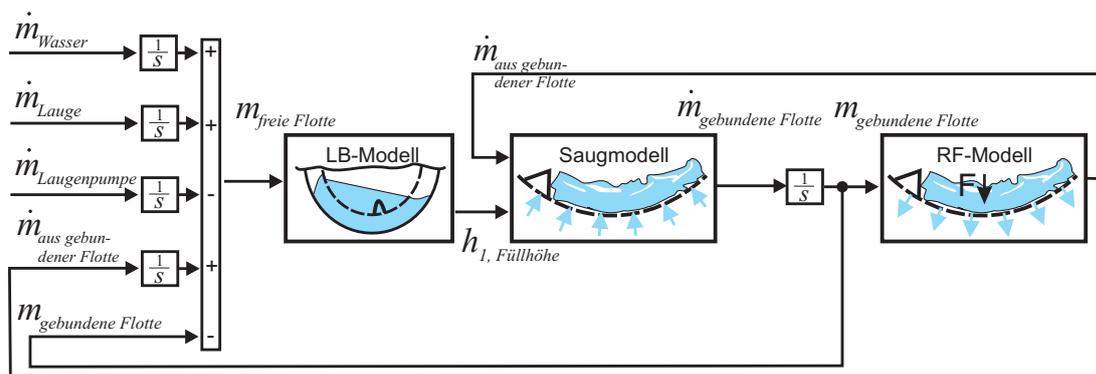


Bild 3-10: Blockschaltbild des fluidmechanischen Aggregatmodells

aus der Integration der verschiedenen Massenströme und deren Summe berechnet. Die Masse der freien Flotte ($m_{freie Flotte}$) stellt den Eingang in das Laugenbehältermodell, welches daraus die Füllhöhe ($h_{1, Füllhöhe}$) berechnet und dem Saugmodell übergibt. Abhängig von der Füllhöhe und der Restfeuchte wird im Saugmodell ein

Massenstrom an die gebundene Flotte berechnet. Die Restfeuchte wird im Saugmodell aus den Massenströmen $\dot{m}_{aus\ gebundener\ Flotte}$ und $\dot{m}_{gebundene\ Flotte}$ berechnet. Der Massenstrom aus dem Saugmodell wird integriert und an das Restfeuchtemodell übergeben. Die von der Beladung aufgenommene gebundene Flotte muss von der freien Flotte subtrahiert werden. Im Restfeuchtemodell wird in Abhängigkeit von den auf die Beladung wirkenden Kräften, der Beladungsart und der gebundenen Flotte der Massenstrom aus der gebundenen an die freie Flotte und damit an den Laugenbehälter berechnet ($\dot{m}_{aus\ gebundener\ Flotte}$). Dieser wird an das Summationsglied zurückgeführt.

Ablaufsystem

Das Ablaufsystem besteht aus der Strömungsmaschine und der Leiteinrichtung, wobei die Strömungsmaschine von einem kleinen Elektromotor angetrieben wird. Dieses fluidmechanische Teilsystem hat die Aufgabe, das Laugengemisch aus dem Laugenbehälter in das Abwassersystem zu befördern. Als Eingangsgröße in die Strömungsmaschine geht der Massenstrom des Laugengemisches ein, welcher von der Strömungsmaschine gefördert wird. Dieser stellt auch den Ausgang aus der Leiteinrichtung und damit aus dem System Waschautomat dar, siehe Bild 3-11. Darüber hinaus zeigt das Bild die verschiedenen Komponenten der Leiteinrichtung, welche maßgeblich für die hydraulischen Verluste des Fördermassenstroms verantwortlich sind: der Verbindungsschlauch, die Rücklaufsicherung, der Ablaufschlauch, der Krümmer und die Höhendifferenz der Ablaufhöhe gegenüber der Strömungsmaschine.

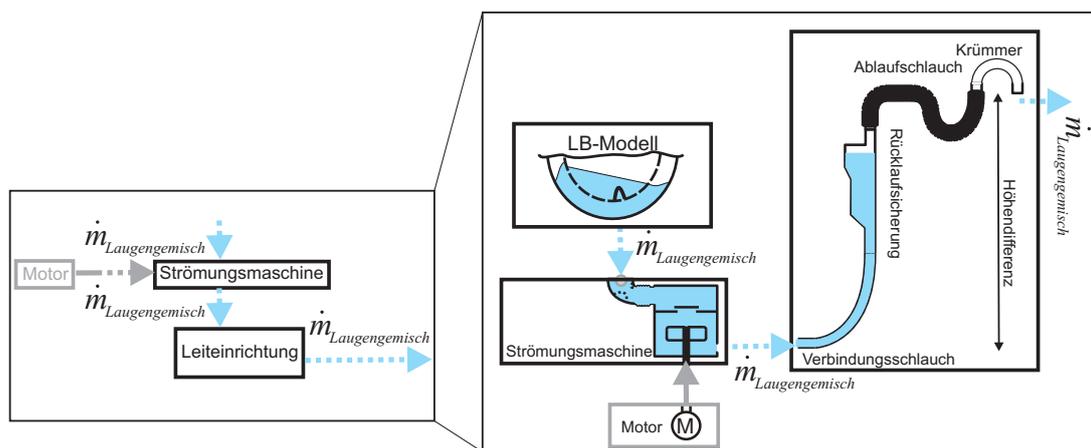


Bild 3-11: Ablaufsystem im Waschautomaten

Der Massenstrom aus dem Waschautomaten wird in Abhängigkeit der Schaufelarbeit, der Strömungsverluste und der Förderhöhe berechnet. Diese Zusammen-

hänge können mittels der *Bernoulli*-Gleichung (3-9) beschrieben werden, unter der Annahme eines reibungsfreien Fluids [Kal95, PP86].

$$\underbrace{\rho \cdot \frac{c_{st}^2}{2}}_{\text{Förderdruck}} = \underbrace{\rho \cdot Y_{\text{Schaufel}}}_{\text{Förderleistung Pumpe}} - \underbrace{\rho \cdot g \cdot \Delta h}_{\text{Druckverluste Höhendifferenz}} - \underbrace{\sum_{i=1}^{n_{\text{Komponente}}} \zeta_i(Re, Geo.) \cdot \rho \cdot \frac{c_{st,i}^2}{2}}_{\text{hydraulische Druckverluste}}$$

(3-9)

Dabei stellt Y_{Schaufel} die spezifische Schaufelarbeit der Strömungsmaschine dar. Mit der Multiplikation der Fluidichte ρ ergibt dies die Förderleistung bzw. den erzeugten Druck. Dieser muss die unterschiedlichen hydraulischen Widerstände in der Leiteinrichtung überwinden, um das Fluid aus dem System fördern zu können. Diese Widerstände setzen sich aus den Druckverlusten durch die Höhendifferenz und den hydraulischen Verlusten zusammen. Die hydraulischen Verluste werden über die Widerstandszahl ζ beschrieben. Diese ist von Geometrien der Komponenten, den darin auftretenden Strömungsverhalten (*Reynoldszahl*) und der Strömungsgeschwindigkeit c_{st} abhängig. In Abhängigkeit der Förderleistung und der Verluste resultiert der Förderdruck des Ablaufsystems, welcher die Energiebilanz vervollständigt.

Damit wird die Beschreibung der Modellbildung des fluidmechanischen Modells abgeschlossen. Die Parametrierung ist Gegenstand von Kapitel 4. Im Folgenden wird die Wärmeübertragung im Waschautomaten betrachtet.

3.2.2 Wärmeübertragung

Die Wärmeübertragung ist ein Teilgebiet der Thermodynamik, in dem der Wärmefluss über die Systemgrenzen durch drei unterschiedliche Übertragungsarten stattfindet. Die Wärmeübertragung erfolgt durch Strahlung, Konvektion und Leitung, wobei die Wärmeübertragung bei Konvektion und Leitung linear von der Temperaturdifferenz abhängt. Auf Basis dieser Grundübertragungsarten werden Bilanzräume für die einzelnen Komponenten erstellt und über die Wärmeströme miteinander verbunden.

Bei der Modellbildung der Wärmeübertragung im Waschautomaten spielen viele Faktoren zusammen, die Einfluss auf die Wärmeverteilung haben. Einerseits sind es die kalorischen Zustandsgrößen der einzelnen Komponenten wie Beladungsmenge, Beladungsart, Bauart des Waschautomaten und verwendete Werkstoffe. Andererseits wirkt sich die Art der Wärmeübertragung auf die aufgeführten Komponenten und auf die Umgebung unterschiedlich aus.

Als kalorische Zustandsgröße spielt hier die spezifische Wärmekapazität (c_p) die wichtigste Rolle. Sie beschreibt, wie viel Energie einem Element mit der Masse eines Kilogramms in Form von Wärme zugeführt werden muss, um die Temperatur des Elements um ein *Kelvin* zu erhöhen [BS08]. Die spezifische Wärmekapazität kann in kleinen Temperaturbereichen bei bestimmten Materialien, die in den Temperaturbereichen zwischen 0-95 °C keine Phasenumwandlung erfahren, als nahezu konstant angenommen werden. Dazu gehören wie in diesem Fall z. B. Metalle und Textilien. Für die Erfassung der Wärmeenergie Q , die ein Körper mit Masse m aufnimmt oder abgibt, gilt die folgende Gleichung:

$$Q = c_p \cdot m \cdot (T_{ist} - T_{start}). \quad (3-10)$$

Diese Gleichung beschreibt die gespeicherte Wärmeenergie, sagt aber nichts über den Wärmefluss bzw. darüber aus, wie die Wärmeenergie in die Masse geflossen ist. Im Folgenden wird auf die Wärmeübertragung durch Konvektion und Leitung näher eingegangen, weil diese für die Modellbildung benötigt werden. In den meisten Fällen treten diese beiden Übertragungsarten gemeinsam auf und werden deshalb auch zusammengefasst, dies ist zulässig weil beide linear von der Temperatur abhängig sind. Der Wärmestrom \dot{Q} , z. B. durch die Laugenbehälterwand, ist demnach:

$$\dot{Q} = k_{LB} \cdot A_{LB} \cdot (T_{LB_i} - T_{LB_a}) \quad (3-11)$$

mit

$$\frac{1}{k_{LB}} = \frac{1}{\alpha_{frFl}} + \frac{d_{LB}}{\lambda_{LB}} + \frac{1}{\alpha_{Umgebung}}. \quad (3-12)$$

Dabei ist k_{LB} der Gesamt-Wärmeübergangskoeffizient, A_{LB} ist die Laugenbehälterfläche, α_{frFl} der Wärmeübergangskoeffizient von der freien Flotte an die Laugenbehälterwand, λ_{LB} der Wärmeleitkoeffizient durch die Laugenbehälterwand mit der Dicke d_{LB} und $\alpha_{Umgebung}$ stellt den Wärmeübergangskoeffizienten von der Laugenbehälterwand an die Umgebung dar. Das Bild 3-12 zeigt die beschriebenen Zusammenhänge an einem schematischen Temperaturverlauf durch den Laugenbehälter. Die vorgestellten Grundlagen beschreiben die stationäre Wärmeübertragung, diese ist von der Zeit unabhängig.

Zur Modellbildung der Wärmeübertragung werden die folgende Randbedingungen festgelegt: Die Wärmeübertragung erfolgt anhand der drei genannten Übertragungsarten, also ohne Stoffflüsse. Es wird angenommen, dass die freie und die gebundene Flotte bereits im System vorhanden ist und im System verbleibt. Eine Voraussetzung für das Aufstellen der Bilanzräume ist, dass zwischen der freien und gebundenen Flotte nur Wärmeübertragung und keine Stoffübertragung

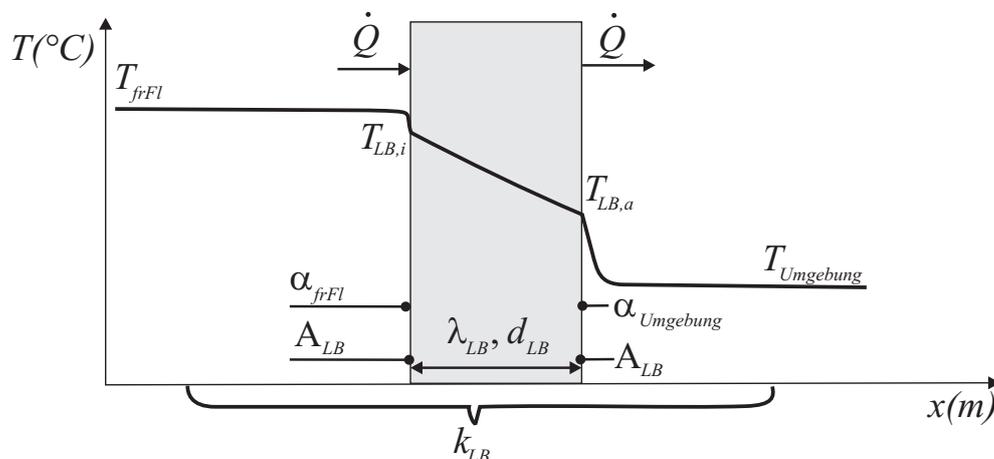


Bild 3-12: Temperaturverlauf beim Wärmedurchgang von der freien Flotte durch die Laugenbehälterwand an die Umgebung

stattfindet. Durch die getroffenen Annahmen wird ein Wärmeübertragungsmodell unabhängig vom Stoffübertragungsmodell aufgestellt und analysiert. Das Bild 3-13 zeigt das Teilmodell der Wärmeübertragung für die freie Flotte und die damit direkt verbundenen Energieflüsse im Waschautomaten.

Der Energieeintrag in die freie Flotte erfolgt durch die Heizung (\dot{Q}_{Heizung}) und die Waschmechanik ($\dot{Q}_{\text{Waschmechanik}}$). Dabei heizt der Rohrheizkörper die freie Flotte und die Waschmechanik die gebundene Flotte auf. An dem Rohrheizkörper befindet sich ein Sensor, welcher die Temperatur der freien Flotte erfasst. Von der freien Flotte findet eine Wärmeübertragung an die gebundene Flotte (\dot{Q}_{geFl}), die Beladung ($\dot{Q}_{\text{Beladung}}$)², die Waschtrommel ($\dot{Q}_{\text{Waschtrommel}}$)² und den Laugenbehälter (\dot{Q}_{LB}) statt. Vom Laugenbehälter wird diese über Konvektion und Strahlung an die Umgebung ($\dot{Q}_{\text{Umgebung}}$) abgegeben. Die Richtungen der Wärmeströme hängen von der Temperaturdifferenz ab. Die Wärmeenergie fließt immer zu dem Objekt mit niedrigerer Temperatur. Zum Beispiel ist zu Beginn die freie Flotte kälter als der Laugenbehälter und wird deshalb von diesem aufgewärmt. Während der Aufheizphase wird der Laugenbehälter von der freien Flotte erwärmt.

Anhand der beschriebenen Wärmeströme im Waschautomaten wird eine Gesamtbilanz der Wärmeenergie erstellt. Diese zeigt die Komplexität der Temperaturent-

²Auf eine Darstellung dieser Größen wird verzichtet, um die Übersichtlichkeit zu bewahren.

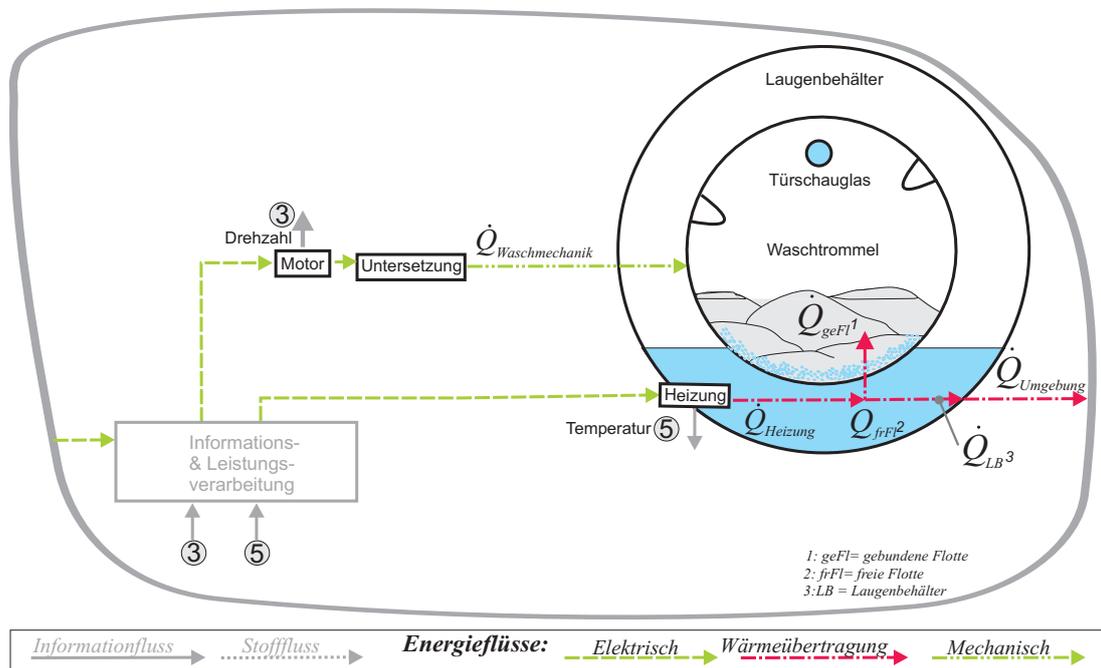


Bild 3-13: Teilmodell der Wärmeübertragung im Waschautomaten

wicklung von den Bauteilen, der Beladung und der Waschflotte und wird mittels folgender Bilanzformel für die gesamte Waschphase beschrieben:

$$\begin{aligned}
 Q_{frFl} = & \sum_{i=1}^n \int_{t_{Heizungan,i}}^{t_{Heizungaus,i}} \dot{Q}_{Heizung} dt - \int_{t_0}^t \dot{Q}_{LB} dt \\
 & - \int_{t_0}^t \dot{Q}_{geFl} dt - \int_{t_0}^t \dot{Q}_{Beladung} dt - \int_{t_0}^t \dot{Q}_{Waschrommel} dt.
 \end{aligned} \quad (3-13)$$

Zur Modellierung der Temperatur der freien Flotte wird die Bilanzgleichung zur Wärmeenergie der freien Flotte Q_{frFl} umgestellt, weil diese Temperatur vom Sensor erfasst wird. Ein Energiefluss von der Heizung an die freie Flotte findet nur bei eingeschalteter Heizung statt (siehe Integralgrenzen). Der Energieeintrag aus der Waschmechanik findet nur bei eingeschaltetem Motor statt und geht direkt in die gebundene Flotte. Erst durch die Bewegung der Beladung findet eine Umwandlung der kinetischen Energie in Wärmeenergie statt. Diese wird von der gebundenen Flotte aufgenommen. Die Integralgrenzen der restlichen Bilanzräume verlaufen über den gesamten Waschprozess. Die Temperaturberechnung der freien Flotte erfolgt mittels der Gleichung (3-13), welche zu der gesuchten Größe T_{frFl} umgestellt wird. Das Bild 3-14 fasst die beschriebenen Zusammenhänge in einem Blockschaltbild zusammen.

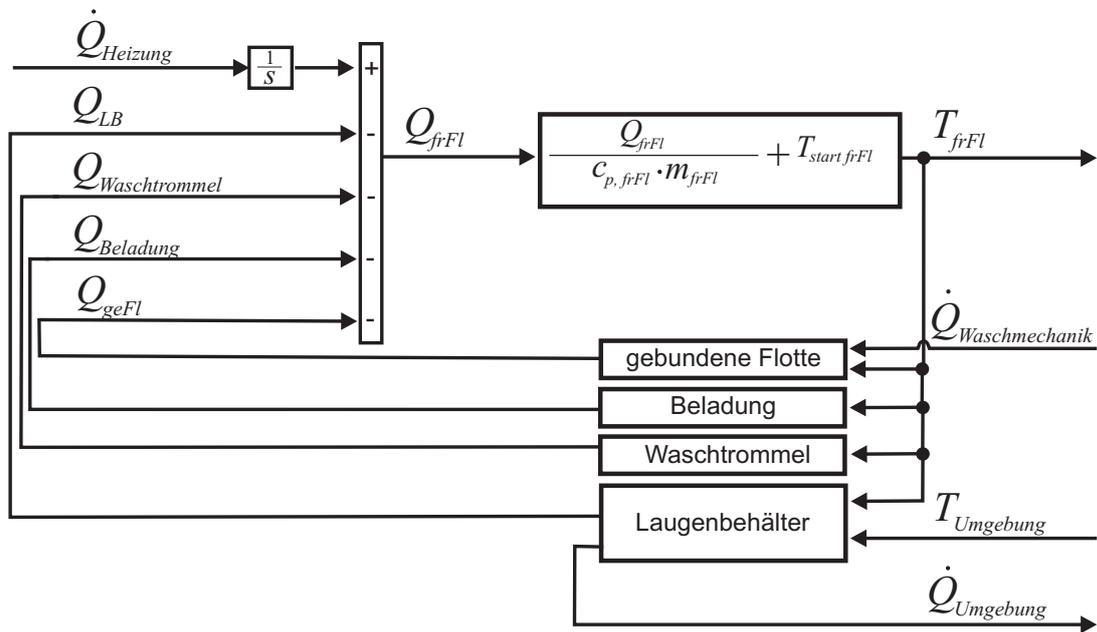


Bild 3-14: Blockschaltbild des Wärmeübertragungsmodells

Im Wärmeübertragungsmodell werden die instationäre und die stationäre Wärmeübertragung betrachtet. Die instationäre Übertragung tritt verstärkt während der Heizphase auf und wirkt sich entscheidend auf die nachfolgende, annähernd stationäre Waschphase aus. Dabei wird nicht auf die üblichen Berechnungsmethoden der instationären Wärmeübertragung zurückgegriffen, sondern ein Modell aufgebaut, das die Wärmeströme dynamisch mit den Methoden der stationären Wärmeübertragung simuliert. Das instationäre Verhalten wird durch die Wärmespeicherung der einzelnen Komponenten im Waschautomaten einbezogen. Als Beispiel soll die Wärmeübertragung von der freien Flotte auf den Laugenbehälter betrachtet werden.

Um ein instationäres Übertragungsverhalten abzubilden, wurde der Wärmetransport nicht wie üblich von der freien Flotte durch die Laugenbehälterwand auf die Umgebung berechnet, sondern bis zur Wandmitte ($k_{frFl-M, LB}$), wo idealisiert die Wärmeenergie im Laugenbehälter gespeichert wird. Von der Wandmitte wird der Wärmestrom an die Umgebung ($k_{M, LB-Umgebung}$) berechnet. Bild 3-15 zeigt die schematische Modellierung des Wärmetransports. Dieses Vorgehen wird am Beispiel der Wärmeübertragung von der freien Flotte an den Laugenbehälter im Blockschaltbild 3-16 dargestellt. Dabei handelt es sich um das Teilmodell des Laugenbehälters aus dem Blockschaltbild 3-14 des Wärmeübertragungsmodells.

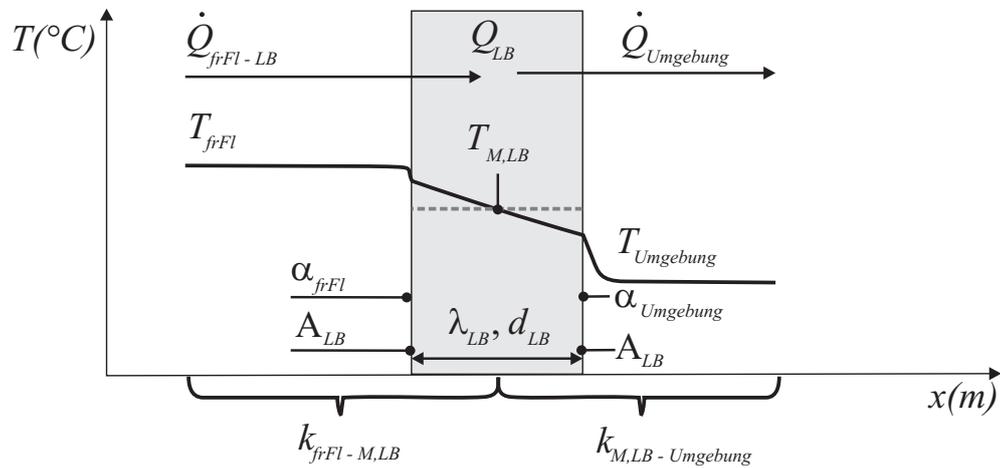


Bild 3-15: Modellierung des stationären und instationären Wärmedurchgangs von der freien Flotte an den Laugenbehälter und an die Umgebung

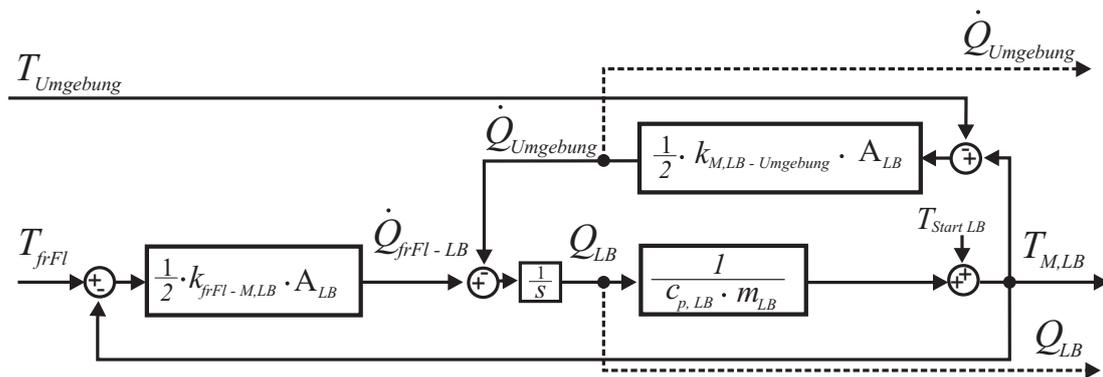


Bild 3-16: Blockschaltbild der Wärmeübertragung von der freien Flotte an den Laugenbehälter

Die Eingangsgrößen stellen die Temperaturen T_{Umgebung} und T_{frFl} dar. Anhand dieser werden die Ausgangsgrößen: Wärmestrom $\dot{Q}_{\text{Umgebung}}$, Wärmemenge Q_{LB} und die mittlere Temperatur des Laugenbehälters $T_{\text{M, LB}}$ berechnet.

Aus der Differenz $T_{\text{frFl}} - T_{\text{M, LB}}$ multipliziert mit dem Wärmedurchgangskoeffizient $k_{\text{frFl-M, LB}}$ und der Laugenbehälterfläche A_{LB} , welche in Kontakt mit dem Fluid steht, wird der Wärmestrom an den Laugenbehälter $\dot{Q}_{\text{frFl-LB}}$ berechnet. Durch eine Integration über die Zeit wird daraus die Wärmemenge. Aus der vorhandenen Wärmemenge, der Wärmekapazität $c_{\text{p, LB}}$, der Masse m_{LB} des Laugenbehälters und seiner Starttemperatur $T_{\text{Start LB}}$ wird dessen aktuelle Temperatur berechnet. Der Wärmefluss an die Umgebung wird aus der Differenz $T_{\text{M, LB}} - T_{\text{Umgebung}}$ und dem dazugehörigen Wärmedurchgangskoeffizient $k_{\text{M, LB-Umgebung}}$ und der Laugenbehälterfläche A_{LB} berechnet. Gleichzeitig muss $\dot{Q}_{\text{Umgebung}}$ von der Wärmemenge des Laugenbehälters abgezogen werden. Das vorgestellte Blockschaltbild für die Wärmeübertragung weist eine PT1-Charakteristik auf, welche durch eine Umformung des Blockschaltbildes 3-16 in 3-17 deutlich wird. Durch die Umstel-

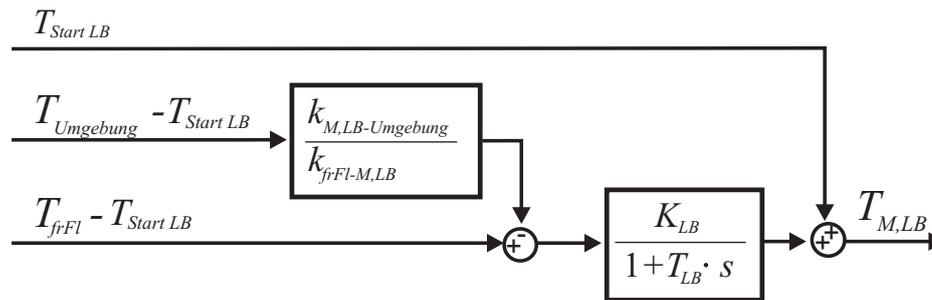


Bild 3-17: Umgeformtes Blockschaltbild der Wärmeübertragung von der freien Flotte an den Laugenbehälter zur Darstellung des Übertragungsverhalten

lung kann das Übertragungsverhalten mittels regelungstechnischer Größen wie dem Verstärkungsfaktor (K_{LB}) und der Zeitkonstante (T_{LB}) charakterisiert werden. Dabei stellt die Differenz zwischen T_{Umgebung} und $T_{\text{Start LB}}$ die Störgröße im System dar. Die Starttemperatur des Laugenbehälters $T_{\text{Start LB}}$ gibt die Referenztemperatur des Laugenbehälters an und stellt einen Durchgriff im System dar. Der Verstärkungsfaktor und die Zeitkonstante des Systems ergeben sich wie folgt:

$$K_{\text{LB}} = \frac{k_{\text{frFl-M, LB}}}{k_{\text{frFl-M, LB}} + k_{\text{M, LB-Umgebung}}} \quad \text{und}$$

$$T_{\text{LB}} = \frac{m_{\text{LB}} \cdot c_{\text{p, LB}}}{A_{\text{LB}} \cdot (k_{\text{frFl-M, LB}} + k_{\text{M, LB-Umgebung}})}$$

Bei einer Sprunganregung der freien Flotte von 23 °C auf 24 °C, bei einer Umgebungstemperatur von 23 °C, weist das System eine Verstärkung von 0,9315 und

eine Zeitkonstante von 348,28 auf. Damit zeigt das System ein träges Verhalten, wenn nur die Wärmeübertragung durch Leitung bei geringen Differenztemperaturen betrachtet wird.

Der Vorteil dieser Herangehensweise an die Modellbildung der instationären Wärmeübertragung liegt in ihrer Zeitinvarianz. Üblicherweise werden Probleme der instationären Wärmeübertragung durch das komplementäre Gauß'sche Fehlerintegral gelöst [VDI06]. Dieser Ansatz ist jedoch zeitabhängig und damit für ein dynamisches Modell ungeeignet. Dieses Modell ist sowohl im stationären als auch im instationären Wärmeübertragungsbereich gültig.

Mit dieser Vorgehensweise ist es möglich, die Wärmeströme jeder Komponente des Waschautomaten physikalisch zu modellieren und durch Energiebilanzen die Temperaturen zu simulieren. Ein weiterer Vorteil dieser Herangehensweise ist die Echtzeitfähigkeit des Modells, weil hier auf die Abbildung der partiellen Temperaturfelder durch rechenaufwendige FEM-Modelle verzichtet wird. Mit dieser Vorgehensweise der Modellierung wird ein instationäres echtzeitfähiges Modell der Wärmeübertragung aufgestellt. Es beinhaltet die messbaren Systemgrößen, welche anschließend validiert werden können und so zum Prozessverständnis beitragen.

3.2.3 Wärme- und Stoffübertragung

In den vorhergehenden Abschnitten wurde die Fluidmechanik im Waschautomaten losgelöst von der Wärmeübertragung betrachtet, um die Prozesse abstrahieren, analysieren und modellieren zu können. Im realen Prozess finden beide Vorgänge gleichzeitig statt und beeinflussen sich gegenseitig. Die Wärme aus der Umgebung wird über den Stofftransport in den Laugenbehälter gebracht (Bild 3-18). Während der Durchfeuchtungs- und der Waschphase findet eine permanente Stoff- und Wärmeübertragung zwischen der freien und gebundenen Flotte statt. Diese Übertragung geschieht in beide Richtungen abhängig von den Druck-, Temperatur- und Konzentrationsunterschieden im System. Darüber hinaus spielen hier die Stoffeigenschaften, die Strömungen und die Geometrie der Übertragungsflächen eine Rolle. Nach Beendigung der jeweiligen Waschphase wird die freie Flotte mit der gespeicherten Wärmeenergie über die Strömungsmaschine aus dem System abgepumpt.

Das Bild 3-18 zeigt die Wärme- und Stoffübertragung zusammen in einer Darstellung. Jeder Massenstrom hat Einfluss auf die Wärmebilanz, wohingegen die Wärmeflüsse nur die Fließeigenschaften (dynamische Viskosität des Fluids) beeinflussen, unter der Annahme, dass sich der Aggregatzustand des Fluids nicht ändert. Die berechneten Temperaturen der jeweiligen Fluide werden an das fluidmechanische Modell übergeben und über die dynamische Viskosität in das Modell

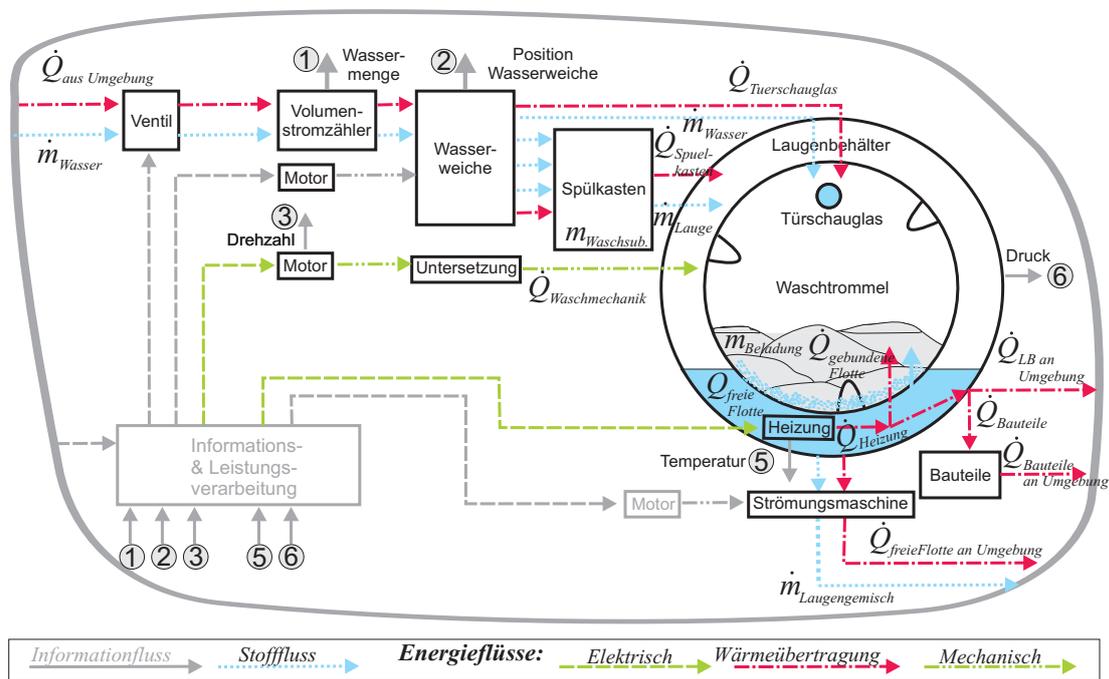


Bild 3-18: Kopplung der Teilmodelle zum Wärme- und Stoffübertragungsmodell im Waschautomaten

eingebunden. Die Temperatur der gebundenen Flotte hat maßgeblichen Einfluss auf die Restfeuchte beim Schleudern. Zur Kopplung der beiden Teilmodelle gilt es, die Bilanzgleichung (3-13) der Wärmeübertragung um die Massenströme aus dem fluidmechanischen Teilsystem zu erweitern. Zur Berücksichtigung der Massenströme wird die Bilanzgleichung (3-14) um den Wärmestrom $\dot{Q}_{\text{ausUmgebung}}$ in das System und $\dot{Q}_{\text{anUmgebung}}$ aus dem System erweitert. Damit entfällt die im vorangegangenen Abschnitt 3.2.2 getroffene Annahme der konstanten Massen. Die andere Vereinfachung war, dass die Wärmeübertragung zwischen der freien und gebundenen Flotte nur über Wärmeleitung erfolgt. Diese Vereinfachung ist ebenso nicht mehr notwendig, weil die Stoffmassenströme \dot{m}_{geFl} und \dot{m}_{ausgeFl} aus dem fluidmechanischen Modell bekannt sind. Mit der Kopplung der beiden Modelle wird die Bilanzgleichung (3-14) zu einem Wärme- und Stoffübertragungsmodell erweitert:

$$\begin{aligned}
 Q_{frFl} = & \int_{t_{\text{Heizungan}}}^{t_{\text{Heizungaus}}} \dot{Q}_{\text{Heizung}} dt + \int_{t_0}^t \dot{Q}_{\text{ausUmgebung}} dt - \int_{t_0}^t \dot{Q}_{LB} dt \\
 & - \int_{t_0}^t \dot{Q}_{geFl} dt - \int_{t_0}^t \dot{Q}_{Beladung} dt - \int_{t_0}^t \dot{Q}_{anUmgebung} dt - \int_{t_0}^t \dot{Q}_{Waschtrommel} dt
 \end{aligned}
 \tag{3-14}$$

mit

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{ausUmgebung} &= c_{p,Wasser} \cdot \dot{m}_{Wasser} \cdot \Delta T \text{ und} \\ \dot{Q}_{anUmgebung} &= c_{p,Wasser} \cdot \dot{m}_{Laugengemisch} \cdot \Delta T.\end{aligned}\quad (3-15)$$

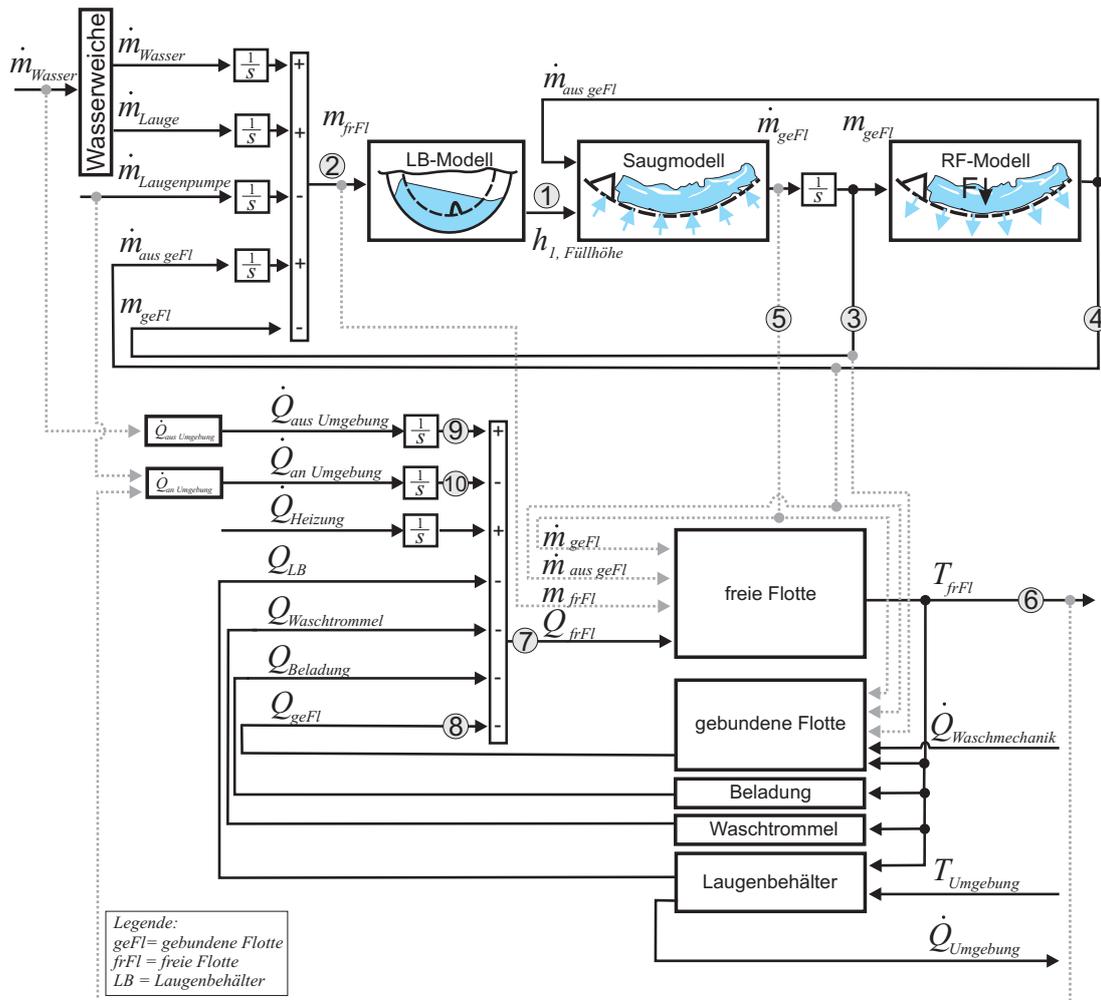


Bild 3-19: Blockschaltbild des Wärme- und Stoffübertragungsmodells

Zur Kopplung werden den Massenströmen die dazugehörigen Temperaturen zugewiesen. In Abhängigkeit der zulaufenden (\dot{m}_{Wasser}) und ablaufenden Massenströme ($\dot{m}_{Laugengemisch}$) werden die Energieströme in die jeweiligen Bilanzräume berechnet, wie z. B. in die Bilanzgleichung der freien Flotte. Über die zu- und abgeführte Wärmeenergie (Bild 3-19, Punkte 8, 9 und 10) wird die Wärmeenergie der freien Flotte erhöht oder abgesenkt.

Anhand der vorhandenen Energie in der freien Flotte (7) wird über die stoffspezifische Wärmekapazität und der im Bilanzraum vorhandenen Masse (2) die

Temperatur der freien Flotte berechnet (6). Diese Berechnung basiert auf der Annahme einer optimalen Durchmischung im System. Diese Annahme ist notwendig, um die Temperatur berechnen zu können. Andernfalls müsste die freie Flotte in mehrere Bereiche unterteilt werden, um die Wärme- und Stoffübertragung zwischen diesen Bilanzräumen berechnen zu können. Die Schwierigkeit liegt in der anschließenden Validierung, der Simulation der turbulenten Spaltströmung und der Echtzeitfähigkeit dieser Simulation.

Der Nutzen einer solchen Simulation rechtfertigt nicht den Aufwand, weil durch diese nur der Aufheizvorgang besser abgebildet werden könnte. Für ein gleichmäßiges und damit gutes Waschergebnis ist die durchschnittliche Waschttemperatur über die gesamte Waschphase relevant, also wenn die Beladung mit der Waschlafte optimal durchmischt ist. Deshalb ist hier die Annahme einer homogenen Durchmischung im System sinnvoll.

3.2.4 Mechanik

Als mechanisches Teilmodell des Waschautomaten wird ein aus [LSF⁺11] in Dymola entwickeltes MKS-Modell in das bestehende Gesamtmodell eingebunden. Im Modell wird die Schwingdynamik des Aggregates abgebildet (siehe Abschnitt 2.3.1), welches über Feder- und Dämpferelemente im Gehäuse aufgehängt ist. Als Eingangsgröße geht in das mechanische Teilmodell das Antriebsmoment des Motors ein, welches über eine Untersetzung die Waschtrommel antreibt. Das mechanische Teilmodell wird über die Beladungsmasse, die gebundene und die freie Flotte mit dem fluidmechanischen Teilmodell gekoppelt. Als Ausgangsgröße wird die Aggregatsauslenkung zur Unwuchtdetektierung zurückgegeben (Bild 3-20).

Das Aggregat stellt ein schwingungsfähiges System dar, das durch die auftretenden, oszillierenden Unwuchtkräfte³ angeregt wird. Insbesondere in Bereichen der translatorischen Resonanzfrequenzen führt dies zu hohen Beschleunigungen bzw. Kräften in den Aufhängungen des Aggregates. Durch die kompakte Bauweise bei modernen Maschinen sowie hohe Beladungsmengen ist eine Voraussage der maximalen Aggregatsschwingungsamplituden aufgrund der nichtkonstanten Gesamtmasse und der somit nichtkonstanten Resonanzfrequenzen nicht möglich. Hinzu kommt, dass die eingebrachte Beladung bei jedem Waschprozess variiert und aufgrund der Beladungsverteilung während des Schleuderhochlaufs die ausgetriebene Wassermenge und damit die Gesamtmasse variiert.

Das mechanische Teilmodell besteht aus einem starren Gehäuse, das Wanderbewegungen auf einem reibungsbehafteten Untergrund ausführen kann. Am Gehäuse sind die Ankoppelemente, bestehend aus vier linearen Federelementen $F_{c,i}$

³Diese können aufgrund von ungleichmäßiger Beladungsverteilung und unterschiedlichen oder wasserundurchlässigen Beladungsarten hervorgerufen werden.

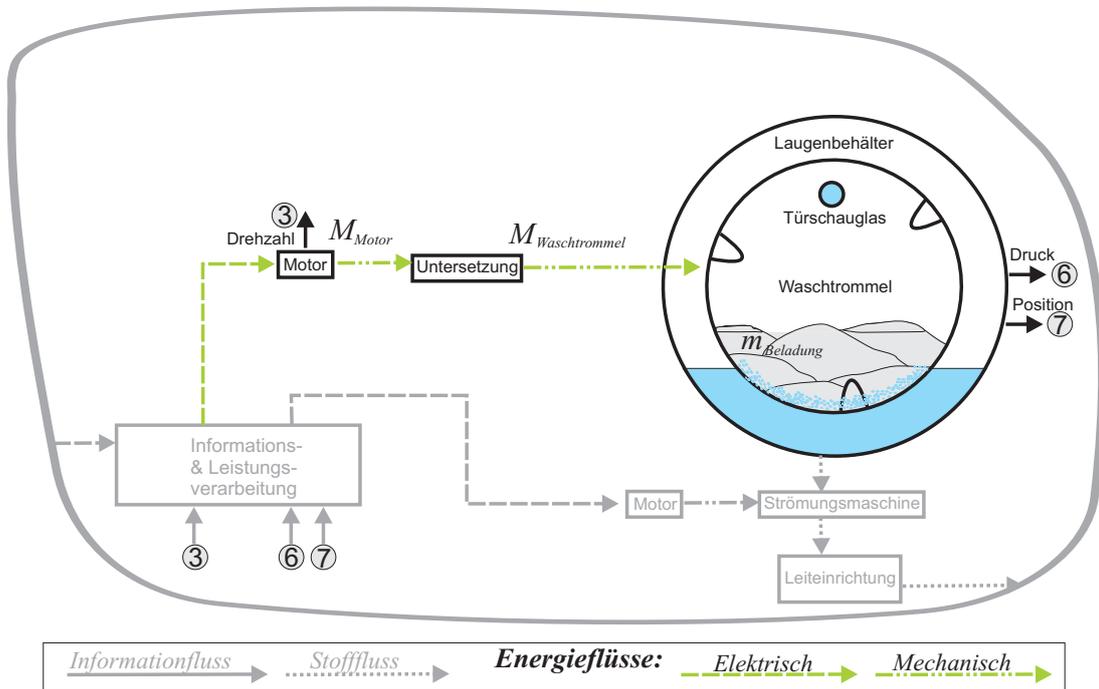


Bild 3-20: Mechanisches Teilmodell des Waschautomaten

an der Ober- und drei nichtlinearen Reibungsdämpfern $F_{d,i}$ an der Unterseite, angebunden (Bild 3-21).

Die mathematischen Grundlagen zur Beschreibung des Verhaltens der Reibungsdämpfer sind in (3-16) bis (3-18) dargestellt:

$$F_{d,i} = F_{viscous,i} + F_{coulomb,i}, \quad (3-16)$$

$$F_{viscous,i} = k_{reib} \cdot v_{rel} \text{ und} \quad (3-17)$$

$$F_{coulomb,i} = (F_{coulomb,Reibung} + (F_{Haft} - F_{coulomb,Reibung}) \cdot e^{-c|v_{rel}|}) \cdot \text{sign}(v_{rel}). \quad (3-18)$$

Die Dämpfungskraft $F_{d,i}$ teilt sich in eine geschwindigkeitsabhängige und eine reibungsabhängige Kraft auf. Die geschwindigkeitsabhängige Kraft $F_{viscous,i}$ wird aus dem Produkt der relativen Dämpfergeschwindigkeit v_{rel} und dem Beiwert der viskosen Reibkraft k_{reib} berechnet. Die reibungsabhängige Kraft $F_{coulomb,i}$ hat einen konstanten Anteil $F_{coulomb,Reibung}$ ausgehend von der Festkörperreibung und eine Haftkraft F_{Haft} , welche die Reibung im Stillstand und bei geringen Geschwindigkeiten beschreibt. Die Haftkraft wird mit einer Exponentialfunktion multipliziert.

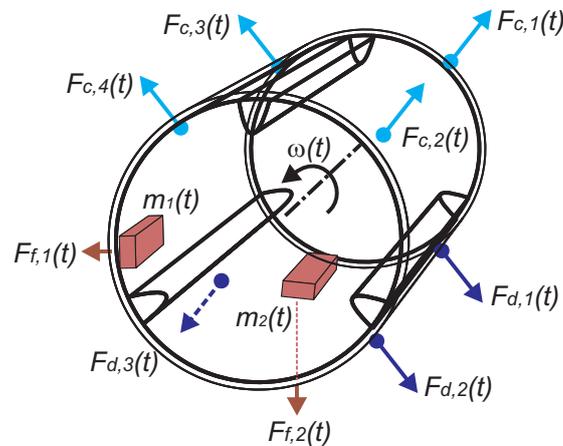


Bild 3-21: Prinzip-Skizze des mechanischen Teilmodells

Diese beschreibt die Kraftabnahme durch den Abklingkoeffizienten c mit zunehmender relativer Geschwindigkeit v_{rel} . Die Summe der reibungsabhängigen Kräfte wird anschließend mit der Signum-Funktion von v_{rel} multipliziert, um sicherzustellen, dass die Kräfte immer der Bewegung entgegenwirken.

Der Laugenbehälter wird an definierten Punkten über die Feder-Dämpfer-Elemente im Gehäuse angebracht. An diesem sind diverse Teile befestigt wie z. B. die Kontergewichte, das Lagerkreuz, der Motor sowie diverse Kleinteile. Die Waschtrommel wird über ein rotatorisches Gelenk eingebracht und mit dem Steuereingang des Momentes als Schnittstelle zum Antriebsmotor versehen. Die Einbringung der Zentrifugalkraft $F_{f,i}(t)$ erfolgt mittels Punktmassen, die über zeitvariante Masse $m_i(t)$, Lage $\underline{x}_{Tr,i}(t)$ und Entwässerungsverhalten der Beladung \underline{p}_W in (3-19) parametrisiert werden

$$F_{f,i}(t) = f(\omega(t), m_i(t), \underline{x}_{Tr,i}(t), \underline{p}_W). \quad (3-19)$$

3.2.5 Aktoren und Sensoren

Die Aktor- und Sensormodelle sind das Verbindungsglied zwischen dem Strecken- und dem Steuergerätemodell und Teil des Streckenmodells. In den Aktoren wird die elektrische Energie in kinetische Energie umgewandelt und damit die gewünschten Stelleingriffe im System realisiert. Dadurch wird die Systemdynamik gezielt eingestellt, welche über die Sensoren gemessen und an das Steuergerät zurückgeführt wird. Dabei werden in der Regel physikalische Systemgrößen in ein digitales oder analoges Signal umgewandelt. Die vorhandenen Aktoren und Sensoren besitzen keine Schnittstelle zur Umgebung.

Das vorgestellte System des Waschautomaten verfügt über sechs Aktoren und acht Sensoren. Hierbei handelt es sich um die minimale Anzahl an vorhande-

nen Sensoren und Aktoren. Bild 3-22 zeigt die Anordnung dieser im System. Die Aktoren sind dabei das Einlaufventil (a), der Wasserweichenmotor (b), der Waschtrommelmotor (c), das Türschloss (d), die Heizung (e) und der Strömungsmaschinenmotor (f). Die Sensoren im System sind der Flügelradsensor (1), der Positionssensor der Wasserweiche (2), der Tachogenerator des Waschtrommelmotors (3), der Kontaktsensor am Türschloss (4), der Temperatursensor am Heizstab (5), der Drucksensor im Laugenbehälter (6), der Unwuchtsensor am Laugenbehälter (7) und der Wassersensor (8) in der Bodenwanne des Waschautomaten.

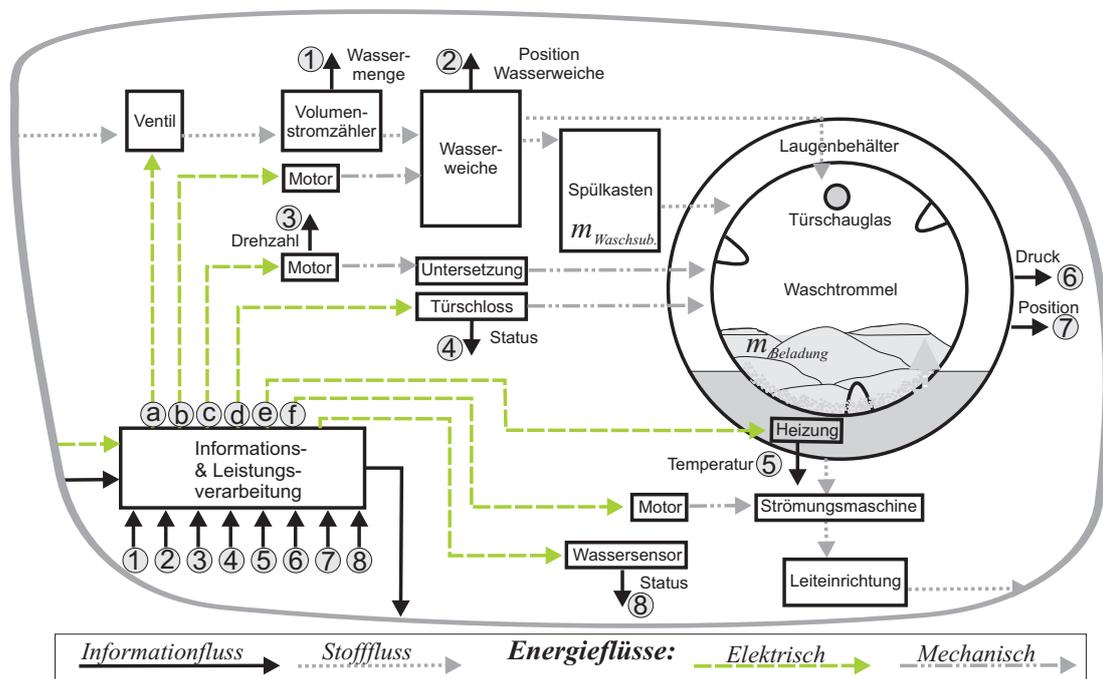


Bild 3-22: Teilmodell der Aktoren und Sensoren des Waschautomaten

Bei der Modellbildung der Sensoren gilt es, die physikalischen Systemgrößen in die entsprechenden Sensorsignale zu überführen. Beim Wassermengensensor müssen in Abhängigkeit des Massenstroms die Flügelradimpulse in Form eines Rechtecksignals mit definierten Puls-Pause-Verhältnissen nachgebildet werden. Beim Positionssensor der Wasserweiche ist ein Zustandsautomat notwendig, um die verschiedenen Zustände abzubilden. Für andere Sensoren wie z. B. den Drehzahl-, den Unwucht- und den Temperatursensor müssen die Spannungsverläufe für die jeweiligen Betriebszustände mittels Kennlinien abgebildet werden. Beim Wasser- und Türschlosssensor ist ein Relais ausreichend, welches die angelegte Phase in Abhängigkeit des Zustandes schaltet.

Das Festlegen der richtigen Modellierungstiefe bei den Aktoren ist zu Beginn der Modellbildung schwierig, weil die gesamte Systemdynamik durch die Wechselwirkungen aller Systemgrößen geprägt wird. Deshalb werden bei der Modellierung der Aktoren zunächst deren Stelleingriffe auf das System abgebildet. Aus den Stelleingriffen wird der Energieverbrauch der Aktoren berechnet und daraus eine Gesamtenergiebilanz des Waschautomaten. Die Gesamtenergiebilanz des Waschautomaten wird primär von der Heizung und vom Waschtrommelmotor beeinflusst, wobei die aus der Heizung eingebrachte Energie im Wärme- und Stoffübertragungsmodell abgebildet wird. Dementsprechend gilt es, den Waschtrommelmotor und seine Leistungsbilanz abzubilden.

Die Waschtrommel wird von einem Asynchronmotor angetrieben und über den Schlupf vom Steuergerät geregelt. Über einen Frequenzumrichter gibt das Steuergerät die Motorspannung und die Frequenz vor, welche von der Ist-Frequenz und damit vom Last- und Trägheitsmoment in der Waschtrommel abhängig sind. Zur Modellbildung werden die Spannungs-Differentialgleichungen der allgemeinen Drehfeldmaschine für Stator- und Rotorkreis verwendet [Sch07]:

Bei den anderen beiden Antrieben, dem Wasserweichenmotor und dem Motor der Strömungsmaschine, handelt es sich um kleine Antriebe, welche über ein Gleichstrommotormodell abgebildet werden. Das Einlaufventil besteht aus einer Magnetspule, einer Feder, einem Eisenkern und einer Membran, sodass diese als ein Massenschwinger mit Feder-Dämpfer-Element in Reihe geschaltet abgebildet wird. Ähnliches gilt auch für das Türschloss. Durch die Abbildung der Aktoren, also der Verbraucher, und Sensoren entsteht eine Energiebilanz des Waschautomaten.

3.3 Modellierung der Regelung und Steuerung des Waschautomaten

In diesem Abschnitt wird auf die Modellierung der Regelungs- und Steuerungstechnik des Waschautomaten eingegangen. Die Schnittstellen des Steuerungsmodells mit dem Streckenmodell sind die Sensoren und die Aktoren, welche in Abschnitt 3.2.5 und in Bild 3-22 vorgestellt wurden. Im Gegensatz zur physikalischen Modellbildung des Streckenmodells ist hier eine andere Vorgehensweise notwendig. Zur Abbildung der Prozesslogik kommen etablierte Methoden und Modellierungstechniken aus der Softwaretechnik zum Einsatz.

Zur Modellierung der Steuerungs- und Regelungstechnik sind sowohl kontinuierliche als auch diskrete Modelle notwendig. Mittels kontinuierlicher Modelle werden Regelalgorithmen simuliert und entwickelt. Mit endlichen Automaten werden ereignisdiskrete Modelle erstellt, welche den gesamten Systemablauf strukturieren

und hierarchisieren. Ein Automat besteht aus Zuständen und Zustandsübergängen. Abhängig von den Eingangsgrößen können in Zuständen Aktionen durchgeführt werden, welche eventuell Zustandsänderungen zur Folge haben.

Eine gebräuchliche Form zur Darstellung von endlichen Automaten sind Zustandsdiagramme (engl. Statecharts). Hauptnotationselemente sind Zustände, Zustandsübergänge (auch Transitionen) und Aktionen. Es wird unterschieden zwischen Entry-, During- und Exit-Aktionen. Ein Zustand kann mehrere ausgehende Transitionen haben, welche sich durch verschiedene Bedingungen voneinander unterscheiden. Die Reihenfolge der Überprüfung dieser Bedingungen lässt sich flexibel vorgeben, weitere Details sind in [Har86] zu finden.

Durch komplexe Zustände kann ein Zustandsdiagramm hierarchisiert werden. Einzelne komplexe Zustände können wiederum eigene Zustände oder ganze Zustandsdiagramme enthalten. Solche Zustände werden auch als Superzustände bezeichnet, während die Zustände der untergeordneten Ebene Unterzustände genannt werden. Definierte Daten für einen Zustand auf beliebiger Hierarchieebene sind nur für diesen und alle untergeordneten Zustände sichtbar und zum Verarbeiten verfügbar. Die Hierarchisierung stellt die Grundlage für das Konzept der Komposition dar. Zuständen kann entweder die Eigenschaft der seriellen oder parallelen Anordnung von Unterzuständen zugewiesen werden. Eine Parallelanordnung ermöglicht mehrere Signalflüsse gleichzeitig und schafft somit Spielraum zur Modellierung äußerst komplexer Systeme. Aufgrund ihrer flexiblen, hierarchischen und effizienten Darstellung werden Zustandsdiagramme für die Modellbildung verwendet.

Die Gestaltung eines Modells mittels Zustandsdiagrammen kann sehr unterschiedlich vorgenommen werden. Dabei treten zwei Fälle auf. Einerseits kann man Diagramme erstellen, die aus einer starren Abfolge von einzelnen Zuständen bestehen. In diesem Fall ist nur ein Zustand aktiv und wird wieder inaktiv, sobald eine Bedingung einer Transition zu einem anderen Zustand erfüllt ist. Die Vorteile eines solchen Aufbaus sind einfache Nachvollziehbarkeit und geringe Ausfallwahrscheinlichkeit. Im Allgemeinen wird das Modell für größere Abbildungen jedoch tendenziell unübersichtlich, da zunehmend mehr Elemente verwendet werden müssen. Teilweise kann es vorkommen, dass Zustände mehrfach eingebracht werden müssen, da die starre Kopplung die wiederholte Verwendung eines Zustands zu verschiedenen Zeitpunkten nicht ermöglicht. Es liegt nahe, dass der Aufwand für eventuelle Änderungen relativ groß ausfällt, wenn sie an Teilen des Modells erfolgen, die mehrfach vorkommen. Dadurch, dass jeder Zustand nur einmal modelliert wird, muss bei Änderungen nur dieser angepasst werden. Er hat keine Auswirkungen auf andere Zustände, weil er nur eine Funktion abbildet.

Die andere Modellierungsmöglichkeit ist eine möglichst kompakte Darstellungsweise, bei der alle Zustände einmalig modelliert werden. Diese Zustände können

dann mehrmalig aufgerufen werden, dabei muss dann sichergestellt werden, dass die gewählte Modellierung alle Anwendungsfälle hinreichend berücksichtigt. Das erreicht man durch eine lose Kopplung der Hauptzustände, indem diese parallel angeordnet werden. Eine solche Vorgehensweise ist zwar übersichtlicher, aber sowohl Ablauf als auch Zusammenhänge und Abhängigkeiten werden mit zunehmender Verschachtelung komplexer. Bei Änderungen am Modell muss mit einer größeren Vorsicht herangegangen werden als es bei der Aneinanderreihung von Einzelzuständen der Fall ist. Das liegt vor allem daran, dass sich Parallelzustände gegenseitig beeinflussen und kleine Veränderungen größere Kettenreaktionen verursachen können. Wesentlicher Vorteil dieser Vorgehensweise ist die allgemeinere Anwendbarkeit, da die lose Kopplung einer integrierten Entscheidungsfunktion entspricht. Dadurch macht es ein solches Modell möglich, zahlreiche Varianten des abgebildeten Prozesses darzustellen. Zwischen diesen beiden Darstellungsmöglichkeiten gibt es diverse Mischformen, welche die Komplexität weiter erhöhen. Auf diese wird im folgenden nicht eingegangen.

Anhand der beschriebenen Darstellungsmöglichkeiten wurde ein möglichst kompakter Aufbau erarbeitet. Dabei wurde auf folgende Punkte ein besonderer Schwerpunkt gelegt:

- Allgemeingültigkeit: Abbildung sämtlicher Waschprogramme im selben Modell.
- Erweiterbarkeit: Einfaches Hinzufügen weiterer Komponenten und Prozesse.
- Übersichtlichkeit: Einmaliges Abbilden einzelner Prozesse.

Auf Grundlage der Prozessbeschreibung aus Abschnitt 2.3.2 wird ein Zustandsdiagramm erstellt, das im Superzustand *Programm* drei parallele Superzustände *Phasen*, *Prozesse* und (die als Gruppe zusammengefasst) *AktorenSensoren* enthält. Es wird Bezug genommen auf die Hierarchie der Zustände. Die zum Zweck der Erklärung definierte oberste Ebene ist der Zustand *Programm*, welcher alle weiteren Zustände enthält, die zur Modellierung der Ablaufsteuerung notwendig sind. Die Ebene darunter enthält die drei Waschphasen *Vorwäsche*, *Hauptwäsche* und *Spülen*. Jede dieser Phasen lässt sich wiederum unterteilen in alle im Modell integrierten Prozesse, welche ihrerseits mit den Aktoren und Sensoren kommunizieren. Das Bild 3-23 zeigt das Zustandsdiagramm. Im Folgenden wird die Programmlogik auf Ebene der Superzustände gezeigt und schematisch erläutert.

Die (nicht sichtbaren) Verbindungen zwischen den Superzuständen *Phasen*, *Prozesse*, *AktorenSensoren* stellen die Informationsflüsse im Modell dar. Aufgrund der parallelen Anordnung erfolgen die Informationsflüsse nicht mittels direkter Transitionen, sondern mittels aufgerufener Ereignisse. Das ermöglicht einerseits, dass mehrere Zustände unter demselben Befehl angesprochen werden können, an-

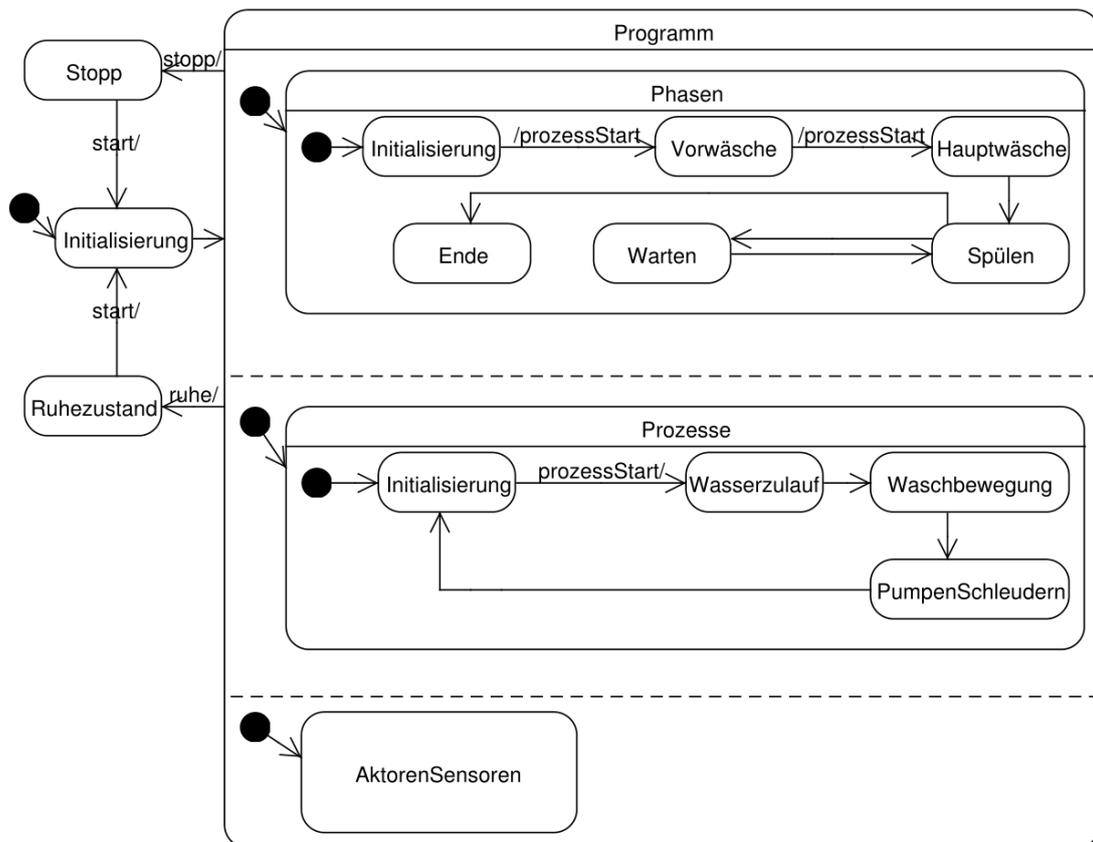


Bild 3-23: Zustandsdiagramm des Waschautomaten

dererseits führt es zu einer höheren Komplexität und schlechteren Lesbarkeit von Zustandsbeziehungen. Bei der Modellierung der Kommunikation ist ein besonderes Maß an Sorgfalt notwendig, damit es zu keinen Widersprüchen kommt.

Aufgrund der Programmvielefalt und der Verschachtelung des Waschprogramms, in dem einzelne Prozesse mehrmalig unter anderen Voraussetzungen ausgeführt werden, müssen die Parameter beschrieben und geeignet übergeben und Variablen besetzt werden. Die Zustandsaufrufe und deren Abarbeitung müssen also in einer bestimmten Reihenfolge geschehen, damit die Zustände schließlich mit den richtigen Datensätzen abgearbeitet werden. Aus diesem Grund wird die Interaktion der Superzustände so realisiert, dass Signalflüsse nur zwischen angrenzenden Programmzuständen möglich sind. Einzige Ausnahme bildet das Ereignis *stopp*, welches sinngemäß ein Not-Aus darstellt und deshalb aus allen Zuständen heraus angesprochen werden kann.

Ein Waschprogramm lässt sich anhand des Zustandsdiagramms aus Bild 3-23 abbilden und beschreiben. Nach dem Start findet eine Initialisierung statt, in dieser

werden die Parameter geladen und der Zustand *Programm* ausgeführt. Der Zustand *Programm* besteht aus drei parallelen Superzuständen, welche gleichzeitig gestartet werden. Im Superzustand *Phasen* wird beim Übergang zum Zustand *Vorwäsche* gleichzeitig über *prozessStart* der Prozess gestartet. Aus dem Zustand *Wasserzulauf* werden die notwendigen Sensoren und Aktoren angesteuert und ausgewertet. Nachdem eine Bedingung zum Beenden des gegenwärtigen Prozesses erfüllt ist, werden die Aktoren und Sensoren verlassen. Im anschließenden Prozess *Waschbewegung* werden die notwendigen Sensoren und Aktoren aktiviert. Das gleiche Prinzip wiederholt sich. Dieser Prozess läuft durch bis zur Initialisierung. Beim Übergang zur *Hauptwäsche* und zum *Spülen* passiert das gleiche. Das Waschprogramm wird im Modell durch dieses sequentielle Zustandsprinzip der parallel angeordneten Superzustände in Kombination mit den Ereignissen realisiert.

In diesem Abschnitt wurde somit die Modellierung des Steuer- und Regelalgorithmus sowie die Vor- und die Nachteile verschiedener Strukturierungsprinzipien vorgestellt. Dabei wurde eine Top-Down-Modellierung mittels Zustandsdiagrammen in einer kompakten Darstellung festgelegt. Die Vorteile dieser Modellierung sind Allgemeingültigkeit, Erweiterbarkeit und Übersichtlichkeit.

3.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die systematische Modellbildung des Waschautomaten vorgestellt. Der besondere Schwerpunkt lag dabei auf der Modellbildung der Wärme- und Stoffübertragung im Gesamtsystem. Die Modellierung dieser Transportphänomene über den gesamten Prozess wurde in dieser Arbeit zum ersten Mal durchgeführt. Um dieses komplexe System abbilden zu können, wurde die Modellbildung systematisch und strukturiert durchgeführt. Zu Beginn wurde das System Waschautomat von seiner Umgebung freigeschnitten. Auf Grundlage dieser Schnittstellen wurde eine Wirkstruktur und damit eine Hierarchie des Waschautomaten aufgestellt. Anhand dieser wurden die Systemzusammenhänge in Form von Informations-, Energie- und Stoffflüssen dargestellt. Auf Basis dieser Schnittstellen wurden qualitative Modelle der einzelnen Domänen erstellt. Die Modellbildung erfolgt signalflussorientiert. Diese Modelle sind Zustandsmodelle, welche einen rückwirkungsfreien (gerichteten) Signalfluss haben, siehe dazu Abschnitt 2.2.1. Durch die Einbindung der objektorientierten Dymola-Modelle entsteht ein qualitatives hybrides Zustandsmodell des Waschautomaten in Form eines DAE-Systems.

Nachdem das qualitative Modell des Waschautomaten aufgestellt wurde, gilt es dieses im nächsten Kapitel in ein quantitatives Modell in einer Simulationsumgebung zu implementieren und zu validieren.

4 Simulation und Validierung

In diesem Kapitel wird das Modell des Waschautomaten, welches in Kapitel 3 erstellt wurde, parametrisiert und in *MATLAB/Simulink* simuliert. Die Simulationsergebnisse werden mit Messungen, welche am realen Waschautomaten gemacht wurden, validiert. *MATLAB/Simulink* ist ein etabliertes Simulationswerkzeug, welches über diverse Schnittstellen zu vielen anderen Softwarewerkzeugen und Hardwareplattformen verfügt. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit mit Simulink-Stateflow einen ereignisdiskreten Automaten mit einer kontinuierlichen Simulation in einer Simulationsumgebung zu koppeln. Damit steht eine etablierte und standardisierte Plattform für zukünftige Weiter- und Neuentwicklung zur Verfügung.

Die Simulation und die Validierung beziehen sich auf das Streckenmodell des Waschautomaten, da dieser Modellteil sowohl die Grundlage für die HiL-Simulation (Kapitel 5) als auch für die MiL-Simulation (Kapitel 6) darstellt. Beim Steuergerätemodell handelt es sich um ein vereinfachtes Modell des Seriensteuergeräts mit den vorentwicklungsrelevanten Funktionen. Die Regel- und Steueralgorithmen passen zu jedem Modell und können durch entsprechende Parametrierung flexibel für zukünftige Generationen eingesetzt werden. Die zum Verständnis notwendigen Regel- und Steueralgorithmen werden im Kapitel MiL-Simulation vorgestellt, eine Validierung dieser ist nicht möglich, weil es für diese keine Referenzmessungen gibt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Modell auf Grundlage eines bestehenden Waschautomaten erstellt. Unter dieser Prämisse werden im Folgenden die Simulation und die Validierung parallel durchgeführt, wobei die Validierung auf die messbaren Systemgrößen beschränkt ist. Im Waschautomatenmodell lassen sich nicht alle Größen, wie z. B. der massenspezifische Durchströmungswiderstand α , aus Messungen bestimmen, sondern müssen identifiziert werden. Die Parametrierung des Modells erfolgt anhand von Konstruktionsdaten, Datenblättern und vorhandenen Messdaten. Zur Übersicht beginnt das Kapitel mit einer Darstellung und Einteilung des Gesamtwaschprozesses in die drei Phasen. Dazu wird in Abschnitt 4.1 der Waschprozess anhand einer Messaufzeichnung vorgestellt und in die aus Abschnitt 2.3.2 bekannten Phasen unterteilt. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 4.2 die domänenspezifischen Teilmodelle simuliert und validiert. Der Schwerpunkt liegt auf der Wärme- und Stoffübertragung, weil diese den Neuigkeitswert dieser Arbeit darstellen. Ein schwer messbarer Parameter im Waschprozess ist die Restfeuchte. Die Simulation und Identifikation dieser Größe findet in Abschnitt 4.2.1 statt. Abschließend werden in Abschnitt 4.3 die Simulation

und die Validierung des Gesamtmodells vorgestellt und die erzielten Modellierungsergebnisse diskutiert. Nachdem das Streckenmodell validiert wurde, werden in Abschnitt 4.4 Simulationen zum Energieverbrauch und zum Waschergebnis vorgestellt. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse.

4.1 Vorstellung des Waschprozesses

Die wichtigsten messbaren Größen zur Beurteilung des Waschprozesses sind Temperatur-, Druck- und Drehzahlverlauf über die Zeit. Mittels dieser Verläufe und dem Zusammenhang zwischen diesen wird der Waschprozess beurteilt. Bis auf den Waschmitteleinfluss spiegeln die Verläufe den SINNERSchen Kreis wider: Temperatur, Wassermenge, Mechanik und Einwirkzeit (siehe dazu auch Abschnitt 2.3.3). Bild 4-1 zeigt den gemessenen Verlauf des gesamten Waschprozesses mit einer Kleinstbeladung Standard Load A anhand der Größen Temperatur, Druck und Drehzahl.

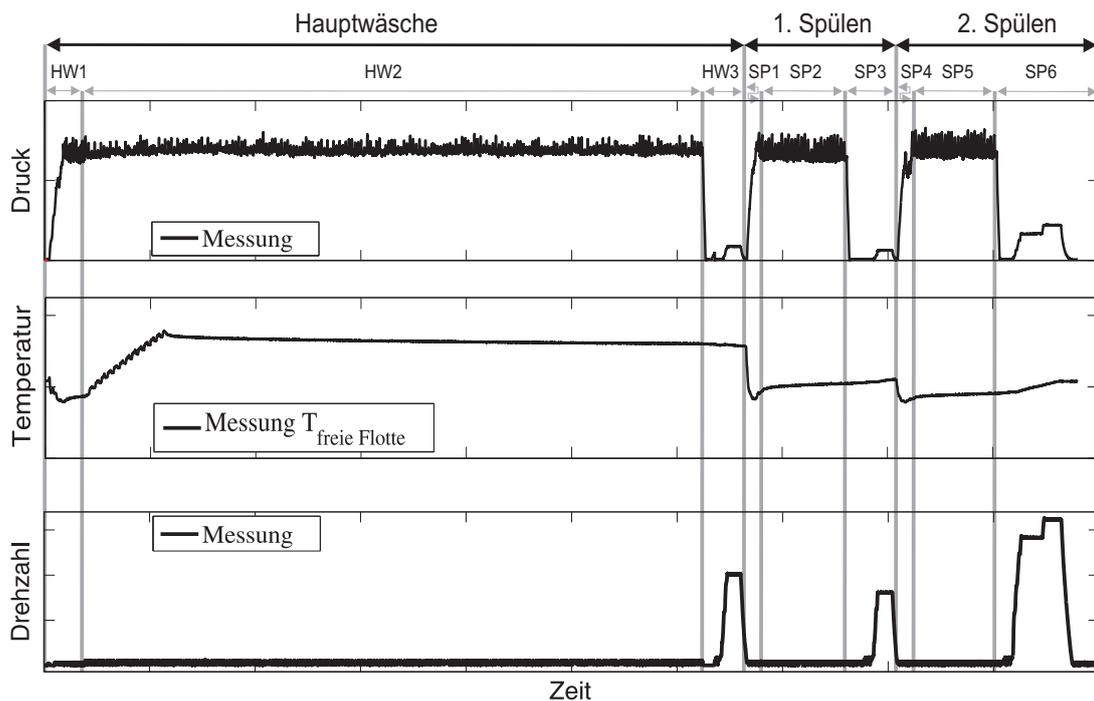


Bild 4-1: Gemessener Waschprozess einer Kleinstbeladung Standard Load A

Im Bild 4-1 sind die unterschiedlichen Phasen des Waschprozesses dargestellt: Hauptwäsche und Spülen mit ihrer jeweiligen Dauer (siehe dazu auch Abschnitt 2.3.2). Mit den Abkürzungen und Nummern eins bis sechs sind die Unterprozesse

gekennzeichnet: Wassereinlauf und Durchfeuchtung (HW1, SP1, SP4), Waschbewegung (HW2, SP2, SP5), Schleudern und Pumpen (HW3, SP3, SP6) in den jeweiligen Phasen. In der Darstellung fällt auf, dass die Vorwäsche nicht stattfindet. Diese wird vom Waschautomaten nur bei starker Verschmutzung vorgeschaltet oder muss zusätzlich angewählt werden. Aus diesem Messverlauf wird deutlich, dass sowohl die Phasen als auch die Unterprozesse unterschiedlich lang sind und ihre speziellen Charakteristiken haben. Im Folgenden werden anhand dieses Messverlaufs die unterschiedlichen domänenspezifischen Modelle erläutert und validiert. Eine Modellvalidierung über alle Programmanwahlmöglichkeiten, Temperatureinstellungen, Beladungsarten und Mengen – das wären 2240 Simulationen (siehe Abschnitt 1.1) – kann im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgen. Statt dessen wird das erarbeitete Modell anhand eines Beispiels detailliert vorgestellt und erläutert, um ein tieferliegendes Prozessverständnis für den Waschprozess zu schaffen.

4.2 Modellvalidierung der Teilmodelle

Die hier dargestellte Simulation und die Validierung der Teilmodelle finden in der gleichen Reihenfolge wie die Vorstellung der Modellbildung statt. Zuerst wird das fluidmechanische Teilmodell betrachtet, anschließend das Wärmeübertragungsmodell und dann die Kopplung beider Modelle. Das mechanische Modell ist validiert [LSF⁺11] und wird hier nicht weiter betrachtet, weil es auch nicht im Rahmen dieser Arbeit entstanden ist. Die Simulation und Validierung der Aktoren und Sensoren als Verbraucher findet in Abschnitt 4.4 statt.

4.2.1 Fluidmechanik

Das fluidmechanische Modell besteht aus den Teilsystemen Wasserzulauf, Laugenbehälter, Saugmodell, Restfeuchtemodell und Ablaufsystem. Die Validierung konzentriert sich auf die wesentlichen Teilmodelle: das Laugenbehälter-, das Saug- und das Restfeuchtemodell, weil diese die wichtigsten Waschkenngrößen abbilden. Beim Wasserzu- und -ablauf wird das Wasser bzw. Laugengemisch in und aus dem Laugenbehälter befördert, diese Volumenströme werden indirekt über die Druckänderung im Laugenbehälter erfasst. Im realen Waschprozess wird nur die Füllhöhe im Laugenbehälter gemessen, der Verlauf der Füllhöhe wird aber vom Laugenbehälter-, Saug- und Restfeuchtemodell beeinflusst. Um die einzelnen Einflüsse abbilden zu können, werden zunächst die einzelnen Modelle simuliert und validiert und anschließend als Gesamtmodell anhand des Drucksignals validiert.

Laugenbehältermodell

Die Simulation des Laugenbehältermodells erfolgt auf Basis der Gleichung 3-1. Diese berechnet in Abhängigkeit der Füllhöhe das Füllvolumen. Für die Simulation wird aber die Füllhöhe in Abhängigkeit des Füllvolumens im Laugenbehälter benötigt. Dazu muss die Gleichung nach h aufgelöst werden. Dies ist analytisch nicht möglich, sodass dieses Problem in ein numerisches Nullstellenproblem umgeschrieben werden muss. Das Nullstellenproblem wird iterativ mit dem Newton-Verfahren gelöst. Als Ergebnis wird die Füllhöhe des Laugenbehälters in Abhängigkeit der Laugenbehältergeometrie und des eingelaufenen Fluidvolumens berechnet.

Das Bild 4-2 zeigt die Simulation und Messung des Laugenbehältermodells. Dabei wird die Füllhöhe in Millimeter Wassersäule ($mmWs^1$) angegeben, diese stellt eine Hilfsgröße dar. In dem oberen Bild 4-2 wird der Laugenbehälter zur Hälfte mit Wasser gefüllt, dies entspricht ca. $250 mmWs$. Ein weiteres Füllen des Laugenbe-

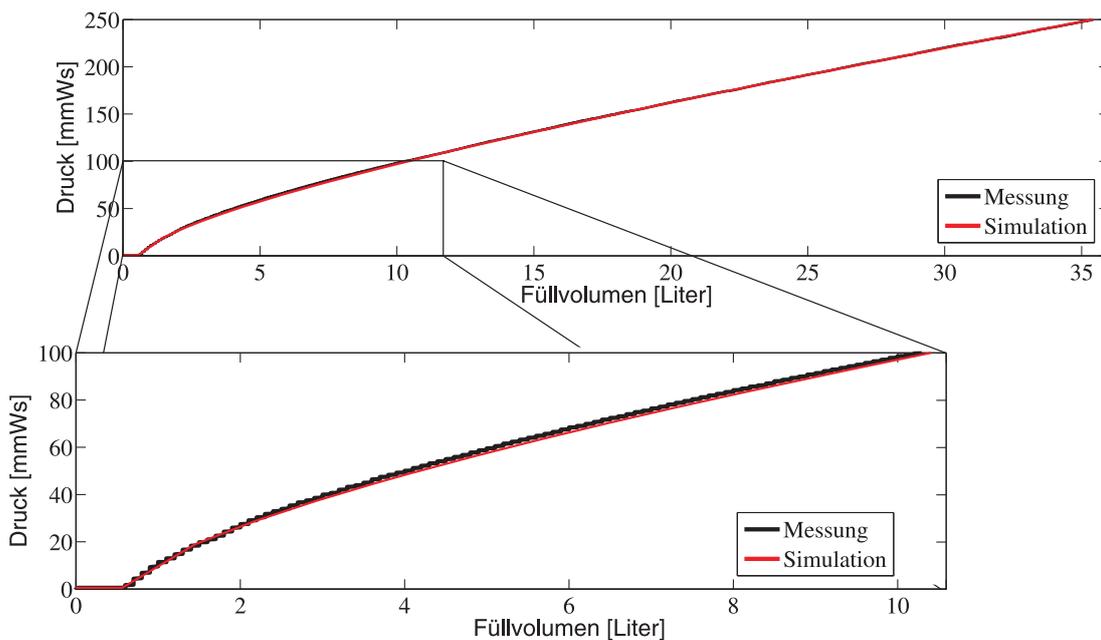


Bild 4-2: Simulation und Validierung des Laugenbehältermodells

hälters wird durch die Sicherheitseinstellungen des Steuergerätes verhindert und ist auch nicht betriebsrelevant. Der im Betrieb relevante Bereich (unteres Bild im Zoom) liegt bis ca. $100 mmWs$. Die Validierung zeigt eine sehr gute Übereinstimmung des Simulationsmodells mit dem realen Verlauf des Drucks über das

¹Zur Berechnung wird der statische Druck in *Pascal* $p = \rho \cdot g \cdot h$ durch die Erdbeschleunigung g und die Wasserdichte ρ geteilt und von Meter auf Millimeter skaliert.

Füllvolumen im Laugenbehälter für den statischen Druck. Bei der Messung wurde das Drucksignal in einer leeren Waschtrommel ohne Drehung ermittelt.

Nachdem das Laugenbehältermodell validiert wurde, wird daraus eine füllvolumenabhängige Kennlinie für die Füllhöhe extrahiert. Die ist notwendig, um die konstante Berechnungszeit im Gesamtmodell sicherzustellen. Mit dem validierten Modell können Änderungen an der Laugenbehältergeometrie simuliert und mittels dieser das Laugenbehältermodell angepasst werden. Mit diesem Modell wird nur der statische Druck berechnet, dieser berücksichtigt nicht die Waschtrommeldrehung – durch welche ein dynamischer Anteil hinzukommt. Dies erfolgt auf Basis der Gleichung (3-2). Das entstandene Laugenbehältermodell wird in einem Waschautomaten ohne Beladung validiert. Dabei findet ein normaler Wasserzulauf mit einer Waschtrommelreversierung statt, bei dem die Messungen mit dem Modell mit und ohne dynamischen Druckanteil verglichen werden. In Bild 4-3 sind die drei Druckverläufe und die Drehzahl der Waschtrommel als Messung dargestellt. Der gemessene Druckverlauf ist schwarz, das Modell mit dem statischen Druckverlauf rot gestrichelt und mit dem dynamischen Anteil als rot durchgezogene Linie dargestellt. Der Messverlauf zeigt eine sich wiederholende

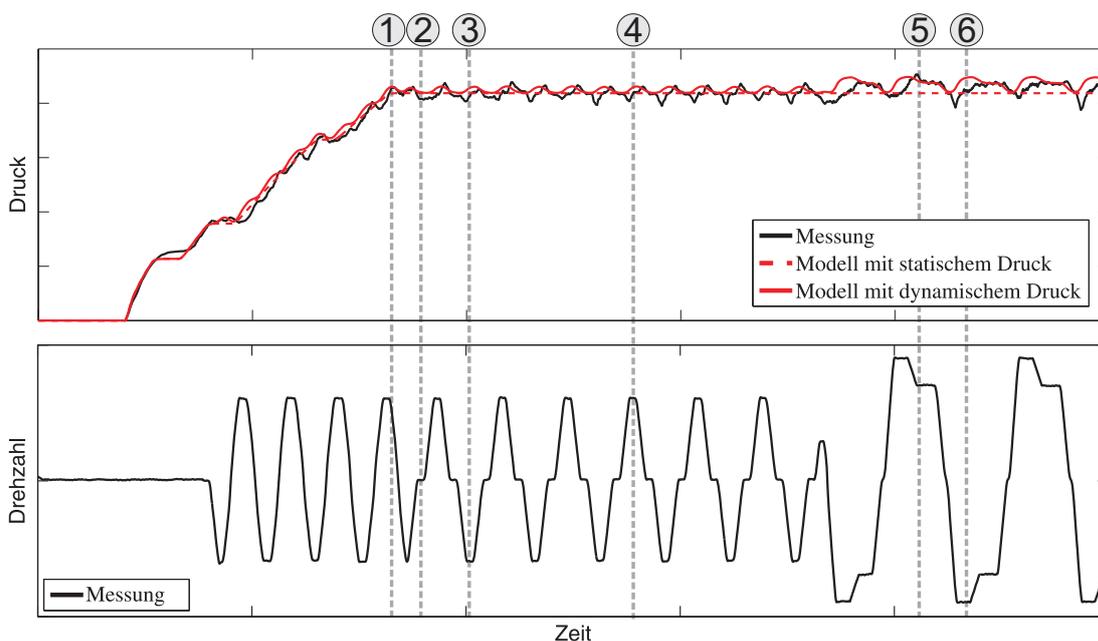


Bild 4-3: Simulation und Validierung des statischen und dynamischen Drucks im Waschprozess

Charakteristik im gemessenen Drucksignal für die verschiedenen Drehrhythmen. Der Druckverlauf mit dem dynamischen Anteil ist in der Simulation immer höher als der statische Druckverlauf, aufgrund des gewählten Modellierungsansatzes.

Beim Wasserzulauf, bis zum Punkt eins, liegen die drei Drucksignale sehr nah beieinander. Durch den Drehrichtungswechsel der Waschtrommel können bereits in diesem Bereich Druckerhöhungen und Abfälle im gemessenen Signal beobachtet werden. Diese kleinen Druckschwankungen aus der Fluidodynamik werden weder durch statische noch durch das dynamische Modell abgebildet. In dieser Phase fließt das Fluid über eine obere Öffnung des Laugenbehälters in diesen hinein und bringt zusätzliche potenzielle Energie in die freie Flotte, welche bei diesem Ansatz nicht berücksichtigt wird. Nichtsdestotrotz wird der Wasserzulauf mit beiden Druckmodellen gut abgebildet, wobei das statische Modell diese Phase etwas besser abbildet. Nach der Wasserzulaufphase ab Punkt eins bleibt der Druck im statischen Modell konstant auf einem Niveau, während beim dynamischen Modell der Druck drehzahlabhängig variiert. Bei Drehzahl Null, Punkt zwei, sind die Druckwerte der Modelle identisch. Auf dem Drehzahlplateau, Punkt drei, wird im dynamischen Modell eine Druckspitze erreicht. Dabei erreicht die freie Flotte in der Modellnahme den maximalen Pegel, was die zugrundeliegende Messung nur teilweise bestätigt. Zu diesem Zeitpunkt steigt zwar der Druck an, aber der Wert des dynamischen Modells wird nicht erreicht. Der gleiche Verlauf ist in Punkt vier zu beobachten, hier liegt das Drehzahlplateau in der anderen Reversierungsrichtung. Ein ähnlicher Verlauf nur mit höheren Druckspitzen aufgrund höherer Drehzahlen ist in den Punkten fünf und sechs dargestellt.

Im statischen Modell wird der Druck in Abhängigkeit des Füllvolumens berechnet. Das gemessene Drucksignal fällt bei Richtungsänderungen der Waschtrommel zeitweise unter den berechneten Modellwert. Zu diesem Zeitpunkt bricht das komplette nichtlaminare Strömungsfeld. Was genau zu diesem Zeitpunkt passiert, kann nur vermutet werden. Entweder entsteht lokal ein Saugeffekt oder die hohen Geschwindigkeiten haben einen Druckabfall zur Folge. Auf diese Effekte wird im weiteren Verlauf der Arbeit nicht weiter eingegangen, weil diese mit der Zunahme der Beladung messtechnisch nicht mehr erfasst werden können und vernachlässigbar sind. Die Validierung zeigt, dass beide Modelle den Druckverlauf richtig abbilden. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden beide Modelle genutzt. Das dynamische Modell wird für die Sensorsimulation genutzt, während die Füllhöhe aus dem statischen Modell an andere Teilmodelle wie z. B. an das Restfeuchte- und das Saugmodell übergeben wird. Die Validierung des Saugmodells entfällt, weil es sich um aufgenommene Kennlinien handelt. Deshalb geht es im Folgenden direkt zum Restfeuchtemodell.

Restfeuchtemodell

Im Saugmodell wird das aufgenommene Fluid berechnet und an das Restfeuchtemodell übergeben. Hier wird anhand der wirkenden Kräfte und der Bindung des

Fluids an die Beladung die Fest-Flüssig-Trennung zwischen Fluid und Beladung berechnet. Das ungebundene Fluid fließt zurück in die freie Flotte.

Im Restfeuchtemodell werden die wirkenden Kräfte und die dazugehörigen Trajektorien über (3-4) bis (3-7) berechnet. Bild 4-4 zeigt die wirkenden Kräfte, jeweils in x- und y-Richtung, auf die Beladung in einem Kraft-Drehzahl-Diagramm. Aus diesem Diagramm werden exemplarisch für drei Punkte die dazugehörigen Trajektorien (rot) der Beladung in der Waschtrommel (schwarz) dargestellt. Die gezeigten Kraftverläufe wurden für eine vollständige Umdrehung entlang der Trajektorie gemittelt. Zugrunde gelegt wurde eine Beladungs-Punktmasse von 1 kg. Im Punkt 1, bei einer geringen Drehzahl, wirken geringe Beschleunigungen, wodurch die Beladung wenig beschleunigt wird. Der Ablösepunkt für den freien Fall ist niedrig und damit auch die durchschnittlichen Kräfte. Diese erreichen ihr Maximum im Punkt 2: Hier löst sich die Beladung bei höheren Geschwindigkeiten ab einer höheren Ablösestelle und trifft seitlich auf die Waschtrommel. Hier ist die Aufprallkraft am höchsten. Durch eine weitere Zunahme der Drehzahl wandert der Ablösepunkt immer weiter nach oben, bis die Beladung an der Waschtrommel anliegt und nicht mehr gelöst wird. In der Folge nehmen die Kräfte in y-Richtung ab, siehe Punkt 3 im Bild 4-4. Ab dieser Drehzahl wird nur noch die Zentrifugalkraft betrachtet.

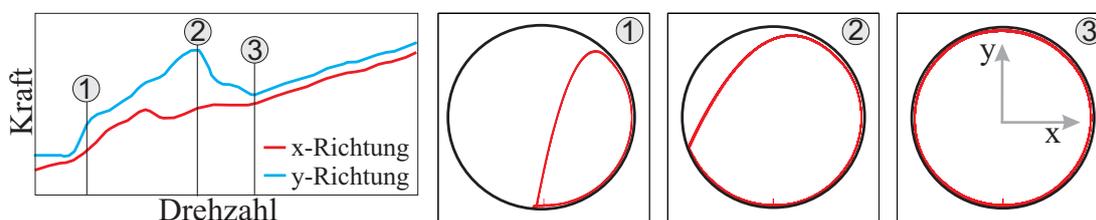


Bild 4-4: Simulation der wirkenden Kräfte auf die Beladung und die dazugehörigen Trajektorien bei unterschiedlichen Drehzahlen

Identifikation des massenspezifischen Durchströmungswiderstands

Anhand der wirkenden Kräfte und des hydraulischen Gesamtwiderstands wird der Massenstrom an die freie Flotte berechnet. Dieser ist vom massenspezifischen Durchströmungswiderstand α abhängig. In der Literatur [Aib05, Kra04, Chr10] finden sich bislang keine Ansätze zur Berechnung dieses Parameters für Wäsche. Das α wurde bisher nur durch aufwendige Messverfahren bestimmt [Sta09, AA03]. Das ist nur für den Schleudergang möglich, weil hier der Massenstrom des Wassers gemessen werden kann. Zur Identifikation von α während des Waschprozesses werden das bereits vorgestellte fluidmechanische Modell und vorhandene Messdaten aus realen Waschprozessen genutzt.

Das vorhandene fluidmechanische Modell wird verwendet, um den spezifischen Durchströmungswiderstand α für die Waschphase zu identifizieren. Die Restfeuchte ist hierbei deutlich höher als bei dem durch Messungen identifizierten Schleuderprozess und wird in einem Bereich von 200 % bis 400 % angenommen, um den Waschprozess gut abbilden zu können. Da der Restfeuchteverlauf der Beladung in realen Versuchen nicht gemessen werden kann, wird der Druckverlauf zur Validierung der zu identifizierenden Parameter verwendet. Die Gesamtmenge des Fluids im Laugenbehälter ist ebenfalls bekannt. Durch kontinuierliche Messungen lässt sich indirekt auf die Restfeuchte der Wäsche schließen, was wiederum Rückschlüsse auf den massenspezifischen Durchströmungswiderstand zulässt.

Mittels eines Optimierungsverfahrens wird eine Parameteridentifikation für das α durchgeführt. Dazu müssen zunächst die Optimierungsvariablen definiert werden. Hier wird eine äquidistante Diskretisierung des Verlaufs von α in Abhängigkeit der Restfeuchte gewählt. Dazu wird der kontinuierliche Verlauf der Restfeuchte von 200 % bis 400 % in 10 %-Schritte diskretisiert. Bei der Optimierung wird zu jeder Stützstelle ein Wert α_k bestimmt. Der Bereich unterhalb von 200 % konnte mittels vorhandener Messungen sehr gut identifiziert und validiert werden.

Zusätzlich müssen für die Optimierung Nebenbedingungen an die Optimierungsvariablen gestellt werden, die sich aus physikalischen Bedingungen ergeben. Zum einen muss der massenspezifische Durchströmungswiderstand immer positiv und zum anderen bezüglich der Restfeuchte monoton fallend sein, sodass sich die folgenden Nebenbedingungen ergeben

$$\begin{aligned} \alpha_k > 0, k = 1, \dots, n, \\ A \cdot \alpha^T \leq 0, \end{aligned} \tag{4-1}$$

mit $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_n] \in \mathbb{R}^n$ und A einer Matrix mit 1 auf der Hauptdiagonalen und -1 auf der oberen Nebendiagonalen.

Eine weitere Problematik ist die Größenordnung der α -Werte. Es ist zu erwarten, dass diese sich in einem Bereich von 10^7 bis 10^{10} bewegen, sodass sich eine große Varianz ergibt. Durch eine geeignete Skalierung dieser Werte innerhalb des Optimierungsverfahrens ist sichergestellt, dass mit Werten von annähernd gleicher Größenordnung gerechnet wird, was numerisch von Vorteil ist.

Das Ergebnis einer Optimierung hängt sehr stark von der Wahl der Zielfunktion ab. Für die Identifikation des massenspezifischen Durchströmungswiderstands wird, wie bereits beschrieben, der Druckverlauf des Fluids im Laugenbehälter ($p_{Messung}$) verwendet. Während der Optimierung wird in jedem Schritt der gesamte Waschprozess mit den aktuellen Werten für α simuliert, wodurch man auch für den Druck einen simulierten Verlauf ($p_{Simulation}$) erhält. Anschließend wird die

quadratische Abweichung zwischen Simulation und Messung an diskreten Zeitpunkten als Gütemaß für die Validierung der Optimierungsvariablen verwendet, was durch die folgende Formel beschrieben werden kann:

$$J(\alpha) := \sum_{k=1}^N (p_{\text{Messung}}^k - p_{\text{Simulation}}^k)^2, \quad (4-2)$$

wobei N die Anzahl der gewählten Messpunkte beschreibt. Die quadratische Abweichung ist stets positiv, differenzierbar und bestraft größere Abweichungen stärker als kleinere.

Somit ergibt sich das nichtlineare Optimierungsproblem als:

$$\min_{\alpha} J(\alpha), \quad (4-3)$$

unter den Nebenbedingungen aus (4-1).

Dem Optimierungsverfahren muss ein Startwert der Optimierungsvariablen übergeben werden. Dabei hängt das Ergebnis der Optimierung sehr sensitiv von diesem Startwert ab, da nichtlineare Optimierungsverfahren kein global optimales Ergebnis sicherstellen. Als Startwert wird für alle α der bekannte und validierte Wert für 200 % Restfeuchte gewählt, der aus dem Schleudervorgang ermittelt wurde. Bei nicht sinnvoll gewähltem Startwert liefert die Simulation des Waschprozesses so schlechte Ergebnisse, dass eine erfolgreiche Optimierung nicht möglich ist. Deshalb sollte der Gültigkeitsbereich für die Optimierungsvariablen vorab überprüft werden.

In einem ersten Schritt wird das nichtlineare Optimierungsproblem mit Hilfe des *fminsearch* Algorithmus [Mat12b] ohne die nichtlinearen Nebenbedingungen gelöst, um eine erste Näherung an die optimale Lösung zu erhalten. Die Ergebnisse für α werden anschließend als Anfangsschätzung für eine Optimierung mit dem *fmincon* Algorithmus [Mat12b] aus der *MATLAB Optimization Toolbox* verwendet. Ein solches Verfahren ist in der Lage für ein nichtlineares Problem mit Nebenbedingungen ein lokales Optimum zu bestimmen. Dabei werden Ableitungen verwendet, die numerisch approximiert werden. Durch dieses Vorgehen wurde der massenspezifische Durchströmungswiderstand für Teilbereiche identifiziert.

Bild 4-5 zeigt den identifizierten Verlauf des massenspezifischen Durchströmungswiderstandes α für eine Kleinstbeladung. Dabei wurde der α -Bereich für den Schleuderprozess auf der linken Seite mittels Messungen identifiziert, während die rechte Seite mittels Optimierung identifiziert wurde. Diese ist für den Waschprozess gültig. Aufgrund der vorliegenden Nebenbedingungen sind die Werte für den Waschprozess insgesamt kleiner bzw. gleich dem minimalen Wert des Durchströmungswiderstandes für den Schleudervorgang bei 200 % Restfeuchte. Im Bereich

zwischen 200 % und 340 % werden die α -Werte vom Optimierer nicht verändert. Erst im Bereich zwischen 350 % und 400 % werden die α -Werte sinnvoll identifiziert, weil die aus der Messung berechnete Restfeuchte in diesem Bereich variiert. Somit kann festgestellt werden, dass im eigentlichen Sinn nur die Werte ab 350 % Restfeuchte für die Simulation und die weitere Verwendung sinnvoll optimiert wurden. Um die Werte von 200 % und 340 % identifizieren zu können sind erweiterte Messungen notwendig, welche Restfeuchtegehalte über den gesamten Bereich enthalten. Solche Messungen können bei keinem Standard-Waschprozess gemacht werden, weil die Beladung bei niedrigen Wasserständen ungleichmäßig durchfeuchtet wird. Ein vielversprechender Ansatz wäre die Nutzung der Umflutpumpe, um eine gleichmäßige Restfeuchte über die Drehzahlprofile einstellen und damit identifizieren zu können. Für den weiteren Verlauf der Arbeit werden die anhand eines Standard-Waschprozesses identifizierten α -Werte in das Restfeuchtemodell eingesetzt.

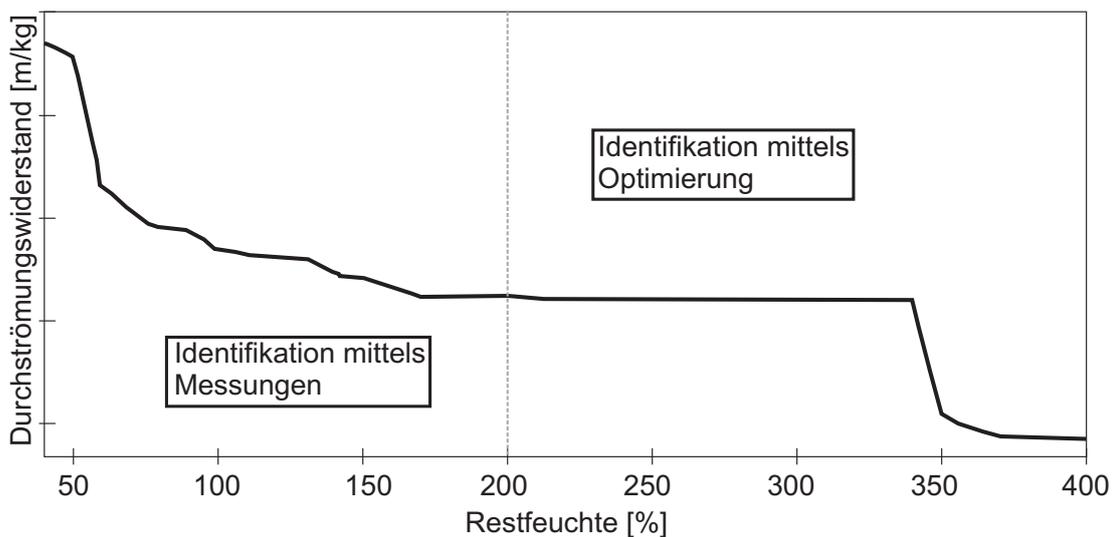


Bild 4-5: Verlauf des identifizierten massenspezifischen Durchströmungswiderstandes; auf der linken Seite befindet sich der mittels Messungen identifizierte Bereich und auf der rechten Seite der mittels Optimierung bestimmte Verlauf für den Waschprozess

Simulation und Validierung Fluidmechanik am Gesamtprozess

Nachdem die einzelnen Bereiche des fluidmechanischen Modells simuliert, identifiziert und validiert worden sind, werden diese im Gesamtmodell simuliert und validiert. Bild 4-6 zeigt das fluidmechanische Blockschaltbild und die darin simulierten Signale für einen Waschprozess. Der erste Verlauf zeigt die Validierung

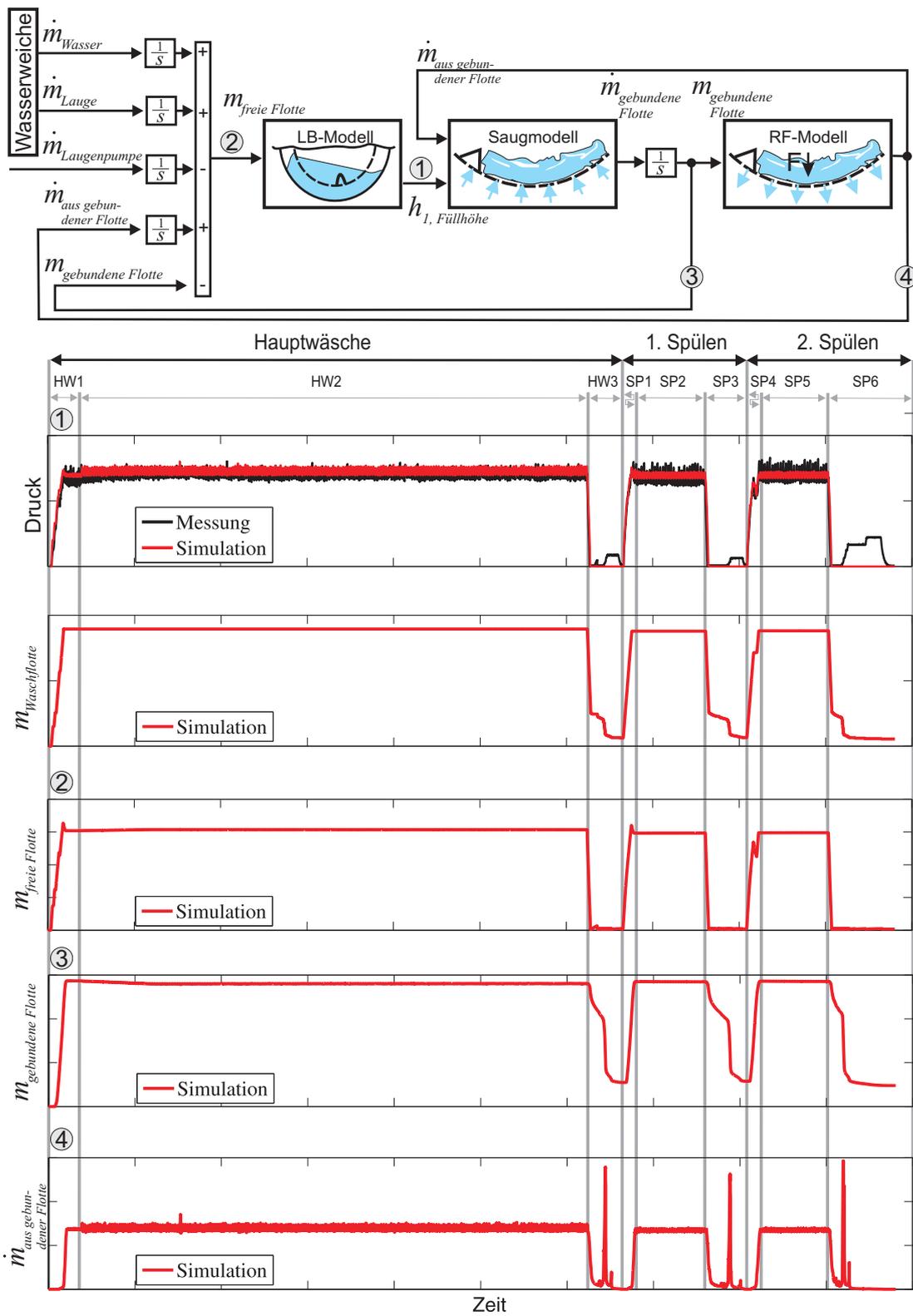


Bild 4-6: Fluimechanisches Modell mit der Validierung des Drucks (1); Simulation der inneren Größen $m_{\text{Waschflotte}}$, $m_{\text{freie Flotte}}$ (2), $m_{\text{gebundene Flotte}}$ (3) und $\dot{m}_{\text{aus gebundener Flotte}}$ (4)

des Drucksignals, schwarz dargestellt die Messung und rot die Simulation. Diese Verläufe zeigen eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Die dazugehörigen Simulationsverläufe in rot dargestellt zeigen die Waschflotte, die freie, sowie die gebundene Flotte und den Massenstrom von der gebundenen an die freie Flotte. Dabei handelt es sich um innere Größen des Systems, welche in der Simulation abgebildet werden. Im Verlauf $m_{Waschflotte}$ ist die aktuelle Wassermenge im Waschautomaten dargestellt. Diese setzt sich zusammen aus: $m_{freie Flotte}$ und $m_{gebundene Flotte}$. Im letzten Verlauf: $\dot{m}_{aus gebundener Flotte}$ ist der Massenstrom aus der gebundenen an die freie Flotte dargestellt. Zu Beginn der Simulation fließt Wasser bzw. Lauge in den Laugenbehälter, die Masse der freien Flotte steigt und damit auch das Drucksignal im Verlauf 1. Ab einem gewissen Füllstand im Laugenbehälter beginnt die Beladung das Laugengemisch aufzusaugen, als Folge steigt die Masse der gebundenen Flotte. Sobald die Beladung einen Restfeuchtegrad erreicht, wird die Flüssigkeit an der Faseroberfläche gebunden. Diese Wasser wird durch die verschiedenen Kräfte im Waschprozess von der Faseroberfläche gelöst und fließt in die freie Flotte, siehe Verlauf 4. Während des Waschprozesses ist der Massenstrom von der gebundenen an die freie Flotte konstant, weil die übrigen Systemgrößen in dieser Phase (HW2, SP2 und SP5) einen stationären Zustand erreichen.

Nach Beendigung der Waschphase wird die freie Flotte vollständig abgepumpt, das Schleudern und Pumpen beginnt (HW3). Der Massenstrom (4) von der gebundenen an die freie Flotte sinkt, bis nur noch ein Abtropfen stattfindet. Durch das Zwischenschleudern wird die Beladung entwässert, siehe großer Peak im Massenstrom an die freie Flotte. Dieser Massenstrom wird von der Laugenpumpe direkt abgepumpt, sodass dieser in der Bilanz der freien Flotte nicht zu sehen ist. In den darauffolgenden Spülgängen wiederholen sich die bereits beschriebenen Abläufe. Im Gegensatz zum Simulationsbeginn weist die Beladung zu Anfang der Spülgänge eine gewisse Restfeuchte, siehe Masse der gebundenen Flotte (3), auf. Der Druckverlauf (1) in den Wasserzuläufen SP1 und SP4 zeigt eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Verläufen, was auf eine richtige Berechnung der Restfeuchte schließen lässt. Obwohl der dynamische Druckanteil in der Hauptwäsche von der Amplitude gut war, ist diese in den Spülgängen zu gering – bei annähernd gleichem Druckniveau, Drehzahlen und Restfeuchtegehalt. Anscheinend werden wichtige Effekte, welche bei einer Waschtrommel mit Beladung auftreten, im Modell nicht erfasst und resultieren aus der Wäschebewegung und nicht der Fluidodynamik.

Die vorgestellten Simulationen der inneren Größen stellen die Ein- und Ausgänge und somit die Schnittstellen zu den jeweiligen Modellen dar. Über das Drucksignal kann hier auf die Korrektheit der Teilmodelle geschlossen werden, da es mit der Messung übereinstimmt und auf Grundlage dieser Massenströme berech-

net wurde. Die Teilmodelle wurden soweit möglichst unabhängig voneinander simuliert und validiert, aber im Waschprozess besteht nur über das Drucksignal die Möglichkeit, diese im Gesamtprozess zu validieren. Auf die Darstellung der Restfeuchte wird hier verzichtet, weil der Verlauf identisch dem der gebundenen Flotte ist. Auf Grundlage dieser Größen erfolgt die Simulation der Wärme- und Stoffübertragung.

4.2.2 Wärmeübertragung

Die Simulation der Wärmeübertragung erfolgt auf Grundlage der Gleichung (3-13). Die Umsetzung dieser Gleichung zeigt das Bild 3-14 zur Temperaturberechnung der freien Flotte. Dabei handelt es sich um ein vereinfachtes Blockschaltbild, in dem die Wärmeströme zwischen den Komponenten nicht dargestellt werden. In diesem Modell wird nur die Wärmeübertragung im Waschprozess betrachtet, weil währenddessen die Gesamtmasse im System als konstant angenommen wird.

Während des Waschprozesses wird die Temperatur der freien Flotte gemessen (siehe Abschnitt 2.3). Diese wird im Folgenden zur Modellvalidierung genutzt. Das Bild 4-7 zeigt im ersten Verlauf die Temperaturvalidierung der freien Flotte während der Waschphase und im zweiten Verlauf die Temperatursimulation der freien Flotte und des Laugenbehälters. Der dritte Verlauf zeigt die dazugehörigen Wärmemengen. Bei der Messung zur Validierung zeigt der Temperatursensor zunächst die Umgebungstemperatur an, während in der Simulation direkt die Temperatur der vorhandenen Wassermenge angezeigt wird. Nach dem Wasserzulauf gleicht sich die gemessene Temperatur der simulierten an. Das Einschalten der Heizung hat einen linearen Anstieg der simulierten Temperatur zur Folge, wohingegen diese bei der Messung in einem welligen, aber gleichmäßigen Verlauf ansteigt. Die Ursache hierfür liegt in der Durchmischung der Waschflotte und der Sensorposition.

In der Simulation wird die freie Flotte immer als homogen durchmischt angenommen, sodass die Temperatur gleichmäßig ansteigt. Im realen System ist dies nicht der Fall. Abhängig vom Drehrhythmus der Waschtrommel wird die Lauge unterschiedlich durchmischt. Die Position des Sensors spielt hierbei auch eine wichtige Rolle. Dieser ist direkt am Heizstab angebracht. Wenn die Waschtrommel stillsteht, findet lokal ein schneller Temperaturanstieg statt. Durch die anschließende Drehung und Durchmischung fällt die Temperatur wieder leicht. Dieser Effekt wird in der Simulation nicht abgebildet, weil hier die partiellen Temperaturfelder und turbulenten Strömungen nicht abgebildet werden. Diese könnten mittels CFD-Werkzeugen berechnet, aber nur mit großem Aufwand validiert werden. Für den Waschprozess ist die erreichte Temperatur nach der Heizphase und während der Waschbewegungsphase prozessrelevant, deshalb können diese instationären Effekte vernachlässigt werden.

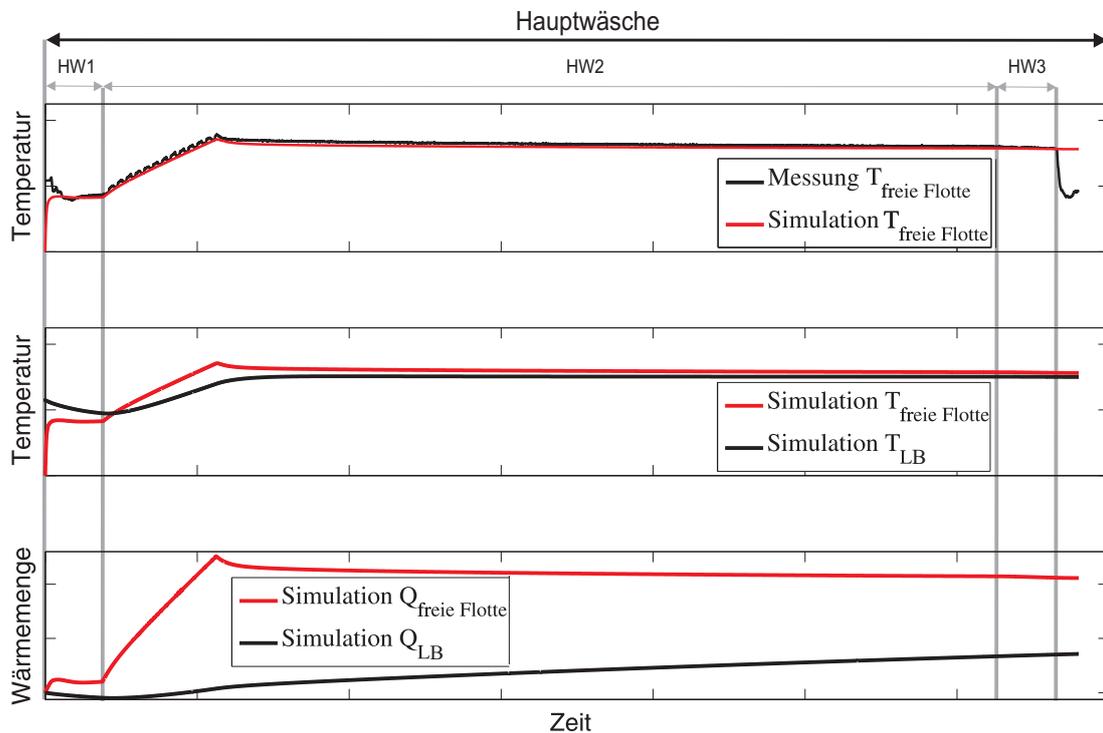


Bild 4-7: Validierung des Wärmeübertragungsmodells

Nachdem die Solltemperatur erreicht ist, wird die Heizung abgeschaltet und es findet ein leichter Temperaturabfall statt. Dies ist auf das verzögerte Aufheizen der gebundenen Flotte mit der Beladung durch die freie Flotte zurückzuführen. Nach der Aufheizphase ist die Temperatur der gebundenen Flotte und der Beladung immer höher als in der freien Flotte. Demzufolge fließt die Wärme von der Beladung mit der gebundenen Flotte an die freie Flotte und von dieser an die Bauteile und an die Umgebung. Dies ist am gleichmäßigen Temperaturabfall zu beobachten. Der Verlauf der Simulation mit der Messung zeigt eine sehr gute Übereinstimmung und damit indirekt die korrekte Abbildung der Verluste an die Bauteile und die Umgebung.

Die beiden unteren Verläufe zeigen die Temperaturen sowie Wärmemengen der freien Flotte und des Laugenbehälters. Zu Beginn ist die Temperatur des Laugenbehälters höher als die der freien Flotte. Diese ist gleich der Umgebungstemperatur. Deshalb findet zunächst eine Wärmeübertragung vom Laugenbehälter an die freie Flotte statt. Dies wird sowohl im zweiten als auch im dritten Verlauf deutlich. Sobald die Temperatur der freien Flotte höher ist als die des Laugenbehälters, ändert der Wärmefluss seine Richtung. Dies ist in der Heizphase der Fall. In der Waschphase, nach der Heizphase, gleichen sich die Temperaturen immer weiter an, bis sie irgendwann bei der Umgebungstemperatur theoretisch über-

einstimmen. Damit zeigen die Simulationsverläufe ein plausibles und erwartetes Systemverhalten des Wärmeübertragungsmodells. So können im nächsten Schritt das fluidmechanische Modell und das Wärmeübertragungsmodell gekoppelt werden.

4.2.3 Wärme- und Stoffübertragung

Im System Waschautomat findet eine permanente Wärme- und Stoffübertragung statt. Bei jedem Wasserzulauf wird über den Einlaufmassenstrom Energie in das System eingebracht. Über den Austausch zwischen der freien und gebundenen Flotte wird diese gleichmäßig im System verteilt (siehe fünfter Verlauf in Bild 4-6). Nach Beendigung der jeweiligen Waschphase wird die freie Flotte, mit den darin gespeicherten Energiemengen, aus dem System abgepumpt. Um diese Energieflüsse abzubilden, werden das fluidmechanische und das Wärmeübertragungsmodell gekoppelt. Damit wird im Streckenmodell des Waschautomaten die Wärme- und Stoffübertragung simuliert. Dazu muss die Gleichung (3-13) der Wärmeübertragung um die Stoffströme des fluidmechanischen Systems erweitert werden. Diese werden in Gleichung (3-14) erfasst. Das daraus resultierende Blockschaltbild 3-19 zeigt die Kopplung der beiden Modelle.

Bild 4-8 zeigt die Simulationsergebnisse des Wärme- und Stoffübertragungsmodells für den gesamten Waschprozess. Diese zeigen die einzelnen Größen (Punkte 1 bis 9) aus dem Blockschaltbild 3-19 und deren Verläufe über den Waschprozess. Die einzelnen Simulationsverläufe sind von a bis f gekennzeichnet. Dabei handelt es sich um eine Erweiterung des in Bild 4-6 vorgestellten fluidmechanischen Modells. Durch die Kopplung wird der Temperaturverlauf (d) über den gesamten Waschprozess simuliert. Dieser zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen, bis auf wenige Abweichungen beim Pumpen, auf welche später in diesem Abschnitt eingegangen wird.

Der Waschprozess beginnt mit dem Wassereinlauf in den Laugenbehälter, welcher zu einem Druckanstieg (a,HW1) im Laugenbehälter führt. Die Massen der freien und gebundenen Flotte steigen (b,HW1) bis zum Sättigungspunkt der Beladung, ab diesem kann die Lauge nicht mehr im Textil gebunden werden und sammelt sich als Oberflächentropfwasser am Textil. Dieses Wasser bzw. die Lauge fließt zurück in die freie Flotte (c,HW1). Hier stellt sich ein Gleichgewicht zwischen den Massenströmen der freien und gebundenen Flotte ein, welches von der Drehzahl abhängig ist.

Im Gegensatz zur Simulation der Wärmeübertragung startet die Temperatursimulation der freien Flotte (d,HW1) mit der Umgebungstemperatur, weil keine freie Flotte vorhanden ist. Mit dem Wassereinlauf in den Laugenbehälter nimmt die Temperatur der freien Flotte die Temperatur des zulaufenden Wassers an. In

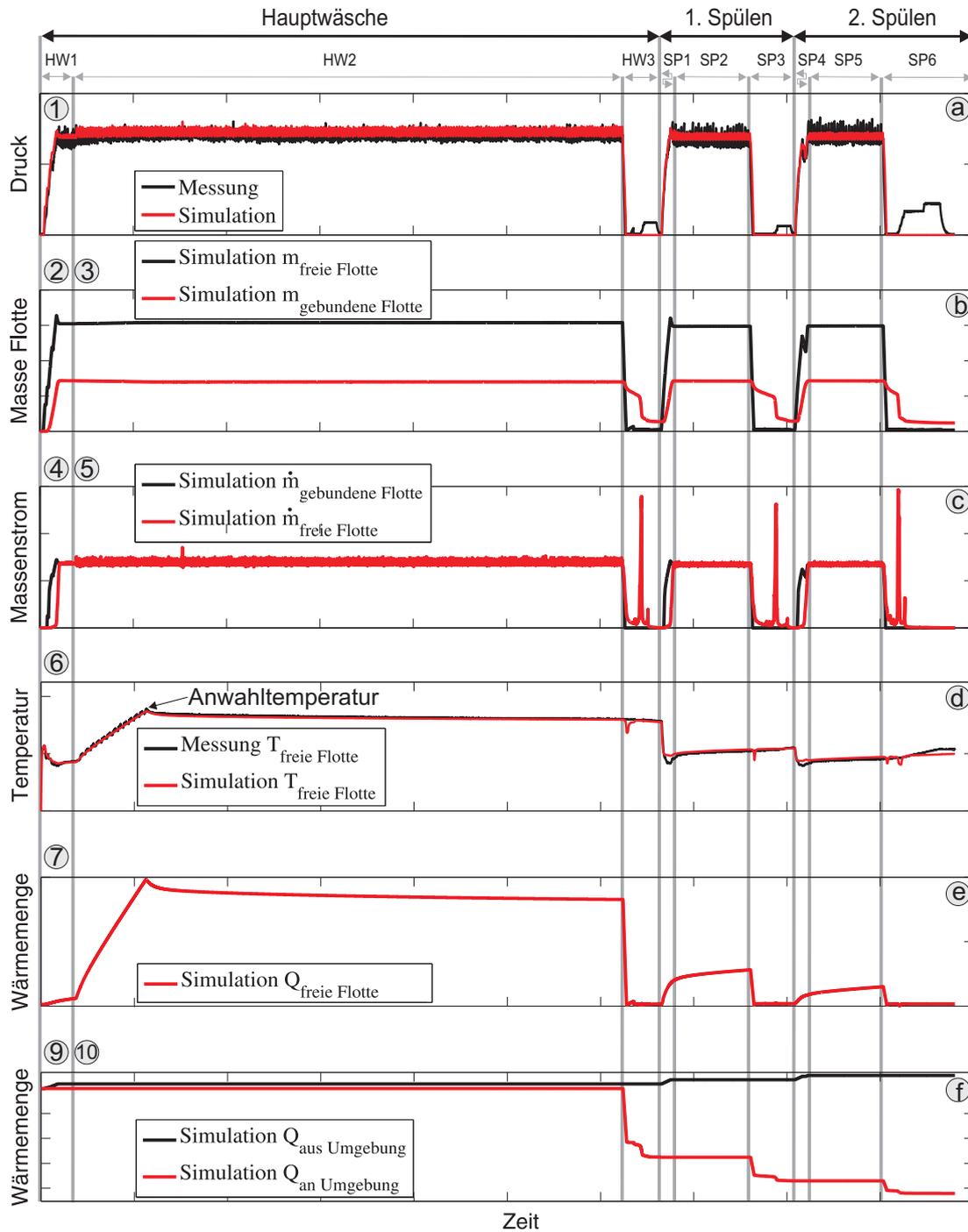


Bild 4-8: Simulation und Validierung des Wärme- und Stoffübertragungsmodells

den Simulationsverläufen ist die Zulauftemperatur niedriger als die Umgebungstemperatur, dementsprechend findet zunächst ein Temperaturabfall zu Beginn statt (d, HW1). Die Simulation der Wärmemenge aus der Umgebung (f, HW1) zeigt eine Zunahme der Wärmemenge des Systems mit dem Wasserzulauf. Aufgrund der niedrigen Zulauftemperatur führt diese insgesamt zu einem Temperaturabfall der freien Flotte. Die eingebrachte Wärmemenge geht in die freie Flotte (e, HW1) und diese Wärmemenge nimmt nach dem Wasserzulauf weiter zu. In die freie Flotte fließt Wärme aus den umliegenden Bauteilen, weil diese eine höhere Temperatur² haben. Dieser Wärmefluss ist langsam, siehe Zeitkonstante Abschnitt 3.2.2, und ist im leichtem Temperaturanstieg ansatzweise zu erkennen (d, HW1).

Nach der Wasserzulaufphase folgt die Waschphase, in der die freie Flotte auf Anwahltemperatur (d, HW2) gebracht wird. Dabei wird die Wärmemenge der freien Flotte erhöht (e, HW2). Nach Erreichen der Anwahltemperatur ändert sich der Wärmefluss von der freien Flotte zum Laugenbehälter und auf die gebundene Flotte, von der gebundenen an die freie Flotte, und dann weiter an die Bauteile und die Umgebung. Dieser Fluss setzt nicht sofort nach der Abschaltung der Heizung ein, sondern wenn die Beladungstemperatur höher wird als die der freien Flotte. Während der Waschphase verliert die Waschflotte kontinuierlich Wärmeenergie an ihre Umgebung. Die Verluste bewegen sich auf einem niedrigen Niveau, dies zeigen die Verläufe d, HW2 und e, HW2.

Mit dem Abpumpen der freien Flotte und dem Zwischenschleudern endet die Hauptwäsche. Beim Abpumpen wird die gesamte Wärmeenergie der freien Flotte über den Massenstrom des Wassers an die Umgebung abgeführt, siehe Verläufe b, HW3, c, HW3, e, HW3 und f, HW3. Da die Energie im Fluid gespeichert ist, müssen sowohl die Massen-, als auch die Energiebilanzen korrekt abgebildet werden, um die richtige Temperatur zu berechnen. Dies ist im Temperaturverlauf d, HW3 der Fall. Die Temperatur bleibt trotz der Massen- und Energieabnahme im System konstant. Hier zeigt die Simulation eine kurzzeitige Abweichung von der Messung, welche anschließend über die Energieflüsse im System ausgeglichen wird. Während des Abpumpens wird dem System in einem kurzen Zeitraum viel Energie entzogen. Gleichzeitig fließt das warme Oberflächentropfwasser aus der gebundenen Flotte an die freie Flotte und wird sofort an die Umgebung abgeführt. Der Wärmefluss im gesamten System ändert seine Richtung zu der freien Flotte. Währenddessen ist die Masse der freien Flotte fast Null, sodass kleinste Änderungen sich sofort auf die Temperatur auswirken. Die Überlagerung dieser Wärme- und Stoffströme führt zu einer kurzzeitigen Temperaturabweichung. Diese sensible Stelle des Modells bedarf zukünftig detaillierter Analysen, um Ursachen für diese Abweichung zu identifizieren. In der Schleuderphase tritt diese Abweichung, trotz

²Die Starttemperatur ist die Umgebungstemperatur.

hoher Massenströme an die freie Flotte (c,HW3) und den damit einhergehenden Wärmeströmen (e,HW3 und f,HW3) nicht auf.

Zu Beginn der Spülphase findet ein Wasserzulauf mit kaltem Wasser statt, welcher zu einem Temperaturabfall der freien Flotte führt (d,SP1). Dabei wird eine niedrigere Temperatur gemessen als in der Simulation berechnet. Dies ist auf die inhomogene Durchmischung zurückzuführen. Sobald der Massenstrom von der gebundenen Flotte an die freie Flotte (c,SP1) einsetzt, werden beide durchmischt und die Temperatur der Simulation stimmt mit den Messwerten wieder überein. Im Verlauf von e,SP1 kann der Wärmefluss von der gebundenen Flotte an die freie Flotte genau quantifiziert werden. Im weiteren Verlauf der Simulation wiederholen sich die bereits beschriebenen Effekte und Verläufe.

Durch die Erweiterung des Wärmeübertragungsmodells und die Kopplung mit dem fluidmechanischen Modell entstand ein Wärme- und Stoffübertragungsmodell. Mit diesem Modell ist es möglich, den gesamten Waschprozess mit allen Energie- und Stoffströmen zu simulieren und zu analysieren. Die Simulation und Validierung des Modells zeigt eine gute Übereinstimmung der messbaren Systemgrößen mit den simulierten Verläufen.

4.3 Validierung des Gesamtmodells und Diskussion

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die Teilmodelle simuliert und am Messverlauf einer Kleinstbeladung validiert. Dieser Abschnitt fasst nun die erzielten Ergebnisse am Gesamtmodell zusammen. Auf dieser Grundlage wird auf die Modelleigenschaften, die Modellgüte und den Gültigkeitsbereich des Gesamtmodells eingegangen.

4.3.1 Gesamtmodell

Zu Beginn des Kapitels wurde der Waschprozess mit den drei wichtigsten messbaren Prozessgrößen dargestellt und in verschiedene Phasen unterteilt, Bild 4-1. Dieser bereits vorgestellte Prozess wird in Bild 4-9 simuliert und zusammengefasst.

Die Verläufe der Simulation und der Messung zeigen sehr gute Übereinstimmungen während des gesamten Waschprozesses. Die Abweichungen sind gering und bewegen sich in einem akzeptablen Bereich. So sind die Temperaturabweichungen beim ersten und zweiten Spülen auf die inhomogene Vermischung zwischen freier und gebundener Flotte zurückzuführen, da im Modell immer eine homogene Durchmischung zwischen diesen beiden Größen modelliert ist. Bei dem Druckverlauf gibt es Abweichungen bei großen Drehzahlen (HW3, SP3 und SP6). Im realen

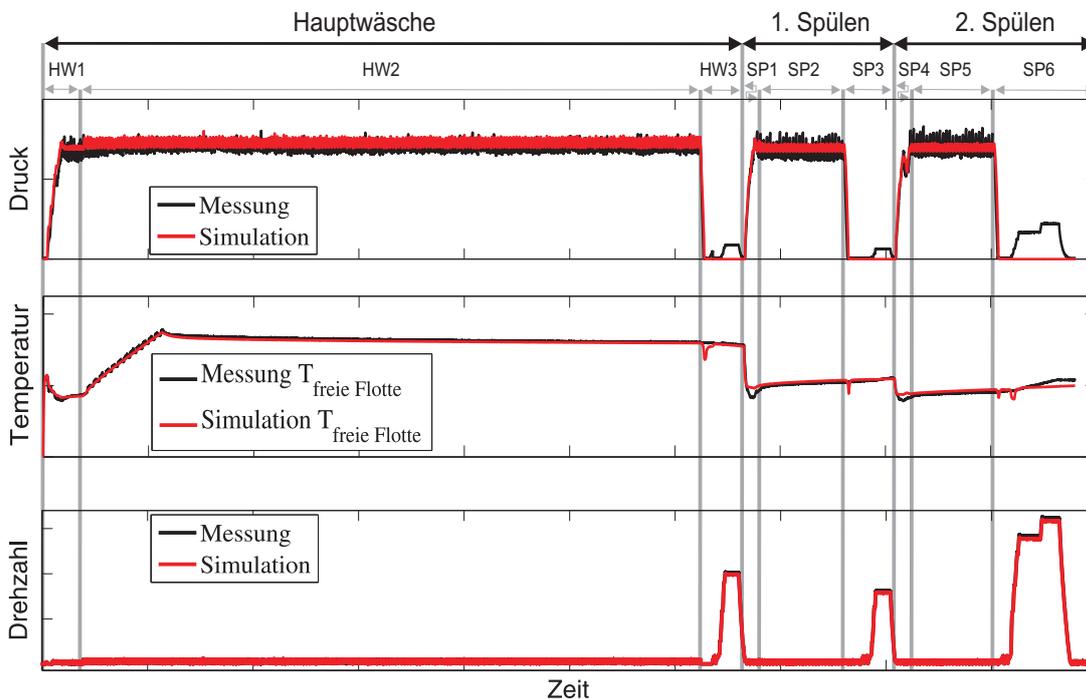


Bild 4-9: Validierung des gesamten Waschprozesses mit einer zwei Kilogramm Beladung Standard Load A

System entsteht im Spalt zwischen dem Laugenbehälter und der Wäschetrommel eine hohe Luftströmungsgeschwindigkeit, welche beim Schleudern zu einem messbaren Druckanstieg im Drucksensor führt. Dieses Signal wird beim Schleudern zur Schaumerkennung genutzt. In Abhängigkeit der Schaumausbildung und des Drucksigalanstiegs aufgrund der Luftströmungen kann der Schleuderhochlauf abgebrochen werden. Um diesen Einfluss auszuschließen wird das Drucksignal beim Schleudern auf Null gesetzt. Damit wird die exemplarische Validierung des Waschprozesses abgeschlossen.

4.3.2 Modelleigenschaften

Die Simulation und die Validierung erfolgte anhand eines durchgängigen Beispiels, dies ist aber nur eine mögliche Parametereinstellung des Streckenmodells. Im Folgenden wird auf die Gesamtmodelleigenschaften eingegangen.

Gültigkeitsbereich Das Streckenmodell umfasst drei Beladungsarten: Standard Load A, B und Frottier, siehe dazu Abschnitt 2.3.3. Für jede dieser Beladungsarten kann die Beladungsmenge zwischen eins bis neun Kilogramm variiert werden. Mit diesen Beladungsarten und Mengen können alle Standardprogramme

simuliert werden. Dazu gehören auch die bisher bekannten Label- und Deklarationsprüfungen. Andere spezielle Beladungsarten wie z. B. Wolle, Outdoor, Seide, Feinwäsche usw. sind nicht abgebildet. Für diese Beladungsarten müssten die spezifischen Prozessparameter wie z. B. Saugverhalten und Restfeuchte beim Schleudern identifiziert werden. Das Mischen der einzelnen Beladungsarten ist derzeit nicht möglich.

Das Modell ist für einen Temperaturbereich von 15 bis 90 °C validiert. Die minimale Zulauftemperatur bei Standardprüfungen liegt bei 15 °C und die maximale Anwahltemperatur bei 90 °C. Das Streckenmodell wurde innerhalb dieses Temperaturbereichs, mit Standard Load A, Frottier mit den Beladungsstufen von 0-9 kg in 1-kg-Schritten, validiert. Die Validierung erfolgte mittels automatisierter Skripte mit unterschiedlichen Schwerpunkten z. B. Energie, Massenbilanzen, Prozessschritte usw.. Bei Standard Load B erfolgte die Validierung mit der Kleinstbeladung und halben Beladung. Detaillierte Validierungsergebnisse können in den studentischen Arbeiten [Fas09, Wan09, Mic11, Sto11, Mic12, Mic12, Dep13] nachgeschlagen werden.

Modellannahmen In dem Modellbildungskapitel 3 und im Abschnitt 4.2 wurden viele spezielle Modellannahmen getroffen und erläutert. An dieser Stelle stehen die allgemeinen Modellannahmen im Vordergrund. Die größte Vereinfachung ist die Vernachlässigung der Waschsubstanzen. Im Streckenmodell wird mit den physikalischen Eigenschaften von Wasser und nicht mit Lauge gerechnet. Bei den zugrundeliegenden Messungen zur Validierung wird immer mit dem Normwaschmittel [IEC10] gewaschen. Damit wurden die gesamten chemischen Reaktionen im Waschautomaten nicht abgebildet und sind indirekt in den Saugkurven und massenspezifischen Durchströmungswiderstand enthalten.

Die Ermittlung der wirkenden Kräfte auf die Beladung erfolgte nur für die Kleinstbeladung, weil nur bei dieser Beladungssituation genügend Raum für die Bewegung vorhanden ist. Damit sind die mittels Optimierung identifizierten α nur für die Kleinstbeladung gültig. Für die übrigen Beladungen erfolgt die Identifikation der α -Werte an einem vereinfachten Kräftemodell für die Bewegung der Beladung in der Waschphase. Bei einer halben und vollen Beladung kommt es zur Reibung zwischen den Beladungsstücken. Diese wurden bei der Kleinstbeladung vernachlässigt. Die Abbildung, Simulation und Validierung dieser Kräfte ist für die Simulation der Waschwirkung notwendig. Diese wird aber im Waschprozess nicht erfasst und ist somit für diese Arbeit nicht relevant. In Kapitel 6 werden ein erster Ansatz und eine Anwendung für ein Waschwirkungsmodell vorgestellt.

Modellgüte Die Modellgüte ist von der Beladungsmenge abhängig. Mit steigender Beladungsmenge nimmt die Reproduzierbarkeit der Messungen ab. Bei Kleinstbeladungen kann die Saugzeit sehr gut abgebildet werden, weil hier mehr

Wasser pro Kilogramm Beladung vorhanden ist, ändert sich dies bei höheren Beladungen. Die größere Beladungsmenge verhindert durch das Abdecken der Waschtrommellöcher das gleichmäßige Durchfeuchten der Beladung. Dadurch kommt es zu einer stärkeren Variation des Waschprozesses in der Durchfeuchtungsphase, was zu einem Nachtanken in der Waschphase führen kann. Das zusätzliche Wasser führt zu einer Verlängerung der Heizphase. Die höheren Beladungsmengen und deren ungleichmäßige Verteilung beim Schleudern führen zu Schleuderabbrüchen und Neuverteilungen. Damit führt die höhere Beladungsmenge im Modell zu einer stärkeren Variation des Prozesses, welche im Streckenmodell nur durch eine stochastische Variation der Parameter erzeugt werden kann. Diese ist aber im Rahmen einer reproduzierbaren Simulation des Waschprozesses nicht sinnvoll. Eine quantitative Aussage zu den Abweichungen ist schwierig. Diese hängen von Anwahltemperatur, Wassermenge, Schleuderabbrüchen, Neuverteilungen und erreichter Enddrehzahl ab. So kann sich bei einer vollen Beladung bis zu maximal 10 % Modellabweichung zur Messung kommen.

4.4 Analyse des Gesamtenergieverbrauchs

Nach der erfolgreichen Simulation und Validierung des Streckenmodells werden in diesem Abschnitt der Energieverbrauch und wichtige Kenngrößen des Waschprozesses bewertet. Die Bewertung erfolgt anhand von labelrelevanten Größen, welche im Folgenden vorgestellt werden. Der Energieverbrauch ist die wichtigste Größe des Waschprozesses, wenn man das EU-Label³ betrachtet. Dieses beschreibt verschiedene Effizienzklassen von A+++ bis G, ordnet das Gerät in diese ein und gibt zusätzlich den Jahresverbrauch (220 Wäschen) in kWh an. Die anderen Größen sind Wasserverbrauch (Liter für 220 Wäschen), maximale Füllmenge (Kilogramm), Schleuderleistungsstufe (A-G) und Schalleistung (in Dezibel) beim Waschen und Schleudern. Um das Label zu erhalten, muss bei vollen und bei halben Beladungen im Durchschnitt die Waschwirkungsklasse A erreicht werden. Die dazugehörigen Effizienzklassen A+++ bis G werden in der folgenden Tabelle 4-1 dargestellt.

Dabei wird die Energie-Effizienzklasse von A+++ bis D angegeben, während die Effizienzklassen Schleuderwirkung und Waschwirkungsverhältnis in den Größen von A bis G angegeben werden. Die Waschwirkung wird anhand von Remissionsmessungen⁴ bestimmt und die Restfeuchte durch das Wiegen der Beladung nach dem Waschprozess. Zur Bestimmung des Energieeffizienzindex (EEI) gehen mehrere

³<http://www.newenergylabel.com/de/labelcontent/washers>

⁴Bei einer Remissionsmessung wird der Körper mit einem Lichtstrahl angeleuchtet, dabei wird der Reflexionsgrad des Lichts erfasst und auf die Helligkeit der Oberfläche geschlossen.

Tabelle 4-1: Kennzahlen des Waschprozesses

Effizienz- klasse	Waschwirkungs- verhältnis	Schleuder- wirkung (RF)	Energie- effizienzindex (EEI)	Ø Verbes. Vergl. zu A
A+++	–	–	EEI < 46	32 %
A++	–	–	$46 \leq \text{EEI} < 52$	24 %
A+	–	–	$52 \leq \text{EEI} < 59$	13 %
A	>1,03	<45 %	$59 \leq \text{EEI} < 68$	
B	>1,00	<54 %	$68 \leq \text{EEI} < 77$	
C	>0,97	<63 %	$77 \leq \text{EEI} < 87$	
D	>0,94	<72 %	$87 \leq \text{EEI}$	
E	>0,91	<81 %	–	
F	>0,88	<90 %	–	
G	$\leq 0,88$	$\geq 90 \%$	–	

Betriebszustände des Waschautomaten in die Berechnung ein. Detaillierte Angaben zur Berechnung können in [EU10] nachgeschlagen werden. Hier werden die Beladungsmengen und die Anzahl der zu messenden Waschversuche vorgegeben. Die Labelmessungen finden mit vollen und halben Beladungen statt. Bei voller Beladung sind drei Programme bei 60 °C durchzuführen, während bei halber Beladung zwei Programme mit 60 °C und zwei mit 40 °C vorgeschrieben sind. Im Folgenden wird ein 60 °C-Programm Baumwolle mit voller Beladung simuliert, was einer Labelmessung entspricht. Bei diesem Programm wird die größte Menge Wasser erwärmt, trotz voller Trommel müssen die Waschwirkung und die Restfeuchte erreicht werden. Aus diesem Grund wird im Folgenden dieses Programm simuliert und mit einem realen Versuch validiert. Die volle Beladung ist gleichzeitig auch der kritischste Fall in der Simulation.

Die Simulation der Verbrauchsdaten zeigt Bild 4-10. In diesem werden Druck, Temperatur-, Drehzahl-, Energieverbrauch- und Restfeuchteverlauf dargestellt. Die oberen drei Verläufe zeigen die Waschprozesskenngrößen: Druck, Temperatur und Drehzahl. Um die Messung mit der Simulation vergleichen zu können, wird die Ist-Drehzahl als Eingang an die Simulation übergeben, ebenso die Schaltzeiten der Aktoren. Die unteren beiden Verläufe zeigen die labelrelevanten Größen Energieverbrauch und Restfeuchte. Der Verlauf des Energieverbrauchs zeigt einen direkten Zusammenhang zum Drehzahl- und Temperaturverlauf, weil diese die Hauptverbraucher im System darstellen. Dabei steigt der Energieverbrauch in der Heizphase auf ca. 70 % seines Endwertes, während er im weiteren Verlauf, bis auf die Schleudergänge, linear zunimmt. Beim Schleudern muss die Waschtrommel, inklusive der feuchten Beladung, auf 1600 U/min beschleunigt werden. Im höheren Drehzahlbereich des Schleuderns sinkt der Wirkungsgrad des Mo-

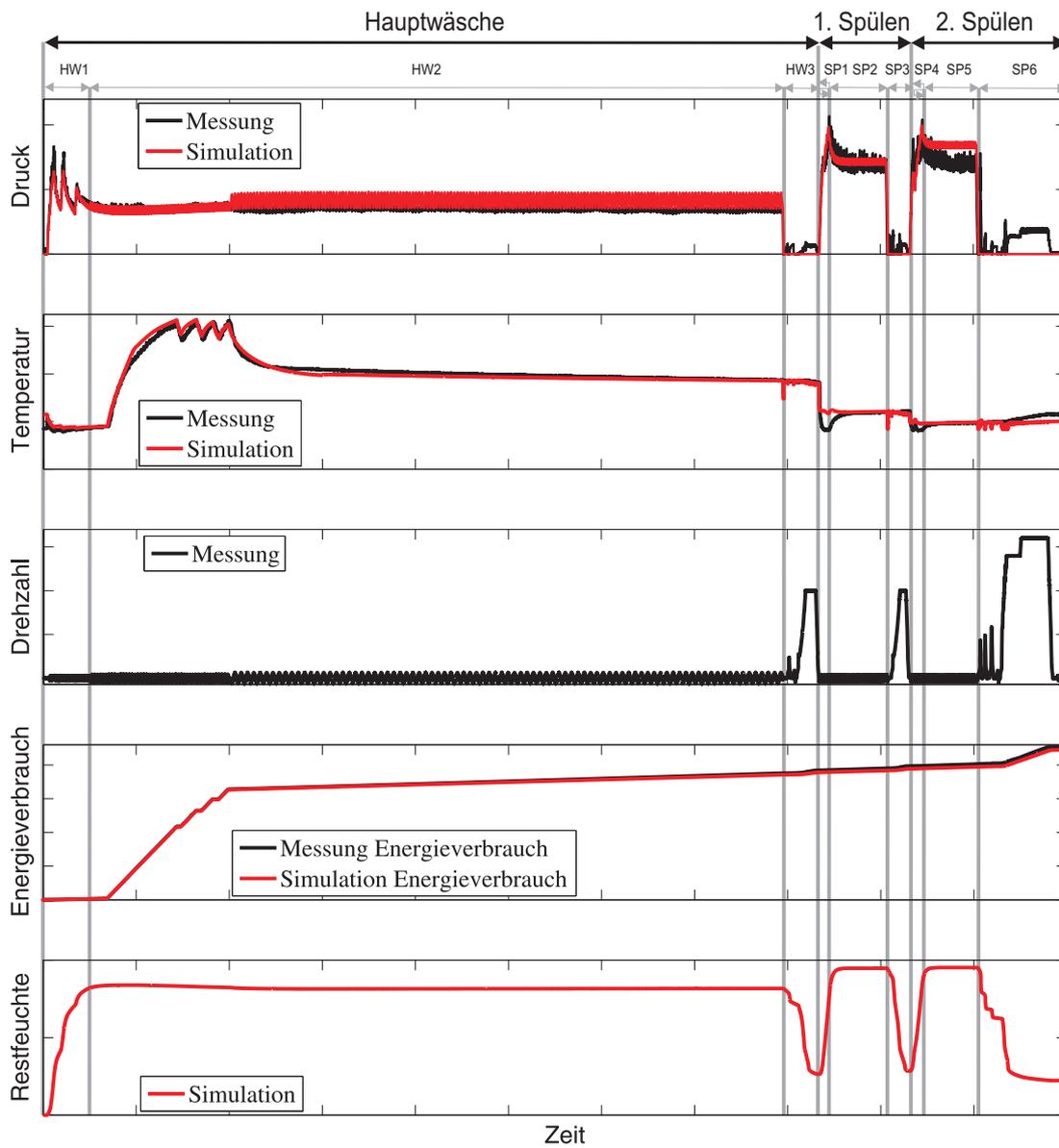


Bild 4-10: Simulation und Validierung der Verbrauchsdaten

tors, deshalb steigt der Verbrauch des Motors in diesem Bereich stärker an. Die Simulation zeigt hier eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten, was aufgrund der vorangegangenen Validierungsergebnisse zu erwarten war. Der Endwert des Energieverbrauchs der Simulation beträgt $0,889 kWh$, der Messwert $0,907 kWh$. Dieser Wert würde einem Energieeffizienzindex von 44,5 und damit mindestens der Effizienzklasse A+++ entsprechen.

Der Verlauf der Restfeuchte entspricht qualitativ dem der gebundenen Flotte. Die Berechnung erfolgt mittels Gleichung (2-1). Nach dem Endschleudern wird eine Restfeuchte von 44,69 % erreicht, was der Schleuderwirkung A entspricht. Um diese zu erreichen, wird die Enddrehzahl (SP6) über mehrere Minuten gehalten. Die wichtigste Kenngröße, das Waschwirkungsverhältnis, wird aus einem Kennfeld nach Beendigung des Waschprozesses ausgegeben und liegt mit 1,06 über dem geforderten Wert von 1,03. Auf die Waschwirkung wird in Abschnitt 6.3 detaillierter eingegangen. Damit zeigt die Simulation des Energieverbrauchs, dass die wichtigsten Kenngrößen des Waschprozesses im Modell qualitativ und quantitativ richtig abgebildet werden.

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erläutert, sind hier größere Abweichungen im Druck- und Temperaturverlauf zu beobachten. Im Druckverlauf werden die maximalen Druckspitzen beim Wassereinlauf nicht erreicht (HW1). Dies ist nicht bei allen Versuchen mit voller Beladung der Fall und hängt von der Position der Wäsche ab. Mit zunehmender Dauer der Durchfeuchtungsphase und weiteren Wassereinläufen gleichen sich die Verläufe weiter an. In der Waschphase ist der Druckverlauf in der Simulation immer geringfügig höher als in der Messung. Beim ersten Spülgang ist eine gute Übereinstimmung zu beobachten und beim zweiten Spülgang ist der Druck in der Simulation höher als in der Messung, was auf eine zu hohe Restfeuchte beim Schleudern im Modell hinweist. Beim Temperaturverlauf sind die bereits beschriebenen Abweichungen beim Abpumpen zu beobachten. Genauso wie die Temperaturabweichungen in den Wassereinlauf- und Durchfeuchtungsphasen (SP1 und SP4) in den Spülgängen. Diese sind eine Folge der inhomogenen Durchmischung.

4.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde das qualitative Modell des Waschautomaten aus dem vorangegangenen Kapitel in ein quantitatives überführt, simuliert und validiert, soweit es möglich war. Dabei erwies sich die Modellparametrierung und Identifikation als schwierig. Parameter für das Saugverhalten mussten mit hohem Aufwand experimentell bestimmt werden. Der massenspezifische Durchströmungswiderstand konnte nur für das Schleudern genau identifiziert werden. Um diesen

auf den Waschprozess zu erweitern, wurde ein Optimierungsverfahren zur Identifikation eingesetzt, wobei die Ergebnisse nur eingeschränkt für Kleinstbeladungen gültig sind. Durch die erfolgreiche Identifikation und Kopplung der Systemgrößen des fluidmechanischen Modells und des Wärmeübertragungsmodells entstand ein Wärme- und Stoffübertragungsmodell. Dieses Modell ermöglicht die Simulation des kompletten Waschprozesses. Durch die Validierung konnten die gewünschten Eigenschaften und Funktionen des Modells nachgewiesen werden. Damit steht für den Einsatz der In-the-Loop-Techniken ein deterministisches Streckenmodell zur Verfügung.

5 HiL-Simulation für Waschautomaten

In den vorangegangenen Kapiteln wurde der Waschprozess vorgestellt, modelliert und validiert. Dieses Streckenmodell wird für die HiL-Simulation verwendet, um die Waschautomaten-Steuergeräte in einer virtuellen Umgebung zu testen. Um die HiL-Simulation zu realisieren, müssen zunächst die Anforderungen an die Schnittstellen, die Hard- und die Software aufgestellt werden. Dazu werden zunächst die vorliegenden Randbedingungen bei der Einführung und dem Einsatz modellbasierter Testmethoden in der Hausgeräteindustrie erfasst (Abschnitt 5.1). Aus diesen Randbedingungen werden die Anforderungen an eine Prüfstandsarchitektur abgeleitet. In der anschließenden Spezifikationsphase werden die zu verwendenden Hard- und Softwarelösungen festgelegt (Abschnitt 5.2). Abschnitt 5.3 zeigt die Anwendung der HiL-Simulation anhand von Verfahrens- und Funktionstests. Das Kapitel schließt mit einem Ausblick auf zukünftige Arbeiten im Bereich der HiL-Simulationen bei Waschautomaten ab.

5.1 Modellbasiertes Testen in der Hausgeräteindustrie

In der Automobilindustrie gehört die modellbasierte Entwicklung [VDI2206] zu den Standardverfahren ([KH08], [SRB06], [SZ06], [Lam03]) und wird in den unterschiedlichsten Ausprägungen eingesetzt. In anderen Branchen, wie der Hausgeräteindustrie, werden hingegen keine modellbasierten bis sehr wenige modellbasierte Techniken genutzt. HiL-Simulation gehört bislang nicht dazu. Zur Einführung der modellbasierten Techniken ist zunächst eine Analyse der branchenspezifischen Gegebenheiten notwendig.

Bei den branchenspezifischen Randbedingungen muss unterschieden werden zwischen den Randbedingungen für die Einführung einer Technik und für den eigentlichen Einsatz der Technik. Die Randbedingungen bei der Einführung von modellbasierten Tests basieren auf den gelebten Entwicklungsprozessen sowie den beteiligten Ingenieuren. Es gilt oft:

- Modellbasierte Tests und damit auch die Entwicklung sind nicht etabliert und anerkannt, d. h. modellbasierte Testmethoden wie HiL existieren nicht und Modelle mit entsprechenden Genauigkeiten ebenfalls nicht.
- Die Komplexität erscheint oft geringer als im Automobilbereich. Aus diesem Grund wird der Nutzen einer modellbasierten Entwicklung in Frage gestellt.
- Investitionen für modellbasierte Techniken sind hoch.

Aufgrund dieser Randbedingungen ist der Einstieg in die modellbasierte Entwicklung und das modellbasierte Testen aufwendig. Deshalb ist es von Vorteil für den Start eine modellbasierte Technik zu wählen, die mit vergleichsweise geringen Anfangsinvestitionen auskommt, möglichst schnell validiert werden kann und einen messbaren Nutzen ergibt. Zur Nutzung einer HiL-Simulation ist nur das Streckenmodell notwendig, wohingegen bei den anderen modellbasierten Techniken zusätzlich ein Steuerungs- und Regelungsmodell vorhanden sein muss. Die Bedienung der HiL-Simulation erfolgt ähnlich wie eine Prüfstandsmessung über das Bedienanzeigeelement und nur die Einstellung der Beladung erfolgt über eine Benutzeroberfläche des Host-PCs. Darüber hinaus sind keine speziellen Software- und Modellierungskenntnisse notwendig. Aus diesen Gründen wurde in diesem Anwendungsfall die HiL-Simulation als Einstieg in die modellbasierten Techniken gewählt.

Die Randbedingungen beim Einsatz modellbasierter Techniken gleichen im Wesentlichen denen der Automobilindustrie:

- Welche Werkzeuge und Software sollen eingesetzt werden?
- Welche Aufgabenstellungen sollen damit bearbeitet werden?
- Welche Mitarbeiter sollen welche Kompetenzen mit dem Umgang haben bzw. wer übernimmt die Entwicklung, die Wartung und die Dokumentation der Modelle?
- Welche Schnittstellen zwischen den Abteilungen und den Lieferanten müssen damit abgedeckt werden?

Einige Randbedingungen unterscheiden sich aber von der Automobilindustrie:

- (i) Die Dynamik der modellierten Prozesse ist teilweise niedrig, und oftmals reicht eine weiche Echtzeit aus. So ist z. B. bei einem Wäschetrockner die Simulation der Trommeltemperatur verhältnismäßig rechenaufwendig, aber die Temperaturänderungen gleichzeitig träge, sodass es hier eine Zykluszeit von 1 s ausreichend ist. Alternativ können auch hybride Prüfstände genutzt werden. Dabei findet ein Teil der Tests in Echtzeit statt, während andere Tests unter Nichtechtzeitbedingungen durchgeführt werden. Dieser Punkt soll hier nicht weiter betrachtet werden.
- (ii) Die bestehende Softwarelandschaft und die Werkzeugketten unterscheiden sich in der Hausgeräteindustrie deutlich von denen in der Automobilindustrie.
- (iii) An einem Modell sind oft viele andere Domänen beteiligt, z. B. Mechanik, Elektrotechnik, Fluidmechanik.
- (iv) Entwicklungsabteilungen sind oft kleiner und dadurch sind die Entwicklungsingenieure weniger spezifisch tätig.

- (v) Geringer Nutzen bzw. Zwang, weil alle Versuche bislang am realen Gerät nachgestellt und durchgeführt werden konnten, wohingegen bei der Automobilindustrie die extrem sicherheitskritischen Fahrversuche und die Komplexität eine HiL-Simulation erforderten.

Für eine konsequente Nutzung von modellbasierten Techniken müssen diese Randbedingungen in den Entwicklungsprozess eingebunden werden. Dies bedingt eine systematische Einbindung in etablierte Werkzeugketten. Bei der Einführung von modellbasierten Techniken in der Automobilindustrie sprechen *Wohnhaas* und *Habrock* in [WH00] von einem erheblichen Aufwand in Analyse und Planungen sowie Vorinvestitionen in Infrastruktur, Software und Hardware, Dienstleistungen und Mitarbeiterkapazitäten. Dadurch ergibt sich die Notwendigkeit eines Einführungsprozesses mit umfassenden Analysen, langfristigem Konzept sowie speziellen Support- und Betriebskonzepten. Nur dadurch kann ein produktiver und effektiver Betrieb sichergestellt werden. Wenn dieses Betriebskonzept nicht vorhanden ist, kann es passieren, dass ein technisch funktionierendes Simulationssystem ohne spezielle Anpassung, Integration, Einführung und kontinuierliche Betreuung nicht nutzbringend einsetzbar ist. Aus diesem Grund ist eine Analyse und Berücksichtigung der vorhandenen Randbedingungen und Infrastruktur essenziell.

Die bestehenden Produkte für HiL-Simulationen sind an der Soft- und Hardware der Automobilindustrie ausgerichtet. Wie bereits in der Randbedingung (ii) für den Einsatz modellbasierter Techniken erläutert, kommen in der Hausgeräteindustrie andere Soft- und Hardware zum Einsatz, die Tool-Landschaft ist typisch für den Maschinen- und Anlagebau. Für eine erfolgreiche Anwendung der HiL-Simulation bedarf es einer detaillierten Analyse der beim Unternehmen eingesetzten Software, Hardware und der daraus entstandenen Prüfaufbauten. Die Nutzung der HiL-Simulation hängt maßgeblich von der Integration und der damit verbundenen Nutzung des vorhandenen Wissens und der Strukturen ab. Diese Soft- und Hardwarelandschaft kann sich von den anderen Hausgeräteherstellern unterscheiden, wobei von anderen Herstellern bekannt ist, dass diese ebenfalls mit NI-Produkten arbeiten. Von den ausländischen Herstellern ist nichts bekannt.

5.1.1 Eingesetzte Software beim Unternehmen

Das Unternehmen hat eine hohe Entwicklungs-, Konstruktions- und Produktionstiefe. Die Entwicklung umfasst unter anderem Antriebstechnik, Platinendesign und Sensoren. Dazu werden unterschiedlichste Softwarewerkzeuge eingesetzt wie *Catia* zur Konstruktion, *Ansys* zur Strömungssimulation, *Adams* zur Schwingungsanalyse, *Visual Studio* zur Steuergeräteprogrammierung, *Pearl90* zur Echtzeitprogrammierung, *Pspice* zur Elektronikauslegung, *Cornerstone* zur Versuchsplanung, *Testmaster* zur Automatisierung, *Maple*, *DIAdem* und *Excel/VBA* zur Analyse und viele weitere Tools.

Im Folgenden wird der für diese Arbeit relevante Bereich Mess- und Prüftechnik näher vorgestellt. In dieser haben sich die Produkte der Firma *National Instruments* etabliert. Zur Datenerfassung werden beim Projektpartner ausschließlich *DIAdem* und *LabVIEW* eingesetzt. Dadurch ist eine abteilungsübergreifende Standardisierung und Modularisierung der Soft- und Hardwarelandschaft entstanden. Beide Werkzeuge sind sehr umfangreich in ihren Anwendungsmöglichkeiten und deshalb werden im Folgenden eine Übersicht und die zum Verständnis der Arbeit relevanten Module vorgestellt.

DIAdem ist ein Softwarewerkzeug zur Messdatenaufzeichnung, Verwaltung, Bearbeitung, Analyse und Berichterstellung. Das Besondere an *DIAdem* ist das offene binäre Dateiformat TDMS (Technical Data Management Streaming), mit dem hohe Übertragungsraten realisiert werden können. Darüber hinaus können mit *DIAdem* alle gängigen Datenformate eingelesen und verarbeitet werden. Diese werden intern in das TDMS-Format umgesetzt, sodass diese verglichen werden können [NI13a].

LabVIEW ist eine grafische Entwicklungsumgebung für die Mess-, Regelungs- und Automatisierungstechnik. Die Programmierung von *LabVIEW* erfolgt mittels Funktionsblöcken und Objekten oder textbasiert. Bild 5-1 gibt eine Übersicht zu den Programmierkonzepten, den Zielplattformen und den dazugehörigen Hardwarelösungen. Die Programmierung erfolgt abhängig von der zu verwendenden Zielplattform, z.B. gelten für Echtzeit-Anwendungen andere Programmierkonventionen als für ein FPGA. Zur Unterstützung steht eine große Hardwaretreiberbibliothek direkt in *LabVIEW* zur Verfügung, mit deren Hilfe die Anbindung an die Zielhardware umgesetzt werden kann [NI13b].

5.1.2 Eingesetzte Hardware beim Projektpartner

Als Hardware werden in der Mess- und Prüftechnik die DAQ-Karten (Data Acquisition) zur Datenerfassung eingesetzt. Eine DAQ-Karte wird mit einem handelsüblichen Windows-Host-PC verbunden und in *DIAdem* eingelesen (siehe Bild 5-2). Über die DAQ-Karte werden alle externen Größen beim Waschprozess erfasst, wie z.B. der Energie- und Wasserverbrauch. Parallel dazu wird das Steuerleistungsteil (SLT) über eine optische Schnittstelle ausgelesen. Die optische Schnittstelle ist eine serielle Schnittstelle mit einem integrierten Lichtwellenleiter. Über diese wird eine Kommunikation zwischen dem Bedienanzeigeelement (BAE) und einem Host-PC hergestellt. Diese ermöglicht eine bidirektionale Kommunikation zwischen dem Host-PC und dem Steuergerät. Mittels dieser Verbindung können alle aktuellen Betriebsparameter ausgelesen werden und mit einem speziellen Blockeditor auch geschrieben werden. Zur Versuchslaufzeit werden über diese Schnittstelle die SLT-Größen in *DIAdem* aufgezeichnet und online visualisiert.

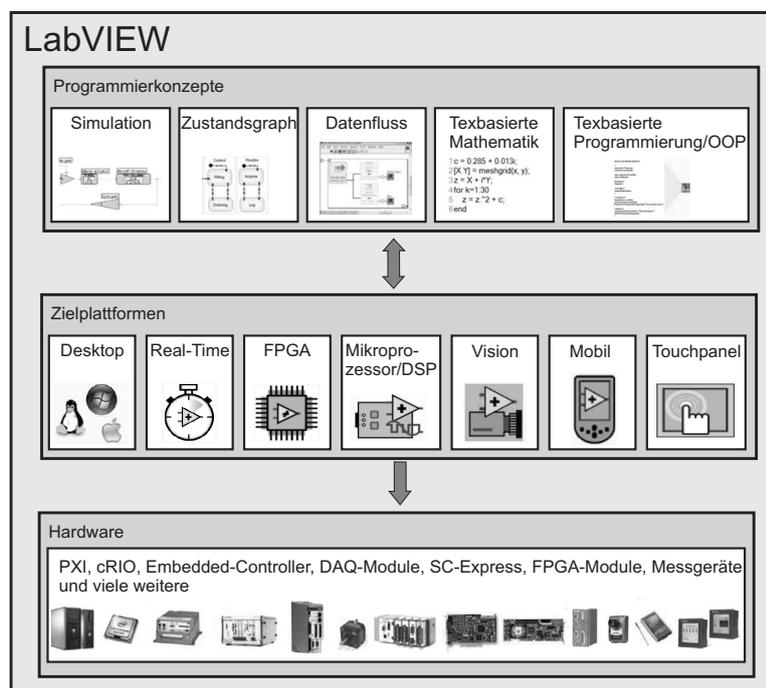


Bild 5-1: LabVIEW Hard- und Software in der Übersicht

Nach der Versuchsdurchführung werden die aufgezeichneten Datenreihen, die internen Daten aus der optischen Schnittstelle und die externen Messungen aus der DAQ-Karte auf dem Windows-Host-Rechner in einem TDMS-File abgespeichert. Die *DIAdem*-Datei wird manuell um die BAE-Einstellungen, die Wäscheposteneigenschaften und eventuell um spezielle Randbedingungen ergänzt. Diese Versuchsdaten werden von einem Ingenieur für die Verfahrensentwicklung ausgewertet. Dabei werden standardisierte *DIAdem*-Auswerteskripte zur Prozessanalyse und Dokumentation verwendet. Daraus wird ein Prüfbericht erstellt und gemäß der Prüfauftragsnummer in der Datenbank bereitgestellt.

Neben den DAQ-Karten werden auch PXI- und cRIO-Systeme mit unterschiedlichen Konfigurationen vorwiegend in der Vorentwicklung eingesetzt. Für die Echtzeitsysteme wurde ab 2009 eine spezielle Softwareumgebung *NI VeriStand* eingeführt. Damit wurde das *LabVIEW Simulation Interface Toolkit* in eine eigene Softwareumgebung überführt, mit dem Ziel die Erstellung von Echtzeitanwendungen zu vereinfachen.

Die genaue Analyse der eingesetzten Werkzeuge beim Projektpartner stellt eine wichtige Grundlage für das weitere Vorgehen dar. Aus der Analyse können im folgenden Abschnitt die detaillierten Anforderungen an die Prüfstandsarchitektur aufgestellt werden. Dadurch sind die Aufgabe und die Schnittstellen zwischen den

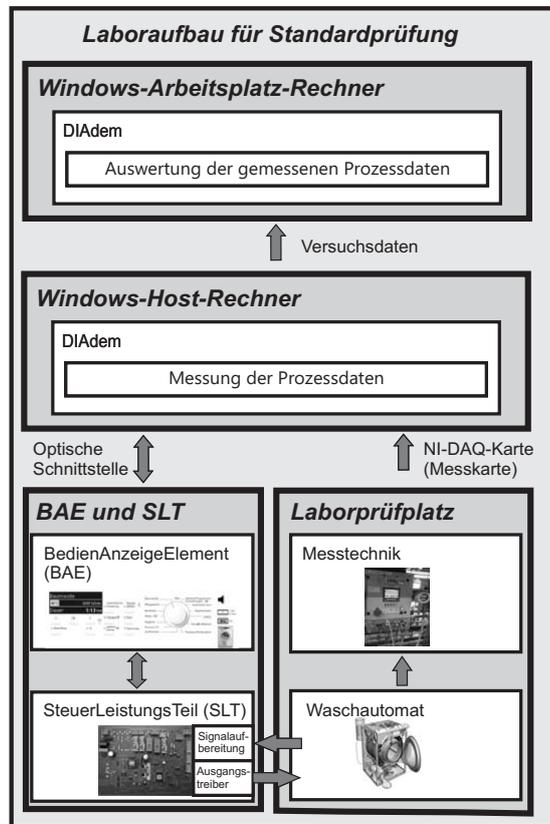


Bild 5-2: Messtechnischer Laboraufbau für Standardmessungen

einzelnen Werkzeugen klar definiert, sodass diese durch andere ersetzt werden können.

5.2 HiL-Prüfstandsarchitektur

Die Betrachtung der Randbedingungen für die Einführung und den Einsatz von modellbasierten Techniken sowie die Analyse vorhandener Werkzeuge und Werkzeugketten wird genutzt, um die Anforderungen an den Prüfstand abzuleiten. Auf dieser Grundlage wird eine Prüfstandsarchitektur entwickelt, welche sich in die bestehenden Prozesse sowie die Soft- und Hardwarelandschaft integrieren lässt. Abschließend werden Vor- und Nachteile dieser Architektur in der Zusammenfassung diskutiert.

5.2.1 Prüfstandsanforderungen

Eine zentrale Vorgabe bei der Erstellung der Prüfstandsarchitektur ist die Integration der HiL-Simulation in die beschriebene Soft- und Hardwarelandschaft

des Projektpartners (siehe Abschnitt 5.1.1 und 5.1.2). Dabei wurde vom Projektpartner der Einsatz von *National Instruments* Werkzeugen vorgegeben, da *National Instruments* Produkte bereits in den Prozessen etabliert sind. Der Labor-Prüfplatz in Bild 5-2 verdeutlicht den Einsatz von NI-Produkten und stellt gleichzeitig den Ausgangspunkt für die Prüfstandsanforderungen dar. Dabei sollen der Waschautomat und die Messtechnik durch ein Echtzeitsystem mit adäquaten Schnittstellen ersetzt werden. Um dieses zu realisieren, werden im Folgenden die Anforderungen an die Soft- und Hardware aufgestellt.

Anforderungen an die Software: Die eingesetzte Software sollte eine Schnittstelle zu *DIAdem* besitzen, die während der Prozesslaufzeit die aktuellen Werte des Streckenmodells für *DIAdem* zur Verfügung stellt. Die Datenübertragung sollte Übertragungsfrequenzen über 1 Hz beherrschen, sodass die Streckenmodelldaten in *DIAdem* mit den Daten aus der optischen Schnittstelle synchronisiert und mit den Standard-Auswertungsskripten analysiert werden können. Darüber hinaus sollten in der Software Streckenmodelle von etablierten Modellierungswerkzeugen eingebunden werden können, insbesondere *MATLAB/Simulink*-Modelle.

Bei einer HiL-Simulation bringt erst die Testautomatisierung den Mehrwert gegenüber den realen Prüfaufbauten. Aus diesem Grund sollten Schnittstellen für eine Testautomatisierung vorhanden sein oder bei der Entwicklung vorgesehen werden. Beim Aufstellen der Anforderungen sollen Schnittstellen für den Einsatz dieses Automatisierungswerkzeugs bei der Prüfstandsarchitektur berücksichtigt werden.

Als weitere Anforderung kommen die Bedienfreundlichkeit, die Erweiterbarkeit und die offenen Schnittstellen zu weiteren etablierten Modellierungswerkzeugen hinzu.

Anforderungen an die Hardware: Leistungsfähigkeit, Software-Kompatibilität und Erweiterbarkeit. Unter Leistungsfähigkeit versteht man hier die Sicherstellung der Echtzeit bei der Verarbeitung der Ein- und Ausgangssignale sowie der Simulation des Streckenmodells. Die Einhaltung der Echtzeit wird durch die Turnaround-Zeit beschrieben (siehe Abschnitt 2.1.5). Die Simulationsschrittweite und der Modellumfang (Größe, Systemdynamik und Modellierungstiefe) beeinflussen unmittelbar die Turnaround-Zeit. Dabei gibt die Abtastrate des Steuergeräts in der Regel die maximale Simulationsschrittweite vor. In diesem Fall ist zur Abbildung der Systemdynamik im elektrischen und mechanischen Teilsystem die Simulationsschrittweite von 1 ms erforderlich. Die Hardware sollte mit der ausgewählten Softwareumgebung nutzbar sein, also eine Software-Kompatibilität ausweisen.

Eine weitere Forderung ist die Erweiterbarkeit der Schnittstellen, um neue Aktoren und Sensoren in Zukunft einbinden zu können. Im Speziellen muss die Hardware analoge und digitale Signale verarbeiten können. Darüber hinaus müssen auch folgende Schnittstellen bedient werden können: PWM-Signale, serielle

Schnittstellen und frei konfigurierbare Bussysteme. Als weitere wichtige Anforderung ist die Kompatibilität der Hardware mit der Software zu nennen, wobei die meisten etablierten Hardwarehersteller eine eigene Softwarelösung für ihre Hardware anbieten. Aus diesen Anforderungen (Tabelle 5-1) und den zu Beginn beschriebenen Randbedingungen wird eine Prüfstandsarchitektur für die HiL-Simulation entwickelt, indem HiL-Prüfstandskomponenten ausgewählt und zu einer Gesamtarchitektur zusammengesetzt werden.

Tabelle 5-1: Anforderungen an eine HiL-Simulation

Kriterium	Software	Hardware
Schnittstellen	<i>DIAdem, MATLAB/Simulink</i> und <i>TestMaster</i>	digitale, analoge, serielle, Bus-Systeme, PWM-Signale und weitere
Funktionalität	Echtzeitsystem	Abstraten $\leq 1\text{ ms}$
Bedienung	Benutzeroberfläche	Schalter
Kosten	möglichst bestehende Lizenzen nutzen	Anschaffungskosten \leq Prototyp

5.2.2 Auswahl der HiL-Prüfstandskomponenten

Zur Realisierung der HiL-Simulation bietet die Firma *National Instruments* zwei unterschiedliche Softwarelösungen an: die Konfiguration des System mittels *Veri-stand* oder die Programmierung mit *LabVIEW*. Die Programmierung des Systems muss nochmals in eine grafische Programmierumgebung *LabVIEW* und *LabWindows/CVI* unterteilt werden.

Softwareauswahl

LabWindows/CVI *LabWindows/CVI* ist eine ANSI-C-Entwicklungsumgebung und damit eine Entwicklungsumgebung auf Textbasis. Vorteile dieser Entwicklungsumgebung sind der Einsatz und die Integration vorhandener C-Codes und diverser Bibliotheken. Nachteile sind die textuelle Programmierung und die notwendigen tiefen C-Programmierkenntnisse zur Entwicklung eines neuen Systems. Daher wird dieser Ansatz wenig genutzt.

LabVIEW Bei der Programmierumgebung *LabVIEW* werden die Toolboxen *Real-Time* und *Signal Interface Toolkit (SIT)* benötigt. Mittels dieser wird in *LabVIEW* ein Echtzeitprojekt erstellt. Hier besteht die Möglichkeit, C-Code und in *MATLAB/Simulink* erstellte Modelle zu verwenden. Der Hauptvorteil dieser Lösung ist der flexible Einsatz der kompletten NI-Hardwarelösungen (siehe

Bild 5-1). Diese Lösung hat einen entscheidenden Nachteil. Die SIT-Toolbox wird von *National Instruments* nicht mehr weiterentwickelt, wodurch die zukünftigen Schnittstellen begrenzt wären.

VeriStand *Veristand* stellt eine eigenständige konfigurierbare Softwareumgebung für Echtzeittests dar. Sie verfügt über diverse Schnittstellen zu anderen Simulationstools wie z. B.: *MATLAB/Simulink*, *SimulationX*, *Dymola*, C/C++ und weiteren Tools (siehe auch [NI12]). Die offene Architektur der *Veristand*-Engine erlaubt eine Anpassung der Kommunikationsschleifen, wofür jedoch Programmierkenntnisse in *LabVIEW*-Real-Time und *Veristand*-Architekturwissen notwendig sind. Die Konfiguration der Echtzeittests findet über den *Veristand*-Explorer statt, welcher über Standardschnittstellen zur Hardware verfügt; diese umfassen DAQ-Module, Can-, Lin-Bussysteme und standardisierte FPGA-Module. Diese Standardschnittstellen reichen aber nicht für eine Umsetzung der HiL-Simulation aus. Deswegen müssen weitere Schnittstellen in *LabVIEW* und *LabVIEW*-FPGA konfiguriert werden, welche anschließend über die offene Schnittstelle „Custom Device“ oder FPGA-Bitfiles eingebunden werden müssen. Mit der Schnittstelle „Custom Device“ können auch TDMS-Files erzeugt und eingelesen werden, die für die Anbindung an *DIAdem* wichtig sind. Über *LabVIEW* besteht die Möglichkeit die HiL-Simulation mittels TestMaster zu automatisieren.

Die Bedienung der HiL-Simulation erfolgt über eine grafische Oberfläche, so sind keine Kenntnisse in *MATLAB/Simulink* und *LabVIEW* notwendig. Die Nachteile dieser Softwareumgebung sind zum einen die beschränkten Anzeigeelemente in *Veristand* und zum anderen die zusätzlich notwendigen *LabVIEW*-Lizenzen und Programmierkenntnisse. Des Weiteren ist diese Softwareumgebung auf die Hardwaresysteme CompactRIO, PXI und Windows-PC begrenzt.

Fazit der Softwareauswahl Auf Grundlage der hier erläuterten Vor- und Nachteile der verschiedenen Softwarelösungen wird für die HiL-Simulation *Veristand* eingesetzt. *Veristand* verfügt über alle notwendigen Schnittstellen und kann mittels *LabVIEW* beliebig erweitert werden. Darüber hinaus ist die Bedienung relativ einfach und ohne spezielles Wissen möglich. *LabWindows/CVI* scheidet aufgrund der hohen Entwicklungszeit aus. *LabVIEW* kommt nicht direkt zum Einsatz, was der nicht weiterentwickelten Schnittstelle geschuldet ist. Aufgrund der notwendigen Erweiterungen der Schnittstellen kann auf den Einsatz von *LabVIEW* nicht verzichtet werden.

Durch die Festlegung der Softwareumgebung ist die Hardwareauswahl auf zwei Echtzeitsysteme begrenzt: das CompactRIO- und das PXI-System.

Hardwareauswahl

CompactRIO-System Das CompactRIO-System besteht aus einem Embedded-Controller mit einer FPGA-basierten Hochgeschwindigkeits-I/O, mit einer Prozessorleistung von 0,4 - 1,3 MHz und bis zu acht Steckplätzen für die I/O-Module. Das System ist für den Einsatz in der Automatisierungstechnik ausgelegt und verfügt deshalb über eine schnelle Datenerfassung und über einen im Vergleich zu PXI leistungsschwachen, dafür aber robusten, Prozessor.

PXI-System Die begrenzten Steckplätze, der geringe Speicher und insbesondere die geringe Prozessorleistung sind der Hauptgrund ein PXI-System zu verwenden. Die Prozessorleistung von PXI-Systemen beginnt bei einem 2,53 MHz Dual-Core-Prozessor und endet mit einem i7-Quad-Core-Prozessor. Bei der Signalerfassung und Verarbeitung können hier die unterschiedlichsten Module eingesetzt werden. Das PXI-System kann mit einem Windows-Betriebssystem oder mit dem Echtzeitbetriebssystem *PharLap* von *National Instruments* betrieben werden.

Fazit der Hardwareauswahl Die Festlegung der Hardware erfolgte in einer sehr frühen Phase der Entwicklung. Zu diesem Zeitpunkt war die Modellierung noch nicht abgeschlossen, sodass keine genaue Aussage zur benötigten Rechenleistung getroffen werden konnte. Aufgrund der Dynamik des bereits vorhandenen mechanischen und des elektrischen Streckenmodells und den niedrigen Simulationsschrittweiten, den Kontaktkraftberechnungen, der elektrischen Ströme und der zunehmenden Modellierungstiefe musste von einem rechenintensiven Streckenmodell ausgegangen werden. Das PXI-System ist die leistungsstärkste und flexibelste Hardware, die mehr als ausreichend Leistung zur Verfügung stellt. Aufgrund der hier vorliegenden Randbedingungen wird das PXI-System verwendet. Dieses verfügt über genügend Leistung, um die Simulation in Echtzeit durchzuführen. Im Folgenden wird die entwickelte Systemarchitektur mit den verwendeten Komponenten näher beschrieben.

5.2.3 Architektur der HiL-Simulation

In diesem Unterkapitel wird die entwickelte HiL-Architektur und deren Einbindung in den Testprozess beschrieben. Die HiL-Simulation besteht aus drei Komponenten: dem Windows-Host-Rechner, der Echtzeithardware (PXI-System) und dem Steuerleistungsteil (SLT) mit dem Bedienanzeigeelement (BAE) (siehe Bild 5-3). Diese drei Komponenten haben unterschiedliche Aufgaben und kommunizieren permanent miteinander. Die Steuerung der HiL-Simulation erfolgt über den Windows-Host-Rechner. Zu Beginn der Simulation wird über das Ethernet (Bild 5-3 Nummer 1) die Echtzeithardware parametrisiert und gestartet. Über das BAE wird der Waschprozess gestartet, dies kann manuell oder über die optische

Schnittstelle (Bild 5-3 Nummer 5) geschehen. Wenn der Test läuft, bekommt der Host-PC die Testdaten über die optische Schnittstelle aus dem BAE/SLT und über das Ethernet aus der Echtzeithardware. Diese beiden Schnittstellen sind nicht echtzeitfähig und sie unterliegen auch keinen Echtzeitanforderungen.

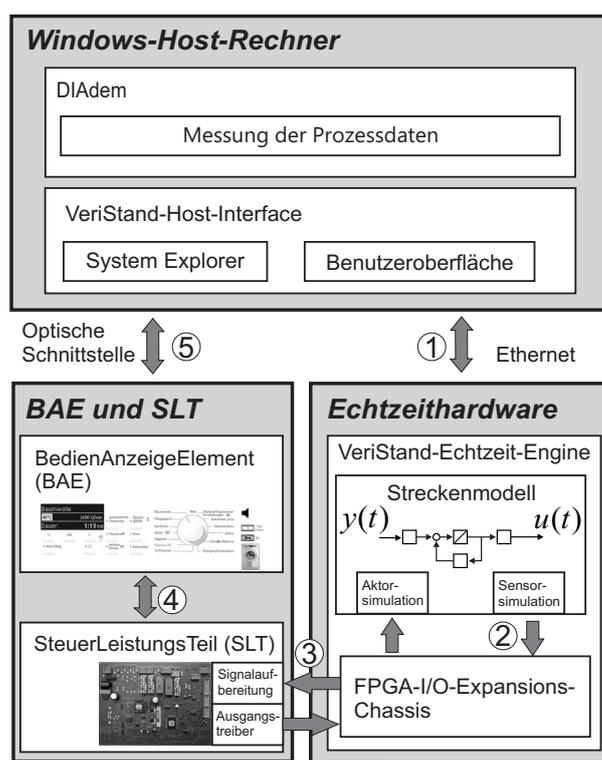


Bild 5-3: Architektur der HiL-Simulation mit den Kommunikationsschnittstellen

Echtzeitschnittstellen Die HiL-Simulation mit den Echtzeitanforderungen findet zwischen der Echtzeithardware und dem SLT (Bild 5-3 Nummer 3) statt. Dabei muss das Schreiben und Lesen der I/O-Signale innerhalb der Echtzeit sichergestellt werden, zur Echtzeit siehe Abschnitt 2.2.2. In diesem Anwendungsfall unter 1 ms.

Darüber hinaus existieren noch zwei weitere Schnittstellen: Das Streckenmodell kommuniziert über Sensor- und Aktorsimulation mit dem FPGA-Modul (Bild 5-3 Nummer 2). Das BAE ist über ein Bus-System mit dem SLT verbunden (Bild 5-3 Nummer 4). Hierbei handelt es sich um die Standardanbindung, wie sie in Waschautomaten vorliegt.

Windows-Host-Rechner Auf dem Windows-Host-Rechner befinden sich *DIAdem* und *Veristand*. *DIAdem* dient zur Beschreibung der Testaufgaben, der *Veristand*

waltung und Anzeige der Simulationsergebnisse und dem Auslesen des Steuergeräts über die optische Schnittstelle. In *Veristand* wird die Echtzeit-Engine¹ konfiguriert und erstellt. Das *Veristand*-Host-Interface besteht aus zwei Teilen, dem System-Explorer und der Benutzeroberfläche. Im System-Explorer werden die Ein- und Ausgänge des Streckenmodells mit denen des FPGA-I/O-Expansions-Chassis verbunden und die Engine konfiguriert. Im nächsten Schritt wird in der Benutzeroberfläche die Simulationssteuerung und Visualisierung für die HiL-Simulation erstellt. Anschließend wird das erstellte Projekt über das Ethernet auf die Echtzeithardware gebracht und gestartet. Über die Benutzeroberfläche, welche permanent mit der Echtzeit-Engine kommuniziert, bestehen verschiedene Möglichkeiten die HiL-Simulation zu steuern und zur Laufzeit zu verändern. Dadurch besteht zu jedem Zeitpunkt die Möglichkeit, die HiL-Simulation zu beeinflussen, sowohl die Schnittstellen als auch das Streckenmodell.

Echtzeithardware Auf der Echtzeithardware, dem PXI-System, läuft das Echtzeitbetriebssystem PharLab, worauf die *Veristand*-Echtzeit-Engine ausgeführt wird. Die Engine liest die Eingänge vom SLT über das FPGA-I/O-Expansions-Chassis und übergibt diese an die Aktorsimulation des Streckenmodells. Das Streckenmodell berechnet anhand der Eingänge die Ausgänge und übergibt diese an die Sensorsimulation, welche wiederum über das FPGA-I/O-Expansions-Chassis an das Steuerleistungsteil zurückgegeben werden.

BAE und SLT Über das Bedienanzeigeelement finden die Programmeinstellung, das Starten, das Stoppen und die Anzeige der aktuellen Einstellungen statt. Das BAE übergibt diese Einstellungen über ein Bus-System an das SLT. Anhand der übergebenen Parameter regelt und steuert das Steuerleistungsteil den gesamten Waschprozess. Das SLT stellt in der HiL-Simulation die zu prüfende Hardware dar.

Die umgesetzte HiL-Simulation, welche der vorgestellten Architektur (Bild 5-3) entspricht, zeigt Bild 5-4. Aus Gründen der elektrischen Sicherheit und der Verdrahtung befindet sich das FPGA-I/O-Expansions-Chassis im Bretttaufbau des BAE und SLT.

Integration Die vorgestellte HiL-Architektur gilt es im Folgenden in den Prozess für Standardprüfungen zu integrieren. Dazu werden in Bild 5-5 die beiden Architekturen miteinander verglichen und deren Gemeinsamkeiten und Unterschiede aufgezeigt.

¹Die Echtzeit-Engine ist das erstellte Echtzeitprojekt, welches auf der Echtzeit-Hardware in Echtzeit läuft inkl. Streckenmodell, Eingänge, Ausgänge, Kommunikationsschnittstellen und der eingestellten Spezifikationen.

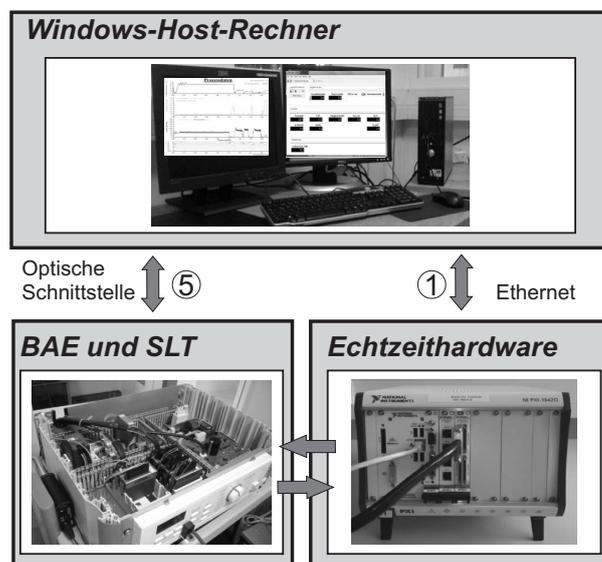


Bild 5-4: Umgesetzte HiL-Simulation mit den drei Hauptkomponenten: Windows-Host-Rechner, Echtzeithardware und BAE und SLT

Für eine erfolgreiche Integration der HiL-Simulation sollten der Laboraufbau und die HiL-Simulation mindestens die gleichen Kanäle (Schnittstelle Nummer 6, Versuchsdaten) zur Auswertung am Windows-Arbeitsplatz-Rechner bereitstellen. Diese Versuchsdaten werden auf dem Windows-Host-Rechner in *DIAdem* aufgezeichnet. Beim Laboraufbau liest *DIAdem* die Daten aus der optischen Schnittstelle und der DAQ-Karte ein. In der HiL-Simulation sind die Daten aus der optischen Schnittstelle die gleichen wie im Laboraufbau. Den wesentlichen Unterschied machen die Daten aus *Veristand*. Diese beinhalten neben den Standardkanälen (aus DAQ) die Modelldaten. Dadurch können alle Zustandsgrößen des Waschautomatenmodells aufgezeichnet werden, wie z. B. die Restfeuchte, welche messtechnisch schwer zu erfassen ist.

Durch die adäquaten Schnittstellen können zukünftig die Standardversuche durch die HiL-Simulation ergänzt und teilweise ersetzt werden. Dazu bedarf es einer konsequenten Nutzung der HiL-Simulation, in der sie ihre Vorteile in der Anwendung über die Zeit beweisen muss.

Automatisierung Bei der vorgestellten HiL-Simulation muss jede Prüfung manuell eingestellt und gestartet werden. Der Nutzen einer HiL-Simulation kommt erst richtig zum Tragen, wenn diese automatisiert wird, also der 24/7-Betrieb zur Verfügung steht. 24/7 bezeichnet einen Dauerbetrieb, welcher Rund um die Uhr an sieben Tagen pro Woche ausgeführt wird. Beim Projektpartner wird der TestMaster [SEA13] als ein werksübergreifendes Testautomatisierungswerkzeug

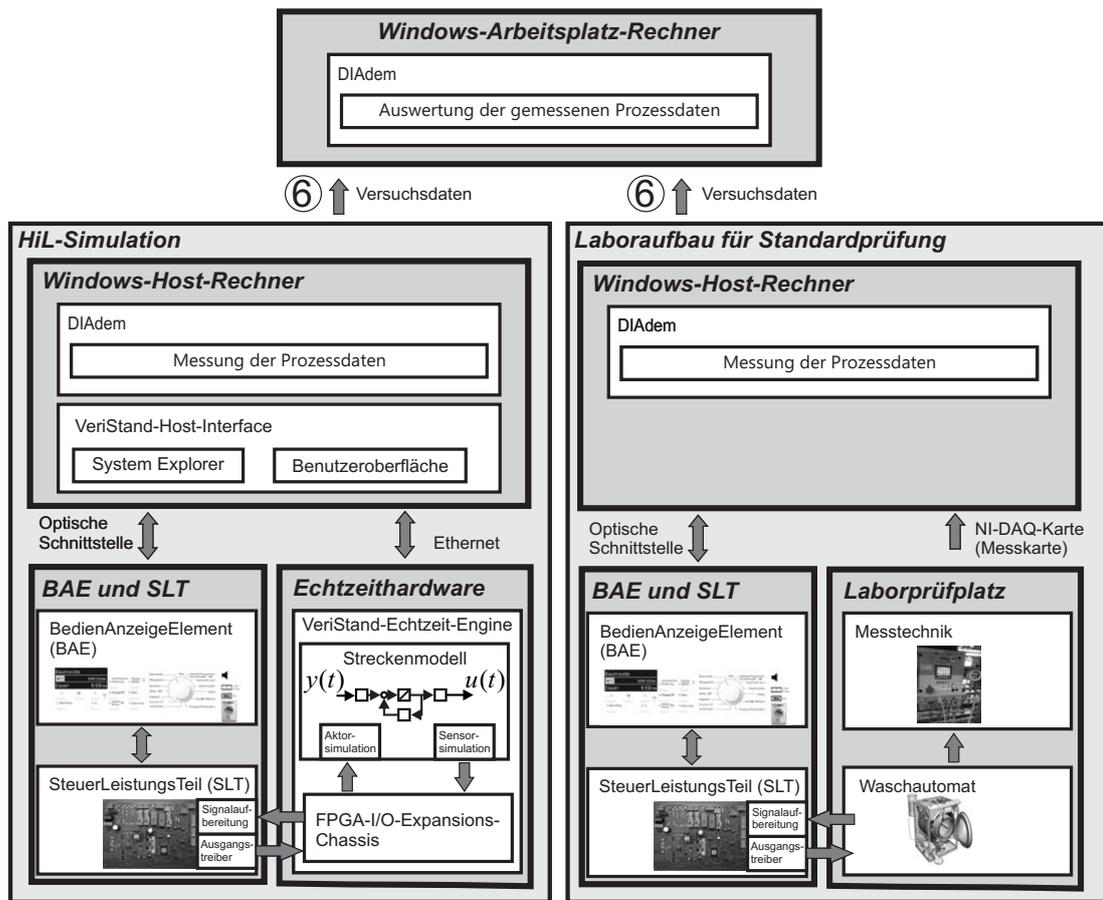


Bild 5-5: Vergleich der HiL-Simulation mit dem Standardprüfaufbau

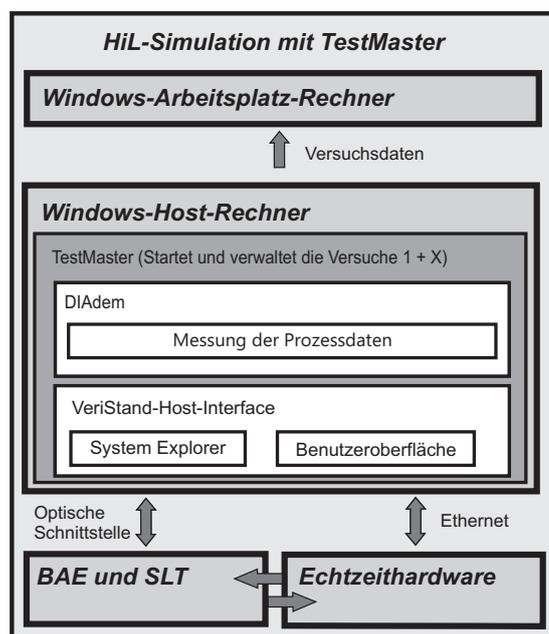


Bild 5-6: Automatisierung der HiL-Simulation mittels TestMaster

eingesetzt. Dabei handelt es sich um einen Werkzeugkasten für Test- und Prüfanwendungen auf *LabVIEW*-Basis. Im TestMaster werden die Kommunikationsprotokolle für die optische Schnittstelle umgesetzt und gepflegt. Aus diesem Grund ist der TestMaster in die Gesamtarchitektur zu integrieren.

Der TestMaster wird auf dem Windows-Host-Rechner ausgeführt und automatisiert die HiL-Simulation (siehe Bild 5-6). Zur Automatisierung der HiL-Simulation muss der TestMaster sowohl die optische als auch die *Veristand*-Schnittstelle lesen und beschreiben können. Zunächst müssen im TestMaster die Test-Fälle definiert werden, wie z. B. sechs Messungen von 1-6 *kg* Standard Load A in 1-Kilogramm Schritten. Anhand dieser Definitionen wird die *Veristand*-Engine mit dem Streckenmodell parametrisiert, konfiguriert und auf die Echtzeithardware geladen. Im nächsten Schritt werden über die optische Schnittstelle die Einstellungen auf das SLT übertragen. Dabei wird das Waschprogramm mit allen möglichen Zusatzfunktionen, wie z. B. der Wasserplus-Option, die der Endverbraucher am BAE einstellen kann, festgelegt und gestartet. Darüber hinaus können über die optische Schnittstelle erweiterte Einstellungen für das SLT vorgegeben werden, wie z. B. die Anpassung der Betriebsparameter im Kundendienstmodus. Anschließend werden über die gleiche Schnittstelle die SLT-Daten ausgelesen.

Nach der Testdurchführung werden alle Messdaten und Systemeinstellungen in einem zuvor angegebenen Ordner abgespeichert und der Test beendet. Insofern

ein weiterer Test eingestellt wurde, wird mit diesem fortgefahren bis alle Testsequenzen abgearbeitet wurden.

Die Aufgabe der Testauswertung bleibt nach wie vor dem Prüfenieur überlassen – egal ob es eine HiL-Simulation oder eine Prüfstandsmessung ist. Durch die erfolgreiche Integration der HiL-Simulation in die vorhandenen Prozesse kann der Prüfenieur auf bereits vorhandene Skripte zur Auswertung und Darstellung zurückgreifen.

5.2.4 Vergleich HiL-Simulation und Prototypentest

Die technische Machbarkeit und Umsetzung sind die Grundlagen für eine funktionierende HiL-Simulation. Aber der Systemeinsatz hängt von dem betriebswirtschaftlichen Nutzen ab. Um diesen Nutzen zu verdeutlichen, wird im Folgenden die HiL-Simulation mit einem Prototypentest des Waschautomaten verglichen. Als Bewertungskriterien werden die Anschaffungskosten, die Betriebskosten, die Wiederverwendung und die Automatisierung herangezogen.

Die Anschaffungskosten für einen Prototypen liegen bei ca. 30.000 €, wohingegen sie bei einer HiL-Simulation bei 15.700 € liegen. Der größte Kostenfaktor von 13.000 € stellt das PXI-System mit den diversen Karten und Modulen dar. Der Rest teilt sich in Host-PC und Bretttaufbau. Damit ist die Anschaffung eines Aufbaus für HiL-Simulation um die Hälfte günstiger. Die Betriebskosten der HiL-Simulation bestehen aus Lizenzkosten für *Veristand*, während der Prototyp einen klimatisierten Laborstellplatz mit Anschlüssen für Kalt-, Warm-, Abwasser und Messtechnik benötigt. Als weiterer Ressourcenbedarf kommen konditionierte Wäscheposten, Normansmutzungen und Waschmittel hinzu. Ein realer Waschautomat muss für jeden Versuch beladen, eingestellt und nach dem Versuch entladen werden, was Personalkosten verursacht.

Eine Automatisierung der Be- und Entladung bei realen Waschautomaten ist nicht mit vertretbarem Aufwand für jedes Gerät zu realisieren. Deshalb laufen die Dauerversuche mit der selben Wäsche – also mit feuchter Wäsche. Diesen Einschränkungen unterliegt die HiL-Simulation nicht, weil Wäscheart und Wäschemenge nur ein Modellparameter sind. Bei realen Versuchen ist in Abhängigkeit des Versuchs eine Abkühlpause notwendig, damit sich das Gerät in einen definierten Anfangszustand versetzt. In dieser Zeit steht der Waschautomat ungenutzt im Labor, blockiert einen Prüfplatz und verursacht Kosten.

Als letzter Punkt kommt die Wiederverwendung des jeweiligen Prüfstandes. Wenn am Prototypen die notwendigen Messungen durchgeführt wurden wird dieser wieder in die Einzelteile zerlegt und analysiert. Der nächste Prototyp wird wieder komplett neu aufgebaut. Bei der HiL-Simulation muss hingegen nur das Steuerleistungsteil ausgetauscht werden, in Abhängigkeit des neuen Prüflings müssen

unter Umständen die Schnittstellen erweitert werden. Die Hauptinvestition muss nur zu Beginn für die Anschaffung getätigt werden. In Tabelle 5-2 wird die Gegenüberstellung als Übersicht zusammengefasst.

Tabelle 5-2: Vergleich der HiL-Simulation mit einem realen Prüfstand für Waschautomaten

	HiL-Simulation	Prototyp
Anschaffungskosten	15.700 €	30.000 €
Betriebskosten	Lizenzkosten	Personal zum Be- und Entladen, Ressourcen (Wäscheposten, Waschmittel, Wasser Laborfläche und Infrastruktur)
Automatisierung	Ja	Mit Einschränkungen: Abkühlpausen und selbe Beladung
Wiederverwendung	Ja	Nein

Um den Vergleich abzuschließen, müssen noch die zu Beginn des Kapitels erwähnten Anfangsinvestitionen in die Modellbildung² berücksichtigt werden. Das bedeutet, es muss ein Modell des Waschautomaten entwickelt und gepflegt werden. Ein weiterer nicht zu unterschätzender Punkt ist die Schulung der Testingenieure, die die HiL-Simulation zur Prüfung verwenden. Diese Schulung muss sich an dem Wissensstand und Anwendungsbereich des jeweiligen Testingenieurs orientieren.

Langfristig spart die HiL-Simulation Kosten und Ressourcen. Darüber hinaus können mittels der HiL-Simulation Standard-Tests definiert und automatisiert werden, sodass die Testtiefe und damit die Qualität stetig erhöht werden könnte. Die HiL-Simulation ist somit eine effiziente Prüfmethode, um die steigende Anzahl an Prüfungen – resultierend aus der zunehmenden Modellbaureihen- und Programmdiversifizierung – Kosten- und Ressourceneffizient, durchzuführen.

5.2.5 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurde die Entwicklung einer HiL-Architektur für Waschautomaten vorgestellt. Dafür wurden zunächst die speziellen Randbedingungen und bestehenden Laboraufbauten und Prüfprozesse beim Projektpartner erfasst und analysiert. Die vorhandenen Randbedingungen sind: eine nicht etablierte

²Diese wurden beim Vergleich nicht herangezogen, weil die Anfangsinvestitionen in den Musterbau gleichermaßen nicht berücksichtigt wurden.

modellbasierte Entwicklung, keine vorhandenen Modelle, Werkzeuge und Methoden. Bei den Laboraufbauten und Prüfprozessen kommt ausschließlich Hard- und Software von *National Instruments* zum Einsatz. Unter Berücksichtigung dieser Ausgangslage wurden die Anforderungen an die HiL-Simulation aufgestellt: Die HiL-Simulation soll möglichst die bestehenden Werkzeuge nutzen sowie flexibel und erweiterbar sein. Basierend auf den Anforderungen wurden mögliche Soft- und Hardwarelösungen sowie deren Vor- und Nachteile recherchiert und bewertet. Dabei hat sich die Softwareumgebung *Veristand* in Kombination mit dem PXI-System durchgesetzt. Die entscheidenden Vorteile dieser Lösung sind die flexible Erweiterbarkeit und Anpassung des Systems sowie dessen Bedienfreundlichkeit. Darüber hinaus erfüllt diese Lösung die Mindestanforderungen an die Integration in die Prüfprozesse sowie die bestehende Soft- und Hardwarelandschaft. Abschließend wurden die wirtschaftlichen Aspekte der HiL-Simulation dargestellt und mit einem Prototypenaufbau verglichen. Nach einer Anfangsinvestition spart die HiL-Simulation langfristig Ressourcen und erhöht signifikant die Testtiefe.

5.3 Anwendung der HiL-Simulation

HiL-Simulationen werden sowohl während der Systemintegration als auch bei Systemtests eingesetzt (siehe Abschnitt 1.2). In diesen unterschiedlichen Entwicklungsphasen werden HiL-Simulationen zu unterschiedlichen Zwecken eingesetzt: In der Integrationsphase, um Komponenten zu testen, und bei Systemtests, um das Steuergerät zu testen. Bei Waschautomaten kommen HiL-Komponententests während der Systemintegration aus betriebswirtschaftlichen Gründen nicht zum Einsatz. Die eingesetzten Komponenten sind nicht so teuer wie z. B. in der Automobilindustrie und es existieren bereits Standardprüfverfahren und Prüfstände, sodass eine HiL-Simulation an dieser Stelle keinen Mehrwert darstellt. Bei den Systemtests wird die HiL-Simulation zur erweiterten Testabdeckung benötigt und ist aufgrund der zunehmenden Programmvierfalt unverzichtbar.

Bei den Systemtests muss zwischen Funktions- und Verfahrenstests unterschieden werden. Bei Funktionstests steht die elektronische Funktionalität im Fokus. Dabei wird die Funktionalität gegen eine Spezifikation getestet (Verifikation). Zusätzlich sind Verfahrenstests notwendig, um den Gesamtablauf des Waschprozesses zu testen und sicherzustellen, dass der Waschautomat seinen Zweck erfüllt (Validierung). Im folgenden Unterkapitel 5.3.1 werden HiL-Simulationen für Funktionstests vorgestellt und an zwei umgesetzten Simulationen exemplarisch gezeigt. Abschließend werden im Unterkapitel 5.3.2 beispielhaft zwei HiL-Verfahrenstests vorgestellt und erläutert.

5.3.1 HiL-Funktionstests

Die Funktionstests gehören zu den am häufigsten durchgeführten Testmethoden und können in Klassen-, Modul-, Komponenten-, Subsystem- und Gesamtsystemtests unterteilt werden (vertiefende Literatur [Ben05]). Mit der entwickelten HiL-Simulation sollen die spezifizierten Funktionalitäten am Gesamtsystem nachgewiesen werden. Um diese testen zu können, muss das Streckenmodell die Sensoren und Aktoren beinhalten. Bei einem Test werden über die Sensorsignale überschrieben und geprüft, ob die Aktoren sich laut Spezifikation verhalten. Zusätzlich wird das System auch auf sein Verhalten bei Fehlern getestet. Dazu sind in den Aktor- und Sensormodellen Schnittstellen zur Fehlerinjektion berücksichtigt worden. In der einfachen Manipulation der Sensoren und Aktoren liegt ein großer Vorteil der HiL-Simulation. Diese erlaubt die Injektion von Aktor/Sensor-Fehlern in die Simulation zur Laufzeit. So können Fehlerfälle oder Randbereiche simuliert und das Verhalten des Steuergeräts unter diesen Umständen zerstörungsfrei geprüft werden. Damit können unter anderem folgende Funktionstests durchgeführt werden:

- Ein Sensor ist beschädigt und liefert falsche Daten, welche außerhalb des zulässigen Bereichs liegen.
- Widersprüchliche Sensorwerte, wenn z. B. der Drucksensor kein Signal gibt, aber der Flügelradsensor permanent Impulse gibt.
- Sich plötzlich ändernde Unwuchten im Schleudern.
- Trockenheizen beim Waschen, wenn zu wenig Wasser im Laugenbehälter ist.
- Leitungsunterbrechung, z. B. durch Beschädigung der Verkabelung, Kurzschluss oder niedrigere Versorgungsspannung.

Wenn ein oder mehrere Fehler dieser Art auftreten, wird vom Steuergerät erwartet, dass es diese richtig erkennt und anzeigt. Abhängig von auftretenden Fehlern soll der Waschautomat, wenn möglich, das Wasser aus dem Laugenbehälter abpumpen und das Türschloss entriegeln. Hierbei handelt es sich um die ideale Überführung des Systems in einen sicheren Endzustand, welcher aber nicht bei jedem Fehler erreicht wird. Im Folgenden werden exemplarisch zwei Funktionstests mittels HiL-Simulation vorgestellt. Im ersten Beispiel fallen zwei Sensoren gleichzeitig aus und im zweiten Beispiel erzeugen zwei Sensoren widersprüchliche Signale.

1. Beispiel: Bei einer Leitungsunterbrechung fallen zwei Sensoren gleichzeitig aus: der Temperatursensor und der Drucksensor. Der Sensorausfall findet in der Heizphase statt. Hierbei muss das Steuergerät sofort reagieren, um ein Trockenheizen

zu verhindern. Darüber hinaus ist es interessant, welcher der gleichzeitig auftretenden Fehler zuerst erkannt wird und ob der Waschautomat in den sicheren Endzustand überführt wird.

Um diesen Test durchzuführen, wird die HiL-Simulation mit 7 kg Standard Load A initiiert. Am BAE wird das Baumwolle 60 °C Programm angewählt und gestartet. Die beiden relevanten Systemgrößen, der Druck- und der Temperaturverlauf, werden in Bild 5-7 dargestellt. Dabei werden die Daten aus dem Streckenmodell grau gestrichelt und die aus dem SLT als schwarze Linie dargestellt. Prinzipiell handelt es sich um das gleiche Signal. Das gestrichelte graue Streckenmodell-Signal wird aus dem Echtzeitsystem ausgelesen, während das schwarze SLT-Signal das gleiche Streckenmodell-Signal ist, aber über die Sensorsimulation vom SLT eingelesen, umgerechnet und über die optische Schnittstelle ausgelesen wurde. Diese beiden Signale wurden in *DIAdem* synchronisiert. Zusätzlich werden in einem dritten Diagramm die beiden Aktorsignale der Heizung (schwarze Linie) und der Pumpe (grau gestrichelte Linie) dargestellt. Zu Beginn des Waschprozesses findet ein normaler Wasserzulauf statt und nach dem Erreichen des Mindestniveaus (Bild 5-7 Punkt 1) wird die Heizung aktiviert. Im weiteren Verlauf wird mehrmals nachgetankt und die Temperatur der freien Flotte nimmt langsam zu.

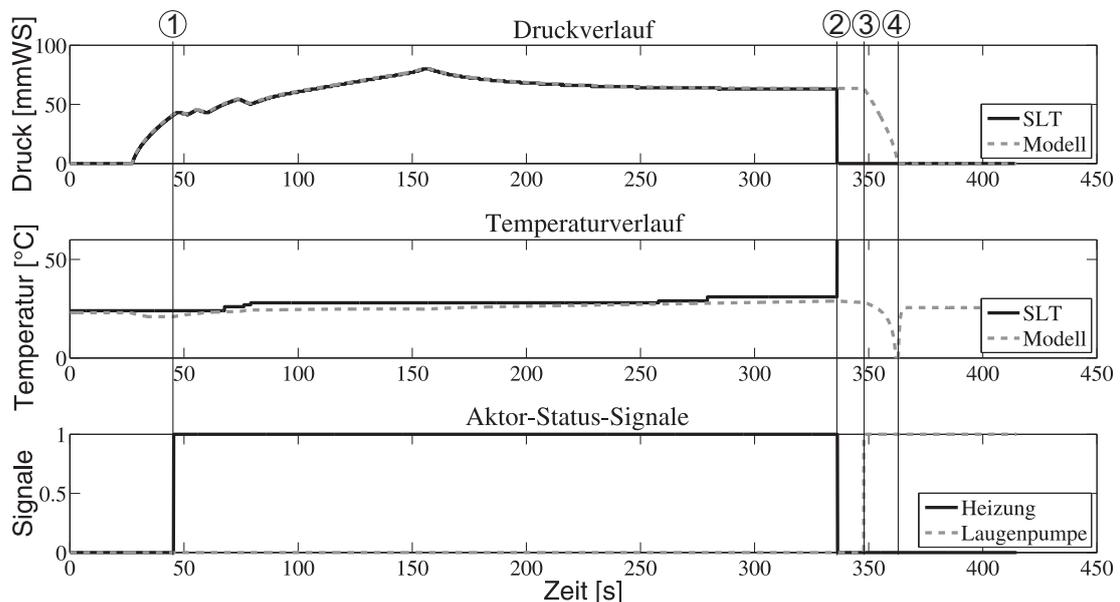


Bild 5-7: HiL-Funktionstest mit Ausfall des Druck- und Temperatursensors

Nach der Zeit $t = 336s$ findet der gleichzeitige Ausfall beider Sensoren statt (Punkt 2). Dazu werden die beiden Ausgangssignale des Temperatur- und des Drucksensors überschrieben und auf Null gesetzt. Im Druckverlaufdiagramm fällt das SLT-Drucksignal auf Null und das Temperatursignal springt auf über 150 °C,

beim Temperatursensor entsprechen die 0 V über 150 °C. Das Überschreiben der Kanäle findet zwischen dem Ausgang des Streckenmodells und dem FPGA-Eingang statt (Bild 5-8 Punkt 5). Hierbei handelt es sich um eine gezielte Fehlerinjektion. Das SLT bemerkt den Sensorausfall sofort und schaltet als erste Maßnahme die Heizung ab (Bild 5-7 Punkt 2). Das Streckenmodell bekommt von all dem nichts mit, weil nur die Ausgangssignale überschrieben wurden. Aufgrund der Heizabschaltung wird im Streckenmodell nicht mehr weiter geheizt, woraufhin die Temperatur nicht mehr weiter ansteigt. In den nächsten 10 s wartet und prüft das Steuerleistungsteil, ob es sich hierbei um eine kurzzeitige Störung handelt und ob der Prozess weiter fortgesetzt werden kann. Dies ist hier aber nicht der Fall, weshalb am BAE der „Fehler F0051“ angezeigt wird: Ein Fehler im Drucksensor wurde festgestellt (Bild 5-8 Punkt 6). In Bild 5-7 ist dies der Punkt 3. Jetzt wird die Pumpe aktiviert und das Wasser aus dem Laugenbehälter abgepumpt. Aufgrund der schnellen Massenabnahme und der langsamen Ausgleichsvorgänge im thermodynamischen Modell sehen wir einen kurzzeitigen Temperaturabfall (Punkt 4). Dieser wird nach dem Abpumpvorgang und dem damit verbundenen abgeschlossenen Wärmetransport wieder korrekt angezeigt, siehe dazu auch Abschnitt 4.2.3. Der Waschautomat befindet sich im Fehlermodus und es wird

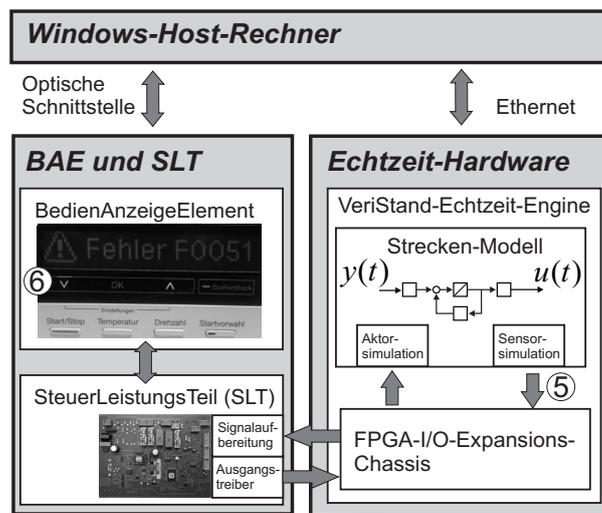


Bild 5-8: HiL-Funktionsprüfung Fehlerinjektion und die Reaktion des SLTs

ein Hinweis für den Kundendienst angezeigt, weil ein interner Fehler festgestellt wurde. An dieser Stelle wird die Simulation beendet.

2. Beispiel: Zwei Wassermengensensoren zeigen widersprüchliche Sensorwerte beim Wassereinlauf. Der Flügelradsensor übermittelt die Wassereinlauf-Signale, während der Drucksensor keinen Anstieg im Laugenbehälter anzeigt. Beide Sensoren werden beim Einschalten des Waschautomaten vom Steuergerät richtig erkannt.

Für die anstehende Funktionsprüfung werden 7 kg Standard Load A als Beladungsmenge im Modell eingestellt und die Simulation gestartet. Über das BAE wird das Programm Baumwolle $40\text{ }^\circ\text{C}$ gestartet. Die Versuchsauswertung erfolgt anhand des Druckverlaufs und der eingelaufenen Wassermenge. Das Steuergerät berechnet die eingelaufene Wassermenge aus den Impulsen des Flügelradzählers. Als Aktor-Status-Signale werden hier das Ventil und die Laugenpumpe dargestellt (Bild 5-9).

Nachdem der Waschprozess gestartet wurde, fährt die Wasserweiche auf die eingestellte Position. Hat sie die Position erreicht, wird das Ventil geöffnet (Punkt 1 in Bild 5-9). Der Flügelradsensor misst die einlaufende Wassermenge und gibt diese an das Steuergerät. Das dazugehörige Drucksignal wird im Streckenmodell berechnet und an das Sensormodell übermittelt. Im Sensormodell wird aus dem Drucksignal ein entsprechendes PWM-Signal generiert. Über *Veristand* wird im Sensormodell dieses Signal manipuliert (ein Offset wird addiert), sodass das PWM-Signal auf Null gehalten wird (Punkt 4 in Bild 5-10). Dadurch kann das SLT keinen Druckanstieg aus dem Drucksignal feststellen. Nach einer gewissen Zeit wird der Wasserzulauf abgebrochen (Bild 5-9 Punkt 2) und die Pumpe eingeschaltet. Zum selben Zeitpunkt zeigt das BAE eine Wasserzulauf-Warnung im Display an (Punkt 5 in Bild 5-10). Der Benutzer wird aufgefordert, im Benutzerhandbuch nach möglichen Fehlerursachen im Wasserzulauf nachzuschlagen. Eine Leckage wurde nicht angezeigt, weil der WPS-Sensor kein austretendes Wasser im Waschautomaten gemeldet hat. Damit wird die Aufzeichnung und auch der Test beendet.

Die beiden Funktionstests wurden erfolgreich durchgeführt. Durch die gelungene Aktor- und Sensorsimulation kann das Steuergerät die Simulationsumgebung vom realen Waschautomaten nicht unterscheiden. Mittels der HiL-Simulation konnten realitätsnahe Sensorausfälle und Fehlfunktionen erfolgreich nachgestellt werden. Die Datensynchronisation in *DIAdem* zeigt ebenfalls einen lückenlosen Verlauf der Messungen. Insgesamt zeigen die beiden durchgeführten Simulationen ein sehr gutes Ergebnis, in dem das Streckenmodell, der Prüfaufbau und die Fehlerinjektion miteinander funktionieren. Damit konnte zum einen ein Funktionsnachweis der HiL-Simulation demonstriert werden und zum anderen die einfache Möglichkeit von Funktionstests mittels HiL-Simulation.

Bei den Funktionstests wird nur die spezifizierte Funktion getestet. Wenn dies erfolgt ist, werden der Waschprozess und der Test beendet. Die Testdauer ist damit von der zu prüfenden Funktion abhängig, sodass der Test nicht über den ganzen Waschprozess dauern muss.

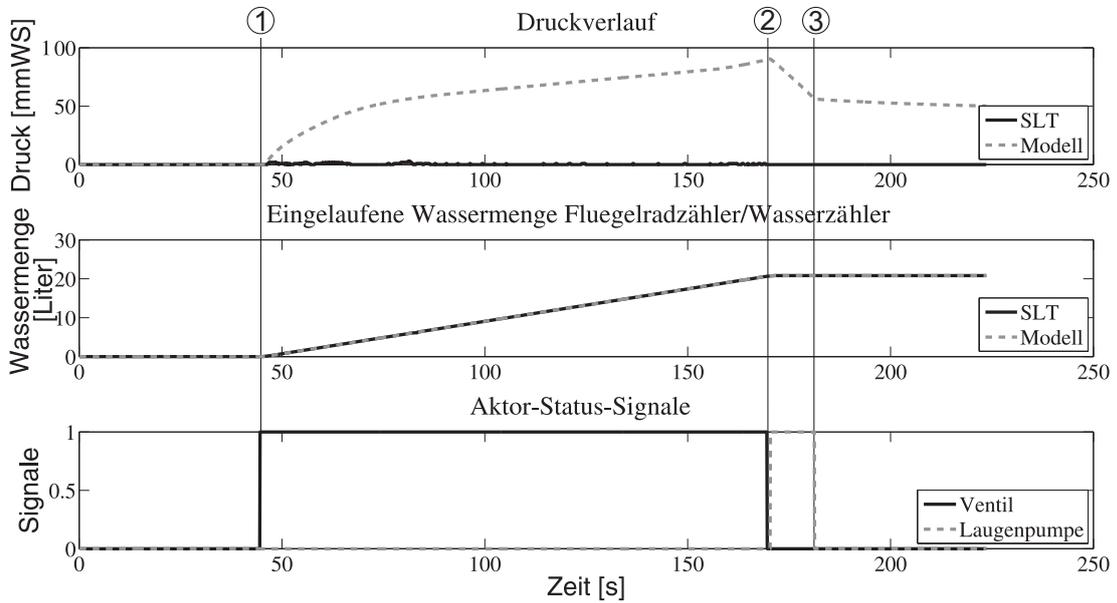


Bild 5-9: HiL-Funktionsprüfung des Wassereinflaßs

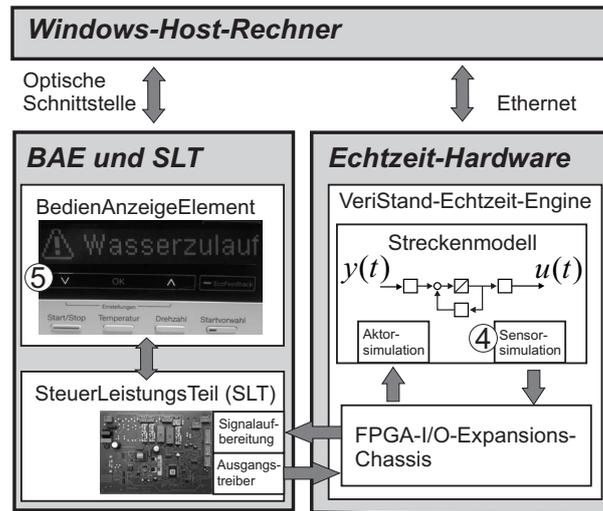


Bild 5-10: HiL-Funktionsprüfung fehlerhafter Drucksensor

5.3.2 HiL-Verfahrenstest

Beim HiL-Verfahrenstest sollen der gesamte Waschprozess und damit das implementierte Verfahren überprüft und dessen Korrektheit sichergestellt werden. Dabei wird eine optimale Funktion der Aktoren und Sensoren vorausgesetzt. Zur Einstellung eines Waschprozesses sind im Steuerleistungsteil über 70.000 Parameter hinterlegt, welche einen Waschprozess beschreiben. Hinzu kommen noch diverse Zusatzanwahlmöglichkeiten, die die Programme überschreiben können. Die HiL-Verfahrenstests ermöglichen die Prüfung der Korrektheit eines programmierten Verfahrens unter verschiedenen Randbedingungen. Dies kann, zusammen mit dem Funktionstest, zum Nachweis der funktionalen Sicherheit gegenüber Behörden genutzt werden. Mindestens genauso wichtig ist der Nachweis gegenüber dem Kunden. Besonders als Premiumhersteller hat man hier sehr hohe Ansprüche an die eigene Produktqualität. Mit der HiL-Simulation kann die Prüftiefe unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten effizient erhöht werden.

Beim Verfahrenstest wird das Zusammenwirken aller Komponenten auf den Waschprozess untersucht. Dies beinhaltet den programmierten Waschprozess, den Einfluss des Streckenmodells und die Umsetzung durch die Aktoren und Sensoren. Mögliche Fragestellungen bzw. Aufgabenstellungen für Verfahrenstests sind z. B.:

- Werden die Waschprogramme richtig umgesetzt?
- Werden die im Waschverfahren eingestellten Wassermengen erreicht?
- Sind die im Waschverfahren voreingestellten Energiemengen ausreichend, um die gewünschte Waschwirkungsklasse zu erreichen?
- Wird am Ende des Waschprozesses die geforderte Schleuderwirkung erreicht?
- Wird beim Wassereinlauf die richtige Wäschemenge erkannt und das Verfahren danach ausgerichtet?
- Welchen Einfluss haben veränderte Wäscheigenschaften auf die Verbrauchsdaten und Programme?
- Wie reagiert das Waschverfahren auf sich ändernden Randbedingungen im Waschprozess oder der Umgebung?

Dies sind nur einige Beispiele für HiL-Verfahrenstests. Im Folgenden werden beispielhaft zwei umgesetzte HiL-Verfahrenstests vorgestellt und erläutert.

1. Beispiel: Das Baumwollprogramm bei 60 °C soll auf seine Korrektheit überprüft werden, bei einer Beladung von 6 kg Standard Load A. Für die Versuchsdurchführung wird die Simulation entsprechend parametrisiert und simuliert. Über das BAE wird das gewünschte Programm gestartet. Mittels der HiL-Simulation soll in diesem Testdurchlauf das umgesetzte Programm auf seinen richtigen Ablauf und die

Vollständigkeit überprüft werden. Was das genau bedeutet, wird im Folgenden anhand von Bild 5-11 erläutert. Die wichtigsten Kenngrößen zur Beurteilung eines Waschprozesses hinsichtlich des Verfahrens sind Druckverlauf, Temperatur, Drehzahl und die Aktor-Status-Signale. Die einzelnen Diagramme zeigen jeweils gestrichelt die Modellausgänge und als schwarze Linie die vom SLT aufgezeichneten Sensoreingänge. Im vierten Diagramm werden die Aktor-Status-Signale des Ventils (Wassereinlaufventil), der Laugenpumpe und der Heizung dargestellt. Hierbei handelt es sich um die Modelleingänge.

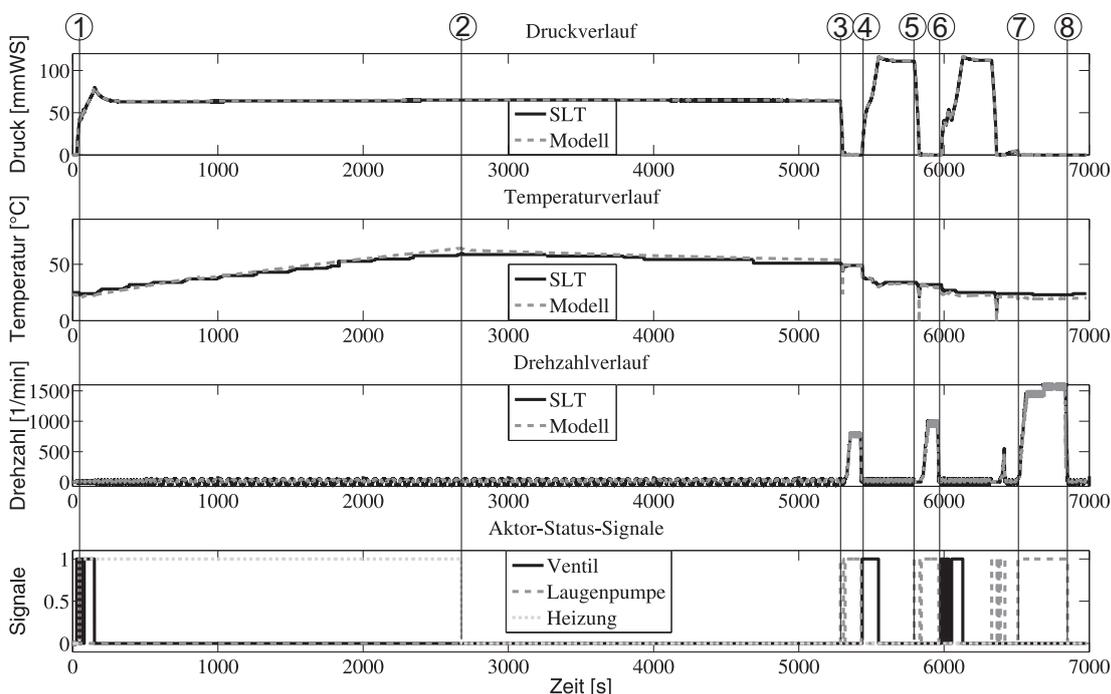


Bild 5-11: HiL-Verfahrenstest Baumwolle 60 °C mit 6 kg Standard Load A

Zu Beginn des Waschprozesses wird das Ventil mehrmals geöffnet und Wasser fließt auf verschiedenen Wegen in den Laugenbehälter. Der Drucksensor zeigt einen Anstieg der Wassersäule. Nach dem Überschreiten eines Mindestniveaus wird die Heizung eingeschaltet (Punkt 1 in Bild 5-11). Das Ventil schaltet anschließend maximal drei Mal, bis die notwendige Wassermenge für die 6 kg Beladung eingelaufen ist oder der Hinschaltpunkt von 80 mmWS erreicht ist. In der anschließenden Heizphase von Punkt 1 bis 2 werden das eingelaufene Wasser und die Wäsche auf 60 °C erwärmt. Die Heizphase endet mit dem Erreichen der eingestellten 60 °C. Damit wurden die Einstellungen für das Heizen vom Steuerleistungsteil richtig umgesetzt. Dem System wurde genug Energie zugeführt, um die gewünschte Waschwirkung zu erreichen. Durch das Reversieren der Trommel

und der damit verbundenen Durchmischung des Systems wird die Wäsche gereinigt. Die genauen Zusammenhänge werden in Abschnitt 2.3.3 dargestellt. Das Waschen endet hier nach ca. 5300 s (Punkt 3). Die Laugenpumpe wird aktiviert und das Laugengemisch aus dem Laugenbehälter abgepumpt. Zum Abschluss der Waschphase wird die Wäsche zwischengeschleudert. Mit dem Zwischenschleudern endet die Waschphase. Anhand der hier vorliegenden Verläufe wurde die Waschphase vollständig und richtig umgesetzt.

Der Wasserzulauf in der Spülphase (Punkte 4 bis 6) wird aus den Wasserverbrauchsdaten der Waschphase berechnet. In dieser Phase wird die Wäsche mit viel Wasser relativ kurz gespült. Anschließend wird das Laugengemisch abgepumpt (Punkt 5) und die Wäsche zwischengeschleudert (Punkt 6). Im Anschluss findet ein zweiter Spülgang statt, in welchem der Wasserzulauf saugabhängig ist. Die Verläufe zeigen das erwartete Verhalten und die Druck-Niveaus, vergleiche dazu die Messung in Bild 4-9. Damit wurden die beide Spülgänge richtig umgesetzt.

Zum Schluss kommt das Endschleudern auf die maximale Drehzahl (Punkte 7 bis 8). Dabei soll möglichst viel Wasser auf mechanischem Wege aus der Wäsche geschleudert werden. Das Restfeuchtemodell berechnet anhand der Drehzahl die erreichte wäschespezifische Restfeuchte. Die hier vorgestellte HiL-Simulation beinhaltet keine Unwuchtbehandlung. Aus diesem Grund zeigt die Messung einen optimalen Schleuderrhochlauf mit der maximalen Drehzahl. Um die Unwuchtbehandlung umzusetzen, bedarf es weiterer Hardware sowie eines Emulators und dessen Ansteuerung, um den komplexen Antrieb abzubilden. Die entwickelte HiL-Simulation soll zunächst in der Verfahrensprüfung eingesetzt werden. Deshalb wurde die Unwuchtbehandlung in dieser Ausbaustufe zunächst zurückgestellt.

Der HiL-Verfahrenstest zeigt den kompletten Durchlauf eines Waschprogramms. Dabei hat das Steuergerät keinen Unterschied zwischen dem realen Waschautomaten und der HiL-Simulation festgestellt. Die in der HiL-Simulation aufgezeichneten Messdaten (Bild 5-11) zeigen einen fehlerfreien und plausiblen Waschprozessverlauf.

2. Beispiel: Die Versuchseinstellungen bleiben die gleichen wie im ersten Versuch, nur der Wäscheposten ist gealtert. Durch das Waschen und Tragen der Wäsche nutzen sich die Fasern ab und sind nicht mehr so eng gebündelt. Als Folge entstehen mehr Zwischenräume, welche das Saugvermögen bei gleichbleibendem Gewicht erhöhen. Dies wird im Allgemeinen als das Altern der Wäsche bezeichnet. Dadurch kann sich das Saugverhalten bei einem Standard Load A Wäscheposten um bis zu 16 % erhöhen. Dieser Wert wird in der folgenden HiL-Simulation im Saugverhalten der Beladung eingestellt.

Um zu sehen, wie das Steuergerät auf das erhöhte Saugverhalten reagiert und sich der Waschprozess zum vorherigen unterscheidet, wird diese Simulation mit der

vorangegangenen verglichen. Dafür werden die aufgezeichneten Druck-, Temperatur- und Drehzahlverläufe aus dem Steuergerät verglichen. Um die Unterschiede besser darzustellen, werden die eingelaufene Wassermenge und das Heizsignal hinzugekommen. In den Verläufen wird der Versuch mit dem erhöhten Saugverhalten als schwarze Linie und der normale Versuch grau gestrichelt dargestellt (Bild 5-12).

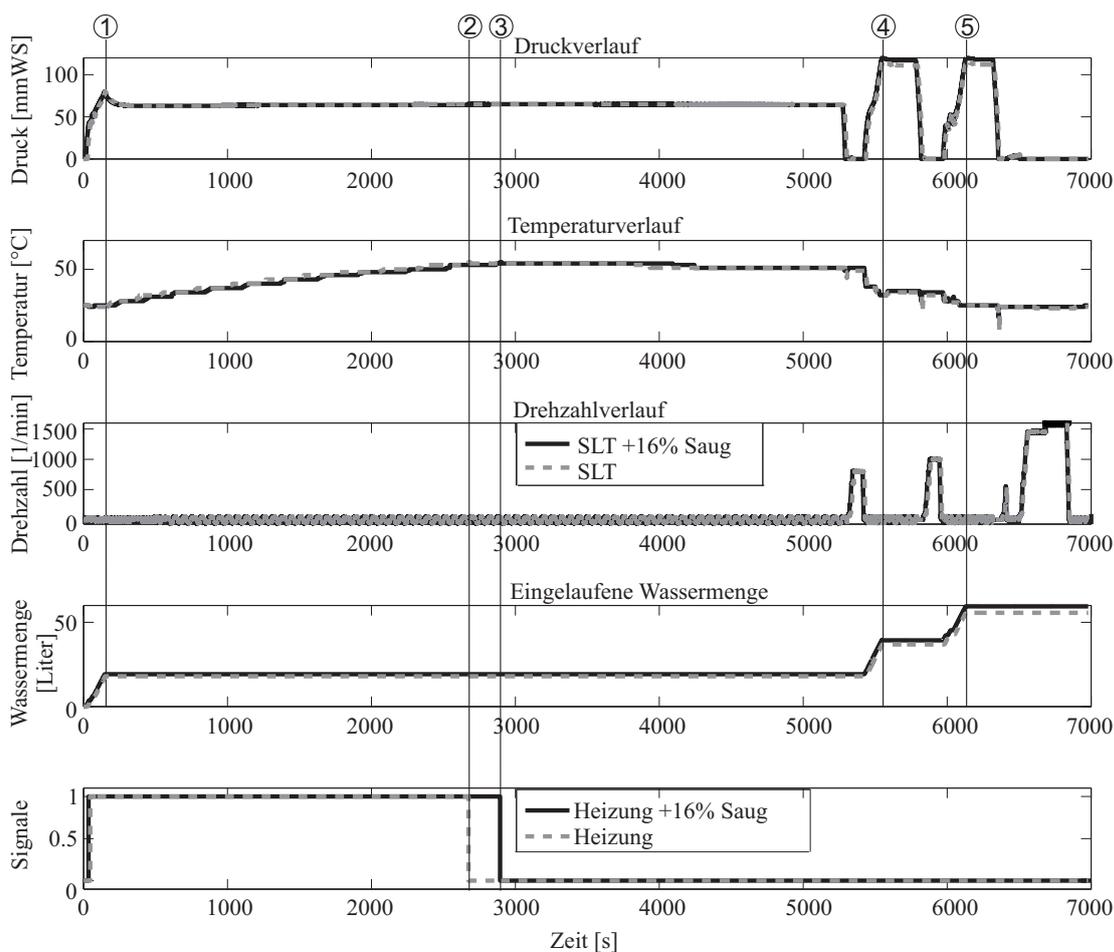


Bild 5-12: HiL-Verfahrenstest mit einer 16% höheren Saugfähigkeit der Beladung

Die Verläufe ähneln sich sehr stark. Die Spülgänge und das Endschleudern finden zum selben Zeitpunkt statt und sehen gleich aus – sind aber im Detail unterschiedlich. Der signifikanteste Unterschied liegt in der eingelaufenen Wassermenge. Durch das erhöhte Saugverhalten sind 1,2 l mehr in den Laugenbehälter gelaufen (Punkt 1 in Bild 5-12). Das Steuergerät hat auf das erhöhte Saugverhalten reagiert und mehr Wasser einlaufen lassen. Um diese zusätzlichen 1,2 l auf die eingestellten 60 °C zu heizen, muss die Heizung 220 s länger heizen. Diese Differenz ist in Bild 5-12 zwischen den Punkten 2 und 3 zu sehen.

Im weiteren Verlauf der Messung wird der erhöhte Wasserbedarf in den Spülgängen sichtbar. Beim ersten Spülgang (Punkt 4) laufen ebenfalls 1,2 l mehr in den Laugenbehälter ein. Beim zweiten Spülgang sind es sogar 1,4 l (Punkt 5). Diese beiden Werte sind mit Vorsicht zu betrachten, da in beiden Fällen die maximale Wassersäule von 120 mmWS erreicht wird und deshalb der Wasserzulauf beendet wird. Bis auf die erläuterten Unterschiede zeigt die HiL-Simulation einen reproduzierten Testdurchlauf des ersten Beispiels.

Damit wurde das Hauptziel erreicht: Die Entwicklung und Umsetzung einer HiL-Simulation für den Waschautomaten. Insgesamt zeigen die beiden HiL-Verfahrenstests eine sehr gut funktionierende HiL-Simulation. Das Streckenmodell ist in der Lage, den gesamten Waschprozess in allen Phasen sehr detailliert abzubilden. Darüber hinaus wird die Echtzeit über die gesamte Simulationsdauer eingehalten. Die mittlere Prozessorauslastung liegt bei 20 %. Bei einer Prozessorauslastung bis 66 % wird die Echtzeit auf der Echtzeithardware sicher eingehalten. Damit sind noch genügend Leistungsreserven auf dem PXI-System für Erweiterungen vorhanden, um z. B. weitere Sensoren, Aktoren, Emulatoren und Modelle einbinden zu können.

5.3.3 Ausblick

In diesem Kapitel wurde die systematische Entwicklung einer HiL-Prüfstandsarchitektur für Waschautomaten vorgestellt, welche sich an den Anforderungen und Randbedingungen der Hausgeräteindustrie orientiert. Wie bereits in Abschnitt 5.3.2 angedeutet, ist dies nur die erste Ausbaustufe, welche alle Grundfunktionen enthält. In dieser Ausbaustufe fehlen Extrafunktionen wie das Dampfmodul, die regelbare Umflutpumpe, das Warmwasserventil, die Dosiereinheit und der PLPM-Antrieb. In der nächsten Ausbaustufe gilt es diese Extrafunktionen zu modellieren und in die bestehende HiL-Simulation zu integrieren. Darüber hinaus hat jeder Prüf- und Entwicklungsingenieur spezielle Anforderungen im Rahmen seines Aufgabengebiets. An diese Anforderungen muss die HiL-Simulation individuell angepasst werden.

Neben den Erweiterungen besteht eine „... zentrale Herausforderung für einen effizienten Einsatz von HiL-Systemen ... in der automatisierten Durchführung von Tests“ [WR06, Seite 686]. Die Notwendigkeit der Testautomatisierung wird von Guddat [Gud03] mit folgenden Erkenntnissen begründet und in der Arbeit von Olejniczak [Ole07] auf vier Hauptaspekte zusammengefasst:

- (i) Mit zunehmender Komplexität der Tests steigt auch der manuelle Aufwand zur Testdurchführung. Dieser Aufwand hat höhere Kosten zur Folge.
- (ii) Der Tester stellt eine potenzielle Fehlerquelle dar, sowohl bei der Eingabe von Fehlern als auch beim Ablesen. Als Richtwert werden in [Bei95]

durchschnittlich drei Fehler auf 1000 Tastenanschläge genannt – bei einer professionellen Arbeitskraft.

- (iii) Ein entscheidender Faktor bei einer effizienten Fehlersuche ist die Reproduzierbarkeit der Fehler. Erst wenn ein Testverfahren einen Fehler reproduzierbar aufdeckt, ist eine effiziente Fehlerfindung und Beseitigung möglich. Anschließend kann mittels Regressionstests sichergestellt werden, dass der Fehler behoben wurde und bei der Behebung kein neuer eingebaut wurde.
- (iv) Bei einer Testautomatisierung lassen sich die einmal erstellten Testfälle bei nächsten Gerätetypen wiederverwenden. Die Erstellung dieser Testfälle ist bei der Erstanwendung mit einem höheren Aufwand verbunden, spart jedoch bei den nächsten Tests Zeit ein. Die eingesparte Zeit kann in das Erstellen neuer Testfälle investiert werden, um die Testabdeckung weiter zu erhöhen.

Mit einer Testautomatisierung steigen die Datenmengen, die der Prüfenieur auszuwerten hat. An dieser Stelle müssten die aktuellen Testauswerteskripte auf eine Automatisierung überprüft und gegebenenfalls erweitert werden. Darüber hinaus zeigt [AOS13] in Bild 5-13 weitere Potenziale zur Automatisierung weiterer Testprozesse, welche für diesen Anwendungsfall überprüft werden müssten. Die Testprotokollierung mit *DIAdem* ist bereits vollständig automatisiert, das gleiche gilt für die Testdurchführung durch den *TestMaster*. Die Testauswertung ist bereits teilweise automatisiert, aber zur vollständigen Automatisierung ist noch viel Entwicklungsarbeit notwendig. Dazu müssen Auswerteverfahren entwickelt und umgesetzt werden. Zur Automatisierung der Testplanung und Testspezifikation müssen die Fehlerarten und die Möglichkeiten der Testmethoden genau spezifiziert werden. Auf dieser Grundlage können die Testmethoden und Testplanungen für die einzelne Fehlersuche oder für Testreihen entwickelt werden. Erst wenn diese Zwischenschritte erfolgt sind, kann eine geeignete Umsetzung der Automatisierung der Testplanung und Spezifikation erfolgen.

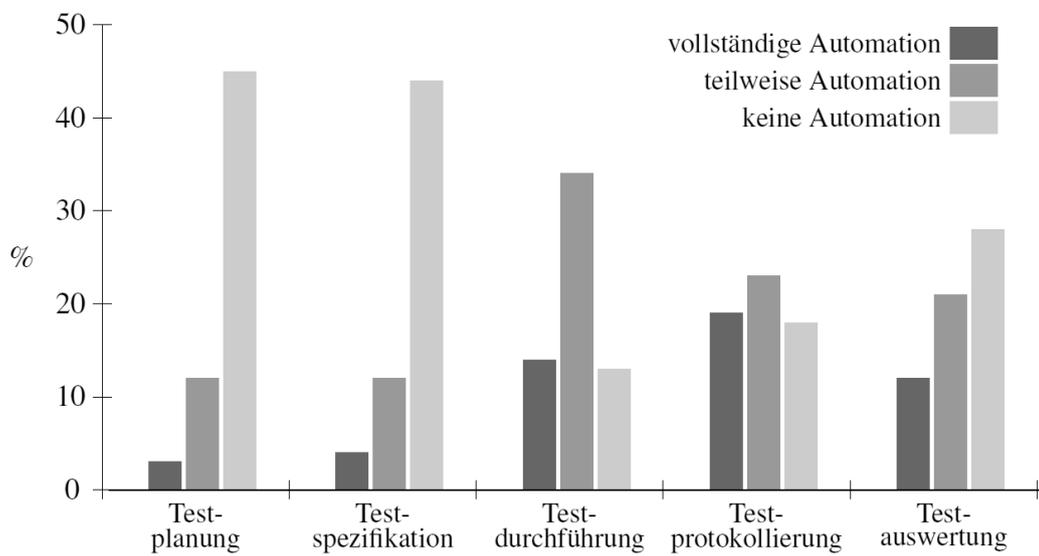


Bild 5-13: Umfrage zum aktuellen Automatisierungsgrad (in %) in den jeweiligen Testprozessen in Industrieunternehmen [AOS13]

6 Anwendungsbeispiele für MiL-Simulationen

Dieses Kapitel beschreibt zwei Anwendungsbeispiele für die entwickelten Strecken- und Steuerungsmodelle. Im ersten Anwendungsbeispiel wird das Streckenmodell des Waschautomaten in eine MiL-Simulation eingebunden. Die MiL-Simulation wird in der Systementwurfphase eingesetzt, also der linken Seite des V-Modells, um die Systemauslegung und Entwicklung modellbasiert zu unterstützen. Dabei werden das Strecken- und das Steuergerätemodell in einer Regelschleife simuliert, siehe Abschnitt 2.1.1. In Abhängigkeit der Aufgabenstellung wird in dieser Simulation der Steuer- und Regelalgorithmus oder das Streckenmodell analysiert und bzw. oder entwickelt. Der Einsatz von validierten Modellen in der Entwicklungsphase trägt zu einem ausgereiften und ressourcenschonenden Produkt bei. Darüber hinaus werden die Modelle an die kommenden Gerätegenerationen angepasst, was später die Nutzung des Streckenmodells für die HiL-Simulation vereinfacht.

In Abschnitt 6.1 wird modellbasiert eine neue Einbauposition des Füllstandsensors untersucht. Für diese werden neue Rückschaltpunkte des intelligenten Wasserzulaufs bestimmt und anschließend in einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Zusätzlich wird eine Erweiterung des Streckenmodells, welches nur für die MiL-Simulation notwendig ist, vorgestellt. Das zweite Anwendungsbeispiel ist in zwei Abschnitte unterteilt. Abschnitt 6.2 beschreibt das phänomenologische Waschwirkungsmodell. Dieses wird in Abschnitt 6.3 in eine Mehrzieloptimierung eingebunden, um paretooptimale Waschprozessparameter zu bestimmen und damit die Waschprozessauslegung zu unterstützen.

6.1 Modellbasierte Auslegung einer Neupositionierung des Füllstandsensors

Die zunehmenden Beladungsmengen führen zu einer Verdichtung des Bauraums im Waschautomaten. Daher müssen Sensorpositionen permanent überprüft, angepasst und ausgelegt werden. Davon bleibt auch der Füllstandsensord nicht unberührt. Eine Änderung der Einbauposition oder der Geometrieparameter führt zur notwendigen Anpassung und Überprüfung vieler verfahrenstechnischer Parameter in der Steuerung, wie z. B. die des intelligenten Wasserzulaufs. Durch eine Änderung der Geometrieparameter des Laugenbehälters ändert sich die nicht-lineare Beziehung zwischen Füllvolumen und Druckwert. Gleiches gilt für eine Änderung des Füllstandsensors, dieser wird um die Höhe h_{LF} nach oben versetzt

(siehe Bild 6-1). Durch die Änderung müssen die neuen Steuerungsparameter für den Wasserzulauf in aufwendigen Messversuchen mit verschiedenen Beladungsarten und -mengen bestimmt werden. Die Anzahl der Messversuche kann durch eine MiL-Simulation deutlich verringert werden.

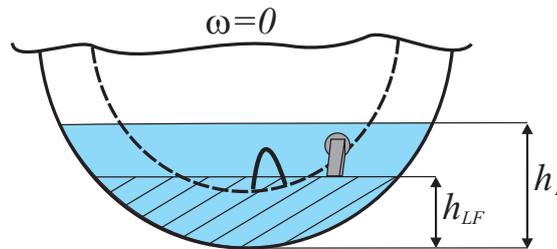


Bild 6-1: Veränderung der Luftfalleneinbauposition um die Höhe h_{LF}

Im Folgenden wird das entwickelte Streckenmodell genutzt, um modellbasiert die Rückschaltpunkte des intelligenten Wasserzulaufs zu bestimmen. Dazu wird im Steuerungsmodell der intelligente Wasserzulauf abgebildet (Abschnitt 6.1.1) und im Streckenmodell der Nullpunkt der Luftfalle verändert. Mit diesen Erweiterungen werden neue Rückschaltpunkte in einer MiL-Simulation ausgelegt (Abschnitt 6.1.2). Im Abschnitt 6.1.3 werden die ermittelten Rückschaltpunkte durch eine Variation der Sauggeschwindigkeiten auf ihre Robustheit untersucht.

Der Füllstandsensord besteht aus mehreren Bauteilen: der Luftfalle, dem Drucksensor und einem Verbindungsschlauch. Die Luftfalle ist direkt am Laugenbehälter befestigt und soll ein definiertes Luftvolumen einschließen, wenn der Laugenbehälter mit Wasser gefüllt wird. Bei einem Wasseranstieg drückt dieses Luftvolumen gegen eine Membran des Drucksensors, welcher außerhalb des Laugenbehälters über der Luftfalle angebracht ist. Dieser Luftdruck wird in ein digitales Signal umgewandelt. Ein Gummischlauch verbindet diese beiden Bauteile. Da hier eine Änderung der Einbauposition im Laugenbehälter betrachtet wird und diese durch die Luftfallenposition gekennzeichnet ist, steht bei den folgenden Betrachtungen die Luftfalle bzw. ihre Position stellvertretend für den Füllstandsensord.

6.1.1 Der intelligente Wasserzulauf

Der intelligente Wasserzulauf basiert auf dem niveaugesteuerten Wasserzulauf, welcher in Abschnitt 2.3.2 beschrieben ist. Beim niveaugesteuerten Wasserzulauf soll möglichst schnell das Arbeitsniveau erreicht werden. Als Arbeitsniveau wird ein Füllstandsbereich im Waschautomaten bezeichnet, welcher während der Waschphase eingehalten werden sollte. Das Ziel der intelligenten Wasserzulaufsteuerung ist das Erreichen des benötigten Arbeitsniveaus bei unterschiedlichen

Beladungsmengen mit möglichst wenigen Wassereinlaufzyklen und geringem Wasserverbrauch. Die Reduktion der Wassereinlaufzyklen wird mittels einer Fallunterscheidung mit variablen Füllmengen erreicht. Im Folgenden wird dieses Verfahren schematisch an einem Statechart erläutert. Die detaillierte Funktionsweise des intelligenten Wasserzulaufs kann in [AEG⁺98] nachgeschlagen werden.

Die intelligente Wasserzulaufsteuerung ist ein Teil des Steuerungsmodells¹. Diese besteht aus mehreren sich wiederholenden Unterzuständen: Wassereinlaufphase, Saugphase und abschließende Drucküberprüfung (Bild 6-2).

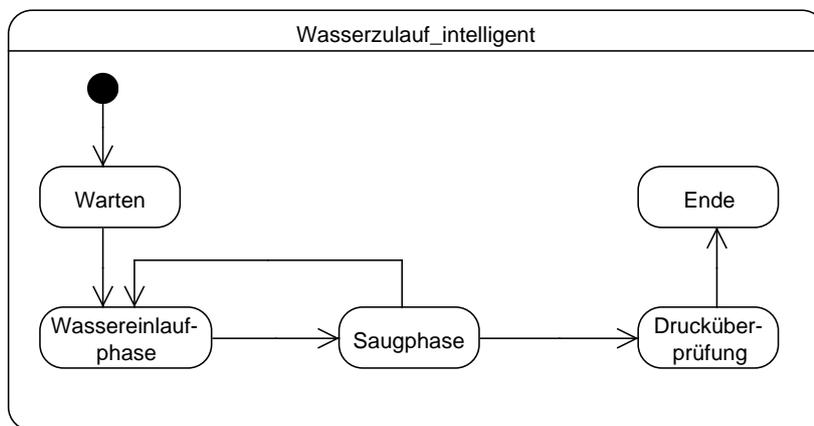


Bild 6-2: Intelligente Wasserzulaufsteuerung mit den dazugehörigen Unterzuständen

Bild 6-3 zeigt den intelligenten Wasserzulauf beispielhaft am Druckverlauf. In der ersten Wassereinlaufphase läuft die Mindestwassermenge V_1 ein. Anschließend folgt die Saugphase, in der die Saugzeit bis zum Rückschaltpunkt 1 $t_{1,saug}$ gemessen wird. Diese Saugzeit wird durch eine Fallunterscheidung in vorgegebene Zeitintervalle eingeordnet ($t_{1,saug\ min}$, $t_{1,saug\ mittel}$ und $t_{1,saug\ max}$). Jedem dieser drei Zeitintervalle wird eine Wassereinlaufmenge für den nächsten Wasserzulauf zugeordnet ($V_{2,max}$, $V_{2,mittel}$ und $V_{2,min}$). Ausschlaggebend für die benötigte Zeit zum jeweiligen Rückschaltpunkt ist die Sauggeschwindigkeit der Beladung. Mit dem Zulauf der Einlaufmenge V_2 beginnt die zweite Wasserzulaufphase und Saugphase. In dieser wiederholt sich der Ablauf mit veränderten Parametern für V_2 und $t_{2,saug}$. Nach der dritten Wassereinlaufphase sollte genügend Wasser im Laugenbehälter sein, sodass das Arbeitsniveau nicht unterschritten wird und es in der dritten Saugphase und der Drucküberprüfung nicht zum Nachtanken kommt.

¹Die intelligente Wasserzulaufsteuerung ist ein Unterzustand vom *Wasserzulauf*, welcher wiederum einen Teil des Superzustands *Prozesse* darstellt, siehe Bild 3-23.

Wird in der Drucküberprüfungsphase ein minimales Druckniveau unterschritten, folgt ein Nachtanken mit einer festen Wassereinflaufmenge V_4 . Durch diese Einordnung der Saugzeiten in Kategorien kommt es dazu, dass selbst bei leicht unterschiedlichen äußeren Umständen dieselbe Wasserzulaufstrategie zu unterschiedlichen Wassermengen führt. Eine Analyse dieses Phänomens erfolgt in Abschnitt 6.1.3.

Aus Abschnitt 2.3.3 ist bekannt, dass die Sauggeschwindigkeit vor allem von der Beladungsmenge, der Art und der Restfeuchte abhängt. Die Sauggeschwindigkeit ist höher bei größeren Beladungsmengen und nimmt mit steigender Restfeuchte ab. Wenn die gemessene Saugzeit kurz ist, kann daraus geschlossen werden, dass mehr Wasser im Prozess benötigt wird. Somit wird die zulaufende Wassermenge an die Beladung und deren Sättigung angepasst.

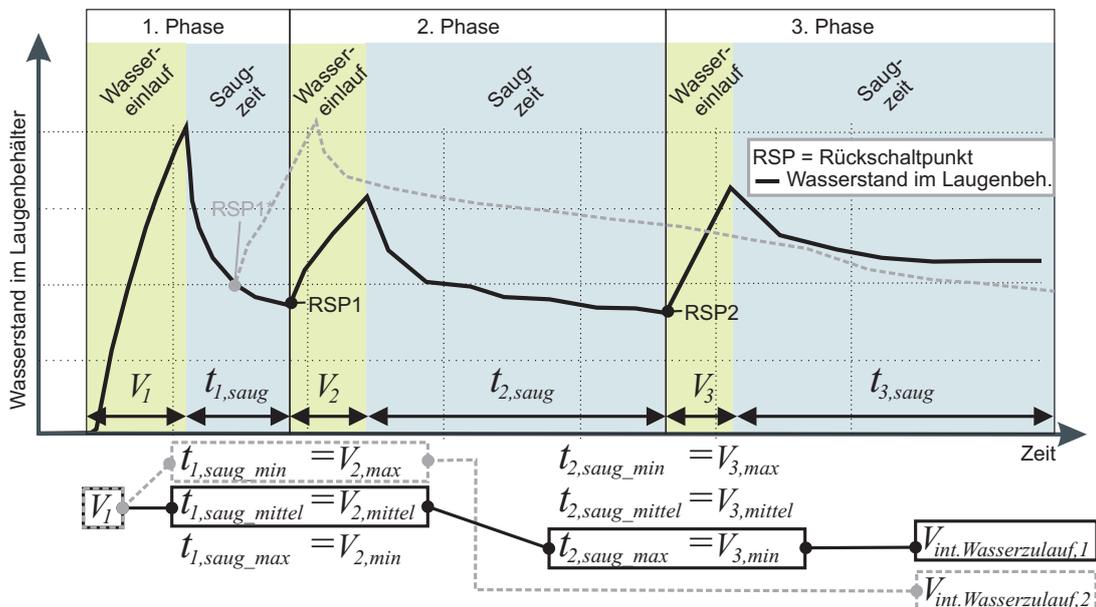


Bild 6-3: Intelligenter Wasserzulauf mit den drei Wassereinflauf- und Saugphasen; unterhalb der x-Achse sind die Zulaufmengen für der beiden Verläufe dargestellt

Eine Veränderung der Wasserzulaufsteuerung kann durch die Verschiebung der Rückschaltpunkte erreicht werden (siehe grau gestrichelt). Wenn es dazu kommt, dass ein Rückschaltpunkt nicht erreicht wird, wird eine Wassereinflauf- und Saugphase übersprungen und mit der darauffolgenden Phase fortgefahren, insofern es eine weitere gibt. Im Weiteren werden nur die Rückschaltpunkte für die neue Luftfallenposition der intelligenten Wasserzulaufsteuerung ausgelegt. Eine Änderung der anderen Parameter wie z. B. der Saugzeiten und der Wasserzulaufmengen ist

nicht notwendig, weil die Laugenbehälter- und Trommelgeometrie unverändert bleibt und die vorhandenen Parameter als gut gewählt angenommen werden.

6.1.2 Auslegung der Rückschaltpunkte

Zur Auslegung der Rückschaltpunkte müssen Kriterien für diese festgelegt werden. Das Ziel des Wasserzulaufs ist das Erreichen eines näherungsweise konstanten Arbeitsniveaus bei verschiedenen Beladungsmengen. Es sollte möglichst zwischen 40 - 50 *mmWs* liegen. Die Anforderungen an den Wasserzulauf sind neben dem Arbeitsniveau eine möglichst geringe Anzahl an Wasserzuläufen angestrebt, im Folgenden als Wassereinlaufzyklen bezeichnet, um die Ventilschaltzeiten minimal zu halten. Eine weitere Forderung ist ein minimaler Wasserverbrauch. Da bis auf die Rückschaltpunkte alle Parameter der Wasserzulaufsteuerung konstant gehalten werden, sind die Anforderungen an den Wasserzulauf auch gleichzeitig die Anforderungen für die auszulegenden Rückschaltpunkte.

Das bedeutet, ein Rückschaltpunkt ist gut gewählt, wenn durch ihn

- weniger Wasser verbraucht,
- das geforderte Arbeitsniveau erreicht und
- die minimale Anzahl an Wassereinlaufzyklen benötigt wird.

Die Kriterien werden im Folgenden physikalischen Größen im Modell zugeordnet. Mit diesen Einstellungen werden in *1-kg*-Schritten die Rückschaltpunkte für eine Standard Load A Beladung bestimmt. Dabei werden nur die ausgelegten Rückschaltpunkte für kleine, halbe und volle Beladungen vorgestellt, weil diese alle die möglichen Wäscheposten in den Haushalten ausreichend genau abdecken.

Ermittlung der Rückschaltpunkte Zur Auslegung der Rückschaltpunkte werden die Rückschaltpunktintervalle ermittelt, d. h. die Bereiche, in denen die Rückschaltpunkte gewählt werden können. Die Intervalle beginnen bei 30 *mmWs*, dieser Druckwert entspricht der minimal notwendigen Wassersäule für einen Austausch zwischen der freien und gebundenen Flotte. Als Intervallobergrenze wird 50 *mmWs* festgelegt, weil Rückschaltpunkte über dem Arbeitsniveau zu einem Wassermehrverbrauch führen. Die Rückschaltpunktintervalle zeigen den Einfluss der Rückschaltpunkte auf das Arbeitsniveau, den Wasserverbrauch und die Wassereinlaufzyklen. Hinzu kommt noch eine weitere Forderung für die kleinen, die halben und die vollen Beladungen. Kleine Beladungen sollen mit einem Wasserzulauf, halbe Beladungen mit zwei und volle Beladungen mit drei Wasserzuläufen beendet werden. Mit zunehmender Beladungsmenge steigt die Gesamtwaschdauer. Um diese bei kleinen und halben Beladungen gering zu halten, soll die Wasserzulaufphase für diese Beladungen mit möglichst wenigen Wasserzuläufen abgeschlossen werden.

Den ermittelten Rückschaltintervallen werden das erreichte Arbeitsniveau, der Wasserverbrauch und die Wassereinlaufzyklen zugeordnet. Der Wasserverbrauch ist die Summe der Wasserzuläufe V_1, \dots, V_4 , welcher in Bild 6-3 als $V_{int.Wasserzulauf,i}$ dargestellt ist. Die Auslegung erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird der Rückschaltpunkt 1 für die halbe Beladung bestimmt. Dieser bildet die Grundlage für die Auslegung des zweiten Rückschaltpunkts und wird dabei nicht mehr verändert (zweiter Schritt). Tabelle 6-1 zeigt die verschiedenen Rückschaltpunktintervalle und die sich daraus ergebenden Arbeitsniveaus, Wasserverbräuche und Wassereinlaufzyklen.

Tabelle 6-1: Variation der Rückschaltpunkte für kleine, halbe und volle Beladungen

Rückschaltpunktintervall [mmWs]	Arbeitsniveau [mmWs]	Wasserverbrauch [Liter]	Wassereinlaufzyklen
kleine Beladung			
30 - 41	41,7	9,4	1
42 - 50	81,0	13,8	2
halbe Beladung			
30 - 50	41,4	14,2	2
volle Beladung			
30 - 32	41,3	16,7	4
33 - 35	41,7	17,5	3
36 - 50	51,8	20,6	3

Aus den Ergebnissen der kleinen und halben Beladung gilt es den Rückschaltpunkt 1 festzulegen. Die Simulation mit den jeweiligen Rückschaltpunkten zeigt, dass der Rückschaltpunkt 1 für eine halbe Beladung zwischen 30-50 *mmWs* gewählt werden kann. Dieses Intervall wird durch die kleine Beladung auf 30-41 *mmWs* eingeschränkt, weil höhere Rückschaltpunkte bei dieser Beladung zu einem zweiten Wasserzulauf und damit zu einem höheren Arbeitsniveau, Wasserverbrauch und Wassereinlaufzyklen führen. Damit liegt der durch Mittlung berechnete und vorerst beste Rückschaltpunkt bei 35,5 *mmWs*.

Im Hinblick auf die volle Beladung ist die Wahl eines niedrigeren Rückschaltpunktes vorteilhafter. In Bild 6-3 sind zwei Druckverläufe dargestellt: schwarz ein Verlauf mit niedrigem Rückschaltpunkt und gestrichelt ein Verlauf mit einem höheren. Bei einem höheren Rückschaltpunkt wird die Saugzeit verkürzt, wodurch in diesem Beispiel die Zulaufmenge, Schaltzeiten und Arbeitsniveau verändert werden. Durch eine Verkürzung des Intervalls wird das System empfindlicher für Störungen und Abweichungen. Deshalb wird der Rückschaltpunkt 1 in das untere Intervalldrittel auf 33 *mmWs* festgelegt.

Bei der Simulation zur Bestimmung des Rückschaltintervalls für den Rückschaltpunkt 2 wird der erste Rückschaltpunkt konstant gehalten. Die Simulationsergebnisse sind in Tabelle 6-1 als Rückschaltpunkte für die volle Beladung dargestellt. Diese zeigen drei Intervalle mit unterschiedlichen Wasserverbräuchen, Arbeitsniveaus und Wassereinlaufzyklen. Im ersten Intervall 30-32 *mmWs* wird das wenigste Wasser verbraucht, aber die maximale Anzahl der Rückschaltpunkte überschritten. Ebenso ausgeschlossen wird das Intervall von 36-50 *mmWs*, da hier das Arbeitsniveau zu hoch liegt und zu viel Wasser verbraucht wird. Damit bleibt das Intervall 33-35 *mmWs* übrig. Um möglichst weit von Sprüngen entfernt zu sein, wird 34 *mmWs* gewählt.

Bewertung der Vorgehensweise Die gewählte Vorgehensweise liefert eine schnellere Analyse im Vergleich zu Messversuchen. Sie zeigt wichtige Zusammenhänge zwischen den Parametern auf und verbessert so das Prozessverständnis. Durch diese Vorgehensweise ist es nun möglich, die Auswirkungen von unterschiedlichen Luftfallenpositionen auf die intelligente Wasserzulaufsteuerung zu untersuchen. Darüber hinaus sind auch Untersuchungen zur Veränderung anderer Parameter, wie z. B. der Geometrie des Laugenbehälters, Saugzeiten und Einlaufmengen, denkbar. Die so erzielten Ergebnisse dienen dann als Basis für Versuche an realen Systemen. Alternativ müssten die Wasserzulaufparameter in einer Vielzahl von langen Versuchen an realen Systemen ermittelt und getestet werden.

6.1.3 Anwendung der Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse ermöglicht es, vorhandene mathematische oder physikalische Modelle näher zu untersuchen. Sie ist eine Analyseform, die Aussagen über den Einfluss von Eingangsgrößen auf die Ausgangsgrößen eines Systems erlaubt. In diesem Anwendungsfall soll mittels der Sensitivitätsanalyse der Einfluss des Saugverhaltens auf die bestimmten Rückschaltpunkte untersucht werden bzw. wie groß die Änderung sein darf und wie sich diese auf den Wasserverbrauch und die Schaltzyklen auswirkt. Dadurch erhält man ein Maß für die Robustheit dieses Prozesses.

Um eine geeignete Analysemethode auswählen zu können, muss das Modellverhalten bekannt sein. Die Eingangsgröße Wasserzulauf bewirkt ein nichtlineares Verhalten bei der Ausgangsgröße Druck. Das kann zu großen Sprüngen der Systemantwort bei kleinen Änderungen der Eingänge führen. Diese sind auf die Fallunterscheidung in der Wasserzulaufsteuerung zurückzuführen. Es handelt sich also hier um ein komplexes nichtlineares System. Zur Analyse wird auf eine lokale Sensitivitätsanalyse zurückgegriffen. Die Methode eignet sich auf Grund der Nichtlinearität normalerweise nicht für derartige Modelle. Die Problemstellung bezieht sich jedoch nur auf die Endwerte der Ausgangsgrößen, nicht auf deren

Verlauf. Die Sprünge, die durch Variation der Eingangsgrößen in den Ausgangsgrößen auftreten können, sind wichtig für die Ermittlung der Rückschaltpunkte. Sie werden auch benötigt, um den robusten Bereich eines Rückschaltpunkts bei variierendem Saugverhalten zu bestimmen. Eine Übersicht und Beschreibung der Verfahren kann in [Sch05] nachgeschlagen werden.

Mit *One-At-a-Time*-Simulationen können die Eingangsgrößen nacheinander variiert und das Verhalten der Ausgangsgröße aufgezeichnet werden. In der Sensitivitätsanalyse wird das Saugverhalten für die ermittelten Rückschaltpunkte variiert. Damit soll abgeschätzt werden, wie sensibel die Wasserzulaufsteuerung auf Schwankungen des Saugverhaltens reagiert. Das Arbeitsniveau wird im Folgenden nicht betrachtet, weil nur die Sauggeschwindigkeit variiert wird und die gebundene Flotte gleich bleibt.

Bei der Sensitivitätsanalyse wird die halbe und die volle Beladung aus dem vorangegangenen Abschnitt untersucht. Die Sauggeschwindigkeit wird durch einen Faktor von -30 % bis +30 % in 5%-Schritten variiert. Als Ausgangsgrößen dienen der Wasserverbrauch und die Anzahl der Wassereinlaufzyklen. Mit diesen Ausgangsgrößen können Änderungen im Wasserzulauf nachvollziehbar dargestellt werden. Die Tabelle 6-2 zeigt die Ergebnisse der Simulation.

Eine Zu- und Abnahme der Sauggeschwindigkeit für die halbe Beladung, im variierten Bereich, zeigt keinen Einfluss auf den Rückschaltpunkt 1. Der Wasserverbrauch bleibt unverändert bei 14,2 Litern und die Anzahl der Wasserzulaufzyklen bei zwei. Dieses Ergebnis war zu erwarten, weil das Auswahlintervall für den Rückschaltpunkt 1 (Abschnitt 6.1.2) relativ groß war. Dies war bei der vollen Beladung nicht der Fall, hier sind mehrere Veränderungen zu beobachten.

Tabelle 6-2: Variation der Sauggeschwindigkeit bei halben und vollen Beladungen

Sauggeschwindigkeit [%]	Wasserverbrauch [Liter]	Wassereinlaufzyklen
halbe Beladung		
70 - 130	14,2	2
volle Beladung		
70 - 75	16,4	2
80 - 90	18,1	3
95 - 115	17,5	3
120 - 130	20,6	3

Im Intervall von 95 % bis 115 % kann sich die Sauggeschwindigkeit ändern, ohne dass diese die Wassereinlaufmenge verändert, dies ist somit der Ausgangswert für die weiteren Betrachtungen. Bei einer Abnahme der Sauggeschwindigkeit auf 70 %

bis 75 % sinkt die Wasserzulaufmenge auf 16,4 Liter. Durch die langsamere Wasseraufnahme der Textilien wird der erste Rückschaltpunkt übersprungen (nicht erreicht), dafür der zweite in kurzer Zeit erreicht, sodass es hier nur zu zwei Wasserzulaufzyklen kommt und weniger Wasser zuläuft. Das Intervall von 80 % bis 90 % hat einen größeren Wasserverbrauch als die beiden benachbarten Intervalle. Die geringere Sauggeschwindigkeit führt zu einem sehr späten Erreichen des ersten Rückschaltpunktes und einem schnelleren Erreichen des zweiten. In der Summe fließen dadurch 18,1 Liter in den Laugenbehälter. Höhere Sauggeschwindigkeiten von 120 % bis 130 % führen wie erwartet zu höheren Wasserzulaufmengen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das System bei voller Beladung empfindlicher auf Änderungen der Sauggeschwindigkeit reagiert. Es kommt zu einem unerwarteten Wassermehrverbrauch bei niedrigeren Sauggeschwindigkeiten. Insgesamt zeigen die ausgelegten Rückschaltpunkte eine gewünschte Funktion des Wasserzulaufs bei einer Änderung der Sauggeschwindigkeit von 95 % bis 115 %.

6.2 Waschwirkungsmodell

Die wichtigste Kenngröße eines erfolgreichen Waschprozesses ist die Waschwirkung. Wird diese nicht erreicht, verlieren alle anderen Effizienzgrößen ihre Basisvoraussetzung (siehe Abschnitt 4.4). In jedem Waschprogramm wird durch die Verfahrensparameter eine beladungsspezifische Reinigungsleistung eingestellt, weil diese im Prozess nicht gemessen wird. Diese kann nach dem Waschprozess mittels Remissionsmessungen nach [IEC10] bestimmt werden. Die Haupteinflussfaktoren auf die Waschwirkung wurden in Abschnitt 2.3.3 durch den SINNERSchen Kreis beschrieben. In diesem Abschnitt werden die genormten Anschmutzungsstreifen im Modell abgebildet. Durch die Einbindung des Anschmutzstreifenmodells in das Streckenmodell und die Kopplung mit den Waschprozessgrößen wird die erzielte Waschwirkung modelliert. Dadurch werden im Gesamtmodell alle wichtigen Waschprozess charakteristischen Größen abgebildet und das Prozessverständnis für den gesamten Waschprozess verbessert. Dazu werden zunächst die Anschmutzungsstreifen beschrieben und anschließend die darauf angebrachten Anschmutzungsarten charakterisiert. Auf dieser Grundlage wird ein Waschwirkungsmodell entwickelt.

6.2.1 Anschmutzungsstreifen

Zur Messung der Waschwirkung werden in Abhängigkeit der Beladungsmenge Anschmutzungsstreifen an die Beladungsstücke angenäht. In Tabelle 2-1 kann die genaue Anzahl der Anschmutzungsstreifen pro kg Beladungsmenge entnommen werden. Diese Anschmutzungsstreifen (Bild 6-4) bestehen aus sechs $12 \times 12 \text{ cm}$

großen Anschmutzflächen: unbeflecktes Referenzfeld, Sebum mit Rußpigmenten, Rußpigmente mit Mineralöl, Blut, Kakao und Rotwein. Diese künstlichen Anschmutzungen bilden charakteristisch die vielfältigen Verschmutzungen aus dem Alltag ab. Das erste Feld ist weiß und unbefleckt und wurde mit Fluoreszenz,

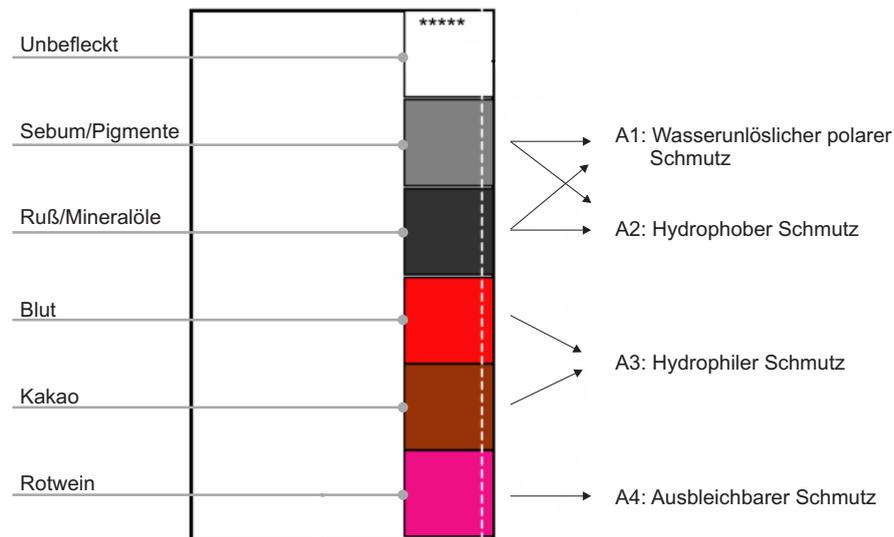


Bild 6-4: Anschmutzungstreifen mit den Standardanschmutzungen; rechts werden diese in vier idealisierte Schmutzarten unterteilt; die Darstellung der Anschmutzungstreifen ist an die [IEC10] angelehnt

einem optischen Aufheller, bearbeitet. Anhand dieses Feldes sollen Schmutzrepositionen nachgewiesen werden, d. h. Schmutzan- und -umlagerungen aus den anderen Anschmutzungstreifen. Die detaillierte Zusammensetzung der einzelnen Anschmutzungen kann in [IEC10] nachgeschlagen werden.

6.2.2 Anschmutzarten

Die Anschmutzungen auf den Streifen lassen sich in vier idealisierte Schmutzarten unterteilen: hydrophober, wasserunlöslicher polarer, hydrophiler und ausbleichbarer Schmutz. Das Bild 6-4 zeigt die vier Schmutzarten mit den jeweiligen Anschmutzungen. Diese bestehen zum Teil aus zwei unterschiedlichen Schmutzarten, z. B. Sebum und Ruß, oder zwei Anschmutzungen bestehen aus der gleichen Schmutzart, z. B. Blut und Kakao, welche sich wiederum im Detail unterscheidet. Zur Modellierung werden im Folgenden die einzelnen Schmutzarten und deren Lösemechanismen beschrieben.

A1: Wasserunlöslicher polarer Schmutz Die Rußpigmente stellen den wasserunlöslichen polaren Schmutz dar. Diese haben das gleiche elektrokinetische Potenzial wie die Textilfasern. Um diese Bindung und damit Pigmente zu lösen, sind Hydroxid-Ionen notwendig. Die Hydroxid-Ionen werden von der Pigmentoberfläche adsorbiert und damit die Pigmente und die Fasern polarisiert. Die Stärke der Polarisation ist abhängig von der Laugenkonzentration und vergrößert die Abstoßung von der Faser. Die Tenside verstärken diesen Vorgang, indem sie eine hydrophile Oberfläche der Textilien und der Pigmente mit gleichsinnig beladenen Tensiden benetzen. Durch eine Kombination von Abstoßungskräften und der Wäschebewegung werden die Pigmente gelöst und, durch die Tenside umschlossen, in der Lauge gehalten [Wag10].

A2: Hydrophober Schmutz Als wasserabweisend bzw. hydrophob wird öl- und fetthaltiger Schmutz bezeichnet. Dieser kann nicht allein mit Wasser gelöst werden. Das Lösen wird durch die Zugabe von Tensiden unterstützt, welche im Waschmittel enthalten sind, siehe dazu Abschnitt 2.3.3. Tenside setzen die Oberflächenspannung des Wassers herab, durch ein hydrophiles und ein hydrophobes Ende. Dadurch werden die Fasern vollständig mit den Tensiden benetzt, im Besonderen setzen sie sich an der Grenzfläche zwischen dem Schmutz und dem Textil an. Aufgrund der gleichsinnigen Enden und der erhöhten örtlichen Konzentration wird der Schmutz durch Abstoßungskräfte von der Faser gelöst. Dieses Lösen wird durch die Waschmechanik unterstützt. Im weiteren Waschverlauf wird der von der Textiloberfläche gelöste Schmutz vollständig durch die Tenside umschlossen und in der Waschlauge gehalten.

A3: Hydrophiler Schmutz Unter dem Begriff hydrophiler Schmutz können unterschiedliche eiweißhaltige Verbindungen und Schmutzarten einsortiert werden, z. B. Kakao, Eigelb, Bratensoße, Blut und Urin. Die Normanschmutzungen bestehen aus verfestigtem Blut und Kakao. Beide Anschmutzungen werden durch Enzyme gelöst, wobei im IEC-Waschmittel [IEC10] nur Protease-Enzyme enthalten sind. Diese funktionieren als Biokatalysatoren, d. h., sie werden bei Reaktion nicht verbraucht. Um die Eiweißverbindungen (Proteine) zu spalten und in der Lauge zu lösen, ist eine Aktivierungsenergie notwendig. Die Aktivität der Enzyme ist stark abhängig von Temperatur und pH-Wert. Bei einem pH-Wert von 9,0 liegt eine Reaktionsgeschwindigkeit (Aktivität) von 20 % bei 40 °C vor; diese erreicht ihr Maximum (100 %) bei 70 °C. Die genauen Werte und Zusammenhänge werden in [Wag10] detailliert beschrieben. Wie bei den anderen Schmutzarten gilt auch hier, dass die Enzyme über die Durchmischung der Waschtrommel zum Schmutz transportiert werden müssen. Nur dann können diese ihre Wirkung entfalten.

A4: Ausbleichbarer Schmutz Bei den ersten drei Schmutzarten handelt es sich um Oberflächenanschmutzungen. Im Gegensatz dazu dringt der ausbleichbare

Schmutz in Form von Rotwein in den Faserkern und bleibt in diesem. Dieser Schmutz ist kaum zu entfernen. Aus diesem Grund werden Bleichmittel auf Sauerstoffbasis eingesetzt, um den Schmutz zu oxidieren. Durch die Oxidation werden die Farbstoffe in farblose und wasserlösliche Fragmente umgewandelt und teilweise aus den Fasern herausgelöst. Die optimale Wirkung entfalten die Bleichmittel bei 60 °C und einem pH-Wert von 10-11 [Wag10], wobei die Bleichmittel in aktuellen Vollwaschmitteln bereits ab 30 °C aktiviert werden – diese werden in der Normprüfung jedoch nicht verwendet.

6.2.3 Abbildung der Waschwirkung

Die Waschwirkung wird qualitativ durch den SINNERSchen Kreis (Abschnitt 2.3.3) dargestellt. Dieser besteht aus fünf Größen: Mechanik, Temperatur, Wasser, Einwirkzeit und Waschmittel. Durch das Zusammenwirken dieser Größen wird die Anschmutzung von der Faser gelöst. Der Grad der Ablösung wird durch eine Reflexionsgradmessung erfasst, die Reflexionsgrade geben das Verhältnis zwischen reflektierter und einfallender Intensität in Form von elektromagnetischen Wellen an. Die einzelnen Anschmutzungsarten werden auf unterschiedliche Weise von der Textilfaser gelöst. Um Rotwein aus der Faser zu lösen bzw. umzuwandeln, ist Bleiche notwendig, welche zur Aktivierung eine erhöhte Temperatur benötigt. Die erhöhte Temperatur wiederum sorgt für eine Verfestigung der Blutanschmutzung und die Bleiche zerstört die Enzyme, welche für die hydrophile Schmutzlösung benötigt werden. Um diese teilweise gegenläufigen Prozesse berücksichtigen zu können, muss jede Anschmutzung einzeln abgebildet werden. Für eine physikalische Abbildung der komplexen chemischen Reaktionen fehlt ein detailliertes Grundlagenwissen in Form von Wechselwirkungen und Reaktionsgleichungen, welches zusätzlich aufwendig experimentell validiert werden müsste. Dabei handelt es sich um Fachwissen der Waschmittelhersteller, welches nicht frei verfügbar ist. Aus diesem Grund wird hier auf eine phänomenologische Modellbildung zurückgegriffen.

Im Folgenden wird eine Darstellung der Waschwirkung in einem 4-dimensionalen Kennfeld beschrieben. Dadurch kann die Waschwirkung übersichtlich dargestellt werden. Dieses ist jeweils nur für eine Anschmutzungsart gültig, sodass fünf solcher Kennfelder benötigt werden. Aus den fünf SINNERSchen Größen werden die zwei wichtigsten, Waschmittel und Temperatur, übernommen. Diese beiden Eingangsgroßen haben entscheidenden Einfluss auf jede Anschmutzungsart und somit auf das Waschergebnis, siehe Abschnitt 6.2.2. Als dritte Eingangsgröße kommt die Waschzeit hinzu. Die Waschzeit fasst die Größen Einwirkzeit und Waschmechanik zusammen. Im Waschprozess sind diese beiden Größen gekoppelt; es gibt keine Waschmechanik ohne Einwirkzeit und ohne Einwirkzeit keine Schmutzlö-

sung. Über eine Abfrage werden die Waschtrommelbewegung und der Wasserstand abgeprüft.

Durch den intelligenten Wassereinlauf wird in jedem Waschprozess immer eine Mindestmenge an Waschflotte sichergestellt, siehe Abschnitt 6.1.1, sodass eine Abhängigkeit von der Wassermenge hier vernachlässigt wird. Das Bild 6-5 zeigt exemplarisch das Waschwirkungskennfeld für Sebum, welches durch Messungen ermittelt wurde. Die Waschwirkungskennfelder der anderen Anschmutzungen sind qualitativ ähnlich und werden hier nicht weiter betrachtet. Bei den Messungen wurden Waschdauer, Temperatur und Waschmittelmenge variiert. Das Kennfeld zeigt den Reflexionsgrad in unterschiedlichen Farben, welcher über die drei Achsen Waschmittelmenge, Temperatur und Waschzeit aufgetragen ist. Dabei sind unter *a)* die Stützstellen dargestellt und unter *b)* das gesamte Kennfeld mit den interpolierten Punkten. Für die Interpolation der Punkte wurde die *Delauney Triangulation* [Mat12a] verwendet. Durch dieses lineare Interpolationsverfahren wird sichergestellt, dass die interpolierten Werte innerhalb der konvexen Hülle der Datenpunkte liegen. Im Folgenden sei diese H_{konvex} . Der Nachteil dieses Verfahrens ist, dass es nur Interpolationen zulässt und für extrapolierte Werte eine Fehlermeldung ausgibt.

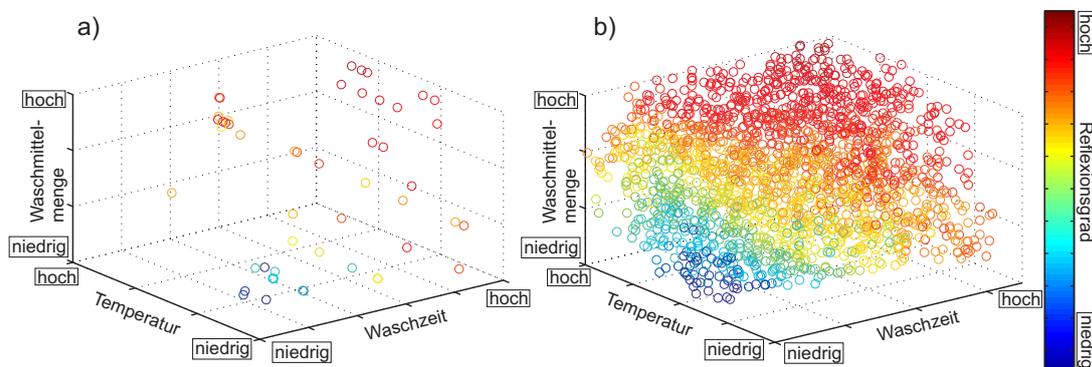


Bild 6-5: 4-dimensionales Kennfeld für die Waschwirkung von Sebum; a) zeigt die Stützpunkte und b) das Kennfeld mit den interpolierten Werten

Das Bild 6-5 zeigt, dass die Entfernung von Sebum entweder durch eine hohe Waschzeit oder eine hohe Temperatur bei hoher Waschmittelmenge erfolgen kann. Für eine Schmutzlösung bei einer niedrigen Temperatur und gleichzeitig geringer Waschmittelmenge ist eine hohe Waschzeit erforderlich. Die Temperatur und die Waschmittelmenge beschleunigen die Reinigungswirkung, sodass die höchste Waschwirkung beim Maximum aller Faktoren erreicht wird. Das Kennfeld zeigt einen plausiblen Verlauf welcher mit den Grundlagen aus Abschnitt 6.2.2 und dem SINNERSchen übereinstimmt.

6.3 Mehrzieloptimierung

Der vorangegangene Abschnitt zur Waschwirkung zeigte die Komplexität der sich gegenseitig beeinflussenden Faktoren Waschmittel, Mechanik, Temperatur und Einwirkzeit. Anhand von Bild 6-5 wird deutlich, dass verschiedene Parametereinstellungen zum gleichen Waschwirkungsergebnis führen. Damit hat der Verfahrensentwickler diverse Freiheitsgrade zur Auslegung des Waschprogramms. Die Programmauslegung erfolgt nach unterschiedlichen Kriterien. Zum einen müssen die Labelwerte möglichst gut erfüllt werden (siehe Abschnitt 4.4) und zum anderen darf der Waschprozess nicht unnötig lang werden. Denn durch einen zu langen Waschprozess werden die Textilien verschlissen und der Anwender muss sehr lange auf die Wäsche warten. Es entsteht bei der Prozessauslegung ein Zielkonflikt zwischen Energieverbrauch und Waschkdauer. Verfahrensauslegungen anhand von Versuchen würden hier an ihre Grenzen stoßen, weil der gesamte Parameterraum durch aufwendige Testreihen ausgewertet werden müsste. Durch eine Mehrzieloptimierung kann dieser Zielkonflikt systematisch gelöst und optimale Einstellungen für den Waschprozess ermittelt werden.

Das Ziel einer Mehrzieloptimierung ist die gleichzeitige Minimierung der bestehenden Zielfunktionen. Dabei werden Punkte gesucht, bei denen es nicht mehr möglich ist, die eine Zielgröße zu verbessern ohne die andere zu verschlechtern. Derartige Punkte werden als Paretopunkte bezeichnet und sind im Allgemeinen nicht eindeutig. Die Paretopunkte, die auf der unterschiedlichen Gewichtung der Zielfunktionen basieren, stellen die Grundlage für eine Verfahrensauslegung dar und sollen das Prozessverständnis weiter verbessern. Darüber hinaus stellen die Ergebnisse eine Grundlage für die Entwicklung eines selbstoptimierenden und adaptiven Systems dar. Im Folgenden wird exemplarisch eine Mehrzieloptimierung für die Waschwirkung in einem Waschprozess vorgestellt. Das Augenmerk liegt hier auf den Ergebnissen, sodass im anschließenden Abschnitt nur die Grundidee des Optimierungsproblems vorgestellt wird.

6.3.1 Optimierungsproblem

Bei der Optimierung soll das Gütemaß J in Abhängigkeit der Temperatur der freien Flotte T_{ff} , der Waschmittelmenge m_{Wm} und der Waschkdauer t_{WH} minimiert werden. Somit ergibt sich das nichtlineare Optimierungsproblem als

$$\min_{T_{\text{ff}}, m_{\text{Wm}}, t_{\text{WH}}} J(T_{\text{ff}}, m_{\text{Wm}}, t_{\text{WH}}). \quad (6-1)$$

Das Gütemaß besteht aus der Summe der Funktionen für die Waschzeit $f_{\text{Waschzeit}}$ und der Energie f_{Energie} . Diese werden über einen Gewichtungsvektor $\gamma = [\gamma_1, \gamma_2]$

mit $\sum_{i=1}^2 \gamma_i = 1$ gewichtet, sodass eine Paretofront berechnet werden kann. Damit ergibt sich das folgende Gütemaß für das Optimierungsproblem

$$J(T_{\text{ff}}, m_{\text{Wm}}, t_{\text{WH}}) := \gamma_1 \cdot f_{\text{Waschzeit}}(t_{\text{WH}}) + \gamma_2 \cdot f_{\text{Energie}}(T_{\text{ff}}, m_{\text{Wm}}, t_{\text{WH}}). \quad (6-2)$$

Es bestehen zusätzlich die folgenden Nebenbedingungen

$$A_{\text{Reflexionsgrad},i} \geq A_{\text{Reflexionsgrad},\text{soll},i} \quad (6-3)$$

und

$$A_{\text{Reflexionsgrad},1,\dots,5} \in H_{\text{konvex}}. \quad (6-4)$$

Durch die Nebenbedingungen wird ein Mindestreflexionsgrad, also eine Mindestwaschwirkung, sichergestellt. $A_{\text{Reflexionsgrad},i}$ stellt den Reflexionsgrad der jeweiligen Anschmutzung nach dem Waschprozess dar und $A_{\text{Reflexionsgrad},\text{soll}}$ die minimal geforderte Reinigungsleistung der jeweiligen Anschmutzung. $f_{\text{Waschzeit}}$ stellt die Waschzeit dar, also die Waschbewegung in der Hauptwäsche (siehe Abschnitte 2.3.2 und 4.1). Die Energiefunktion f_{Energie} ist abhängig von der vorgegebenen Temperatur für die freie Flotte, der Waschmittelmenge und der Waschkdauer. Diese wird benötigt, um die verbrauchte Energie des Motors zu berechnen. Die Umsetzung erfolgt mithilfe des *fgoalattain*-Algorithmus in *MATLAB* [Mat12b].

6.3.2 Optimierungsergebnisse

Zur Optimierung wurden die fünf Kennfelder der Anschmutzungen (Abschnitt 6.2) genutzt. Diese Optimierung erfolgt an einem vereinfachten Modell in *MATLAB*, in dem von den Optimierungsvariablen $(T_{\text{ff}}, m_{\text{Wm}}, t_{\text{WH}})$ auf die Reflexionsgrade geschlossen wird. Dadurch wird die Simulationszeit für einen Waschprozess auf wenige Sekunden reduziert, was für eine Mehrzieloptimierung von Vorteil ist, weil hier sehr viele Funktionsauswertungen und damit Simulationen notwendig sind. Nach der Simulation werden die Reflexionsgrade der einzelnen Anschmutzungen zu einem Gesamtreflexionsgrad addiert, welcher die Waschwirkung darstellt. Die Optimierungsergebnisse sind in Bild 6-6 dargestellt. Bild 6-6a) zeigt die berechnete Paretofront mit 11 Stützstellen, unter b) ist der dazugehörige Urbildraum (hier exemplarisch für Sebum) dargestellt. Anhand der Nummerierung können den einzelnen Paretopunkten die dazugehörigen Einstellungen im Waschprozess direkt zugeordnet werden. In Bild 6-6c) werden die Paretopunkte 1, 6 und 11 im SINNERSchen Kreis dargestellt.

Der Punkt 1 in der Paretofront stellt den Waschprozess mit dem höchsten Energieverbrauch und mit der geringsten Waschzeit dar. Hier wird zum Reinigen der

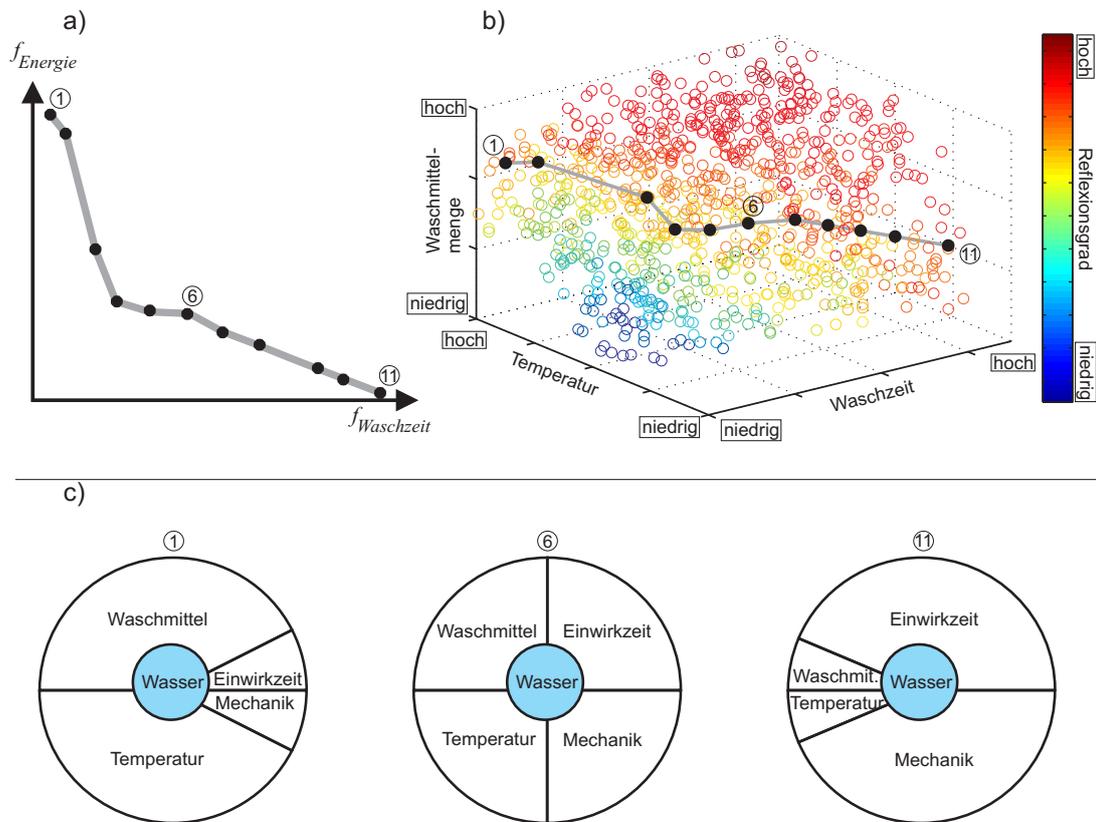


Bild 6-6: a) Bildraum der Paretofront für Waschwirkung mit Energie über Waschzeit b) Urbildraum-Sebum der Paretofront c) stellt die einzelnen Pareto-Punkte qualitativ im SINNERSchen Kreis dar

Beladung viel Energie durch die hohe Waschtemperatur und die hohe Waschmittelmenge eingetragen. Die hohe Temperatur bei gleichzeitig hoher Laugenkonzentration sorgt für eine Beschleunigung der chemischen Reaktionen. Der Schmelzpunkt von Fetten wird überschritten, sodass diese durch die Tenside leichter gelöst werden. Die hohe Konzentration führt zu einer schnelleren Benetzung und somit Lösung von Schmutzpartikeln. Durch die verkürzte Washdauer wird der Textilverschleiß minimiert – aber die lokale chemische Konzentration in den Textilien erhöht.

Bei dem mittleren Punkt 6 sind alle Parameter gleich gewichtet, was einem gleich verteilten SINNERSchen Kreis entspricht. Dabei wird die Waschwirkung durch das Zusammenwirken aller am Prozess beteiligten Komponenten erzielt. Durch die Temperatur wird genügend Aktivierungsenergie bereitgestellt, um die chemischen Reaktionen zu starten. Fett wird hier nicht mehr geschmolzen, sondern

muss durch die Tenside gelöst werden. Die verringerte Laugenkonzentration und Temperatur müssen durch eine längere Waschdauer kompensiert werden.

Am energieeffizientesten ist Punkt 11, welcher durch die extrem lange Waschdauer bei niedriger Temperatur erreicht wird. Wie in Abschnitt 4.4 beschrieben, stellt das Aufheizen der Waschlauge den größten Energieverbrauch im System dar und damit das Absenken der Temperatur das größte Energieeinsparpotenzial. Die chemischen Reaktionen finden auch bei niedrigen Temperaturen statt, nur sehr viel langsamer. Die längere Waschphase und die damit verbundene Einwirkzeit in Kombination mit der Waschmechanik begünstigen die Umnetzung und das Lösen der Schmutzpartikel von der Faser. Zudem wird ein Teil der Waschmechanik durch Reibung in Wärme umgewandelt. Die verlängerte Waschmechanik führt langfristig zu einer stärkeren Abnutzung der Textilien.

Die beschriebenen Punkte sind lediglich drei charakteristische Punkte der gesamten Paretofront. Es können jedoch beliebig viele weitere Punkte der Paretofront analysiert werden. Die Entwicklung heutiger Haushaltsgeräte zielt immer mehr auf eine Integration von Intelligenz in den Systemen ab. Zur Integration ist eine bedarfs- und angebotsabhängige Beeinflussung der Prozesse notwendig. Im Kontext des Waschautomaten ist eine Integration in ein Energiemanagementsystem und damit eine Berücksichtigung von externen Randbedingungen notwendig. Diese können in einer prädiktiven bzw. adaptiven Regelung berücksichtigt werden – welche auf der Paretofront und dem dazugehörigen Urbildraum basieren könnten. Damit würde der Waschautomat das Waschverfahren flexibel an anwendungsspezifische Wünsche ausrichten. Der Anwender könnte über die Festlegung eines Zeitpunktes für das Programmende indirekt bestimmen, wie gewaschen werden soll. Für eine kurze Waschdauer würde eine energieintensive Einstellung gewählt werden, während bei einem langen Intervall die Freiheitsgrade für einen energieschonenden Waschprozess genutzt werden könnten.

Eine prädiktive und bzw. oder adaptive Regelung eröffnet weitere Freiheitsgrade zur intelligenten Vernetzung von lokalen Verbrauchern für eine intelligente Nutzung von regenerativen Energien. Darüber hinaus könnte der Waschautomat den Waschprozess optimal auf die Anschmutzung ausrichten. Wenn z. B. keine Rotwein und Blutflecken vorliegen, kann hier Waschmittel und Energie eingespart werden. Hierfür bedarf es aber zuverlässiger und einheitlicher Schnittstellen zur Umgebung, welche die Umgebungsbedingungen beschreiben: Waschmittelinhalte, Wasserpreise, Wärmepreise, Strompreise, verfügbare Mengen und Zeiten.

In diesem Kapitel wurde in Form von zwei verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten, eine Sensorneupositionierung und eine Mehrzieloptimierung für den Waschprozess, der Mehrwert des Strecken- und Steuerungsmodells aufgezeigt. Die Anwendungsbeispiele setzen auf bereits vorhandene Streckenmodelle auf, welche zum Teil erweitert (intelligenter Wasserzulauf) und ersetzt (Waschwirkung) werden

mussten, und erhöhen die Qualität bzw. die Entwicklungstiefe. Darüber hinaus wird das Systemwissen in den Modellen transparent dargestellt, konserviert und weiterentwickelt, sodass dieses für einen effektiven Test bei HiL-Simulationen oder zur Systemweiterentwicklung genutzt werden kann.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst. Außerdem wird ein Ausblick auf zukünftige Arbeiten gegeben.

7.1 Zusammenfassung

Im Waschautomaten werden neue Funktionen durch intelligente Elektroniken sowie die funktionale Integration von Aktoren und Sensoren ermöglicht. Diese Funktionen werden zu großen Teilen durch Steuergerätecodes realisiert. In der Folge nimmt der Entwicklungs- und Testaufwand immer weiter zu. Um diesem permanent steigenden Umfang und der Komplexität zu begegnen, wurde eine modellbasierte In-the-Loop-Testumgebung für Waschautomaten entwickelt. Durch das modellbasierte Testen und die Zuhilfenahme von Echtzeitsimulationen werden die Testtiefe und der Testumfang erhöht, um die Steuergerätequalität sicherzustellen und weiter zu verbessern.

Zum Aufbau einer modellbasierten In-the-Loop-Umgebung sind ein echtzeitfähiges Streckenmodell und eine Echtzeithardwareumgebung notwendig, was den Kernpunkt dieser Arbeit darstellt. Zur Entwicklung des Streckenmodells wurde der Waschprozess durchgehend beschrieben und strukturiert. Dabei zeigte sich die Komplexität des Waschprozesses, sodass eine rein physikalische Modellbildung im Rahmen dieser Arbeit nicht immer möglich war. Das Saugverhalten der unterschiedlichen Textilien, die Wärme- und Stoffübertragung, die Bewegung der Textilien im Waschprozess und deren ungleichmäßige Verteilung und Entwässerung beim Schleudern führen zu einer nichtlinearen Schwingung des Aggregats und zu einem insgesamt nicht reproduzierbaren Waschprozess.

Zur Komplexitätsreduktion bei der Modellbildung wurde das System in einzelne Komponenten zerlegt, sodass die Energie-, Stoff- und Informationsflüsse und deren Abhängigkeiten dargestellt werden konnten. Auf dieser Grundlage erfolgte die domänenspezifische Modellbildung. Die Modellierung des Saugverhaltens geschah durch aufwendige Versuchsreihen zur Ermittlung von Kennfeldern für unterschiedliche Textilien. Zur Simulation der Wärmeübertragung wurde die instationäre Wärmeübertragung abgebildet. Durch eine Kopplung des fluidmechanischen Modells mit dem Wärmeübertragungsmodell konnte die Wärme- und Stoffübertragung im Waschautomaten echtzeitfähig abgebildet werden. Anschließend wurden die Teilmodelle der Mechanik, Sensorik und Aktorik zu einem echtzeitfähigen Gesamtstreckenmodell integriert.

Bei der Auswahl der Echtzeithardware galt es, die spezifischen Rahmenbedingungen der Hausgeräteindustrie zu berücksichtigen. Im Gegensatz zur Automobilindustrie ist keine modellbasierte Entwicklung und damit Tests wie HiL etabliert. Die Soft- und Hardwarelandschaft unterschied sich deutlich von der Automobilindustrie. Eine produktive und effektive Nutzung der In-the-Loop-Umgebung kann nur erfolgen, wenn die modellbasierten Techniken in die bestehenden Werkzeugketten und Entwicklungsprozesse integriert werden. Unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen und der Infrastruktur wurde eine Hard- und Softwarearchitektur für die HiL-Umgebung entwickelt und integriert.

Der Einstieg in die modellbasierte Entwicklung fand über das Testen statt, weil zunächst nur das Streckenmodell mit einer vergleichsweise niedrigen Modellierungstiefe notwendig ist und relativ schnell ein Mehrnutzen für die Serienentwicklung zu generieren war. Vor dem modellbasierten Testen findet der Systementwurf statt. Durch die Entwicklung und Anbindung des Steuergerätemodells mit dem vorhandenen Streckenmodell wurde anhand einer Neupositionierung des Füllstandsensors der Mehrwert einer MiL-Simulation beim Systementwurf aufgezeigt. Als weiteres Beispiel wurde mittels einer Mehrzieloptimierung eine Paretofront für die Waschwirkung in Abhängigkeit der Waschzeit und dem Energieverbrauch berechnet. Dadurch konnte ein tieferes Systemverständnis und damit optimale Waschprogrammeinstellungen systematisch aufgezeigt werden. Letztendlich stellt diese Arbeit nur den Einstieg für die zukünftigen vertiefenden Arbeiten zur Einführung und Etablierung der modellbasierten Techniken in der Hausgeräteindustrie dar.

7.2 Ausblick

Der nächste Schritt ist das Etablieren der In-the-Loop-Technik in den Entwicklungsprozess. Das vorhandene Modell bietet eine Grundlage zur Entwicklung von adaptiven und prädiktiven Regelungen, welche mittels eines RCP-Systems in Betrieb genommen und getestet werden können. Die modernen Waschautomaten verfügen über eine Umflutpumpe, ein Dampfmodul, ein automatisches Dosiersystem und einen Kapsel-Einsatz. Diese sind im aktuellen Streckenmodell nicht abgebildet. Mit dem Dosiersystem und dem Waschmittel steigt die Anforderung an die Modellbildung, weil die komplexen Waschmittel modelliert werden müssen. Darüber hinaus werden in den nächsten Jahren weitere Innovationen in den Waschautomaten hinzukommen, um welche das vorhandene Modell erweitert werden müsste. Hier kann nur das Ziel sein, diese möglichst früh in der Entwurfsphase zu modellieren, damit beim Testen ausgereifte Modelle zu Verfügung stehen.

Das vorhandene Strecken- und Steuergerätemodell muss sukzessive weiterentwickelt bzw. die Modellierungstiefe weiter gesteigert werden, um dessen Gültigkeits-

bereich zu erweitern. Im Streckenmodell wurde z. B. das Saugverhalten als Kennfeld abgebildet, welches auf Versuchen basiert. In der Trocknungstechnik werden anhand von Differentialgleichungen Diffusionsvorgänge, Wärme- und Stofftransporte modelliert. Es gilt diese Ansätze auf den Waschprozess zu übertragen und zu prüfen, inwieweit diese die physikalischen Vorgänge in Textilien abbilden können. Je nach Einsatzgebiet bzw. Nutzungsbereich gilt es in Zukunft die Modelle zu erweitern und anzupassen.

8 Notation

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
BAE	Bedienanzeigeelement	–
CFD	Computational Fluid Dynamics	–
DAE	Differential-algebraische Gleichung	–
DAQ	Data Acquisition	–
EEl	Energieeffizienzindex	–
FPGA	Field Programmable Gate Array	–
HiL	Hardware-in-the-Loop	–
HSP	Hinschaltpunkt	–
HW	Hauptwäsche	–
I/O	Input/Output	–
LB	Laugenbehälter	–
NTC	Negative Temperature Coefficient	–
MiL	Modell-in-the-Loop	–
MKS	Mehrkörpersimulation	–
mmWS	Millimeter Wassersäule	–
pH-Wert	Maß der Stoffmengenkonzentration von H_3O^+	–
PiL	Processor-in-the-Loop	–
PXI	PCI eXtensions for Instrumentation	–
PWM	Pulsweitenmodulation	–
RCP	Rapid Control Prototyping	–
RF	Restfeuchte	%
RSP	Rückschaltpunkt	–
SiL	Software-in-the-Loop	–
SIT	Signal Interface Toolkit	–
SLT	Steuerleistungsteil	–
SP	Spülen	–
TDMS	Technical Data Management Streaming	–
WPS	Water Proof System	–
$frFl$	freie Flotte	–
$geFl$	gebundene Flotte	–
A_{LB}	Laugenbehälterfläche	m^2
$A_{Trommel}$	Waschtrommelfläche	m^2
$A_{Reflexionsgrad}$	Reflexionsgrad	–

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
c	Federkonstante	N/m
c_p	spezifische Wärmekapazität	$J/kg \cdot K$
$c_{p,\text{freie Flotte}}$	spezifische Wärmekapazität der freien Flotte	$J/kg \cdot K$
$c_{p,\text{Wasser}}$	spezifische Wärmekapazität des Wassers	$J/kg \cdot K$
c_{St}	Strömungsgeschwindigkeit	m/s
d	Dämpfungskonstante	$N \cdot s/m$
d_{LB}	Dicke der Laugenbehälterwand	m
f_{Energie}	Energiefunktion	–
$f_{\text{Waschzeit}}$	Waschzeitfunktion	–
F	Betrag der resultierenden Punktkraft	N
$F_{\text{Coulomb},i}$	Coulomb-Kraft-Anteil der Dämpfungskraft	N
$F_{\text{Coulomb,Reibung}}$	Reibkraft-Anteil der Coulomb-Kraft	N
$F_{d,i}$	Dämpfungskraft	N
F_{Gewicht}	Gewichtskraft	N
F_{Haft}	Haftkraft-Anteil der Coulomb-Kraft	N
F_{Trommel}	Rippenkontaktkraft	N
F_{Rippe}	Trommelkontaktkraft	N
$F_{\text{viscous},i}$	viscouser Anteil der Dämpfungskraft	N
$F_{\text{Zentrifugalkraft}}$	Zentrifugalkraft	N
F_{ω}	Fluidwiderstandskraft	N
g	Erdbeschleunigung	m/s^2
h_1	Füllhöhe bei $\omega = 0$	m
h_2	Füllhöhe bei $\omega > 0$	m
h_{LF}	Veränderung der Luftfalleneinbauhöhe	m
H_{konvex}	Konvexe Hülle	
J	Gütemaß	–
K_{LB}	Verstärkungsfaktor Laugenbehälter	–
k_{reib}	Beiwert der viskosen Reibkraft	–
m	Masse	kg
$\dot{m}_{\text{aus gebundener Flotte}}$	Massenstrom aus gebundener Flotte	kg/s
m_{Beladung}	Masse Beladung	kg
$m_{\text{freie Flotte}}$	Masse freie Flotte	kg
$m_{\text{gebundene Flotte}}$	Masse gebundene Flotte	kg
$\dot{m}_{\text{gebundene Flotte}}$	Massenstrom an gebundene Flotte	kg/s
\dot{m}_{Lauge}	Laugenmassenstrom	kg/s
$\dot{m}_{\text{Laugengemisch}}$	Laugengemischmassenstrom	kg/s
$\dot{m}_{\text{Laugenpumpe}}$	Massenstrom Laugenpumpe	kg/s
m_{nass}	Masse feuchter Beladung	kg

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
m_{trocken}	Masse trockener Beladung	kg
$\dot{m}_{\text{Türschauglas}}$	Wassermassenstrom Türschauglas	kg/s
$m_{\text{Waschsubstanz}}$	Masse Waschsubstanz	kg
m_{Wm}	Masse Waschsubstanz	kg
\dot{m}_{Wasser}	Wassermassenstrom	kg/s
$\dot{m}_{\text{Wasser/Lauge}}$	Massenstrom Wasser bzw. Lauge	kg/s
p_{dyn}	Dynamischer Druck	bar
$P_{\text{Elektrisch}}$	Elektrische Leistung	W
p_{Gesamt}	Gesamtdruck	bar
p_{Messung}	gemessener Druckverlauf	–
$p_{\text{Simulation}}$	simulierter Druckverlauf	–
p_{stat}	Statischer Druck	bar
Q	Energie, die ein Körper in Form von Wärme aufnimmt	J
\dot{Q}	Wärmestrom	W
$\dot{Q}_{\text{aus Umgebung}}$	Wärmestrom aus der Umgebung	W
$\dot{Q}_{\text{an Umgebung}}$	Wärmestrom an die Umgebung	W
$\dot{Q}_{\text{Bauteile}}$	Wärmestrom an die Bauteile	W
$\dot{Q}_{\text{Beladung}}$	Wärmestrom an die Beladung	W
$\dot{Q}_{\text{freie Flotte}}$	Energie, die die freie Flotte aufnimmt	J
$\dot{Q}_{\text{gebundene Flotte}}$	Wärmestrom an die gebundene Flotte	W
\dot{Q}_{Heizung}	Wärmestrom der Heizung	W
\dot{Q}_{LB}	Wärmestrom an den Laugenbehälter	W
$\dot{Q}_{\text{Umgebung}}$	Wärmestrom an die Umgebung	W
$\dot{Q}_{\text{Waschtrommel}}$	Wärmestrom an die Waschtrommel	W
r	Radius Laugenbehälter	m
r_{Beladung}	Radius der Beladungspunktmasse	m
R_C	hydraulischen Gesamtwiderstand	$1/m$
t_{LB}	Tiefe des Laugenbehälters	m
t_{WH}	Waschdauer Hauptwäsche	s
T_{fF}	Temperatur freie Flotte	K
$T_{\text{freie Flotte}}$	Temperatur freie Flotte	K
T_{ist}	Ist-Temperatur	K
$T_{\text{gebundene Flotte}}$	Temperatur gebundene Flotte	K
T_{LB}	Zeitkonstante Laugenbehälter	–
$T_{\text{LB,innen}}$	Laugenbehältertemperatur innen	K
$T_{\text{LB,außen}}$	Laugenbehältertemperatur außen	K
$T_{\text{M, LB}}$	Temperatur Laugenbehältermitte	K

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
T_{Umgebung}	Temperatur Umgebung	K
T_{Start}	Start-Temperatur	K
$T_{\text{Start LB}}$	Start-Temperatur des Laugenbehälters	K
$T_{\text{Waschtrommel}}$	Antriebsmoment Waschtrommel	N/m
v	Geschwindigkeit der Beladung	m/s
v_{rel}	relativen Dämpfergeschwindigkeit	m/s
$V_{\text{füll}}$	gefüllten Volumen des Laugenbehälters	m^3
x_{Beladung}	Position der Beladung in x-Richtung	m/s
$\dot{x}_{\text{Beladung}}$	Geschwindigkeiten Beladung in x-Richtung	m/s
x_{Rippe}	Position der Rippe in x-Richtung	m/s
y_{Beladung}	Position der Beladung in y-Richtung	m/s
$\dot{y}_{\text{Beladung}}$	Geschwindigkeiten Beladung in y-Richtung	m/s
y_{Rippe}	Position der Rippe in y-Richtung	m/s
Y_{Schaufel}	spezifische Schaufelarbeit der Strömungsmaschine	$N \cdot m/kg$
α	Durchströmungswiderstand der gebundenen Flotte	m/kg
$\alpha_{\text{freie Flotte}}$	Wärmeübergangskoeffizient von der freien Flotte an die Laugenbehälterwand	$W/(m^2 \cdot K)$
α_{Umgebung}	Wärmeübertragungskoeffizienten von der Laugenbehälterwand an die Umgebung	$W/(m^2 \cdot K)$
γ	Gewichtungsvektor	–
η	dynamische Viskosität	$kg/(m \cdot s)$
$k_{\text{freie Flotte-M, LB}}$	Wärmeübergangskoeffizient von der freien Flotte an Laugenbehälter	$W/(m^2 \cdot K)$
k_{LB}	Gesamt-Wärmeübergangskoeffizient	$W/(m^2 \cdot K)$
$k_{\text{M, LB-Umgebung}}$	Wärmeübergangskoeffizient vom Laugenbehälter an die Umgebung	$W/(m^2 \cdot K)$
λ_{LB}	Wärmeleitkoeffizient durch die Laugenbehälterwand	$W/(m \cdot K)$
ω	Winkelgeschwindigkeit	rad/s
ρ	Dichte des Wassers	kg/m^3
ζ	Widerstandszahl	–

9 Literaturverzeichnis

- [AA03] ALLES, Carina M. ; ANLAUF, Harald: *Filtration mit kompressiblen Kuchen: Effiziente Konzepte für eine anspruchsvolle Trennaufgabe*. Chemie-Ingenieur-Technik Vol. 75 Nr. 9, SS. 1221-1230, 2003
- [AEG⁺98] AVENWEDDE, Josef ; ERBE, Friedemann ; GRAUTE, Bernhard ; HOELSCHER, Elisabeth ; MERLING, Bernd ; NIEHAUS, Detlef ; OLSCHIEWSKI, Ruediger ; SCHAEFFERSMANN, Wilfried ; SIEDING, Dirk: Patent DE 4431654 C2, Verfahren zum Füllen eines Laugenbehälters einer Waschmaschine. (1998)
- [Aib05] AIBIBU, Dilbar: *Charakterisierung, Modellierung und Optimierung der Barriereigenschaften von OP-Textilien*. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität Dresden, 2005
- [Akc07] AKCABAY, Deniz T.: *PHYSICS BASED WASHING MACHINE SIMULATIONS*. Michigan : PhD thesis University of Michigan, USA, 2007
- [And99] ANDERSEN, Arne: *Der Traum vom guten Leben. Alltags- und Konsumgeschichte vom Wirtschaftswunder bis heute*. Frankfurt a. M. : Campus, 1999
- [Ant05] ANTOULAS, A. C.: *Approximation of Large-Scale Dynamical Systems*. Philadelphia : SIAM, 2005
- [AOS13] ARMBRUST, Ove ; OCHS, Michael ; SNOEK, Björn: Stand der Praxis von Software- Tests und deren Automatisierung - Interviews und Online-Umfrage. (2013), Januar. <http://publica.fraunhofer.de/eprints/N-24381.pdf>
- [Avg07] AVGOUSTINOV, Nikolay: *Modelling in Mechanical Engineering and Mechatronics*. London : Springer-Verlag, 2007
- [Böc04] BÖCKH, Peter von: *Fluidmechanik*. Bd. 2. Auflage. Berlin : Springer-Verlag, 2004
- [BDE⁺04] BECKMANN, H.-W. ; DRAIER, R. ; ESTORFF, O. von ; KLAMT, K. ; MARKIEWICZ, M. ; ZALESKI, O.: Modellierung eines Waschautomaten für vibroakustische Untersuchungen. In: *22nd CAD-FEM Users Meeting 2004, Dresden* (2004)
- [Bei95] BEIZER, Brunno: *Black Box Testing - Techniques for Functional Testing of Software and Systems*. John Wiley & Sons, Inc., 1995

- [Ben05] BENDER, Klaus: *Embedded Systems - qualitätsorientierte Entwicklung*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2005
- [Bla64] BLASS, Eckhard: Geometrische und strömungstechnische Untersuchungen an Drahtgeweben. In: *Chemie Ingenieur Technik* (1964)
- [BLK+02] BAE, S. ; LEE, J.M. ; KANG, Y.J. ; KANG, J.S. ; YUN, J.R.: Dynamic analysis of an automatic washing machine with a hydraulic balancer. In: *Journal of Sound and Vibration* (2002)
- [Boe79] BOEHM, Barry W.: *Guidelines for verifying and validating software requirements and design specifications*. North Holland : EURO IFIP 79, 1979
- [Bre87] BREKEL, LUCAS DOMINICUS M. d.: *Hydrodynamics and mass transfer in domestic drum-type fabric washing machines*. Delft : PhD thesis TU Delft, NL, 1987
- [Bro01] BROWN, David: Accuracy of projection methods for the incompressible Navier-Stokes equations. In: *Half-Moon Bay conference on incompressible flows*. (2001)
- [BS08] BAEHR, Hans D. ; STEPHAN, Karl: *Wärme- und Stoffübertragung*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2008
- [Bun12] BUNDESINSTITUT FÜR BERUFSBILDUNG: *Nachhaltigkeit in der gewerblichen Wäscherei*. Bonn : Nationale Agentur Bildung für Europa beim Bundesinstitut für Berufsbildung, 2012
- [CC01] CHRZAN, Michael J. ; CARLSON, David J.: Fluid sponge devices and their use in vibration control of washing machines. In: *Proceedings of the 8th annual symposium on smart structures and materials*. Newport Beach, CA, USA (2001)
- [Chr10] CHRISTEN, Daniel: *Praxiswissen der chemischen Verfahrenstechnik*. Heidelberg : Springer Verlag 2. Auflage, 2010
- [CJZ+11] CHEN, Hai-Wei ; JI, Wei-Xi ; ZHANG, Qiu-Ju ; CAO, Yi ; FAN, Sheng-Yao: A method for vibration isolation of a vertical axis automatic washing machine with a hydraulic balancer. In: *Journal of Mechanical Science and Technology* 26 (2011)
- [Dep13] DEPPERMAN, Jan: *Modellbasierte Sensitivitätsanalyse einer Sensorneupositionierung in einem komplexen mechatronischen System*. Paderborn : Bachelorarbeit Universität Paderborn, 2013
- [DIN44300] DIN 44300, DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Informationsverarbeitung Begriffe*. Berlin, Köln : Beuth-Verlag, 1985

- [Dre06] DRESIG, Hans: *Schwingungen und mechanische Antriebssysteme*. Heidelberg : Springer-Verlag, Berlin, 2006
- [EU10] EUROPÄISCHE KOMMISSION, DELEGIERTE VERORDNUNG (EU) NR. 1061/2010: *Amtsblatt der EU-Kommission: Zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Kennzeichnung von Haushaltswaschmaschinen in Bezug auf den Energieverbrauch*. 2010 <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32010R1061&qid=1470915498284>
- [Fas09] FAST, Viktor: *Modellierung des Aufheizvorgangs im Laugenbehälter eines Waschautomaten*. Paderborn : Studienarbeit Universität Paderborn, 2009
- [Föl94] FÖLLINGER, Otto: *Regelungstechnik: Einführung in die Methoden und ihre Anwendungen*. Heidelberg: Hüthig, 1994
- [GK08] GEIGER, Walter ; KOTTE, Willi: *Handbuch Qualität*. Wiesbaden : Vieweg und Teubner Verlag, 2008
- [Gud03] GUDDAT, Ulrich: *Automatisierte Tests von Telematiksystemen im Automobil*. Eberhard Karls Universität Tübingen : Dissertation, Fakultät für Informations- und Kognitionswissenschaften, 2003
- [Hap58] HAPPEL, John: GViscous flow in multiparticle systems: Slow motion of fluids relative to beds of spherical particles. In: *AIChE Journal* (1958)
- [Har86] HAREL, D.: *Statecharts - A Visual Approach to Complex Systems*. Rehovot, Israel : Microelectronics and Computer, Technology Corporation, 1986
- [Har10] HARCHENKO, Jewgenij: *Mechatronischer Entwurf eines neuartigen aktiven Fahrzeugfederungssystems für PKW unter Verwendung einer reversierbaren Flügelzellenpumpe*. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 288 : Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, 2010
- [Hes06] HESTERMEYER, Thorsten: *Strukturierte Entwicklung der Informationsverarbeitung für die aktive Federung eines Schienenfahrzeugs*. Paderborn : Dissertation an der Universität Paderborn, 2006
- [Hof10] HOFER, Michael T.: *Trends bei Elektrohausgeräten*. Berlin : IFA 2010, 2010
- [IEC10] IEC-60456: *Clothes washing machines for household use Methods for measuring the performance*. Schweiz : IEC Central Office, 2010

- [Ise08] ISERMANN, Rolf: *Mechatronische Systeme*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2. Auflage, 2008
- [Jan10] JANSCHKE, Klaus: *Systementwurf mechatronischer Systeme*. Heidelberg : Springer Verlag, 2010
- [JTIZ10] JUST, Viktor ; TRÄCHTLER, Ansgar ; ILLG, Igor ; ZEINELDIN, Tarek: *Efficient design of complex mechatronic products using the example of the separation-process in ATM*. Tagung ASME. 12.-18. November 2010 Vancouver, British Columbia, Canada, 2010
- [Kal95] KALIDE, Wolfgang: *Energie Umwandlung in Kraft- und Arbeitsmaschinen*. München : Carl Hanser Verlag, 8. Auflage, 1995
- [KDSDL13] KAPPLER, Jerrod A. ; DEAN SUEL, Richard ; DIDAT, Mark A. ; LEIBMAN, Alexander B.: Patent US 20130049969 A1, Bulk dispenser fluid level sensing and out of balance detection for a washing machine appliance. (2013)
- [KH08] KÖHL, Susanne ; HIMMLER, Andreas: *Anwendungen und Trends in der HiL-Simulation*. Berlin : Simulation und Test in der Funktions- und Softwareentwicklung für die Automobilelektronik II, Clemens Gühmann (Hrsg.). expert Verlag, 2008
- [KKL+13] KIM, Hooi J. ; KIM, Sung J. ; LEE, Moo H. ; PARK, Jae S. ; CHO, Sung J. ; BAE, Il S. ; CHOI, Ho: Patent US 20130025331 A1, WASHING MACHINE AND BALANCER THEREOF. (2013)
- [KKM12] KANG, Myung S. ; KIM, Ja Y. ; MICHIAKI, Doo Y. Ito Ryu R. Ito Ryu: Patent US 20120144876 A1, Washing machine having balancer. (2012)
- [KLZT09] KOERT, Dirk ; LÖFFLER, Alexander ; ZEINELDIN, Tarek ; TRÄCHTLER, Ansgar: *Echtzeitsimulation für den modellbasierten Steuergesamtest von Haushaltsgeräten*. 6. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, 2009
- [KM02] KIESSLING, Alois ; MATTHES, Max: *Textil - Fachwörterbuch*. Berlin: Schiele und Söhne Fachverlag, 2002
- [Krü13] KRÜGER, Martin: *Parametrische Modellreduktion für hierarchische selbstoptimierende Systeme*. HNI Verlag, Paderborn : Dissertation Universität Paderborn, 2013
- [Kra04] KRAUME, Matthias: *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik*. Heidelberg : Springer Verlag, 2004
- [Lam03] LAMBERG, Klaus: *Durchgängiges, automatisiertes Testen bei der Entwicklung von Automobilelektronik*. Berlin : Simulation und Test in

- der Funktions- und Softwareentwicklung für die Automobiltechnik, 2003
- [Lüd03] LÜDECKE, Andre: *Simulationsgestützte Verfahren für den Top-Down-Entwurf heterogener Systeme*. Duisburg : Dissertation Universität Duisburg-Essen, 2003
- [Lee97] LEE, J.: Vibration Analysis of a Pulsator Type Washing System. In: *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering* (1997)
- [LJK⁺98] LEE, J. ; JO, S. ; KIM, T. ; ; PARK, Y: Modeling and Dynamic Analysis of a Front Loaded Washing Machine with Ball Type Automatic Balancer. In: *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering* (1998)
- [Lov11] LOVE, Augustus Edward H.: *A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity*. Dover : Dover Books on Engineering, 2011
- [LSF⁺11] LÖFFLER, Alexander ; SCHWEERS, Christoph ; FAST, Viktor ; KRUSE, Daniel ; TRÄCHTLER, Ansgar: *Multidomänen-Modell eines Waschvollautomaten für einen Hardware-in-the-Loop-Prüfstand*. 8. Paderborner Workshop: Entwurf mechatronischer Systeme, 2011
- [Mar04] MARTINUS, Marcus A.: *Funktionale Sicherheit von mechatronischen Systemen bei mobilen Arbeitsmaschinen*. München : Dissertation Technischen Universität München, 2004
- [Mat12a] MATHWORKS: Delaunay Triangulation. (2012). <http://de.mathworks.com/help/matlab/math/delaunay-triangulation.html>
- [Mat12b] MATHWORKS: MATLAB OPTIMIZATION TOOLBOX. (2012), Dezember. www.mathworks.de
- [Mic11] MICHAEL, Jan: *Modellierung der Wärme- und Stoffübertragung im Waschvollautomaten*. Paderborn : Bachelorarbeit Universität Paderborn, 2011
- [Mic12] MICHAEL, Jan: *Modellbasierte Parameteridentifikation mittels Optimierungsalgorithmen für schwer messbare Systemparameter*. Paderborn : Studienarbeit Universität Paderborn, 2012
- [NI12] NATIONAL INSTRUMENTS, NI: Using Simulation Models with NI VeriStand. (2012). <http://zone.ni.com/devzone/cda/epd/p/id/6488>
- [NI13a] NATIONAL INSTRUMENTS, NI: DIAdem. (2013), Januar. <http://www.ni.com/diadem/d/>

- [NI13b] NATIONAL INSTRUMENTS, NI: LabVIEW. (2013), Januar. <http://www.ni.com/labview/d/>
- [NYC⁺06] NHO, Gyung-Hun ; YOO, Wan-Suk ; CHUNG, Bo-Sun ; KANG, Dong-Woo ; LYU, Jae-Cheol: Matching of Multibody Simulation and Experiment of a Drum-Type Washing Maschine. In: *Third Asian Conference on Multibody Dynamics (ACMD2006)* (2006)
- [OBU09] OERTEL, Herbert ; BÖHLE, Martin ; ULRICH, Dohrmann: *Strömungsmechanik*. Wiesbaden : Vieweg und Teubner Verlag, 2009
- [Ole07] OLEJNICZAK, Robert: *Systematisierung des funktionalen Tests eingebetteter Software*. Technischen Universität München : Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2007
- [PB07] PAHL, Gerhard ; BEITZ, Wolfgang: *Konstruktionslehre*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2007
- [Pes72] PESKIN, Charles: Flow patterns around heart valves - numerical method. In: *Journal of computational physics 10 (2): 252-271* (1972)
- [PM89] PAHL, Manfred-Helmut ; MEINECKE, Heinrich: *Schaumzerstörung mit arteigener Flüssigkeit*. Dechema-Monographien Band 114 - VCH Verlagsgesellschaft, 1989
- [PP86] PFLEIDERER, Carl ; PETERMANN, Hartwig: *Strömungsmaschinen*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 5. Auflage, 1986
- [PTT73] PAYATAKES, Alkiviades ; TIEN, Chi ; TURIAN, Raffi: A new model for granular porous media: Part I. Model formulation. In: *AIChE Journal* (1973)
- [Rod06] RODDECK, Werner: *Einführung in die Mechatronik*. Wiesbaden : Teubner Verlag, 2006
- [Rou07] ROUETTE, Hans-Karl: *Enzyklopädie Textilveredlung, Band 1, 1. Auflage*. Deutscher Fachverlag GmbH, 2007
- [SBH08] SIEBERTZ, Karl ; BEBBER, David van ; HOCHKIRCHEN, Thomas: *Statistische Versuchsplanung*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, VDI-Buch, 2008
- [Sch60] SCHEIDEGGER, Adrian: The physics of flow through porous media. In: *University of Toronto Press* (1960)
- [Sch05] SCHWIEGER, Volker: *Nicht-lineare Sensitivitätsanalyse gezeigt an Beispielen zu bewegten Objekten*. Stuttgart : Habilitation, Universität Stuttgart, 2005

- [Sch07] SCHRÖDER, Dirk: *Elektrische Antriebe*. Berlin : Springer-Verlag, 2. Auflage, 2007
- [SEA13] SCIENCE & ENGINEERING APPLICATIONS, S.E.A.: TestMaster. (2013), Januar. <http://www.sea-gmbh.com/en/products/testmaster/overview/>
- [SPS+09] SPELTAA, Cristiano ; PREVIDIA, Fabio ; SAVARESIB, Sergio M. ; GIUSEPPE, Fraternalc ; GAUDIANO, Nicola: Control of magnetorheological dampers for vibration reduction in a washing machine. In: *IEEE Mechatronics* (2009)
- [SRB06] SVEN REBESCHIESS, Thomas L. ; BAZARSUREN, Uzme: *Automatisierter Closed-Loop-Softwaretest eingebetteter Motorsteuerfunktionen*. Dresden : In: 26th Automotive Electronics Conference: Elektronik im Kraftfahrzeug., 2006
- [SSFG08] SPELTA, Cristiano ; SAVARESI, Sergio ; FRATERNALE, Giuseppe ; GAUDIANO, Nicola: Vibration Reduction in a Washing Machine Via Damping Control. In: *17th IFAC World Congress, Korea 2008* (2008)
- [Sta09] STAHL, Werner H.: *Industrie-Zentrifugen: Betriebstechnik und Prozessintegration*. Karlsruhe : DrM Press, Band III, 2009
- [Sto11] STOLZ, Alexander: *Modellierung des Restfeuchteverlaufs im Waschvollautomaten*. Paderborn : Bachelorarbeit Universität Paderborn, 2011
- [SZ06] SCHÄUFFELE, Jörg ; ZURAWKA, Thomas: *Automotive Software Engineering*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag; Auflage: 3, 2006
- [Tem02] TEMPLIN, Ralf: *Unwuchtuntersuchungen am Waschautomaten*. Bielefeld : Diplomarbeit, FH Bielefeld, 2002
- [Tög71] TÖGEL, Erhard: *Bleiche und Appretur*. Fachbuchverlag Leipzig, 1. Auflage, 1971
- [Trä12] TRÄCHTLER, Ansgar: *Vorlesungsskript: Modellbildung in der Mechatronik*. Universität Paderborn, 2012
- [Ulr99] ULRICH, Liebscher: *Anlegen und Auswerten von technischen Versuchen*. Hollfeld : Manz Verlag, 1999
- [VDI2211] VDI-2211: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1993
- [VDI2206] VDI-2206: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 2004

- [VDI06] VDI-WÄRMEATLAS: *VDI-Wärmeatlas*. VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006
- [Wag10] WAGNER, Günther: *Waschmittel*. Weinheim : Wiley-VCH Verlag, 2010
- [Wan09] WANG, Peng: *Modellierung des hydraulischen Systems eines Waschvollautomaten*. Paderborn : Bachelorarbeit Universität Paderborn, 2009
- [War99] WARD, David: Modelling of a Horizontal-axis Domestic Washing Machine. In: *The Journal of the Textile Institute* (1999)
- [Wen07] WENDKER, Christoph: Neue Entwicklungen der Waschmaschinen. *Konferenzbeitrag: Forum Waschen* (2007)
- [WH00] WOHNHAAS, Achim ; HABROCK, Hans-Jürgen: Szenarien und Schritte bei der Einführung modellbasierter Methoden in der Kfz-Elektronikentwicklung. In: *VDI Berichte Nr. 1547* (2000)
- [Wäl09] WÄLTERMANN, Peter: Hardware-in-the-Loop: Die Technologie zum Test elektronischer Steuerungen und Regelungen in der Fahrzeugtechnik. In: *6. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, Paderborn* (2009)
- [WR06] WALLENTOWITZ, Henning ; REIF, Konrad: *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik*. Wiesbaden : Vieweg & Sohn Verlag, 2006
- [ZB08] ZIEREP, Jürgen ; BÖHLER, Karl: *Grundzüge der Strömungslehre - Grundlagen, Statik und Dynamik der Fluide*. Karlsruhe : Teubner Verlag, 2008

Das Heinz Nixdorf Institut – Interdisziplinäres Forschungszentrum für Informatik und Technik

Das Heinz Nixdorf Institut ist ein Forschungszentrum der Universität Paderborn. Es entstand 1987 aus der Initiative und mit Förderung von Heinz Nixdorf. Damit wollte er Ingenieurwissenschaften und Informatik zusammenführen, um wesentliche Impulse für neue Produkte und Dienstleistungen zu erzeugen. Dies schließt auch die Wechselwirkungen mit dem gesellschaftlichen Umfeld ein.

Die Forschungsarbeit orientiert sich an dem Programm „Dynamik, Mobilität, Vernetzung: Eine neue Schule des Entwurfs der technischen Systeme von morgen“. In der Lehre engagiert sich das Heinz Nixdorf Institut in Studiengängen der Informatik, der Ingenieurwissenschaften und der Wirtschaftswissenschaften.

Heute wirken am Heinz Nixdorf Institut neun Professoren mit insgesamt 150 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Pro Jahr promovieren hier etwa 20 Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler.

Heinz Nixdorf Institute – Interdisciplinary Research Centre for Computer Science and Technology

The Heinz Nixdorf Institute is a research centre within the University of Paderborn. It was founded in 1987 initiated and supported by Heinz Nixdorf. By doing so he wanted to create a symbiosis of computer science and engineering in order to provide critical impetus for new products and services. This includes interactions with the social environment.

Our research is aligned with the program “Dynamics, Mobility, Integration: Enroute to the technical systems of tomorrow.” In training and education the Heinz Nixdorf Institute is involved in many programs of study at the University of Paderborn. The superior goal in education and training is to communicate competencies that are critical in tomorrows economy.

Today nine Professors and 150 researchers work at the Heinz Nixdorf Institute. Per year approximately 20 young researchers receive a doctorate.

Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

- Bd. 327 KAISER, L.: Rahmenwerk zur Modellierung einer plausiblen Systemstrukturen mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 327, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-46-5
- Bd. 328 KRÜGER, M.: Parametrische Modellordnungsreduktion für hierarchische selbstoptimierende Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 328, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-47-2
- Bd. 329 AMELUNXEN, H.: Fahrdynamikmodelle für Echtzeitsimulationen im komfortrelevanten Frequenzbereich. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 329, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-48-9
- Bd. 330 KEIL, R.; SELKE, H. (Hrsg.): 20 Jahre Lernen mit dem World Wide Web. Technik und Bildung im Dialog. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 330, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-49-6
- Bd. 331 HARTMANN, P.: Ein Beitrag zur Verhaltensantizipation und -regelung kognitiver mechatronischer Systeme bei langfristiger Planung und Ausführung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 331, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-50-2
- Bd. 332 ECHTERHOFF, N.: Systematik zur Planung von Cross-Industry-Innovationen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 332, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-51-9
- Bd. 333 HASSAN, B.: A Design Framework for Developing a Reconfigurable Driving Simulator. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 333, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-52-6
- Bd. 334 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 10. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 20. und 21. November 2014, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 334, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-53-3
- Bd. 335 RIEKE, J.: Model Consistency Management for Systems Engineering. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 335, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-54-0
- Bd. 336 HAGENKÖTTER, S.: Adaptive prozessintegrierte Qualitätsüberwachung von Ultraschalldrahtbondprozessen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 336, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-55-7
- Bd. 337 PEITZ, C.: Systematik zur Entwicklung einer produktlebenszyklusorientierten Geschäftsmodell-Roadmap. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 337, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-56-4
- Bd. 338 WANG, R.: Integrated Planar Antenna Designs and Technologies for Millimeter-Wave Applications. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 338, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-57-1
- Bd. 339 MAO, Y.: 245 GHz Subharmonic Receivers For Gas Spectroscopy in SiGe BiCMOS Technology. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 339, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-58-8
- Bd. 340 DOROCIĄK, R.: Systematik zur frühzeitigen Absicherung der Sicherheit und Zuverlässigkeit fortschrittlicher mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 340, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-59-5
- Bd. 341 BAUER, F.: Planungswerkzeug zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 341, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-60-1
- Bd. 342 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M.; MEYER AUF DER HEIDE, F. (Hrsg.): 12. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 342, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-61-8

Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

- Bd. 343 GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 10. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 343, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-62-5
- Bd. 344 BRÖKELMANN, J.: Systematik der virtuellen Inbetriebnahme von automatisierten Produktionssystemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 344, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-63-2
- Bd. 345 SHAREEF, Z.: Path Planning and Trajectory Optimization of Delta Parallel Robot. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 345, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-64-9
- Bd. 346 VASSHOLZ, M.: Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 346, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-65-6
- Bd. 347 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 11. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 29. und 30. Oktober 2015, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 347, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-66-3
- Bd. 348 HEINZEMANN, C.: Verification and Simulation of Self-Adaptive Mechatronic Systems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 348, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-67-0
- Bd. 349 MARKWART, P.: Analytische Herleitung der Reihenfolgeregeln zur Entzerrung hochauslastender Auftragsmerkmale. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 349, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-68-7
- Bd. 350 RÜBBELKE, R.: Systematik zur innovationsorientierten Kompetenzplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 350, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-69-4
- Bd. 351 BRENNER, C.: Szenariobasierte Synthese verteilter mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 351, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-70-0
- Bd. 352 WALL, M.: Systematik zur technologieinduzierten Produkt- und Technologieplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 352, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-71-7
- Bd. 353 CORD-LANDWEHR, A.: Selfish Network Creation - On Variants of Network Creation Games. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 353, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-72-4
- Bd. 354 ANACKER, H.: Instrumentarium für einen lösungsmusterbasierten Entwurf fortschrittlicher mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 354, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-73-1
- Bd. 355 RUDTSCH, V.: Methodik zur Bewertung von Produktionssystemen in der frühen Entwicklungsphase. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 355, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-74-8
- Bd. 356 SÖLLNER, C.: Methode zur Planung eines zukunftsfähigen Produktportfolios. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 356, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-75-5
- Bd. 357 AMSHOFF, B.: Systematik zur musterbasierten Entwicklung technologieinduzierter Geschäftsmodelle. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 357, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-76-2