

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung und Zielsetzung . . . . .	2
1.2	Modellbasierte Entwicklung und Test von mechatronischen Systemen . . . . .	4
1.3	Aufbau der Arbeit . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>11</b>
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
<b>3</b>	<b>Modellbildung des Waschautomaten</b>	<b>43</b>
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
<b>4</b>	<b>Simulation und Validierung</b>	<b>79</b>
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
<b>5</b>	<b>HiL-Simulation für Waschautomaten</b>	<b>105</b>
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 . . . . .	122
5.3.2	HiL-Verfahrenstest . . . . .	127
5.3.3	Ausblick . . . . .	132
<b>6</b>	<b>Anwendungsbeispiele für MiL-Simulationen</b>	<b>135</b>
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
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>153</b>
7.1	Zusammenfassung . . . . .	153
7.2	Ausblick . . . . .	154
<b>8</b>	<b>Notation</b>	<b>157</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>161</b>