

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	XIII
Formel- und Symbolverzeichnis	XVII
Nomenklatur	XXIII
1 Einleitung	1
1.1 Einführung in die Hochschulkooperation	1
1.2 Einordnung der Arbeit	2
1.3 Die Komplexität des Wäschewaschens	3
1.4 Übergeordnetes Ziel	5
2 Die Waschmaschine und die Vermessung des Waschprozesses	6
2.1 Aufbau einer Waschmaschine	6
2.2 Bestimmung der Waschperformance nach DIN EN 60456	7
2.2.1 Prüfgeräte	7
2.2.2 Prüfmaterialien	8
2.2.3 Prüfung	11
2.2.4 Auswertung	12
2.3 Motivation zur alternativen Bestimmung der Waschperformance	14
2.4 Forschungsfrage und Ziele der Arbeit	15
2.5 Abgrenzung der Arbeit	17
3 Stand der Forschung	18
3.1 Gläserne Waschmaschine	18
3.2 Bewegungsarten der Wäsche	19
3.3 Bewegungserfassung der Wäsche	20
3.4 Numerische Simulation der Textil-Strukturmechanik	23
3.5 Modellbasierte Testumgebung für Waschmaschinen	24
3.6 Einfluss der Wäschebewegung auf das Waschergebnis	25
4 Grundlagen des maschinellen Lernens	27
4.1 Definition des maschinellen Lernens	27
4.2 Arten des maschinellen Lernens	28
4.2.1 Unüberwachtes Lernen	28
4.2.2 Bestärkendes Lernen	29
4.2.3 Überwachtes Lernen	29
4.3 Unbekanntes Signal	30
4.4 Signalvorverarbeitung	31
4.5 Merkmale und Merkmalsextraktion	33
4.6 Klassifikation	34
4.7 Regression	36
4.7.1 Lineare Regression	38
4.7.2 Nichtlineare Regression	42
4.7.3 Modell- und Parameterschätzung	43
4.7.4 Merkmalsreduzierung und Gütebewertung der Regressionsfunktion	47
4.8 Fazit zur Methode des maschinellen Lernens	56
5 Prüfstandaufbau und Versuchsdurchführung	58
5.1 Anforderungen eines skalierbaren Prüfstandes	58
5.2 Aufbau des Prüfstandes	59
5.2.1 Systemgrenze und Funktionen des Prüfstandes	59
5.2.2 Gehäuse	61
5.2.3 Schwingsystem	63
5.2.4 Wasserführung	66
5.2.5 Messtechnik	67
5.2.6 Software	70
5.2.7 CE-Kennzeichnung	74

5.3 Verifikation des Prototyps	75
5.3.1 Basiswaschprogramm	76
5.3.2 Verifikation der Messmittel	77
5.3.3 Verifikation der Waschwirkung	83
5.4 Versuchsplanung und –auswertung	84
5.4.1 Versuche zur Erzeugung des Regressionsmodells	85
5.4.2 Ergebnisse der Waschversuche	87
5.4.3 Varianzanalyse der Versuchsparameter	90
6 Regressionsmodell zur Schätzung der Waschperformance	94
6.1 Messdatenvorverarbeitung	95
6.1.1 Resampling	96
6.1.2 Synchronisation der Signale	96
6.1.3 Isolation der Hauptwaschphase	97
6.1.4 Filterung der Rohdaten	98
6.2 Merkmalsextraktion	100
6.2.1 Merkmale aus dem Zeitbereich	100
6.2.2 Merkmale aus dem Frequenzbereich	100
6.2.3 Merkmale aus dem Verteilungsbereich	102
6.3 Merkmalsreduzierung und Gütebewertung	103
6.3.1 Merkmalsselektion mittels AIC_{kor} -Kriterium	103
6.3.2 Modifizierte Merkmalsselektion mittels AIC_{kor} -Kriterium	104
6.3.3 Merkmalsselektion mittels Hypothesentest mit $\alpha = 0,005$	104
6.3.4 Merkmalsselektion mittels Hypothesentest mit $\alpha = 0,01$	105
6.3.5 Merkmalsselektion mittels Hypothesentest mit $\alpha = 0,005$ und vorgefülltem Modell	105
6.3.6 Robuste Merkmalsselektion mittels Hypothesentest mit $\alpha = 0,005$ und vorgefülltem Modell	105
6.3.7 Lineare/quadratische Modellbildung ausschließlich über Drehzahl und Reversierrhythmus	106
6.3.8 Kubische Modellbildung ausschließlich über Drehzahl und Reversierrhythmus	106
6.3.9 Transformation mittels Hauptkomponentenregression	106
6.3.10 Merkmalsselektion über Merkmale mit quadratischem Zusammenhang	107
6.3.11 Benchmarktest: Modellbildung anhand einer Konstanten	107
6.4 Ergebnisse der Regression	108
6.4.1 Übersicht und Analyse der Prognosefehler	108
6.4.2 Analyse des Lernprozesses	111
6.4.3 Zielführendste Regressionsfunktionen	116
6.4.4 Interpretation der Merkmale	118
6.5 Fehleranalyse	122
6.5.1 Ausreißer	123
6.5.2 Zufällige Fehler	123
6.5.3 Systematische Fehler	124
7 Zusammenfassung und Ausblick	125
7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse	125
7.2 Ausblick	127
Literaturverzeichnis	128
Anhang	135
A.1 Abbildungen	135
A.1.1 Allgemeine Abbildungen	135
A.1.2 Waschergebnisse	140
A.1.3 Varianzanalyse der Waschversuche	142
A.1.4 Analyse des Lernprozesses	145
A.1.5 Nicht-triviale Regressoren	149
A.1.6 Residuenplots	159
A.2 Tabellen	160

A.2.1 Allgemeine Tabellen	160
A.2.2 Technische Spezifikationen des skalierbaren Prüfstandes	165
A.2.3 Prognosefehler der Regressionsmodelle	169
A.3 Mathematische Funktionen der besten Regressionsmodelle	171
A.3.1 Schmutzart: Sebum	171
A.3.2 Schmutzart: Ruß	171
A.3.3 Schmutzart: Blut	172
A.3.4 Schmutzart: Gesamt	172
A.4 Sonstiges	173
A.4.1 Rechenregeln zur Differenzierung von Vektoren und Matrizen	173
A.4.2 Beispiel zum Umgang mit linear abhängigen Merkmalen	173
A.4.3 Beispiel für linearisierte nichtlineare Regression	176
A.4.4 Softwarespezifikationen zur Ansteuerung der Gläsernen Waschmaschine 2.0	178