Inhaltsverzeichnis

Symbole und Abkürzungen **X**

Kurzfassung **XII**

1 Einleitung **1**
1.1 Motivation 1
1.2 Zielsetzung dieser Arbeit 3
1.3 Aufbau der Arbeit 4

2 Stand der Technik **5**
2.1 Modellierungsebenen und Anforderungen der Verhaltensmodellierung 5
2.2 Methoden zur Erstellung von Verhaltensmodellen 8
2.2.1 Physikalische Verhaltensmodellierung 8
2.2.2 Strukturelle Verhaltensmodellierung 9
2.2.3 Parametrische Verhaltensmodellierung 10
2.2.4 Symbolische Verhaltensmodellierung 11
2.2.5 Datenbasierte Verhaltensmodellierung 12
2.3 Charakterisierung der Modellierungsverfahren 14

3 Datenbasierte Modellierungsmethoden **16**
3.1 Systemtheorie und Schaltungssimulation 17
3.2 Klassische Verfahren der Systemidentifikation 20
3.3 Methoden der Signalanalyse 22
3.3.1 Fouriertransformation und Wavelets 23
3.3.2 Klassische Filter 24
3.3.3 Time Delay Embedding 25
3.3.4 Surrogate Data 26
3.3.5 Sensitivitätsanalyse 27
3.4 Maschinelles Lernen 28
3.4.1 Neuronale Netze 29
3.4.2 Fuzzy-Systeme 33
3.4.3 Support-Vektor-Maschinen 35
3.4.4 Gauss-Prozesse 37
3.4.5 Repräsentation dynamischer Information 39

3.5 Aktives Lernen . . . 40
3.5.1 Experimentelles Design . . . 41
3.5.2 Regressionsmodelle . . . 42

4 Automatisierte Erstellung von Verhaltensmodellen 44
4.1 Schritte auf dem Weg zur Automatisierung der Modellgenerierung . . . 45
4.2 Problembeschreibung aus systemtheoretischer und probabilistischer Sicht . . . 46
4.2.1 Modellierungskomplexität der systemtheoretischen Modellklassen . . . 47
4.2.2 Statistische Beschreibung eines Modellierungsprozesses . . . 48
4.3 Abbildung nichtlinearer Information . . . 48
4.4 Abbildung dynamischer Informationen . . . 54
4.4.1 Dynamische Informationen . . . 56
4.4.2 Systeme mit kontinuierlichen Signalen . . . 57
4.4.3 Systeme mit diskreten Signalen . . . 58
4.4.4 Mixed-Signal Systeme . . . 59
4.5 Wahl der relevanten Regressoren . . . 60
4.6 Hierarchische Modelle . . . 63
4.7 Automatisierung der Trainingsdatengenerierung . . . 66
4.8 Modell Validierung . . . 73
4.9 Einbindung von Randbedingungen . . . 73
4.10 Lernalgorithmus zur Diskretisierung der Parameter einer Support-Vektor-Maschine . . . 75

5 Einsatz der datenbasierten Methode in industriellen Anwendungen 81
5.1 Simulationsumgebung . . . 82
5.1.1 Simulatoren . . . 83
5.1.2 Modellintegration in ausgewählte Simulatoren . . . 84
5.1.3 Integration der Modellierungsmethodik in InSiMS . . . 89
5.1.4 Portierung und Simulation datenbasierter Modelle auf einem Mikrocontroller . . . 91
5.2 Ladungspumpe . . . 93
5.2.1 Beschreibung des Systems . . . 93
5.2.2 Datenbasierte Modellierung . . . 94
5.2.3 Nutzen für die Entwicklung . . . 100
5.3 Kraftstoff-Einspritzventil . . . 101
5.3.1 Beschreibung des Systems . . . 101
5.3.2 Datenbasierte Modellierung . . . 104
5.3.3 Nutzen für die Entwicklung . . . 105
5.4 Drucksensor . . . 105
5.4.1 Beschreibung des Systems . . . 106
5.4.2 Datenbasierte Modellierung . . . 107

5.4.3 Nutzen für die Entwicklung 112
5.5 Gassensor 113
5.5.1 Beschreibung des Systems 114
5.5.2 Datenbasierte Modellierung 115
5.5.3 Nutzen für die Entwicklung 118
5.6 Diskussion zur Verwendung der datenbasierten Modellierung in der Kraftfahrzeugtechnik 120
5.6.1 Automatisierte Generierung funktionaler Verhaltensmodelle 120
5.6.2 Automatisierte Generierung von Verhaltensmodellen für die Signalanalytik integrierter Sensoren 123

6 Zusammenfassung und Ausblick 126
6.1 Zusammenfassung 126
6.2 Ausblick auf weiterführende Arbeiten 128

A InSiMS - Integrated Co-Simulation of Mixed-Signal Systems 132

Literaturverzeichnis 134