

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Zielsetzung	1
1.1	Entwicklungssystematiken mechatronischer Systeme	2
1.2	Fachdisziplinspezifische Auslegung in der Regelungstechnik . .	3
1.2.1	Steuerungs- und Reglerentwurf	6
1.2.2	Zustandsschätzung	7
1.3	Problemstellung und Anforderungen	9
1.4	Stand der Wissenschaft und der Technik	12
1.5	Handlungsbedarf	14
1.6	Aufbau der Dissertation	15
2	Zustands- und Parameterschätzung	19
2.1	Statistische Grundlagen	20
2.1.1	Wahrscheinlichkeit	20
2.1.2	Zufallsvariable und Dichtefunktion	21
2.1.3	Statistische Momente	22
2.2	Das Kalman-Filter	24
2.2.1	Das Extended-Kalman-Filter	27
2.2.2	Least-Square- und Weighted-Least-Square-Methode . .	29
2.2.3	Bayessche Zustandsschätzung	32
2.3	Particle Filter	33
2.4	Sigma-Punkte-Filter	35
2.5	Machine Learning	36
2.6	Zusammenfassung der Schätzverfahren	36
3	Sigma-Punkte-Filter	39
3.1	Unscented-Kalman-Filter	40
3.2	Unscented Transform	46
3.2.1	Second-Order Transformation	48
3.2.2	Scaled-Unscented Transformation	54
3.2.3	Spherical-Simplex Transformation	60
3.2.4	Zusammenfassung der Sigma-Punkte-Verfahren	64
3.3	Erweiterung des UKF-Algorithmus	65
3.4	Das Central-Difference-Kalman-Filter	68
3.5	Parameterschätzung mittels Sigma-Punkte-Filter	71
3.5.1	Das Joint-Unscented-Kalman-Filter	72

3.5.2	Wahl der Kovarianz einer Parameterschätzung	74
3.6	Sigma-Punkte-Filter unter Nebenbedingungen	75
3.7	Zusammenfassung der Sigma-Punkte-Filter	80
4	Wahl der Filter- und Entwurfparameter	83
4.1	Optimaler Parametersatz zur Filterauslegung	84
4.1.1	Szenariodefinition	84
4.2	Ermittlung von Prozess- und Messrauschkovarianzen	85
4.3	Optimierung der Entwurfparameter	88
4.3.1	Gaußprozess	90
4.3.2	Kernel-Funktionen und Hyperparameter	95
4.3.3	Optimale Vorgabe von Hyperparametern des Kernels	97
4.3.4	Gaußprozessoptimierung	98
4.4	Anwendung am Unscented-Kalman-Filter	100
4.4.1	Trainingsdaten	102
4.4.2	Optimierung zur Maximafindung und Abbruchbedingung	104
5	Auslegungsmethodik	109
5.1	Das Functional-Mockup-Interface	110
5.1.1	MATLAB-Interface zur FMU-Ansteuerung	111
5.2	Modelleinbindung	114
5.3	Filterentwurf	115
5.4	Systemtest	116
5.5	Zusammenfassung Auslegungsmethodik	118
6	Anwendungsbeispiele	121
6.1	Doppelpendel	121
6.1.1	Modellbildung Doppelpendel	122
6.1.2	Zustands- und Parameterschätzung unter idealen Bedingungen	123
6.1.3	Optimierter Satz von Entwurfparametern	123
6.1.4	Wahl von Prozess- und Messrauschkovarianz	127
6.1.5	Einbeziehung von Nebenbedingungen	129
6.1.6	Vergleich unterschiedlicher Filtervarianten	133
6.2	Schätzung zeitvarianter Unwucht in Waschautomaten	137
6.2.1	Modellbildung Waschautomat	138
6.2.2	Unwuchtschätzung im Schleuderprozess	140
6.2.3	Robustheit gegenüber Modellungenauigkeiten	141
6.3	Zustandsschätzung Dingo 2	147
6.3.1	Modellbildung Dingo	147
6.3.2	Zustandsschätzung bei Hindernisfahrt	148
6.4	Zusammenfassung Anwendungsbeispiele	151
7	Resümee und Perspektiven	153

8	Literaturverzeichnis	157
A	Anhang	167
A.1	Square-Root Unscented Kalman Filter	167
A.2	Central-Difference-Filter	168
A.3	MATLAB-Toolbox	169
A.4	Doppelpendel	174
A.5	Schätzung zeitvarianter Unwucht im Waschautomaten	178
A.6	Zustandsschätzung Dingo 2	182