

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	viii
Symbolverzeichnis	xx
1 Einführung	1
1.1 Problemstellung und Motivation	2
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Stand der Technik	5
2.1 Einklemmschutz im Automobilbereich	5
2.1.1 Bedeutung des Einklemmschutzes	5
2.1.2 Indirekte EKS-Technologien	12
2.1.3 Direkte EKS Technologien	15
2.2 Fensterhebersystem	21
2.2.1 Struktureller Aufbau	21
2.2.2 FH-Regelung	28
2.2.3 Einflussfaktoren	31
3 Theoretische Grundlagen	33
3.1 Prinzipien der Mechanik	33
3.1.1 Rekursives Newton-Euler-Verfahren	33
3.2 Modellierung von Reibung	35
3.2.1 Reibmodelle	35
3.2.2 Hysterese und Reibeffekte an Kabelzugsystemen	37
3.3 Zustandsraumdarstellung	38
3.3.1 Lineare Systeme	39
3.3.2 Zeitdiskretisierung	39
3.4 Kalman Filter	41
3.4.1 Klassischer Kalman Filter	41
3.4.2 Extended Kalman Filter	43
3.4.3 Unscented Kalman Filter	44
3.5 Lernfähige Beobachter	47
3.5.1 Statische Funktionsapproximation	47
3.5.2 Lernfähige Beobachter	54
3.6 Modellierung von PMDC-Motoren	56
3.6.1 Elektrisches Ersatzschaltbild	56
3.6.2 Kommutierung	57
3.6.3 Elektromagnetische Effekte	60
3.6.4 Getriebe	65
3.7 Elektrodynamik	68
3.7.1 Maxwellsche Gleichungen	68
3.7.2 Finite Integral Methode	69

3.7.3	Laplace-Operator	73
3.7.4	Kapazitätsbestimmung	73
4	Herleitung der Aufgabenstellung	77
4.1	A) Problembeschreibung	78
4.2	B) Zielsetzung	80
4.3	C) Vergleich der Teillösungen	83
5	Methoden und Konzepte	87
5.1	Modellierung von FH-Motoren	87
5.1.1	Motormodell	87
5.1.2	Thermisches Ersatzmodell	89
5.1.3	Motor Parameteridentifikation	93
5.2	Sensorlose Positionierung (SLP)	96
5.2.1	Rippleentstehung	96
5.2.2	Modellierung einer Rippledetection	101
5.2.3	Scheitelpunktdetection	112
5.3	Modellierung des FH-Systems	114
5.3.1	Mechanisches Ersatzsystem	114
5.3.2	Kinematische Beziehungen	115
5.3.3	Dynamik der Hebermechanik	116
5.3.4	Dichtungsreibung	119
5.3.5	Kontaktmodelle	122
5.3.6	Kinematik des Gesamtsystems	125
5.3.7	Newton-Euler Verfahren	126
5.4	Lernfähiger Beobachter	128
5.4.1	UKF-Beobachter mit intelligenter Reibungsidentifikation	128
5.4.2	Reibungsidentifikation	130
5.4.3	Plausibilisierungen zur Unscented Transformation	133
5.4.4	Konvergenzverhalten	134
5.4.5	Rotorwinkelsynchronisation	135
5.5	Kraftbasierter Einklemmschutz	137
5.5.1	Einklemmkraftsensitivitäten	137
5.5.2	Einklemmschutzgradienten	138
5.5.3	Wiederholgenauigkeiten	146
5.5.4	Beobachterfehlerbasierter Einklemmschutz	147
5.6	Berührungsloser Einklemmschutz	152
5.6.1	Elektrostatischer Einklemmschutz	152
5.6.2	Optische Einklemmschutzabsicherung	166
6	Validierung	169
6.1	Parameteridentifikation	169
6.1.1	Lineare Motorparameteridentifikation	169
6.1.2	Nichtlineare Motorparameteridentifikation	174
6.1.3	Motortemperaturmodellidentifikation	177
6.1.4	Systemsteifigkeiten	181
6.2	Validierung zur sensorlosen Positionierung	185
6.2.1	Testumgebung	185
6.2.2	Positionsbestimmung	185
6.2.3	Ergebnisdiskussion	192
6.3	Validierung des UKFM-NN Konzepts	193
6.3.1	Simulation unter Idealbedingungen	194
6.3.2	Prüfstandsversuch	198
6.3.3	Diskussion	200

6.4	Beobachterfehlerbasierter Einklemmschutz	202
6.4.1	Testumgebung	202
6.4.2	Testablauf	203
6.4.3	Auswertung zur Güte der beobachteten Referenzwerte	203
6.4.4	Auswertung zur Einklemmschutzsensitivität	207
6.4.5	Einfluss des Prozessrauschens	211
6.4.6	Zusammenfassung	212
6.4.7	Diskussion der Ergebnisse	213
6.5	Elektrostatistischer Einklemmschutz	214
6.5.1	Testumgebungen	214
6.5.2	Prüfstandsmessung	217
6.5.3	Fahrzeugversuch	219
6.5.4	Bewertung der Konzepttauglichkeit	222
6.6	Optische Einklemmschutzabsicherung	223
6.6.1	Trainingsergebnisse	223
6.6.2	Funktionsvalidierung	225
6.6.3	Robustheitsbewertung	228
6.6.4	Diskussion der Ergebnisse	230
7	Zusammenfassung	233
8	Anhang	237
8.1	Anhang A: Ergebnisse	237
8.1.1	Verifikationsergebnisse	237
8.1.2	Validierungsergebnisse	239
8.2	Anhang B: Modellergänzungen	250
8.2.1	PMDC-Motormodellierung und SLP	250
8.2.2	FH-Modellierung	251
8.2.3	FH-Regelung	257
8.2.4	Kapazitiver Einklemmschutz	264
8.2.5	Optischer Einklemmschutz	269
8.3	Anhang C: Zeichnungen	272
8.3.1	Stand der Technik	272
8.3.2	Herleitung der Aufgabenstellung	273
	Abbildungsverzeichnis	277
	Tabellenverzeichnis	285
	Literaturverzeichnis	286
	Lebenslauf	295
	Studentische Arbeiten	296