

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	v
Zusammenfassung	vii
Abstract	ix
Abkürzungen und Formelzeichen	xi
1 Einleitung	1
2 Elektrische Antriebssysteme in automobilen Traktionsanwendungen	3
2.1 Anforderungen	4
2.2 Stand der Technik und Trends	5
2.2.1 Elektrische Motoren	5
2.2.2 Leistungselektronik	7
2.2.3 Regelung des Antriebssystems	9
2.3 Bedarf der modellbasierten Temperaturermittlung zur Laufzeit	10
3 Elektromagnetische Modellierung	15
3.1 Koordinatensysteme	16
3.2 Zeitkontinuierliche Zustandsdifferentialgleichungen	18
3.2.1 Sättigungs- und Kreuzsättigungseffekte	20
3.2.2 Winkelabhängigkeit des verketteten Flusses	23
3.2.3 Drehzahlabhängigkeit des verketteten Flusses	25
3.3 Zeitliche Diskretisierung	28
3.3.1 Explizite Euler Diskretisierung in statorfesten Koordinaten	32
3.3.2 Berücksichtigung der Sättigungs- und Kreuzsättigungseffekte	34
3.4 Verlustleistungsmodellierung	38
3.4.1 Stromwärmeverluste	39
3.4.2 Eisenverluste	42
3.4.3 Mechanische Verluste	48
4 Feldorientierte Regelung und Arbeitspunktsteuerung	51
4.1 Stromregelung	52
4.2 Arbeitspunktsteuerung	55
4.3 Aussteuerungsregler	58
5 Thermische Modellierung	61
5.1 Stand der Technik und Methodenauswahl	62
5.2 Herleitung eines T-Ersatzschaltbilds mit konzentrierten Parametern	65
5.3 White-Box Modellierung eines Prototypenmotors unter Unsicherheiten	76
5.3.1 Wasserkühlmantel	77
5.3.2 Statorrücken	78
5.3.3 Statorwicklung	81
5.3.4 Statorzähne	84

5.3.5	Luftspalt	85
5.3.6	Permanentmagnete	87
5.3.7	Rotoreisenpaket	90
5.3.8	Rotorwelle	91
5.3.9	Kugellager	94
5.3.10	Lagerschild	96
5.3.11	Netzwerksynthese	98
5.3.12	Empirisches Verlustleistungsmodell	100
5.3.13	Zeitliche Diskretisierung	105
5.3.14	Validierung	106
5.4	Light-Grey-Box Modellierung mittels Identifikation unsicherer Parameter	110
5.4.1	Diskussion möglicher Identifikationsansätze für LPV-LPTN-Modelle	110
5.4.2	Definition unsicherer Parameter	113
5.4.3	Identifikationsvorgehen	115
5.4.4	Kreuz-Validierung	116
5.4.5	Vernachlässigung des Lagerschildes und des Kugellagers	121
5.4.6	Berücksichtigung variierender Zwischenkreisspannungen	126
5.5	Dark-Grey-Box Modellierung durch Modellreduktion und neuer Identifikation	129
5.5.1	Globaler Identifikationsansatz	130
5.5.2	Identifikationsergebnis und Kreuz-Validierung	132
5.5.3	Weitergehende Analyse der erzielten Schätzperformanz	137
5.5.4	Berücksichtigung variierender Zwischenkreisspannungen	138
5.5.5	Exkurs: Lokale LPV-Identifizierung	142
6	Ermittlung der Magnettemperatur aus elektrischen Größen	145
6.1	Stand der Technik und Methodenauswahl	146
6.2	Konzept des exakten Flussbeobachters	148
6.3	Identifikationsprozess der Beobachter-Modellparameter	149
6.4	Umrichtermodellierung	151
6.4.1	Parameteridentifikation des Umrichtermodells	154
6.4.2	Aspekte der Implementierung	158
6.4.3	Validierung	160
6.5	Auslegung der Beobachterrückführung	163
6.6	Sensitivitätsanalyse	167
6.7	Untersuchung im aktiven Kurzschluss	172
6.8	Einfluss thermischer Ausdehnungseffekte	177
6.9	Erweiterung für geringe Drehzahlen und Parameteroptimierung	180
6.10	Validierung	182
6.11	Berücksichtigung variierender Zwischenkreisspannungen	184
7	Fusionierung unabhängiger Temperaturinformationen	185
7.1	Gewichteter Mittelwert	186
7.1.1	Statorwicklung	187
7.1.2	Permanentmagnete	188
7.2	Künstliche Neuronale Netzwerke	189
7.3	Kalman-Filter	193
7.3.1	Stand der Technik	197
7.3.2	Formelle Analyse des LPTN und des Beobachterentwurfs	198
	Beobachtbarkeit und Erreichbarkeit des LPTN	199
	Stabilität des LPTN	201
	Stabilität des Beobachterkreises	203

7.3.3	Umgang mit farbigen Rauschprozessen	205
	Farbiges Systemrauschen	205
	Farbiges Messrauschen	206
	Bewertung der Formfilter	206
7.3.4	Analytische Auslegung unter idealisierten Annahmen	207
7.3.5	Optimierte Auslegung des dynamischen KF	209
7.3.6	Optimierte Auslegung des stationären KF	214
7.3.7	Alternative: Robustes Kalman-Filter und H_∞ -Filter	219
8	Maximierung der thermischen Ausnutzung zur Laufzeit (Derating)	223
8.1	Stand der Technik	224
8.2	Fahrzeug- und Streckenmodell	225
8.3	Lösungsmethoden für Optimalsteuer- und modellprädiktive Regelungsprobleme	229
8.4	Modellprädiktives Derating	232
8.5	Konventioneller Derating-Ansatz	238
9	Fazit und Ausblick	243
9.1	Fazit	243
9.2	Ausblick	245
	Literaturverzeichnis	247
	Eigene Veröffentlichungen	267
A	Validierungsplattform	269
A.1	Prüfstandsaufbau	269
A.2	Prototypenmotor	272
B	Einige systemtheoretische Grundlagen	275
B.1	Identifizierbarkeit	275
	B.1.1 Strukturelle Identifizierbarkeit	275
	B.1.2 Identifizierbarkeit als Konvergenzkriterium	277
B.2	Kostenfunktionen für die Parameteridentifikation	277
B.3	Validierung	280
C	Grundlagen der Partikelschwarmoptimierung	285
C.1	Grundidee	287
C.2	Nachbarschaften	289
C.3	Exploration vs. Konvergenz	291
C.4	Lokale Optimierung	292
D	Trainingsdaten für globale Identifikationsprozesse	295