

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Elektrische Maschinen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge	1
1.2	Motivation und Zielstellung	3
1.3	Aufbau der Arbeit	7
2	Permanentmagneterregte Synchronmaschinen und synchrone Reluktanzmaschinen	9
2.1	Grundwellenmodell	9
2.2	Klassifizierung der Rotortopologien	13
2.2.1	Synchronmaschinen mit Oberflächenmagneten	13
2.2.2	Synchronmaschinen mit vergrabenen Magneten	14
2.2.3	Synchrone Reluktanzmaschinen	16
2.3	Betriebsverhalten	18
3	Anforderungen an die Kennlinien elektrischer Fahrmotoren	27
3.1	Fahrzeugparameter und Fahrwiderstände	27
3.2	Fahrzyklen	28
3.3	Ableitung der Betriebskennlinien	31
4	Analytische und numerische Maschinenberechnung	35
4.1	Elektromagnetisches Drehmoment	36
4.2	Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien	38
4.3	Fahrzyklusabhängige Verluste	40
4.3.1	Stromwärmeverluste in der Wicklung	41
4.3.2	Ummagnetisierungsverluste im Elektrolech	44
4.3.3	Weitere Verlustarten	48
4.4	Aktiver dreiphasiger Kurzschluss und Entmagnetisierungsfestigkeit	49
4.5	Thermische Belastung der Wicklung	54
4.6	Mechanische Rotorfestigkeit	56
5	Multikriterielle Maschinenoptimierung	61
5.1	Optimierungsprobleme	61

5.2	Optimierungsverfahren	63
5.2.1	Klassifizierung	63
5.2.2	Differential Evolution Algorithmus	64
5.3	Automatisierter Entwurfsprozess	73
5.3.1	Kennfeldmodus	74
5.3.2	Bemessungspunktmodus	77
6	Optimierte Auslegung von synchronen Reluktanzmaschinen	81
6.1	Modellbildung und Problemstellung	81
6.1.1	Modellierung des Stators und der Wicklung	81
6.1.2	Modellierung des Rotors	83
6.1.3	Vorbetrachtungen und Problemstellung	87
6.2	Simulationsergebnisse	92
6.2.1	Optimierungsergebnisse	92
6.2.2	Analyse und Überarbeitung eines Maschinendesigns	96
6.3	Aufbau eines Prototyps und experimentelle Ergebnisse	103
7	Maßnahmen zur Verbesserung des Betriebsverhaltens	111
7.1	Weichmagnetische Werkstoffe	111
7.1.1	Klassifizierung und Eigenschaften	111
7.1.2	Vergleich verschiedener Elektroblechsorten	114
7.2	Anwendungsspezifische Wahl der Elektroblechsorte	119
7.3	Einsatz neuer Verfahren zur Herstellung der Stator- und Rotorbleche	125
8	Vergleich mit permanentmagneterregten Synchronmaschinen und Auswahlssystematik	135
8.1	Permanentmagnetmaterialien	135
8.1.1	Übersicht	135
8.1.2	Modellierung der spezifischen Materialkosten	138
8.2	Optimierte Auslegung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen	142
8.2.1	Parametrische Modellbildung von Rotorgeometrien mit mehreren Magnetlagen	142
8.2.2	Problemstellung	146
8.2.3	Simulationsergebnisse und Auswahlssystematik	147
8.3	Vergleich zwischen ausgewählten Topologien	153
8.4	Einordnung von synchronen Reluktanzmaschinen mit amagnetischen Rotorstegen	156
9	Zusammenfassung und Ausblick	159

Literaturverzeichnis	163
Anhang	177
A.1 Rohstoffpreise von SmCo-Magneten	177
A.2 Leistungsanforderung zur Beschleunigung eines Fahrzeugs	177
A.3 Mindestanforderungen an die elektrische Maschine	178
A.4 Wärmeklassen	178
A.5 Simulationsparameter Differential Evolution	179
A.6 Verlauf der Designparameter für Bemessungspunktmodus	180
A.7 Designparameter der synchronen Reluktanzmaschine D1	181
A.8 Stationäre Wicklungstemperatur bei Bestromung nach MTPA	181
A.9 Berechnung der Lager- und Luftreibungsverluste	182
A.10 Arbeitspunktverteilung für verschiedene Fahrzyklen	186
A.11 Fehlerbetrachtung zur Leistungsmessung	187
A.12 Auswertung der Verlustanteile aus Messdaten	189
A.13 Parameter der Schneidverfahren	191
A.14 Vergleich zwischen Laser-Schmelzschnitten und Laser-Remoteschnitten	191
A.15 Auswirkung der Oberflächenbehandlung auf die Permeabilität des Elektroblechs	192
A.16 Berechnung der Flussdichte eines Rundmagneten	192
A.17 Berechnung der Abmessungen eines Rundmagneten	193
A.18 Materialbestandteile Permanentmagnete	194
A.19 Konstante Parameter für PMSM-Optimierung	196
A.20 Pareto-Lösungen für ideale SynRM ohne Rotorstege	197
Abkürzungen und Formelzeichen	199
Abbildungsverzeichnis	213
Tabellenverzeichnis	221