

1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Vorarbeiten	5
2.1 Einsatz von elektrischen Maschinen im Kfz	5
2.1.1 Batterieelektrische Fahrzeuge	6
2.1.2 Brennstoffzellenfahrzeug	7
2.1.3 Hybridfahrzeuge	8
2.2 Neuartiger Ansatz zur Implementierung elektrischer Leistung im Antriebsstrang	11
2.2.1 Anforderungen und Restriktionen an elektrische Maschinen im Kfz	11
2.2.2 Definition Segmentmotor	12
2.2.3 Systemvorteile segmentierter Maschinen	13
2.2.4 Wissenschaftliche Vorarbeiten zu Segmentmotoren	14
2.2.5 Einsatz von Segmentmotoren	15
2.3 Technologiebewertung auf Basis der Anforderungen an elektrische Maschinen in einem Kfz-Antriebsstrang	17
2.3.1 Auswahl des Maschinentyps	17
2.3.2 Auswahl der Wicklungsart	20
3 Systemanalyse segmentierter Maschinen	21
3.1 Restriktionen in der Segmentierung	21
3.1.1 Einschränkung der Nut/Polkombinationen	21
3.1.2 Entfernen einzelner Spulen	22
3.2 Analytische Systembewertung	23
3.2.1 Optimaler Bohrungsdurchmesser	24

3.2.2 Geometrieanalyse unsegmentierter elektrischer Maschinen	30
3.2.3 Segmentierungsvarianten	34
4 Untersuchung einer segmentierten PSM mit variierender Segmentanzahl	41
4.1 FEM-Modellierung	41
4.1.1 2D-Simulation	42
4.1.2 3D-Simulation	43
4.1.3 FEM-Berechnungen segmentierter elektrischer Maschinen	45
4.2 Berechnete Referenzmaschine	46
4.2.1 Charakterisierung	47
4.2.2 Variation der Segmentierungen	48
4.3 Drehmomentverhalten	50
4.3.1 Maximales Drehmoment	50
4.3.2 Rastmoment	53
4.4 Verlustbetrachtung	55
4.4.1 Kupferverluste	55
4.4.2 Berechnung des Arbeitspunktes eines Magneten	56
4.4.3 Wirbelstromverluste in den Magneten	59
4.4.4 Eisenverluste	60
4.5 Unsymmetrien auf Grund der Randeffekte	62
4.5.1 Induzierte Leerlaufspannung	62
4.5.2 Stromverlauf in den Wicklungen	64
4.5.3 Einfluss auf die Drehmomentbildung	69
4.5.4 Einfluss auf den Drehmomentrissel	75
4.5.5 Erhöhung der Kupferverluste	76
4.5.6 Erhöhung der Eisenverluste	79
4.5.7 Einfluss auf die Wirbelstromverluste in den Magneten	80
5 Untersuchung der Randeffekte einer segmentierten PSM	83
5.1 Gestaltungsmaßnahmen an den Segmentgrenzen	83
5.1.1 Gestaltung des Flussleitstücks	83
5.2 Verbesserung des Drehmomentverhaltens	84
5.2.1 Rastmoment	84
5.2.2 Drehmomentrissel	85
5.2.3 Maximales Drehmoment	86

5.3	Verlustbetrachtung unter Einbezug der Flussleitstücke	88
5.3.1	Eisenverluste in den Flussleitstücken	88
5.3.2	Einfluss auf die Wirbelstromverluste in den Magneten	89
5.4	Reduzierung der Unsymmetrien	93
5.4.1	Induzierte Leerlaufspannung	93
5.4.2	Stromverlauf in den Wicklungen	94
5.4.3	Einfluss auf die Drehmomentbildung	97
5.4.4	Kennlinienvergleich	97
5.5	Feldanalyse außerhalb der segmentierten Maschine	101
5.5.1	Schirmungsfaktor	101
5.5.2	Einfluss der Felder auf externe Objekte	103
5.6	Akustik segmentierter Maschinen	104
6	Messtechnische Validierung und Interpretation der Berechnungen	109
6.1	Prüfstandsaufbau	109
6.1.1	Definition des Prototypen	109
6.1.2	Konstruktion des Prototypen	112
6.1.3	Messaufbau am Prüfstand für elektrische Maschinen	114
6.2	Drehmomentverhalten	116
6.2.1	Rastmoment	116
6.2.2	Zeitlich konstanter Strombelag	118
6.3	Unsymmetrien in der Flussverkettung	120
6.3.1	Induktivitätsmessung	120
6.3.2	Leerlaufspannung	122
6.3.3	Aktiver Kurzschluss	126
6.4	Felder außerhalb der segmentierten Maschine	128
6.4.1	Messaufbau zur Messung des Magnetfeldes	128
6.4.2	Messergebnisse und Auswertung	128
6.5	Diskussion der Messergebnisse	129
7	Zusammenfassung und Ausblick	131
Literaturverzeichnis		135