

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	IX
Symbolverzeichnis	XI
Zusammenfassung	XVII
Abstract	XIX
1. Einleitung	1
2. Permanentmagnetisch erregte Kleinmotoren in axialer Bauform	5
2.1. Stand der Technik	5
2.2. Aufbau, Funktionsprinzip und Topologien der AFPM	7
2.3. Theoretischer Vergleich zum Radialflussmotor	10
2.3.1. Herleitung der Entwurfsgleichung der AFPM	10
2.3.2. Theoretische Potentiale des Axialflussmotors	11
2.4. Luftspaltoberwellen und deren Auswirkungen auf die Motorverluste	15
2.5. Konventionelle Beschreibung von BLDC Motoren	18
2.5.1. Schichtenmodell	19
2.5.2. Gleichstrommodell	21
3. Hoch ausgenutzte Kleinantriebe für handgeführte Elektrowerkzeuge	23
3.1. Systemübersicht	24
3.1.1. BLDC-Motoren in handgeführten Elektrowerkzeugen	25
3.1.2. Leistungselektronik	26
3.1.3. Ansteuerverfahren	27
3.2. Betriebsverhalten	29
3.2.1. Vereinfachtes Betriebsverhalten	30
3.2.2. Näherung zur Beschreibung des physikalischen Betriebsverhal-	
tens im Dauerbetriebsbereich	31
3.3. Anforderungsdefinition	33
3.3.1. Untersuchung des Gesamtsystems	33
3.3.2. Referenzmotor	36
3.4. Eingrenzung der Arbeit	37
4. Analytische Beschreibung	39
4.1. Analytische Berechnung des elektromagnetischen Drehmoments . .	40

4.2.	Theorie der quasi-stationären magnetischen Felder	41
4.2.1.	Durchflutungsgesetz	41
4.2.2.	Induktionsgesetz	42
4.2.3.	Magnetische Energie und Koenergie	42
4.3.	Theorie der Wicklungsfunktion	44
4.3.1.	Definition der Windungs- und Wicklungsfunktion	46
4.4.	Permanentmagnetbehafteter Kreis	48
4.4.1.	Korrekturfaktoren der analytischen Berechnung	49
4.4.2.	Arbeitspunkt der PMe	51
4.4.3.	Die Remanenzflussdichtefunktion	53
4.4.4.	Energie und Kräfte im PM-erregten Kreis	54
4.5.	Analytische Beschreibung von Zahnspulenwicklungen	57
4.5.1.	Konstruktion der Wicklungsfunktion	57
4.5.2.	Zonungsfaktor der Wicklungsfunktion 1. Art	60
4.5.3.	Zonungsfaktor der Zahnspulen 2. Art	62
4.5.4.	Durchflutungsverteilung bei nicht sinusförmiger Anregung	65
4.5.5.	Induzierte Spannung	68
4.5.6.	Elektromagnetisches Drehmoment	71
5.	Entwurf und Realisierung eines Prototypen	75
5.1.	Entwurfsprozess	76
5.2.	Grobentwurf des Motors	79
5.3.	FE-gestützte Optimierung	83
5.3.1.	Sensitivitätsanalyse und Optimierung	83
5.3.2.	Dynamisches Motorverhalten	91
5.3.3.	Vergleich zum Entwurf und Schlussfolgerung	99
5.4.	Aufbau des Prototypen	99
5.4.1.	Fertigung von Axialflussmotoren: Stand der Technik und Herausforderungen	99
5.4.2.	Gesamtkonstruktion des Prototypen	101
5.4.3.	Konstruktion und Fertigung der Baugruppe Stator	103
5.4.4.	Konstruktion und Fertigung der Baugruppe Rotor	104
6.	Inbetriebnahme und Vermessung	107
6.1.	Prüfstand	107
6.2.	Betriebsverhalten des Prototypen	110
6.2.1.	BEMF und Spannungskonstante	110
6.2.2.	Strom-Drehmoment-Verhalten	110
6.2.3.	Motorkennlinie	113
6.3.	Motorverluste	114
6.3.1.	Energiebilanz der elektromechanischen Energiewandlung	115
6.3.2.	Wirkungsgradkennfeld	116
6.3.3.	Separation der Einzelverluste	116
6.3.4.	Inneres Wirkungsgradkennfeld	118

6.4. Fazit	120
7. Zusammenfassung und Ausblick	121
A. Zusätze zu den PM-erregten Kleinmotoren mit axialer Bauform	125
A.1. Konturkarte der doppelseitigen AFPM	125
A.2. Marktanalyse Axialflussmotoren	125
B. Zusätze zur analytischen Berechnung	129
B.1. Geometrische Umrechnungsformeln	129
B.2. Bestimmung der Korrekturfaktoren	129
B.3. Berechnung der Stranginduktivitäten	131
B.4. Elektrische Motorparameter der Co-Simulation	133
B.4.1. Induktivitätsverlauf	133
B.4.2. BEMF-Verlauf	133
C. Zusätze zur Prüfstandsarbeit	135
C.1. Vermessung des Referenzmotors	135
C.2. Messdatenauswertung	136
C.2.1. BEMF des Referenzmotors	136
C.2.2. Verlustleistung des Referenzmotors im Leerlauf	136
C.2.3. Wirkungsgradkennfelder des Referenzmotors	137
C.3. Prüfstandsautomatisierung	138
D. Zusätze zur Konstruktion des Prototypen	141
D.1. Konstruktion und Baugruppen	141
D.2. Technische Zeichnungen	142
Literaturverzeichnis	147