

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Anwendungsbeispiele	1
1.2	Motivation	6
1.3	Stand der Technik	7
1.3.1	Permanentmagneterregte Synchronmaschine	9
1.3.2	Gleichstrommaschine mit Luftspaltwicklung	12
1.3.3	Geschaltete Reluktanzmaschine	12
1.4	Aufgabenstellung	13
1.5	Methodisches Vorgehen	14
2	Anforderungen	15
2.1	Fahrzyklus	15
2.2	Bedarfskraft	16
2.2.1	Luftwiderstand	17
2.2.2	Rollwiderstand	18
2.2.3	Beschleunigungswiderstand	18
2.2.4	Steigungswiderstand	19
2.3	Fahrzeug	20
2.4	Bedarfsdrehmoment	20
2.5	Berechnung des Energieverbrauches	22
3	Modellbildung der Synchronmaschine mit Permanentmagneten	27
3.1	Funktionsweise	27
3.2	Luftspaltinduktion	32
3.3	Induzierte Spannung	35
3.4	Phasenwiderstand	36

3.5	Wicklungsinduktivitäten	36
3.5.1	Hauptinduktivität	37
3.5.2	Streuinduktivität der Unter- und Oberwellen	38
3.5.3	Nutstreuinduktivität	38
3.5.4	Zahnkopfstreuinduktivität	39
3.5.5	Wickelkopfstreuinduktivität	40
3.6	Betriebsverhalten	40
4	Verluste	43
4.1	Kupferverluste	43
4.1.1	Wirbelstromverluste durch Skin- und Proximity-Effekt	45
4.1.2	Wirbelstromverluste durch Kreisströme	48
4.2	Ummagnetisierungsverluste im Elektrolech	51
4.3	Wirbelstromverluste in den Magneten	54
5	Auswahlkriterien von Nutenzahl und Polzahl für Zahnspulenwicklungen	57
5.1	Eigenschaften von Zahnspulenwicklungen	57
5.1.1	Entwurf von Zahnspulenwicklungen	59
5.1.2	Luftspaltfelderanalyse	62
5.1.3	Berechnung des Wicklungsfaktors	64
5.1.4	Berechnung der Oberfeldstreuiziffer	65
5.2	Kriterien für die Wahl der Nuten- und Polzahl	66
5.2.1	Wicklungsfaktor	67
5.2.2	Oberfeldstreuiziffer	68
5.2.3	Radialkräfte und Biegeverformung	69
5.2.4	Einfluss auf die relativen Frequenzen	72
5.2.5	Einfluss auf das Rastmoment	73
5.2.6	Einfluss auf den modularen Aufbau	74
5.3	Vorauswahl der Nuten- und Polzahl für den Direktantrieb	75

6	Numerisch basierte Auslegung	81
6.1	Numerische Methode	81
6.2	Auslegung im Bemessungspunkt	82
6.2.1	Auslegung der Wicklungen	82
6.2.2	Windungszahl	85
6.2.3	Verschaltung der Wicklungen	86
6.2.4	Aufbau von reduzierten Maschinenschnitten	89
6.2.5	Nutfüllfaktor	91
6.2.6	Dimensionierung der Nuten	92
6.2.7	Bemessungsstrom	93
6.2.8	Nutschlitzbreite	94
6.2.9	Polbedeckungsfaktor und Magnethöhe	98
6.2.10	Luftpaltbreite	99
6.2.11	Bohrungsdurchmesser	100
6.2.12	Bewertung der Nuten- / Polzahlkombinationen	102
6.2.13	Parallelfankige Nuten	108
6.3	Berechnung des Kurzschlussstroms	111
6.4	Feldschwächung	113
6.4.1	Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie	114
6.4.2	Erhöhung der Drehzahlspitzung	115
6.5	Ergebnisse	123
6.5.1	Finale Geometrien der ausgelegten Maschinen	123
6.5.2	Dreiphasiger Stoßkurzschluss	126
6.5.3	Wirkungsgradkennfelder	126
6.5.4	Energieverbrauch	128
6.5.5	Überprüfung der Entmagnetisierungsfestigkeit	134
7	Zusammenfassung und Ausblick	137
7.1	Zusammenfassung	137
7.2	Ausblick	140

A Anhang	141
A.1 Fahrzyklen	141
A.2 Maschinengeometrien	142
A.3 Wirkungsgrad- und Verlustkennfelder	147
A.4 Verwendetes Magnetmaterial	152
Abbildungsverzeichnis	153
Tabellensverzeichnis	158
Abkürzungen und Formelzeichen	160
Literaturverzeichnis	169