

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Kurzfassung	iii
Abstract	iv
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik mehrphasiger Antriebe	4
2.1 Definition und Strukturierung von Mehrphasensystemen	4
2.2 Argumente für den Einsatz von Mehrphasensystemen und höheren Strangzahlen	7
2.2.1 Elektrische Maschine	7
2.2.2 Wechselrichter und System	9
3 Modellbildung mehrphasiger permanentmagneterregter Synchronmaschinen	13
3.1 Permanentmagneterregte Synchronmaschinen im elektrifizierten Antriebsstrang	13
3.2 Modellbildung dreisträngiger PMSM	14
3.3 Erweiterung der Modellbildung für höhere Strangzahlen	17
3.3.1 Modellierung mit Vector Space Decomposition	17
3.3.2 Modellierung als eigenständige Teilsysteme	22
3.4 Modelle und Strategien für den Betrieb mehrsträngiger PMSM	25
4 Systematische Analyse mehrphasiger permanentmagneterregter Synchronmaschinen	29
4.1 Zielstellung und Vorgehen	29
4.2 Gesetzmäßigkeiten mehrsträngiger Wicklungen	30
4.2.1 Mehrsträngige Ganzlochwicklungen	31
4.2.2 Mehrsträngige Zahnspulenwicklungen	36
4.2.3 Bewertung mehrsträngiger Wicklungen	39
4.3 Ableiten eines Untersuchungsansatzes	43
4.3.1 Vorüberlegungen	44
4.3.2 Begründen des Ansatzes	45
4.3.3 Definition von Untersuchungsvarianten	46
4.4 Einfluss der Strangzahl auf Maschinenparameter	48
4.4.1 Strangwiderstand	49
4.4.2 Selbstinduktivität	50
4.4.3 Koppelinduktivitäten	57
4.4.4 Parameternachweis durch Messung ohne Rotor	61
4.5 Einfluss der Strangzahl auf Betriebseigenschaften	64
4.5.1 Induzierte Spannungen im Leerlauf	65

4.5.2	Mittlere Drehmomente und Drehmomentwelligkeit	67
4.5.3	Verlustbetrachtungen	72
4.6	Zusammenfassung und Bewertung der Analyseergebnisse	77
5	Erweiterung der Analyse um Systembetrachtungen	80
5.1	Erhöhte Systemkomplexität aufgrund der Mehrphasigkeit	81
5.2	Bewertung mehrphasiger Ansteuerverfahren	82
5.2.1	Raumzeigermodulation mit maximaler Spannungsausnutzung	83
5.2.2	Raumzeigermodulation mit minimaler Spannungsverzerrung	86
5.3	Stromwelligkeit unter Berücksichtigung von induktiven Strangverkopplungen	89
5.3.1	Stromwelligkeit bei dreiphasiger Raumzeigermodulation	89
5.3.2	Stromwelligkeit bei mehrphasiger Raumzeigermodulation	94
5.4	Belastung des Zwischenkreiskondensators	98
5.4.1	Wechselstrombelastung	98
5.4.2	Spannungswelligkeit	103
5.5	Zusammenfassung und Bewertung der Systembetrachtungen	107
6	Begründete Wahl einer Strangzahl und Entwurf einer Versuchsmaschine	109
6.1	Gesamtheitliche Bewertung und Wahl einer geeigneten Strangzahl	109
6.2	Entwurf einer mehrsträngigen Versuchsmaschine	113
6.2.1	Prämissen und Spezifikation	113
6.2.2	Elektromagnetische Modellbildung	114
6.2.3	Vector Space Decomposition für mehrere Teilsysteme	116
6.3	Simulativer Vergleich zwischen drei- und neunsträngiger Wicklungsausführung	118
6.3.1	Drehzahl-Drehmoment- und Drehzahl-Leistungs-Kennlinien	118
6.3.2	Drehmomentwelligkeit bei Sinusstromspeisung	119
6.3.3	Maschinenverluste bei Sinusstrom- und bei Wechselrichterspeisung	120
7	Experimentelle Analyse und Validierung an mehrphasiger Versuchsmaschine	129
7.1	Umsetzung am Antriebsprüfstand	129
7.2	Messungen zur Bestimmung von Maschinenparametern	130
7.2.1	Permanentmagnetflussverkettung	131
7.2.2	Strangwiderstände und -induktivitäten	132
7.2.3	Längsinduktivität mittels Kurzschlussversuch	135
7.3	Messungen im geregelten Betrieb	136
7.3.1	Reduktion von Stromüberschwingungen bei neunphasigem Betrieb	136
7.3.2	Nachweis von Stromwelligkeiten bei induktiven Strangverkopplungen	141
7.3.3	Anmerkung zum Zwischenkreiswechselstrom	149
8	Zusammenfassung und Ausblick	152
Anhang A: Bestimmung des Wickelkopfwiderstands		I
Anhang B: Datenblattangaben zu eingesetzten Materialien		IV
Abbildungsverzeichnis		VI

Tabellenverzeichnis	XII
Abkürzungsverzeichnis	XV
Symbol- und Formelzeichenverzeichnis	XVI
Literaturverzeichnis	XXIV