

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Kurzfassung	vii
Abstract	ix
Formelzeichenkonvention	xi
Formelzeichen	xiii
Abkürzungsverzeichnis	xix
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung der Arbeit	2
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Stand der Technik	5
2.1 Stromverdrängung Allgemein	5
2.2 Stromverdrängung in elektrischen Traktionsantrieben	8
3 Allgemeine Grundlagen	13
3.1 Permanenterregte elektrische Traktionsantriebe	14
3.2 Verlustmechanismen	17
3.2.1 Mechanische Verluste	18
3.2.2 Elektromagnetische Verluste	19
3.3 Physikalische Grundlagen der Stromverdrängung	21
3.3.1 Skin-Effekt	23
3.3.2 Proximity-Effekt	30
3.3.3 Stromverdrängungsfaktor k_{ih}	36
3.4 Induktive Kopplung von Teilleitern	38
3.4.1 Magnetfelder ebener Leiteranordnungen	38
3.4.2 Magnetisches Vektorpotential von Linienleiteranordnungen	40
3.4.3 Magnetische Energie und Induktivität	42
3.5 Randwertproblem und Green'sche Funktion	44
3.6 Bestimmung der Induktivitäten	49
4 Gekoppeltes Verfahren zur Lösung des Stromverdrängungsproblems	53
4.1 PEEC-Methode angewendet auf einen rechteckförmigen Leiter	53

4.2	Entwicklung der PEEC-Formulierung	55
4.3	Berechnung der auftretenden Verluste in einem einzelnen Leiter	57
4.4	Berechnung der auftretenden Verluste in einer Mehrleiteranordnung	59
4.5	Ermittlung der magnetischen Kopplung zwischen den Teilleitern	61
4.6	Eigenschaften der Systemmatrizen	63
4.6.1	Widerstandsmatrix \mathbf{R}	63
4.6.2	Induktivitätsmatrix \mathbf{L}	64
4.7	Berücksichtigung benachbarter ferromagnetischer Körper	65
4.7.1	Feldtheoretischer Hintergrund	65
4.7.2	Anwendung auf diskrete Gebiete und Kopplung zur PEEC-Methode .	66
4.8	Berücksichtigung der Bewegung	71
4.8.1	Virtuelle Netzgenerierung und Umrechnung der Quellengrößen . . .	73
4.8.2	Transformation der Magnetisierung auf das statische Netz	74
4.9	Berücksichtigung von Symmetrien	76
4.9.1	Spiegel- und Rotationssymmetrie	79
4.9.2	Ferromagnetische Materialien	85
4.9.3	Singularität	88
4.10	Übersicht über das vorgestellte Verfahren	91
4.11	Konvergenzverhalten	94
4.11.1	Effektive Stromdichte	97
4.11.2	Verluste	97
4.11.3	Konvergenzordnung	99
4.12	Einfluss des Gebietsrandradius R_Ω	100
4.12.1	Einfluss auf Selbst- und Gegeninduktivität	101
4.12.2	Einfluss auf Stromdichte	102
4.12.3	Einfluss der relativen Lage der Leiter im Bezug zum Gebietsrand R_Ω	104
4.12.4	Ferromagnetisches Material	105
4.13	Zusammenfassung der Modellierungsanforderungen	107
5	Beschreibung des Berechnungsprogrammes ELMO	109
5.1	Allgemeine Programmstruktur	109
5.2	Besonderheiten für Einzel- und Mehrleitersysteme	111
5.3	Besonderheiten für ferromagnetische Körper	116
5.4	Besonderheiten für bewegte ferromagnetische Körper	119
6	Beispiele und Anwendungen	123
6.1	Einzelleiter	124
6.1.1	Verwendetes Modell	124
6.1.2	Vergleich mit Referenzlösung	125
6.2	Doppelleitung	126
6.2.1	Verwendetes Modell	127
6.2.2	Vergleich mit Referenzlösung	128
6.3	Einfacher Stator mit drei Strängen	131
6.3.1	Verwendetes Modell	131
6.3.2	Vergleich mit Referenzlösung	133

6.4	Permanenterregte Synchronmaschine zur Anwendung als Traktionsantrieb	134
6.4.1	Verwendetes Modell	135
6.4.2	Vergleich mit Referenzlösung	140
6.4.3	Validierung mit gemessenen Ergebnissen	142
6.4.4	Einfluss des Rotorfeldes auf die Stromverdrängung	145
7	Zusammenfassung und Ausblick	149
 Anhang		
A	Quasistationäre Betrachtung elektromagnetischer Felder	153
B	Eichung elektromagnetischer Potentiale	155
C	Fundamentallösung des Laplace-Operators im zweidimensionalen Raum	159
D	Dirichlet'sches Randwertproblem am Einheitskreis	163
E	Einfachmodell des Traktionsantriebes	165
E.1	Inhomogene Stromdichteverteilungen	166
E.2	Magnetisierungsströme	166
 Literaturverzeichnis		
 Lebenslauf		
 Publikationsliste		