



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Analytische Modelle zur Berücksichtigung von Nutungseffekten	3
2.1	Beschreibung der Nutung durch Sub-Domänen	5
2.1.1	Lösung der Felddifferentialgleichung für Nutbereich	5
2.2	Beschreibung der Nutung durch Kantenstromdichten	9
2.2.1	Ermittlung der Kantenstromdichte beim Übergang von Luft nach Eisen . .	9
2.2.2	Lösung der Felddifferentialgleichung	13
2.3	Berechnungsbeispiel	16
3	Wirbelstromverluste in Magneten von permanentmagneterregten Synchronmaschinen	21
3.1	Geometrie und Voraussetzungen	24
3.2	Integraltransformationen zur Berücksichtigung endlicher Abmessungen	26
3.3	Analytisches Modell mit 1D-Flussdichte- und 2D-E-Feldverteilung	31
3.3.1	Bestimmung des Vektorpotentials für E-Feld	32
3.3.2	Bestimmung der Verlustleistung	37
3.4	Analytisches Modell mit 2D-Flussdichte- und 1D-E-Feldverteilung	38
3.4.1	Ansatz für Vektorpotential	38
3.4.2	Anpassung der Konstanten an Randbedingungen	44
3.4.3	Bestimmung der Verlustleistung	48
3.5	Analytisches Modell mit 2D-Flussdichte- und 2D-E-Feldverteilung	49
3.5.1	Ansatz für das elektrische Feld eines Magnetsegments	51
3.5.2	Bestimmung der induzierten Wirbelstromdichte	53
3.5.3	Differentialgleichungssystem für magnetisches Vektorpotential	55
3.5.4	Bestimmung der Verlustleistung	56
3.6	Analytisches Modell mit 3D-Flussdichte- und 2D-E-Feldverteilung ohne Berücksichtigung der z -Abhängigkeit in der Systemmatrix	57
3.6.1	Ansatz für das elektrische Feld eines Magnetsegments	57
3.6.2	Bestimmung der induzierten Wirbelstromdichte	59
3.6.3	Differentialgleichungssystem für magnetisches Vektorpotential	61
3.6.4	Wahl der anregenden Stromdichten und Anpassung der Konstanten an Randbedingungen	65
3.6.5	Bestimmung der Verlustleistung	66
3.7	Analytisches Modell mit 3D-Flussdichte und 2D-E-Feldverteilung mit Berücksichtigung der z -Abhängigkeit in der Systemmatrix	67
3.7.1	Ansatz für das elektrische Feld eines Magnetsegments	67
3.7.2	Bestimmung der induzierten Wirbelstromdichte	70
3.7.3	Differentialgleichungssystem für magnetisches Vektorpotential	72



3.7.4	Anpassung der Konstanten an Randbedingungen	75
3.7.5	Bestimmung der Verlustleistung	76
3.8	Charakteristik der Wirbelstromverluste im Magneten unter verschiedenen Randbedingungen	76
3.8.1	Einfluss der Nutung auf das Flussdichtespektrum	86
3.9	Vergleich der Rechenmodelle	89
3.10	Verifikation durch Messung	99
4	Abschirmung von hochpermeablem Material gegen äußere Felder	103
4.1	Grundlegende Untersuchung des Schirmungsproblems	104
4.1.1	Einfluss der Schirmdicke	108
4.1.2	Einfluss der Materialparameter des Schirms	112
4.1.3	Einfluss der Materialparameter der Reaktionsplatte	113
4.2	Hybridschirm	114
4.3	Analytisches 3D-Modell des Schirmungsproblems	116
4.3.1	Voraussetzungen und Vereinfachungen	117
4.3.2	Feldansatz für Luftbereiche	119
4.3.3	Feldansatz für Statorbereich	121
4.3.3.1	Ermittlung von Kantenstromdichten beim Übergang von Luft nach Eisen	122
4.3.3.2	Aufstellen des Differentialgleichungssystems (Statorbereich)	123
4.3.4	Feldansatz für Schirm- und Reaktionsplatte	126
4.3.4.1	Vektorpotential für elektrisches Feld	126
4.3.4.2	Vektorpotential für magnetische Flussdichte	128
4.3.4.3	Bestimmung der induzierenden Flussdichten	128
4.3.4.4	Bestimmung der induzierten Stromdichte	129
4.3.4.5	Aufstellen des Differentialgleichungssystems	130
4.3.4.6	Lösung des Differentialgleichungssystems	135
4.3.4.7	Bestimmung von magnetischen Flussdichten und elektrischen Feldstärken	136
4.3.5	Anpassen der Konstanten an Randbedingungen	137
4.3.5.1	Übergangsbedingung zwischen Regionen mit veränderlicher Permeabilität	137
4.3.5.2	Aufstellen des Gleichungssystems	139
4.4	Abgewickeltes Modell mit 2D-E-Feld	141
4.4.1	Voraussetzungen und Vereinfachungen	141
4.4.2	Feldansatz für Luftbereich	141
4.4.3	Feldansatz für Abschirmplatte	143
4.4.3.1	Induziertes elektrisches Feld	143
4.4.3.2	Differentialgleichungssystem für magnetisches Vektorpotential	145
4.4.4	Feldansatz für Eisenbereich	148
4.4.5	Rand- und Übergangsbedingungen	150



4.5	Schichtenmodell für Schirmungsproblem	151
4.5.1	Voraussetzungen und Vereinfachungen	151
4.5.2	Strombelagsansatz für Schirmschicht	151
4.5.3	Feldansatz für Luftbereich	152
4.5.4	Feldansatz für Eisenbereich	153
4.5.5	Aufstellen der Rand- und Übergangsbedingungen	153
4.6	Vergleich der analytischen Verfahren mit FEM-Berechnungen	155
5	Oberflächenverfahren	165
5.1	Beschreibung des Verfahrens	167
5.1.1	Abbildung des leitfähigen Gebiets durch Netzwerkmodell	167
5.1.2	Ersetzen des leitfähigen Eisens durch 2-Schicht-Modell	173
5.1.3	Numerische Lösung des Differentialgleichungssystems	174
5.1.4	Implementierung in FEM-Programm	175
5.2	Berechnungsbeispiel	175
6	Zusammenfassung und Ausblick	181
	Symbole und Abkürzungen	183
	Abbildungsverzeichnis	191
	Tabellenverzeichnis	194
	Literaturverzeichnis	196