

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                                                                                        |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                                                                                                      | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Analytische Modelle zur Berücksichtigung von Nutzungseffekten</b>                                                                   | <b>3</b>  |
| 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        |
| <b>3</b> | <b>Wirbelstromverluste in Magneten von permanentmagneterregten Synchronma-</b>                                                         |           |
|          | <b>schinen</b>                                                                                                                         | <b>21</b> |
| 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         |
| <b>4</b> | <b>Abschirmung von hochpermeablem Material gegen äußere Felder</b>                     | <b>103</b> |
| 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      | Abgewinkeltes 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        |
| <b>5</b> | <b>Oberflächenverfahren</b>                               | <b>165</b> |
| 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        |
| <b>6</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                       | <b>181</b> |
|          | <b>Symbole und Abkürzungen</b>                            | <b>183</b> |
|          | <b>Abbildungsverzeichnis</b>                              | <b>191</b> |
|          | <b>Tabellenverzeichnis</b>                                | <b>194</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>                               | <b>196</b> |