

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Symbolverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung	1
1.2 Gliederung der Arbeit	4
2 Rechnergestützter Entwurf und automatisierte Optimierung	6
2.1 Stand der Technik	6
2.1 Darstellung des Gesamtsystems	9
3 Anforderungen an induktive Bauelemente und ihre Klassifikation	11
3.1 Transformatoren	12
3.1.1 Elektrische Klassifikation und Abgrenzung	12
3.1.2 Elektrische Anforderungen	12
3.1.3 Mechanische Klassifikation	14
3.2 Spulen	15
3.2.1 Elektrische Klassifikation und Abgrenzung	15
3.2.2 Elektrische Anforderungen	18
3.2.3 Mechanische Klassifikation	18
3.3 Mechanische Anforderungen	18
4 Eigenschaften des magnetischen Kreises	19
4.1 Magnetischer Leitwert des Kernes	19
4.1.1 Berechnung der Formfaktoren in den Kernsegmenten	21
4.1.2 Fazit und Anmerkungen zur Berechnung der geometrischen Größen	26
4.2 Magnetischer Leitwert von Luftspalten	26
4.2.1 Methoden zur Berechnung des magnetischen Leitwertes von Luftspalten	26
4.2.2 Berechnung des Leitwertbelages durch konforme Abbildungen	28
4.2.3 Magnetischer Leitwert eines Luftspaltes mit rechteckiger Querschnittsfläche	35
4.2.4 Magnetischer Leitwert eines Luftspaltes mit runder Querschnittsfläche	39
4.3 Ermittlung der magnetischen Flußdichteverläufe	41
4.4 Temperaturabhängigkeit der Sättigungsflußdichte	42
4.5 Berechnung der Kernverlustleistung	43
4.5.1 Approximation von Herstellerkennlinien ohne Vormagnetisierung	43
4.5.2 Approximation von Messungen mit Vormagnetisierung	46
4.5.3 Kernverluste bei nicht-sinusförmiger Ummagnetisierung	49

4.5.3.1	Ein Ummagnetisierungszyklus pro Grundswingungsperiode	49
4.5.3.2	Mehrere Ummagnetisierungszyklen pro Grundswingungsperiode	50

5	Wicklungsverluste und Klemmenverhalten	52
5.1	Impedanzmatrix und Lagenverschaltung	52
5.2	Berechnung der Impedanzmatrixelemente von Mehrwicklungstransformatoren	56
5.2.1	Auswahl eines Feldberechnungsverfahrens, Stand der Technik	56
5.2.2	Ergebnisse der eindimensionalen Feldberechnung für Folienleiter	60
5.2.2.1	Näherungen und Annahmen	60
5.2.2.2	Scheinleistungsanteil der Leiterlagen und Stromverdrängungsfaktoren	62
5.2.2.3	Konsequenzen der Leitfähigkeitsmodifikation	65
5.2.2.4	Verallgemeinerung auf Lagen mit mehr als einer Windung	67
5.2.2.5	Anteil der Leiterlagen an den Elementen der Impedanzmatrix	67
5.2.3	Modifikationen für Lagen aus Runddraht	68
5.2.3.1	Innerer Skin-Effekt im freien, stromdurchflossenen Runddraht	69
5.2.3.2	Induzierter Skin-Effekt im freien, stromlosen Runddraht	70
5.2.4	Modifikationen für Lagen aus Hochfrequenzlitze	72
5.2.5	Anteile der Isolationslagen an der Scheinleistung	77
5.2.6	FEM-Parameterstudien zur Berücksichtigung von Randeffekten	77
5.2.6.1	Widerstandserhöhung durch das radiale Streufeld in Folienlagen	77
5.2.6.2	Erhöhung der Streuung durch Randeffekte	79
5.2.7	Anteile des magnetischen Kreises an der Scheinleistung	80
5.2.8	Gesamtscheinleistung und Impedanzmatrix	80
5.2.9	Berechnung der Wicklungsverluste von Transformatoren	81
5.3	Berechnung der Wicklungsverluste von Spulen	82
5.3.1	Vorbetrachtungen, Stand der Technik	82
5.3.2	Verlustleistungsberechnung mit eindimensionalem Feldansatz	84
5.3.3	Induzierte Wirbelstromverluste durch Feldaufweitung	86
5.3.3.1	Wirbelstromverluste in Runddrahtwicklungen	87
5.3.3.1.1	Das statische Feld innerhalb des Wickelfensters	87
5.3.3.1.2	Bestimmung der Oberflächenfeldstärken	91
5.3.3.1.3	Lösung der Skin-Gleichung in Rundleitern	91
5.3.3.1.4	Berechnung der Verluste	93
5.3.3.2	Wicklungsverluste in HF-Litzenwicklungen	94
5.3.3.3	Wicklungsverluste in Folienwicklungen	94
5.3.3.3.1	Vorbetrachtungen	94
5.3.3.3.2	Lösung des Feldproblems für Massivleitermodell	98
5.3.3.3.3	Berechnung der Verluste	100
5.4	Bestimmung von Ersatzzeigen- und Koppelkapazitäten	102
5.4.1	Eigenkapazität von Spulen	102
5.4.1.1	Eigenkapazität durch „innere elektrische Energie“	103
5.4.2	Koppelkapazitäten eines Transformators	105
5.4.3	Umrechnung der Koppelkapazitäten in Klemmenkapazitäten	106
5.5	Schaltungsmodelle von Spulen und Transformatoren	107
5.5.1	Vorbetrachtungen, Stand der Technik	107
5.5.2	Spulen: Approximation von Impedanzverläufen	108

5.5.3	Transformatoren	110
6	Thermisches Modell	114
6.1	Stand der Technik, Vorbetrachtungen	114
6.2	Thermisches Modell mit zwei Temperaturknoten	116
6.2.1	Anteile der Wärmeleitung an den Ersatzwiderständen	117
6.2.2	Anteile der Wärmestrahlung an den Ersatzwiderständen	118
6.2.3	Anteile der freien und erzwungenen Konvektion an den Ersatzwiderständen	118
6.2.4	Bestimmung der Temperaturschwankung in der Wicklung	121
6.2.4.1	Wärmeübergangswiderstände zwischen den Lagen	122
7	Prüfung des Berechnungsmodells	128
7.1	Transformatoren	128
7.1.1	Transformator mit Runddrahtwicklungen	128
7.1.2	Transformator mit Litzwicklungen	130
7.1.3	Transformator mit Folienwicklungen	131
7.1.4	Transformator mit Folien- und Runddrahtwicklung	132
7.2	Spulen	134
7.2.1	Spulen mit Runddrahtwicklung	134
7.2.2	Spulen mit Folienwicklung	135
7.2.3	Spulen mit Litzwicklung	136
7.3	Abhängigkeit der Belastungsgrößen von parasitären Eigenschaften	138
7.3.1	Vorbetrachtungen	138
7.3.2	Exemplarische Untersuchung	139
7.4	Schlußfolgerungen	144
8	Formulierung der Optimeraufgabe	145
8.1	Der Parametervektor	145
8.2	Formulierung der Nebenbedingungen	146
8.2.1	Physikalische Nebenbedingungen	146
8.2.2	Geometrische Nebenbedingungen	147
8.2.3	Definitionsbereiche der Parameter	147
8.3	Formulierung der Zielfunktionen	148
8.3.1	Elementare Zielfunktion	148
8.3.2	Iterationen innerhalb der Zielfunktion	148
8.3.3	Klassifikation der Optimierungsaufgabe	151
9	Voroptimierung und Startwerte	152
9.1	Definition des Flächenproduktes	152
9.2	Voroptimierung von Transformatoren	154
9.2.1	Ermittlung des optimalen Flächenproduktes	154
9.2.2	Berechnung der Startwerte	160
9.2.2.1	Abmessungen des Kernes	160
9.2.2.1.1	Verfügbare Kerne	160
9.2.2.1.2	Nicht verfügbare Kerne	161
9.2.2.2	Parameter der Wicklung	161

9.3	Voroptimierung von Spulen	162
9.3.1	Ermittlung des optimalen Flächenproduktes	162
9.3.2	Berechnung der Startwerte	166
9.3.2.1	Abmessungen des Kernes	166
9.3.2.2	Parameter der Wicklung	166
9.4	Vorauswahl eines Kerntyps	167
10	Optimieralgorithmen	169
10.1	Stand der Technik, Vorbemerkungen	169
10.2	Algorithmenauswahl	169
10.2.1	Lokal optimierende Algorithmen	169
10.2.2	Global optimierende Algorithmen	169
10.2.3	Multimodale, stetige Funktion	170
10.2.4	Multimodale, unstetige Funktion	171
11	Anwendung der Methode in Fallstudien	173
11.1	Optimierung eines Transformators	174
11.2	Optimierung einer Resonanzspule	181
11.3	Automatisierte Optimierung einer Filterspule	183
12	Zusammenfassung	185
13	Literaturverzeichnis	187
14	Anhang	195
14.1	Kelvin-Funktionen	195
14.2	Lösung der Skin-Gleichung für Folienleiter in einer röhrenförmigen Wicklung	196
14.3	Anteil der Leiterlagen an Impedanzmatrix	199
14.4	Berechnung der Kernkenngrößen unterschiedlicher Kernbauformen	203
14.4.1	U-Kern	203
14.4.2	UR-Kerne	205
14.4.3	E-Kern	206
14.4.4	ETD-Kern	207
14.4.5	EC-Kern	208
14.4.6	P-Kerne	210
14.4.7	PM-Kern	212
14.4.8	PQ-Kern	215
14.4.9	RM-Kern	217