

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlegende Zusammenhänge	1
1.1	Das Durchflutungsgesetz	1
1.2	Die Flussdichten	3
1.3	Die Feldgleichung für das magnetische Vektorpotential	4
1.4	Felder unterschiedlicher Leiteranordnungen	5
1.4.1	Der unendlich lange Linienleiter	5
1.4.2	Die räumliche Stromdichteverteilung	6
1.4.3	Die dünne Leiterschleife	7
1.5	Das Faradaysche Induktionsgesetz	8
1.6	Das Durchflutungsgesetz bei zeitabhängigen Vorgängen	9
1.7	Die Maxwellschen Gleichungen	10
1.8	Die Skingleichung	10
1.9	Die Rechnung mit komplexen Amplituden	13
1.10	Der Poyntingsche Vektor	14
	Literatur	17
2	Die Induktivität von Luftspulen	19
2.1	Die Selbstinduktivität einer Leiterschleife	19
2.2	Die Gegeninduktivitäten im System mehrerer Leiterschleifen	20
2.3	Die Induktivität von Spulen	22
2.4	Der Sonderfall dünner Leiterschleifen	23
2.4.1	Die Selbstinduktivität einer dünnen Leiterschleife	23
2.4.2	Die Gegeninduktivität dünner Leiterschleifen	25
2.4.3	Die Induktivitätsmatrix	26
2.5	Drahtgewickelte Spulen	28
2.5.1	Kreisförmige Leiterschleifen	28
2.5.2	Rechteckförmige Leiterschleifen	31
2.5.3	Auswertungen	33
2.6	Planare Spulen	37

2.7	Folienspulen	37
2.7.1	Die kreisförmige Folienspule	38
2.7.2	Die rechteckförmige Folienspule	40
2.7.3	Alternative Berechnung der Selbstinduktivität	41
2.7.4	Auswertungen	42
3	Die Kapazität von Luftspulen	45
3.1	Drahtgewickelte Spulen	46
3.1.1	Auswertungen	56
3.1.2	Parallel geschaltete Drähte	58
3.1.3	Gleichmäßige Windungsverteilung in der obersten Lage	58
3.1.4	Ein alternatives Wickelschema	59
3.1.5	Wicklungen mit Litzen	61
3.1.6	Mehrkammerwicklungen	62
3.2	Folienspulen	63
3.3	Der Einfluss eines rechteckigen Wickelkörpers	65
3.4	Möglichkeiten zur Reduzierung der Wicklungskapazität	67
	Literatur	68
4	Die Verluste in Luftspulen	71
4.1	Rms- und Skinverluste in drahtgewickelten Spulen	72
4.1.1	Zeitlich konstanter Strom	72
4.1.2	Sinusförmiger Strom	72
4.1.3	Zeitlich periodischer nichtsinusförmiger Strom	78
4.2	Proximityverluste in drahtgewickelten Spulen	79
4.2.1	Runddraht im homogenen externen Magnetfeld	81
4.2.2	Runddraht im inhomogenen externen Magnetfeld	86
4.2.3	Rückwirkung der Proximityströme auf das externe Magnetfeld	90
4.3	Auswertungen	96
4.4	Die Verwendung von HF-Litzen	101
4.4.1	Die Charakterisierung von HF-Litzen	101
4.4.2	Hochfrequenzverluste in idealen HF-Litzen	103
4.4.3	Hochfrequenzverluste in realen HF-Litzen	109
4.4.4	Die Qualitätsparameter von HF-Litzen	111
4.4.5	Auswertungen	112
4.5	Die Parallelschaltung von Drähten	115
4.6	Folienwicklungen	120
4.6.1	Die eindimensionale Verlustberechnung	121
4.6.2	Die zweidimensionale Verlustberechnung	134
4.7	Möglichkeiten zur Reduzierung der Wicklungsverluste	137
	Literatur	140

5	Kerne	143
5.1	Grundlegende Zusammenhänge	143
5.2	Die effektiven Kernparameter und der A_L -Wert	148
5.3	Ferritmaterialien	152
5.3.1	Die Permeabilität	153
5.3.2	Analytische Beschreibung der Amplitudenpermeabilität	156
5.3.3	Die Sättigung	158
5.3.4	Die Leitfähigkeit des Ferritmaterials	160
5.4	Alternative Materialien	160
5.4.1	Metallpulverkerne	161
5.4.2	Ringbandkerne	162
5.4.3	Vergleich zwischen Ferrit und alternativen Materialien	163
5.5	Die Energiespeicherung	164
	Literatur	166
6	Der Einfluss des Kerns auf die Induktivität	167
6.1	Der Ringkern mit Luftspalt	167
6.2	Allgemeine Betrachtungen zum Luftspalt	170
6.3	Die Reluktanz von großen Luftspalten	176
6.4	Die Flussverdrängung im Kernquerschnitt	179
6.5	Der Einfluss der nichtlinearen Materialeigenschaften	185
	Literatur	189
7	Der Einfluss des Kerns auf die Kapazität	191
7.1	Die Berechnung der Ersatzoberfläche	192
7.2	Die Berechnung der elektrischen Energie	192
7.2.1	Der Bereich zwischen Wicklung und Mittelschenkel	193
7.2.2	Der Bereich zwischen Wicklung und Außenschenkel	195
7.2.3	Der Bereich zwischen Wicklung und unterem bzw. oberem Schenkel	195
7.2.4	Das Potential des Kerns	197
7.3	Die zusätzliche Kapazität	198
7.4	Auswertungen	198
	Literatur	200
8	Die Kernverluste	201
8.1	Die spezifischen Kernverluste bei sinusförmiger Aussteuerung	205
8.2	Der Einfluss der Kerngröße auf die spezifischen Kernverluste	209
8.3	Das Prinzip der „äquivalenten Frequenz“	210
8.3.1	Die modifizierte Steinmetz-Gleichung „MSE“	211
8.3.2	Eine alternative Methode „iGSE“	220
8.3.3	Ein Vergleich der beiden Methoden MSE und iGSE	221

8.4	Die Berechnung der spezifischen Kernverluste mithilfe der Fourier-Entwicklung	224
8.5	Der Einfluss einer Gleichfeldvormagnetisierung	228
8.6	Die Wirbelstromverluste im Kern	229
8.6.1	Die Wirbelstromverluste bei kreisförmigem Schenkelquerschnitt	231
8.6.2	Die Wirbelstromverluste bei rechteckförmigem Schenkelquerschnitt	232
8.6.3	Die Wirbelstromverluste bei komplizierteren Kerngeometrien	233
8.6.4	Der Einfluss der Stromform auf die Wirbelstromverluste	234
8.7	Auswertungen zu den Verlustmechanismen	235
8.8	Schnittbandkerne	237
8.9	Möglichkeiten zur Reduzierung der Kernverluste	238
	Literatur	239
9	Der Einfluss des Kerns auf die Wicklungsverluste	241
9.1	Die Berechnung der Feldverteilung im Wickelfenster	242
9.1.1	Das Feld der Luftspule	243
9.1.2	Das Luftspaltfeld	243
9.1.3	Die Feldbeeinflussung durch den Kern	246
9.2	Der Einfluss von Kern und Luftspalt auf die Proximityverluste	250
9.2.1	Die Ausdehnung der Lagenbreite bis zum Kern	250
9.2.2	Luftspalt im Innen- bzw. Außschenkel	252
9.2.3	Die Aufteilung des Gesamluftspalts in mehrere Einzelluftspalte	252
9.2.4	Der Einfluss der Luftspaltbreite	253
9.3	Der Einfluss der Windungspositionen	253
9.4	Optimierungsmöglichkeiten bei Folienwicklungen	257
9.5	Stabkernspulen	258
9.6	Möglichkeiten zur Reduzierung der Wicklungsverluste	260
	Literatur	261
10	Transformatoren	263
10.1	Der Zweiwicklungstransformator	263
10.2	Die Koppelfaktoren	265
10.3	Vereinfachte Ersatzschaltbilder	268
10.4	Der Dreiwicklungstransformator	271
10.5	Die messtechnische Bestimmung der Netzwerkparameter	272
10.6	Die Berechnung der Streuinduktivitäten	274
10.7	Auswertungen	277
10.8	Möglichkeiten zur Minimierung der Streuinduktivitäten	284

10.9	Die Aussteuerung des Kernmaterials	286
10.9.1	Der Magnetisierungsstrom und die Kernverluste	286
10.9.2	Die Sättigungsproblematik	289
10.10	Die Wicklungsverluste im Transformator	289
10.10.1	Der klassische Transformatorbetrieb	290
10.10.2	Der Betrieb als gekoppelte Spulen	293
10.10.3	Folienwicklungen	297
10.10.4	Elektrostatische Abschirmungen	298
10.10.5	Fragen zur Konvergenz bei der Berechnung der Wicklungsverluste	299
10.11	Möglichkeiten zur Reduzierung der Wicklungsverluste	301
	Literatur	303
11	Erweiterte Ersatzschaltbilder	305
11.1	Das Spulenersatzschaltbild	307
11.1.1	Die Standardlösung	307
11.1.2	Der Impedanzverlauf im Bereich höherer Frequenzen	308
11.2	Die Berücksichtigung nichtlinearer Abhängigkeiten	310
11.2.1	Die Frequenzabhängigkeit	310
11.2.2	Die Stromabhängigkeit	311
11.2.3	Die Temperaturabhängigkeit	311
11.3	Induktives Ersatzschaltbild für einen Transformator mit mehreren Wicklungen	312
11.4	Kapazitives Transformatorersatzschaltbild	316
11.5	Das Widerstandersatzschaltbild	326
11.5.1	Die Standardlösung	327
11.5.2	Ein erweiterter Ansatz	328
11.6	Thermisches Ersatzschaltbild	331
11.6.1	Die Notwendigkeit einer thermischen Analyse	331
11.6.2	Die Wärmeübertragung	332
11.6.3	Das verwendete Ersatzschaltbild	334
11.6.4	Die thermischen Widerstände der Standardkerne	336
11.6.5	Die thermische Iterationsschleife	338
11.6.6	Möglichkeiten zur Reduzierung der Temperatur in Kern und Wicklung	341
	Literatur	343
12	EMV-Aspekte bei induktiven Komponenten	345
12.1	Die Funkstörspannungen	345
12.1.1	Gleichtakt- und Gegentaktstörungen	346
12.1.2	Die getrennte Messung der Gleichtakt- und Gegentaktstörungen	347

12.1.3	Die Beeinflussung der dm-Störpegel durch die induktive Komponente	349
12.1.4	Die Beeinflussung der cm-Störpegel durch die induktive Komponente	350
12.2	Möglichkeiten zur Reduzierung der cm-Störpegel	351
12.2.1	Das Wicklungslayout im Transformator	352
12.2.2	Schirmungsmaßnahmen im Transformator	355
12.3	Induktive Bauteile als Filterkomponenten	357
12.3.1	Filterspulen zur Reduzierung der Gegentaktströme	358
12.3.2	Filterspulen zur Reduzierung der Gleichtaktströme	360
12.3.3	Bemerkungen zum internen Aufbau eines Filters	364
12.4	Das von induktiven Komponenten erzeugte Magnetfeld	365
12.4.1	Das von Luftspulen erzeugte Magnetfeld	365
12.4.2	Der Einfluss des Ferritkerns auf das äußere Magnetfeld	375
12.4.3	Der Einfluss von Ferritkern und Luftspalt auf das äußere Magnetfeld	381
12.4.4	Wirbelstromschirmung	383
12.4.5	Möglichkeiten zur Reduzierung des Außenfelds	383
	Literatur	385
13	Strategische Vorgehensweise bei der Auslegung	387
13.1	Der Designprozess beginnt bei der Schaltung	387
13.2	In 10 Schritten zur optimalen Komponente	390
	Literatur	398
14	Anhang	399
14.1	Verwendete Koordinatensysteme	399
14.1.1	Das kartesische Koordinatensystem	400
14.1.2	Das zylindrische Koordinatensystem	400
14.2	Verwendete Beziehungen aus der Vektoranalysis	401
14.2.1	Vektoroperatoren im kartesischen Koordinatensystem	402
14.2.2	Vektoroperatoren im zylindrischen Koordinatensystem	402
14.2.3	Der Nablaoperator	403
14.3	Die vollständigen elliptischen Integrale	403
14.4	Die modifizierten Bessel-Funktionen mit komplexem Argument	404
14.5	Die Berechnung des Skin- und Proximityfaktors	405
	Literatur	407
	Symbolverzeichnis	409
	Sachverzeichnis	415