

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zeitabhängige elektrische und magnetische Felder</b>	<b>11</b>
1.1	Quasistationäre Vorgänge	11
1.1.1	Konzentrierte Bauelemente	11
1.1.2	Ideale Grundzweipole	12
1.2	Erweiterung des Strombegriffs	14
1.2.1	Idealer kapazitiver Zweipol	14
1.2.2	Verschiebungsstrom	16
1.2.3	Knotensatz bei zeitabhängigen Strömen	17
1.2.4	Durchflutungsgesetz bei zeitabhängigen Strömen	18
1.3	Bewegungsinduktion	20
1.3.1	Bewegter Leiter im Magnetfeld	20
1.3.2	Zeitliche Änderung des magnetischen Flusses in der Schleifenfläche	24
1.3.3	Rotation einer Leiterschleife im homogenen Magnetfeld	26
1.4	Ruheinduktion	29
1.4.1	Induktive Spannung bei zeitabhängigem Magnetfeld	29
1.4.2	Spannungsstoß	31
1.5	Elektromagnetisches Feld	33
1.5.1	Induktionsgesetz	33
1.5.2	Das LENZsche Gesetz	34
1.5.3	Elektrisches Wirbelfeld	35
1.5.4	Die 2. MAXWELLSche Gleichung	36
1.6	Selbstinduktion	39
1.6.1	Selbstinduktive Spannung	39
1.6.2	Selbstinduktivität	40
1.6.3	Induktivität von Leiteranordnungen	44
1.6.4	Idealer induktiver Zweipol	46
1.7	Gegenseitige Induktion	49
1.7.1	Induktive Kopplung	49
1.7.2	Gegenseitige Induktivität	51
1.7.3	Gleichsinnige und gegensinnige Kopplung	52
1.7.4	Kopplungsfaktor	54
1.7.5	Reihenschaltung gekoppelter Spulen	55
1.7.6	Wirbelströme	56
<b>2</b>	<b>Kraft und Energie in elektromagnetischen Feldern</b>	<b>58</b>
2.1	Energie im elektromagnetischen Feld	58
2.1.1	Energie eines Kondensators	58
2.1.2	Elektrische Energiedichte	59
2.2	Kräfte im elektromagnetischen Feld	60
2.2.1	Kräfte auf Punktladungen	60
2.2.2	Kräfte auf einen Dipol	61
2.2.3	Kräfte auf die Platten eines Plattenkondensators	61
2.3	Energie im magnetischen Feld	63
2.3.1	Energie einer Leiteranordnung	63
2.3.2	Energiedichte im Magnetfeld	64
2.3.3	Innere Induktivität	65

2.3.4	Hysteresearbeit	66
2.3.5	Magnetischer Kreis mit Dauermagnet	67
2.4	Kräfte auf Magnetpole	68
2.5	Energietransport im elektromagnetischen Feld	71
<b>3</b>	<b>Periodisch zeitabhängige Größen</b>	<b>74</b>
3.1	Periodische Schwingungen	74
3.2	Mittelwerte periodischer Größen	76
3.2.1	Gleichwert	76
3.2.2	Wirkleistung	78
3.2.3	Effektivwert	79
3.2.4	Gleichrichtwert	80
3.2.5	Verhältniszahlen	82
3.3	Sinusförmige Schwingungen	83
3.3.1	Kenngrößen	83
3.3.2	Mittelwerte	85
3.3.3	Überlagerung von Sinusgrößen	87
3.3.4	Zeigerdarstellung	90
3.3.5	Komplexe Symbole	93
<b>4</b>	<b>Lineare Zweipole an Sinusspannung</b>	<b>95</b>
4.1	Lineare passive Zweipole	95
4.1.1	Begriffsdefinitionen	95
4.1.2	Komplexer Widerstand und Leitwert	95
4.2	Lineare aktive Zweipole	98
4.2.1	Begriffsdefinitionen	98
4.2.2	Ideale Sinusquellen	98
4.2.3	Lineare Sinusquellen	99
4.3	Leistung	100
4.3.1	Leistungsschwingung	100
4.3.2	Komplexe Leistung	104
4.4	Grundzweipole an Sinusspannung	106
4.4.1	Idealer OHMScher Zweipol	106
4.4.2	Idealer induktiver Zweipol	107
4.4.3	Idealer kapazitiver Zweipol	110
<b>5</b>	<b>Netze mit Sinusquellen gleicher Frequenz</b>	<b>113</b>
5.1	Ersatzzweipole passiver Netze	113
5.1.1	Reihenschaltung passiver Zweipole	113
5.1.2	Parallelschaltung passiver Zweipole	117
5.1.3	Ersatzzweipol und Ersatzschaltung	119
5.2	Resonanz	122
5.2.1	Reihenresonanz	122
5.2.2	Parallelresonanz	124
5.2.3	Resonanz linearer passiver Zweipole	126
5.2.4	Widerstandstransformation	126
5.3	Netze mit Sinusquellen	129
5.3.1	Belastung idealer Sinusquellen	129
5.3.2	Ersatzquellen	130

5.3.3	Leistungsanpassung	132
5.3.4	Blindleistungskompensation	133
5.4	Netze mit linearen Zweitoren	136
5.4.1	Zweitorparameter	136
5.4.2	Beschaltete Zweitore	137
5.4.3	Wellenwiderstand	138
5.4.4	Symmetrieeigenschaften von Zweitoren	139
5.4.5	Zweitor-Ersatzschaltungen	140
<b>6</b>	<b>Netze bei unterschiedlichen Frequenzen</b>	<b>143</b>
6.1	Frequenzabhängigkeit der Netzeigenschaften	143
6.1.1	Wirkung von $L$ und $C$	143
6.1.2	Komponentendarstellung	145
6.1.3	Ortskurvendarstellung	147
6.1.4	Ortskurven zueinander inverser Funktionen	148
6.2	Frequenzgang	151
6.2.1	Amplitudengang und Phasengang	151
6.2.2	Übertragungsfaktor und Dämpfungsfaktor	152
6.2.3	Übertragungssymmetrie von Zweitoren	155
6.2.4	Logarithmierte Größenverhältnisse	156
6.2.5	Pol-Nullstellen-Plan	159
6.2.6	BODE-Diagramm	161
6.2.7	Äquivalente Netze	163
6.2.8	Duale Netze	165
6.3	Filternetze	168
6.3.1	Grenzfrequenz	168
6.3.2	Tiefpass	170
6.3.3	Hochpass	172
6.3.4	Bandpass	174
6.3.5	Bandsperre	181
6.3.6	Allpass	183
6.3.7	Filter höherer Ordnung	184
<b>7</b>	<b>Drehstrom</b>	<b>188</b>
7.1	Symmetrische Spannungen	188
7.1.1	Das symmetrische Dreiphasensystem	188
7.1.2	Prinzip des Synchrongenerators	189
7.1.3	Sternschaltung	191
7.1.4	Dreieckschaltung	192
7.2	Symmetrische Belastung	193
7.2.1	Sternschaltung	193
7.2.2	Dreieckschaltung	192
7.2.3	Drehfeld	198
7.3	Unsymmetrische Belastung	200
7.3.1	Sternschaltung am Vierleiternetz	201
7.3.2	Sternschaltung am Dreileiternetz	202
7.3.3	Dreieckschaltung	204
7.4	Symmetrische Komponenten	206

7.4.1	Geschlossenes Zeigerdreieck . . . . .	206
7.4.2	Beliebige Lage der Zeiger . . . . .	207
<b>8</b>	<b>Nichtsinusförmige Größen</b> . . . . .	<b>209</b>
8.1	Harmonische Synthese . . . . .	209
8.1.1	Teilschwingungen . . . . .	209
8.1.2	Reelle FOURIER-Reihen . . . . .	211
8.1.3	Sonderfälle der Synthese . . . . .	212
8.1.4	Komplexe FOURIER-Reihen . . . . .	214
8.1.5	Spektrum periodischer Größen . . . . .	216
8.2	Eigenschaften periodischer Größen . . . . .	218
8.2.1	Leistung und Effektivwert . . . . .	218
8.2.2	Leistung bei Sinusspannung und nichtsinusförmigem Strom . . . . .	219
8.2.3	Kennwerte für die Verzerrung von Wechselgrößen gegenüber der Sinusform . . . . .	221
8.3	Harmonische Analyse . . . . .	223
8.3.1	Berechnung der FOURIER-Koeffizienten . . . . .	223
8.3.2	Verschiebungssatz . . . . .	224
8.4	Nichtperiodische Größen . . . . .	227
8.4.1	FOURIER-Transformation . . . . .	227
8.4.2	Diskrete FOURIER-Transformation eines zeitbeschränkten Signals . . . . .	229
8.4.3	Diskrete FOURIER-Transformation eines zeitlich unbeschränkten Signals . . . . .	231
8.5	Nichtsinusförmige Schwingungen in linearen Netzen . . . . .	233
8.5.1	Überlagerungsprinzip . . . . .	233
8.5.2	Verzerrungsfreie Übertragung . . . . .	235
8.5.3	Lineare Verzerrungen . . . . .	236
8.6	Nichtlineare Verzerrungen . . . . .	238
8.6.1	Spulenstrom bei verlustfreiem Eisenkern . . . . .	238
8.6.2	Spulenstrom beim Kern mit Eisenverlusten . . . . .	235
<b>9</b>	<b>Schaltvorgänge</b> . . . . .	<b>240</b>
9.1	Netz an Gleichspannung . . . . .	240
9.1.1	Netz mit einem Grundzweipol $C$ . . . . .	240
9.1.2	Netz mit einem Grundzweipol $L$ . . . . .	245
9.1.3	LAPLACE-Transformation . . . . .	248
9.1.4	Schwingkreis . . . . .	252
9.1.5	Netz mit zwei gleichartigen Energiespeichern . . . . .	256
9.2	Netz an Sinusspannung . . . . .	258
9.2.1	Netz mit einem Grundzweipol $C$ . . . . .	258
9.2.2	Netz mit einem Grundzweipol $L$ . . . . .	261
9.2.3	Schwingkreis . . . . .	262
<b>10</b>	<b>Reale Bauelemente</b> . . . . .	<b>264</b>
10.1	Bauformen . . . . .	264
10.2	Widerstand . . . . .	264
10.2.1	Nenndaten . . . . .	264
10.2.2	Temperatureinfluss . . . . .	265
10.2.3	Widerstandsformen . . . . .	266
10.2.4	Wechselstrom-Ersatzschaltung . . . . .	267

10.3	Kondensator . . . . .	270
10.3.1	Bauformen . . . . .	270
10.3.2	Verluste bei Gleichspannungsbetrieb . . . . .	273
10.3.3	Verluste bei Wechselspannungsbetrieb . . . . .	275
10.3.4	Wechselstrom-Ersatzschaltungen . . . . .	276
10.3.5	Temperatureinfluss . . . . .	277
10.3.6	Eigenschaften von Elektrolytkondensatoren . . . . .	278
10.4	Spule . . . . .	280
10.4.1	Berechnung der Induktivität . . . . .	281
10.4.2	Verlustwinkel und Gütefaktor . . . . .	282
10.4.3	Kupferverluste . . . . .	284
10.4.4	Kernverluste . . . . .	285
	<b>Anhang</b> . . . . .	290
A1	Beziehungen zwischen Winkelfunktionen . . . . .	290
A2	Komplexe Rechnung . . . . .	291
A3	Wichtige Konstanten . . . . .	293
A4	Verwendete Formelzeichen . . . . .	293
A5	FOURIER-Koeffizienten . . . . .	295
A6	LAPLACE-Transformation . . . . .	296
A7	Magnetisierungskurven . . . . .	300
	Lösungen der Aufgaben . . . . .	301
	Literatur . . . . .	314
	Sachwortverzeichnis . . . . .	316
	Namenverzeichnis . . . . .	320