

Inhaltsverzeichnis

I. Grundlegende Begriffe	1
1. Strom und Spannung	2
1.1. Der elektrische Strom	2
1.1.1. Stromstärke	2
1.1.2. Stromdichte	3
1.1.3. Stromarten	4
1.2. Elektrische Spannung und Energie	5
1.2.1. Elektrische Feldstärke	5
1.2.2. Leitfähigkeit	6
1.2.3. Elektrische Spannung	7
1.2.4. Elektrische Energie	8
1.2.5. Elektrische Leistung	9
 II. Gleichstromschaltungen	 10
2. Die Grundgesetze	11
2.1. Der Stromkreis	11
2.2. Das Ohmsche Gesetz	12
2.3. Der elektrische Widerstand	13
2.3.1. Berechnung von Widerständen	13
2.3.2. Lineare und nichtlineare Widerstände, differentieller Widerstand	14
2.3.3. Temperaturabhängigkeit von Widerständen	15
2.4. Erste Kirchhoffsche Gleichung (Knotengleichung)	17
2.5. Zweite Kirchhoffsche Gleichung (Maschenoder Umlaufgleichung).	19
 3. Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen	 24
3.1. Reihenschaltung von Widerständen	24
3.1.1. Gesamtwiderstand	24
3.1.2. Spannungsteiler	25
3.1.3. Vorwiderstand (Spannungs-Messbereichserweiterung)	28

3.2. Parallelschaltung von Widerständen	29
3.2.1. Gesamtleitwert	29
3.2.2. Stromteiler	30
3.2.3. Nebenwiderstand (Strom-Messbereichserweiterung) . .	33
3.3. Vergleich zwischen Reihen- und Parallelschaltung	34
3.4. Gruppenschaltungen von Widerständen	36
3.5. Schaltungssymmetrie	38
4. Netzumwandlung	40
4.1. Umwandlung eines Dreiecks in einen Stern	41
4.2. Umwandlung eines Sterns in ein Dreieck	45
5. Lineare Zweipole	52
5.1. Zählpfeile für Spannung und Strom	52
5.2. Spannungsquellen und Stromquellen	54
5.2.1. Spannungsquellen	54
5.2.2. Stromquellen	57
5.2.3. Innenwiderstand	59
5.2.4. Kennlinienfelder	59
5.3. Aktive Ersatz-Zweipole	61
5.3.1. Ersatzspannungsquelle	61
5.3.2. Ersatzstromquelle	63
5.3.3. Vergleich zwischen Ersatzquellen	64
5.3.4. Die Sätze von den Zweipolen (Thévenin-Helmholtz- und Norton-Theorem)	67
5.4. Leistung an Zweipolen	71
5.4.1. Leistungsanpassung	71
5.4.2. Wirkungsgrad, Ausnutzungsgrad	73
5.4.3. Leistung, Spannung und Strom bei Fehlanpassung . . .	74
6. Nichtlineare Zweipole	79
6.1. Kennlinien nichtlinearer Zweipole	79
6.2. Reihen- und Parallelschaltung von nichtlinearen Zweipolen . .	80
6.3. Netze mit nichtlinearen Zweipolen	83
7. Analyse linearer Netze	86
7.1. Unmittelbare Anwendung der Kirchhoffschen Gleichungen (Zweigstromanalyse)	86
7.2. Überlagerungssatz und Reziprozitätssatz	89
7.2.1. Überlagerungssatz (Superpositionsprinzip nach Helmholtz)	89
7.2.2. Reziprozitäts-Satz	92
7.3. Topologische Grundbegriffe beliebiger Netze	94
7.4. Maschenstromverfahren (Umlaufanalyse)	97
7.4.1. Unabhängige und abhängige Ströme	97

7.4.2.	Aufstellung der Umlaufgleichungen	100
7.4.3.	Regeln zur Anwendung des Maschenstromverfahrens . .	103
7.4.4.	Beispiele zur Anwendung des Maschenstromverfahrens .	104
7.5.	Knotenpotentialverfahren (Knotenanalyse)	110
7.5.1.	Abhängige und unabhängige Spannungen	110
7.5.2.	Aufstellung der Knotengleichungen	111
7.5.3.	Regeln zur Anwendung der Knotenanalyse	114
7.5.4.	Beispiele zur Anwendung der Knotenanalyse	115
7.6.	Zusammenfassung und Vergleich zwischen den Methoden der Analyse linearer Netze	121
7.6.1.	Allgemeines	122
7.6.2.	Die Kirchhoffschen Gleichungen (Zweigstromanalyse) . .	123
7.6.3.	Ersatzspannungsquelle und Ersatzstromquelle	124
7.6.4.	Der Überlagerungssatz	128
7.6.5.	Maschenstromverfahren	130
7.6.6.	Knotenpotentialverfahren	133
7.7.	Design von Gleichstromkreisen mit gewünschten Strömen . .	135

III. Wechselstromschaltungen

138

8. Grundbegriffe der Wechselstromtechnik

139

8.1.	Warum verwendet man Wechselstrom?	139
8.2.	Kennwerte der sinusförmigen Wechselgrößen	141
8.2.1.	Wechselgrößen	141
8.2.2.	Sinusgrößen	142

9. Einfache Sinusstromkreise im Zeitbereich

147

9.1.	Allgemeines	147
9.2.	Ohmscher Widerstand R	148
9.3.	Zusammenhang zwischen Strom und Spannung bei Induktivitäten und Kapazitäten	148
9.4.	Ideale Induktivität L	152
9.5.	Ideale Kapazität C	153
9.6.	Ohmsches Gesetz bei Wechselstrom	154
9.7.	Die Kirchhoffschen Sätze für Wechselstromschaltungen.	155
9.8.	Schaltungen von Grundelementen	157
9.8.1.	Reihenschaltung R und L	157
9.8.2.	Reihenschaltung R und C	158
9.8.3.	Reihenschaltung R , L und C	159
9.9.	Kennwerte der Sinusstromkreise	161
9.9.1.	Impedanz und Phasenwinkel	161
9.9.2.	Resistanz und Reaktanz	162
9.9.3.	Admittanz und Phasenwinkel	163
9.9.4.	Konduktanz und Suszeptanz	164

9.9.5. Zusammenfassung und Diskussion der Kennwerte einfacher Sinusstromkreise	165
9.10. Leistungen in Wechselstromkreisen	167
9.10.1. Leistung bei idealen Schaltelementen R, L und C	167
9.10.2. Wechselstromleistung allgemein	170
9.10.3. Wirk-, Blind- und Scheinleistung, Leistungsfaktor	171
10. Symbolische Verfahren zur Behandlung von Sinusgrößen	176
10.1. Allgemeines	176
10.2. Zeigerdarstellung von Sinusgrößen	177
10.2.1. Geometrische Darstellung einer Sinusgröße	177
10.2.2. Grundschaltelemente in Zeigerdarstellung	179
10.2.2.1. Ohmscher Widerstand	179
10.2.2.2. Ideale Induktivität	180
10.2.2.3. Ideale Kapazität	180
10.2.3. Zeigerdarstellungen von Sinusstromkreisen	181
10.3. Komplexe Darstellung von Sinusgrößen	185
10.3.1. Darstellung einer Sinusgröße als komplexe Zahl	186
10.3.2. Anwendung der komplexen Darstellung in der Wechselstromtechnik	189
10.3.3. Komplexe Impedanzen und Admittanzen	192
10.3.4. Komplexe Leistung	195
10.3.5. Die Grundschaltelemente in komplexer Darstellung	196
11. Sinusstromnetzwerke	200
11.1. Allgemeines, Kirchhoffsche Gleichungen	200
11.2. Reihen- und Parallelschaltung	202
11.2.1. Reihenschaltung, Spannungsteiler	202
11.2.2. Parallelschaltung, Stromteiler	208
11.2.3. Kombinierte Schaltungen	213
11.3. Netzumwandlung bei Wechselstrom	216
11.3.1. Bedingung für Umwandlungen	216
11.3.2. Die Umwandlung Dreieck-Stern	217
11.3.3. Die Umwandlung Stern-Dreieck	219
11.4. Besondere Wechselstromschaltungen	221
11.5. Aktive Ersatz-Zweipole	224
11.5.1. Ersatzquellen (Thévenin-Helmholtz-, Norton-Theorem)	224
11.5.2. Leistungsanpassung bei Wechselstrom	231
11.6. Analyse von Sinusstromnetzwerken	233
11.6.1. Unmittelbare Anwendung der Kirchhoffschen Sätze	233
11.6.2. Überlagerungssatz (Superpositionsprinzip)	234
11.6.3. Maschenstromverfahren	237
11.6.4. Knotenpotentialverfahren	243

12. Zweitore	251
12.1. Definitionen, Begriffe	251
12.2. Zweitorgleichungen und -parameter	257
12.2.1. Zählpfeilsysteme für Zweitore	257
12.2.2. Zweitor-Gleichungen in Admittanzform Y	257
12.2.3. Allgemeine Bedeutung der Vierpolgleichungen	262
12.2.4. Impedanzform Z , Kettenform A , Hybridform H	263
12.2.5. Umrechnung der Vierpol-Parameter	268
12.2.6. Elementare Zweitore	268
12.2.7. Ersatzschaltbilder von Vierpolen	270
12.2.8. Wellenimpedanz	274
12.3. Zusammenschaltung von Zweitoren	277
12.3.1. Überblick der möglichen Schaltungen, Diskussion	277
12.3.2. Reihenschaltung von Zweitoren	278
12.3.3. Parallelschaltung	282
12.3.4. Reihen-Parallel-Schaltung	285
12.3.5. Kettenschaltung	286
13. Schwingkreise	291
13.1. Schaltungen mit besonderem Frequenzverhalten	291
13.2. Resonanzkreise, Reihen- und Parallelresonanz	293
13.2.1. Frequenzabhängigkeit von Betrag und Phase von \underline{Z} , bzw. \underline{Y}	294
13.2.2. Charakteristische Größen der Resonanzkreise	295
13.2.3. Frequenzabhängigkeit von Strom und Spannung	299
13.3. Technische Schaltelemente	303
13.3.1. Allgemeine Betrachtungen	303
13.3.2. Technischer Widerstand	304
13.3.3. Technischer Kondensator	306
13.3.4. Technische Spule	307
14. Drehstromsysteme	310
14.1. Allgemeines, Vorteile des Drehstroms	310
14.2. Spannungen an symmetrischen Drehstromgeneratoren	314
14.3. Generatorschaltungen	317
14.3.1. Generatorsternschaltung	318
14.3.2. Generatordreieckschaltung	319
14.4. Symmetrische Verbraucher	320
14.4.1. Symmetrischer Verbraucher in Sternschaltung	320
14.4.2. Symmetrischer Verbraucher in Dreieckschaltung	323
14.5. Leistungen in Drehstromsystemen	325
14.6. Zusammenfassende Betrachtung symmetrischer Drehstromsysteme	333
14.7. Unsymmetrische Drehstromsysteme	336
14.7.1. Elektrische Energieverteilung	336

14.7.2. Sternverbraucher: Die Spannung zwischen Generator- und Verbraucher-Sternpunkt	336
14.7.3. Unsymmetrischer Dreieck-Verbraucher	342
14.7.4. Diskussion zur Behandlung besonderer unsymmetrischer Systeme	342

IV. Schaltvorgänge

344

15. Berechnung von Ausgleichsvorgängen im Zeitbereich mithilfe

von Differentialgleichungen

345

15.1. Untersuchte Schaltvorgänge, Einschränkungen	345
15.2. Differentialgleichungen zur Beschreibung der Schaltvorgänge . .	347
15.3. Verhalten der Grundschaltelemente R , L , C bei Schaltsprüngen	350
15.4. Stromkreise mit einem Energiespeicher bei Gleichspannung . .	351
15.4.1. Lösung von Differentialgleichungen erster Ordnung (Beispiel: Einschalten einer verlustbehafteten Induktivität)	351
15.4.2. Strategie zur Lösung von Differentialgleichungen erster Ordnung	355
15.4.3. Beispiele zur Berechnung von Strömen und Spannungen in R - L -Stromkreisen mithilfe von Differentialgleichungen	357
15.4.4. Schaltvorgänge in Kondensatorschaltungen	368
15.4.5. Beispiele zur Berechnung von Strömen, Spannungen und Ladungen in R - C -Stromkreisen mithilfe von Differentialgleichungen	373
15.5. Stromkreise mit einem Energiespeicher bei Wechselspannung .	380
15.5.1. Verlustbehaftete Induktivität	380
15.5.2. Reihenschaltung R - C	383
15.5.3. Allgemeines Verfahren bei Kreisen mit einem Energiespeicher	392
15.6. Stromkreise mit zwei Energiespeichern. DGL zweiter Ordnung	393

16. Berechnung von Ausgleichsvorgängen mithilfe der Laplace-Transformation

401

16.1. Was ist die Laplace-Transformation?	401
16.2. Laplace-Transformierten einiger Funktionen	404
16.2.1. Die (Einheits-)Sprungfunktion	404
16.2.2. Der Rechteckimpuls	405
16.2.3. Die (lineare) Rampenfunktion	405
16.2.4. Die Exponentialfunktion	406
16.2.5. Die Potenzfunktion (oder Parabel n-ten Grades)	407
16.2.6. Die Sinusfunktion (mit Nullphasenwinkel null)	407
16.2.7. Die Cosinusfunktion (mit Nullphasenwinkel null)	408

16.3. Die Rücktransformation in den Zeitbereich	409
16.4. Lösungsstrategien für die Berechnung von Ausgleichsvorgängen mithilfe der Laplace-Transformation	411
16.4.1. Problemstellung	411
16.4.2. Beziehungen zwischen Strom und Spannung an den idealen Grundschaltelementen R , L , C im Bildbereich . . .	411
16.4.3. Lösungsweg bei Schaltungen mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen	413
16.4.4. Abschließende Betrachtung der beiden Methoden: DGL und Laplace-Transformation	415
16.5. Anwendungen der Laplace-Transformation auf Schaltvorgänge .	415
16.5.1. Berechnung von Strömen und Spannungen in R - L -Schaltungen mithilfe der Laplace-Transformation . . .	415
16.5.2. Berechnung von Strömen und Spannungen in R - C -Schaltungen mithilfe der Laplace-Transformation . . .	427
16.5.3. Berechnung von Strömen und Spannungen in Schaltungen mit 2 unterschiedlichen Energiespeichern	436

V. Nichtsinusförmige Vorgänge 444

17. Nichtsinusförmige periodische Vorgänge (Fourier-Analyse) 445

17.1. Wo kommen in der Elektrotechnik nichtsinusförmige Vorgänge vor?	445
17.2. Die Lösung: Zerlegung und Superposition (Fourier-Analyse) . .	446
17.3. Bestimmung der reellen Fourier-Koeffizienten	449
17.3.1. Bestimmung des Fourier-Koeffizienten a_0	449
17.3.2. Bestimmung der Fourier-Koeffizienten a_n	450
17.3.3. Bestimmung der Fourier-Koeffizienten b_n	451
17.4. Vereinfachungen bei der Berechnung der Fourier-Koeffizienten	452
17.4.1. Allgemeine Empfehlungen	452
17.4.2. Abschätzung des Gleichanteils a_0	452
17.4.3. Erkennung von Symmetrien	453
17.5. Fourier-Koeffizienten. Spektral-Darstellungen	458
17.5.1. Noch einmal: Strategie zur Fourierreihen-Entwicklung mit reellen Koeffizienten	458
17.5.2. Rechteckfunktion	459
17.5.3. Dreieckfunktion	460
17.5.4. Periodischer rechteckförmiger Impuls	463
17.5.5. Einweggleichrichtung	465
17.5.6. Zweiweggleichrichtung	467
17.5.7. Sägezahnfunktion	469
17.6. Komplexe Fourier-Reihenentwicklung	473

17.7. Effektivwert nichtsinusförmiger Wechselgrößen	476
17.7.1. Allgemeine Formel	476
17.7.2. Bestimmung der Effektivwerte wichtiger Funktionen . .	479
17.7.3. Interessante Beobachtungen und ihre Konsequenzen . .	488
17.8. Kenngrößen der Verzerrung: Klirrfaktor k , Grundswingungs- gehalt g	491
17.8.1. Allgemeine Formeln	491
17.8.2. Bestimmung des Klirrfaktors k wichtiger Funktionen . .	492
17.9. Leistungen bei nichtsinusförmigen Strömen und Spannungen . .	496
18. Lineare Netzwerke bei nichtsinusförmiger Erregung	499
18.1. Grundlegende Betrachtungen	499
18.2. Grundschaltelemente bei nichtsinusförmigen Spannungen . .	501
18.3. Strategie zur Berechnung von Netzwerken mit periodischen, nichtsinusförmigen Strömen und Spannungen	505
18.4. Bestimmung von Effektivwerten und Klirrfaktoren	505
18.5. Bestimmung von Leistungen bei nichtsinusförmiger Erregung .	511
 ANHANG	 516
A. Rechenregeln für Zeiger	516
B. Rechenregeln für komplexe Zahlen	518
C. Diskussionen über die Exponentialfunktionen	521
D. Eigenschaften der Laplace-Transformation	526
D.1. Linearität (Multiplikations- und Additionssatz)	526
D.2. Ähnlichkeitssatz	526
D.3. Dämpfungssatz	527
D.4. Faltungssatz	527
D.5. Verschiebungssatz	527
D.6. Grenzwertsätze	528
D.7. Ableitungssatz	529
E. Mathematische Grundbegriffe und Integrale mit trigonometrischen Funktionen	530
Literaturverzeichnis	533
Index	537