

# Inhaltsverzeichnis

<b>I. Grundlegende Begriffe</b>	<b>1</b>
<b>1. Strom und Spannung</b>	<b>2</b>
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
<b>II. Gleichstromschaltungen</b>	<b>10</b>
<b>2. Die Grundgesetze</b>	<b>11</b>
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
<b>3. Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen</b>	<b>24</b>
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
<b>4. Netzumwandlung</b>	<b>40</b>
4.1. Umwandlung eines Dreiecks in einen Stern . . . . .	41
4.2. Umwandlung eines Sterns in ein Dreieck . . . . .	45
<b>5. Lineare Zweipole</b>	<b>52</b>
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
<b>6. Nichtlineare Zweipole</b>	<b>79</b>
6.1. Kennlinien nichtlinearer Zweipole . . . . .	79
6.2. Reihen- und Parallelschaltung von nichtlinearen Zweipolen . . . . .	80
6.3. Netze mit nichtlinearen Zweipolen . . . . .	83
<b>7. Analyse linearer Netze</b>	<b>86</b>
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 Netwerke . . . . .	121
7.6.1. Allgemeines . . . . .	122
7.6.2. Die Kirchhoffsschen 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

<b>8. Grundbegriffe der Wechselstromtechnik</b>	<b>139</b>
8.1. Warum verwendet man Wechselstrom? . . . . .	139
8.2. Kennwerte der sinusförmigen Wechselgrößen . . . . .	141
8.2.1. Wechselgrößen . . . . .	141
8.2.2. Sinusgrößen . . . . .	142
<b>9. Einfache Sinusstromkreise im Zeitbereich</b>	<b>147</b>
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 Kirchhoffssche 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
<b>10. Symbolische Verfahren zur Behandlung von Sinusgrößen</b>	<b>176</b>
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
<b>11. Sinusstromnetzwerke</b>	<b>200</b>
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. Netztumwandlung 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 Kirchhoffsschen Sätze . .	233
11.6.2. Überlagerungssatz (Superpositionsprinzip) . . . . .	234
11.6.3. Maschenstromverfahren . . . . .	237
11.6.4. Knotenpotentialverfahren . . . . .	243

<b>12. Zweitore</b>	<b>251</b>
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
<b>13. Schwingkreise</b>	<b>291</b>
13.1. Schaltungen mit besonderem Frequenzverhalten . . . . .	291
13.2. Resonanzkreise, Reihen- und Parallelresonanz . . . . .	293
13.2.1. Frequenzabhängigkeit von Betrag und Phase von $Z$ , bzw. $Y$ . . . . .	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
<b>14. Drehstromsysteme</b>	<b>310</b>
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
<b>IV. Schaltvorgänge</b>	<b>344</b>
<b>15. Berechnung von Ausgleichsvorgängen im Zeitbereich mithilfe von Differentialgleichungen</b>	<b>345</b>
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 Kondensatorsschaltungen . . . . .	368
15.4.5. Beispiele zur Berechnung von Strömen, Spannungen und Ladungen in $R-C$ -Stromkreisen mithilfe von Differential- gleichungen . . . . .	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
<b>16. Berechnung von Ausgleichsvorgängen mithilfe der Laplace- Transformation</b>	<b>401</b>
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 Augleichsvorgängen 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
<b>V. Nichtsinusförmige Vorgänge</b>	<b>444</b>
<b>17. Nichtsinusförmige periodische Vorgänge (Fourier-Analyse)</b>	<b>445</b>
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 $k$ , Grundschwingungs- 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
<b>18. Lineare Netzwerke bei nichtsinusförmiger Erregung</b>	<b>499</b>
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
<b>ANHANG</b>	<b>516</b>
<b>A. Rechenregeln für Zeiger</b>	<b>516</b>
<b>B. Rechenregeln für komplexe Zahlen</b>	<b>518</b>
<b>C. Diskussionen über die Exponentialfunktionen</b>	<b>521</b>
<b>D. Eigenschaften der Laplace-Transformation</b>	<b>526</b>
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
<b>E. Mathematische Grundbegriffe und Integrale mit trigonometrischen Funktionen</b>	<b>530</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>533</b>
<b>Index</b>	<b>537</b>