

MARLENE MARINESCU · NICOLAE MARINESCU

ELEKTRO TECHNIK

FÜR STUDIUM UND PRAXIS

Gleich-, Wechsel- und Drehstrom,
Schalt- und nichtsinusförmige Vorgänge

2., erweiterte Auflage

 **NIKOL**
VERLAG

Vorwort zur zweiten, erweiterten Auflage

Die Überarbeitung und Erweiterung in der vorliegenden 2. Auflage betrifft Ergänzungen im Bereich der Wechselstromschaltungen (Teil III).

Aus der Erkenntnis, dass viele spezielle Anwendungen des Wechselstroms an Bedeutung gewinnen und somit in den Studienplänen vieler elektrotechnischer Hochschulen Berücksichtigung finden, haben wir zwei neue Kapitel hinzugefügt:

Kapitel 12 - Zweitore

Kapitel 13 - Schwingkreise.

Die zahlreichen Beispiele und die mehr als 50 neuen Abbildungen sollen nicht nur Studierenden, sondern auch Ingenieuren in der Praxis, die sich mit diesen speziellen Gebieten befassen, behilflich sein.

Die ausführlichen Lösungen der in dem Buch aufgestellten Übungsaufgaben befinden sich jetzt im Internet auf der Produktseite

<https://www.springer.com.de/book/97836582883-9>.

Wir danken dem Verlag Springer Vieweg | Springer Fachmedien Wiesbaden für die sehr gute Zusammenarbeit, wobei unser besonderer Dank Herrn Reinhard Dapper gilt, für die Bereitschaft unser Buch in einer zweiten, erweiterten Auflage zu verlegen und für das großzügige Entgegenkommen bezüglich unserer Wünsche. Zum Gelingen dieses Buches hat auch die wertvolle Hilfe der Frau Andrea Broßler beigetragen, für ihre ständige Unterstützung unseres Buchprojektes gebührt ihr unser Dank.

Ebenfalls ein herzlicher Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Andreas Kopp, der die über 50 Bilder der neuen Kapitel (12 und 13), – wie auch die über 400 Abbildungen der ersten Auflage –, digital erstellt hat.

Frankfurt am Main, im Frühjahr 2020

Marlene Marinescu
Nicolae Marinescu

Vorwort zur ersten Auflage

Das vorliegende Buch ist hervorgegangen aus dem Lehrbuch „Grundlagenwissen Elektrotechnik. Gleich-, Wechsel- und Drehstrom“, das in der 3. Auflage im Vieweg + Teubner Verlag | Springer Fachmedien, im Jahr 2011 erschien. Die Voraufgaben sind unter dem Titel „Basiswissen Gleich- und Wechselstromtechnik“ im Jahr 2005 (1. Auflage) und 2008 (2. Auflage) im selben Verlag erschienen.

Die Autoren bedanken sich bei Prof. Dr. Jürgen Winter, Hochschule Rhein-Main, für die Hilfe bei der Formatierung und bei der Erstellung einiger druckreifen Abbildungen für die 1. Auflage aus dem Jahr 2005.

Dem vorliegenden Buch liegen eine jahrzehntelange Forschungs- und Entwicklungsarbeit für die elektrotechnische Industrie im Rahmen der eigenen Firma MAGTECH und langjährig durchgeführte, unterschiedliche Vorlesungen über „Grundlagen der Elektrotechnik“ an der Hochschule RheinMain, an der Hochschule Darmstadt und an der Frankfurt University of Applied Sciences, zugrunde.

Das Buch wurde gleichermaßen als Lehrbuch und Arbeitsbuch konzipiert und ist besonders für *Studierende der Bachelor-Studiengänge* an den Hochschulen und technischen Universitäten, die in den ersten Semestern die Grundlagen der Elektrotechnik lernen, geeignet.

Gegenüber dem ursprünglichen, erwähnten Lehrbuch, enthält das vorliegende zwei neue Abschnitte: Schaltvorgänge und nichtsinusförmige Vorgänge, die bisher üblicherweise nicht zum Basiswissen der Schaltungstechnik gerechnet wurden. Mit den umwälzenden Entwicklungen des letzten Jahrzehntes in der Energieversorgung, - d.h. der rasanten Verbreitung der Ausnutzung erneuerbarer Energiequellen (Wind, Sonne) - haben jedoch die Ein- und Ausschaltvorgänge, wie auch die Problematik der nichtsinusförmigen Vorgänge eine größere Bedeutung bekommen. Aus diesem Grund haben wir diese zwei Abschnitte zugefügt, die allerdings Kenntnisse der höheren Mathematik (Differentialgleichungen, Laplace-Transformation, Fourier-Reihenentwicklungen) erfordern.

Damit kann das vorliegende Buch auch Studierenden der *Master-Studiengänge* hilfreich sein.

Auf jeden Fall kann dieses Buch *in der Praxis stehenden Ingenieuren* zum Auffrischen ihrer Grundkenntnisse über viele Problemstellungen der elektrischen Schaltungen helfen.

Aus den Fragen und Anregungen der Studierenden haben wir erfahren, dass trotz der relativen Einfachheit der Begriffe und des mathematischen Werkzeugs (für die Gleichstromschaltungen: Algebra, vor allem Bruchrechnung und lineare Gleichungssysteme, für Wechsel- und Drehstrom: Trigonometrie, Operationen mit komplexen Zahlen) das Erlernen der Schaltungstheorie einen nicht unerheblichen Arbeitsaufwand verlangt. Zunächst ist es wichtig, die physikalischen Zusammenhänge zu verstehen, die durch die Knoten- und Maschengleichungen und das Ohmsche Gesetz mathematisch formuliert sind. Dieses Verständnis erlangt man am einfachsten, wenn man Ströme und Spannungen in Gleichstromschaltungen berechnet. Fast alle Berechnungsmethoden können dann auf Wechselstromschaltungen übertragen werden, doch werden hier komplexe Zahlen als Symbole für die elektrischen Größen verwendet. In diesem Buch wird der Behandlung der Sinusstromkreise im Zeitbereich (also als trigonometrische Funktionen) viel Aufmerksamkeit gewidmet und erst dann wird zu der Zeiger- und schließlich zu der komplexen Darstellung übergegangen.

Wir möchten unsere Leser dazu motivieren, selbständig zu *üben*. Dazu stellt das Buch *zahlreiche Beispiele und Aufgaben* mit ausführlicher Erläuterung des Lösungsweges zur Verfügung. Zusätzlich bietet es Übungsaufgaben, deren ausführliche Lösungen man in Internet auf der Produktseite

<http://www.springer.com/de/book/9783658141585>

findet. Die Beispiele und Aufgaben haben sich als für die *Prüfungsvorbereitung* besonders nützlich erwiesen.

Wir danken dem Vieweg + Teubner Verlag | Springer Fachmedien für die sehr gute Zusammenarbeit, vor allem Herrn Reinhard Dapper, der uns mit begeistertem Einsatz motiviert hat, dieses Buch zu schreiben.

Das Buch enthält über 400 Abbildungen, die dem Verständnis der Theorie, aber auch der gestellten Aufgaben, dienen. Unser besonders herzlicher Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Andreas Kopp, der den Großteil der Bilder der neuen Abschnitte (Teil IV und Teil V) digital erstellt hat.

Frankfurt am Main, im Frühjahr 2016

Marlene Marinescu
Nicolae Marinescu

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 Netwerke	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 Kirchhoffsche 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 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

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 , 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
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

Teil I.

Grundlegende Begriffe

1. Strom und Spannung

1.1. Der elektrische Strom

In Metallen sind die Elektronen nur lose gebunden und können sich als **freie** Elektronen bewegen. Ein **elektrischer Strom** entsteht dann, wenn der unregelmäßigen Bewegung der elektrischen Ladungen ein **gerichteter** Ladungstransport überlagert wird, d.h. wenn gleichnamige Ladungen in eine bestimmte Richtung bewegt werden (Driftbewegung).

Für die Richtung des elektrischen Stromes wurde vereinbart, dass diese **entgegengesetzt zu dem Elektronenstrom** ist¹.

Ein elektrischer (zeitlich konstanter) Strom kann nur in einem **geschlossenen** Kreis fließen.

1.1.1. Stromstärke

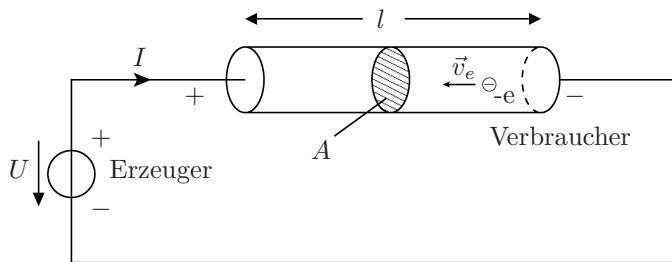


Abbildung 1.1.: Stromkreis aus Erzeuger und Verbraucher

Die Abbildung 1.1 zeigt einen Erzeuger² und einen Verbraucher.

Merksatz *Der Strom fließt im Verbraucher von + nach -, im Erzeuger von - nach +. Der Strom kommt aus der Plusklemme des Akkus heraus.*

Die Elektronen bewegen sich im Metall dagegen von - nach +. Es sind etwa $n \approx 10^{23}$ freie Elektronen pro cm^3 Metall³.

¹Diese Richtung nennt man auch „technische“ oder „konventionelle“ Stromrichtung

²Ein Erzeuger kann eine Batterie, ein Akku, ein Generator u.a. sein

³Bei Kupfer sind es z.B. $0,8 \cdot 10^{23}$

Jedes Elektron besitzt die negative Ladung (Elementarladung)

$$-e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As} .$$

Somit ist die freie Elektrizitätsmenge in jedem cm^3 :

$$n \cdot e = -n \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As} .$$

Fließt ein Strom, so bewegt sich in einem Draht der Länge l mit dem Querschnitt A eine Gesamtladung von

$$Q = n \cdot e \cdot l \cdot A .$$

Jedes Elektron braucht die Zeit t um die Länge l zu durchlaufen.

Die Stromstärke wird als das Verhältnis

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{n \cdot e \cdot l \cdot A}{t} \quad (1.1)$$

definiert. Da die Einheiten für I und t in dem MKSA-System festgelegt sind, resultiert für die Einheit der Ladung Q :

$$[Q] = [I] \cdot [t] = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s} = 1 \text{ As} = 1 \text{ Coulomb} = 1 \text{ C} . \quad (1.2)$$

Die Gleichung (1.1) gilt wenn I zeitlich konstant ist. Allgemein gilt jedoch

$$i(t) = \frac{dq}{dt} . \quad (1.3)$$

Die Schreibweise nach Gleichung (1.3) bedarf einer Erklärung:

Vereinbarung *Zeitlich konstante Größen bezeichnet man mit großen Buchstaben. Veränderliche Größen bezeichnet man mit kleinen Buchstaben.*

1.1.2. Stromdichte

Als Stromdichte S wird das Verhältnis

$$S = \frac{I}{A} \quad (1.4)$$

definiert. Diese Formel gilt nur bei gleichmäßiger Verteilung des Stromes I über den Querschnitt A .

Als Einheit für die Stromdichte ergibt sich:

$$[S] = \frac{[I]}{[A]} = 1 \frac{\text{A}}{\text{m}^2} . \quad (1.5)$$

Üblicherweise wird die Stromdichte in $\frac{A}{mm^2}$ angegeben.

Allgemein ist S nicht konstant⁴ und die allgemeine Formel für den Strom I ist:

$$I = \iint \vec{S} \cdot d\vec{A} \quad (1.6)$$

wobei \vec{S} und das Flächenelement $d\vec{A}$ Vektoren sind und \vec{S} ortsabhängig sein kann. Die Strömungsgeschwindigkeit der Elektronen in Metallen ist nach Gleichung (1.1):

$$v_e = \frac{l}{t} = \frac{I}{n \cdot e \cdot A} = \frac{S}{n \cdot e} . \quad (1.7)$$

In der Energietechnik werden Stromdichten zwischen $S = 1 \frac{A}{mm^2}$ und $S = 10 \frac{A}{mm^2}$, in Störungsfällen bis $S = 100 \frac{A}{mm^2}$ verwendet.

■ Beispiel 1.1

In welchen Grenzen ändert sich die Driftgeschwindigkeit der Elektronen normalerweise in der Energietechnik, wenn $n = 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ ist ?

Mit $v_e = \frac{S}{n \cdot e}$ ergibt sich für die minimale und maximale Driftgeschwindigkeit:

$$\begin{aligned} v_{e_{min}} &= \frac{1 \frac{A}{mm^2}}{10^{23} \text{ cm}^{-3} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}} = \frac{10^{-4} \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{m^2 \cdot s}}{1,602 \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{m^2 \cdot s}} = 0,62 \cdot 10^{-4} \frac{m}{s} \\ &= 0,062 \frac{mm}{s} \end{aligned}$$

$$v_{e_{max}} = 10 \cdot v_{e_{min}} = 6,2 \cdot 10^{-4} \frac{m}{s} = 0,62 \cdot \frac{mm}{s}.$$

Gegenüber der Lichtgeschwindigkeit von $c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ ist die Driftgeschwindigkeit um 11 bis 12 Potenzen kleiner. Trotz der geringen Driftgeschwindigkeit entsteht der Strom in einem Kreis mit Lichtgeschwindigkeit, da sich der Bewegungsimpuls der Elektronen mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzt. ■

1.1.3. Stromarten

Um das zeitliche Verhalten von Strömen zu charakterisieren, haben sich die folgenden Bezeichnungen durchgesetzt:

- a) Als *Gleichstrom* bezeichnet man einen Strom, der unabhängig von der Zeit t ist, d.h. seine Stromstärke und seine Richtung ändern sich im zeitlichen Verlauf nicht. Trägt man die Stromstärke über der Zeit auf, erhält man den in Abbildung 1.2 a) dargestellten Verlauf.

⁴z.B. bei hochfrequenten Strömen: Stromverdrängung (Skinneffekt)