

Heinz-Josef Bauckholt

Grundlagen und Bauelemente der Elektrotechnik



9., erweiterte Auflage

HANSER



bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Lernbücher der Technik

herausgegeben von Dipl.-Gewerbelehrer Manfred Mettke,
Oberstudiendirektor a. D.

Bisher liegen vor:

Bauckholt, Grundlagen und Bauelemente der Elektrotechnik

Felderhoff/Busch, Leistungselektronik

Felderhoff/Freyer, Messtechnik

Freyer, Nachrichten-Übertragungstechnik

Heiderich/Meyer, Technische Probleme lösen mit C/C++

Hofmann/Spindler, Werkstoffe in der Elektrotechnik

Knies/Schierack/Berger, Elektrische Anlagentechnik

Schaaf/Böcker, Mikrocomputertechnik

Seidel/Hahn, Werkstofftechnik

Heinz-Josef Bauckholt

Grundlagen und Bauelemente der Elektrotechnik

9., erweiterte Auflage

HANSER

Der Autor:

Dipl.-Ing. Heinz-Josef Bauckholt, Studiendirektor a. D., Fachschule für Technik der Stadt Köln



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, sind vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2022 Carl Hanser Verlag München

Internet: www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg

Herstellung: Frauke Schafft

Zeichnungen: Peter Palm, Berlin

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Titelbild: © stock.adobe.com/Grispb

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-47300-3

E-Book-ISBN 978-3-446-47328-7

Vorwort des Herausgebers

Was können Sie mit diesem Buch lernen?

Wenn Sie mit diesem Buch lernen, erwerben Sie umfassende Kompetenzen in den Grundlagen und Bauelementen der Elektrotechnik. Sie bilden wesentliche Voraussetzungen bei der Entwicklung von Projekten und der Lösung von produktionstechnischen Aufgaben.

Der Umfang dessen, was wir Ihnen anbieten, orientiert sich an

- den Lehrplänen der Fachschulen für Technik in den Bundesländern,
- den Studienplänen der Fachhochschulen für Technik in den Bundesländern.

Sie werden mit den elektrischen Erscheinungen bei Gleich-, Einphasen- und Mehrphasenwechselstrom im elektrischen, nichtelektrischen und magnetischen Feld sowie mit Schaltvorgängen vertraut gemacht. Jeder Problemkreis ist dabei praxisgerecht aufbereitet.

Das heißt, Sie gehen stets folgenden Fragen nach:

- Welche Gesetzmäßigkeiten gelten?
- Welche Funktionsprinzipien werden wirksam?
- Welchen spezifisch elektrotechnischen Arbeitsmethoden muss nachgegangen werden?
- Welche schaltungstechnischen und/oder technologischen Problemlösungen sind denkbar?

Wer kann mit diesem Buch lernen?

Jeder, der

- sich weiterbilden möchte,
- die elementaren Grundlagen der Elektrotechnik kennt,
- die Grundlagen der elementaren Mathematik beherrscht,
- grundlegende Kenntnisse in der Differenzial- und Integralrechnung besitzt.

Das können sein:

- Studenten an Fachhochschulen,
- Studenten an Berufsakademien und Ingenieure,
- Studenten an Fachschulen für Technik und Techniker,
- Schüler an technischen Gymnasien,
- Schüler an Fachoberschulen,
- Zukünftige Technische Assistenten und Technische Assistenten,
- Schüler an beruflichen Gymnasien, Berufsoberschulen und Berufsfachschulen,
- Facharbeiter, Gesellen und Meister, während und nach der Ausbildung,
- Umschüler und Rehabilitanden,
- Teilnehmer an Fort- und Weiterbildungskursen,
- Autodidakten,

vor allem in den Fachrichtungen:

- Elektrische Energietechnik und Prozessautomatisierung,
- Prozessleittechnik,
- Informationstechnik,
- Elektronische Datenverarbeitungstechnik,
- Telekommunikationstechnik.

Wie können Sie mit diesem Buch lernen?

Ganz gleich, ob Sie mit diesem Buch in Schule, Betrieb, Lehrgang oder zu Hause im „stillen Kämmerlein“ lernen, es wird Ihnen letztlich Freude machen. Warum?

Ganz einfach, weil Ihnen hier ein Buch vorgelegt wird, das in seiner Gestaltung die Grundgesetze des menschlichen Lernens beachtet. Deshalb werden Sie am Anfang jedes Kapitels über Kompetenzbeschreibungen mit dem bekannt gemacht, was Sie am Ende gelernt haben sollten.

Ein Lernbuch also!

Danach beginnen Sie sich mit den Lerninhalten auseinander zu setzen, schrittweise dargestellt, ausführlich beschrieben in den linken Spalten der Buchseiten und umgesetzt in die technisch-fachsprachliche Darstellung in den rechten Spalten der Buchseiten. Die eindeutige Zuordnung der behandelten Lerninhalte in beiden Spalten macht das Lernen viel leichter, Umblättern ist nicht mehr nötig. Zur Vertiefung stellt Ihnen der Autor Beispiele vor.

Ein unterrichtsbegleitendes Lehrbuch!

Jetzt können und sollten Sie sofort die Übungsaufgaben durcharbeiten, um das Gelernte zu festigen. Den wesentlichen Lösungsgang und das Ergebnis der Übungen hat der Autor am Ende des Buches für Sie aufgeschrieben.

Also auch ein Arbeitsbuch mit Lösungen!

Sie wollen sicher sein, dass Sie richtig gelernt haben. Deshalb bietet Ihnen der Autor am Ende jedes Unterkapitels „praxisorientierte Lernaufgaben“ zur Lernerfolgskontrolle an. Ob Sie richtig geantwortet haben, können Sie aus deren Lösungen am Ende des Buches ersehen.

Und Lernerfolgskontrolle mit Lösungen!

Trotz intensiven Lernens durch Beispiele, Übungen und Lernerfolgskontrollen verliert sich ein Teil des Wissens und Könnens wieder, wenn Sie nicht bereit sind, regelmäßig und bei Bedarf zu wiederholen!

Das will Ihnen der Autor erleichtern.

Er hat die jeweils rechten Spalten der Buchseiten so geschrieben, dass hier die wichtigsten Lerninhalte als stichwortartiger Satz, als Formel oder als Skizze zusammengefasst sind. Sie brauchen deshalb beim Wiederholen und Nachschlagen meistens nur die rechten Spalten zu lesen.

Schließlich noch Repetitorium!

Das Inhaltsverzeichnis am Anfang des Buches führt Sie in die Sachstruktur der Lerninhalte ein. Für die Suche bestimmter Begriffe steht das Sachwortverzeichnis am Ende des Buches zur Verfügung.

Selbstverständlich mit Inhaltsverzeichnis und Sachwortverzeichnis!

Möchten Sie Ihr Wissen noch erweitern und vertiefen, dann sollten Sie das Literaturangebot zu Rate ziehen.

Zusätzlich ein Literaturverzeichnis!

Sicherlich werden Sie durch die intensive Arbeit mit dem Buch auch Ihre „Bemerkungen zur Sache“ in diesem Buch unterbringen wollen. So wird es zum individuellen Arbeitsmittel, das Sie auch später gerne benutzen. Deshalb haben wir für Ihre Notizen auf den Seiten Platz gelassen.

Am Ende ist „Ihr“ Buch entstanden!

Möglich wurde dieses Lernbuch für Sie durch die Bereitschaft des Autors und die intensive Unterstützung des Verlages mit seinen Mitarbeitern. Ihnen sollten wir herzlich danken.

Beim Lernen wünsche ich Ihnen viel Freude und Erfolg!

Der Herausgeber

Manfred Mettke

Vorwort zur 9. Auflage

Wenn man in der elektrotechnischen Fachsprache definierte Begriffe physikalisch hinterfragt, so stößt man schnell auf wissenschaftliche Unkorrektheiten. Die Fachfrau oder der Fachmann bedienen sich dieser etablierten und auch eingeführten Begriffe, trotzdem sollten die Fallstricke bekannt sein. Besonders häufig treten Verständnisprobleme im Unterricht und in Vorlesungen auf, wenn Schüler:innen und Student:innen die Grundlagen der Elektrotechnik vermittelt werden.

Die 9. Auflage wurde um einen Anhang erweitert, der diese Fallstricke in der elektrotechnischen Fachsprache erläutert.

Heinz-Josef Bauckholt
Köln, Januar 2022

Vorwort zur 8. Auflage

Die 8. Auflage wurde durchgesehen und aktualisiert.

Des Weiteren wurden Lesereinschriften berücksichtigt, entsprechende Änderungen vorgenommen und Fehler behoben.

Heinz-Josef Bauckholt
Köln, November 2018

Vorwort zur 7. Auflage

Gesetzliche Vorgaben zur Ausbildung von Technikerinnen und Technikern wurden verändert, so dass nun mit dem Abschluss zum staatlich geprüften Techniker auch die Fachhochschulreife zuerkannt wird. Mit diesem Zusatz können nun staatlich geprüfte Techniker an Fachhochschulen studieren. Dies macht ein erweitertes elektrotechnisches Grundverständnis notwendig, in dem auch nichtlineare Variable elektrischer Größen mit einbezogen werden. So wird in der nun vorliegenden Neuauflage dieses Lernbuches auch die allgemeine Betrachtung von Gleichungen mit der Infinitesimalrechnung aufgenommen und an Beispielen in der Anwendung gezeigt.

Die in den vorherigen Auflagen gezeigte Herleitung der Gesetzmäßigkeiten mit linearen Variablen bleibt bestehen.

Ebenfalls neu aufgenommen wurden Kapitel über die Anwendung passiver Vierpole und Ortskurven von Impedanz-Schaltungen. Zur Berechnung linearer Netzwerke wird eine weitere Methode, das Überlagerungsgesetz, gezeigt. Weltweit haben sich die Staaten in der elektrischen Energieversorgung auf der Verbraucher-Ebene auf Netzspannungen 230 V und 400 V vertraglich festgelegt. In Beispielen und Übungen sind diese Spannungsebenen berücksichtigt worden. Die im öffentlichen Netz möglichen Netzarten werden in einem eigenen Kapitel vorgestellt.

In der Didaktik spricht man heute, bedingt durch die Handlungsorientierung im Lernbereich, nicht mehr von Lernzielen, sondern von Qualifikationen und Kompetenzen. Mit dieser Neuauflage sind allen Kapiteln Kompetenzbeschreibungen vorangestellt. Zur eigenen Kontrolle, ob die definierten Kompetenzen erreicht wurden, sind am Ende der Kapitel praxisorientierte Lernaufgaben angefügt. Diese Lernaufgaben sind themenübergreifend. Die Lösungen finden Sie ebenfalls im Lösungsteil. Einige dieser Lernaufgaben sind als Beispiele ausgeführt, da die Lösungswege recht komplex sind.

Heinz-Josef Bauckholt
Köln, Januar 2013

Inhalt

Grundlagen der Elektrotechnik

0	Einleitung	19
1	Elektrische Grundgrößen	20
1.0	Elektrizität und Elektrotechnik	20
1.1	Elektrischer Strom	21
1.1.1	Elektrische Ladung als Ursprung der Elektrizität	21
1.1.1.1	Das Elektron im Atomaufbau	22
1.1.1.2	Das Elektron als kleinste elektrische Ladung	23
1.1.1.3	Das Modell des elektrischen Feldes um eine elektrische Ladung	24
1.1.2	Stromfluss als gerichtete bewegte Ladung	25
1.1.2.1	Elektrischer Stromfluss	25
1.1.2.2	Elektronengeschwindigkeit und Stromgeschwindigkeit	26
1.1.2.3	Stromdichte	27
1.1.2.4	Wirkungen des elektrischen Stromes.	29
1.1.3	Stromarten	30
1.2	Elektrische Spannung	30
1.2.1	Energieniveau zwischen getrennten Ladungen	31
1.2.2	Spannungsgewinnung durch Energieumwandlung.	33
1.2.3	Spannungsarten	34
1.3	Elektrischer Widerstand	35
1.3.1	Stromleitung in Metallen	35
1.3.1.1	Aufbau und Gitterstruktur von Metallen	35
1.3.1.2	Das Bändermodell bei Metallen	36
1.3.1.3	Vorgang der Stromleitung	37
1.3.2	Elektrischer Widerstand als Strombegrenzer	37
1.3.2.1	Spezifischer elektrischer Widerstand und elektrische Leitfähigkeit	38
1.3.2.2	Bemessungsgleichung des Widerstandes	40
1.3.2.3	Temperaturabhängigkeit des Widerstandes	41
1.3.3	Stromleitung in Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen	45
2	Elektrischer Stromkreis	46
2.1	Aufbau des technischen Stromkreises	46
2.2	Strömungsgesetze im elektrischen Stromkreis	47
2.2.1	Ohm'sches Gesetz	47
2.2.2	Widerstandsdiagramme	49
2.2.2.0	Einführung.	49
2.2.2.1	Lineare Widerstände	50
2.2.2.2	Nichtlineare Widerstände	53
2.3	Messung von Strom und Spannung	56
2.3.1	Strommessung	56
2.3.2	Spannungsmessung	56
2.4	Aktive und passive Zwei- und Vierpole	57
2.4.0	Einführung	57
2.4.1	Zweipole	58
2.4.1.0	Definitionen	58
2.4.1.1	Spannungsquelle als aktiver Zweipol	58
2.4.1.2	Widerstand und andere „Verbraucher“ als passiver Zweipol	58

2.4.2	Vierpole	59
2.4.2.0	Definitionen	59
2.4.2.1	Ausgewählte aktive Vierpole	59
2.4.2.2	Ausgewählte passive Vierpole	60
3	Grundsaltungen für Gleichstrom	62
3.1	Reihenschaltung von Widerständen	62
3.1.1	Gesamtstrom, Gesamtspannung, Gesamtwiderstand	62
3.1.2	Verhältnissbildung zwischen Teilspannung und Teilwiderständen – Spannungsteilung	65
3.1.3	Der feste bzw. fest eingestellte unbelastete Spannungsteiler	66
3.1.4	Der stellbare unbelastete Spannungsteiler (Potenziometerschaltung)	67
3.1.5	Vergleich von Spannungspotenzialen	69
3.1.6	Grafische Lösung einer Reihenschaltung	71
3.2	Parallelschaltung von Widerständen	73
3.2.1	Gesamtspannung, Gesamtstrom, Gesamtwiderstand	73
3.2.2	Verhältnissbildung zwischen Teilströmen und Widerständen – Stromteilung	76
3.2.3	Ersatzwiderstand = Gesamtwiderstand parallel geschalteter Widerstände	78
3.2.4	Ersatzleitwert	80
3.2.5	Grafische Lösung einer Parallelschaltung	80
3.3	Ersatzspannungsquelle und Ersatzstromquelle	82
3.3.1	Ersatzspannungsquelle.	82
3.3.1.0	Einführung	82
3.3.1.1	Schaltung	82
3.3.1.2	Kennlinie und Kenngrößen.	83
3.3.2	Ersatzstromquelle.	87
3.3.2.0	Einführung	87
3.3.2.1	Schaltung	87
3.3.2.2	Kennlinie und Kenngrößen.	87
3.4	Gemischte Schaltungen von Widerständen	89
3.4.1	Reihen- und Parallelschaltungen von Widerständen in einer Schaltung	89
3.4.2	Belasteter Spannungsteiler	93
3.4.2.0	Einführung	93
3.4.2.1	Fester belasteter Spannungsteiler	93
3.4.2.2	Stellbarer belasteter Spannungsteiler (Potenziometerschaltung)	95
3.4.3	Brückenschaltung.	97
3.4.3.0	Einführung	97
3.4.3.1	Die abgegliche Brückenschaltung	97
3.4.3.2	Die unabgegliche Brückenschaltung	99
3.5	Netzwerke und ihre Berechnungsmethoden	99
3.5.0	Einführung	99
3.5.1	Stern-Dreieck-Umwandlung	99
3.5.2	Maschen- und Knotenpunktgleichungen	107
3.5.3	Ersatzspannungs- und Ersatzstromquellen – Umwandlung	110
3.5.4	Überlagerungssatz	115
3.5.5	Passive Vierpole aus Widerstandsnetzwerken	122
3.5.5.0	Einführung	122
3.5.5.1	Aufstellung von Vierpolgleichungen	123
3.5.5.2	Definition und Kennzeichnung der Vierpolparameter	126
3.5.5.3	Ermittlung der Bauelementdaten einer Vierpol-Innenschaltung aus den Daten der Vierpolparameter	129
3.6	Elektrische Arbeit und Leistung	132
3.6.1	Elektrische Arbeit	132

3.6.2	Elektrische Leistung	134
3.6.2.1	Leistungshyperbel	137
3.6.2.2	Nutzleistung und Verlustleistung	140
3.6.2.3	Wirkungsgrad	143
3.6.2.4	Leistungsanpassung	144
3.7	Umwandlung elektrischer Energie in andere Energien und umgekehrt	148
3.7.0	Einführung	149
3.7.1	Elektrische Energie in mechanische Energie	150
3.7.2	Elektrische Energie in thermische Energie	151
3.7.3	Elektrische Energie in optische Energie	152
3.7.4	Elektrische Energie in chemische Energie	153
3.7.4.0	Einführung	153
3.7.4.1	Elektrolyse und Leitungsmechanismus in Flüssigkeiten	153
3.7.4.2	Elektrochemische Spannungsquellen.	157
3.7.4.2.1	Galvanische Elemente (Primärelemente)	157
3.7.4.2.2	Akkumulatoren (Sekundärelemente)	161
	Praxisorientierte Lernaufgaben	168
4	Das elektrische Feld und der Kondensator	172
4.0	Einführung	172
4.1	Erscheinungsformen des elektrischen Feldes	172
4.1.1	Elektrische Felder zwischen elektrischen Ladungen – elektrostatische Felder	172
4.1.2	Elektrische Felder in und zwischen Strom führenden Leitern	173
4.1.2.0	Einführung	173
4.1.2.1	Felder in Strom führenden Leitern	173
4.1.2.2	Felder zwischen Strom führenden Leitern.	174
4.2	Die elektrische Feldstärke als Kenngröße des elektrischen Feldes	175
4.3	Kräfte im elektrischen Feld und das Coulomb'sche Gesetz	177
4.4	Spannungspotenziale in elektrischen Feldern	179
4.4.1	Spannung im elektrischen Feld	179
4.4.2	Spannung zwischen getrennten Ladungen	180
4.5	Ladungsspeicherung und Kondensator	181
4.6	Isolierstoffe im elektrischen Feld	185
4.6.1	Ladungsverschiebung in Isolierstoffen oder die elektrische Influenz.	185
4.6.2	Feldkonstante des elektrischen Feldes	186
4.6.3	Bemessungsgleichung der Kapazität	188
4.7	Schaltungen von Kondensatoren	190
4.7.1	Reihenschaltung von Kondensatoren	190
4.7.2	Parallelschaltung von Kondensatoren.	192
4.7.3	Reihen- und Parallelschaltungen von Kondensatoren in einer Schaltung	193
4.8	Schaltvorgänge am Kondensator	194
4.8.1	Einschalt- oder Ladevorgang am Kondensator	194
4.8.2	Ausschalt- oder Entladevorgang am Kondensator	201
4.9	Gespeicherte Energie eines geladenen Kondensators und die Energie des elektrischen Feldes	205
	Praxisorientierte Lernaufgaben	209
5	Das magnetische Feld	210
5.1	Erscheinungsformen des magnetischen Feldes.	210
5.1.1	Das magnetische Feld eines Natur- oder Dauermagneten	210
5.1.2	Das magnetische Feld eines stromdurchflossenen Leiters	211

5.1.3	Das magnetische Feld einer stromdurchflossenen Spule oder eines Elektromagneten	212
5.1.4	Eigenschaften magnetischer Felder	212
5.2	Kenngrößen des magnetischen Feldes	213
5.2.1	Magnetfluss oder magnetischer Fluss	213
5.2.2	Magnetflussdichte oder magnetische Flussdichte	213
5.2.3	Elektrische Durchflutung	214
5.2.4	Magnetische Feldstärke	215
5.2.5	Magnetischer Widerstand und magnetischer Leitwert	217
5.3	Magnetisierungskennlinien	222
5.3.1	Die Magnetflussdichte als Funktion der magnetischen Feldstärke	222
5.3.2	Magnetisierungskennlinie einer Luftspule	222
5.3.3	Magnetisierungskennlinie einer Spule mit Kern aus ferromagnetischen Werkstoffen	223
5.3.3.1	Aufbau der Magnetisierungskennlinien ferromagnetischer Werkstoffe	223
5.3.3.2	Magnetisierungskennlinien magnetischer Werkstoffe beim Ummagnetisierungsvorgang oder die magnetische Hysterese	226
5.3.3.3	Arten und Aussteuerung von Hystereseschleifen	227
5.4	Magnetisierungsarbeit und Magnetisierungsverluste	229
5.4.1	Magnetisierungsarbeit	229
5.4.2	Magnetisierungsverluste	230
5.5	Der magnetische Kreis	231
5.6	Kräfte im Magnetfeld	235
5.6.1	Kräfte an magnetischen Polen	236
5.6.2	Kräfte zwischen magnetischen Feldern	239
5.6.2.1	Magnetflussdichte und Feldstärke des magnetischen Feldes eines stromdurchflossenen Leiters	239
5.6.2.2	Überlagerung von magnetischen Feldern parallel verlaufender stromdurchflossener Leiter	242
5.6.2.3	Kräfte zwischen dem magnetischen Feld eines stromdurchflossenen Leiters oder einer Spule und dem magnetischen Feld eines Dauermagneten – Motorprinzip	243
5.6.2.4	Kräfte zwischen den magnetischen Feldern stromdurchflossener Leiter	246
5.7	Magnetische Induktion oder Spannungserzeugung durch Veränderung magnetischer Felder	248
5.7.1	Bewegung eines stromlosen Leiters im konstanten magnetischen Feld – Generatorprinzip	249
5.7.2	Bewegung eines stromdurchflossenen Leiters im konstanten magnetischen Feld – Generatorprinzip	250
5.7.3	Induktionsgesetz bei bewegten Leitern und Spulen im konstanten magnetischen Feld	251
5.7.3.0	Einführung	251
5.7.3.1	Induktionsgesetz bei geradliniger Bewegung eines Leiters oder einer Spule	251
5.7.3.2	Induktionsgesetz bei Rotationsbewegung eines Leiters oder einer Spule	254
5.7.4	Induktionsgesetz bei ruhenden Leitern oder Spulen im zeitlich veränderlichen magnetischen Feld	255
5.7.4.1	Induktivität, die magnetische Kenngröße einer Spule	257
5.7.4.2	Energie des Magnetfeldes	260
5.7.4.3	Reihen- und Parallelschaltung von Induktivitäten	261
5.7.4.4	Schaltvorgänge an Spulen	262

5.7.5 Transformatorprinzip	264
Praxisorientierte Lernaufgabe	270
6 Grundsaltungen für Wechselspannungen	271
6.1 Darstellung und Kenngrößen von Wechselspannung und Wechselstrom	271
6.1.0 Einführung	271
6.1.1 Zeiger- und Liniendiagramme	271
6.1.2 Kenngrößen von Wechselspannung und Wechselstrom	273
6.1.3 Zeitliche Betrachtung von Wechselspannungen und Wechselströmen	278
6.1.4 Überlagerung von Wechselspannungen und die Fourier-Analyse	281
6.2 Verhalten der idealen Grundschaltelemente an Wechselspannung	285
6.2.1 Idealer Wirkwiderstand an Wechselspannung	285
6.2.2 Idealer Kondensator an Wechselspannung	286
6.2.3 Ideale Spule an Wechselspannung	293
6.3 Komplexe Rechnung und die Anwendung im Wechselstromkreis	298
6.3.1 Komplexe Zahlen – Komplexe Zahlenebene – Rechenregeln	298
6.3.2 Elektrische Größen in komplexer Schreibweise	301
6.4 Reihenschaltungen im Wechselstromkreis	302
6.4.1 Widerstand und Kondensator	307
6.4.2 Widerstand und Spule	307
6.4.3 Kondensator und Spule	310
6.4.4 Widerstand, Kondensator und Spule	312
6.5 Parallelschaltungen im Wechselstromkreis	316
6.5.1 Widerstand und Kondensator	316
6.5.2 Widerstand und Spule	320
6.5.3 Kondensator und Spule	323
6.5.4 Widerstand, Kondensator und Spule	325
6.6 Gemischte Schaltungen im Wechselstromkreis – Impedanzschaltungen	328
6.7 Resonanz im Wechselstromkreis	337
6.7.1 Begriff der Grenzfrequenz	337
6.7.2 Begriff der Resonanz und der Resonanzfrequenz	340
6.7.3 Reihenresonanzkreis	341
6.7.3.0 Einführung	341
6.7.3.1 Idealer Reihenresonanzkreis	341
6.7.3.2 Realer Reihenresonanzkreis	343
6.7.4 Parallelresonanzkreis	345
6.7.4.0 Einführung	345
6.7.4.1 Idealer Parallelresonanzkreis	345
6.7.4.2 Realer Parallelresonanzkreis	346
6.8 Impedanzschaltungen und das Verhalten bei variablen Frequenzen – Ortskurven	348
6.8.0 Einführung	348
6.8.1 Ortskurven von Reihenschaltungen	349
6.8.2 Ortskurven von Parallelschaltungen	351
6.8.3 Ortskurve einer gemischten Impedanzschaltung	353
6.9 Elektrische Arbeit und elektrische Leistung im Wechselstromkreis	357
6.9.1 Leistung im Wechselstromkreis	357
6.9.1.0 Einführung	357
6.9.1.1 Wirkleistung	357
6.9.1.2 Blindleistung	360
6.9.1.3 Wirk-, Blind- und Scheinleistung im Wechselstromkreis	361
6.9.2 Blindleistungskompensation oder Leistungsfaktorverbesserung	367
6.9.3 Arbeit im Wechselstromkreis	370
Praxisorientierte Lernaufgaben	372

7 Mehrphasenwechselfspannung – Mehrphasenwechselstrom (Drehstrom)	378
7.1 Erzeugung von Mehrphasenwechselfspannung	378
7.2 Dreiphasenwechselfspannung	379
7.2.1 Spannungserzeuger in Sternschaltung	381
7.2.2 Spannungserzeuger in Dreieckschaltung	382
7.2.3 Verbraucher in Sternschaltung	382
7.2.4 Verbraucher in Dreieckschaltung	385
7.3 Spannungsnetze – öffentliche Netze	389
Praxisorientierte Lernaufgaben	392

Bauelemente der Elektrotechnik – Grundschaltelemente

Vorbemerkung zu den Kapiteln 8 bis 10	395
8 Lineare technische Widerstände	397
8.0 Einleitung	397
8.1 Bauarten technischer Widerstände	397
8.1.0 Einführung	397
8.1.1 Festwiderstände	397
8.1.1.0 Einführung	397
8.1.1.1 Schichtwiderstände	398
8.1.1.2 Drahtwiderstände	399
8.1.2 Stellbare Widerstände (Potenziometer)	400
8.1.2.0 Einführung	400
8.1.2.1 Schichtpotenziometer	400
8.1.2.2 Drahtpotenziometer	401
8.2 Daten und Normen technischer Widerstände	402
8.2.1 Technische Daten	402
8.2.2 Normung	403
8.2.2.1 Normung der Widerstandswerte	403
8.2.2.2 Normung der Kennzeichnung	404
9 Technische Kondensatoren	409
9.1 Bauarten technischer Kondensatoren	409
9.1.0 Einführung	409
9.1.1 Wickelkondensatoren	409
9.1.1.0 Einführung	409
9.1.1.1 MP-Kondensatoren	409
9.1.1.2 MK-Kondensatoren	410
9.1.2 Keramikkondensatoren	411
9.1.3 Elektrolytkondensatoren	411
9.1.3.0 Einführung	411
9.1.3.1 Aluminium-Elektrolytkondensatoren	411
9.1.3.2 Tantal-Elektrolytkondensatoren	412
9.1.4 Stellbare Kondensatoren (Drehko)	413
9.2 Daten und Normen technischer Kondensatoren	413
9.2.1 Technische Daten	413
9.2.2 Normung	415
9.2.2.1 Normung der Kapazitätswerte	415
9.2.2.2 Normung der Kennzeichnung	416

10 Technische Spulen	419
10.1 Bauarten technischer Spulen	419
10.1.0 Einführung	419
10.1.1 Luftspulen	419
10.1.2 Spulen mit Kern aus magnetischem Werkstoff	424
10.2 Daten technischer Spulen	426
Praxisorientierte Lernaufgaben	426
Lösungen aller Übungen und Lernaufgaben	428
Anhang	471
Literaturhinweise:	
I. Fachhochschulen für Technik	477
II. Fachhochschulen	477
Sachwortverzeichnis	479

Grundlagen der Elektrotechnik

0 Einleitung

Dieses Buch soll den Leser in die Problemstellungen der Elektrotechnik einführen. Vorausgesetzt werden dabei nur solche Erkenntnisse, die man durch den täglichen Umgang mit der Elektrotechnik erhält. Bei der Darlegung physikalischer Grundlagen werden die z. Z. gültigen Modellvorstellungen verwendet und für die Erklärungen herangezogen. Dieses Buch versteht sich als Grundlagenbuch für alle weiteren elektrotechnischen Fachgebiete dieser Lernbuchreihe.

Elektrotechnische Vorgänge sind nur schwer ohne mathematische Methoden erklärbar. Der in diesem Buch verwendete Umfang mathematischer Methoden und Gesetze ist im Bild 0.–2 dargestellt.

In einigen Fällen wären für die Ableitungen von Gleichungen oder Formeln Kenntnisse der Differenzial- und Integralrechnung erforderlich. Um ohne diese auskommen zu können, wird der Lösungsablauf dann durch gleichwertige mathematische und grafische Methoden ersetzt, die zwar nicht immer ganz exakt sind, dafür aber den Lösungsweg überschaubarer machen. Der Einsatz der komplexen Rechnung zur Berechnung von Wechselstromkreisen bringt erhebliche Vorteile, da schon bei einfachen Schaltungen mit Wirk- und Blindwiderständen im Wechselstromkreis mathematische Ausdrücke auftreten, die sonst nur mit großem Aufwand zu lösen sind. Die komplexe Rechnung bringt hier wesentliche Vereinfachungen.

Der Techniker benutzt in vielen Fällen Diagramme und Kennlinien zur Lösung elektrischer Probleme. In diesem Buch wird auf die Einführung in diese Arbeitsweise besonderen Wert gelegt. Die Definition elektrischer Grundgrößen erfolgt üblicherweise durch Definitionsgleichungen, die durch Bemessungsgleichungen ergänzt werden können. Die Kontrolle von Gleichungsumstellungen wird durch Einheitengleichungen vorgenommen. Dieses Schema wiederholt sich bei allen Betrachtungen elektrischer Größen.

In einigen Kapiteln werden Zusammenhänge und Formeln schrittweise ergänzt und erweitert, soweit es die jeweiligen Erkenntnisse zulassen. Es ist deshalb möglich, dass die end-

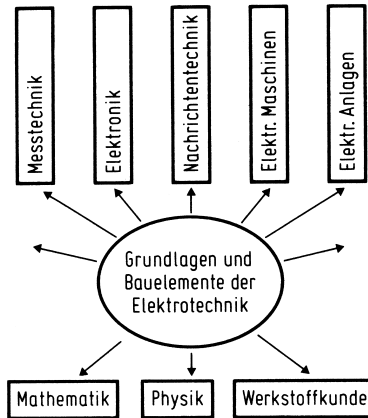


Bild 0. – 1
Grundlagen der Elektrotechnik im Beziehungsfeld der Anwendungsgebiete

gültige Gleichung erst nach mehreren Kapiteln vorliegt.

Die oben genannten Aussagen zur Herleitung von Gleichungen und Gesetzmäßigkeiten zur Elektrotechnik bezogen sich auf **lineare** Variable und konstante Parameter. Dies ist eine spezielle Betrachtungsweise. Sind Variable nicht linear, so ist der Einsatz ausgewählter Bereiche der **Infinitesimalrechnung** notwendig. Die mit dieser mathematischen Denkweise herbeigeleiteten Gleichungen sind somit allgemein gültige Aussagen elektrotechnischer Gesetze und Regeln.

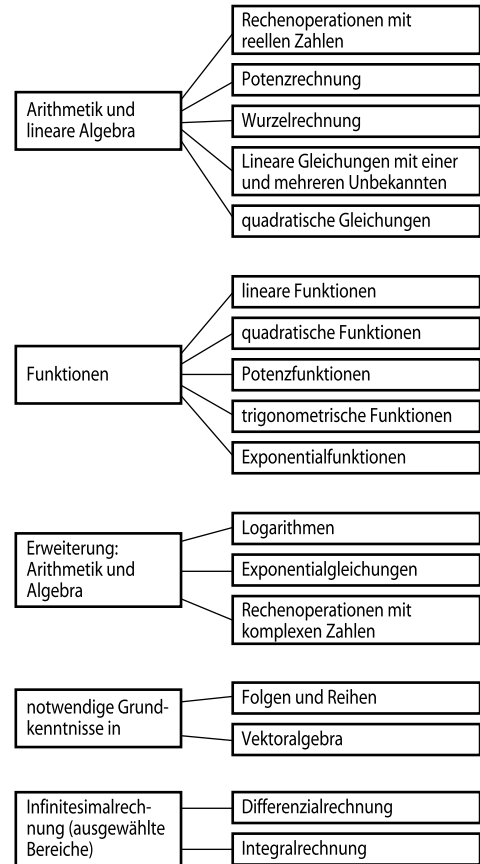


Bild 0. – 2
Strukturplan der als notwendig erachteten Mathematik

1 Elektrische Grundgrößen

1.0 Elektrizität und Elektrotechnik

Die Elektrotechnik ist ein wichtiger Bestandteil unserer Zivilisation. Wir benutzen die Begriffe Spannung, Strom, Widerstand usw. als Aussagen über Elektrotechnik, ohne diese Begriffe allerdings immer genau erklären zu können.

Die Elektrotechnik ist die technische Anwendung der Elektrizität. An dieser Stelle sei da-

rauf hingewiesen, dass im Buch „Werkstoffe der Elektrotechnik“ (Fischer) dieser Lernbuchreihe weitere Informationen zur Vertiefung der Kenntnisse über die Elektrizität zu finden sind. In diesem Buch werden nur solche physikalischen Zusammenhänge erklärt, die für das Verständnis der Elektrotechnik notwendig sind.

Anhand eines Stromkreises werden nun die elektrischen Grundgrößen hergeleitet.

Der Stromkreis besteht aus einer Spannungsquelle, einem Verbraucher, Verbindungsleitungen und einem Schalter. Wird der Schalter geschlossen, dann leuchtet die Glühlampe auf und wird warm. Wärme entsteht bekanntlich entweder bei einem Verbrennungsvorgang oder durch Reibung. Ein Verbrennungsvorgang ist hier jedoch nicht möglich, da dem Glaskolben der Glühlampe bei der Herstellung der Sauerstoff entzogen wurde. Es bleibt somit nur der Vorgang der Reibung. Diese entsteht durch die Berührung von Stoffen bei Bewegung. In der Glühlampe und damit im gesamten Kreis muss also ein Bewegungsablauf vorliegen. Im Kreis fließt oder strömt „etwas“. Es wird als elektrischer Strom bezeichnet.

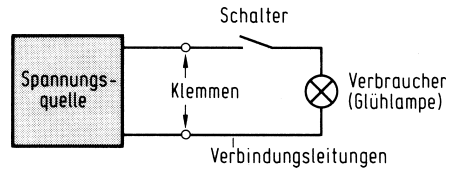


Bild 1.0 – 1 Elektrischer Stromkreis

1.1 Elektrischer Strom

Nach der Durcharbeitung dieses Kapitels haben Sie die **Kompetenz . . .**

- aus den Wirkungen des elektrischen Stromes Anwendungen abzuleiten,
- den elektrischen Strom als bewegte elektrische Ladungsmenge zu beschreiben,
- zu erläutern, dass die Ursache der Elektrizität in den Elementarladungen des Atoms begründet ist.

1.1.1 Elektrische Ladung als Ursprung der Elektrizität

Beim elektrischen Stromfluss muss nach den bisherigen Erkenntnissen Materie im Verbraucher und in den Verbindungsleitungen fließen. Beide Komponenten des Stromkreises sind aus Metallen aufgebaut. Metalle sind feste Stoffe und haben eine kristalline Anordnung der Atome. Die fließenden oder strömenden Stoffteilchen müssen demnach sehr klein sein, um sich durch die Zwischenräume im Kristallgitter bewegen zu können.

Es kann sich somit nur um Atomteilchen handeln. Gleichzeitig muss die Spannungsquelle treibend auf diese Teilchen einwirken, um die

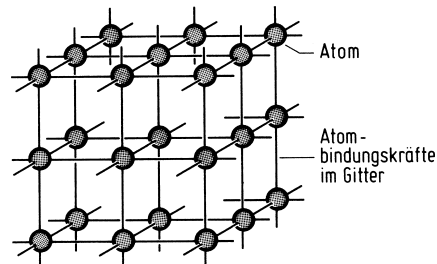


Bild 1.1.1 – 1 Kristallgitter der Atome

Strömung zu bewirken. Bei der Untersuchung der Verbindungsleitungen und Verbraucher auf kleine bewegliche Atomteilchen für den Strömungsvorgang stößt man auf freie Elektronen also die gesuchten Atomteilchen.

Um die Strömung der Elektronen weiter ergründen zu können, ist zunächst das Verhalten des Elektrons im Atomaufbau zu erläutern.

1.1.1.1 Das Elektron im Atomaufbau

Ausgehend vom Atommodell werden die Eigenschaften des Atoms, welche für die Elektrizität wichtig sind, herausgestellt. Beim einfachen Atommodell kreisen um einen Kern Teilchen auf verschiedenen konstanten Bahnen. Die kreisenden Atomteilchen werden als Elektronen bezeichnet.

Bei der Betrachtung dieses Atommodells drängen sich folgende Fragen auf:

1. Was treibt die Elektronen auf den einzelnen Bahnen an?
2. Was hält die Elektronen auf dem bleibenden Abstand zum Kern?

Die Antwort ist: **Elektrische Kräfte.**

Massenanziehung und magnetische Kräfte scheiden aus, da keine Berechnung zum Ergebnis führt.

Die elektrischen Kräfte waren schon im Altertum den Griechen bekannt, nur war ihnen eine Deutung dieser Vorgänge noch nicht möglich. Sie beobachteten z. B. dass an Wolle geriebener Bernstein, Papierschnitzel und Wollflusen anzieht. Das Wort „Elektron“ stammt daher aus dem Griechischen.

Bei der Untersuchung elektrischer Kräfte stellt man Anziehung und Abstoßung fest. Diese Erkenntnis lässt nur den einen Schluss zu, dass es zwei Arten von Elektrizität geben muss.

Anziehung erfolgt zwischen ungleicher Elektrizität und Abstoßung zwischen gleicher Elektrizität. Die beiden Elektrizitätsarten werden als positive und negative Elektrizität bezeichnet. Was nun Elektrizität exakt ist, weiß man jedoch noch nicht.

Zurück zum Atommodell:

Die Elektronen sind Sitz der negativen Elektrizität und der Atomkern ist Sitz der positiven Elektrizität. Im Atomkern selbst sind es die Protonen, welche die Elektrizität beinhalten.

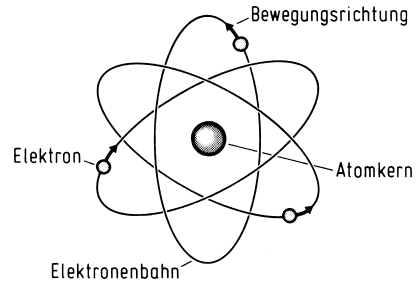


Bild 1.1.1.1 – 1 Atommodell

Das Elektron ist Sitz der negativen Elektrizität.
Das Proton ist Sitz der positiven Elektrizität.

1.1.1.2 Das Elektron als kleinste elektrische Ladung

Die negative Elektrizität des Elektrons bezeichnet man als negative Ladung. Ein Elektron ist nicht teilbar, somit hat das Elektron die kleinste elektrische Ladung. Diese ist ständig an das Elektron gebunden.

Die elektrische Ladung ist eine physikalische Größe und hat das Formelzeichen Q .

Als Einheit ist definiert:

Die kleinste elektrische Ladung, die in der Natur vorkommt, ist die eines Elektrons. Sie wird als Elementarladung bezeichnet und hat den folgenden Betrag:

Bereits der französische Physiker Coulomb (1736–1806) hatte diese elektrische Ladung gemessen, allerdings ohne zu wissen, dass sie sich im Elektron befindet.

Der Betrag der Ladung eines Protons ist gleich dem eines Elektrons:

Jede elektrische Ladung ist ein ganzzahliges Vielfaches der Ladung eines Elektrons oder Protons:

Für den Atomaufbau bedeuten die bisherigen Erkenntnisse:

Die Zentripetalkräfte zwischen Atomkern und Elektronen sind elektrische Anziehungskräfte zwischen elektrischen Ladungen. Man spricht von Coulomb'schen Kräften. Für ihre Berechnung gilt:

Die Bewegungen der Elektronen auf den Bahnen, ohne die das Atom nicht bestehen kann, lassen sich mit der nachfolgenden Modellanschauung erklären (es ist eine Modellanschauung, die nicht in allen Fällen gilt):

Das Elektron besitzt die kleinste elektrische Ladung.

Elektrische Ladung Q

$$|Q| = A \cdot s \text{ (Amperesekunde)} = C \text{ (Coulomb)}$$

(1.1.1.2 – 1)

$$\begin{aligned} (Q_-)_{\min} &= e = \text{Elementarladung} \\ &= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s} \\ (Q_-)_{\min} &= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \end{aligned}$$

(1.1.1.2 – 2)

$$(Q_+)_{\min} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$Q = n \cdot e \quad \text{mit } n \in \mathbf{N}$$

(1.1.1.2 – 3)

$$F = k \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

(1.1.1.2 – 4)

Q_1 = Ladung des Elektrons

Q_2 = Ladung des Protons

r = Abstand: Kern–Elektron

k = Konstante (wird in den Abschnitten 4.3 und 4.6 beschrieben)

Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab. Dies gilt auch für im Atomkern angeordnete Ladungen. Die Abstoßung erzeugt eine Drallbewegung der positiven Ladungen, die zu einer Art Umlauf führen. Die Elektronen als Gegenpartner der positiven Ladung werden von diesen Umlaufbewegungen auf ihrer Bahn mitgezogen.

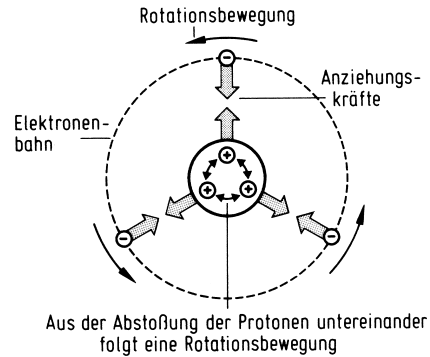


Bild 1.1.1.2 – 1
Schematische Darstellung zur Umlaufbewegung der Elektronen

1.1.1.3 Das Modell des elektrischen Feldes um eine elektrische Ladung

Da elektrische Kräfte über große Entfernungen und ohne Übertragungsmedium wirken können, wird dies schematisch, wie die nebenstehenden Bilder zeigen, dargestellt. Jede Ladung ist von einem elektrischen Feld umgeben. Dargestellt wird dieses durch Feldlinien. Die elektrische Ladung wird dabei kugelförmig angenommen. Bei positiven Ladungen treten die elektrischen Feldlinien senkrecht aus der Oberfläche der Ladungen aus. Bei negativen Ladungen treten sie senkrecht in die Oberfläche ein.

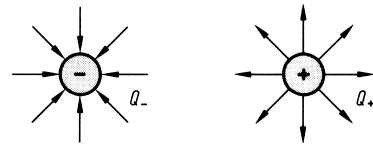


Bild 1.1.1.3 – 1 Elektrische Felder um Ladungen

Mit den Feldlinien um elektrische Ladungen lassen sich Anziehung und Abstoßung überschaubar darstellen und anschaulich erklären.

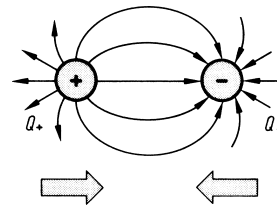


Bild 1.1.1.3 – 2 Anziehung ungleichnamiger Ladungen

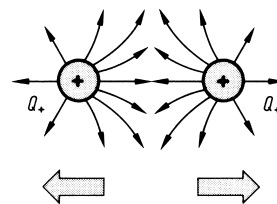


Bild 1.1.1.3 – 3 Abstoßung gleichnamiger Ladungen

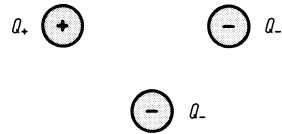
Zusammenfassend ergeben die bisherigen Erkenntnisse folgende Aussage:

Die elektrischen Ladungen mit ihren wechselwirkenden Erscheinungen stellen das Wesensmerkmal der Elektrizität dar. Auf diesem Fundament ist die gesamte Elektrotechnik aufgebaut.

Übung 1.1.1.3 – 1

Skizzieren Sie das elektrische Gesamtfeld der gegebenen Anordnung elektrischer Ladungen.

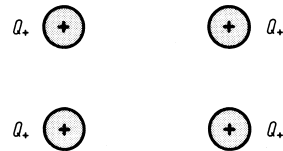
Lösung:



Übung 1.1.1.3 – 2

Skizzieren Sie das elektrische Gesamtfeld der gegebenen Anordnung elektrischer Ladungen.

Lösung:



1.1.2 Stromfluss als gerichtete bewegte Ladung

1.1.2.1 Elektrischer Stromfluss

An dieser Stelle wird die Aussage, dass bei einem Stromfluss Elektronenbewegung auftritt, wieder aufgegriffen und daraus die Definition des elektrischen Stromes abgeleitet, wobei die Menge der Elektronen als Ladungsmenge bezeichnet wird:

Elektrischer Strom =
gerichtete bewegte Ladung =
gerichtete Elektronenbewegung

Die elektrische Stromstärke (kurz: der Strom) ist eine physikalische Größe mit dem Formelzeichen I . Die Definitionsgleichung lautet:

Elektrische Stromstärke I

$$I = \frac{\text{Ladung}}{\text{Zeit}} = \frac{Q}{t} = \frac{n \cdot e}{t} \tag{1.1.2.1 - 1}$$

Die Einheit ist nach dem französischen Physiker Ampère (1775–1836) benannt. Sie ergibt sich aus der Definitionsgleichung:

$$[I] = \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{s}} = \text{A (Ampere)} \tag{1.1.2.1 - 2}$$

Für ein Ampere gilt:

$$1 \text{ A} = \frac{6,25 \cdot 10^{18} \cdot e}{\text{s}} = \frac{6,25 \cdot 10^{18} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s}}{\text{s}}$$

Gebräuchliche Vielfache bzw. Teile der Einheit Ampere sind:

$$\begin{aligned} 1 \text{ kA} &= 1 \cdot 10^3 \text{ A} & 1 \text{ nA} &= 1 \cdot 10^{-9} \text{ A} \\ 1 \text{ mA} &= 1 \cdot 10^{-3} \text{ A} & 1 \text{ pA} &= 1 \cdot 10^{-12} \text{ A} \\ 1 \text{ } \mu\text{A} &= 1 \cdot 10^{-6} \text{ A} \end{aligned}$$

Sind die Variablen Q und t in der Gleichung für den Strom nicht konstant, so gilt allgemein für den Strom I :

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (1.1.2.1 - 3)$$

Die Aussagen in der Gleichung ergeben folgenden Funktionszusammenhang:

Die Änderung der Ladungsmenge hat eine Stromänderung als Folge.

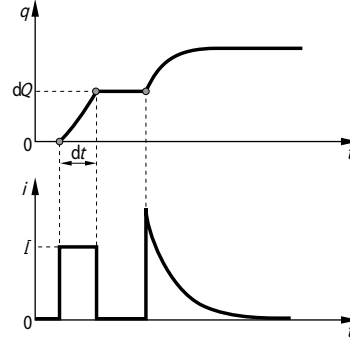


Bild 1.1.2.1-1 Die Stromfunktion in Abhängigkeit von der Änderung der Ladungsmenge

1.1.2.2 Elektronengeschwindigkeit und Stromgeschwindigkeit

Man kann davon ausgehen, dass in elektrischen Leitungen frei bewegliche Elektronen zur Verfügung stehen. Diese Aussage wird in Abschnitt 1.3.1.1 noch genauer behandelt. Die Berechnung der vorhandenen Menge frei beweglicher Elektronen in den Verbindungsleitungen und Verbrauchern eines Stromkreises ist wie folgt möglich:

$$Q = n' \cdot e \cdot V = n' \cdot e \cdot A \cdot l \quad (1.1.2.2 - 1)$$

n' = die Anzahl der Elektronen bezogen auf das Werkstoffvolumen der Verbindungsleitungen und der Verbraucher

e = Elementarladung

V = Volumen der Verbindungsleitungen und Verbraucher

V = Fläche A · Länge l

Wird vorstehende Gleichung in die Definitionsgleichung des Stromes eingesetzt, dann ergibt sich:

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{n' \cdot e \cdot A \cdot l}{t} = n' \cdot e \cdot A \cdot \frac{l}{t}$$

Der Term l/t beschreibt die Elektronengeschwindigkeit v , also die Geschwindigkeit der strömenden Ladungen.

$$\frac{l}{t} = v = \text{Elektronengeschwindigkeit}$$

Die Gleichung des Stromes kann nun in folgender Form geschrieben werden:

$$I = n' \cdot e \cdot A \cdot v$$

Durch Umstellung ergibt sich daraus eine Berechnungsformel für die Elektronengeschwindigkeit:

$$v = \frac{I}{n' \cdot e \cdot A} \quad (1.1.2.2 - 2)$$

Beispiel 1.1.2.2. – 1

Eine Kupferleitung mit einem Querschnitt $A = 1,5 \text{ mm}^2$ und einer Elektronenanzahl $n' = 8,47 \cdot 10^{22} \text{ Elektronen/cm}^3$ wird von einem Strom $I = 10 \text{ A}$ durchflossen. Gesucht ist die Elektronengeschwindigkeit.

Lösung:

$$\begin{aligned} v &= \frac{I}{n' \cdot e \cdot A} \\ &= \frac{10 \text{ A}}{8,47 \cdot 10^{22} \frac{\text{Elektronen}}{\text{cm}^3} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{Elektronen}} \cdot 1,5 \text{ mm}^2} \\ &= \frac{10 \text{ A}}{8,47 \cdot 10^{22} \frac{\text{Elektronen}}{10^3 \text{ mm}^3} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{Elektronen}} \cdot 1,5 \text{ mm}^2} \\ v &= \underline{\underline{0,491 \frac{\text{mm}}{\text{s}}}} \end{aligned}$$

In den meisten Fällen liegt die Elektronengeschwindigkeit im Bereich:

Durchschnittliche Elektronengeschwindigkeit

$$v = 0,1 \dots 10 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Versuche zeigen jedoch, dass die Wirkungen des elektrischen Stromes mit Lichtgeschwindigkeit c auftreten. Der Strom ist also wesentlich schneller, als die Elektronengeschwindigkeit vermuten lässt. Die strömenden Elektronen stoßen sich nämlich wie bei einer Kettenreaktion an und geben so ihre Energie weiter. Die auftretenden Energiestöße erfolgen dabei mit Lichtgeschwindigkeit.

Stromgeschwindigkeit = Lichtgeschwindigkeit c

$$c \approx 300\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}} \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (1.1.2.2 - 3)$$

Übung 1.1.2.2 – 1

Bei einem Kurzschluss fließt in einer Kupferleitung mit einem Durchmesser $d = 2 \text{ mm}$ ein Strom $I_k = 100 \text{ A}$. Berechnen Sie die Elektronengeschwindigkeit.

Lösung:

1.1.2.3 Stromdichte

Da der physikalische Vorgang der Stromleitung recht komplex ist, bedient man sich der

schematischen Darstellung durch Stromfäden. Diese durchsetzen den gesamten Querschnitt einer Leitung gleichmäßig und sind senkrecht zur Querschnittsfläche zu betrachten.

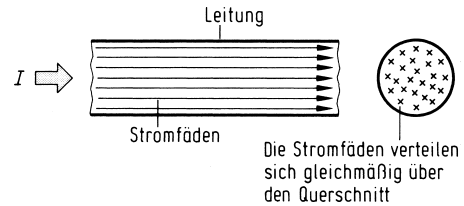


Bild 1.1.2.3 – 1
Schematische Darstellung der Stromfäden beim Stromdurchgang

Die angenommene gleichmäßige Verteilung des Stromes über die Querschnittsfläche der Leitung ermöglicht die Berechnung der Stromdichte. Sie hat das Formelzeichen J . Es gilt die Definitionsgleichung:

$$\text{Stromdichte} = \frac{\text{Strom}}{\text{Querschnittsfläche}}$$

$$J = \frac{I}{A} \quad (1.1.2.3 - 1)$$

Als Einheit ergibt sich:

$$[J] = \frac{\text{A}}{\text{m}^2} \quad (1.1.2.3 - 2)$$

Allgemein gilt die Aussage:

Der Strom I ist ein Skalar, die Stromdichte J ein Vektor.

Beispiel 1.1.2.3 – 1

Ein Strom $I = 12 \text{ A}$ fließt durch eine Leitung mit einem Querschnitt $A = 1,5 \text{ mm}^2$. Die Stromdichte J ist zu berechnen.

Lösung:

$$\begin{aligned} J &= \frac{I}{A} \\ &= \frac{12 \text{ A}}{1,5 \text{ mm}^2} \\ &= 8 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \\ &= 8 \frac{\text{A}}{(10^{-3} \text{ m})^2} \\ J &= \underline{\underline{8 \cdot 10^6 \frac{\text{A}}{\text{m}^2}}} \end{aligned}$$

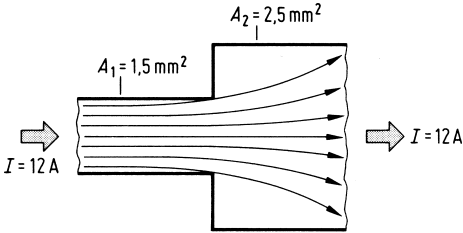
Übung 1.1.2.3 – 1

Der Draht einer Kupferspule (Drahtdurchmesser $d = 0,5 \text{ mm}$) kann maximal eine Stromdichte $J = 10 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ führen. Berechnen Sie den maximalen Strom, der in der Spule fließen darf.

Lösung:

Übung 1.1.2.3 – 2

Die Stromfäden in einem Leitungsstück verteilen sich gemäß Bild. Berechnen Sie die in den Leitungsstücken vorhandene Stromdichte J_1 und J_2 .



Lösung:

1.1.2.4 Wirkungen des elektrischen Stromes

Bei einer stromdurchflossenen Leitung sind folgende Wirkungen zu beobachten:

- Um eine stromdurchflossene Leitung bildet sich ein magnetisches Feld. Die Ursache liegt bei den Elektronen. Um jedes Elektron bildet sich nämlich während der Bewegung zusätzlich zum stets vorhandenen elektrischen Feld ein magnetisches Feld. Beide Felder stehen senkrecht zueinander. Die magnetische Feldrichtung ist abhängig von der Bewegungsrichtung des Elektrons. Die magnetischen Felder der einzelnen Elektronen summieren sich zum Gesamtfeld um den stromdurchflossenen Leiter. Die Ursache der Bildung dieser magnetischen Felder ist noch nicht endgültig geklärt.
- Wärmewirkung beim Stromdurchgang. Sie wurde bereits erwähnt und entsteht durch die Reibung der strömenden Elektronen am Atomgitter.
- Fließt Strom durch leitfähige Flüssigkeiten, dann erfolgen chemische Reaktionen und es tritt z. B. eine Zersetzung ein. (Siehe Abschnitt 3.7.4.1.)

Trägt man den bei einer Ladungsverschiebung auftretenden Strom als Funktion der Zeit auf, dann entspricht die Fläche unter der Geraden der verschobenen Ladungsmenge Q .

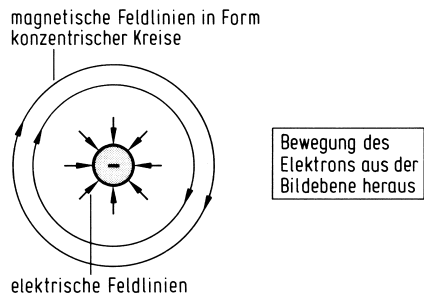
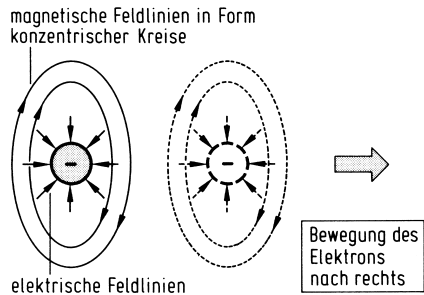


Bild 1.1.2.4 – 1
Magnetisches Feld um bewegte Elektronen

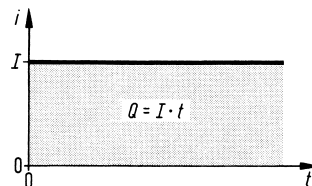


Bild 1.1.2.4 – 2
Fläche als Maß für die verschobene Ladungsmenge

1.1.3 Stromarten

Man unterscheidet bei elektrischen Strömen nach Flussrichtung und zeitlichem Verhalten. Die wichtigsten Arten werden nachfolgend vorgestellt.

Dauer-Gleichstrom:

Die Stromrichtung und die Höhe ändern sich während der Betrachtungszeit nicht.

Impuls-Gleichstrom:

Die Stromrichtung bleibt zwar gleich, doch ändert sich der Stromwert in bestimmten Zeitabständen sprunghaft zwischen Maximum und null.

Impuls-Wechselstrom:

Der Strom ändert sprunghaft seinen Wert und wechselt dabei seine Richtung.

Wechselstrom nach einer Sinusfunktion:

Der zeitliche Verlauf des Stromes erfolgt nach einer Sinusfunktion.

Mischstrom:

Es handelt sich um eine Überlagerung von Gleich- und Wechselstrom.

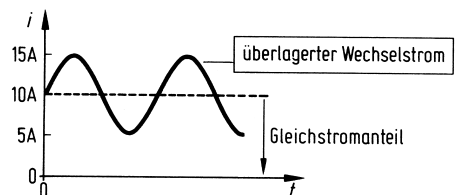
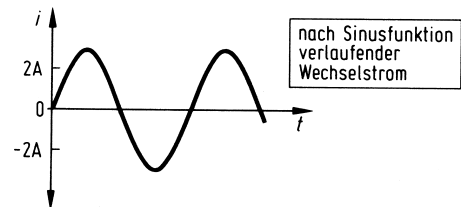
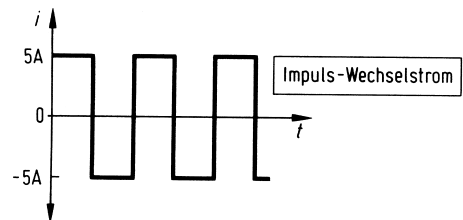
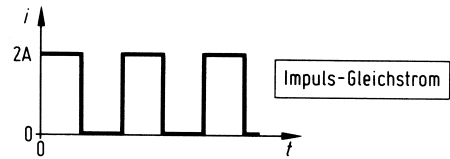
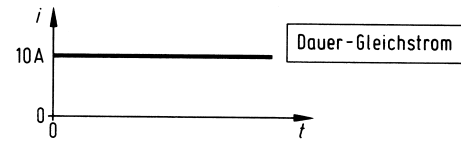


Bild 1.1.3-1 Darstellung der Stromarten nach dem zeitlichen Verhalten

1.2 Elektrische Spannung

Nach der Durcharbeitung dieses Kapitels haben Sie die **Kompetenz** . . .

- die Aussage „ohne Spannung kein Strom“ als **die** Grundaussage für die Praxis anzusehen,
- die elektrische Spannung als Energiezustand zu verstehen und sie zur Versorgung von Schaltungen zu nutzen,
- das die „Erzeugung“ der elektrischen Spannung nach dem Energieprinzip nicht möglich, sondern eine Umformung aus einer anderen Energieform gegeben ist.

1.2.1 Energieniveau zwischen getrennten Ladungen

Bei dem bisher behandelten Stromkreis wurde nur der elektrische Strom erklärt. Da dieser ohne Ursache nicht fließen kann, stellt sich die Frage nach der physikalischen Größe, die den Antrieb bewirkt. Elektrischer Strom begründet sich bekanntlich auf Elektronenbewegung. Elektronen sind negativ geladene elektrische Teilchen, die auf positive Ladungen anziehend wirken. Dies lässt sich im Atommodell anschaulich darstellen.

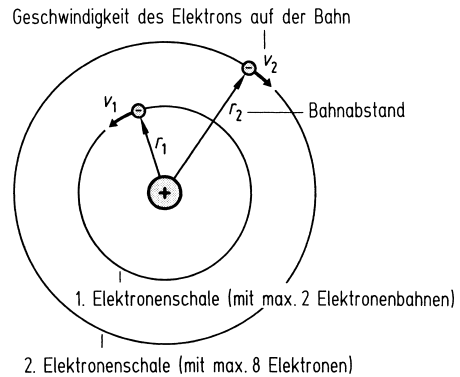


Bild 1.2.1 – 1 Atommodell

Ein rotierender Körper besitzt auf seiner Bahn eine bestimmte potenzielle Energie (= Lageenergie). Diese wandelt sich in kinetische Energie (= Bewegungsenergie) um, sobald der Körper nach Aufhebung der Zentripetalkraft (= Anziehungskraft) in eine geradlinige Bewegung übergeht. Je größer die potenzielle Energie ist, desto größer ist auch die kinetische Energie. Die potenzielle Energie ist abhängig vom Radius des Körpers auf der jeweiligen Bahn, daraus lässt sich folgern, dass die Elektronen auf der ersten Bahn ein niedrigeres Energieniveau besitzen als Elektronen auf den weiter vom Kern entfernt gelegenen Elektronenschalen. Das Bändermodell veranschaulicht diese Abhängigkeiten.

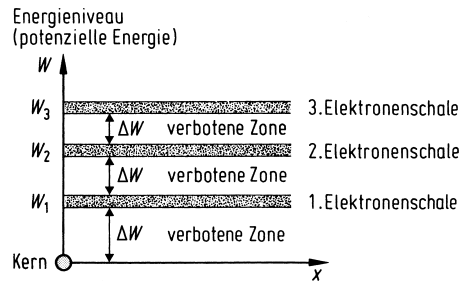


Bild 1.2.1 – 2 Bändermodell zur Betrachtung der Energiestufen im Atom

Im Bändermodell spricht man vom Energiepotenzial der ersten Elektronenschale, vom Energiepotenzial der zweiten Elektronenschale usw. Das Potenzial stellt somit den Energiezustand der Ladungen (= Elektronen) bezogen auf den Kern dar. Dies führt zu der Aussage:

Zwischen räumlich getrennten Ladungen besteht ein Potenzialunterschied (auch Potenzialdifferenz genannt).

Mit dieser Aussage wird die elektrische Spannung definiert:

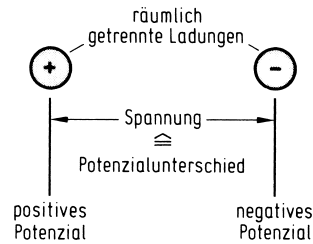


Bild 1.2.1–3 Elektrische Spannung als Energiepotenzial zwischen getrennten Ladungen

Zur Trennung von Ladungen ist Energie erforderlich. Diese wird durch Spannung repräsentiert.

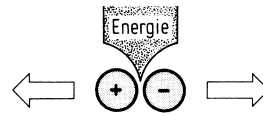


Bild 1.2.1–4 Ladungstrennung ist nur mit Energie möglich

Die elektrische Spannung ist somit ein Energiezustand. Das Formelzeichen der Spannung ist U .

Die Definition lautet:

Elektrische Spannung

$$U = \frac{W}{Q} = \frac{\text{Energie}}{\text{Ladung}} \quad (1.2.1-1)$$

Die Einheit ist nach dem italienischen Physiker Volta (1745–1827) benannt:

$$[U] = V \text{ (Volt)} \quad (1.2.1-2)$$

Für ein Volt gilt:

$$1 \text{ V} = \frac{1 \text{ N} \cdot \text{m}}{1 \text{ A} \cdot \text{s}} = \frac{1 \text{ W} \cdot \text{s}}{1 \text{ A} \cdot \text{s}} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ C}}$$

Ein Volt ist die Potentialdifferenz, die durch $1 \text{ N} \cdot \text{m}$ bei Verschiebung von 1 C aufgebaut wird.

Für die Verschiebung eines Elektrons mittels 1 V bedeutet dies einen Energieumsatz von

$$\begin{aligned} W &= 1 \text{ V} \cdot e \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J.} \end{aligned}$$

Übliche Vielfache und Teile der Einheit Volt sind:

$$\begin{array}{l|l} 1 \text{ MV} = 1 \cdot 10^6 \text{ V} & 1 \text{ mV} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ V} \\ 1 \text{ kV} = 1 \cdot 10^3 \text{ V} & 1 \mu\text{V} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ V} \end{array}$$

Die durch den Spannungspfeil gekennzeichnete positiv zählende Spannungsrichtung geht vom positiven Potenzial zum negativen Potenzial.

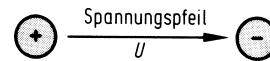


Bild 1.2.1–5 Festlegung der Spannungsrichtung

Da Spannung Energie durch Ladung ist, kann man Spannung auch nicht erzeugen, da sich Energie weder erzeugen noch vernichten lässt. Sie kann nur von einer Form in eine andere umgewandelt werden. Elektrische

Spannung wird deshalb nur durch Umwandlung aus anderen Energien gewonnen, weshalb der Begriff Spannungserzeugung irreführend ist. Der Ladungsunterschied zwischen den Klemmen einer Spannungsquelle ist als Elektronenüberschuss und Elektronenmangel zu verstehen.

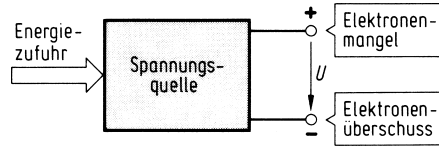


Bild 1.2.1 – 6 Spannungsquelle als Energieumwandler

Das Schaltzeichen einer realen Spannungsquelle ist ein Quadrat, in dem das Zeichen für die Spannungsart eingetragen wird.

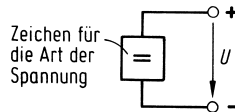


Bild 1.2.1 – 7 Schaltzeichen einer realen Spannungsquelle

Hinweis: Ideale Spannungsquellen siehe Abschnitt 3.3.

Am Anfang dieses Kapitels stand die Frage nach der Antriebsgröße für den Strom. Die Antwort lautet nun:

Antriebsgröße des elektrischen Stromes I ist die elektrische Spannung U .

Ohne elektrische Spannung ist kein elektrischer Strom möglich. Das Zusammenwirken von Strom und Spannung im Stromkreis wird im Kapitel 2 behandelt.

1.2.2 Spannungsgewinnung durch Energieumwandlung

Es erfolgt lediglich eine Aufzählung der grundsätzlichen Möglichkeiten für die Spannungsgewinnung durch Energieumwandlung.

- Elektrische Spannung durch mechanische Energie.
Durch Reibung oder Biegung bestimmter Werkstoffe (z. B. Kunststoffe, Quarze) werden Ladungen verschoben und somit elektrische Spannung aufgebaut.
- Elektrische Spannung durch thermische Energie.
Führt man der Verbindungsstelle zweier unterschiedlicher Metalle Wärmeenergie zu, so werden Ladungen verschoben und eine elektrische Spannung wird zwischen den Metallen aufgebaut.
- Elektrische Spannung durch optische Energie.
Bei bestimmten Werkstoffen führt einfallendes Licht zur Ladungstrennung und somit zur elektrischen Spannung.
- Elektrische Spannung durch chemische Energie.
Bei verschiedenen chemischen Prozessen (z. B. in der Monozelle oder im Bleiakku)

wird chemische Energie in elektrische Spannung umgewandelt.

- Elektrische Spannung durch magnetische Energie.

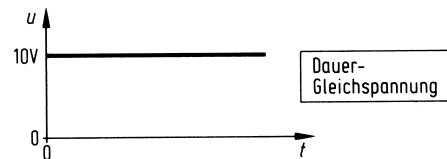
Werden elektrische Leiter in magnetischen Feldern bewegt oder werden bei ruhenden Leitern die magnetischen Felder bewegt, so erfolgt im Leiterwerkstoff eine Ladungsverschiebung der frei beweglichen Elektronen, wird also eine Spannung aufgebaut. Die Umwandlung mittels magnetischer Feldenergie liefert den größten Anteil der benötigten elektrischen Energie für die Elektrotechnik. Der typische Anwendungsfall ist der Generator.

1.2.3 Spannungsarten

Man unterscheidet bei elektrischen Spannungen, analog zu den Strömen, nach Spannungsrichtung und zeitlichem Verhalten. Die wichtigsten Arten werden nachfolgend vorgestellt.

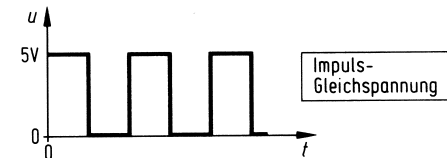
Dauer-Gleichspannung:

Die Spannungsrichtung und der Spannungswert ändern sich während der Betrachtungszeit nicht.



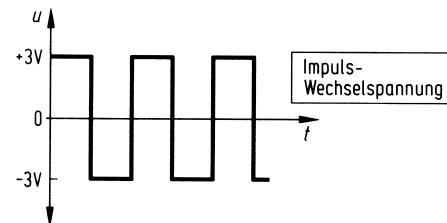
Impuls-Gleichspannung:

Die Spannungsrichtung bleibt zwar gleich, doch ändert sich der Spannungswert in bestimmten Zeitabständen sprunghaft zwischen Maximum und null.



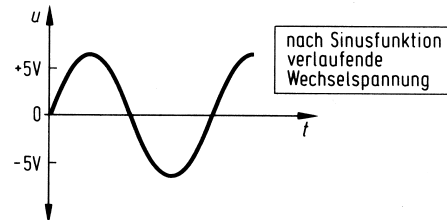
Impuls-Wechselspannung:

Die Spannung ändert sprunghaft ihren Wert und wechselt dabei ihre Richtung.



Wechselspannung nach einer Sinusfunktion:

Der zeitliche Verlauf der Spannung erfolgt nach einer Sinusfunktion.



Mischspannung:

Es handelt sich um eine Überlagerung von Gleich- und Wechselspannung.

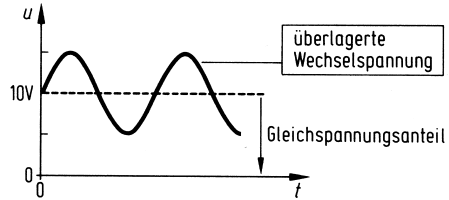


Bild 1.2.3 – 1 Darstellung der Spannungsarten nach ihrem zeitlichem Verhalten

1.3 Elektrischer Widerstand

Nach der Durcharbeitung dieses Kapitels haben Sie die **Kompetenz** ...

- zu unterscheiden zwischen der elektrischen Größe „Widerstand“ und dem Bauelement **Widerstand**,
- Berechnungen für elektrische Widerstände vorzunehmen,
- eine Widerstandsänderung bei Temperaturänderung für messtechnische Zwecke auszunutzen.

1.3.1 Stromleitung in Metallen

Um das Zusammenwirken von Spannung und Strom vollständig darstellen zu können, ist die Kenntnis der Stromleitung in Metallen notwendig.

1.3.1.1 Aufbau und Gitterstruktur von Metallen

Sobald geschmolzene Metalle wieder erstarren, ordnen sich ihre Atome zu kristallinen Gitterstrukturen, meist Kristallgitter genannt. Die einfachste Art ist das auch als Kugelpackung bezeichnete kubisch-raumzentrierte Gitter. Dabei sind die Atome so angeordnet, dass jeweils ein Atom an den Ecken und im Zentrum eines Quaders vorhanden ist. Ordnen sich die Metallatome zum Kristallgitter, dann geben sie Elektronen von der letzten Elektronenbahn in den Zwischenräumen des Kristallgitters ab. Diese sog. Valenzelektronen bleiben dabei zwar an das Gitter gebunden, sind aber innerhalb desselben frei beweglich. Man spricht von „Elektronengas“, das modellhaft gesehen das Kristallgitter durchströmt. Die Antriebsenergie für diesen Vorgang ist die Wärmeenergie, welche oberhalb des absoluten Nullpunktes stets vorhanden ist. Durch Abgabe von Valenzelektronen entstehen positiv geladene Atomreste, die als Ionen bezeichnet werden. Das „Elektronengas“ neutralisiert die

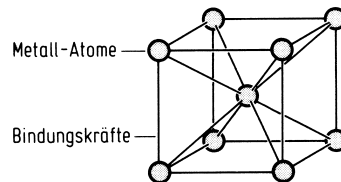


Bild 1.3.1.1 – 1
Modell des kubisch-raumzentrierten Kristallgitters

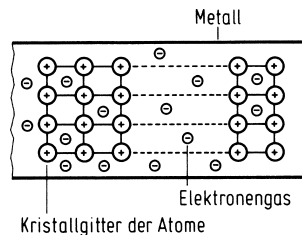


Bild 1.3.1.1 – 2
„Elektronengas“ im Kristallgitter von Metallen

se positive Ladung jedoch, weshalb das Metall nach außen elektrisch neutral erscheint. Es gilt folgende Aussage:

Die gleiche Anzahl positiver Metallionen und freier Elektronen im Metall bedeutet elektrische Neutralität.

1.3.1.2 Das Bändermodell bei Metallen

Die Abgabe von Valenzelektronen in die Zwischenräume des Kristallgitters ist nur durch Energiestöße möglich. Sie werden durch Energieanteile bewirkt, die für den Schmelzvorgang des Metalls erforderlich sind. Das von frei beweglichen Elektronen erreichte Energieniveau wird als Leitungsband bezeichnet.

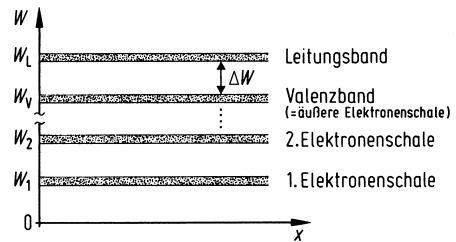


Bild 1.3.1.2 – 1 Bändermodell der Metalle

Es gilt für den Energiestoß zur Freisetzung der Valenzelektronen:

$$\Delta W = W_L - W_V \quad (1.3.1.2 - 1)$$

Der Energiestoß ΔW bei Metallen ist sehr klein gegenüber Keramik und Kunststoffen. Die Anzahl der freien Elektronen ist für jeden Werkstoff verschieden. Es gilt:

$$\text{Kupfer: } n'_{\text{Cu}} \approx 8,47 \cdot 10^{22} \frac{\text{Elektronen}}{\text{cm}^3}$$

$$\text{Silber: } n'_{\text{Ag}} \approx 5,87 \cdot 10^{22} \frac{\text{Elektronen}}{\text{cm}^3}$$

Mit Gleichung 1.1.2.2 – 1 (sie wird hier zum besseren Verständnis wiederholt) kann nun bei Angabe der Elektronenkonzentration pro cm^3 für jedes beliebige Stück Leitung die frei bewegliche Ladungsmenge errechnet werden.

Frei bewegliche Ladungsmenge in einem Werkstoff:

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

Beispiel 1.3.1.2 – 1

Es ist die Ladungsmenge der frei beweglichen Elektronen zu berechnen, die in einem Kupferdraht mit der Länge $l = 1 \text{ m}$ und dem Querschnitt $A = 1 \text{ mm}^2$ vorhanden ist.

Lösung:

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

$$= 8,47 \cdot 10^{22} \frac{\text{Elektronen}}{\text{cm}^3}$$

$$\times 1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{C}}{\text{Elektron}} \cdot 0,01 \text{ cm}^2 \cdot 100 \text{ cm}$$

$$Q = \underline{\underline{1,355 \cdot 10^4 \text{ C}}}$$

Übung 1.3.1.2 – 1

Berechnen Sie die vorhandene elektrische Ladungsmenge einer Steigeleitung aus Kupfer mit einem Querschnitt $A = 16 \text{ mm}^2$ und einer Länge $l = 50 \text{ m}$.

1.3.1.3 Vorgang der Stromleitung

Nach der Betrachtung des Aufbaus von Metallen kann nun der Vorgang der Stromleitung erklärt werden. Wird zwischen die Klemmen einer Spannungsquelle eine Leitung aus Metall angeschlossen, dann gelangen die frei beweglichen Elektronen in der Leitung unter den Einfluss der Spannung. Ein Ladungsausgleich ist nun möglich. Die Elektronen in der Leitung werden vom positiven Pol (positive Ladung) angezogen, in der Leitung entsteht dadurch eine gerichtete Bewegung der freien Elektronen. Sie strömen vom Minus-Pol zum Plus-Pol. Elektronenfluss ist jedoch als elektrischer Strom I definiert worden. Die angelegte Spannung bewirkt also einen Strom durch die Leitung.

Um Spannung U und Strom I bezogen auf die Zählrichtung vom selben Ausgangspunkt betrachten zu können, wird die Stromrichtung von Plus nach Minus festgelegt. Diese so definierte Stromrichtung, welche gegen die Elektronenflussrichtung verläuft, bezeichnet man als technische Stromrichtung.

Lösung:

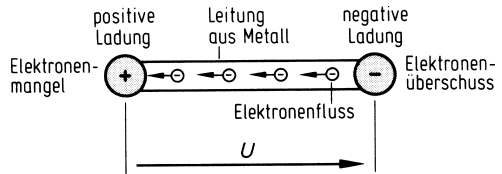


Bild 1.3.1.3 – 1 Gerichtete Bewegung der freien Elektronen im Leiter durch die angelegte Spannung

Freie Elektronen im Leiter = Leitungselektronen

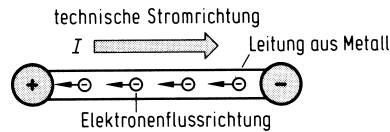


Bild 1.3.1.3 – 2 Definition der technischen Stromrichtung

1.3.2 Elektrischer Widerstand als Strombegrenzer

Die Elektronen stoßen bei ihrer gerichteten Bewegung an das Atomgitter und werden dadurch gebremst, die Geschwindigkeit der Elektronen reduziert sich also. Es fließen damit weniger Elektronen pro Sekunde durch den Leiterquerschnitt, was eine Verringerung des Stromes bedeutet. Die Leitung begrenzt den Ladungsaustausch und somit den Stromfluss. Diese strombegrenzende Wirkung der Leitung wird als elektrischer Widerstand definiert, der ebenfalls eine physikalische Größe darstellt, sein Formelzeichen ist R .

Strombegrenzende Wirkung der Leitung = elektrischer Widerstand R .

Die Einheit ist nach dem deutschen Physiker Ohm (1789–1854) benannt:

$$[R] = \Omega \text{ (Ohm)}$$

$$(1.3.2 - 1)$$

Als Vielfache und Teile der Einheit Ohm kommen zur Anwendung:

$$\begin{array}{l|l} 1 \text{ m}\Omega = 1 \cdot 10^{-3} \Omega & 1 \text{ G}\Omega = 1 \cdot 10^9 \Omega \\ 1 \text{ k}\Omega = 1 \cdot 10^3 \Omega & 1 \text{ T}\Omega = 1 \cdot 10^{12} \Omega \\ 1 \text{ M}\Omega = 1 \cdot 10^6 \Omega & \end{array}$$

Das Schaltzeichen des Widerstandes ist wie Bild 1.3.2 – 1 festgelegt.

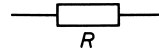


Bild 1.3.2 – 1 Schaltzeichen des Widerstandes

1.3.2.1 Spezifischer elektrischer Widerstand und elektrische Leitfähigkeit

Die einzelnen Werkstoffe weisen bedingt durch unterschiedliche Atomgrößen und Formen der Kristallgitter auch unterschiedliche elektrische Widerstandswerte auf. Für die Berechnung von Widerstandswerten sind diese werkstofftechnischen Kennwerte durch den spezifischen Widerstand ϱ festgelegt. Er ist bezogen auf eine Werkstofflänge $l = 1 \text{ m}$ und einen Querschnitt $A = 1 \text{ mm}^2$.

Als Einheit des spezifischen elektrischen Widerstandes gilt:

Spezifischer elektrischer Widerstand ϱ
($\varrho \rightarrow$ spricht: rho)

Der spezifische elektrische Widerstand ist der Widerstand eines Werkstoffes bezogen auf folgende Abmessungen:

$$l = 1 \text{ m und } A = 1 \text{ mm}^2$$

$$\boxed{[\varrho] = \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}} \quad (1.3.2.1 - 1)$$

Der spezifische Widerstand ist stets bezogen auf eine Umgebungstemperatur $\vartheta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ und eine definierte Materialreinheit. Die gebräuchlichen Werte für ϱ können der Tabelle 1.3.2.1 – 1 entnommen werden (gerundete Werte).

Tabelle 1.3.2.1 – 1
Werkstoffgrößen für den speziellen Widerstand

Leiterwerkstoff	ϱ $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
Silber	0,016
Kupfer	0,01786
Gold	0,023
Aluminium	0,02857
Magnesium	0,0455
Wolfram	0,0555
Zink	0,0625
Messing	0,07 ... 0,09
Nickel	0,08 ... 0,11
Eisen	0,10 ... 0,15
Zinn	0,11
Platin	0,11 ... 0,14
Blei	0,21
Quecksilber	0,96
Konstantan	0,5

Die Zahlenwerte für die spezifischen Widerstände der einzelnen Werkstoffe sind in den meisten Fällen sehr klein. Es wird deshalb häufig besser mit dem Kehrwert des spezifischen Widerstandes, der elektrischen Leitfähigkeit \varkappa , gerechnet:

Elektrische Leitfähigkeit \varkappa
($\varkappa \rightarrow$ spricht: kappa)

$$\boxed{\varkappa = \frac{1}{\varrho}} \quad (1.3.2.1 - 2)$$

Die Einheit ist ebenfalls durch eine Kehrwertbildung definiert:

$$[\kappa] = \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} = \frac{\text{S} \cdot \text{m}}{\text{mm}^2} \quad (1.3.2.1 - 3)$$

$$\frac{1}{\Omega} = \text{S (Siemens)}$$

Die gebräuchlichsten Werte für κ können der Tabelle 1.3.2.1–2 entnommen werden. Sie gelten ebenfalls für eine Umgebungstemperatur von $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ und eine definierte Materialeinheit (gerundete Werte).

Tabelle 1.3.2.1–2
Werkstoffgrößen für die elektrische Leitfähigkeit

Leiterwerkstoff	κ S · m/mm ²
Silber	62,5
Kupfer	56
Gold	43,5
Aluminium	34
Magnesium	22
Wolfram	18
Zink	16
Messing	14...11
Nickel	13...9
Eisen	10...7
Zinn	9,1
Platin	9...7
Blei	4,8
Quecksilber	1,04
Konstantan	2

Für Isolierwerkstoffe ist meist folgende abgewandelte Einheitenangabe gebräuchlich:

Man gewinnt diese durch Einsetzen von gleichen Flächen- und Längeneinheiten in die Gleichung 1.3.2.1–1. Es gilt:

Einheitenangabe für ρ und κ bei Isolierwerkstoffen

$$[\rho] = \Omega \cdot \text{cm} \quad \text{oder} \quad \Omega \cdot \text{m}$$

$$[\kappa] = \frac{\text{S}}{\text{cm}} \quad \text{oder} \quad \frac{\text{S}}{\text{m}}$$

$$[\rho] = \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

da

$$1 \text{ mm}^2 = 10^{-6} \text{ m}^2$$

folglich

$$[\rho] = \frac{\Omega \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}{\text{m}}$$

$$[\rho] = 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$$

somit:

$$1 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} = 1 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$$

Entsprechend gilt:

$$1 \frac{\text{S} \cdot \text{m}}{\text{mm}^2} = 1 \cdot 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}}$$

1.3.2.2 Bemessungsgleichung des Widerstandes

Mit dem spezifischen Widerstand bzw. mit der Leitfähigkeit ist es möglich, für jede beliebige Leitung den elektrischen Widerstand R zu berechnen. Die Bemessungsgleichung für Widerstände lautet:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{l}{\kappa \cdot A} \quad (1.3.2.2 - 1)$$

Kontrolle der Bemessungsgleichung anhand der Einheitengleichung:

$$[R] = \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}}{\text{m} \cdot \text{mm}^2} = \Omega$$

In der Elektrotechnik unterscheidet man verschiedene Widerstandsarten:

- Gewollte Widerstände (technische Widerstände)
- Ungewollte Widerstände (Leitungen, Kontakte usw.)

Bei jeder technischen Stromleitung durch Leiter wird der Strom begrenzt, es liegt also immer ein Widerstand vor. Alle Verbindungsleitungen sollen theoretisch widerstandsfrei sein. Wegen der in der Praxis auftretenden, durch Reibung der Elektronen im Kristallgitter hervorgerufenen Verluste sind jedoch stets ungewollte Widerstände in den Verbindungsleitungen vorhanden. In der Elektrotechnik gibt es aber auch gewollte Widerstände, nämlich die technischen Widerstände. Sie werden eingeteilt in Festwiderstände und stellbare Widerstände, auch Potenziometer genannt. Technische Widerstände werden auch als Verbraucher im Stromkreis bezeichnet. Im Kapitel 8 werden sie noch ausführlich behandelt.

Zur Berechnung eines Widerstandes ist die Draht- oder Leitungslänge erforderlich. Da bei der Festlegung dieser Längen immer wieder Schwierigkeiten auftreten, gelten für dieses Buch folgende Begriffsbestimmungen:

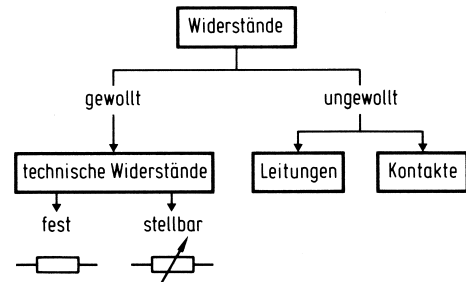


Bild 1.3.2.2 – 1 Widerstandsarten

Technische Widerstände = Verbraucher im Stromkreis

1. Drahtlänge = einfache Länge l

$$\text{also } R = \frac{l \cdot \rho}{A}$$

2. Leitungslänge = Entfernung zwischen Spannungsquelle (= Einspeisung) und Verbraucher

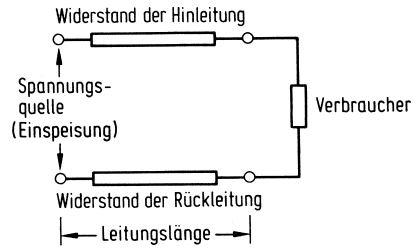


Bild 1.3.2.2–2 Definition der Leitungslänge

Bei der Leitungslänge muss Hinleitung und Rückleitung betrachtet werden, da beide zum Widerstand beitragen.

$$\text{Folglich gilt: } R = \frac{2 \cdot l \cdot \rho}{A}$$

Beispiel 1.3.2.2–1

Es ist der Widerstand eines Kupferleiters mit der Länge $l = 100 \text{ m}$ und einem Querschnitt $A = 2 \text{ mm}^2$ zu berechnen.

Lösung:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{l}{\kappa \cdot A}$$

$$\text{Wert aus der Tabelle: } \rho_{\text{Cu}} = 0,01786 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$R = \frac{0,01786 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 100 \text{ m}}{2 \text{ mm}^2}$$

$$R = \underline{\underline{0,893 \Omega}}$$

$$\text{Wert aus der Tabelle: } \kappa = 56 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$$

$$R = \frac{100 \text{ m}}{56 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \cdot 2 \text{ mm}^2}$$

$$R = \underline{\underline{0,893 \Omega}}$$

Als Kehrwert des spezifischen Widerstandes wurde die elektrische Leitfähigkeit definiert. Analoges gilt auch für den Kehrwert des elektrischen Widerstandes, der als elektrischer Leitwert bezeichnet wird. Es gilt:

Die Einheit ergibt sich aus der Kehrwertbildung der Einheit Ohm.

Für viele Berechnungen ergibt die Verwendung des Leitwertes einfachere Gleichungen.

Elektrischer Leitwert

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.3.2.2-2)$$

$$[G] = \frac{1}{\Omega} = \text{S (Siemens)} \quad (1.3.2.2-3)$$

Beispiel 1.3.2.2 – 2

Es wird ein Widerstand $R = 20 \Omega$ benötigt. Er soll aus einem Konstantendraht mit einem Durchmesser $d = 0,5 \text{ mm}$ gewickelt werden. Es ist die erforderliche Länge des Konstantendrahtes zu berechnen.

Berechnung des Drahtquerschnittes:

Lösung:

$$\begin{aligned} A &= d^2 \cdot \frac{\pi}{4} \\ &= 0,5^2 \text{ mm}^2 \cdot \frac{\pi}{4} \\ A &= \underline{\underline{0,196 \text{ mm}^2}} \end{aligned}$$

Wert aus der Tabelle:

$$\varrho_{\text{Ko}} = 0,5 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

Berechnung der Drahtlänge:

$$\begin{aligned} R &= \frac{\varrho \cdot l}{A} \\ l &= \frac{R \cdot A}{\varrho} \\ &= \frac{20 \Omega \cdot 0,196 \text{ mm}^2}{0,5 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}} \\ l &= \underline{\underline{7,84 \text{ m}}} \end{aligned}$$

Übung 1.3.2.2 – 1

Eine 300 m lange Verbindung aus Aluminiumdraht darf einen Widerstandswert von maximal 10Ω haben. Berechnen Sie den benötigten Querschnitt der Leitung!

Lösung:

Übung 1.3.2.2 – 2

Für eine Überlandleitung sind die Daten der Hochspannungsseile zu ermitteln. Der geforderte Widerstand beträgt $R = 0,5 \Omega$ bei einer Seillänge von 500 m. Berechnen Sie den benötigten Querschnitt eines Kupfer- und eines Aluminiumseiles. Wie verhalten sich die Querschnitte zueinander?

Lösung:

1.3.2.3 Temperaturabhängigkeit des Widerstandes

Erhöht sich die Temperatur eines Widerstandes, dann ist bei einigen Werkstoffen eine Widerstandszunahme, bei anderen eine Widerstandsabnahme zu beobachten. Die Zu- und Abnahmen sind entweder linear oder nicht-linear.

Bei den meisten gebräuchlichen Leiter- und Widerstandswerkstoffen ist bis zu einer bestimmten Temperatur eine lineare Widerstandszunahme zu beobachten.

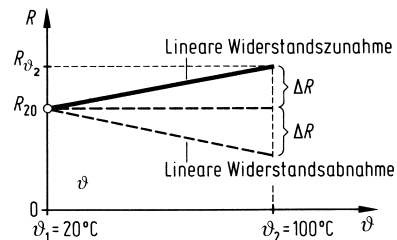


Bild 1.3.2.3 – 1

Widerstandsänderung bei Temperaturerhöhung

Die Widerstandszunahme kann mathematisch wie folgt geschrieben werden:

$$R_{\vartheta_2} = R_{20} + \Delta R \quad (1.3.2.3-1)$$

R_{20} = Widerstandswert bei $\vartheta = 20\text{ °C}$
(= Kaltwiderstand)

R_{ϑ_2} = Widerstandswert bei z. B. $\vartheta = 100\text{ °C}$
(= Warmwiderstand)

$\Delta R = R_{\vartheta_2} - R_{20}$ = Widerstandszunahme

Grundsätzlich lässt sich die Widerstandsänderung wie folgt erklären:

Alle Atome im Kristallgitter schwingen mehr oder weniger stark an ihrem Standort bei Temperaturen oberhalb des absoluten Nullpunktes ($\vartheta = -273,16\text{ °C}$). Die Schwingungen nehmen mit steigender Temperatur zu, wodurch das Kristallgitter ständig in Bewegung ist. Der Elektronenfluss wird dadurch stärker gebremst, was einer Widerstandserhöhung entspricht. Die Widerstandsänderung ΔR ist von der Temperaturänderung und dem Werkstoff abhängig. Für die einzelnen Werkstoffe wurde der Widerstands-Temperaturkoeffizient α eingeführt:

Der Temperaturkoeffizient gibt die Widerstandszu- oder -abnahme eines Werkstoffes von $1\ \Omega$ Widerstandswert und einer Temperaturänderung um $\Delta\vartheta = 1\text{ K}$ (Kelvin) an.

Die Einheit des Temperaturkoeffizienten lautet:

$$\Delta R = f(\Delta\vartheta, \text{Werkstoff})$$

α = Widerstands-Temperaturkoeffizient eines Werkstoffes von $R = 1\ \Omega$ und bei $\Delta\vartheta = 1\text{ K}$

Die gebräuchlichsten Temperaturkoeffizienten können der Tabelle 1.3.2.3-1 entnommen werden.

Die Widerstandserhöhung oder -abnahme des Ausgangswiderstandes R_{20} (= Widerstandswert bei 20 °C) für ein $\Delta\vartheta = 1\text{ K}$ beträgt somit:

$$[\alpha] = \frac{1}{\text{K}} \quad (\text{K} = \text{Kelvin}) \quad (1.3.2.3-2)$$

Bei der Temperaturdifferenz von $\Delta\vartheta = \vartheta_2 - 20\text{ °C}$ ergibt sich:

$$\Delta R = R_{20} \cdot \alpha \cdot 1\text{ K}$$

$$\Delta R = R_{20} \cdot \alpha \cdot (\vartheta_2 - 20\text{ °C})$$

Durch Einsetzen von ΔR in die Gleichung 1.3.2.3-1 folgt daraus die endgültige Gleichung zur Berechnung des Widerstandes bei einer Temperaturänderung $\Delta\vartheta$:

$$R_{\vartheta_2} = R_{20} + R_{20} \cdot \alpha \cdot (\vartheta_2 - 20\text{ °C})$$

$$R_{\vartheta_2} = R_{20}(1 + \alpha(\vartheta_2 - 20\text{ °C})) \quad (1.3.2.3-3)$$

Geltungsbereich bis $\vartheta_2 = 200\text{ °C}$

Der Geltungsbereich der Gleichung 1.3.2.3 – 3 geht maximal bis $\vartheta_2 = 200\text{ °C}$. Darüber ist die Widerstandsänderung nicht mehr linear. Es gilt dann folgende Gleichung:

$$R_{\vartheta_2} = R_{20}(1 + \alpha \cdot (\vartheta_2 - 20\text{ °C}) + \beta \cdot (\vartheta_2 - 20\text{ °C})^2)$$

(1.3.2.3 – 4)

β ist ein zusätzlicher Temperaturkoeffizient.

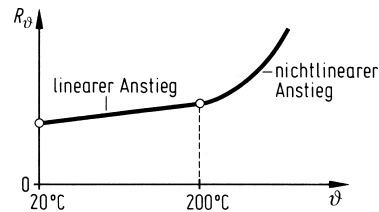


Bild 1.3.2.3 – 2 Widerstandsänderung in Abhängigkeit von der Temperatur

Die gebräuchlichsten Werte für die Temperaturkoeffizienten α und β sind der Tabelle 1.3.2.3 – 1 zu entnehmen.

Tabelle 1.3.2.3 – 1 Werkstoffgrößen für die Temperaturkoeffizienten

Leiterwerkstoff	α 10^{-3} K^{-1}	β 10^{-6} K^{-2}
Silber	3,8	0,7
Kupfer	3,93	0,6
Gold	3,77	0,5
Aluminium	4	1,3
Magnesium	3,9	1
Wolfram	4,1	1
Zink	3,7	2
Messing	1,5	–
Nickel	3,7 ... 6	9
Eisen	4,5 ... 6	6
Zinn	4,2	6
Platin	2 ... 3	0,6
Blei	4,2	2
Quecksilber	0,92	1,2
Konstantan	0,01	–

Beispiel 1.3.2.3 – 1

Ein Widerstand $R_{20} = 80\ \Omega$ ist aus Aluminiumdraht gewickelt. Der Widerstand wird auf $\vartheta_2 = 120\text{ °C}$ erwärmt. Berechnen Sie den Widerstandswert bei $\vartheta_2 = 120\text{ °C}$.

Lösung:

$$R_{\vartheta_2} = R_{20}(1 + \alpha \cdot (\vartheta_2 - 20\text{ °C}))$$

gemäß Tabelle: $\alpha = 4 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$

$$R_{120\text{ °C}} = 80\ \Omega \left(1 + 4 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{K}} (120\text{ °C} - 20\text{ °C}) \right)$$

$$= 80\ \Omega \left(1 + 4 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{K}} \cdot 100\text{ K} \right)$$

$$= 80\ \Omega (1 + 0,4)$$

$$R_{120\text{ °C}} = \underline{\underline{112\ \Omega}}$$

Übung 1.3.2.3 – 1

Ein Widerstand $R_{20} = 100 \Omega$ aus einem Nickeldraht erreicht nach der Temperaturerhöhung den Widerstandswert $R_{\vartheta_2} = 150 \Omega$. Berechnen Sie die Endtemperatur ϑ_2 ausgehend von $\vartheta_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, wenn $\alpha = 4,5 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$ ist.

*Lösung:***Übung 1.3.2.3 – 2**

Der Widerstand einer Kupferspule mit einem Kaltwiderstand $R_{20} = 230 \Omega$ darf sich nur um 8% erhöhen. Welche maximale Temperatur darf die Spule erreichen?

*Lösung:***1.3.3 Stromleitung in Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen**

Es soll hier lediglich ein Überblick für die einzelnen Stromleitungsmechanismen gegeben werden. Man unterscheidet Stromleitung in

- Metallen (= Elektronenleiter)
- Isolatoren (= Nichtleiter)
- Flüssigkeiten (= Ionenleiter)
- Gasen (= Elektronen- und Ionenleiter)
- Halbleitern (= Störstellenleiter)
- Supraleitenden Stoffen

Isolatoren (= Nichtleiter) sind Werkstoffe, die nur ganz wenige freie Elektronen im Atomverband haben. Unter dem Einfluss einer angelegten Spannung werden immer an irgendeiner Stelle des Werkstoffes Elektronen freigesetzt. Es gibt deshalb keinen idealen Nichtleiter.

Einen idealen Nichtleiter gibt es nicht.

Die Stromleitung in Flüssigkeiten erfolgt bei gleichzeitiger Zersetzung der Flüssigkeit, so dass die Stromleitung nur von endlicher Dauer ist. Bei dieser Art der Stromleitung wird von Leitern zweiter Klasse gesprochen. Der Vorgang wird im Abschnitt 3.7.4.1 behandelt.

Stromleitende Flüssigkeiten = Leiter
2. Klasse

Die Stromleitung in Gasen erfolgt mittels Stoßionisation. Die Valenzelektronen der neutralen Gasatome werden durch den Anstoß mit bereits freien Elektronen vom Atom getrennt und dienen dann der Stromleitung.

Stromleitung in Gasen mittels Stoßionisation

Die Beschreibung der Stromleitung in Halbleitern setzt die Kenntnis der Festkörperphysik über n- und p-Leitung voraus. Siehe dazu das Buch „Werkstoffe der Elektrotechnik“ dieser Lernbuchreihe.

Stromleitung bei Halbleitern mittels n- und p-Leitung

Unter supraleitenden Stoffen versteht man Werkstoffe, die bei sehr niedrigen Temperaturen ihren Widerstandswert ganz verlieren.

Supraleitung bedeutet: $R \rightarrow 0 \Omega$
wenn
 $\vartheta \rightarrow 0 \text{ K}$

2 Elektrischer Stromkreis

2.1 Aufbau des technischen Stromkreises

Nach der Durcharbeitung dieses Kapitels haben Sie die **Kompetenz** ...

- Stromkreise in äußere und innere Abschnitte einzuteilen und die Bedeutung für die Praxis aufzuzeigen.

Im Themenkreis 1 wurden die einzelnen elektrischen Grundgrößen erarbeitet und ihre Zusammenhänge dargestellt. In diesem Themenkreis erfolgt nun die Betrachtung des Zusammenwirkens der einzelnen Grundgrößen im Stromkreis. Dazu wird ein aus Spannungsquelle, Schalter, Leitungen und einem Widerstand als Verbraucher bestehender Stromkreis betrachtet.

Nach dem Schließen des Stromkreises mittels Schalter beginnt die Ladungsbewegung. Von der Spannung bewegt strömen Elektronen vom Minus-Pol (= Elektronenüberschuss) durch den Widerstand R zum Plus-Pol (= Elektronenmangel). In der Spannungsquelle erfolgt wieder eine Ladungstrennung, wobei die Elektronen zum Minus-Pol verschoben werden. Der Kreislauf ist somit geschlossen. Solange die Energieumwandlung in der Spannungsquelle anhält, wird der Elektronenfluss aufrechterhalten. Die Stromrichtung ist, wie bereits bekannt, von Plus nach Minus festgelegt.

Die Ursache des Stromflusses ist die Spannung.

Für den gesamten Stromkreis gilt die Aussage:

Der Stromkreis wird in einen äußeren und inneren Stromkreis aufgeteilt. Im äußeren Stromkreis sind alle Verbraucher zusammengefasst, während der innere Stromkreis durch die Spannungsquelle gebildet wird. Daraus erklären sich auch die Begriffe Verbraucher- und Erzeugerkreis.

Die Definition der Stromrichtung ist auf den äußeren Stromkreis bezogen. In der Spannungsquelle fließt der Strom von Minus nach Plus, die Elektronen natürlich entgegengesetzt.

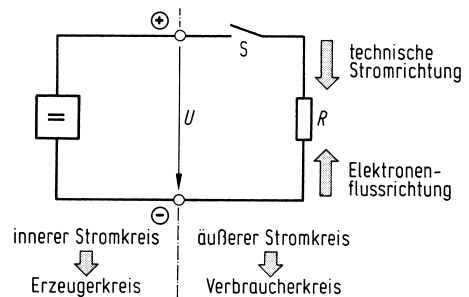


Bild 2.1 – 1
Zusammenwirken der Grundgrößen im Stromkreis

Ohne Spannung kein Strom.

Der Strom ist an allen Stellen des Kreises gleich groß.

2.2 Strömungsgesetze im elektrischen Stromkreis

Nach der Durcharbeitung dieses Kapitels haben Sie die **Kompetenz** ...

- Berechnungen an einfachen elektrischen Stromkreisen mit dem Ohm'schen Gesetz durchzuführen,
- zwischen linearen und nichtlinearen Widerständen zu unterscheiden und ihr Verhalten im Stromkreis zu erklären.

2.2.1 Ohm'sches Gesetz

Den Zusammenhang zwischen der elektrischen Spannung U , dem elektrischen Strom I und dem Widerstand R erkannte als Erster der deutsche Physiker Georg Simon Ohm (1789–1854), weshalb die mathematische Formulierung dieser Abhängigkeit als Ohm'sches Gesetz bezeichnet wird.

Im geschlossenen Stromkreis sind bei konstantem Widerstand der Strom und die Spannung einander proportional.

Bei konstanter Spannung U und Vergrößerung des Widerstandes R ist der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung umgekehrt proportional.

Zusammenfassend lässt sich daraus die Größengleichung des Ohm'schen Gesetzes ableiten:

Die Einheitengleichung ergibt wie folgt:

Das Ohm'sche Gesetz lässt sich durch verschiedene Formulierungen darstellen:

1. Die am Widerstand R anliegende Spannung U treibt den Strom I durch diesen Widerstand.
2. Um den Strom I durch den Widerstand R zu treiben, muss die Spannung U angelegt werden.

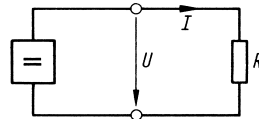


Bild 2.2.1 – 1 Geschlossener Stromkreis

$$I \sim U \quad (\text{wenn } R = \text{konstant})$$

folglich

$$I = k \cdot U$$

$k = \text{Proportionalitätsfaktor}$

$$I \sim \frac{1}{R} \quad (\text{wenn } U = \text{konstant})$$

Mit $k = \frac{1}{R}$ ergibt sich das **Ohm'sche Gesetz**

$$I = \frac{U}{R} \quad (2.2.1 - 1)$$

$$[I] = \frac{\text{V}}{\Omega} = \text{A} \quad (2.2.1 - 2)$$

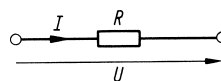


Bild 2.2.1 – 2 Spannung und Strom am Widerstand