

Heinz-Josef Bauckholt

# Grundlagen und Bauelemente der Elektrotechnik



8., aktualisierte Auflage

HANSER

Bauckholt  
**Grundlagen und Bauelemente der Elektrotechnik**



**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](http://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, 8. Auflage  
Felderhoff/Busch, Leistungselektronik, 4. Auflage  
Felderhoff/Freyer, Elektrische und elektronische Messtechnik, 8. Auflage  
Fischer/Hofmann/Spindler, Werkstoffe in der Elektrotechnik, 7. Auflage  
Freyer, Nachrichten-Übertragungstechnik, 7. Auflage  
Heiderich/Meyer, Probleme lösen mit C/C++, 3. Auflage  
Knies/Schierack, Elektrische Anlagentechnik, 6. Auflage  
Schaaf, Mikrocomputertechnik, 6. Auflage  
Seidel, Werkstofftechnik, 11. Auflage

# HANSER

Heinz-Josef Bauckholt

# **Grundlagen und Bauelemente der Elektrotechnik**

8., aktualisierte Auflage

mit 617 Bildern sowie zahlreichen Tabellen,  
Beispielen, Übungen und Testaufgaben

**HANSER**

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

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Print-ISBN 978-3-446-45904-5  
E-Book-ISBN 978-3-446-45905-2

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 Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen.

Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Die Rechte aller Grafiken und Bilder liegen bei den Autoren.

© 2019 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München  
[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)  
Lektorat: Franziska Jacob, M.A.  
Herstellung: le-tex publishing services GmbH  
Zeichnungen: Peter Palm, Berlin  
Coverkonzeption: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München  
Coverrealisation: Stephan Rönigk  
Druck und Bindung: Friedrich Pustet KG, Regensburg  
Printed in Germany



---

# 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 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	Verhältnisbildung 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	Verhältnisbildung 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
Literaturhinweise:	
I. Fachschulen für Technik . . . . .	471
II. Fachhochschulen . . . . .	471
Sachwortverzeichnis . . . . .	473



# 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-

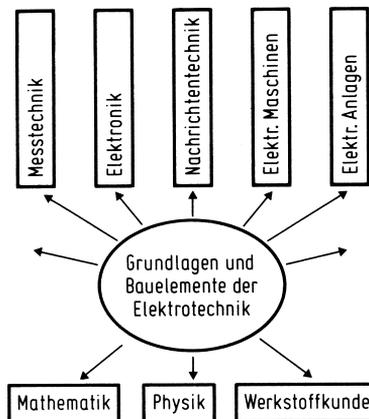


Bild 0. – 1  
Grundlagen der Elektrotechnik im Beziehungsfeld der Anwendungsgebiete

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.

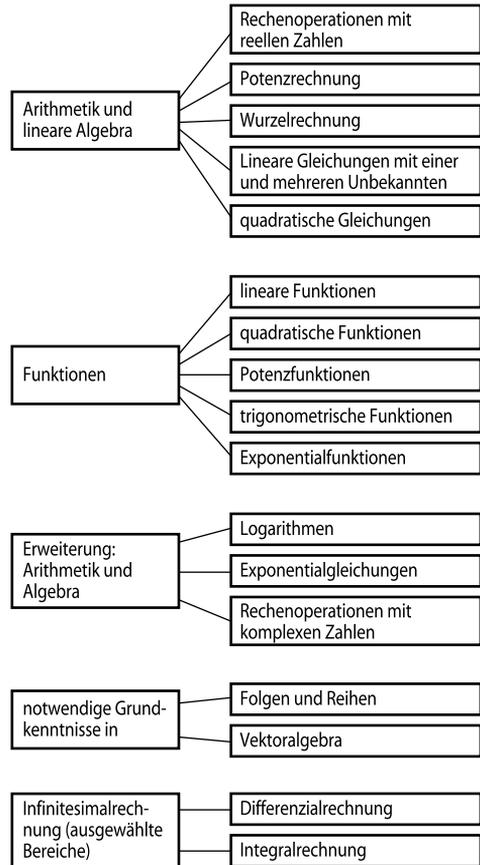


Bild 0. – 2  
Strukturplan der als notwendig erachteten Mathematik

# 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.

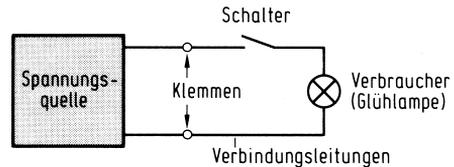


Bild 1.0 – 1 Elektrischer Stromkreis

## 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

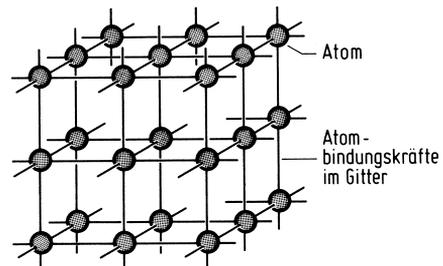


Bild 1.1.1 – 1 Kristallgitter der Atome

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.

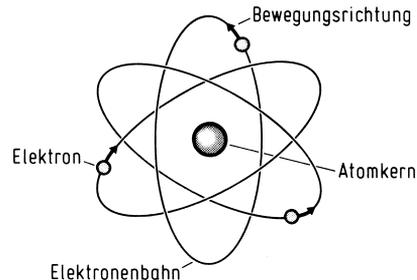


Bild 1.1.1.1 – 1 Atommodell

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)

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

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

(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.

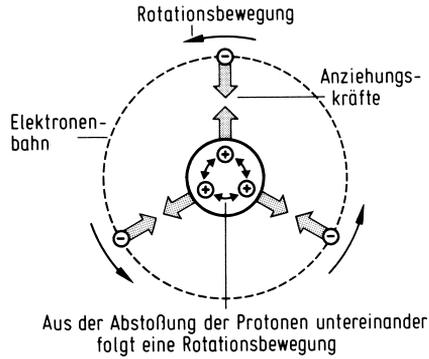


Bild 1.1.1.2 – 1  
Schematische Darstellung zur Umlaufbewegung der Elektronen

### 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.

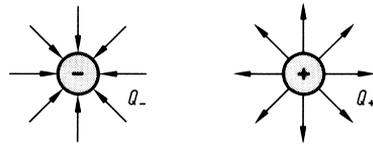


Bild 1.1.1.3 – 1 Elektrische Felder um Ladungen

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

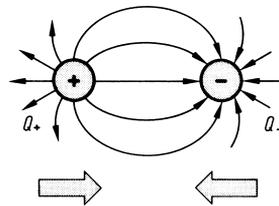


Bild 1.1.1.3 – 2 Anziehung ungleichnamiger Ladungen

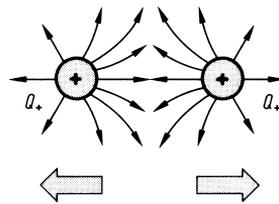


Bild 1.1.1.3 – 3 Abstoßung gleichnamiger Ladungen

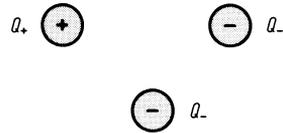
Zusammenfassend ergeben die bisherigen Erkenntnisse folgende Aussage:

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.

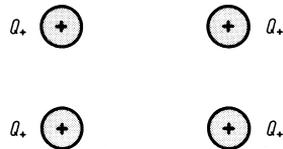
Lösung:



**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  $I$ :

$$I = \frac{dQ}{dt} \tag{1.1.2.1-3}$$

Die Aussagen in der Gleichung ergeben folgenden Funktionszusammenhang:

Die Änderung der Ladungsmenge hat eine Stromänderung als Folge.

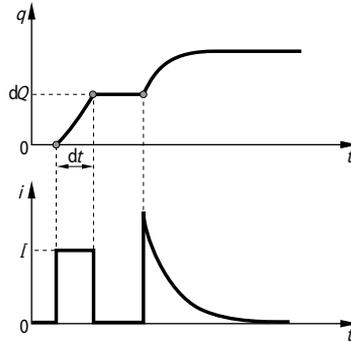
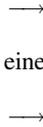


Bild 1.1.2.1-1 Die Stromfunktion in Abhängigkeit von der Änderung der Ladungsmenge

### 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:

$$Q = n' \cdot e \cdot V = n' \cdot e \cdot A \cdot l \tag{1.1.2.2-1}$$

$n'$  = 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.

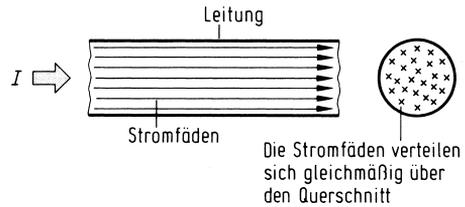


Bild 1.1.2.3 – 1  
Schematische Darstellung der Stromfäden beim Stromdurchgang

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:*

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

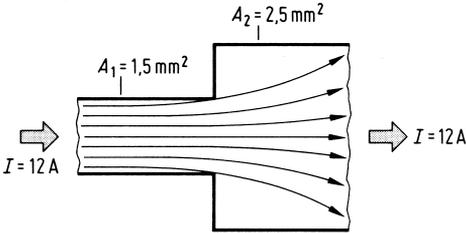
### Übung 1.1.2.3 – 1

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:

1. 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.
2. Wärmewirkung beim Stromdurchgang. Sie wurde bereits erwähnt und entsteht durch die Reibung der strömenden Elektronen am Atomgitter.
3. Fließt Strom durch leitfähige Flüssigkeiten, dann erfolgen chemische Reaktionen und es tritt z. B. eine Zersetzung ein. (Siehe Abschnitt 3.7.4.1.)

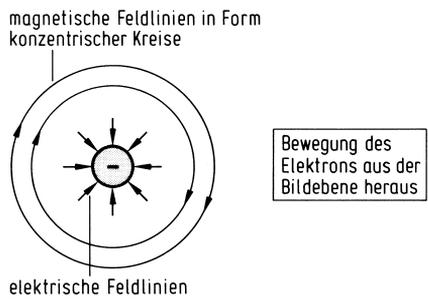
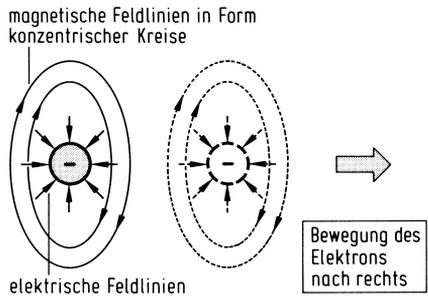


Bild 1.1.2.4 – 1  
Magnetisches Feld um bewegte Elektronen

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

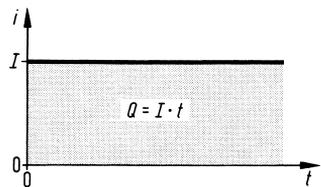


Bild 1.1.2.4 – 2  
Fläche als Maß für die verschobene Ladungsmenge