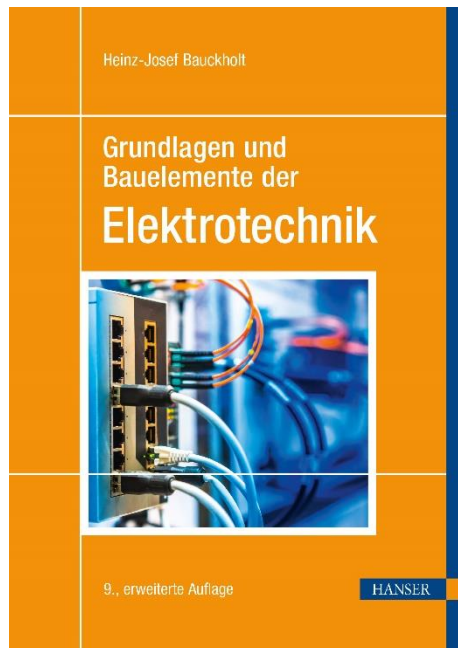


# HANSER



## **Leseprobe**

zu

## **Grundlagen und Bauelemente der Elektrotechnik**

von Heinz-Josef Bauckholt

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

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

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446473003>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

---

# 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 Verhältnisbildung zwischen Teilspannung und Teilwiderständen – Spannungs-<br>teilung . . . . .                | 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 unabgeglichene 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<br>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 Mehrphasenwechselspannung – Mehrphasenwechselstrom (Drehstrom) . . . . . | 378 |
| 7.1 Erzeugung von Mehrphasenwechselspannung . . . . .                      | 378 |
| 7.2 Dreiphasenwechselspannung . . . . .                                    | 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 |



# 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-

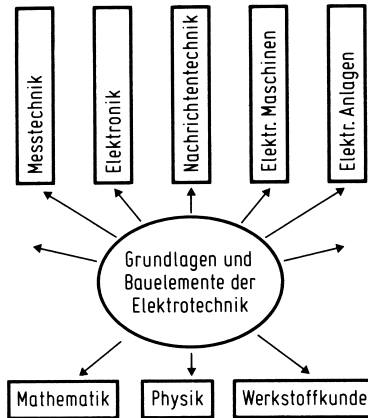


Bild 0. – 1  
Grundlagen der Elektrotechnik im Beziehungsfeld der Anwendungsgebiete

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.

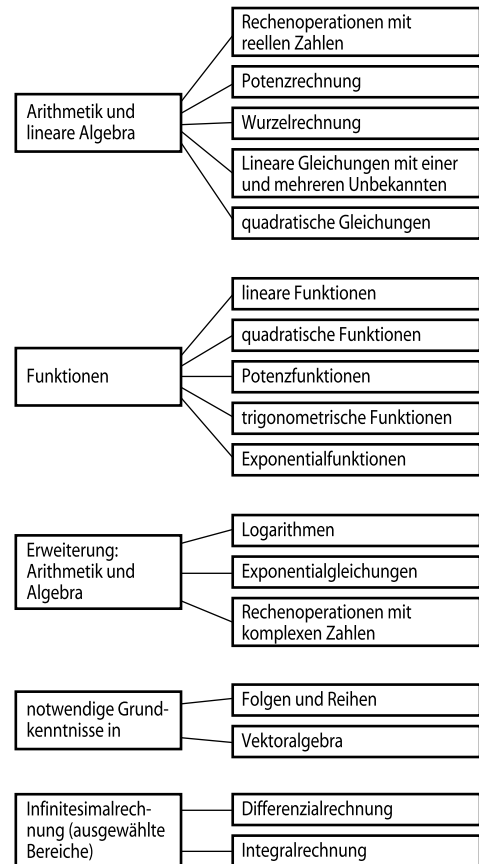


Bild 0. – 2

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.

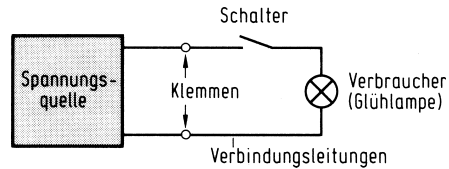


Bild 1.0 – 1 Elektrischer Stromkreis

## 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

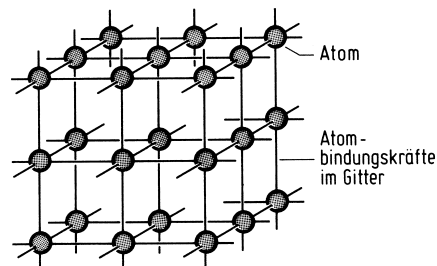


Bild 1.1.1 – 1 Kristallgitter der Atome



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.

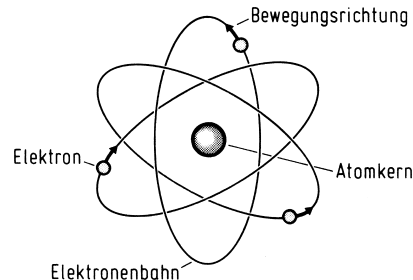


Bild 1.1.1.1 – 1 Atommodell

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:

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)

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:

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

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

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

(1.1.1.2 – 3)

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:

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

(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)

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):

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.

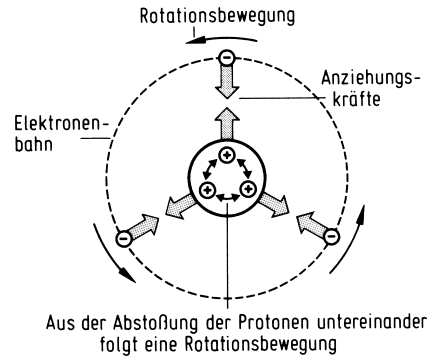


Bild 1.1.1.2 – 1  
Schematische Darstellung zur Umlaufbewegung der Elektronen

### 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.

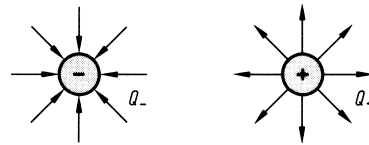


Bild 1.1.1.3 – 1 Elektrische Felder um Ladungen

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

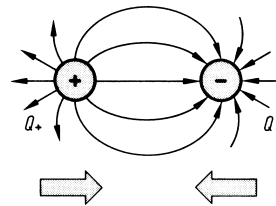


Bild 1.1.1.3 – 2 Anziehung ungleichnamiger Ladungen

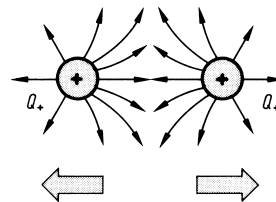


Bild 1.1.1.3 – 3 Abstoßung gleichnamiger Ladungen

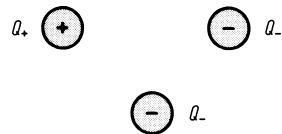
Zusammenfassend ergeben die bisherigen Erkenntnisse folgende Aussage:

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.

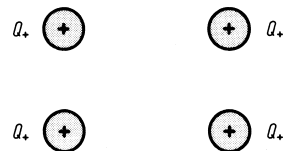
Lösung:



### 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 $I$

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

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

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

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.

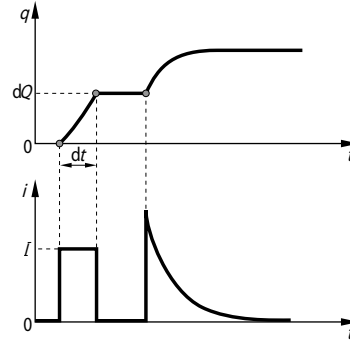


Bild 1.1.2.1 – 1 Die Stromfunktion in Abhängigkeit von der Änderung der Ladungsmenge

### 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:*

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

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.

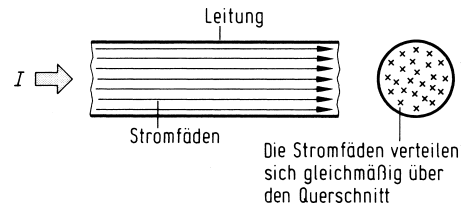


Bild 1.1.2.3 – 1

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:*

---

# Sachwortverzeichnis

- Admittanz 327  
Akkumulatoren 161  
Aluminium-Elektrolytkondensator 411  
 $A_L$ -Faktor 426  
Ampère 25  
Anode 154  
Äquipotenziallinien 179  
Äquivalent, elektrochemisches 155  
Arbeit, elektrische 132, 357  
Arbeitspunkt 51, 54  
Atom 22  
Atomkern 22  
Atommodell 22  
Atomteilchen 22  
Augenblickswert 273
- B**  
Bändermodell 31, 36  
Belastbarkeit (Dauerbelastung) 402  
belasteter Spannungsteiler 93  
Belastungsbetrieb 145  
Belastung, symmetrische 383, 386  
Black Box 82  
Bleiakkumulator 162  
Blindarbeit (= Feldenergie) 371  
Blindleistung 360, 362  
Blindleistung, induktive 361  
Blindleistung, kapazitive 360  
Blindleistungskompensation 367  
Blindleitwert, induktiver 295  
Blindleitwert, kapazitiver 290  
Blindwiderstand 298  
Blindwiderstand, induktiver 293, 298  
Blindwiderstand, kapazitiver 287, 298  
Bogenmaß 275  
Brückenschaltung 97
- chemische Energie 153
- Coulomb 23  
Coulomb'sches Gesetz 177, 178, 188
- D**  
Dauer-Gleichspannung 34  
Dauer-Gleichstrom 30  
Dauermagnet 210, 243  
Dipol 185  
Drahtpotenziometer 401  
Drahtwiderstand 399  
Drehko 413  
Drehkondensator 409  
Drehstrom 378  
Dreieckschaltung 382  
Dreiecksumlaufwiderstand 104  
Dreiphasennetz 380  
Dreiphasenwechselspannung 379, 389  
Dreiphasenwechselstrom 379  
Druck, osmotischer 157  
Durchflutung, elektrische 214, 215  
dynamisches Widerstandsverhalten 56
- Edelmetallschichtwiderstand 398  
Effektivwert 274, 276  
elektrische Arbeit 132, 357  
elektrische Durchflutung 214, 215  
elektrische Feldkonstante 178  
elektrische Feldstärke 175  
elektrische Flussdichte 186  
elektrische Influenz 185  
elektrische Ladung 23  
elektrische Leistung 134, 357  
elektrische Leitfähigkeit 38  
elektrische Spannung 30, 32  
elektrische Stromstärke 25  
elektrischer Widerstand 35, 37  
elektrisches Feld 24, 172  
Elektrizität 22  
elektrochemische Spannungsreihe 158  
elektrochemisches Äquivalent 155  
Elektrolyse 153  
Elektrolyt 154  
Elektrolytkondensator 409, 411, 412  
Elektromotor 243  
Elektron 22  
Elektronenbewegung 25  
Elektronenfluss 37  
Elektronengas 35  
Elektronengeschwindigkeit 26, 27  
Elektronenkonzentration 36  
Elektronenmangel 33, 46  
Elektronenüberschuss 33, 46  
Elektrostatik 173  
Elementarladung 23, 26  
Energie, chemische 153  
Energie, mechanische 150  
Energie, optische 152  
Energie, potenzielle 31  
Energie, thermische 151  
Energieniveau 31  
Energieumwandlung 33  
Ersatzleitwert 80  
Ersatzscheinwiderstand 317  
Ersatzspannungsquelle 82, 86  
Ersatzstromquelle 82, 87  
Ersatzwiderstand 75, 78  
Exponentialform 299
- F**  
Faraday 155  
Faraday'sches Gesetz 155  
Feld, elektrisches 24, 172  
Feld, magnetisches 210  
Feldkonstante, elektrische 178  
Feldkonstante, magnetische 220  
Feldlinie 24  
Feldstärke 176  
Feldstärke, elektrische 175  
Feldstärke, magnetische 215, 216  
ferromagnetische Werkstoffe 223  
Festwiderstand 397



Flussdichte, elektrische 186  
 Fourier-Analyse 281  
 Frequenz 274  
 Frequenzabhängigkeit 414

Generatorprinzip 249, 250  
 Gesamtspannung 62, 73  
 Gesamtstrom 62, 73  
 Gesamtwiderstand 62, 73  
 Gesamtwirkleistung 384  
 Gitterstruktur 35  
 Grenzfrequenz 337

**Hertz** 274  
 Hystereseschleife 227  
 Hysteresis, magnetische 226

ideale Spannungsquelle 82  
 Impedanz 304, 327  
 Impedanzschaltung 328  
 Impuls-Gleichspannung 34  
 Impuls-Gleichstrom 30  
 Impuls-Wechselspannung 34  
 Impuls-Wechselstrom 30  
 Impulsbelastbarkeit 402  
 Induktanz 327  
 Induktion, magnetische 248  
 Induktionsfluss, magnetischer 213  
 Induktionsgesetz 251, 252, 254, 256  
 induktive Blindleistung 361  
 induktive Suszeptanz 327  
 induktiver Blindleitwert 295  
 induktiver Blindwiderstand 293, 298  
 Induktivität 257, 258  
 Influenz, elektrische 185  
 Innenwiderstand 56, 57  
 Isolator 45  
 Isolierwerkstoff 39

**Kapazität** 327  
 Kapazität 188  
 kapazitive Blindleistung 360  
 kapazitive Suszeptanz 327  
 kapazitiver Blindleitwert 290  
 kapazitiver Blindwiderstand 287, 298  
 Kathode 154  
 Kenngrößen der Ersatzspannungsquelle 84  
 Kenngrößen der Ersatzstromquelle 88  
 Kennzeichnung 407, 416  
 Keramikkondensator 409, 411  
 Kettengleichung 65  
 Kettenleiter 112  
 Kirchhoff 63, 74  
 Kirchhoff'scher Satz 63, 74, 107  
 Knotenpunkt 108, 124  
 Knotenpunktgleichung 108  
 Kohle-Zink-Element 159  
 Kohleschichtwiderstand 398  
 komplexe Rechnung 298  
 komplexe Zahlen 298  
 Kondensator 172, 181  
 Kondensator, technischer 409  
 Konduktanz 327

konjugiert komplexe Erweiterung 300  
 Korkenzieher-Regel 211  
 Kreisfrequenz 275  
 Kreis, magnetischer 231  
 Kristallgitter 35, 38, 43  
 Kurzschluss-Kennwiderstand 127  
 Kurzschluss-Stromverhältnis 128  
 Kurzschlussbetrieb 145

Ladung, elektrische 23  
 Ladevorgang 200  
 Ladungsmenge  $Q$  163  
 Ladungsspeicherung 181  
 Ladungstrennung 32  
 Leerlauf-Kennleitwert 128  
 Leerlauf-Spannungsverhältnis 127  
 Leerlaufbetrieb 145  
 Leistung 132  
 Leistung, elektrische 134, 357  
 Leistungsanpassung 144, 146  
 Leistungsbilanz 144  
 Leistungsfaktor 367  
 Leistungsfaktorverbesserung 367, 368  
 Leistungshyperbel 137, 138  
 Leiterspannung 381, 382  
 Leitfähigkeit, elektrische 38  
 Leitungsband 36  
 Leitwert 48  
 Leitwert, magnetischer 217, 218  
 Lenz'sche Regel 250  
 Lichtausbeute 152  
 Lichtgeschwindigkeit 27  
 Lichtstärke 152  
 Lichtstrom 152  
 linearer Widerstand 50  
 Liniendiagramm 271, 272  
 Linke-Hand-Regel 244  
 Lorentz-Kraft 245  
 Lösungsdruck 158

**Magnetfluss** 213  
 Magnetflussdichte 213  
 Magnetgestell 232  
 magnetische Feldkonstante 220  
 magnetische Feldstärke 215, 216  
 magnetische Hysteresis 226  
 magnetische Induktion 248  
 magnetischer Induktionsfluss 213  
 magnetischer Kreis 231  
 magnetischer Leitwert 217, 218  
 magnetischer Widerstand 217, 218, 231  
 magnetisches Feld 210  
 Magnetisierungsarbeit 229  
 Magnetisierungskennlinie 222  
 Magnetisierungsverlust 230  
 Maschengleichung 107–108  
 Maschenumlaufrihtung 107  
 mechanische Energie 150  
 Mehrphasenwechselspannung 378  
 Mehrphasenwechselstrom 378  
 Metallion 36  
 Metallschichtwiderstand 398  
 Mischspannung 35

- Mischstrom 30  
MK-Kondensator 410  
Momentanwert 273  
Motorprinzip 243  
MP-Kondensator 409
- Nennkapazität 414  
Nennspannung 414  
Netz, öffentliches 389  
Netzwerk 99  
nichtlinearer Widerstand 53  
Normalform 299  
Normreihe 404  
Normreihe (E-Reihe) 404  
Nulldurchgang 273  
Nutzleistung 140
- öffentliches Netz 389  
Ohm 37, 47  
Ohm'sches Gesetz 47, 49, 51, 76  
optische Energie 152  
Ortskurve 348, 351  
Osmose 157  
osmotischer Druck 157
- Parallelresonanzkreis 345  
Parallelschaltung 73  
Parametrierung 349  
passiver Vierpol 122  
Periodendauer 272  
Permeabilitätszahl 220  
Permittivität 187  
Permittivitätszahl 187  
Phasenverschiebung 278, 296  
Phasenverschiebungswinkel 279  
Potenzialunterschied 31, 32  
Potenzialverschiebung 69  
potenzielle Energie 31  
Potenziometer 400  
Potenziometerschaltung 67, 95  
Primärelement 157  
Proton 22
- Reaktanz 327  
Rechte-Hand-Regel 211, 212, 250  
Reihenresonanzkreis 341  
Reihenschaltung 71, 80  
Resistanz 327  
Resonanz 337, 340  
Resonanzfall 324  
Resonanzfrequenz 340  
Reststrom 414
- Schaltvorgänge 195  
Scheinarbeit 371  
Scheinleistung 362, 366  
Scheinleitwert 317, 318, 321  
Scheinspannung 303  
Scheinstromstärke 316  
Scheinwiderstand 304  
Scheitelfaktor 277  
Scheitelwert 273  
Schichtgemischwiderstand 398  
Schichtpotenziometer 400  
Schichtwiderstand 398  
Skalar 28  
Spannung 20  
Spannung, elektrische 30, 32  
Spannungsarten 34  
Spannungsfestigkeit 403  
Spannungsmessung 56  
Spannungsnetz 389  
Spannungspotenzial 69, 179  
Spannungsquelle, ideale 82  
Spannungsreihe, elektrochemische 158  
Spannungsteiler, belasteter 93  
Spannungsquelle 33  
Spannungsteiler 93  
Spannungsteiler, unbelasteter 66  
Spannungszeigerdiagramm 307, 312  
spezifische Wärmekapazität 151  
spezifischer elektrischer Widerstand 38  
Spitzenspannung 414  
statisches Widerstandsverhalten 56  
Stern-Dreieck-Umwandlung 99  
Sternleitwert 101  
Sternschaltung 381  
Strangspannung 381  
Strom 20  
Stromart 30  
Strombegrenzer 37  
Stromdichte 27, 28, 176  
Stromfaden 28  
Stromgeschwindigkeit 27  
Stromkreis 46  
Stromleitung 35, 37  
Stromleitungsmechanismen 45  
Strommessung 56  
Stromrichtung 37  
Stromstärke, elektrische 25  
Stromteilung 76  
Stromzeigerdiagramm 320, 323  
Suszeptanz 327  
Suszeptanz, induktive 327  
Suszeptanz, kapazitive 327  
symmetrische Belastung 383, 386
- Tantal-Elektrolytkondensator 412  
technischer Kondensator 409  
technischer Widerstand 40, 397  
Teildurchflutung 215, 231  
Temperaturabhängigkeit 414  
Temperaturbeiwert 402  
Temperaturkoeffizient 43, 402  
thermische Energie 151  
Transformatorprinzip 264  
trigonometrische Form 299
- Überlagerung 118  
Überlagerungssatz 115  
Übersetzungsverhältnis 265  
Ummagnetisierungsvorgang 226  
unbelastete Spannungsteiler 66
- Valenzelektronen 35, 45  
Vektor 28

- Verkettung 380  
Verkettungsfaktor 382  
Verlustfaktor  $\tan \delta = d_C$  414  
Verlustleistung 140  
Vierpol 59  
Vierpol, passiver 122  
Vierpol-Gleichungssystem 124  
Vierpolgleichung 123  
Vierpolparameter 126, 129  
Volta 32
- W**  
Wärmefluss 141  
Wärmekapazität, spezifische 151  
Wärmewiderstand 141, 402  
Wärmewirkung 29  
Wechselspannung 34, 271, 278  
Wechselstrom 30, 271, 278  
Werkstoffe, ferromagnetische 223  
Wickelkondensator 409  
Widerstand 20  
Widerstand, elektrischer 35, 37  
Widerstand, linearer 50  
Widerstand, magnetischer 217, 218, 231  
Widerstand, nichtlinearer 53  
Widerstand, technischer 40, 397  
Widerstands-Temperaturkoeffizient 43  
Widerstandsart 40  
Widerstandsdiagramm 49, 50  
Widerstandsdrift 402  
Widerstandskennlinie 50, 52  
Widerstandstoleranz 402  
Widerstandsverhalten 56  
Widerstandsverhalten, dynamisches 56  
Widerstandsverhalten, statisches 56  
Widerstandswert 402  
Widerstandszeigerdiagramm 308, 313  
Winkelgeschwindigkeit 273  
Wirbelstrom 230  
Wirkarbeit 371  
Wirkleistung 357, 362  
Wirkleistung eines Stranges 384  
Wirkungsgrad 143  
Wirkwiderstand 285, 298
- Z**  
Zeigerdiagramm 271, 272  
Zeitkonstante 196, 199, 262  
Zentripetalkraft 31  
Zweipol 58