

0 Einleitung

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

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

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

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

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

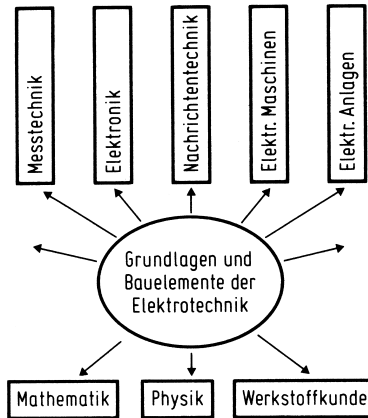


Bild 0. – 1
Grundlagen der Elektrotechnik im Beziehungsfeld der Anwendungsgebiete

gültige Gleichung erst nach mehreren Kapiteln vorliegt.

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

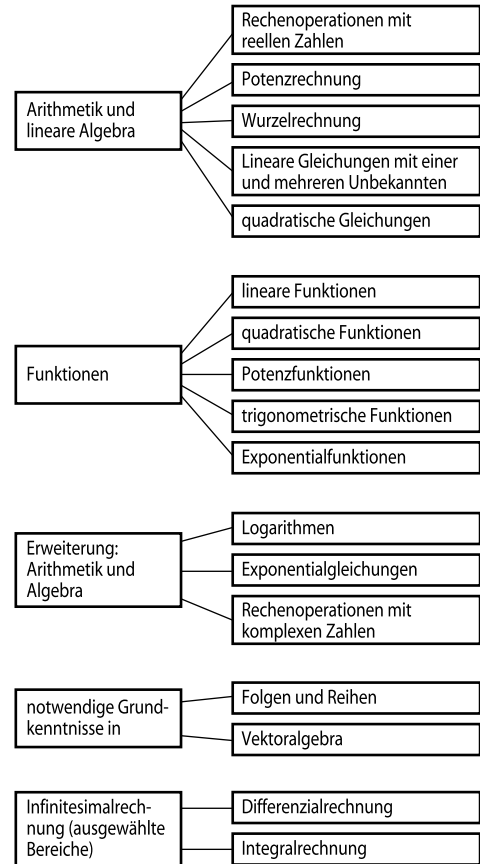


Bild 0. – 2
Strukturplan der als notwendig erachteten Mathematik

1 Elektrische Grundgrößen

1.0 Elektrizität und Elektrotechnik

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

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

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

Anhand eines Stromkreises werden nun die elektrischen Grundgrößen hergeleitet.

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

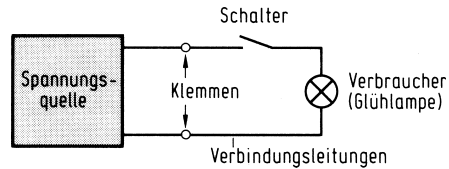


Bild 1.0 – 1 Elektrischer Stromkreis

1.1 Elektrischer Strom

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

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

1.1.1 Elektrische Ladung als Ursprung der Elektrizität

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

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

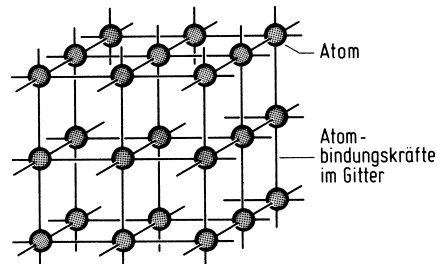


Bild 1.1.1 – 1 Kristallgitter der Atome

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

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

1.1.1.1 Das Elektron im Atomaufbau

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

Bei der Betrachtung dieses Atommodells drängen sich folgende Fragen auf:

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

Die Antwort ist: **Elektrische Kräfte.**

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

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

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

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

Zurück zum Atommodell:

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

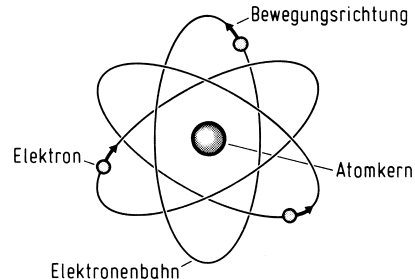


Bild 1.1.1.1 – 1 Atommodell

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

1.1.1.2 Das Elektron als kleinste elektrische Ladung

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

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

Als Einheit ist definiert:

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

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

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

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

Für den Atomaufbau bedeuten die bisherigen Erkenntnisse:

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

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

Das Elektron besitzt die kleinste elektrische Ladung.

Elektrische Ladung Q

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

(1.1.1.2 – 1)

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

(1.1.1.2 – 2)

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

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

(1.1.1.2 – 3)

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

(1.1.1.2 – 4)

Q_1 = Ladung des Elektrons

Q_2 = Ladung des Protons

r = Abstand: Kern–Elektron

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

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

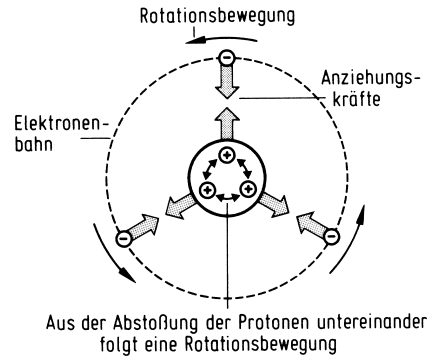


Bild 1.1.1.2 – 1
Schematische Darstellung zur Umlaufbewegung der Elektronen

1.1.1.3 Das Modell des elektrischen Feldes um eine elektrische Ladung

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

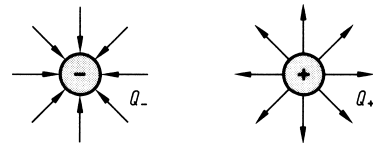


Bild 1.1.1.3 – 1 Elektrische Felder um Ladungen

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

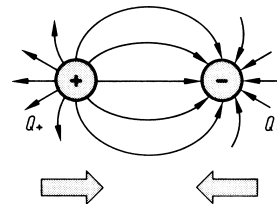


Bild 1.1.1.3 – 2 Anziehung ungleichnamiger Ladungen

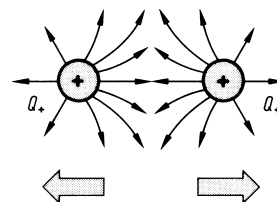


Bild 1.1.1.3 – 3 Abstoßung gleichnamiger Ladungen

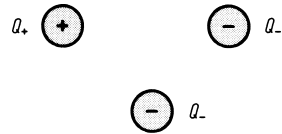
Zusammenfassend ergeben die bisherigen Erkenntnisse folgende Aussage:

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

Übung 1.1.1.3 – 1

Skizzieren Sie das elektrische Gesamtfeld der gegebenen Anordnung elektrischer Ladungen.

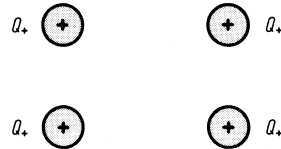
Lösung:



Übung 1.1.1.3 – 2

Skizzieren Sie das elektrische Gesamtfeld der gegebenen Anordnung elektrischer Ladungen.

Lösung:



1.1.2 Stromfluss als gerichtete bewegte Ladung

1.1.2.1 Elektrischer Stromfluss

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

Elektrischer Strom =
gerichtete bewegte Ladung =
gerichtete Elektronenbewegung

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

Elektrische Stromstärke *I*

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

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

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

Für ein Ampere gilt:

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

Gebräuchliche Vielfache bzw. Teile der Einheit Ampere sind:

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

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

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

Die Aussagen in der Gleichung ergeben folgenden Funktionszusammenhang:

Die Änderung der Ladungsmenge hat eine Stromänderung als Folge.

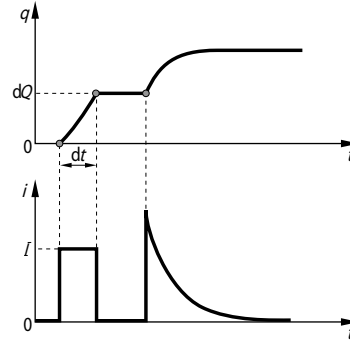


Bild 1.1.2.1-1 Die Stromfunktion in Abhängigkeit von der Änderung der Ladungsmenge

1.1.2.2 Elektronengeschwindigkeit und Stromgeschwindigkeit

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

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

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

e = Elementarladung

V = Volumen der Verbindungsleitungen und Verbraucher

V = Fläche A · Länge l

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

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

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

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

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

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

Durch Umstellung ergibt sich daraus eine Berechnungsformel für die Elektronengeschwindigkeit:

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

Beispiel 1.1.2.2. – 1

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

Lösung:

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

In den meisten Fällen liegt die Elektronengeschwindigkeit im Bereich:

Durchschnittliche Elektronengeschwindigkeit

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

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

Stromgeschwindigkeit = Lichtgeschwindigkeit c

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

Übung 1.1.2.2 – 1

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

Lösung:

1.1.2.3 Stromdichte

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

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

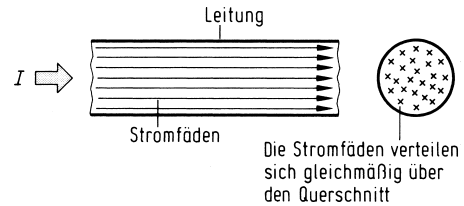


Bild 1.1.2.3 – 1
Schematische Darstellung der Stromfäden beim Stromdurchgang

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

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

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

Als Einheit ergibt sich:

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

Allgemein gilt die Aussage:

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

Beispiel 1.1.2.3 – 1

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

Lösung:

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

Übung 1.1.2.3 – 1

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

Lösung:

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
Dreieckschlusswiderstand 104
Dreiphasenstrom 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
- 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

- Flusssdichte, 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, unbelastete 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