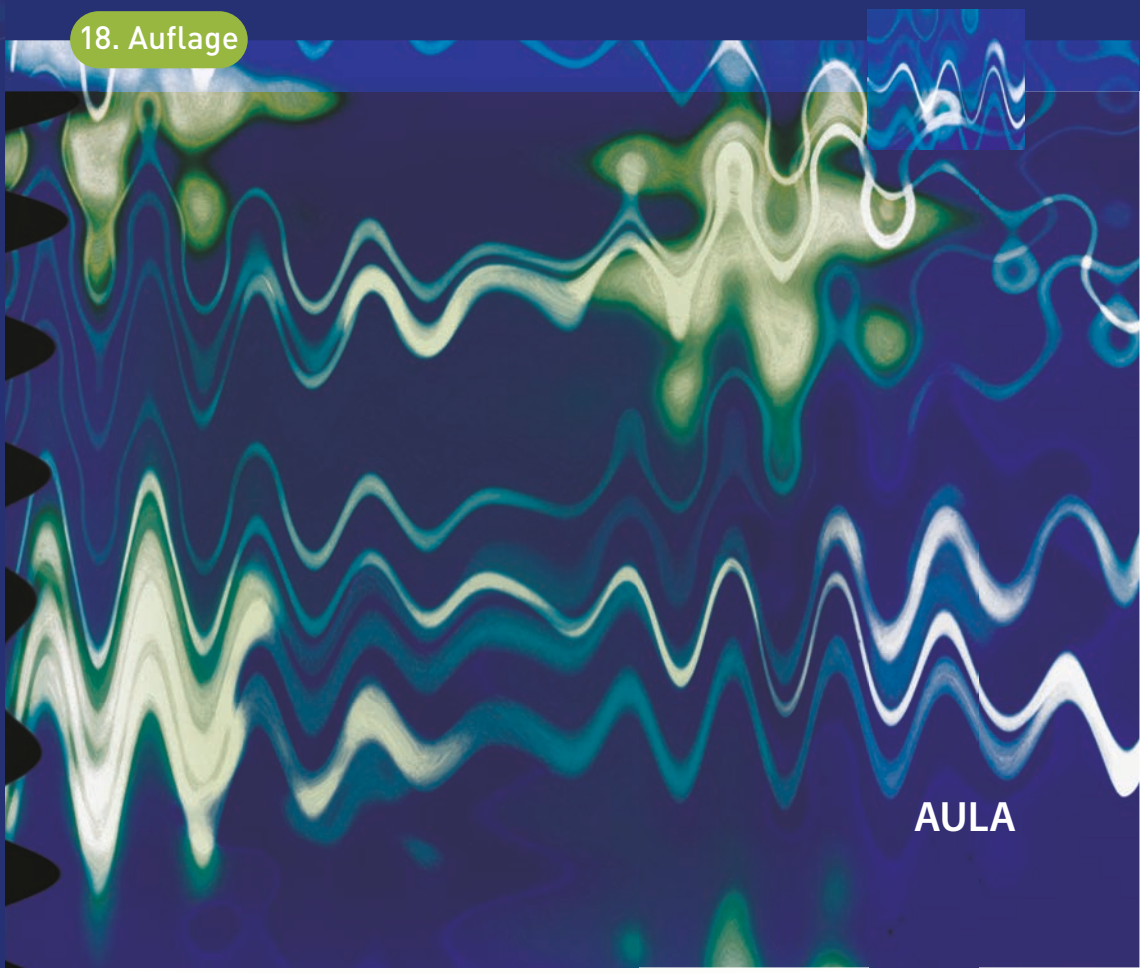
Gert Hagmann

Grundlagen der Elektrotechnik

Das bewährte Lehrbuch für Studierende der Elektrotechnik und anderer technischer Studiengänge ab 1. Semester

18. Auflage



AULA

Gert Hagmann

Grundlagen der Elektrotechnik

Das bewährte Lehrbuch für Studierende der Elektrotechnik und anderer technischer Studiengänge ab 1. Semester

Mit 225 Abbildungen, 4 Tabellen, Aufgaben und Lösungen

18., durchgesehene und korrigierte Auflage

AULA-Verlag

Inhalt

1 Physikalische Größen, Einheiten, Gleichungen 1
1.1 Physikalische Größen 1
1.2 Das internationale Einheitensystem 1
1.3 Gleichungen 5

2 Gleichstromkreise 6
2.1 Grundbegriffe der elektrischen Strömung 6
2.1.1 Aufbau der Materie, elektrische Ladungsträger 6
2.1.2 Freie Elektronen, Defektelektronen, Ionen 7
2.1.3 Der elektrische Strom 8
2.1.4 Die elektrische Stromdichte 10
2.1.5 Strömungsgeschwindigkeit der Elektronen 10
2.1.6 Die elektrische Spannung 12
2.1.7 Das ohmsche Gesetz 13
2.1.8 Spezifischer Widerstand und Leitfähigkeit 15
2.1.9 Die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes 18
2.1.10 Arbeit und Leistung bei Gleichstrom 21
2.1.11 Bezugssinn und Pfeilsysteme 24
2.1.12 Die Kirchhoff'schen Gesetze 25
2.1.13 Quellenspannung und innerer Widerstand von realen Spannungsquellen 28
2.1.14 Stromquellen 29
2.2 Die Berechnung von Gleichstromkreisen 31
2.2.1 Reihenschaltung von Widerständen 31
2.2.2 Parallelschaltung von Widerständen 32
2.2.3 Dreieck-Stern- und Stern-Dreieck-Umwandlung 34
2.2.4 Netzwerkberechnung bei Schaltungen mit einer Spannungsquelle 38
2.2.5 Netzwerkberechnung durch unmittelbare Anwendung der Kirchhoff'schen Gesetze 42
2.2.6 Netzwerkberechnung nach dem Maschenstromverfahren 45
2.2.7 Netzwerkberechnung nach dem Knotenpotenzial-Verfahren 53
2.2.8 Netzwerkberechnung durch Anwendung des Überlagerungs-gesetzes 60
2.2.9 Leistungsanpassung 63
2.2.10 Die Ersatzspannungsquelle 65

2.2.11 Anwendung der Ersatzspannungsquelle zur Netzwerkberechnung ... 70
2.2.12 Die Ersatzstromquelle ... 74
2.3 Nichtlineare Gleichstromkreise ... 76
2.3.1 Allgemeines ... 76
2.3.2 Behandlung nichtlinearer Kreise ... 76

3 Das elektrische Feld ... 83
3.1 Die elektrische Ladung und ihre Wirkung ... 83
3.2 Die elektrischen Feldgrößen ... 84
3.2.1 Elektrische Feldstärke und elektrisches Potenzial ... 84
3.2.2 Der elektrische Fluss ... 89
3.2.3 Elektrische Flussdichte ... 90
3.2.4 Nichtleiter im elektrischen Feld ... 92
3.3 Berechnung elektrostatischer Felder ... 96
3.3.1 Das Feld der geladenen Kugel ... 96
3.3.2 Das Feld in der Umgebung mehrerer Ladungen ... 98
3.3.3 Das Feld des geladenen langen, geraden Leiters ... 101
3.4 Die Kapazität von Kondensatoren ... 103
3.4.1 Definition der Kapazität ... 103
3.4.2 Kapazität des Plattenkondensators ... 104
3.4.3 Kapazität des Kugelkondensators ... 105
3.4.4 Kapazität des Zylinderkondensators ... 106
3.4.5 Zusammenschaltung von Kondensatoren ... 106
3.5 Energie des elektrostatischen Feldes ... 111
3.5.1 Energie des geladenen Kondensators ... 111
3.5.2 Energiedichte im elektrostatischen Feld ... 113
3.6 Kräfte zwischen elektrischen Ladungen ... 118
3.6.1 Das Coulomb'sche Gesetz ... 118
3.6.2 Kräfte zwischen Elektroden ... 121

4 Das elektrische Strömungsfeld ... 124
4.1 Allgemeines ... 124
4.2 Feldgrößen des Strömungsfeldes ... 125
4.3 Bestimmung von Widerständen ... 128

5 Das magnetische Feld ... 131
5.1 Allgemeines zum magnetischen Feld ... 131
5.2 Die magnetischen Feldgrößen ... 133
5.2.1 Magnetische Feldstärke ... 133
5.2.2 Magnetische Flussdichte und Permeabilität ... 136
5.2.3 Der magnetische Fluss ... 138
5.2.4 Die magnetische Spannung ... 139
5.3 Das Durchflutungsgesetz ... 140

5.4 Der magnetische Kreis und das ohmsche Gesetz des magnetischen Kreises ... 143
5.5 Berechnung magnetischer Felder ... 146
5.5.1 Magnetisches Feld in der Umgebung mehrerer stromführender Leiter ... 147
5.5.2 Das Gesetz von Biot-Savart ... 150
5.6 Materie im magnetischen Feld ... 153
5.6.1 Allgemeines ... 153
5.6.2 Ferromagnetische Stoffe ... 154
5.6.3 Magnetische Kreise mit Eisen ... 157
5.6.4 Magnetischer Kreis mit Dauermagnet ... 166
5.7 Kräfte im magnetischen Feld ... 168
5.7.1 Stromführender Leiter im Magnetfeld ... 168
5.7.2 Bewegte Ladung im Magnetfeld ... 169
5.7.3 Der Halleffekt ... 172
5.7.4 Kräfte zwischen stromführenden Leitern ... 173
5.8 Induktionswirkung des magnetischen Feldes ... 176
5.8.1 Bewegter Leiter im Magnetfeld ... 176
5.8.2 Induktionswirkung des zeitlich veränderlichen Magnetfeldes ... 180
5.9 Die Selbstinduktion ... 183
5.10 Die gegenseitige Induktion ... 189
5.11 Die Energie des magnetischen Feldes ... 192
5.12 Kräfte an Grenzflächen ... 196

6 Grundbegriffe der Wechselstromtechnik ... 199
6.1 Allgemeines über Wechselgrößen ... 199
6.2 Sinusförmige Wechselgrößen und ihre Darstellung ... 200
6.3 Mittelwerte von periodisch zeitabhängigen Größen ... 203
6.3.1 Gleichrichtwert ... 203
6.3.2 Effektivwert ... 205
6.3.3 Formfaktor und Scheitelfaktor ... 211
6.4 Die Zeigerdarstellung von Sinusgrößen ... 212
6.5 Die komplexe Darstellung von Sinusgrößen ... 214
6.5.1 Grundbegriffe der komplexen Rechnung ... 215
6.5.2 Anwendung der komplexen Rechnung in der Wechselstromtechnik ... 218

7 Einfache Wechselstromkreise ... 221
7.1 Grundschaltungen ... 221
7.1.1 Kreis mit ohmschem Widerstand ... 221
7.1.2 Kreis mit Spule ... 223
7.1.3 Kreis mit Kondensator ... 226
7.1.4 Kreis mit Spule und Reihenwiderstand ... 230
7.1.5 Kreis mit Kondensator und Reihenwiderstand ... 235
7.1.6 Kreis mit Spule und Parallelwiderstand ... 238

7.1.7 Kreis mit Kondensator und Parallelwiderstand 241
7.1.8 Umwandlung von Reihen- und Parallelschaltung 245
7.2 Ersatzschaltungen für reale Bauelemente 249
7.2.1 Spule mit Wirkwiderstand 249
7.2.2 Kondensator mit Verlustwiderstand 250
7.2.3 Widerstand mit Eigeninduktivität und Eigenkapazität 252

8 Leistung im Wechselstromkreis 255
8.1 Wirkleistung 255
8.2 Blindleistung 256
8.3 Scheinleistung 259
8.4 Komplexe Darstellung der Leistung 261

9 Berechnung von Wechselstromnetzen 263
9.1 Allgemeine Berechnungsverfahren 263
9.2 Leistungsanpassung in Wechselstromkreisen 272
9.3 Blindleistungskompensation 276

10 Ortskurven 280
10.1 Begriff der Ortskurve 280
10.2 Die Ermittlung von Ortskurven 283
10.2.1 Inversion einer Geraden 283
10.2.2 Inversion eines Kreises 287

11 Tief- und Hochpässe 292
11.1 Tiefpass 292
11.2 Hochpass 294

12 Schwingkreise 296
12.1 Freie und erzwungene Schwingungen 296
12.2 Der Reihenschwingkreis 297
12.2.1 Allgemeines 297
12.2.2 Verhalten bei Resonanz 298
12.2.3 Frequenzgang 301
12.3 Der Parallelschwingkreis 304
12.3.1 Allgemeines 304
12.3.2 Verhalten bei Resonanz 305
12.3.3 Frequenzgang 307

13 Drosselspulen und magnetisch gekoppelte Kreise 309
13.1 Drosselspule mit Eisenkern 309
13.1.1 Allgemeines 309
13.1.2 Hystereseverluste 311
13.1.3 Wirbelstromverluste 312
13.1.4 Ersatzschaltbild 313
13.2 Transformator mit Eisenkern 315

13.2.1 Der ideale Transformator 315
13.2.2 Verhalten und Ersatzschaltbild des realen Transformators 316
13.2.3 Leerlauf- und Kurzschlussversuch 319
13.3 Der eisenfreie Transformator 324
13.3.1 Der eisenfreie Transformator im unbelasteten Zustand 324
13.3.2 Der eisenfreie Transformator im belasteten Zustand 325
13.3.3 Reihenschaltung von magnetisch gekoppelten Spulen 326

14 Drehstromtechnik 330
14.1 Die Erzeugung von Drehstrom 330
14.1.1 Sternschaltung des Generators 331
14.1.2 Dreieckschaltung des Generators 333
14.2 Verbraucherschaltungen im Drehstromsystem 334
14.2.1 Sternschaltung mit angeschlossenem Neutralleiter 334
14.2.2 Sternschaltung ohne angeschlossenen Neutralleiter 337
14.2.3 Dreieckschaltung 341
14.3 Die Leistung im Drehstromsystem 345
14.3.1 Leistung bei symmetrischer Belastung 345
14.3.2 Leistung bei unsymmetrischer Belastung 348

15 Nichtsinusförmige periodische Vorgänge 349
15.1 Allgemeines 349
15.2 Darstellung von Funktionen durch Fourier-Reihen 349
15.3 Die Fourier-Analyse 351
15.4 Nichtsinusförmige Vorgänge in linearen Schaltungen 355
15.5 Effektivwert, Leistung, Verzerrung 356
15.5.1 Effektivwert nichtsinusförmiger Wechselgrößen 356
15.5.2 Wirk-, Blind- und Scheinleistung 358
15.5.3 Kenngrößen der Verzerrung 360

16 Schaltvorgänge 362
16.1 Allgemeines 362
16.2 Schaltvorgänge in RL- und RC-Schaltungen 363
16.2.1 Ohmsch-induktiver Gleichstromkreis 363
16.2.2 Ohmsch-kapazitiver Gleichstromkreis 366
16.2.3 Ohmsch-induktiver Wechselstromkreis 370
16.2.4 Ohmsch-kapazitiver Wechselstromkreis 374
16.3 Schaltvorgänge in RLC-Schaltungen 376
16.3.1 Schaltvorgänge in RLC-Schaltungen bei Gleichspannungsversorgung 376
16.3.2 Schaltvorgänge in RLC-Schaltungen bei Wechselspannungsversorgung 387

Verzeichnis der wichtigsten Symbole 389
Literaturverzeichnis 391
Sachverzeichnis 392

1 Physikalische Größen, Einheiten, Gleichungen

1.1 Physikalische Größen

Zur Beschreibung von Naturvorgängen sind zahlreiche **physikalische Größen** definiert worden. Bekannte Größen sind zum Beispiel Länge, Zeit, Geschwindigkeit, elektrische Spannung, Temperatur. Zur Messung und Darstellung von physikalischen Größen benötigt man **Einheiten**. Einheiten für die Länge sind zum Beispiel Meter, Zentimeter oder Millimeter, Einheiten für die Zeit Stunde oder Sekunde. Zur vereinfachten Darstellung verwendet man sowohl für die physikalische Größen als auch für die Einheiten *Abkürzungen* (Symbole). Zum Beispiel werden die Länge durch *l*, die Zeit durch *t*, das Meter durch m, die Sekunde durch s abgekürzt.

Jede physikalische Größe kann durch ein Produkt aus **Zahlenwert** und **Einheit** dargestellt werden. Wählen wir hierfür als Beispiel

$$l = 5\ \mathrm{m},$$

so sind *l* die physikalische Größe (Länge), 5 der Zahlenwert und m die Einheit (Meter).

1.2 Das internationale Einheitensystem

In Technik, Forschung und Wissenschaft werden, ebenso wie auch in Wirtschaft, Handel und Gewerbe, überwiegend **SI-Einheiten** verwendet. SI ist die Abkürzung für **Système Internationale d'Unités** (internationales Einheitensystem). Dieses international vereinbarte Einheitensystem enthält die in Tabelle 1.1 angegebenen sieben **Basiseinheiten**, die dadurch gekennzeichnet sind, dass sie willkürlich festgelegt sind und nicht aus anderen Einheiten abgeleitet werden.

Von diesen sieben Basiseinheiten sind für das Gebiet der Elektrotechnik nur die ersten vier von besonderer Bedeutung. Aus den folgenden Angaben ist zu ersehen, in welcher Weise diese vier Basiseinheiten festgelegt sind.

Das **Meter** ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Dauer von (1/299 792 458) Sekunden durchläuft.

Das **Kilogramm** ist die Einheit der Masse; es ist gleich der Masse des Internationalen Kilogrammprototyps.

Die **Sekunde** ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids ^{133}Cs entsprechenden Strahlung.

Das **Ampere** ist die Stärke eines konstanten elektrischen Stromes, der, durch zwei parallele, geradlinige, unendlich lange und im Vakuum im Abstand von 1 Meter voneinander angeordnete Leiter von vernachlässigbar kleinem, kreisförmigem Querschnitt fließend, zwischen diesen Leitern je 1 Meter Leiterlänge die Kraft $2 \cdot 10^{-7}$ Newton hervorrufen würde.

Tabelle 1.1
Basisgrößen und Basiseinheiten des internationalen Einheitensystems

Basisgröße	Basiseinheit	Kurzzeichen
Länge	Meter	m
Masse	Kilogramm	kg
Zeit	Sekunde	s
elektrische Stromstärke	Ampere	A
Temperatur	Kelvin	K
Lichtstärke	Candela	cd
Stoffmenge	Mol	mol

Von den in Tabelle 1.1 enthaltenen Basiseinheiten werden alle übrigen SI-Einheiten abgeleitet. Man bezeichnet sie als **abgeleitete Einheiten**. Sie haben zum Teil eigene Namen und eigene Einheitenzeichen, für andere abgeleitete Einheiten trifft dies nicht zu. An folgenden Beispielen sei gezeigt, wie aus den SI-Basiseinheiten andere SI-Einheiten abgeleitet werden.

Die SI-Einheit der **Geschwindigkeit** finden wir aus der Gleichung

$$v = \frac{l}{t},$$

die angibt, dass die Geschwindigkeit (v) eines Körpers gleich dem zurückgelegten Weg (l) dividiert durch die benötigte Zeit (t) ist. Die zugehörige Einheitengleichung lautet

$$[v] = \frac{[l]}{[t]}.$$

Darin bedeuten $[v]$ die Einheit der Geschwindigkeit, $[l]$ die Einheit des Weges und $[t]$ die Einheit der Zeit. Mit den SI-Basiseinheiten $[l]$ = m und $[t]$ = s wird die abgeleitete SI-Einheit der Geschwindigkeit

$$[v] = \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}.$$

Die SI-Einheit der **Kraft** finden wir aus der dynamischen Grundgleichung Kraft (F) gleich Masse (m) mal Beschleunigung (a), also aus

$$F = m\,a.$$

Die zugehörige Einheitengleichung lautet

$$[F] = [m]\,[a].$$

Mit $[m]$ = kg und $[a]$ = m/s^2 wird

$$[F] = \frac{\mathrm{kg\,m}}{\mathrm{s}^2}.$$

Hierfür verwendet man auch die Bezeichnung **Newton** (Einheitenzeichen: N). Somit ist die SI-Einheit der Kraft

$$\mathrm{N} = \frac{\mathrm{kg\,m}}{\mathrm{s}^2}. \tag{1.1}$$

Ein Newton ist also diejenige Kraft, die einem Körper der Masse 1 kg die Beschleunigung 1 m/s^2 erteilt.

Die Einheit der **Arbeit** (oder **Energie**) finden wir aus der Gleichung

$$W = F\,l,$$

die angibt, dass die geleistete Arbeit (W) sich aus dem Produkt der Kraft (F) und dem von der Kraft zurückgelegten Weg (l) ergibt. Die zugehörige Einheitengleichung

$$[W] = [F]\,[l]$$

liefert, wenn wir als Einheit der Kraft [F] = N und als Einheit für den zurückgelegten Weg [l] = m einsetzen,

$$[W] = \mathrm{N\,m}.$$

Hierfür verwendet man auch die Bezeichnung **Joule** (Einheitenzeichnen: J). Daher ist die SI-Einheit der Arbeit (oder Energie)

$$\mathrm{J} = \mathrm{N\,m}. \tag{1.2}$$

Ein Joule ist also gleich der Arbeit, die geleistet wird, wenn eine Kraft von einem Newton um einen Meter verschoben wird.

SI-Einheiten sind dadurch gekennzeichnet, dass in den sie verbindenden Einheitengleichungen kein von eins verschiedener Zahlenfaktor auftritt. So ist zum Beispiel die Krafteinheit Newton (N) eine SI-Einheit, da sie durch $1\,\mathrm{N} = 1\,\mathrm{kg \cdot m/s^2}$ dargestellt werden kann. Dagegen ist die Krafteinheit Kilopond (kp) keine SI-Einheit, da $1\,\mathrm{kp} = 9{,}81\,\mathrm{kg \cdot m/s^2}$ ist.

Wenn eine Einheit eine ungünstige Größenordnung hat, verwendet man *dezimale Vielfache* oder *dezimale Teile*. Beispielsweise kann man für eine Länge von l = 10000 m besser l = 10 km schreiben. Die möglichen Vorsätze sowie ihre Abkürzungen und ihre Bedeutung sind in Tabelle 1.2 zusammengestellt.

Tabelle 1.2
Vorsätze und Bezeichnungen von dezimalen Vielfachen und dezimalen Teilen von Einheiten

Vorsatz	Vorsatzzeichen	Bedeutung
Tera	T	10^{12}
Giga	G	10^{9}
Mega	M	10^{6}
Kilo	k	10^{3}
Hekto	h	10^{2}
Deka	da	10^{1}
Dezi	d	10^{-1}
Zenti	c	10^{-2}
Milli	m	10^{-3}
Mikro	µ	10^{-6}
Nano	n	10^{-9}
Piko	p	10^{-12}
Femto	f	10^{-15}
Atto	a	10^{-18}

1.3 Gleichungen

Die Zusammenhänge zwischen den einzelnen physikalischen Größen werden durch **Gleichungen** beschrieben. Als Darstellungsform verwendet man überwiegend die **Größengleichung**. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass jedes einzelne Symbol eine physikalische Größe darstellt. Die Einheit des Ergebnisses folgt zwangsläufig aus den Einheiten, die eingesetzt werden. Dies sei an einem Beispiel erläutert. Legt ein Körper den Weg l = 1800 m in der Zeit t = 180 s zurück, so beträgt die mittlere Geschwindigkeit

$$v = \frac{l}{t} = \frac{1800\ \text{m}}{180\ \text{s}} = 10\ \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Verwenden wir für die gleiche Aufgabe andere Einheiten, indem wir für l statt 1800 m den Wert 1,8 km einsetzen und für t statt 180 s den Wert 0,05 h (0,05 Stunden), so erhalten wir das Ergebnis

$$v = \frac{l}{t} = \frac{1{,}8\ \text{km}}{0{,}05\ \text{h}} = 36\ \frac{\text{km}}{\text{h}}.$$

Es unterscheidet sich von dem obigen Ergebnis lediglich dadurch, dass die berechnete Geschwindigkeit in einer anderen Einheit angegeben ist. Beide Ergebnisse sind also gleichermaßen korrekt.

Neben der Größengleichung gibt es als weitere Darstellungsform für eine Gleichung die **Zahlenwertgleichung**. Bei ihr stellt jedes einzelne Symbol einen Zahlenwert dar. Das hat zur Folge, dass jeweils anzugeben ist, welche Einheiten zu verwenden sind. Die Zahlenwertgleichung zur Berechnung der Geschwindigkeit eines Körpers kann zum Beispiel

$$v = 3{,}6\ \frac{l}{t}$$

lauten. Sie gilt jedoch nur unter der Voraussetzung, dass der zurückgelegte Wert l in m und die benötigte Zeit t in s eingesetzt werden, wobei man dann die mittlere Geschwindigkeit v des Körpers in km/h erhält.

Zahlenwertgleichungen werden nur noch selten angewendet. Daher wird bei den folgenden Betrachtungen auch auf ihre Formulierung ganz verzichtet. Die nachfolgenden Gleichungen stellen also ausschließlich Größengleichungen dar.

2 Gleichstromkreise

2.1 Grundbegriffe der elektrischen Strömung

2.1.1 Aufbau der Materie, elektrische Ladungsträger

Wird ein Stoff fortwährend mechanisch zerkleinert, so gelangt man zum **Molekül**. Eine weitere Zerkleinerung ist nur noch auf chemischem Wege möglich. Sie führt zum **Atom**.

Jedes Atom besteht aus einem **Kern** und aus **Elektronen**, die den Kern umkreisen. Der Kern wiederum besteht aus **positiv** geladenen **Protonen** und den ungeladenen **Neutronen**. Die Elektronen sind **negativ** geladen. Ein Atom besitzt im Allgemeinen ebenso viele Elektronen wie Protonen. Derartige Atome bezeichnet man als „elektrisch neutral“. Ist dagegen die Zahl der Elektronen verschieden von der der Protonen, so spricht man von einem „elektrisch geladenen“ Atom. Es gibt sowohl positiv als auch negativ geladene Atome. Protonen, Elektronen und geladene Atome stellen also „Träger von elektrischen Ladungen“ dar und werden daher auch als **elektrische Ladungsträger** bezeichnet.

Kennzeichnend für elektrische Ladungen ist, dass sie (allgemein) Kräfte aufeinander ausüben. Diese bezeichnet man auch als **elektrostatische Kräfte**. Bezüglich ihrer Richtung zeigt sich, dass zwischen einer positiven und einer negativen Ladung eine Anziehungskraft besteht. Dagegen stoßen sich zwei positive Ladungen gegenseitig ab. Das Gleiche gilt für zwei negative Ladungen. Man sagt auch: Gleichartige Ladungen stoßen sich ab; ungleichartige Ladungen ziehen sich an.

Die zwischen den Protonen und den Elektronen eines Atoms wirkenden elektrostatischen Anziehungskräfte sorgen dafür, dass die Elektronen auf ihren Bahnen gehalten werden. Dabei halten sich die genannten Anziehungskräfte und die durch die kreisförmige Bewegung der Elektronen entstehenden Zentrifugalkräfte (Fliehkräfte) das Gleichgewicht. Die zwischen den einzelnen Protonen eines Atomkerns herrschenden elektrostatischen Abstoßungskräfte versuchen, die Ladungen auseinanderzutreiben; die Protonen werden jedoch durch die zusätzlich vorhandenen **Kernkräfte** (kurzer Reichweite) zusammengehalten.

Je nachdem, wie viel Protonen, Neutronen und Elektronen ein Atom besitzt, unterscheidet man über hundert verschiedene Atomarten. Aus ihnen setzen sich sämtliche Moleküle der verschiedenen Stoffe zusammen. Stoffe, die nur aus einer Atomart bestehen, werden als **chemische Elemente** bezeichnet.

Die Elektronen umkreisen den Atomkern nur auf bestimmten Bahnen. Dabei werden Elektronen mit annähernd gleichem Abstand vom Kern zu einer Gruppe zusammengefasst. Sie bilden jeweils eine **Elektronenschale**. Die Anzahl der zu einer Schale gehörenden Elektronen ist begrenzt. So enthält die Schale mit dem kleinsten Bahndurchmesser maximal zwei, die Schale mit dem nächstgrößeren Bahndurchmesser maximal acht Elektronen. Wird die betreffende Anzahl an Elektronen bei der entsprechenden Schale erreicht, so bezeichnet man diese als „vollständig besetzt".

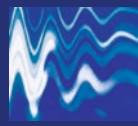
Die Elektronen der in der Regel nicht vollständig besetzten äußeren Schale eines Atoms nennt man **Valenzelektronen**. Die Elektronen der darunter liegenden Schalen heißen **Rumpfelektronen**. Sie bilden zusammen mit dem Kern den Atomrumpf.

2.1.2 Freie Elektronen, Defektelektronen, Ionen

Ein Stoff ist nur dann elektrisch leitfähig, wenn er **bewegliche** Ladungsträger enthält und somit ein Ladungstransport möglich ist. Bei den beweglichen Ladungsträgern kann es sich um **freie Elektronen**, um **Defektelektronen** (auch **Löcher** genannt) oder um **Ionen** handeln.

Freie Elektronen treten insbesondere in Metallen auf. In dieser Materie können sich die Valenzelektronen, also die Elektronen der äußeren Schale, sehr leicht vom Atomrumpf lösen. Dies hat zur Folge, dass die Valenzelektronen überhaupt nicht mehr einem bestimmten Atom zugeordnet werden können, sondern sich frei im Stoff bewegen. Sie werden daher auch als **freie Elektronen** bezeichnet. Da sie sich ähnlich wie die Moleküle eines Gases verhalten, spricht man auch von einem **Elektronengas**.

Defektelektronen (oder **Löcher**) können neben freien Elektronen die Ursache für das Vorhandensein einer elektrischen Leitfähigkeit sein. Dies trifft insbesondere für **Halbleiter** zu. Halbleiter, zum Beispiel Silizium oder Germanium, sind Stoffe, die zwischen den Metallen und den Nichtmetallen eingeordnet werden. Sie besitzen **vier** Valenzelektronen, die für die Bindung der Atome im Kristallgitter benötigt werden. Daher haben reine Halbleiter nur eine sehr geringe Leitfähigkeit. Ersetzt man jedoch zum Beispiel einige Atome durch dreiwertige Fremdatome, also durch Atome mit drei Valenzelektronen, so fehlt jedem Fremdatom zur Herstellung einer vollständigen Bindung ein Elektron. Das Fremdatom kann deshalb leicht ein Valenzelektron eines benachbarten Halbleiteratoms aufnehmen. Durch ein solches Überwechseln eines Elektrons werden das Fremdatom negativ und das Nachbaratom positiv aufgeladen. Die Stelle, an der sich ein derartiges positives



In dem vorliegenden bewährten Lehrbuch, das nun bereits in der 18. Auflage vorliegt, werden die Gebiete der Gleichstromtechnik, des elektrischen und magnetischen Feldes sowie der Wechselstromtechnik zusammenhängend und übersichtlich dargestellt. Die Ausführungen beginnen mit der Behandlung von Gleichstromkreisen. Danach werden die verschiedenen Methoden der Netzwerkberechnung vorgestellt. Es schließt sich die Beschreibung des elektrischen und magnetischen Feldes an. Im zweiten Teil des Buches werden die verschiedenen Bereiche der Wechselstromtechnik behandelt.

Um eine optimale Verständlichkeit des Stoffes zu erreichen, werden die Leserinnen und Leser schrittweise von einfachen Sachverhalten zu komplexeren Problemstellungen geführt. Weiterhin sind jedem Abschnitt Aufgaben mit ausführlichen Lösungswegen zugeordnet, die für die Verständlichkeit der Sachverhalte von besonderer Bedeutung sind.

Elektrotechnik

9 783891 048306

Best.-Nr.: 315-01209
ISBN 978-3-89104-830-6

AULA

www.aula-verlag.de