

Horst Steffen, Hansjürgen Bausch

# Elektrotechnik

Grundlagen

6. Auflage



Teubner

**Horst Steffen, Hansjürgen Bausch**

# **Elektrotechnik**

**Horst Steffen, Hansjürgen Bausch**

# **Elektrotechnik**

## **Grundlagen**

6., überarbeitete und aktualisierte Auflage 2007



**Teubner**

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

**Dr. Horst Steffen** unterrichtet in Osterode an der BBS II.

**Prof. (em.) Dr.-Ing. Hansjürgen-Bausch**, Universität Hannover

1. Auflage 1982
2. Auflage 1988
3. Auflage 1991
4. Auflage 1998
5. Auflage 2004
6. überarb. u. akt. Auflage Februar 2007

Alle Rechte vorbehalten

© B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2007

Lektorat: Dipl.-Ing. Ralf Harms / Sabine Koch

Der B.G. Teubner Verlag ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media.  
[www.teubner.de](http://www.teubner.de)



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, [www.CorporateDesignGroup.de](http://www.CorporateDesignGroup.de)

Druck und buchbinderische Verarbeitung: Strauss Offsetdruck, Mörlenbach

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in Germany

ISBN 978-3-8351-0014-5

## Vorwort

Dieses Buch schließt die Lücke zwischen der Fachkunde für Elektroberufe an den Berufsschulen und den mathematisch-physikalischen Grundlagen der Elektrotechnik in der Hochschulliteratur. Es wendet sich damit vor allem an Schüler der Fachschulen Technik und Berufsaufbauschulen wie auch der Fachoberschulen und Fachgymnasien. Aber auch den Studenten der Anfangssemester an Fachhochschulen und Technischen Universitäten wird es als Einstieg in die theoretische Behandlung der Elektrotechnik hilfreich sein.

Ohne mathematisches Rüstzeug ist eine vertiefte Beschreibung der physikalischen Zusammenhänge in der Elektrotechnik nicht möglich. Vorausgesetzt werden jedoch nur Kenntnisse des Gleichungsrechnens, wie sie auch in der Berufsschule vermittelt werden. Weitergehende mathematische und physikalische Kenntnisse (wie z.B. der Umgang mit Produkten von Vektoren oder Beschreibung physikalischer Felder) werden im ersten Abschnitt vorgestellt bzw. aufgefrischt. Von der zentralen Größe Energie bzw. ihren Umwandlungen nach dem Energieerhaltungssatz aus werden alle erforderlichen Gleichungen ausführlich abgeleitet. Auch dabei werden nur mathematische Verfahren angewendet, wie sie etwa im Mathematikunterricht der Fachschule Technik vermittelt werden. Die Berechnung von Sinusstromvorgängen in Wechselstromkreisen wird in zwei von einander unabhängigen Abschnitten behandelt: In den Kapiteln 7 und 8 werden nur die trigonometrischen Funktionen zur Beschreibung der Vorgänge eingesetzt, um so die physikalischen Abläufe unmittelbar darzustellen. Im Kapitel 9 werden die gleichen Grundschaltungen noch einmal besprochen. So soll dem Leser auch der Zugang zu dem eleganten, aber abstrakten Kalkül der komplexen Berechnung von Sinusvorgängen eröffnet werden.

In einigen Abschnitten werden Grenzwertbetrachtungen durchgeführt, die vor allem für Schüler mit Kenntnissen in der höheren Mathematik (Differential- und Integralrechnung) von Interesse sein werden. Diese Abschnitte können jedoch ohne Schaden für das Verständnis des Zusammenhangs überschlagen werden.

Zahlreiche Aufgaben und durchgerechnete Beispiele sollen dem Leser beim Erarbeiten des dargestellten Stoffgebiets helfen. Für Anregungen zur Verbesserung des Buches sind Verlag und Verfasser dankbar.

Osnabrück, Juli 1982

Ff. Schremser

## Für die 6. Auflage

gehen Autoren und Verlag davon aus, dass die Grundabsicht des Buchs, ein vertieftes Verständnis der physikalischen Zusammenhänge zu vermitteln, inzwischen als ein durch Erfahrung bewährtes Konzept gelten kann. Diese Intention wurde daher ohne Einschränkung beibehalten. Dem gemäß wurden Lehrtext und Aufgaben gegenüber der 5. Auflage wenig geändert. Die Kapitel, die sich mit Wechselgrößen befassen, wurden überarbeitet und die Berechnung mit komplexen Zahlen in den Mittelpunkt gestellt. In einem weiteren Kapitel werden die Lösungen und Ergebnisse zu den Übungsaufgaben angegeben.

Das Buch folgt der reformierten Rechtschreibung. Eine Ausnahme bildet der Fachwörtertschatz, der durch die einschlägigen Normen festgelegt ist.

Autoren und Verlag hoffen, dass die neue Auflage wie die vorangehenden Anerkennung und Verbreitung in den Schulen findet. Sie bedanken sich für zahlreiche Stellungnahmen, die zur Verbesserung des Buchs beigetragen haben und bitten weiterhin um Anregungen und Kritik.

Hattorf, Juli 2006

H. Steffen

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 PHYSIKALISCHE UND MATHEMATISCHE HILFSMITTEL</b>	<b>10</b>
<b>1.1 Physikalische Größen</b>	<b>10</b>
<b>1.2 Gleichungen zwischen Größen</b>	<b>11</b>
<b>1.3 Das Internationale Einheitensystem</b>	<b>12</b>
<b>1.4 Rechnen mit Größen</b>	<b>15</b>
<b>1.5 Skalare und Vektoren</b>	<b>16</b>
<b>1.6 Rechnen mit Vektoren</b>	<b>18</b>
1.6.1 Bezugssysteme	18
1.6.2 Addition und Subtraktion	19
1.6.3 Multiplikation und Division	21
<b>1.7 Komplexe Zahlen</b>	<b>24</b>
1.7.1 Definition	24
1.7.2 Rechenregeln	26
1.7.2.1 Addition	27
1.7.2.2 Multiplikation	27
1.7.2.3 Division	28
<b>1.8 Physikalische Grundbegriffe</b>	<b>29</b>
1.8.1 Felder physikalischer Größen	29
1.8.2 Gravitationsfeld	29
1.8.3 Energie im Gravitationsfeld	31
1.8.4 Energieumwandlung im Gravitationsfeld	34
1.8.5 Stabilität des Energiezustands	36
<b>1.9 Grundbegriffe des elektrischen Felds</b>	<b>37</b>
1.9.1 Elektrische Ladung und elektrisches Feld	37
1.9.2 Elektrische Feldstärke und elektrisches Potential	39
<b>1.10 Aufbau der Materie</b>	<b>41</b>
1.10.1 Bohrsches Atommodell	41
1.10.2 Periodensystem der Elemente	44
1.10.3 Bindungen zwischen Atomen	44
1.10.3.1 Metallbindung	45
1.10.3.2 Ionenbindung	45
1.10.3.3 Elektronenpaarbindung	47
1.10.3.4 Halbleiter	49

<b>2 GLEICHSTROMKREIS</b>	<b>51</b>
<b>2.1 Grundstromkreis</b>	<b>51</b>
2.1.1 Grundgrößen des elektrischen Stromkreises	51
2.1.1 Energiesatz im Grundstromkreis	52
<b>2.2 Verbraucherteil</b>	<b>56</b>
2.2.1 Elektrischer Widerstand (Ohmsches Gesetz)	56
Aufgaben zu Abschnitt 2.2.1	61
2.2.2 Technische Ausführung von Widerständen	62
2.2.3 Temperaturabhängigkeit des Widerstands	63
Aufgaben zu Abschnitt 2.2.3	70
2.2.4 Aufteilung der Leistung im Verbraucher	71
2.2.4.1 Reihenschaltung von Verbrauchern	72
Aufgaben zu Abschnitt 2.2.4.1	76
2.2.4.2 Parallelschaltung von Verbrauchern	77
Aufgaben zu Abschnitt 2.2.4.2	80
2.2.4.3 Gemischte Schaltungen	81
Aufgaben zu Abschnitt 2.2.4.3	85
2.2.4.4 Dreieck-Stern- und Stern-Dreieck-Umwandlung	86
Aufgaben zu Abschnitt 2.2.4.4	91
<b>2.3 Energiesatz in Netzwerken</b>	<b>92</b>
2.3.1 Kirchhoffsche Regeln	92
2.3.2 Berechnung einzelner Netzmaschen	94
Aufgaben zu Abschnitt 2.3	96
2.3.3 Berechnung geschlossener Netze	96
2.3.3.1 Anwendung der Kirchhoffschen Regeln	96
2.3.3.2 Maschenstromverfahren	99
Aufgaben zu Abschnitt 2.3.3	101
<b>2.4 Erzeugerteil</b>	<b>101</b>
2.4.1 Ersatzspannungsquelle	102
Aufgaben zu Abschnitt 2.4.1	104
2.4.2 Ersatzstromquelle	105
Aufgaben zu Abschnitt 2.4.2	106
2.4.3 Leistung und Wirkungsgrad	106
Aufgaben zu Abschnitt 2.4.3	107
2.4.4 Leistungsanpassung	109
Aufgaben zu Abschnitt 2.4.4	110
<b>2.5 Berechnung von Netzwerken mit der Ersatzspannungsquelle</b>	<b>111</b>
2.5.1 Aufteilung eines geschlossenen Netzwerks	111
2.5.2 Belastete Brückenschaltung	113
2.5.3 Spannungsquellen in Parallelschaltung	114
Aufgaben zu Abschnitt 2.5	115
<b>2.6 Berechnung von Netzwerken nach der Überlagerungsmethode</b>	<b>115</b>
Aufgaben zu Abschnitt 2.6	117

<b>3 ELEKTRISCHES STRÖMUNGSFELD</b>	<b>118</b>
<b>3.1 Driftbewegung der Ladungsträger</b>	<b>118</b>
<b>3.2 Feldgleichung des elektrischen Strömungsfelds</b>	<b>119</b>
<b>3.3 Inhomogenes Strömungsfeld</b>	<b>121</b>
<b>3.4 Grundbegriffe der Feldtheorie</b>	<b>122</b>
Aufgaben zu Abschnitt 3	123
<b>4 ELEKTRISCHES FELD</b>	<b>124</b>
<b>4.1 Elektrostatistisches Quellenfeld</b>	<b>124</b>
<b>4.2 Kondensator</b>	<b>130</b>
4.2.1 Kapazität und Permittivität	130
4.2.2 Bauformen von Kondensatoren	131
4.2.3 Auf- und Entladen eines Kondensators	133
4.2.4 Schaltungen von Kondensatoren	137
<b>4.3 Energie des elektrischen Felds</b>	<b>138</b>
Aufgaben zu Abschnitt 4.2 und 4.3	140
<b>5 MAGNETISCHES FELD</b>	<b>142</b>
<b>5.1 Magnetostatisches Feld magnetischer Dipole</b>	<b>142</b>
<b>5.2 Stationäres magnetisches Feld</b>	<b>144</b>
5.2.1 Magnetisches Feld des geraden Leiters	144
5.2.2 Magnetisches Feld einer Leiterwindung	145
5.2.3 Magnetisches Feld einer gestreckten Spule	145
5.2.4 Magnetisches Feld der Kreisringspule	146
5.2.5 Feldgrößen des magnetischen Felds	147
5.2.6 Materie im magnetischen Feld	149
5.2.7 Magnetisches Feld in Eisen	150
Aufgaben zu Abschnitt 5.2	151
<b>5.3 Berechnung magnetischer Kreise</b>	<b>152</b>
5.3.1 Ohmsches Gesetz des magnetischen Kreises	152
5.3.1 Reihenschaltung magnetischer Widerstände	154
5.3.2 Parallelschaltung magnetischer Widerstände	157
Aufgaben zu Abschnitt 5.3	162
<b>5.4 Kräfte im magnetischen Feld</b>	<b>163</b>
5.4.1 Gestreckter, stromdurchflossener Leiter im magnetischen Feld	164
5.4.2 Bewegte Ladungen im magnetischen Feld	165
5.4.3 Kraft zwischen zwei parallelen Leitern	166
Aufgaben zu Abschnitt 5.4	169

<b>5.5 Energie des magnetischen Felds</b>	<b>171</b>
5.5.1 Energie des magnetischen Felds einer Spule	171
5.5.2 Energiedichte des magnetischen Felds	173
5.5.3 Ummagnetisierungsenergie im Eisen	174
Aufgaben zu Abschnitt 5.5	175
<b>6 ELEKTROMAGNETISCHE WECHSELWIRKUNGEN</b>	<b>177</b>
<b>6.1 Grundgesetze elektromagnetischer Wechselwirkungen</b>	<b>177</b>
6.1.1 Induktionsgesetz bei mechanischer Bewegung	177
6.1.2 Induktionsgesetz ohne mechanische Bewegung	180
6.1.3 Allgemeines Induktionsgesetz	182
6.1.4 Durchflutungsgesetz und Induktionsgesetz	183
Aufgaben zu Abschnitt 6.1	184
<b>6.2 Induktion in elektrischen Maschinen</b>	<b>186</b>
6.2.1 Spannungserzeugung in umlaufenden Maschinen	186
6.2.2 Energieumwandlung im Transformator	188
6.2.2.1 Energieumwandlungen auf der Primärseite (Selbstinduktion)	188
6.2.2.2 Energieumwandlungen auf der Sekundärseite (Gegeninduktion)	191
Aufgaben zu Abschnitt 6.2	193
<b>7 WECHSELSTROMKREIS</b>	<b>195</b>
<b>7.1 Stromarten</b>	<b>195</b>
<b>7.2 Eigenschaften von Sinusgrößen</b>	<b>196</b>
7.2.1 Kennwerte einer Sinusspannung	196
7.2.2 Darstellung von Sinusvorgängen	197
7.2.2.1 Liniendiagramm	197
7.2.2.2 Drehzeigerdarstellung	197
7.2.2.3 Darstellung in der komplexen Zahlenebene	198
7.2.3 Addition von Sinusgrößen	199
7.2.4 Bezugspfeilsystem	200
Aufgaben zu Abschnitt 7.2	201
<b>7.3 Mittelwerte</b>	<b>203</b>
7.3.1 Effektivwert	203
7.3.2 Gleichrichtwert und Formfaktor	205
<b>7.4 Leistung und Arbeit</b>	<b>205</b>
7.4.1 Zeigerdarstellung	207
7.4.2 Berechnung in der komplexen Zahlenebene	207
<b>7.5 Ideale Wechselstromwiderstände</b>	<b>208</b>
7.5.1 Ohmscher Widerstand, Wirkwiderstand	208
7.5.2 Ideale Spule, induktiver Blindwiderstand	209
7.5.3 Idealer Kondensator, kapazitiver Blindwiderstand	210
Aufgaben zu Abschnitt 7.4 und 7.5	211

<b>7.6 Grundschaltungen idealer Wechselstromwiderstände</b>	<b>213</b>
7.6.1 Reihenschaltung	213
7.6.1.1 Spule und Wirkwiderstand	213
7.6.1.2 Kondensator und Wirkwiderstand	214
7.6.1.3 Spule, Kondensator und Wirkwiderstand	216
Aufgaben zu Abschnitt 7.6.1	216
7.6.2 Parallelschaltung idealer Wechselstromwiderstände	217
7.6.2.1 Spule und Wirkwiderstand	217
7.6.2.2 Kondensator und Wirkwiderstand	219
Aufgaben zu Abschnitt 7.6.2	221
<b>7.7 Reale Wechselstromwiderstände</b>	<b>221</b>
7.7.1 Umwandlung von Reihen- und Parallelschaltung	221
7.7.2 Ersatzschaltung der Spule	223
7.7.2.1 Reihen und Parallelschaltungen von Spulen	223
7.7.3 Ersatzschaltungen des Kondensator	225
7.7.3.1 Reihen und Parallelschaltungen von Kondensatoren	226
Aufgaben zu Abschnitt 7.7	227
<b>7.8 Gemischte Schaltungen</b>	<b>229</b>
7.8.1 Berechnungen in Netzwerken	229
7.8.2 Blindstromkompensation	230
7.8.3 Schwingkreise	231
7.8.3.1 Reihenschwingkreis	231
7.8.3.2 Parallelschwingkreis	237
Aufgaben zu Abschnitt 7.8	241
<b>7.9 Transformator mit Eisenkern</b>	<b>245</b>
7.9.1 idealer Transformator	246
7.9.2 Verluste beim realen Transformator	247
7.9.3 Transformator im Leerlauf	247
7.9.4 Transformator im Kurzschluss	250
7.9.5 Transformator bei Belastung	253
Aufgaben zu Abschnitt 7.9	255
<b>7.10 Ortskurven</b>	<b>256</b>
<b>8 MEHRPHASIGER WECHSELSTROM</b>	<b>258</b>
<b>8.1 Formen magnetischer Felder</b>	<b>258</b>
8.1.1 Zweiphasensystem	260
8.1.2 Dreiphasensystem	262
<b>8.2 Generatorschaltungen</b>	<b>263</b>
8.2.1 Dreieckschaltung	263
8.2.2 Sternschaltung	263
<b>8.3 Verbraucherschaltungen</b>	<b>264</b>
8.3.1 Sternschaltungen	264

---

8.3.1.1 mit angeschlossenem Mittelleiter	264
8.3.1.2 ohne angeschlossenen Mittelleiter	266
8.3.2 Dreieckschaltungen	267
<b>8.4 Leistung im Drehstromnetz</b>	<b>268</b>
8.4.1 Komplexe Berechnung in Stern und Dreieck Schaltung	268
8.4.2 Kompensation der Blindleistung	269
Aufgaben zu Kapitel 8	271
<b>9 LÖSUNGEN</b>	<b>273</b>
<b>TABELLENANHANG</b>	<b>300</b>
<b>SACHWORTVERZEICHNIS</b>	<b>307</b>

# 1 Physikalische und mathematische Hilfsmittel

## 1.1 Physikalische Größen

**Größen.** In vielen Bereichen des täglichen Lebens, vor allem aber in der Technik und den Naturwissenschaften brauchen wir Begriffe, die die Eigenschaften von Dingen, von Vorgängen oder von Zuständen beschreiben. Solche Begriffe heißen in Naturwissenschaft und Technik *physikalische Größen*, kurz: Größen. Beispiele dafür sind Länge, Zeit, Geschwindigkeit, Masse, Kraft, Energie, Temperatur. Diese verschiedenen *Größenarten* werden durch *Formelzeichen* (Symbole) gekennzeichnet, z.B.  $s$  für die Länge,  $t$  für die Zeit,  $F$  für die Kraft. Gemeinsam ist allen Größen, dass man über sie jeweils auch eine quantitative Angabe machen kann. Solche Angaben sind z.B.

$$s = 6 \text{ m}, t = 30 \text{ min}, F = 400 \text{ N}. \quad (1.1)$$

Durch diese Gleichungen erhalten die Größen konkrete Werte. 6 m, 30 min oder 400 N sind solche Größenwerte. Sie bestehen aus den Zahlenwerten 6, 30 oder 400 und den Einheiten m, min oder N (Newton). Für alle quantitativen Angaben gilt:

Der Wert einer Größe ist das Produkt aus dem Zahlenwert und der Einheit der Größe. (1.2a)
---

**Zahlenwert.** Am einfachsten wird dies sichtbar, wenn man das Verhältnis zweier Größen bildet. So erhält man mit  $s_1 = 6 \text{ m}$  und  $s_2 = 3 \text{ m}$  für das Verhältnis

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{6 \text{ m}}{3 \text{ m}} = 2 \quad (1.3)$$

eine Zahl, weil man in dem Bruch das Meter kürzen kann. Wählt man die Einheit der Länge  $s_3 = 1 \text{ m}$  als Bezugsgröße, liefert das Verhältnis

$$\frac{s_1}{s_3} = \frac{6 \text{ m}}{1 \text{ m}} = 6 \quad (1.4)$$

den Zahlenwert der Größe. Gelegentlich möchte man sich nicht auf einen bestimmten Zahlenwert festlegen, aber zum Ausdruck bringen, dass man von einem Größenwert nur den Zahlenwert meint. Dazu setzt man das Formelzeichen in geschweifte Klammern, z.B.  $\{s\}$  und könnte damit statt Gl. (1.4)  $\{s\} = 6$  schreiben.

**Einheit.** Die in Gl. (1.1) auftauchenden Einheiten m, min oder N sind durch Übereinkunft festgelegte besondere Werte von Größen (s. Abschn. 1.3). Sind in einem bestimmten Zusammenhang nur diese Einheiten gemeint, wird das Formelzeichen in eckigen Klammern gesetzt, z.B.

$$[s] = 1 \text{ m}, [t] = 1 \text{ min}, [F] = 1 \text{ N}. \quad (1.5)$$

Nach Einführung dieser Symbole kann man den Merksatz (1.2a) auch durch Formelzeichen darstellen. Für den Wert einer beliebigen Größe  $M$  gilt demnach

$$M = \{M\} [M]. \quad (1.2b)$$

Damit ergibt sich die Einsicht:

Der Wert einer Größe ist unveränderlich (invariant) gegenüber dem Wechsel der Einheit.

Ist z.B. der Größenwert  $s = 6 \text{ m}$ , lässt sich für  $[s] = 1 \text{ m}$  auch  $100 \text{ cm}$ ,  $1000 \text{ mm}$  oder  $1 \text{ km}/1000$  einsetzen, ohne dass sich an der Länge  $s$  etwas ändert:

$$s = 6 \text{ m} = 6 \cdot 100 \text{ cm} = 600 \text{ cm} = 6 \cdot 1000 \text{ mm} = 6000 \text{ mm} = 6 \text{ km}/1000 = 0,006 \text{ km}$$

Ein weiteres Beispiel für die Anwendung der Gl. (1.2b) ist die Bezeichnung der Diagrammachsen in Bild 1.1. Es ist üblich, auf den Skalen nur die Zahlenwerte der Strecke und der Zeit einzutragen. Die Achsenbezeichnungen lauten daher

$$\frac{s}{\text{m}} = \{s\} \quad \text{und} \quad \frac{t}{\text{s}} = \{t\}.$$

**Kennzeichnung von Größen und Einheiten.** Als Größensymbole werden Groß- bzw. Kleinbuchstaben des lateinischen und griechischen Alphabets verwendet. Im Druck erscheinen Größensymbole in *kursiver* Schrift. Empfehlungen für die einheitliche Verwendung von Buchstaben als Größensymbole finden sich z.B. in DIN 1304. In der Regel verwenden wir in diesem Buch in Übereinstimmung damit für eine Größenart nur ein bestimmtes Größensymbol. Wenn Missverständnisse möglich sind, soll umgekehrt ein bestimmter Buchstabe auch nur für eine Größenart benutzt werden. Dabei lassen sich Abweichungen von den genormten Formelzeichen nicht immer vermeiden. Eine Liste der in diesem Buch verwendeten Größensymbole finden Sie im Anhang.

Manche Einheiten von Größen haben besondere Namen. Solche *Einheitennamen* und die zugehörigen *Einheitenzeichen* sind ebenfalls in einer Liste im Anhang aufgeführt. Im Druck erscheinen Einheitenzeichen in *senkrechter* Schrift.

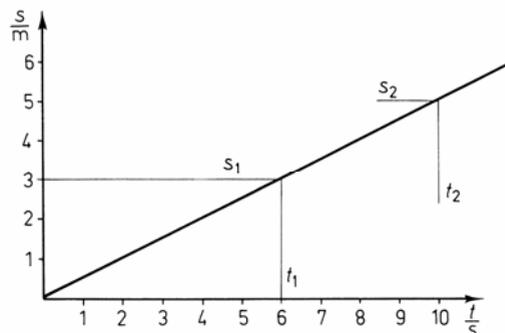
## 1.2 Gleichungen zwischen Größen

**Größengleichungen** Abhängigkeiten zwischen physikalischen Größen, die wir z.B. messtechnisch durch geeignete Versuche ermitteln, können wir in vielen Fällen gewissermaßen als „Modell“ durch Gleichungen zwischen Größen darstellen.

Verhältnisse zwischen verschiedenartigen Größen bleiben dabei oft konstant und führen zu Definitionsgleichungen neuer Größen. Wir wollen das an einem Beispiel aus der Bewegungslehre (Kinematik) erläutern.

**Beispiel 1.1** Bei der geradlinigen Bewegung eines Körpers messen wir die von ihm in einer bestimmten Zeit zurückgelegte Strecke. Dabei müssen wir zunächst für Strecke und Zeit geeignete Einheiten wählen, z.B.  $[s] = \text{m}$ ,  $[t] = \text{s}$ . Tragen wir in einem rechtwinkligen Koordinatensystem mit einem geeigneten Maßstab die Wertepaare von Strecke und Zeit auf, erhalten wir z.B. ein Diagramm entsprechend Bild 1.1, wenn wir die einzelnen Messpunkte miteinander verbinden.

Der lineare Zusammenhang zwischen den Größen  $s$  und  $t$  bedeutet, dass das Verhältnis ihrer Werte konstant fortsetzung ist. Wenn z.B. der Körper in  $t_1 = 6 \text{ s}$  die Strecke  $s_1 = 3 \text{ m}$  und in  $t_2 = 10 \text{ s}$  die Strecke  $s_2 = 5 \text{ m}$



**Bild 1.1** Gleichförmige Bewegung im  $s(t)$ -Diagramm

zurücklegt, ergibt sich für das Verhältnis der gleiche Wert, nämlich die konstante Geschwindigkeit des Körpers.

$$\frac{s_1}{t_1} = \frac{3 \text{ m}}{6 \text{ s}} = \frac{s_1}{t_1} = \frac{5 \text{ m}}{10 \text{ s}} = 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = v. \quad (1.6)$$

Dividieren wir also – im Gegensatz zu Gl. (1.3) – Werte von Größen verschiedener Art, erhalten wir als Ergebnis den Wert einer neuen Größe. In diesem Beispiel ist

$$\frac{s}{t} = v \quad \text{oder} \quad s = v \cdot t. \quad (1.7)$$

Solche Gleichungen, in denen die vorkommenden Symbole Größen darstellen, heißen Größengleichungen. Sie drücken Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen aus. Ihre Gültigkeit ist von der Wahl der Einheiten unabhängig. Deshalb werden wir sie in diesem Buch ausschließlich verwenden.

**Einheitengleichungen** sind eine besondere Form von Größengleichungen. Man erhält sie, indem man eine Größengleichung durch den Zahlenwert dividiert – die Zahlenwerte der linken und der rechten Seite der Gleichung stimmen überein. Ausführlich geschrieben lautet Gl. (1.7)

$$\frac{\{s\}[s]}{\{t\}[t]} = \{v\}[v]. \quad (1.8)$$

Durch Division durch den Zahlenwert ergibt sich die Einheitengleichung

$$\frac{[s]}{[t]} = [v]. \quad (1.9)$$

Sie besagt, dass man die Einheit der Geschwindigkeit erhält, wenn man die Einheit der zurückgelegten Wegstrecke (z.B. Meter) durch die Einheit der Zeit (z.B. Sekunde) teilt.

## 1.3 Das Internationale Einheitensystem

**Basisgrößen und Basiseinheiten.** Zur Beschreibung der physikalischen Sachverhalte in einem abgegrenzten Gebiet der Naturwissenschaft und der Technik sind als Ausgangspunkt bestimmte Basisgrößen erforderlich. Die Wahl dieser Basisgrößen ist grundsätzlich willkürlich; es hat sich aber als zweckmäßig erwiesen, dafür Größen zu wählen, die möglichst anschaulich, gut messbar und aus der täglichen Erfahrung bekannt sind. Basisgrößen des heute üblichen Größensystems sind zunächst Länge  $s$  und Zeit  $t$ . Diese Begriffe werden auch ohne Erläuterung verstanden. Dritte Basisgröße der Mechanik ist die Masse  $m$ , eine Eigenschaft des Stoffs, die sich z.B. im Zusammenhang mit der Gewichtskraft bemerkbar macht. Als weitere Grundgröße kommt in der Elektrotechnik die Stromstärke  $I$  hinzu, die bewegte elektrische Ladung bedeutet. Dabei kann die Ladung ebenfalls als Eigenschaft des Stoffs angesehen werden (s. Abschn. 1.8). Diese und die übrigen Basisgrößen sind in Tabelle 1.2 zusammengestellt, zusammen mit Namen und Einheitenzeichen der zu den Basisgrößen gehörenden Basiseinheiten.

**Tabelle 1.1 Basisgrößen und -einheiten des SI**

Basisgröße	Größensymbol	Basiseinheit	Einheitenzeichen
Länge	$s$	Meter	m
Zeit	$t$	Sekunde	s
Masse	$m$	Kilogramm	kg
elektrische Stromstärke	$I$	Ampere	A
thermodynamische Temperatur	$T$	Kelvin	K
Lichtstärke	$I_L$	Candela	cd
Stoffmenge	$n$	Mol	mol

Die aufgeführten Basiseinheiten sind die des Internationalen Einheitensystems oder SI (Systeme International d'Unites), das in zahlreichen Ländern benutzt wird. Mit dem Gesetz über Einheiten im Messwesen vom 2. Juli 1969 und den zugehörigen Ausführungsverordnungen bildet das SI seit Inkrafttreten des Gesetzes am 5. Juli 1970 auch in der Bundesrepublik die Grundlage der gesetzlichen Einheiten.

**Definition der Basiseinheiten.** Mit der Festlegung der Basiseinheiten nach Tabelle 1.2 ist noch nichts darüber gesagt, was unter einem Meter oder einer Sekunde verstanden werden soll. Die Definition der Basiseinheiten ist zwar an sich willkürlich, muss jedoch aus Gründen der Zweckmäßigkeit einige Anforderungen erfüllen: Da sich aus den Basiseinheiten die Einheiten aller anderen Größen ableiten lassen, müssen sie international verbindlich sein. Die Erleichterung beim Austausch technischer oder naturwissenschaftlicher Erkenntnisse ist offensichtlich. Entsprechend den messtechnischen Erfordernissen und Möglichkeiten müssen die Basiseinheiten überall darstellbar und reproduzierbar sein. Deshalb sind dafür Staatsinstitute verantwortlich, z.B. in der Bundesrepublik Deutschland die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig. Die z. Z. gültigen Definitionen der Basiseinheiten sind in DIN 1301 angegeben. Im Rahmen dieses Buches interessieren davon nur die ersten fünf der Tabelle 1.1. Der amtliche Text lautet:

1 Meter ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Dauer von  $1/299\,792\,458$  Sekunden durchläuft.

1 Sekunde ist das  $9\,192\,631\,770$  fache der Periodendauer der beim Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids  $^{133}\text{Cs}$  entsprechenden Strahlung.

1 Kilogramm ist die Masse des Internationalen Kilogrammprototyps.

1 Ampere ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen elektrischen Stromes, der, durch zwei im Vakuum Zeitparallel im Abstand 1 m voneinander angeordnete, gradlinige, unendlich lange Leiter von vernachlässigbar kleinem, kreisförmigem Querschnitt fließend, zwischen diesen Leitern je 1 m Leiterlänge elektrodynamisch die Kraft  $2 \cdot 10^{-7}$  N hervorrufen würde.

1 Kelvin ist der  $273,16$ te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers.

**Kohärente Einheiten.** Dividieren wir Größengleichungen durch ihre Zahlenwerte, erhalten wir stets Einheitengleichungen wie Gl. (1.9), in denen nur der Zahlenfaktor 1 vorkommt. Die Basiseinheiten und die auf diese Weise daraus abgeleiteten Einheiten bilden ein System kohärenter Einheiten und heißen SI-Einheiten. Abgeleitete SI-Einheiten können als Produkte oder Quotienten anderer SI-Einheiten dargestellt werden. Sie haben oft besondere Einheitenamen.

**Beispiel 1.2** Wird die Einheit der Kraft aus der Größengleichung  $F = m \cdot a$  abgeleitet ( $m =$  Masse,  $a =$  Beschleunigung), erhalten wir die Einheitengleichung.

$$F = [m] \cdot [a] \quad \text{mit} \quad [m] = 1 \text{ kg} \text{ und } [a] = \frac{[v]}{[t]} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} : [F] = 1 \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2} = 1 \text{ N.} \quad (1.10)$$

Die Einheit der Kraft hat den Einheitenamen Newton.