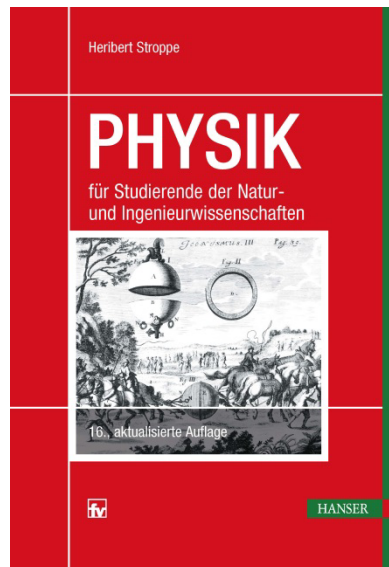


# HANSER



## Leseprobe

ZU

## „PHYSIK für Studierende der Natur- und Ingenieurwissenschaften“ (16. Auflage)

von Heribert Stroppe

ISBN (Buch): 978-3-446-45533-7

ISBN (E-Book): 978-3-446-45580-1

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45533-7>  
sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Vorwort

Seit seinem Erscheinen im Jahre 1974 hat das Lehrbuch zunehmende Verbreitung gefunden, nicht nur unter Studierenden der Ingenieurwissenschaften, für die es ursprünglich gedacht war, sondern auch bei Studienanfängern der Physik und anderer Naturwissenschaften. Das von Anfang an verfolgte und über Jahre hinweg beibehaltene Konzept, das ganze umfangreiche Gebiet in einem einzigen Band wiederzugeben, hat sich somit stets aufs Neue bewährt.

Die Menge an neuen physikalischen Erkenntnissen wächst von Tag zu Tag in stürmischer Weise an. Dies zwingt zu einer Form des Lehrbuchs, wie sie einer Anfängervorlesung wohl am besten gerecht wird: Die Abschnitte über die „klassische“ Physik bringen die Herleitungen bis ins Einzelne; an ihnen sollen sich die Leser die erforderliche Gewandtheit im Rechnen sowie in der mathematischen Formulierung physikalischer Zusammenhänge aneignen. Später, hauptsächlich im Kapitel „Quanten“ sowie bei neueren Anwendungen der Physik, muss mehr und mehr dazu übergegangen werden, das physikalische Phänomen zu beschreiben und zu erklären.

Neben der reinen Wissensvermittlung soll das Buch aber noch einem anderen Zweck dienen: Es soll bei den jungen Studierenden, auch wenn sie die Physik nur als Grundlagenfach belegen (müssen), zugleich ein wenig die Liebe zum Gegenstand wecken. Deshalb sind trotz der gebotenen Kürze manche Probleme der Physik angesprochen, die nicht unmittelbar zum Stoff einer Grundlagenvorlesung gehören, aber üblicherweise allgemeines Interesse finden.

Die Durcharbeitung des in betont knapper Form gehaltenen Stoffes erfordert die intensive Mitarbeit der Leser. Wer also das Buch wirklich zum Lernen und nicht nur zum Nachschlagen benutzen will, wird viel „mitrechnen“ müssen. Dies bezieht sich nicht nur auf die zu den einzelnen Abschnitten aufgenommenen Übungsbeispiele und Aufgaben; diese möglichst ohne Zuhilfenahme der Lösungen zu meistern, sei jedem Studierenden dringend angeraten. Zahlreiche zusätzliche Beispiele und Aufgaben unterschiedlichen Schwierigkeitsgrades mit meist praxisorientiertem Inhalt zu allen behandelten Stoffgebieten enthält unser einbändiges Übungsbuch „PHYSIK – Beispiele und Aufgaben“.

Das Verständnis ist ein allgemeines Problem beim Erlernen der Physik. Das Lesen mag einfach erscheinen, aber das tiefere Verstehen der Zusammenhänge erfordert mehr als nur Lesen und Auswendiglernen, es erfordert Nachdenken; es gibt bei ernsthaftem Studium keine Möglichkeit, Letzteres zu umgehen. Die Studierenden sollen aber wissen, dass die Schwierigkeiten, mit denen erfahrungsgemäß jeder anfänglich zu kämpfen hat, in der Natur der Sache liegen, und dass sie sich um das Verständnis der Dinge ebenso bemühen müssen, wie es vor ihnen auch alle großen Geister einmal getan haben. Der Lohn der Mühe wird sich dann bald im Erfolgserlebnis und „Leistungsglück“ einstellen und Ansporn für ein weiteres erfolgreiches Studium sein.

Trotz vieler Hinweise wurde mit der Erweiterung der Stoffinhalte bewusst zurückhaltend umgegangen. So wurden hinsichtlich der noch bevorstehenden Revision des Internationalen Einheitensystems (SI) bereits abzusehende Änderungen an vielen Stellen eingearbeitet, ein Abschnitt über den kristallinen Aufbau der Stoffe sowie über die allgemeine Relativitätstheorie hinzugefügt. Desweiteren wurden zahlreiche inhaltliche Ergänzungen vorgenommen sowie neue Beispiele und Aufgaben aufgenommen. Vor allem Merksätze, die Studierenden bei der Prüfungsvorbereitung helfen, sind nun deutlicher hervorgehoben als zuvor.

Es war dem Hauptautor des Buches, Prof. Dr. HERIBERT STROPPE, leider nicht vergönnt, das Erscheinen der 16. Auflage zu erleben. Er prägte noch wesentlich die inhaltliche Erweiterung des Lehrbuches und nahm Einfluss auf gestalterische Aspekte der Neuauflage. Wir, die Mitautoren Dr. habil. P. STREITENBERGER und Dr. E. SPECHT, haben nach bestem Wissen die Überarbeitung des Lehrbuches im Sinne des Hauptautors fortgeführt.

Wir danken den Herren Prof. Dr. W. HERMS (Magdeburg) und Prof. Dr. J. HÖHN (Wien) für wertvolle Hinweise. Weiterhin sind wir Frau U. KRUSE für das Zeichnen und Herrn M. SPECHT für die digitale Bearbeitung der Bilder zu Dank verpflichtet.

Dem Verlag sei für die seit Erscheinen des Buches stets gute Zusammenarbeit gedankt.

Magdeburg, im Juli 2018

Die Autoren

## Hinweise

Gleichungen, Bilder, Tabellen, Beispiele und Aufgaben werden *innerhalb eines Hauptabschnittes* (Einer-Nummerierung) fortlaufend gezählt (z. B. Bild 3.10 = 10. Bild im Abschnitt 3, oder (14.5) = Gleichung (5) in Abschnitt 14 oder Beispiel 31.1/2 = zweites der Beispiele 31.1 usw.). Die *Lösungen* zu den Aufgaben befinden sich unter der entsprechenden Aufgaben-Nummer auf den Seiten 629 bis 634.

*Vektoren* sind im Text durch fettgedruckte Buchstaben, in den Bildern zur besseren Unterscheidung durch normale Buchstaben mit einem Pfeil darüber gekennzeichnet.

Aus didaktischen und historischen Gründen verwenden wir in der Benennung und/oder in den Formelzeichen physikalischer Größen in einigen Fällen sowohl die Größenbenennung nach DIN als auch die im physikalischen Schrifttum (noch) häufiger vorkommende Benennung, z. B. „Dielektrizitätskonstante“ und nach DIN „Permittivität“, „Verschiebungsdichte“ und „elektrischer Fluss“, „Flächenladungsdichte“ und „Ladungsbedeckung“, oder Stromdichte  $\mathbf{j}$  statt nach DIN  $\mathbf{J}$ , magnetische Spannung  $U_m$  statt  $V_m$  u. a. Im Übrigen unterliegen sowohl die Größenbenennungen als auch die Formelzeichen erfahrungsgemäß häufigen Veränderungen, und die Empfehlungen sind in verschiedenen Fachgebieten nicht einheitlich.

# Inhaltsverzeichnis

## I Einführung

<b>1</b>	<b>Was ist „Physik“? Wege physikalischer Erkenntnisgewinnung</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>Physikalische Größen, Einheiten, Dimensionen, Gleichungen</b>	<b>22</b>
2.1	Größen, Einheiten, Dimensionen .....	22
2.2	Physikalische Gleichungen .....	24
2.3	Das neue SI-Einheitensystem .....	25

## II Teilchen

Mechanik der Punktmasse und des starren Körpers. Stoffe

<b>3</b>	<b>Kinematik der Punktmasse</b> .....	<b>28</b>
3.1	Raum, Zeit, Bezugssystem .....	28
3.2	Die gleichförmige Bewegung .....	30
3.3	Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung .....	31
3.4	Freier Fall. Senkrechter Wurf .....	34
3.5	Allgemeine Definition von Geschwindigkeit und Beschleunigung. Ungleichmäßig beschleunigte Bewegung .....	36
3.6	Geschwindigkeit und Beschleunigung als Vektoren. Zusammengesetzte Bewegungen (Superposition) .....	39
3.7	Die gleichförmige Kreisbewegung .....	41
3.8	Die ungleichförmige Kreisbewegung .....	45
3.9	Bewegung auf beliebig krummliniger Bahn .....	47
<b>4</b>	<b>Dynamik der Punktmasse</b> .....	<b>49</b>
4.1	Der Kraftbegriff in der Physik. Zusammensetzung und Zerlegung von Kräften. Statisches Gleichgewicht .....	49
4.2	Das Trägheitsgesetz (1. NEWTONSches Axiom) .....	51
4.3	Das Grundgesetz der Dynamik (2. NEWTONSches Axiom) .....	52
4.4	Träge und schwere Masse. Gewichtskraft. Radialkraft .....	53
4.5	Kraftstoß. Impuls (Bewegungsgröße) .....	55
4.6	Lösung der Bewegungsgleichung für konstante Kraft. Die Wurfbewegung ..	58

4.7	Das Wechselwirkungsgesetz (3. NEWTONSches Axiom) .....	61
4.8	Reibungskräfte .....	62
<b>5</b>	<b>Bewegte Bezugssysteme .....</b>	<b>66</b>
5.1	Geradlinig beschleunigte Bezugssysteme. Trägheitskräfte .....	66
5.2	Gleichförmig rotierende Bezugssysteme. Zentrifugalkraft, CORIOLIS-Kraft ..	69
5.3	Inertialsysteme. Relativitätsprinzip der klassischen Mechanik .....	72
<b>6</b>	<b>Grundzüge der speziellen Relativitätstheorie .....</b>	<b>74</b>
6.1	Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Die LORENTZ-Transformation .....	74
6.2	Folgerungen aus der LORENTZ-Transformation .....	78
6.3	Relativistische Bewegungsgleichung .....	79
<b>7</b>	<b>Arbeit und Energie .....</b>	<b>81</b>
7.1	Arbeit .....	81
7.2	Leistung. Wirkung .....	85
7.3	Der Energiebegriff. Potenzielle und kinetische Energie .....	86
7.4	Das Gesetz von der Erhaltung der Energie (Energiesatz) .....	87
7.5	Äquivalenz von Masse und Energie .....	89
<b>8</b>	<b>Gravitation .....</b>	<b>91</b>
8.1	Die KEPLERSchen Gesetze der Planetenbewegung und das Gravitationsgesetz .....	91
8.2	Arbeit gegen die Schwerkraft. Kosmische Geschwindigkeiten .....	94
<b>9</b>	<b>Dynamik der Punktmassen-Systeme .....</b>	<b>96</b>
9.1	Impulserhaltungssatz. Massenmittelpunkt .....	96
9.2	Die Gesetze des Stoßes .....	98
9.3	Raketenantrieb .....	103
<b>10</b>	<b>Statik des starren Körpers .....</b>	<b>105</b>
10.1	Freiheitsgrade des starren Körpers .....	105
10.2	Kräfte am starren Körper. Drehmoment. Gleichgewichtsbedingungen .....	105
10.3	Kräftepaar .....	110
10.4	Der Schwerpunkt .....	110
10.5	Arten des Gleichgewichts .....	113
<b>11</b>	<b>Dynamik des starren Körpers .....</b>	<b>114</b>
11.1	Bewegung eines frei beweglichen Körpers bei Einwirkung einer Kraft .....	114
11.2	Kinetische Energie der Drehbewegung. Massenträgheitsmoment .....	114
11.3	Arbeit und Leistung bei der Drehbewegung. Grundgesetz der Dynamik ....	117
11.4	Der Drehimpuls (Drall). Drehimpulserhaltungssatz .....	119
11.5	Kreiselbewegungen. Freie Achsen .....	121
11.6	Bewegung des symmetrischen Kreisels .....	123

<b>12</b>	<b>Die Zustandsformen der Stoffe</b> .....	<b>126</b>
12.1	Einteilung der Stoffe. Aggregatzustände .....	126
12.2	Der kristalline Aufbau der Festkörper .....	127
12.3	Bindungsarten .....	130

## III Kontinua

Mechanik der deformierbaren Medien

<b>13</b>	<b>Der deformierbare feste Körper</b> .....	<b>132</b>
13.1	Elastische Verformung. HOOKEsches Gesetz .....	132
13.2	Querkontraktion. Kompressibilität .....	134
13.3	Elastisches Verhalten bei Scherbeanspruchung .....	135
13.4	Der einachsige Spannungszustand .....	136
13.5	Dreiachsiger Spannungs- und Dehnungszustand .....	137
13.6	Zusammenhang zwischen Schubmodul, Elastizitätsmodul und POISSON- scher Querkontraktionszahl .....	138
13.7	Plastische Verformung. Spannungs-Dehnungs-Diagramm .....	139
13.8	Härte fester Körper .....	141

<b>14</b>	<b>Ruhende Flüssigkeiten und Gase</b> .....	<b>142</b>
14.1	Druck in Flüssigkeiten (hydrostatischer Druck) .....	142
14.2	Schweredruck. Auftrieb. Schwimmstabilität .....	143
14.3	Druck in Gasen. Zusammenhang zwischen Druck, Volumen und Dichte ...	147
14.4	Schweredruck in Gasen. Barometrische Höhenformel .....	148
14.5	Erscheinungen an Grenzflächen. Kohäsion und Adhäsion .....	150
14.6	Spezifische Oberflächenenergie, Oberflächenspannung .....	150
14.7	Benetzung und Kapillarwirkung .....	152

<b>15</b>	<b>Strömende Flüssigkeiten und Gase (Strömungsmechanik)</b> ....	<b>154</b>
15.1	Das Strömungsfeld. Kennzeichnung und Einteilung von Strömungen .....	154
15.2	Strömungen idealer Flüssigkeiten und Gase. Kontinuitätsgleichung .....	156
15.3	Die BERNOULLISCHE Gleichung. Druckmessung .....	158
15.4	Strömungen realer Flüssigkeiten und Gase. Laminare Strömung .....	162
15.5	Gesetze von HAGEN-POISEUILLE und STOKES .....	163
15.6	Umströmung durch reale Flüssigkeiten und Gase. REYNOLDS-Zahl .....	165
15.7	Die Bewegungsgleichung eines Fluids .....	167

## IV Wärme

Thermodynamik und Gaskinetik

<b>16</b>	<b>Verhalten der Körper bei Temperaturänderung</b> .....	<b>172</b>
16.1	Die Temperatur und ihre Messung .....	172
16.2	Thermische Ausdehnung fester und flüssiger Körper .....	174

16.3	Durch Änderung der Temperatur bewirkte Zustandsänderungen der Gase. Der absolute Nullpunkt .....	176
16.4	Die thermische Zustandsgleichung des idealen Gases .....	179
<b>17</b>	<b>Der I. Hauptsatz der Thermodynamik (Energiesatz) .....</b>	<b>182</b>
17.1	Wärmemenge und Wärmekapazität .....	182
17.2	Innere Energie eines Systems. Formulierung des I. Hauptsatzes .....	184
17.3	Spezifische Wärmekapazität des idealen Gases. Kalorische Zustandsgleichung .....	186
17.4	Anwendung des I. Hauptsatzes auf spezielle Zustandsänderungen des idealen Gases .....	188
17.5	Zustandsänderungen des idealen Gases in offenen Systemen. Technische Arbeit. Enthalpie .....	193
<b>18</b>	<b>Kinetische Gastheorie .....</b>	<b>195</b>
18.1	Die Masse der Atome und Moleküle .....	195
18.2	Druck und mittlere quadratische Geschwindigkeit der Gasmoleküle. Grundgleichung der kinetischen Gastheorie .....	196
18.3	Die Geschwindigkeitsverteilung der Gasmoleküle .....	199
18.4	Molekularenergie und Temperatur. Wärmekapazität der Körper .....	202
18.5	Stoßzahl und mittlere freie Weglänge .....	205
18.6	Gemische idealer Gase. Gesetz von DALTON .....	206
<b>19</b>	<b>Der II. Hauptsatz der Thermodynamik (Entropiesatz) .....</b>	<b>208</b>
19.1	Der CARNOT-Kreisprozess. Wärmekraftmaschine, Kältemaschine und Wärmepumpe .....	208
19.2	Thermodynamische Temperatur .....	212
19.3	Reversible und irreversible Vorgänge. II. Hauptsatz .....	213
19.4	Entropie .....	215
19.5	Entropieänderung des idealen Gases. Irreversible Prozesse .....	220
19.6	Entropie und Wahrscheinlichkeit .....	222
19.7	III. Hauptsatz (Satz von der Unerreichbarkeit des absoluten Nullpunkts) ...	225
<b>20</b>	<b>Reale Gase. Phasenumwandlungen .....</b>	<b>226</b>
20.1	Die VAN-DER-WAALSSche Zustandsgleichung. Gasverflüssigung .....	226
20.2	JOULE-THOMSON-Effekt. Erzeugung tiefer Temperaturen .....	229
20.3	Gleichgewicht zwischen flüssiger und gasförmiger Phase. Sieden und Verdunsten .....	231
20.4	Gleichgewicht zwischen fester und flüssiger Phase. Koexistenz dreier Phasen .....	236
20.5	Lösungen. Siedepunktserhöhung, Gefrierpunktserniedrigung .....	239
<b>21</b>	<b>Ausgleichsvorgänge .....</b>	<b>241</b>
21.1	Wärmeleitung .....	241
21.2	Wärmeübergang, Wärmedurchgang, Konvektion .....	244
21.3	Diffusion .....	246

## V Felder

Gravitation. Elektrizität und Magnetismus

<b>22</b>	<b>Das Gravitationsfeld</b> .....	<b>250</b>
22.1	Nahwirkungstheorie. Der Feldbegriff .....	250
22.2	Gravitationsfeldstärke, Gravitationspotenzial .....	252
22.3	Massen als Senken des Gravitationsfeldes .....	255
22.4	Grundaussagen der allgemeinen Relativitätstheorie .....	257
<b>23</b>	<b>Das elektrostatische Feld</b> .....	<b>259</b>
23.1	Die elektrische Ladung. Ladungsnachweis .....	259
23.2	Ladungen als Quellen bzw. Senken des elektrischen Feldes .....	261
23.3	Kraftwirkungen des elektrischen Feldes. Elektrische Feldstärke .....	262
23.4	Elektrostatisches Potenzial. Spannung .....	265
23.5	Elektrische Ladungen auf Leitern. Influenz .....	267
23.6	Elektrischer Fluss, Flussdichte .....	268
23.7	Das elektrische Zentralfeld (Punktladung und Punktladungssystem) .....	270
23.8	Kapazität. Kondensatoren .....	272
<b>24</b>	<b>Das elektrische Feld in Isolatoren (Dielektrika)</b> .....	<b>275</b>
24.1	Elektrische Polarisation der Dielektrika. Piezoelektrizität .....	275
24.2	Permittivität (Dielektrizitätskonstante), elektrische Suszeptibilität .....	276
24.3	Verhalten von $D$ und $E$ an der Grenzfläche zweier Medien .....	278
24.4	Energieinhalt des elektrischen Feldes .....	280
<b>25</b>	<b>Der Gleichstromkreis</b> .....	<b>282</b>
25.1	Das stationäre elektrische Feld in einem Leiter .....	282
25.2	Stromstärke, Spannung, Widerstand. OHMSches Gesetz .....	282
25.3	Schaltungen und Messmethoden .....	285
25.4	Arbeit und Leistung elektrischer Gleichströme .....	291
<b>26</b>	<b>Elektrische Leitungsvorgänge in Festkörpern und Flüssigkeiten</b> .....	<b>292</b>
26.1	Klassische Theorie der freien Elektronen in Metallen .....	292
26.2	Thermoelektrische Effekte .....	294
26.3	Elektrokinetische Effekte .....	296
26.4	Elektrolytische Stromleitung. FARADAYSche Gesetze .....	296
26.5	Elektrochemische Spannungsquellen .....	298
<b>27</b>	<b>Elektrische Leitungsvorgänge im Vakuum und in Gasen</b> .....	<b>300</b>
27.1	Bewegung freier Ladungsträger im elektrischen Feld .....	300
27.2	Ladungsträgerinjektion, Katodenstrahlen .....	302
27.3	Gasentladungen .....	303
27.4	Plasmaströme .....	306



<b>28</b>	<b>Das magnetostatische Feld der Dipole und Gleichströme</b> .....	<b>307</b>
28.1	Analogien und Unterschiede zum elektrostatischen Feld .....	307
28.2	Kraftwirkungen des magnetischen Feldes auf magnetische Dipole. Magnetische Feldstärke .....	308
28.3	Das Magnetfeld eines geraden Stromleiters. Durchflutungsgesetz .....	309
28.4	Einfache Feldberechnungen .....	311
28.5	Magnetische Flussdichte (Induktion) .....	313
28.6	Kraftwirkungen des magnetischen Feldes auf Stromleiter .....	314
28.7	Bewegung freier Ladungsträger im magnetischen Feld. LORENTZ-Kraft .....	316
28.8	Galvano- und thermomagnetische Effekte. HALL-Effekt. Quanten-HALL-Effekt .....	318
<b>29</b>	<b>Das magnetische Feld in Stoffen</b> .....	<b>320</b>
29.1	Magnetische Polarisation der Stoffe .....	320
29.2	Magnetisierung der Ferromagnetika. Hysterese .....	321
29.3	Der magnetische Kreis. Entmagnetisierung .....	323
<b>30</b>	<b>Elektromagnetische Induktion</b> .....	<b>326</b>
30.1	Das FARADAYSche Induktionsgesetz .....	326
30.2	Selbstinduktion .....	328
30.3	Energieinhalt des magnetischen Feldes .....	330
30.4	Elektromagnetische Induktion in einem bewegten Leiter .....	331
<b>31</b>	<b>Der Wechselstromkreis</b> .....	<b>333</b>
31.1	Wechselspannung, Wechselstrom, Dreiphasenstrom .....	333
31.2	Arbeit und Leistung elektrischer Wechselströme .....	335
31.3	Wechselstromwiderstände. OHMSches Gesetz für Wechselstrom .....	337
31.4	Der Transformator .....	343
31.5	Anharmonische Wechselströme in der Elektronik .....	344
31.6	Gleichrichter und Verstärker. Elektronische Bauelemente .....	345
<b>32</b>	<b>Die MAXWELLSchen Gleichungen</b> .....	<b>349</b>
32.1	Wirbel des magnetischen Feldes. Verschiebungsstrom .....	349
32.2	Wirbel des elektrischen Feldes. Wirbelströme .....	350
32.3	Elektromagnetisches Feld. System der MAXWELLSchen Gleichungen .....	352
32.4	Relativistische Elektrodynamik .....	353
<b>VI</b>	<b>Wellen</b>	
	Mechanische und elektromagnetische Schwingungen und Wellen	
<b>33</b>	<b>Mechanische Schwingungen</b> .....	<b>356</b>
33.1	Lineare Federschwingungen .....	356
33.2	Energiebilanz des harmonischen Oszillators .....	359
33.3	Drehschwingungen .....	360
33.4	Pendelschwingungen .....	362

33.5	Freie gedämpfte Schwingungen .....	364
33.6	Erzwungene Schwingungen .....	367
<b>34</b>	<b>Elektrische Schwingungen .....</b>	<b>371</b>
34.1	Der geschlossene Schwingkreis .....	371
34.2	Strom- und Spannungsresonanz .....	373
34.3	Erzeugung ungedämpfter elektrischer Schwingungen .....	376
<b>35</b>	<b>Überlagerung harmonischer Schwingungen .....</b>	<b>378</b>
35.1	Überlagerung zweier Schwingungen längs gleicher Richtung .....	378
35.2	Gekoppelte Schwingungen .....	380
35.3	Überlagerung zweier Schwingungen längs aufeinander senkrechter Richtungen .....	383
35.4	Überlagerung von harmonischen zu anharmonischen Schwingungen .....	386
35.5	Nichtlineare Schwingungen. Deterministisches Chaos .....	388
<b>36</b>	<b>Allgemeine Wellenlehre .....</b>	<b>392</b>
36.1	Zusammenhang von Schwingungen und Wellen .....	392
36.2	Die eindimensionale Wellengleichung und ihre allgemeine Lösung .....	395
36.3	Transversal- und Longitudinalwellen .....	396
36.4	Stehende Wellen. Eigenschwingungen .....	399
36.5	Wellenausbreitung in ausgedehnten Medien .....	402
<b>37</b>	<b>Schallwellen (Akustik) .....</b>	<b>405</b>
37.1	Wellenausbreitung im Schallfeld. Phasengeschwindigkeit .....	405
37.2	Schallfeldgrößen .....	407
37.3	Schallquellen. Ton, Klang, Geräusch .....	409
37.4	Schallempfänger und Gehör. Schallpegel und Lautstärke .....	410
37.5	Stehende Schallwellen .....	412
37.6	DOPPLER-Effekt .....	414
37.7	MACHScher Kegel .....	416
<b>38</b>	<b>Elektromagnetische Wellen .....</b>	<b>417</b>
38.1	Ausbreitung elektromagnetischer Wellen entlang von Leitungen .....	417
38.2	Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im freien Raum .....	419
38.3	Erzeugung und Nachweis elektromagnetischer Wellen .....	423
38.4	Die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen (H. HERTZ, 1888) .....	425
38.5	Das elektromagnetische Spektrum .....	426
<b>39</b>	<b>Einfluss von Stoffen auf die Wellenausbreitung .....</b>	<b>429</b>
39.1	Absorption und Streuung .....	429
39.2	Phasengeschwindigkeit und Dispersion. Gruppengeschwindigkeit .....	430
39.3	HUYGENSSches Prinzip .....	434
39.4	Reflexion und Brechung (Refraktion). Totalreflexion .....	435
39.5	Optische Dispersion. Prisma, Spektral- und Körperfarben .....	438

<b>40</b>	<b>Strahlenoptik (Geometrische Optik)</b> .....	<b>441</b>
40.1	Lichtstrahlen. FERMATSches Prinzip .....	441
40.2	Reflexion und Brechung von Lichtstrahlen .....	443
40.3	Abbildung durch Spiegel (ebener und gekrümmte Spiegel) .....	445
40.4	Abbildung durch Linsen (dünne und dicke Linsen, Linsensysteme) .....	450
40.5	Das Auge und der Sehvorgang .....	456
40.6	Optische Geräte zur Sehwinkelvergrößerung (Lupe, Mikroskop, Fernrohr) ..	456
40.7	Abbildungsfehler .....	459
<b>41</b>	<b>Wellenoptik</b> .....	<b>460</b>
41.1	Interferenz. Interferenzbedingungen .....	460
41.2	Interferenzen gleicher Neigung und gleicher Dicke .....	462
41.3	Beugung (Diffraktion). Das Beugungsphänomen .....	464
41.4	FRAUNHOFERSche Beugung am Spalt und an der Lochblende .....	466
41.5	Auflösungsvermögen optischer Geräte. Holografie .....	469
41.6	FRAUNHOFERSche Beugung am Strichgitter .....	472
41.7	Spektrometer .....	474
41.8	Beugung von RÖNTGENstrahlen am Raumgitter der Kristalle .....	475
41.9	Polarisation. Polarisation des Lichts durch Reflexion und Brechung .....	479
41.10	Polarisation durch Doppelbrechung .....	482
41.11	Interferenz des polarisierten Lichts .....	484
41.12	Drehung der Schwingungsebene des polarisierten Lichts .....	487
41.13	Nichtlineare Optik .....	489

## VII Quanten

Struktur und Eigenschaften der Materie

<b>42</b>	<b>Die Gesetze der Strahlung</b> .....	<b>492</b>
42.1	Das Wesen der Temperaturstrahlung (Wärmestrahlung) .....	492
42.2	Strahlungsphysikalische Größen .....	493
42.3	Emission und Absorption von Strahlung. KIRCHHOFFSches Strahlungsgesetz .....	495
42.4	Das PLANCKSche Strahlungsgesetz .....	497
42.5	Folgerungen aus dem PLANCKSchen Strahlungsgesetz .....	498
42.6	Lichttechnische Größen (Photometrie) .....	501
42.7	Zusammenhang zwischen strahlungsphysikalischen und lichttechnischen Größen .....	504
<b>43</b>	<b>Der Welle-Teilchen-Dualismus der Mikroobjekte</b> .....	<b>505</b>
43.1	Die Teilchennatur des Lichts. Lichtquanten (Photonen) .....	505
43.2	Der lichtelektrische Effekt (Photoeffekt) .....	506
43.3	Der COMPTON-Effekt .....	509
43.4	Rückstoß durch Quantenemission. MÖSSBAUER-Effekt .....	510
43.5	Die Wellennatur der Teilchen .....	512
43.6	Das HEISENBERGSche Unbestimmtheitsprinzip (Unschärferelation) .....	515

<b>44</b>	<b>Atombau und Spektren</b> .....	<b>518</b>
44.1	Die Streuexperimente von LENARD und RUTHERFORD. Das RUTHERFORDSche Atommodell .....	518
44.2	Das Spektrum des Wasserstoffatoms .....	520
44.3	Das BOHRsche Atommodell .....	522
44.4	Die Spektren der Alkaliatome. Bahndrehimpulsquantenzahl .....	526
44.5	Richtungsquantelung des Bahndrehimpulses der Elektronen .....	529
44.6	Das magnetische Bahnmoment der Elektronen. BOHRsches Magneton .....	530
44.7	Elektronenspin und magnetisches Spinmoment. Die Feinstruktur der Atom-spektren .....	531
44.8	Mehrelektronensysteme .....	533
44.9	Aufspaltung der Spektrallinien im Magnetfeld (ZEEMAN-Effekt) .....	534
44.10	Das PAULI-Prinzip und das Periodensystem der Elemente .....	536
44.11	Die RÖNTGENspektren und ihre Deutung .....	540
44.12	Absorption und Streuung von RÖNTGENstrahlen .....	542
44.13	Induzierte Emission. Maser und Laser .....	546
<b>45</b>	<b>Wellenmechanik</b> .....	<b>549</b>
45.1	Die SCHRÖDINGER-Gleichung .....	549
45.2	Elektron im Kastenpotenzial .....	551
45.3	Das wellenmechanische Bild des Atoms .....	553
45.4	Der Tunneleffekt .....	555
<b>46</b>	<b>Elektrische und magnetische Eigenschaften von Festkörpern</b> .....	<b>557</b>
46.1	Elektrische Leitfähigkeit. Das Modell des Elektronengases .....	557
46.2	Bändermodell des Festkörpers. Metalle, Halbleiter, Isolatoren .....	558
46.3	Elektrische Ströme in Halbleitern. Eigenleitung, Störstellenleitung .....	562
46.4	Der pn-Übergang .....	565
46.5	Halbleiterdiode, Transistor .....	567
46.6	Magnetische Eigenschaften. Dia- und Paramagnetismus .....	569
46.7	Ferromagnetismus, Antiferro- und Ferrimagnetismus .....	571
46.8	Supraleitung. Der JOSEPHSON-Effekt .....	574
46.9	Supraflüssigkeit .....	577
<b>47</b>	<b>Atomkerne</b> .....	<b>578</b>
47.1	Masse, Ladung und Zusammensetzung der Kerne .....	578
47.2	Isotope .....	579
47.3	Isobare, Isotone, Nuklide, Isomere .....	580
47.4	Massendefekt und Bindungsenergie der Kerne .....	580
47.5	Stabilitätskriterien. Kernsystematik .....	582
47.6	Kernkräfte .....	585
47.7	Kernmodelle .....	586

<b>48</b>	<b>Die natürliche Radioaktivität</b> .....	<b>588</b>
48.1	Der $\alpha$ -Zerfall der schweren Kerne .....	588
48.2	Der $\beta$ -Zerfall. Gammastrahlung .....	589
48.3	Das Zerfallsgesetz. Spezifische Aktivität .....	591
48.4	Radioaktive Zerfallsreihen und radioaktives Gleichgewicht .....	593
48.5	Dosimetrie und biologische Wirkung ionisierender Strahlung .....	594
<b>49</b>	<b>Künstliche Kernumwandlungen</b> .....	<b>597</b>
49.1	Arten künstlicher Kernumwandlungen .....	597
49.2	Massen- und Energiebilanz von Kernreaktionen. Wirkungsquerschnitt .....	598
49.3	Kernspaltung. Gewinnung von Kernspaltungsenergie .....	599
49.4	Arten von Kernreaktoren .....	602
49.5	Kernfusion .....	603
<b>50</b>	<b>Elementarteilchen</b> .....	<b>605</b>
50.1	Entwicklung zum Teilchen-„Zoo“ .....	605
50.2	Erhaltungssätze für Baryonenladung, Leptonenladung, Isospin, Strangeness und Hyperladung .....	606
50.3	Die elementaren Teilchen: Leptonen und Quarks .....	608
50.4	Zusammengesetzte Elementarteilchen. Hadronen .....	610
50.5	Die elementaren Kräfte (Wechselwirkungen). Feldquanten .....	611
50.6	Standardmodell der Teilchenphysik. Vereinheitlichte Theorie der elementaren Kräfte .....	613
50.7	Kosmologie. Dunkle Materie und Dunkle Energie .....	614
<b>A</b>	<b>ANHANG: Fehlerrechnung (Messabweichungen)</b> .....	<b>616</b>
A.1	Arten und Ursachen von Messabweichungen .....	616
A.2	Ermittlung von Messergebnis und Messabweichung .....	617
A.3	Zufallsstreuung von Messwerten .....	619
A.4	Fehlerfortpflanzung .....	623
A.5	Geradenausgleich (lineare Regression). Korrelation .....	625
	Bildquellenverzeichnis .....	628
	Lösungen der Aufgaben .....	629
<b>Index</b>	.....	<b>635</b>

# 1

## Was ist „Physik“? Wege physikalischer Erkenntnisgewinnung

Die *Physik* ist eine grundlegende Naturwissenschaft und beschäftigt sich mit der Untersuchung des Aufbaus, der Eigenschaften und der Bewegung der unbelebten Natur sowie mit den diese Bewegung hervorrufenden Kräften oder Wechselwirkungen. Wegen ihres grundlegenden und übergreifenden Charakters bildet die Physik ein unentbehrliches Fundament für viele andere Naturwissenschaften, wie z. B. die Chemie, die Astronomie, die Geowissenschaften und Meteorologie, sowie insbesondere für die gesamte Technik. So sind heute zahlreiche Physiker in den Ingenieurwissenschaften tätig, und viele in der Grundlagenforschung arbeitende Ingenieure sind zu hoch spezialisierten Physikern geworden. Da auch der Stoff, aus dem die Organismen bestehen und der in ihnen umgesetzt wird, den Gesetzen der Physik unterworfen ist, stellt diese darüber hinaus eine wesentliche Grundlage der biologischen und im weiteren Sinne auch der medizinischen Wissenschaft dar; man denke nur an die stürmische Entwicklung und zunehmende Bedeutung der Biophysik.

Die Physik ist eine *Erfahrungswissenschaft*. Jede ausgesprochene Behauptung oder Vermutung über einen physikalischen Sachverhalt ist das Resultat von Schlussfolgerungen, deren Ausgangspunkt bestimmte **Axiome** bilden. Das sind Grund- und Erfahrungssätze, deren Richtigkeit nicht durch logisches Schließen aus anderen Sätzen, sondern nur aus unmittelbar gegebenen Tatsachen hervorgeht. Ein Axiom kann man nicht logisch beweisen, sondern nur durch ein **Experiment** demonstrieren.

Das Experiment, d. h. die exakte Messung bestimmter, genau definierter *physikalischer Größen* im planmäßig und gezielt ausgeführten Versuch, bildet überhaupt die Grundlage jeglicher physikalischen Erkenntnis. Durch systematisches Ordnen des gewonnenen umfangreichen experimentellen Materials, durch die gedankliche Durchdringung mit den Methoden der *Mathematik* und Einordnung der Ergebnisse in schon bekannte Zusammenhänge lassen sich allgemein gültige physikalische **Gesetze** formulieren, die in ihrer Gesamtheit ein komplexes System von Naturerkenntnissen bilden, das sich in zunehmendem Maße ebenso erweitert, wie es an innerer Geschlossenheit gewinnt.

Dem hier skizzierten Weg der Erkenntnisgewinnung liegt die **induktive Methode** zu Grunde, die darin besteht, dass aus einer Fülle von Einzelbeobachtungen durch logische Schlussfolgerungen die allgemeinen Gesetzmäßigkeiten aufgedeckt und in **Theorien** zusammengefasst werden. Sofern eine Gruppe von Gesetzmäßigkeiten noch nicht sicher in das allgemeine Gebäude von Erkenntnissen eingegliedert werden kann, sucht man zunächst mit der Aufstellung einer **Hypothese** eine vorläufige Erklärung. Hypothesen müssen aber sofort verworfen werden, wenn sie in Widerspruch zu den Tatsachen geraten. Da der Wahrheitsgehalt aller physikalischen Lehrsätze allein auf ihrer Übereinstimmung mit der Wirklichkeit beruht, ist die Physik eine immer *induktiv* arbeitende Wissenschaft. Daraus folgt:

**Es gibt keine physikalische Theorie, die nicht zu experimentell prüfbareren Konsequenzen führt. Das Experiment ist deshalb ein wesentlicher Bestandteil der praktischen Überprüfung jeder physikalischen Theorie.**

Für die Gewinnung von neuen physikalischen Erkenntnissen ist aber ebenso der zweite Weg, die **deduktive Methode**, von großer Bedeutung. Sie stellt das Gegenstück und zugleich eine notwendige Ergänzung zur induktiven Methode dar. Mit ihr werden aus bekannten, allgemein gültigen Sätzen, deren Richtigkeit gesichert ist, zumeist durch mathematische Ableitungen neue Einzelerkenntnisse, Experimente und Erscheinungen vorausgesagt. Beide Methoden, die induktive und die deduktive, treten stets in enger Verknüpfung auf.

So hatte beispielsweise JOHANNES KEPLER (1571–1630) die Gesetze der Planetenbewegung auf induktivem Wege ermittelt. Seine Fragestellung galt dem „Wie“ der Planetenbewegung. ISAAC NEWTON (1643–1727) suchte das „Warum“. Er fand es 1687 auf deduktivem Wege, indem er die allgemeinen Gesetze der Mechanik auf den besonderen Fall der Bewegung der Himmelskörper anwandte. Der Schlüssel dazu war das *Gravitationsgesetz*, das die gegenseitige Anziehung zweier Massen bestimmt (s. 8.1).

Die physikalischen Begriffe, mit denen wir bei unseren Untersuchungen und Überlegungen operieren, sind jedoch nicht die konkreten Objekte selbst, sondern mehr oder weniger bewährte Abstraktionen, in denen sich all unsere Erfahrung im Umgang mit diesen Objekten verdichtet und niederschlägt. Bei diesen von uns benutzten physikalischen Begriffen handelt es sich immer nur um „Bilder“ oder **Modelle**.

Solch ein Modell enthält allerdings niemals alle Eigenschaften und Aspekte des wirklichen Gegenstandes. Es ist Teil einer jeden Theorie, die ja nicht die Wirklichkeit selbst ist, sondern lediglich deren annähernd adäquate Widerspiegelung in unserem Bewusstsein. Das Modell gibt aber jene Eigenschaften wieder, die in dem gegebenen Zusammenhang interessieren. Gerade dadurch erhalten die physikalischen Modelle die Eleganz und „Handlichkeit“, mit der die oft unübersehbare Kompliziertheit der wirklichen Objekte auf die jeweils relevanten Aspekte reduziert werden kann.

Als Beispiel sei das *Planetenmodell des Atoms* genannt, wonach die Elektronen im Atom aufgrund der elektrostatischen Anziehung um den Atomkern kreisen wie Planeten um die Sonne als Folge der Schwerkraft, jeweils mit der Fliehkraft als Gegenkraft. Auf Grundlage dieses Modells gelang es (allerdings nicht ohne einschneidende Zusatzforderungen, die BOHRschen Postulate, vgl. 44.3), die Wellenlängen des von einfach gebauten Atomen emittierten Lichts sehr genau zu berechnen. Oder das *Tröpfchenmodell des Atomkerns* (s. 47.7), wonach der Kern einem Flüssigkeitstropfen vergleichbar ist. Wenn sich aus der Gasphase ein neues winziges Tröpfchen an den Tropfen anlagert, entspricht dies einer Kondensation, wobei eine bestimmte Wärmemenge, die Kondensationswärme, frei wird. Analog dazu wird Energie frei, wenn sich ein einzelner Kernbaustein, ein Nukleon, an den Kern anlagert.

# 2

## Physikalische Größen, Einheiten, Dimensionen, Gleichungen

### ■ 2.1 Größen, Einheiten, Dimensionen

Zur kurzen und eindeutigen Beschreibung der Naturgesetze werden bestimmte physikalische **Größen** benutzt. Sie beschreiben Eigenschaften von physikalischen Objekten, für die ein *Messverfahren* existiert. Grundeigenschaften aller physikalischen Größen sind Erfassbarkeit durch Maß und Zahl (Metrisierung) und Verknüpfbarkeit mittels mathematischer Operationen. Physikalische Größen werden ihrer Qualität nach verschiedenen **Größenarten** zugeordnet. So z. B. gehören die Größen Wurfhöhe, Schwingungsamplitude und Kernradius sämtlich der Größenart „Länge“ an.

Als Maß zur Messung von Größen gleicher Art dienen die physikalischen **Einheiten**. Diese sind international festgelegte, reproduzierbare Größen und werden entweder durch eine Maßverkörperung, d. h. einen *Etalon* oder *Prototyp*, wie beim Kilogramm (vgl. 4.3), oder durch eine *Mess-* bzw. *Zählvorschrift*, wie beim Ampere (vgl. 28.6) bzw. Mol (vgl. 16.4) definiert. Bei der Messung einer physikalischen Größe wird dieselbe in Vielfachen bzw. Teilen der zugehörigen Einheit ausgedrückt. Jede physikalische Größe  $G$  trägt somit ein *quantitatives* und ein *qualitatives* Merkmal, und es kann daher ihr *Wert* formal als Produkt zweier Faktoren, *Zahlenwert*  $\{G\}$  und *Einheit*  $[G]$ , aufgefasst werden:

$$G = \{G\} [G]. \quad (2.1)$$

**Beispiel 2.1:** Elektrische Spannung  $U = 220\text{V}$ ;  $\{U\} = 220$ ;  $[U] = \text{V (Volt)}$ . □

Man unterscheidet *Basisgrößenarten* und *abgeleitete Größenarten*. In der Mechanik kommt man z. B. mit drei Basisgrößenarten, der Länge  $s$ , der Zeit  $t$  und der Masse  $m$ , aus, wobei dann die Geschwindigkeit  $v = s/t$ , die Beschleunigung  $a = v/t$ , die Kraft  $F = ma$  usw. abgeleitete Größenarten sind.

Entsprechend unterscheidet man zwischen *Basiseinheiten* und *abgeleiteten Einheiten*, je nachdem, ob es sich um Einheiten von Basisgrößenarten oder abgeleiteten Größenarten handelt.

**Die SI-Basiseinheiten.** Dem *Internationalen Einheitensystem* (Système International d'Unités, abgekürzt in allen Sprachen „SI“) liegen sieben Basiseinheiten zu Grunde; es sind dies die

Einheit der Länge:	das <b>Meter</b>	m	(vgl. 3.1)
Einheit der Masse:	das <b>Kilogramm</b>	kg	(vgl. 4.3)
Einheit der Zeit:	die <b>Sekunde</b>	s	(vgl. 3.1)
Einheit der elektrischen Stromstärke:	das <b>Ampere</b>	A	(vgl. 28.6)
Einheit der Temperatur:	das <b>Kelvin</b>	K	(vgl. 16.1)
Einheit der Stoffmenge:	das <b>Mol</b>	mol	(vgl. 16.4)
Einheit der Lichtstärke:	die <b>Candela</b>	cd	(vgl. 42.6).

*Anmerkung:* Die Temperatur darf wie bisher auch in Grad Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) angegeben werden. CELSIUS-Temperatur ist gleich KELVIN-Temperatur minus 273,15 K.



Alle Einheiten, die aus diesen Basiseinheiten direkt gebildet werden (ohne Verwendung von Zahlenfaktoren), wie z. B. die Einheit der Geschwindigkeit  $1 \text{ m/s}$  (lies: Meter je Sekunde)  $\equiv 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  oder die Einheit der elektrischen Spannung  $1 \text{ Volt (V)} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{kg} \cdot \text{A}^{-1}$ , heißen *kohärente* Einheiten. *Nichtkohärente* Einheiten lassen sich zwar auch auf die Basiseinheiten zurückführen, jedoch treten in den entsprechenden Gleichungen Zahlenwerte auf, die von 1 verschieden sind (Beispiele:  $1 \text{ Kilometer/Stunde} \equiv 1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} = 0,278 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg}$  usw.).

**Tabelle 2.1** Vielfache und Teile von SI-Einheiten. Dezimale Vielfache und Teile von Basiseinheiten und abgeleiteten Einheiten werden wie folgt durch *Vorsätze* gekennzeichnet:

Vorsatz	Vorsatzzeichen	Faktor	Vorsatz	Vorsatzzeichen	Faktor
Yotta	Y	$10^{24}$	Dezi <sup>1</sup>	d	$10^{-1}$
Zetta	Z	$10^{21}$	Zenti <sup>1</sup>	c	$10^{-2}$
Exa	E	$10^{18}$	Milli	m	$10^{-3}$
Peta	P	$10^{15}$	Mikro	$\mu$	$10^{-6}$
Tera	T	$10^{12}$	Nano	n	$10^{-9}$
Giga	G	$10^9$	Piko	p	$10^{-12}$
Mega	M	$10^6$	Femto	f	$10^{-15}$
Kilo	k	$10^3$	Atto	a	$10^{-18}$
Hekto <sup>1</sup>	h	$10^2$	Zepto	z	$10^{-21}$
Deka <sup>1</sup>	da	10	Yocto	y	$10^{-24}$

<sup>1</sup> Diese Vorsätze sollen nur noch bei solchen Einheiten angewendet werden, bei denen sie bisher gebräuchlich waren, z. B. Hektoliter, Hektopascal, Dezitonne, Zentimeter.

**Dimensionen physikalischer Größenarten.** Eine Verallgemeinerung der physikalischen Größe ist deren *Dimension*. Sie kennzeichnet die *Qualität* einer physikalischen Größenart, ohne Hinweis auf bestimmte Einheiten; sie gibt den Zusammenhang einer physikalischen Größenart mit den Basisgrößenarten an.

Der Mechanik liegen allein die drei Dimensionen *Länge* L, *Masse* M und *Zeit* T zu Grunde, entsprechend den oben genannten drei mechanischen Basisgrößenarten. Demnach hat z. B. die Geschwindigkeit die Dimension Länge/Zeit, also  $\text{LT}^{-1}$  (im Unterschied zu ihrer Einheit Meter/Sekunde), die Kraft  $F = ma$  die Dimension  $\text{MLT}^{-2}$ , die Energie die Dimension  $\text{ML}^2\text{T}^{-2}$  usw.

### Beispiele 2.2:

1. Führe die Einheit der elektrischen Spannung, das Volt (V), auf die Basiseinheiten zurück!

*Lösung:* Aus der Einheitenbeziehung für die Energie  $1 \text{ J (Joule)} = 1 \text{ W} \cdot \text{s} = 1 \text{ V} \cdot \text{A} \cdot \text{s} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$ , vgl. (23/1), folgt  $1 \text{ V} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/(\text{s}^3 \cdot \text{A})$ .

2. Drücke die inkohärente Energieeinheit Kilowattstunde (kWh) durch die SI-Einheit Joule (J) aus!

*Lösung:*  $1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 10^3 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot \text{s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$ .

3. Welche Basiseinheit hat das Produkt  $RC$  (elektrischer Widerstand mal Kapazität)?

*Lösung:* Aus  $[R] = 1 \text{ V}/1 \text{ A}$  (s. 25.2) und  $[C] = 1 \text{ A s}/1 \text{ V}$  (s. 23.8) folgt  $[RC] = 1 \text{ s}$  (Sekunde).  $\square$

**Aufgabe**

- 2.1 Forme den Ausdruck  $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}/(\text{dm}^3 \cdot \text{MPa})$  so um, dass er nur kohärente SI-Einheiten enthält, und vereinfache ihn durch formale Rechnung (s. hintere Einband-Innenseite)!

## ■ 2.2 Physikalische Gleichungen

Man unterscheidet zwischen *Größengleichungen*, *zugeschnittenen Größengleichungen*, *Zahlenwertgleichungen* und *Einheitengleichungen*.

In der **Größengleichung** stehen die Symbole für die physikalischen Größen, d. h. für die Produkte aus Zahlenwert und Einheit dieser Größen. Die Größengleichung gilt unabhängig von der Wahl der Einheiten.

**Beispiel 2.3:**

$s = vt$  (Weg = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit);  $F = ma$  (Kraft = Masse  $\times$  Beschleunigung); usw.  $\square$

Auch in den **zugeschnittenen Größengleichungen** stehen die Symbole für die physikalischen Größen; es treten jedoch in der Gleichung stets die Quotienten aus den Größen und ihren Einheiten, d. h. also die Zahlenwerte, auf. Als Beispiel sei die Gleichung (44.26) genannt.

**Beispiel 2.4:**

Umrechnung der CELSIUS-Temperatur  $\vartheta$  (Einheit  $^{\circ}\text{C}$ ) in die (absolute) KELVIN-Temperatur  $T$  (Einheit K)

$$\frac{T}{\text{K}} = \frac{\vartheta}{^{\circ}\text{C}} + 273,15 \quad \text{oder} \quad \{T\} = \{\vartheta\} + 273,15. \quad \square$$

In der **Zahlenwertgleichung** bedeuten die Symbole der vorkommenden physikalischen Größen *nur* die Zahlenwerte dieser Größen. Für die Größen sind dann ganz bestimmte Einheiten vorgeschrieben, die in einer Gleichungslegende angegeben werden.

**Beispiel 2.5:**

$$s = \frac{1}{3,6} vt \quad \text{mit} \quad \begin{array}{ll} s & \text{Weg in Metern,} \\ v & \text{Geschwindigkeit in Kilometern je Stunde,} \\ t & \text{Zeit in Sekunden.} \end{array} \quad \square$$

In diesem Buch werden grundsätzlich keine Zahlenwertgleichungen verwendet.

Die Verwendung der SI-Einheiten bietet den Vorteil, dass die Größengleichungen ohne Veränderung auch als Zahlenwertgleichungen benutzt werden können.

Geht es darum, die *Einheit* einer physikalischen Größe zu ermitteln, so setzt man die in der zugehörigen Größengleichung vorkommenden Größen in eckige Klammern, d. h., man betrachtet lediglich die Einheiten der betreffenden Größen. Auf diese Weise entsteht aus der Größengleichung die zugehörige **Einheitengleichung**.

**Beispiel 2.6:**

Aus der Definition der *spezifischen Wärmekapazität*  $c = Q/[m(T_2 - T_1)]$ , vgl. Abschnitt 17.1, mit  $Q$  als Wärmemenge,  $m$  Masse und  $T$  absoluter Temperatur folgt als Einheitengleichung

$$[c] = \frac{[Q]}{[m] \cdot [T]} = \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \equiv \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1},$$

also für  $c$  die Einheit Joule je Kilogramm und Kelvin.  $\square$

## ■ 2.3 Das neue SI-Einheitensystem

Im alten SI (bis Mai 2019) sind mit dem Caesium-Frequenzstandard  $f_{\text{Cs}}$  und der Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c$  die Basiseinheiten *Sekunde* und *Meter* auf eine unveränderliche Eigenschaft eines speziellen Atoms bzw. eine fundamentale Naturkonstante zurückgeführt (s. Abschnitt 3.1). Insbesondere wurde in Verbindung mit der Meterdefinition die Naturkonstante Lichtgeschwindigkeit 1983 ein für alle Mal auf einen bestimmten Wert festgelegt. Eine ähnliche auf unveränderliche Eigenschaften der Atome oder fundamentale Naturkonstanten zurückgehende definitorische Basis gibt es für die Einheiten Kilogramm, Ampere, Kelvin und Mol im alten SI nicht. Mit der Entdeckung elektrischer Quanteneffekte wie dem JOSEPHSON- und dem Quanten-HALL-Effekt (s. Abschnitte 46.8 bzw. 28.8) wurde es möglich, gut reproduzierbare Normale zu entwickeln, mit denen auch diese Basiseinheiten in großer Präzision und auf praktikable Weise durch Naturkonstanten oder atomare Größen dargestellt werden können. Dieses und die gewachsenen Anforderungen an die Messgenauigkeit in Wissenschaft, Technik und Wirtschaft haben zu einer Revision des SI geführt, die ab Mai 2019 gültig ist.

**Die sieben definierenden Konstanten.** Das neue SI wird durch verbindliche Festlegung der folgenden sieben physikalischen Konstanten definiert:

- **Frequenz des Hyperfeinstrukturübergangs** des Grundzustands im  $^{133}\text{Cs}$ -Atom (vgl. 3.1)  
 $f_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770\,\text{s}^{-1}$
- **Lichtgeschwindigkeit** im Vakuum (vgl. 3.1)  
 $c = 299\,792\,458\,\text{ms}^{-1}$
- **PLANCK-Konstante** (vgl. 42.4)  
 $h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}\,\text{J s}$  ( $\text{J s} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ )
- **Elementarladung** (vgl. 23.1)  
 $e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}\,\text{C}$  ( $\text{C} = \text{A s}$ )
- **BOLTZMANN-Konstante** (vgl. 18.2)  
 $k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23}\,\text{J K}^{-1}$  ( $\text{J K}^{-1} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ )
- **AVOGADRO-Konstante** (vgl. 18.1)  
 $N_{\text{A}} = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}\,\text{mol}^{-1}$
- das **photometrische Strahlungsäquivalent**  $K_{\text{cd}}$  einer monochromatischen Strahlung der Frequenz  $540 \cdot 10^{12}\,\text{Hz}$  ist genau gleich 683 Lumen/Watt (vgl. 42.6).

Die angegebenen Zahlenwerte können sich zum Inkrafttreten der Revision noch geringfügig ändern. Die definierenden Konstanten sollen eine relative Messunsicherheit von mindestens  $10^{-8}$  haben, weshalb die Gravitationskonstante  $\gamma$  (s. 8.1), die nur mit  $10^{-4}$  bekannt ist, nicht unter ihnen ist. Dies unterscheidet u. a. das neue SI von den *PLANCK-Einheiten* (s. u.). Von den definierenden Konstanten sind nur die Lichtgeschwindigkeit  $c$  (s. 3.1), die *PLANCK-Konstante*  $h$  (s. 42.4) und die *Elementarladung*  $e$  (s. 23.1) *fundamentale Naturkonstanten*. Die *BOLTZMANN-Konstante*  $k$  (s. 18.2), die *AVOGADRO-Konstante*  $N_{\text{A}}$  (s. 18.1) und das *photometrische Strahlungsäquivalent*  $K_{\text{cd}}$  (s. 42.7) sind *festgelegte Umrechnungsfaktoren* zwischen Energie und Temperatur, Partikelzahl und Stoffmenge bzw. Leistung und Lichtstrom.

**Die sieben Basisseinheiten.** Jede Basiseinheit kann durch eine Kombination aus Einheiten der oben aufgeführten definierenden Konstanten dargestellt werden. Für das *Kilogramm* als Einheit der Masse zum Beispiel erhält man  $\text{kg} = [h][f_{\text{Cs}}][c]^{-2}$ . Nach (2.1) kann man dafür auch

$1 \text{ kg} = (h/\{h\}) \cdot (f_{\text{Cs}}/\{f_{\text{Cs}}\}) \cdot (c/\{c\})^{-2}$  schreiben. Mit den obigen Maßzahlen  $\{h\}$ ,  $\{f_{\text{Cs}}\}$  und  $\{c\}$  der Konstanten  $h$ ,  $f_{\text{Cs}}$  und  $c$  folgt daraus die *Definition*  $1 \text{ kg} = 1,475\,521 \cdot 10^{40} h f_{\text{Cs}} / c^2$ . Für die sieben Basiseinheiten im neuen SI ergeben sich so die folgenden Definitionen:

<b>Sekunde (s)</b>	$1 \text{ s} = 9\,192\,631\,770 / f_{\text{Cs}}$
<b>Meter (m)</b>	$1 \text{ m} = (c/299\,792\,458) \text{ s} = 30,663\,318 c / f_{\text{Cs}}$
<b>Kilogramm (kg)</b>	$1 \text{ kg} = (h/6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}) \text{ m}^{-2} \text{ s} = 1,475\,521 \cdot 10^{40} h f_{\text{Cs}} / c^2$
<b>Ampere (A)</b>	$1 \text{ A} = (e/1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}) \text{ s}^{-1} = 6,789\,686 \cdot 10^8 f_{\text{Cs}} e$
<b>Kelvin (K)</b>	$1 \text{ K} = (1,380\,649 \cdot 10^{-23} / k) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} = 2,266\,665 f_{\text{Cs}} h / k$
<b>Mol (mol)</b>	$1 \text{ mol} = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23} / N_{\text{A}}$
<b>Candela (cd)</b>	$1 \text{ cd} = (K_{\text{cd}}/683) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1} = 2,614\,830 \cdot 10^{10} f_{\text{Cs}}^2 h K_{\text{cd}}$

Auch hier kann es zum Inkrafttreten des neuen SI noch leichte Veränderungen der Zahlenwerte geben.

**Die experimentelle Realisierung der Basiseinheiten.** Die Bereitstellung der jeweiligen Einheit für die Wissenschaft und Technologie ist ein wesentlicher Bestandteil der Einheitsdefinition, durch die das Messverfahren festgelegt und die Weitergabe der Einheit für Eichungen und Kalibrierungen erst ermöglicht wird. Während die experimentelle Darstellung von Meter, Sekunde und Candela wie im alten SI erfolgt, ist die Realisierung der Einheiten Kilogramm, Ampere, Kelvin und Mol neu.

Für das **Kilogramm** gibt es zwei Realisierungsmethoden, die „*Siliciumkugel*“ und die „*Watt-Waage*“. Bei der ersten Methode wird der bisherige Kilogramm-Prototyp (s. 4.3), das sog. *Ur-Kilogramm*, durch eine hochreine und von strukturellen Gitterdefekten möglichst freie Siliciumkugel als Massennormal ersetzt. Mittels RÖNTGENfeinstrukturbeugung (s. 41.8) und weiterer Messverfahren kann (aus der Gitterkonstante, dem Kugelvolumen und der Kugelmasse sowie der Molmasse von Si) die AVOGADRO-Konstante bestimmt werden, was zunächst eine Realisierung der Einheit **Mol** darstellt. Zusammen mit der PLANCK-Konstanten lässt sich daraus die atomare Masseneinheit  $u$  (s. 18.1) bestimmen und somit die Masseneinheit Kilogramm (s. 4.3) auf atomare Größen zurückführen. Die Methode „*Watt-Waage*“, bei der eine mechanische Leistung mit einer elektrischen Leistung verglichen wird, ist in Abschnitt 46.8 näher erläutert.

Ebenso gibt es zwei Darstellungsmethoden für die Einheit **Ampere**. Für sehr niedrige Stromstärken  $I$  kann die Einheit mittels des sog. COULOMB-*Blockade-Effekts* in mit der Frequenz  $f$  getakteten Einzelelektronen-Schaltungen durch direktes „elektronisches Zählen“ (Elektronenanzahl  $n$ ) über die Beziehung  $I = nef$  auf die Elementarladung  $e$  zurückgeführt werden. Für etwas höhere Stromstärken wird  $I$  nach dem OHMSchen Gesetz  $I = U/R_{\text{H}}$  aus der mittels des JOSEPHSON-Effekts gemessenen Spannung  $U$  und dem Quanten-HALL-Widerstand  $R_{\text{H}}$  bestimmt (s. 46.8).

Die Realisierung der Temperatureinheit **Kelvin** basiert auf der Bestimmung der BOLTZMANN-Konstanten  $k$ . Dies geschieht entweder aus der Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in einem Gas, die proportional zu  $(kT)^{1/2}$  ist (*akustisches Gasthermometer*, s. auch 37.1) oder aus der Veränderung der Permittivität eines Gases, z. B. Helium, bei isothermer Zustandsänderung (*Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer*), die proportional zu  $kT$  ist.

**Die PLANCK-Einheiten.** Einfache arithmetische Kombinationen von Naturkonstanten erlauben die Darstellung der Dimensionen *Länge*  $L$ , *Zeit*  $T$  und *Masse*  $M$ . Es sind dies die sog. *PLANCK-Einheiten*:

PLANCK-Länge	$l_{\text{P}} = \sqrt{\hbar G / c^3} = 1,616 \cdot 10^{-35} \text{ m}$
PLANCK-Zeit	$t_{\text{P}} = l_{\text{P}} / c = \sqrt{\hbar G / c^5} = 5,391 \cdot 10^{-44} \text{ s}$
PLANCK-Masse	$m_{\text{P}} = \sqrt{\hbar c / G} = 2,176 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$
PLANCK-Temperatur	$T_{\text{P}} = m_{\text{P}} c^2 / k = \sqrt{\hbar c^3 / G} = 1,417 \cdot 10^{32} \text{ K}$

mit  $\hbar = h/(2\pi)$ . Diese Einheiten beschreiben einen Bereich, in dem Quanteneffekte und Gravitationswechselwirkung die gleiche Größenordnung haben und sind daher in der *Quanten-Kosmologie* bedeutsam (s. 50.6 und 50.7).

# Index

- Abbildungsfehler, 459, 469, 515
- Abbildungsgleichung
  - für sphärische Linsen, 453
  - für sphärische Spiegel, 448
- Abbildungsmaßstab, 448, 353
- abgeschlossenes System, 88, 96, 98, 184, 218
- absolute Temperatur, 173, 179, 212
- absoluter Nullpunkt, 173, 177, 225
- Absorption, 429, 543
  - von elektromagnetischen Wellen, 429
  - von Schallwellen, 429
- Absorptionsgrad, 429, 435, 495
- Absorptionskoeffizient, 429
- Absorptionsquerschnitt, 599
- Additionstheorem der Geschwindigkeiten, 40
  - , relativistisches, 79
- Adhäsion, 150
- Adiabatexponent, 190, 203, 406
- Aggregatzustand, 126, 232, 237, 306
- Akkommodation, 456
- Aktivierungsenergie, 248
- Aktivität, 592, 593
- Akzeptor, 563
- Alkalimetalle, 534
- Alpha-Zerfall, 588
- Altersbestimmung, 593
- Ampere, 298, 314, 315, 576
- Amplitude, 357, 393
- Analysator, 480, 481
- Anfangsbedingungen, 38, 58, 358
- angeregter Zustand, 521
- Annihilation, 606
- Anomalie des Wassers, 176, 236
- Antenne, 424
- Antifarbe, 610, 612
- Antiferromagnetismus, 572
- Antimaterie, 606
- aperiodischer Grenzfall, 366
- Äquipotenzialfläche, 253, 254, 266, 267, 270
- Äquivalentdosis, 595, 596
- Äquivalentmasse, 297
- Äquivalenzprinzip, 54, 257, 505
- Aräometer, 145
- Arbeit, 81, 117
  - bei der Drehbewegung, 118
  - , Beschleunigungs-, 84
  - eines Gleichstromes, 291
  - elektrischer Wechselströme, 335
  - gegen die Schwerkraft, 82, 94
  - im elektrischen Feld, 265
- ARCHIMEDISches Prinzip, 145
- ARRHENIUS-Gleichung, 247
- Astigmatismus, 459
- Äther, 75, 77, 251
- atomare Masseneinheit, 53
- Atombombe, 580, 601
- Atomkern, 518, 578
- Atommasse, 196
- Atommodell, 518, 519
- Atomrumpf, 526
- Atomuhr, 29
- Atomvolumen, 196
- ATWOODSche Fallmaschine, 53, 55
- Auflösungsvermögen, 469
  - eines Elektronenmikroskops, 515
  - optischer Geräte, 469
- Auflagerkräfte, 109
- Auflösungsvermögen
  - optischer Geräte, 469, 475
- Aufspaltung der Terme, 527
- Auftriebskraft, 144–146
- Augen, 456
- AUGER-Effekt, 541, 544
- Ausdehnungsarbeit, 185
- Ausdehnungskoeffizient, 174, 177
- Ausgleichsgerade, 625
- Austauschkräfte, 585
- Austauschreaktion, 597
- Austauschteilchen, 611, 612
- Austauschwechselwirkung, 558

- Austrittsarbeit, 292, 507  
AVOGADRO-Konstante, 25, 196  
AVOGADROSche Regel, 198  
axialer Vektor, 108  
Axiom, 20
- Bahnbeschleunigung, 45  
Bahndrehimpuls, 527, 529, 586  
Bahnkurve, 43  
BALMER-Serie, 520  
Bändermodell, 559, 565  
BARKHAUSEN-Effekt, 573  
barometrische Höhenformel, 149, 200  
Baryon, 606, 610  
Baryonenladung, 607  
Basis-Schaltung, 347, 568  
Basiseinheit, 22  
Basisgrößenart, 22  
BCS-Theorie, 575  
Becquerel, 592  
Beleuchtungsstärke, 503  
Benetzung, 152  
BERNOULLISCHE Gleichung, 158, 169  
Beschleunigung, 31, 36, 39, 47  
Besetzungsinversion, 547  
BESSELSches Verfahren, 455  
Bestrahlungsstärke, 494  
Beta-Zerfall, 589, 590, 612  
Betatron, 428  
BETHE-WEIZSÄCKER-Formel, 586  
BETHE-WEIZSÄCKER-Zyklus, 603  
Beugung, 464  
– am Spalt, 466  
– am Strichgitter, 472  
– an einer Lochblende, 468  
– , FRAUNHOFERSche, 466, 467  
– , FRESNELSche, 466  
– von Elektronenstrahlen, 512  
– von RÖNTGENstrahlen, 475  
Beugungsgitter, 473  
Beugungsscheibchen, 469, 471  
Beweglichkeit, 247  
– der Ladungsträger, 293  
Bewegungsgleichung, 57, 97  
– , relativistische, 80  
Bewegungsgröße, 55  
Bezugssystem, 29, 66–68  
Biegeschwingungen, 402  
Bindungsenergie  
– der Elektronen, 524, 542  
– des Atomkerns, 586  
– je Nukleon, 582, 583
- Binnendruck, 150  
BIOT-SAVARTSches Gesetz, 312, 354  
Blendenzahl, 469, 470  
Blindleistung, 337  
Blindstrom, 337  
Blindwiderstand, 336, 339, 340  
BLOCH-Wand, 573  
Bogenentladung, 305  
Bogenmaß, 41  
BOHRSCHE Postulate, 522, 523, 526  
BOHRSCHE RADIUS, 121, 524  
BOHRSCHE Atommodell, 121, 522, 525, 553  
BOHRSCHE Korrespondenzprinzip, 525  
BOHRSCHE Magneton, 531  
BOLTZMANN-Gleichung, 222, 547  
BOLTZMANN-Konstante, 25, 173, 198, 223  
BOLTZMANNSCHE Verteilungsgesetz, 200  
Boson, 533  
BOYLE-MARIOTTESches Gesetz, 147  
BRAGGSche Gleichung, 478  
BRAVAIS-Gitter, 128  
Brechungsgesetz, 435–437, 444  
Brechwert, 455  
Brechzahl, 422, 430  
Bremsstrahlung, 540  
Brennpunkt, 446, 451  
Brennweite, 446, 452, 453  
– des Hohlspiegels, 447  
– einer dünnen Linse, 451  
– eines Linsensystems, 454  
BREWSTERSches Gesetz, 480  
Brille, 455  
BROWNSche Molekularbewegung, 195, 405, 407  
Brutreaktion, 601, 602  
BUNSENSches Ausströmungsgesetz, 161
- Caesium-Frequenz-Standard, 25, 29, 315, 576  
Candela, 501  
CARNOT-Prozess, 208, 210, 211, 214, 218  
CAVENDISH-Experiment, 93  
CELSIUS-Temperatur, 22, 173  
CHLADNISCHE Klangfiguren, 402, 554  
CLAUSIUS-CLAPEYRONSCHE Gleichung, 233, 236  
CLAUSIUS-RANKINE-Prozess, 211, 230  
Colour, 609  
COMPTON-Effekt, 509  
COMPTON-Streuung, 510, 543–545  
COOPER-Paar, 575  
CORIOLIS-Kraft, 69–71  
COULOMBSches Gesetz, 132, 271  
COULOMBSches Reibungsgesetz, 63  
CURIE-Punkt, 572

- CURIE-Temperatur, 321, 572  
 CURIE-WEISSSESches Gesetz, 572  
 CURIESches Gesetz, 571  
 $\alpha_W$ -Wert, 165, 166
- D'ALEMBERTSches Prinzip, 68, 168  
 DALTONSches Gesetz, 206, 221  
 Dampfdruck, 227, 232, 233, 239  
 Dampfdruckkurve, 233, 234  
 Dampfdruckpunkt, 173  
 Dämpfungskonstante, 365  
 DE-BROGLIE-Wellenlänge, 514, 549  
 DEBYE-SCHERRER-Verfahren, 478, 512  
 deduktive Methode, 21  
 Defektelektron, 562  
 Dehnung, 132  
 Deklination, 307  
 Determinismus, 517  
 Deuterium, 579, 603  
 deutliche Sehweite, 455, 456  
 Diamagnetismus, 321, 570  
 Dichte, 54, 176  
 Dielektrikum, 275  
 Dielektrizitätszahl, 276, 421  
 DIESEL-Prozess, 192, 211  
 Diffusion, 246, 247, 580  
 Diffusionsstrom, 246, 565  
 Dimension, 22, 23  
 Diode, 345  
 Dioptrie, 455  
 Dipol, 263, 423–426  
 Dipolmoment, 264, 315  
 Dipolstrahlung, 423  
 Dispersion, 430, 474  
 – , anomale, 431, 433  
 – , elektromagnetischer Wellen, 430  
 – , normale, 430, 433, 439  
 – , optische, 438  
 Dispersionsrelation, 432, 433  
 dissipative Strukturen, 224  
 Domänen, 571, 573  
 Donator, 562, 563  
 Doppelbrechung, 482, 486, 487  
 Doppelleitung, 417  
 Doppelschicht, 296, 298, 566  
 DOPPLER-Effekt, 414  
 Dosimetrie, 594  
 Dotierung, 562  
 Drain-Elektrode, 348, 569  
 Drehbewegung, 45, 114, 117  
 Drehimpuls, 119, 124  
 Drehmoment, 105, 107  
 Drehschwingung, 360  
 Drehsinn, 108  
 Drehspulgalvanometer, 315  
 Drehstrom, 333  
 Drehzahl, 41, 42  
 Dreieckschaltung, 334, 337  
 Driftbewegung, 293  
 Driftgeschwindigkeit, 247, 293  
 Driftstrom, 247, 566  
 Druck, 176  
 – in Flüssigkeiten, 142  
 – in Gasen, 147, 197  
 Druckdifferenz, 158  
 Druckmesssonden, 159, 160  
 Dualismus, 491, 505  
 – des Lichts, 506, 512  
 DUANE-HUNTSches Gesetz, 540  
 Dublettsystem, 534  
 DULONG-PETITSche Regel, 204, 205, 294  
 Dunkelentladung, 304  
 Durchflutungsgesetz, 311  
 Durchlassgrad, 429, 435, 480  
 dynamische Viskosität, 163  
 dynamischer Druck, 159  
 dynamisches Gleichgewicht, 68  
 Dynamomaschine, 332
- Effektivwert, 335, 336, 339, 341, 408  
 Eigenfunktionen, 552  
 Eigenleitung, 562, 564  
 Eigenschwingungen, 383, 399, 401, 413  
 Eigenstrahlung, 540  
 Eigenwert, 357, 401, 552  
 Einfangquerschnitt, 599  
 eingeprägte Kraft, 62, 67, 68  
 Einheiten, 22  
 EINSTEIN-DE-HAAS-Versuch, 571  
 EINSTEINSche Gleichung, 507  
 EINSTEINSches Relativitätsprinzip, 75  
 Eispunkt, 173  
 Elastizitätsmodul, 133, 139  
 elektrische Ladung, 259  
 elektrische Leitfähigkeit, 284, 557  
 elektrischer Schwingkreis, 371, 372  
 Elektrisierung, 278  
 elektrochemische Spannungsquellen, 298  
 elektrochemisches Äquivalent, 297, 298  
 Elektrodynamik, 352, 490  
 – , relativistische, 353  
 elektrokinetische Effekte, 296  
 Elektrolyse, 296  
 Elektromagnet, 315, 324, 330

- elektromagnetische Induktion, 326, 331  
 elektromagnetische Wechselwirkung, 611  
 elektromagnetisches Spektrum, 426  
 Elektron, 259, 606  
 Elektronendichte, 293, 554  
 Elektroneneinfang, 591  
 Elektronengas, 292, 558  
 Elektronenleitung, 292  
 Elektronenmikroskop, 470, 514  
 Elektronenradius, 281  
 Elektronenröhre, 345, 346, 568  
 Elektronenspin, 531  
 Elektronenstrahloszillograph, 301  
 Elektronenzwilling, 544  
 Elektronvolt, 266, 300  
 Elektroosmose, 296  
 Elektrophorese, 296  
 elektrostatisches Feld, 307, 352  
 elektrostatisches Potenzial, 265, 266, 270  
 Elementarladung, 25, 260, 263  
 Elementarteilchen, 610, 614  
 Elementarteilchenphysik, 605  
 elliptische Schwingung, 384, 486  
 Emission (induzierte und spontane), 546  
 Emissionsgrad, 496, 499  
 Emitter-Schaltung, 347, 568  
 Energie, 86, 89  
 Energiebändermodell, 559  
 Energiedichte  
 – der Strahlung, 495  
 – des elektrischen Feldes, 281  
 – des magnetischen Feldes, 330  
 Energiedosis, 595  
 Energieflussdichte  
 – , akustische, 409  
 – , elektromagnetische, 422  
 Energielücke, 561  
 Energiemethode, 359  
 Energiequanten, 507  
 Energiesatz, 87, 90, 184  
 Energieterm, 521  
 Energietopf, 588  
 Entartung, 527, 529, 560  
 Entartungstemperatur, 560  
 Enthalpie, 193  
 Entmagnetisierungsfaktor, 324  
 Entropie, 190, 216, 222, 223  
 Entropiesatz, 208, 218  
 Erddrehung, 35, 71  
 Erstarrungswärme, 232, 236  
 erzwungene Schwingung, 367  
 ETTINGSHAUSEN-Effekt, 318  
 EULERSche Formel, 338  
 EULERSche Gleichung der Hydrodynamik, 168, 169  
 Excimer-Laser, 548  
 Experiment, 20  
 FABRY-PÉROT-Interferometer, 474, 475  
 Fallbeschleunigung, 34, 71, 93, 252  
 Fallgesetz, 34  
 FARADAY-Effekt, 484, 489  
 FARADAY-Käfig, 268  
 FARADAY-Konstante, 297  
 FARADAYSche Gesetze, 260, 296  
 Farbfehler, 459  
 Farbkraft, 612  
 Farbladung, 609  
 Farbmischung, 439, 440  
 Farbtemperatur, 500  
 Farbzerlegung, 439  
 Faseroptik, 438  
 Fata Morgana, 438  
 Federkonstante, 84, 356  
 Federkraftmesser, 54, 67  
 Federschwingung, 356, 382  
 Fehlerfortpflanzung, 623, 624  
 Fehlergrenze, 618  
 Feinstruktur der Spektrallinien, 529, 533  
 Feld, 250  
 Feldemission, 303  
 Feldquanten, 611  
 Feldstärke, 250  
 – , elektrische, 262, 270, 279  
 – , Gravitations-, 252  
 – , magnetische, 308  
 Feldstrom, 566  
 FERMATSches Prinzip, 443, 444  
 FERMI-DIRAC-Statistik, 560  
 FERMI-Energie, 293, 559, 561  
 FERMI-Niveau, 560  
 Fermion, 533  
 Fernfeld, 423  
 Fernordnung, 126  
 Fernrohr, 458, 469  
 Ferrimagnetismus, 572  
 Ferrite, 321, 572  
 Ferromagnetismus, 321, 571, 572  
 Festkörper-Impuls laser, 548  
 Fettfleckphotometer, 503  
 FICKSche Gesetze, 246  
 Fixpunkt, 173  
 Flächenladungsdichte, 269, 270, 274  
 Flächensatz, 91, 120



- Flavour, 608  
 Fliehkraft, 69  
 Fluchtgeschwindigkeit, 95  
 Flussdichte  
 – , elektrische, 269  
 – , magnetische, 313, 326, 327  
 Flussquant, 526, 575  
 Flussschlauch, 575  
 FOUCAULTScher Pendelversuch, 71  
 FOURIER-Analyse, 386  
 FRANCK-HERTZ-Versuch, 523  
 freie Achsen, 121, 122  
 freier Fall, 34  
 Freiheitsgrad, 105, 203, 237  
 Fundamentalschwingungen, 381–383  
 Funkenentladung, 305  
 Fusionsbombe, 603  
 Fusionsreaktor, 603
- Galaxie, 615  
 GALILEI-Transformation, 73, 74, 77  
 galvanomagnetische Effekte, 318  
 Galvanometer, 289, 295, 332, 343, 508  
 – ballistisches, 261, 268, 326, 367  
 Gammastrahlung, 428, 591  
 Gap, 561  
 Gasentladung, 303, 305  
 Gasgemische, 206  
 Gaskonstante, 180, 207  
 Gaslaser, 548  
 Gasthermometer, 173, 178  
 Gate-Elektrode, 348, 569  
 GAUSS-Funktion, 243  
 GAUSSSche Normalverteilung, 620  
 GAUSSSche Zahlenebene, 338  
 GAY-LUSSACSches Gesetz, 177, 178  
 gedämpfte Schwingung, 366  
 Gefrierpunkterniedrigung, 240  
 Gegeninduktion, 344  
 Gegenstandsweite, 446, 452  
 Gegenwirkungsprinzip, 61, 62  
 Gehör, 409  
 GEIGER-MÜLLER-Zählrohr, 304, 593  
 gekoppelte Schwingungen, 380  
 Generatorprinzip, 328  
 Geradenausgleich, 625  
 Geschwindigkeit, 36  
 Geschwindigkeitsverteilung der Gasmoleküle,  
 199  
 Gesetz, 20  
 Gewichtskraft, 53, 93  
 gg-Kerne, 584
- GIBBSsche Phasenregel, 237  
 Gitter-Spektrometer, 474, 475  
 Gitterkonstante, 26, 127, 133, 472, 473, 476–478,  
 558  
 Gitterschwingungen, 243, 293, 383, 405, 511  
 Glühkathode, 302  
 Gleichdruckprozess, 193  
 Gleichgewicht, 49, 61  
 – , dynamisches, 68  
 – , radioaktives, 594  
 – , stabiles, 113, 225  
 – , statisches, 51, 106  
 – , thermisches, 172, 189  
 – , thermodynamisches, 172, 188, 211, 213  
 Gleichgewichtsarten, 113  
 Gleichgewichtsbedingungen starrer Körper, 107,  
 108  
 Gleichrichter, 285, 345, 567  
 Gleichstromkreis, 282  
 Gleichverteilungssatz, 203, 204  
 Gleichzeitigkeit, 78  
 Gleitreibungszahl, 64  
 Glimmentladung, 305  
 Gluon, 611, 612  
 Größenart, 22  
 Gradient, 255, 265  
 Grand Unified Theories (GUT), 613  
 grauer Körper, 496  
 Gravitation, 53, 91, 611, 614  
 Gravitationsfeld, 250, 253, 254, 258  
 Gravitationsgesetz, 92  
 Gravitationskonstante, 25, 92, 93, 252, 614  
 Gravitationskraft, 92, 252, 271  
 Graviton, 611  
 Gray, 595  
 Grenzflächenspannung, 152  
 Grenzkontinuum, 524  
 Grenzschicht, 152, 162  
 Grundgesetz der Dynamik, 52, 55, 56, 58, 117  
 Grundschwingung, 386, 401  
 Grundzustand, 121, 319, 521, 552, 557  
 Gruppengeschwindigkeit, 431, 432, 549  
 GSW-Theorie, 613  
 gu-Kerne, 584  
 GUT-Energie, 613, 614
0. Hauptsatz, 172  
 I. Hauptsatz, 184, 185, 188  
 II. Hauptsatz, 208, 214  
 III. Hauptsatz, 225  
 Hadron, 606, 609, 610  
 Haftreibungskraft, 62

- Haftreibungszahl, 62, 63  
Haftspannung, 152  
HAGEN-POISEUILLESches Gesetz, 163  
Halbleiter, 292, 561  
Halbleiter-Laser, 548  
Halbleiterdiode, 346, 567  
Halbwertszeit, 592–594  
HALL-Effekt, 318  
harmonische Schwingung, 355, 357, 359  
harmonische Welle, 393, 404  
harmonischer Oszillator, 357, 372  
Härte, 130, 141  
Hauptebene, 451, 454  
Hauptpunkte, 454  
Hauptquantenzahl, 523, 538  
Hauptstrahl, 452  
Hauptträgheitsachse, 122, 123  
Heißleiter, 285  
HEISENBERGSches Unbestimmtheitsprinzip, 516  
Helium II, 577  
Hellempfindlichkeitsgrad des Auges, 504  
HELMHOLTZsche Wirbelsätze, 156  
HEUSLERSche Legierungen, 321, 572  
HIGGS-Boson, 613  
Hintergrundstrahlung, 615  
Hochtemperatur-Supraleitung, 575  
Höhenstrahlung, 605  
Hohlraumstrahlung, 496  
Hohlspiegel, 446, 447, 449  
Holografie, 470  
HOOKESches Gesetz, 132, 133, 136, 139  
Hörschwelle, 411  
Hubarbeit, 82  
HUYGENS-FRESNELSches Prinzip, 465  
HUYGENSSches Prinzip, 434, 435, 465, 472, 482  
Hydraulik, 142, 155  
Hydrodynamik, 154  
hydrodynamische Ähnlichkeit, 166  
hydrostatische Waage, 145, 146  
hydrostatischer Druck, 135, 142, 144  
Hyperfeinstruktur, 29, 533  
Hyperladung, 608  
Hyperon, 605  
Hyperschall, 405  
Hysterese, 321–323, 574  
  
ideale Flüssigkeit, 156  
ideales Gas, 147, 156, 177, 196  
Impedanz, 338  
Impedanzebene, 339  
Impuls, 55, 57  
– , relativistischer, 80  
Impulserhaltungssatz, 57, 96, 98, 99  
Impulsmasse, 80  
Induktionsgesetz, 326, 327, 331  
induktive Methode, 20  
induktiver Widerstand, 339  
Induktivität, 328  
Inertialsystem, 72, 73, 75  
Influenz, 268, 309  
Infrarot-(IR-)Strahlung, 428  
Infraschall, 405  
Inklination, 307  
innere Bewegungen, 27  
innere Energie, 184, 187, 203, 229  
innere Kräfte, 96  
innere Reibung, 162  
Integrationskonstante, 38, 58, 104  
Intensität, 411, 412, 429, 468, 474, 494, 507, 540  
Interferenz, 379, 460, 461, 463  
– des polarisierten Lichts, 484  
intermediäre Bosonen, 611  
internationale Atomzeit (IAT), 29  
Internationales Einheitensystem (SI), 22  
Intrinsic-Konzentration, 564  
Intrinsicdichte (Inversionsdichte), 564  
Inversionsdichte, 564  
Inversionstemperatur, 230  
Ionen, 297  
Ionendosis, 595, 596  
Ionisationskammer, 303, 595  
Ionisierungsenergie, 508, 524  
Irreversibilität, 218  
irreversibler Prozess, 213, 220  
Isentrope, 190, 220  
Isobare, 183, 185, 188, 192, 211, 580  
Isolator, 260, 292, 561  
Isospin, 607  
Isotherme, 190  
Isotop, 579  
isotroper Körper, 139  
  
JOSEPHSON-Effekt, 25, 575  
JOULE-THOMSON-Prozess, 230  
  
Kalorimetrie, 183  
kalorische Zustandsgleichung, 187, 229  
Kältemaschine, 210  
Kaon, 605  
Kapazität des Kondensators, 279  
kapazitiver Widerstand, 340  
Kapillarität, 152, 153  
Katakastik, 446, 459  
Katodenstrahlen, 260, 302

- Kausalitätsprinzip, 517  
 Kaustik, 448  
 KELVIN-Skala, 173  
 KELVIN-Temperatur, 22  
 Kennlinie  
 – einer Triode, 345  
 – elektrischer Widerstände, 284  
 – von Halbleiterdioden, 346  
 KEPLER-Ellipse, 94  
 KEPLERSche Gesetze, 91, 120  
 KEPLERSches Fernrohr, 458  
 Kernbindungsenergie, 581  
 Kernenergie, 600, 601  
 Kernfusion, 306, 548, 598, 603, 604  
 Kernkraft, 585, 611, 612  
 Kernkraftwerk, 602  
 Kernladungszahl, 519, 578  
 Kernmodelle, 586  
 Kernphotoeffekt, 598  
 Kernradius, 579  
 Kernreaktor, 580, 600, 602  
 Kernspaltung, 598, 599  
 Kernspaltungsbombe, 601, 603  
 Kernspin, 533  
 Kernstreuung, 597  
 Kernumwandlungen, 597  
 Kernverschmelzung, 603  
 KERR-Effekt, 484, 487  
 Kettenreaktion, 601  
 kinetische Energie, 87, 114, 116, 359, 507, 509, 598  
 – , relativistische, 90, 300  
 kinetische Gastheorie, 195, 196  
 Kippschwingung, 388  
 Kippspannung, 302  
 KIRCHHOFFSche Gesetze, 289  
 KIRCHHOFFSches Strahlungsgesetz, 496  
 Klangfarbe, 401, 410  
 Knotenflächen, 554  
 Knotensatz, 289  
 Koerzitivfeldstärke, 322, 574  
 kohärente Einheit, 23  
 Kohärenz, 461, 547  
 Kohäsion, 150  
 Kohäsionsdruck, 150  
 KOHLRAUSCH, Verfahren von, 449  
 Kolbendruck, 142, 144, 159  
 Kollektor-Schaltung, 347, 568  
 Komplementärfarbe, 439, 463  
 Komponentenzerlegung, 40  
 Kompressibilität, 135, 143  
 – des idealen Gases, 147  
 Kompressionsmodul, 135  
 Kondensation, 227, 228, 231  
 Kondensator, 272  
 Konkavspiegel, 446, 447  
 konservative Kraft, 83, 86, 87, 253  
 Kontaktspannung, 294  
 kontinuierliches Spektrum, 388, 439  
 Kontinuitätsgleichung, 157  
 Konvektion, 245, 247  
 Konvexspiegel, 446, 449  
 Koronaentladung, 305  
 Körperfarbe, 440  
 Korrektur, 617  
 Korrelation, 626, 628  
 kosmische Geschwindigkeiten, 94  
 kosmische Strahlung, 428, 605  
 Kosmologie, 614  
 Kovolumen, 226  
 Kraft, 49, 52  
 Krafteck, 51, 106  
 Kräftegleichgewicht, 50  
 Kräftepaar, 110, 114  
 Kräfteparallelogramm, 50  
 Kraftfeld, 90, 250, 262, 308  
 Kraftlinien, 251  
 Kraftstoß, 55, 57  
 Kreisbeschleuniger, 317  
 Kreisbewegung, 41, 42, 44, 69  
 Kreisel, 121, 124  
 Kreisfrequenz, 42, 357  
 Kreisprozess, 184, 186, 208, 217  
 Kreisstrom, 316  
 Kriechfall, 365, 366  
 Kristallgitter, 126, 476, 477  
 kritische Masse, 601  
 Kugelwelle, 403, 404, 435  
 KUNDTSche Staubfiguren, 413  
 Kurzschluss, 287  
 Längenkontraktion, 78, 354  
 Lösungen, 239  
 Lösungstension, 298  
 Ladungsträgerkonzentration, 293  
 laminare Strömung, 162  
 Längenmessung, 28  
 LARMOR-Präzession, 535, 570  
 Laser, 547, 548  
 Laserdiode, 567  
 LAUE-Diagramm, 477  
 LAUESche Gleichungen, 476  
 LAWSON-Kriterium, 604  
 LE-CHATELIERSches Prinzip, 240  
 LECHER-Leitung, 418

- Leistung, 85, 117
  - eines Gleichstromes, 291
  - elektrischer Wechselströme, 335
  - im Drehstromkreis, 335
- Leitfähigkeit
  - , elektrische, 284, 557
  - , Temperatur-, 242
  - , Wärme-, 241, 244
- Leitungsband, 561
- Leitwert, 284
- LENZsche Regel, 327, 329
- Lepton, 606, 608, 609, 612
- Leptonenladung, 607
- Leuchtdichte, 502, 503
- Leuchtelektron, 526
- Lichtbogen, 285
- Lichtbrechung, 437
- lichtelektrischer Effekt, 302, 506
- Lichtgeschwindigkeit, 421
  - im Vakuum, 25, 74
  - , Messung der, 430
- Lichtleiterkabel, 438
- Lichtquanten, 498, 505
- Lichtstärke, 501, 503
- Lichtstrahlen, 441
- Lichtstrom, 502
- lichttechnische Größen, 493, 501
- Lichtweg, 460
- LINDE-Verfahren, 230
- lineare Regression, 625
- Linienflüchtigkeit des Kraftvektors, 106
- Linke-Hand-Regel, 351
- Linsenformen, 450
- Linsensysteme, 454
- LISSAJOUS-Figuren, 385
- Lithium, 603
- Lochblende, 468
- logarithmisches Dekrement, 365
- Longitudinalwelle, 396, 397
- LORENTZ-Kraft, 316, 318, 319, 331, 354, 575
- LORENTZ-Transformationen, 76, 77
- LOSCHMIDT-Konstante, 198
- Luftdruck, 144, 146, 148, 149
- Luftpalt, 322, 324, 330
- Luftverflüssigung, 230
- Luftwiderstand, 167
- Lumen, 502
- Lupe, 456, 458
- Lux, 502
  
- MACH-Zahl, 166
- magische Kerne, 587
  
- Magnet, 307
  - magnetische Feldenergie, 330
  - magnetische Induktion, 314
  - magnetische Quantenzahl, 529
  - magnetische Spannung, 311, 323
  - magnetischer Fluss, 308, 324, 326
  - magnetischer Kreis, 323, 324, 330
  - magnetischer Widerstand, 323
  - magnetisches Bahnmoment, 531
  - magnetisches Dipolmoment, 309, 587
    - einer Spule, 315
    - eines Kreisstromes, 316
  - magnetisches Joch, 330
  - magnetisches Spinmoment, 532–534
- Magnetisierung, 320, 572, 573
- Magnetisierungskurve, 321–324
- Magnetohydrodynamik, 306
- magnetostatisches Feld, 307
- Magnetpol, 307
- MAGNUS-Effekt, 161
- Majoritätsträger, 563
- Maschensatz, 289
- Maser, 547
- Masse, 53, 89, 512
  - , relativistische, 80, 89, 505
- Massendefekt, 581
- Massenmittelpunkt, 96, 97, 111
- Massenschwächungskoeffizient, 543
- Massenspektroskopie, 580
- Massenstrom, 103, 154, 246
- Massenträgheitsmoment, 114
- Massenwirkungsgesetz, 564
- Massenzahl, 578
- Materiewelle, 513
- MAXWELL-BOLTZMANN-Statistik, 560
- MAXWELLSche Geschwindigkeitsverteilung, 199, 200
- MAXWELLSche Gleichungen, 349–351, 419
- MAXWELLSche Relation, 421, 426, 430
- Mehrstufenprinzip, 104
- MEISSNER-OCHSENFELD-Effekt, 574
- MEISSNERSche Rückkopplungsschaltung, 376, 377
- Meson, 585, 605, 606, 610
- Messabweichung, 616
- Messergebnis, 618
- metastabiles Niveau, 548
- Metazentrum, 145
- MHD-Generator, 306
- MICHELSON-Experiment, 75, 77
- Mikroskop, 457, 458, 470
- MILLERSche Indizes, 477
- MILLIKAN-Methode, 263, 264

- Minoritätsträger, 563  
 Mischungstemperatur, 183  
 mittlere freie Weglänge, 205  
 mittlere Geschwindigkeit, 32, 36, 199–201  
 mittlere quadratische Geschwindigkeit, 197, 200, 201  
 mittleres Geschwindigkeitsquadrat, 197  
 Modulation, 425  
 MOHRsche Waage, 145  
 Mol (mol), 180  
 molares Normvolumen, 180  
 Molarität, 239  
 Molekülmasse, 196  
 Molmasse, 196  
 Molwärme, 183, 203, 204  
 Moment, 107  
 MOSFET, 348, 569  
 MÖSSBAUER-Effekt, 510  
 Multipllett, 527  
 Myon, 605, 606, 609
- Nahfeld, 423  
 Nahordnung, 126  
 Nahwirkung, 250, 251  
 Natrium-D-Linie, 529  
 NAVIER-STOKES-Gleichung, 169  
 Nebelkammer, 228, 318, 544  
 Nebenquantenzahl, 527  
 NERNST-Effekt, 318  
 NERNSTsches Wärmetheorem, 225  
 Neukurve, 322  
 Neutrino, 590, 606, 609  
 Neutron, 578, 579  
 Neutronen-Einfang, 597  
 Neutronenstern, 611  
 NEWTONSche Axiome, 51, 52, 61, 68, 252  
 NEWTONSche Ringe, 464  
 NEWTONSches Reibungsgesetz, 162  
 NICOLSches Doppelprisma, 484  
 n-Leiter, 563, 565  
 Nonius, 29  
 Nordpol, 307  
 Normal-Wasserstoffelektrode, 298  
 Normalbeschleunigung, 48  
 Normalkraft, 62  
 Normalluftdruck, 149  
 Normalvergrößerung, 457  
 Normzustand, 180  
 Nukleon, 578  
 Nulleffekt, 593  
 Nullpotenzial, 265  
 Nullpunktenergie, 293, 517, 553, 560
- Nutation, 123, 124
- Oberflächenenergie, 151  
 Oberflächenspannung, 150, 151, 153  
 Oberschwingung, 386, 401, 402  
 Objektiv, 457, 458, 469, 470  
 offenes System, 193, 224  
 OHMSches Gesetz, 283, 284, 293  
 OHMSches Gesetz der Magnetostatik, 323  
 OHMSches Gesetz für Wechselstrom, 341  
 Okular, 457, 458  
 optische Abbildung, 445  
 optische Weglänge, 443, 460  
 Orbitale, 554, 555  
 ordentlicher Strahl, 482  
 Ordnungszahl, 518, 536, 578  
 Orientierungspolarisation, 275  
 Orientierungsquantenzahl, 529  
 Ortsvektor, 47, 58  
 Osmose, 240  
 osmotischer Druck, 240  
 Oszillograph, 367
- Paarbildung, 543–545, 606  
 Parallelschaltung  
 – aus  $R$ ,  $L$  und  $C$ , 341  
 – von Kondensatoren, 273, 280  
 – von Widerständen, 286  
 Paramagnetismus, 321, 570  
 Parität, 612  
 Partialdruck, 206  
 PASCALSches Gesetz, 144  
 PASCHEN-BACK-Effekt, 536  
 PAULI-Prinzip, 538, 559, 609  
 PELTIER-Effekt, 295  
 Pendel, 35  
 Pendelschwingung, 362  
 Periodendauer, 42, 357  
 Periodensystem der Elemente, 536, 537  
 Permanentmagnet, 308  
 Permeabilitätszahl, 320, 323, 324  
 Permittivitätszahl, 276  
 Perpetuum mobile, 88, 184, 214  
 Phase, 150, 231, 237, 394  
 Phasendifferenz, 461  
 Phasenfläche, 403, 434, 441, 442  
 Phasengeschwindigkeit, 394, 397, 398, 431  
 – elektromagnetischer Wellen, 421  
 Phasengleichgewicht, 233  
 Phasengrenze, 150  
 Phasenschieber-Kondensator, 342  
 Phasensprung, 400, 401, 462

- Phasenumwandlung, 226, 231  
Phasenverschiebung, 369  
– zwischen Spannung und Strom, 333, 340–342  
Phasenwinkel, 337, 357  
Phononen, 243  
Photodiode, 285  
Photoeffekt, 302, 506, 524, 544  
Photometrie, 501, 502  
photometrisches Grundgesetz, 502  
Photon, 498, 505, 611  
Photozelle, 508  
physikalische Größen, 22  
physikalisches (physisches) Pendel, 362  
Piezoelektrizität, 276  
Pion, 605, 606  
PITOT-Rohr, 159  
PLANCK-Einheiten, 26, 614  
PLANCK-Energie, 614  
PLANCK-Konstante, 25, 498  
PLANCKSche Quantenbedingung, 505  
PLANCKSches Strahlungsgesetz, 498  
PLANCKSches Wirkungsquantum, 516, 542  
Planetenbewegung, 91  
Plasmazustand, 304, 604  
plastische Verformung, 133, 139, 140  
Plattenkondensator, 272  
p-Leiter, 564, 565  
pn-Übergang, 247, 346, 565, 566  
POISSONSche Adiabatangleichung, 190  
POISSONSche Querkontraktionszahl, 134  
polare Achse, 276  
Polarimeter, 484, 488  
Polarisation  
– des Lichts, 479  
– , elektrische, 275  
– , magnetische, 320  
Polarisationsapparat, 484  
Polarisationsfilter, 480  
Polarisationswinkel, 481  
Polarisator, 480, 481  
Polarisierbarkeit, 275  
Polarkoordinaten, 44  
Polstärke, 308  
Polytrope, 191  
Positron, 590  
Potenzialfeld, 254  
Potenzialmulde, 360, 551  
Potenzialtopf, 551, 555, 588  
Potenzialtopfmodell  
– der Metalle, 293  
– des Atomkerns, 589  
Potenzialwall, 292, 555, 589  
potenzielle Energie, 86, 94, 253, 359  
Potenziometer, 286  
POYNTING-Vektor, 422  
PRANDTL'Sches Staurohr, 159  
Präzession, 124, 125, 529  
Primärelement, 298  
Prisma, 438, 439, 475  
Prismenfernrohr, 458  
Prismen-Spektrometer, 474, 475  
PRONYscher Zaun, 119  
Proton, 259, 578, 579  
Proton-Neutron-Diagramm, 583  
Prozessgröße, 185  
Punktladung, 27, 261, 262, 270  
Punktmasse, 27  
Punktmassen-Systeme, 96  
Pyknometer, 146  
  
Quanten, 491  
Quanten-HALL-Effekt, 25, 319, 576  
Quantenchromodynamik (QCD), 612, 613  
Quantenenergie, 507  
Quantenmechanik, 514, 517, 525, 549  
Quantentheorie des Lichts, 491, 498, 507  
Quantenzahl  
– , innere, 533  
Quantenzahlen, 523, 538  
– , ladungsartige, 606  
Quarkhypothese, 609  
Quarks, 606, 608, 609, 611, 612  
Quelle, 155, 157, 251, 261  
Quellenfeld, 252, 261  
Querkontraktionszahl, 135  
QUINCKESches Resonanzrohr, 414  
  
rad (Radiant), 41  
Radialbeschleunigung, 43  
Radialkraft, 54, 69  
radioaktiver Zerfall, 583  
Radioaktivität  
– , künstliche, 598  
– , natürliche, 588  
Rakete, 38, 57, 103, 104  
Randwinkel, 152  
RAOULTSches Gesetz der Siedepunktserhöhung,  
239  
Raster-Tunnel-Mikroskop, 556  
Raum, 28, 30  
Raumwinkel, 493  
reale Flüssigkeit, 162, 165  
reales Gas, 181, 226  
Rechte-Hand-Regel, 108, 310, 350

- Rechteck-Schwingung, 387  
 Rechts-Links-Symmetrie, 613  
 Rechtsschraubenregel, 43  
 reduzierte Pendellänge, 363  
 reelles Bild, 445  
 Reflexion, 400, 435  
 Reflexionsgesetz, 436, 443  
 Reflexionsgitter, 472  
 Reflexionsgrad, 435, 480, 496  
 Refraktion, 435  
 Refraktometer, 438  
 Regeneration des Eisens, 236  
 Regenbogenspektrum, 520  
 Reibungskraft, 62, 64, 154, 162  
 Reibungswinkel, 63  
 Reihenschaltung  
 – aus  $R$ ,  $L$  und  $C$ , 340  
 – von Kondensatoren, 273, 280  
 – von Widerständen, 285  
 Rekombination, 303, 564  
 relative Atommasse, 196  
 Relativitätsprinzip der klassischen Mechanik, 73  
 Relativitätstheorie, 250, 353, 514  
 – , allgemeine, 54, 257, 614  
 – , spezielle, 74, 76  
 Remanenz, 322  
 Resonanz, 369, 388  
 – im Schwingkreis, 374, 375, 425  
 Resonanzabsorption, 512, 521  
 Resonanzen, 610  
 Resonanzschärfe, 376  
 Resultierende, 39, 49, 50  
 resultierende Kraft, 106  
 reversibler Prozess, 213  
 Reversionspendel, 364  
 REYNOLDS-Zahl, 166  
 RICHARDSON-Gleichung, 302, 508  
 Richtungsquantelung, 530, 533  
 RITZsches Kombinationsprinzip, 521  
 Rohrströmung, 164, 167  
 RÖNTGENstrahlen, 428, 477, 540–542  
 Rotationsenergie, 114  
 Rotationschwingungen, 373  
 Rückstoßprinzip, 103  
 Ruhenergie, 90  
 Ruhmasse, 80, 506  
 RUTHERFORD-Streuung, 271  
 RUTHERFORDsches Atommodell, 518, 522  
 RYDBERG-Frequenz, 520  
  
 Saccharimeter, 488, 489  
 Sammellinse, 449, 450, 452  
 Satellit, 44, 91, 94  
 Sättigungsdruck, 227, 232, 233, 235  
 Sättigungsfeldstärke, 321, 322  
 Sättigungskonzentration, 239  
 Schallfeldgrößen, 407  
 Schallgeschwindigkeit, 166  
 – in Flüssigkeiten, 406  
 – in Gasen, 406  
 – in Luft, 406  
 schallhartes Medium, 408  
 Schallmauer, 166  
 Schallpegel, 412  
 schallweiches Medium, 408  
 Schallwellen, 77, 406, 408, 412  
 Schallwellenwiderstand, 409  
 Scheinleitwert, 341  
 Scheinwiderstand, 338, 340  
 Scheitelwert, 333, 339  
 Schermodul, 136  
 Scherwelle, 396, 398  
 schiefe Ebene, 55, 63, 116  
 schiefer Wurf, 59  
 Schmelzdruckkurve, 236  
 Schmelzen, 236  
 Schmelzpunkt, 236  
 Schmelzwärme, 232, 236  
 Schmerzschwelle, 411  
 schneller Brüter, 602  
 SCHRÖDINGER-Gleichung, 549, 551  
 Schubmodul, 136, 139  
 Schubspannung, 135  
 Schwächungsgesetz, 429, 542, 543  
 schwache Wechselwirkung, 590, 606, 611, 612  
 schwarze Temperatur, 499  
 schwarzer Körper, 495, 497, 498  
 Schwebung, 379–382, 431  
 schwere Masse, 53, 252, 512  
 Schwerebeschleunigung, 34, 252  
 Schweredruck, 143  
 – in einer Kugel, 256  
 – in Gasen, 148  
 Schwerelosigkeit, 68  
 Schwerkraft, 49, 58, 92, 611  
 Schwerpunkt, 96, 98, 110, 111  
 Schwerpunktachse, 122  
 Schwerpunktsatz, 98  
 Schwimmstabilität, 145  
 schwingende Saite, 401  
 Schwingfall, 365, 366  
 Schwingkreis, 423, 426  
 Schwingquarz, 276  
 Schwingung, 357

- Schwingungsebene, 422, 479  
Schwingungsenergie, 359  
Schwingungsmittelpunkt, 363, 364  
SEEBECK-Effekt, 174, 295  
Sehwinkel, 456  
Seilwelle, 392, 393, 397  
Sekundärelektronenemission, 303  
Sekundärelement, 299  
Selbstinduktion, 328  
Sender, 424–426  
Senke, 155, 157, 251, 261  
senkrechter Wurf, 34, 59  
Serienformel, 520  
Seriengrenze, 524  
SI-Einheitensystem, 22  
– neues, 25, 53, 180, 315, 501, 576  
Sieden, 235  
Siedepunktserhöhung, 239  
Siedeverzug, 228  
Sievert, 595  
Siliciumkugel, 26, 180  
Sinusschwingung, 355  
Sinuswelle, 393  
Skalar, 39  
Skinneffekt, 351  
Solarkonstante, 489, 494, 501  
Solenoid, 312  
Source-Elektrode, 348, 569  
Spalt, 466  
Spaltquerschnitt, 599, 601  
Spannung, 133, 266, 267  
Spannungs-Dehnungs-Diagramm, 139  
Spannungsabfall, 282, 284  
Spannungskoeffizient, 178  
Spannungsmesser, 290  
Spannungsquelle, 286, 298  
Spannungsreihe, 298  
Spannungsstoß, 326  
Spannungsteiler, 286  
Spektralanalyse, 439  
spektrale Strahldichte, 494, 501  
Spektralfarben, 439  
Spektrograph (Spektrometer), 474, 475  
Spektrum, 492, 520  
Sperrkreis, 374  
Sperrschicht, 566  
spezifische Oberflächenenergie, 150  
spezifischer Widerstand, 284, 292  
Spiegel, 445–447  
Spin, 531, 534, 586  
Spin-Bahn-Kopplung, 533  
Spinquantenzahl, 532  
Spitzenentladung, 305  
Sprungtemperatur, 574, 575  
Spule, 326, 328  
Standardabweichung, 621  
Standardmodell, 613  
– , kosmisches, 614  
STARK-Effekt, 536  
starke Wechselwirkung, 611  
starrer Körper, 27, 105, 114  
statischer Druck, 159  
statisches Gleichgewicht, 51, 106  
Staudruck, 159  
Staupunkt, 159  
STEFAN-BOLTZMANNsches Gesetz, 499  
stehende Wellen, 399, 400  
STEINERScher Satz, 116, 117  
Steradian, 493  
STERN-GERLACH-Versuch, 532  
Sternschaltung, 334, 337  
STIRLING-Prozess, 211  
Stoffmenge, 180  
STOKESSches Reibungsgesetz, 164  
Störstellenleitung, 562  
Stoß, 98, 99, 101  
Stoßionisation, 304  
Stoßquerschnitt, 205  
Stoßzahl, 99, 205  
Strahlen, 403, 441, 442  
Strahlenoptik, 441  
Strahlungsäquivalent, 504  
Strahlungsdruck, 495  
Strahlungsgleichgewicht, 492  
Strahlungsintensität, 422  
strahlungsphysikalische Größen, 493  
Strahlungspyrometer, 174  
Strahlungswiderstand, 425  
Strangeness, 607  
Strangspannung, 334  
Streckgrenze, 139, 140  
Streubreite des Mittelwertes, 621  
Streuexperimente, 518, 579, 609  
Streufeld, 423  
Streukoeffizient, 544  
Streuquerschnitt, 599  
Streuung, 429, 543, 544  
Strichgitter, 472  
stroboskopischer Effekt, 380  
Strom-Spannungs-Kennlinie, 284  
Stromdichte, 283  
– von Flüssigkeiten, 156  
Stromfaden, 155  
Stromkreis, 283



- Stromleiter, 294, 309  
 – im Magnetfeld, 314  
 Stromlinien, 154  
 Stromlinienform, 165  
 Strommesser, 290  
 Stromröhre, 155, 157  
 Stromresonanz, 376  
 Stromstärke  
 – , elektrische, 282  
 – von Flüssigkeiten, 156  
 Strömungsfeld, 154  
 Strömungswiderstand, 165, 167  
 STUDENT-Faktor, 623  
 Sublimation, 232, 237  
 Sublimieren, 236  
 Südpol, 307  
 Superposition von Schwingungen, 378  
 Superpositionsprinzip, 39, 41, 270  
 Supersymmetrie (SUSY), 613, 614  
 Supraflüssigkeit, 577  
 Supraleiter, 557, 574, 575  
 Suszeptibilität  
 – , elektrische, 278  
 – , magnetische, 320, 571  
 Symmetriebrechung, 612  
 Synchrotron, 317
- Tangentialbeschleunigung, 48  
 Tauon, 609  
 technische Arbeit, 193  
 technische Kreisprozesse, 211  
 Teilchen, 27  
 Teilchenbeschleuniger, 80, 317, 428, 598  
 Telegrafengleichungen, 417  
 Telegrafie, 427  
 Temperatur, 172, 176, 202, 237  
 Temperaturgradient, 242  
 Temperaturkoeffizient, 284  
 Temperaturleitfähigkeit, 242  
 Temperaturmessung, 295  
 Temperaturstrahlung, 492  
 Termschema, 521, 528, 529  
 Theory of Everything (TOE), 613  
 thermische Ausdehnung, 174  
 thermische Elektronenemission, 302  
 thermische Neutronen, 600  
 thermische Zustandsgleichung, 179  
 thermische Zustandsgrößen, 176, 184  
 thermodynamisches Gleichgewicht, 214  
 thermoelektrische Effekte, 294  
 Thermoelement, 174, 295  
 thermomagnetische Effekte, 319
- Thermometer, 172, 176  
 thermonukleare Reaktion, 603  
 Thermosäule, 295  
 Thermospannung, 295  
 THOMSON-Effekt, 318  
 THOMSONSche Schwingungsgleichung, 372  
 Thyristor, 347  
 tiefe Temperaturen, 230  
 Toroid, 312, 604  
 Torsion, 361  
 Torsionsmodul, 136  
 Totalreflexion, 437, 438, 481  
 Trägheit, 52, 53, 90  
 Trägheitsellipsoid, 122  
 Trägheitsgesetz, 51, 57, 67, 73  
 Trägheitskraft, 67, 69, 70  
 Trägheitsmoment, 114–117  
 Tröpfchenmodell, 586, 599  
 träge Masse, 53, 252, 257, 512  
 Transformator, 343  
 Transformatorprinzip, 328  
 Transistor, 347, 348, 567  
 Transmissionsgrad, 429, 435, 496  
 Transversalwelle, 396, 398  
 Triode, 345  
 Tripelpunkt, 173, 237  
 Tritium, 579, 603  
 Tunnel-Mikroskop, 555  
 Tunneleffekt, 555, 575, 589  
 Tunnelkontakt, 575  
 turbulente Strömung, 162, 167  
 TYNDALL-Effekt, 430
- Überdruck, 144, 148, 151, 161, 179, 181  
 Überlagerung harmonischer Schwingungen, 378, 388  
 Überlagerung von Bewegungen, 39, 58  
 übersättigter Dampf, 228  
 ug-Kerne, 584  
 Uhrenparadoxon, 78  
 Ultraschall, 405  
 Umwandlungswärme, 183, 231  
 Unabhängigkeitsprinzip, 39  
 Unbestimmtheitsprinzip, 517, 525  
 Unschärferelation, 516  
 Urknall, 614  
 Ursache-Wirkung-Beziehung, 58, 517  
 Ursprung, 287, 298  
 uu-Kerne, 584
- Valenzband, 561  
 Valenzelektron, 526

- VAN-DER-WAALS-Bindung, 130  
VAN-DER-WAALS-Gleichung, 226–229  
VAN'T HOFFSches Gesetz des osmotischen Drucks, 240  
Vektor, 39  
Vektorprodukt, 43, 108  
VENTURI-Düse, 159  
verbotene Zone, 561  
Verbrennungsmotor, 211  
Verdampfungswärme, 231, 233  
Verdrängungsarbeit, 194  
Verdunstung, 235  
Verformung, 132  
Vergrößerung, 456, 458, 459  
Vermehrungsfaktor, 601  
Verschiebungsdichte, 269, 277, 278  
Verschiebungsstrom, 349  
Versetzung, 140  
Verstärkerschaltung, 376  
Verstärkerstufe, 347, 348  
Verstärkerwirkung, 345  
Vertrauensbereich, 622  
verzweigter Stromkreis, 289  
Virialsatz, 360  
virtuelles Bild, 445  
Viskosimeter, 165  
Viskosität, 162  
VOLTAspannung, 294  
Volumenarbeit, 185  
Volumendilatation, 135  
Volumenstrom, 156, 160
- Wahrscheinlichkeit  
– , thermodynamische, 222, 223  
Wärmedurchgang, 245  
Wärmekapazität, 182, 186, 294  
Wärmeleiter, 294  
Wärmeleitung, 241–244  
Wärmemenge, 182  
Wärmepumpe, 210, 212  
Wärmestrahlung, 245, 492  
Wärmestrom, 241, 244  
Wärmetönung, 231  
Wärmeübergang, 224, 244  
Wärmewiderstand, 245  
Wasserstoffbombe, 603  
Wasserwellen, 402, 433  
Watt-Waage, 26, 577  
Weakon, 611, 612  
Wechselspannung, 331, 333, 338  
Wechselstrom, 333, 338  
Wechselstrombrücke, 343  
Wechselstromwiderstände, 337  
Wechselwirkungen, 49, 585, 610, 611, 614  
Wechselwirkungsgesetz, 61  
WEISSSche Bezirke, 572, 573  
Welle, 392, 512  
Welle-Teilchen-Dualismus, 505  
Wellenfeld, 393  
Wellenfront, 434  
Wellenfunktion, 393, 549  
Wellengleichung, 417  
Wellengruppe, 431  
Wellenlänge, 394  
Wellenmechanik, 514, 549, 553  
Wellenmodell, 442  
– des Atoms, 553  
Wellenoptik, 460  
Wellenpaket, 431  
Wellenwiderstand  
– einer Doppelleitung, 418  
– elektromagnetischer Wellen, 422  
Wellenzahl, 394, 404  
Weltzeit UT, 29  
WHEATSTONE-Brücke, 174, 290, 343  
Widerstand  
– , elektrischer, 283  
Widerstandsbeiwert, 165  
Widerstandsthermometer, 174  
WIEDEMANN-FRANZsches Gesetz, 243, 294  
WIENSches Verschiebungsgesetz, 498, 501  
Winkelbeschleunigung, 45, 46  
Winkelfrequenz, 42  
Winkelgeschwindigkeit, 42, 45  
Wirbelbildung, 165  
Wirbelfeld, 252  
wirbelfreie Strömung, 156  
Wirbelsätze, 156  
Wirbelströme, 351  
Wirbelströmung, 155  
Wirkarbeit, 336  
Wirkleistung, 336, 337  
Wirkung, 85  
Wirkungsgrad, 214  
– der CARNOT-Maschine, 209, 214  
– , thermischer, 209  
Wirkungsquantum, 86, 498  
Wirkungsquerschnitt, 205, 599  
Wirkwiderstand, 336, 338, 339  
Wölbspiegel, 446–448  
Wurfbewegung, 35, 58, 60
- Zählrohr, 304, 595  
Z-Diode, 346

- ZEEMAN-Effekt, 529, 534, 536  
Zeit, 28  
Zeitdilatation, 78, 354  
Zeiteinheit, 29  
Zeitkonstante, 329  
Zeitmessung, 29, 357  
Zeitrichtung, 218  
Zentralfeld, 252  
Zentralkraft, 252  
Zentrifugalbeschleunigung, 70  
Zentrifugalkraft, 69  
Zentrifugalmoment, 122  
Zentripetalbeschleunigung, 43  
Zentripetalkraft, 54  
Zerfallsgesetz, 591  
Zerfallsreihen, 593  
Zerfallswahrscheinlichkeit, 591  
Zerstrahlung, 606  
Zerstreuungslinse, 450, 454  
Zeton, 611  
ZIOLKOWSKI-Zahl, 104  
zirkular polarisierte Welle, 486  
zirkulare Schwingung, 385  
Zirkulation, 155  
Zufall, 517  
Zufallsstreuung, 619  
Zugfestigkeit, 139, 140  
Zugspannung, 133  
Zugversuch, 140  
Zündspannung, 285, 304, 347  
Zustandsänderungen der Gase, 180, 188–191,  
194, 218  
Zustandsdiagramm, 237  
Zustandsgleichungen der Gase, 180, 226  
Zustandsgröße, 172, 185  
Zwangskraft, 61, 81  
Zweistoffsystem, 238  
Zweiweggleichrichtung, 346  
Zwillingsparadoxon, 79  
Zyklotron, 317, 598