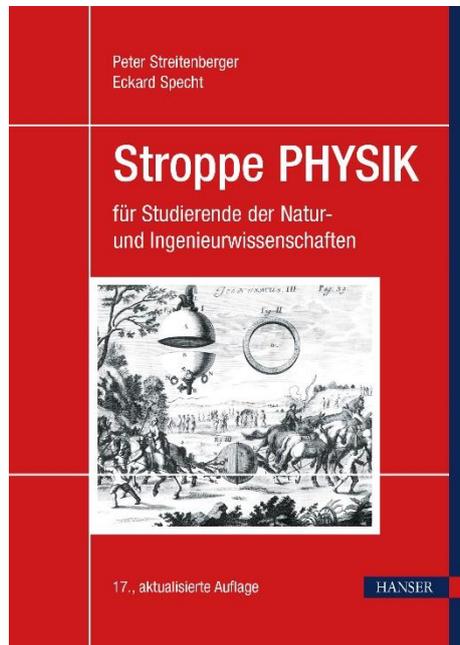


# HANSER



## Leseprobe

zu

## PHYSIK

von Heribert Stroppe, Peter Streitenberger und Eckard Specht

Print-ISBN: 978-3-446-47679-0  
E-Book-ISBN: 978-3-446-47829-9

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446476790>

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 Studienanfängerinnen und 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 Erfolgs-

erlebnis und „Leistungsglück“ einstellen und Ansporn für ein weiteres erfolgreiches Studium sein.

Trotz vieler Hinweise wurde mit der Erweiterung der Stoffinhalte bewusst zurückhaltend umgegangen. Dies gilt auch für die vorliegende 17. Auflage. Auch wenn die vorgenommenen Änderungen und Ergänzungen nicht so umfangreich ausgefallen sind wie bei der 16. Auflage, so sind auch diesmal wichtige Gebiete betroffen. Die Revision des Internationalen Einheitensystems (SI) ist abgeschlossen, was eine Aktualisierung der Darstellung an vielen Stellen erforderlich machte. Inhaltliche Ergänzungen betreffen beispielsweise auch die Abschnitte über die spezielle Relativitätstheorie, wo durch einfache Herleitungen von wichtigen Schlussfolgerungen ein besseres Verständnis angestrebt wird.

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 der Bilder und Herrn DR. M. SPECHT (Berlin) für deren digitale Bearbeitung zu Dank verpflichtet.

Dem Verlag sei für die seit Erscheinen des Buches stets gute Zusammenarbeit gedankt, insbesondere seiner Lektorin Frau Natalia Silakova.

Magdeburg, im Juli 2023

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

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

## II Teilchen

Mechanik der Punktmasse und des starren Körpers. Stoffe

- 3 Kinematik der Punktmasse ..... 28
  - 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
- 4 Dynamik der Punktmasse ..... 49
  - 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 .....	80
<b>7</b>	<b>Arbeit und Energie .....</b>	<b>82</b>
7.1	Arbeit .....	82
7.2	Leistung. Wirkung .....	86
7.3	Der Energiebegriff. Potenzielle und kinetische Energie .....	87
7.4	Das Gesetz von der Erhaltung der Energie (Energiesatz) .....	88
7.5	Äquivalenz von Masse und Energie .....	90
<b>8</b>	<b>Gravitation .....</b>	<b>93</b>
8.1	Die KEPLERSchen Gesetze der Planetenbewegung und das Gravitationsgesetz .....	93
8.2	Arbeit gegen die Schwerkraft. Kosmische Geschwindigkeiten .....	96
<b>9</b>	<b>Dynamik der Punktmassen-Systeme .....</b>	<b>98</b>
9.1	Impulserhaltungssatz. Massenmittelpunkt .....	98
9.2	Die Gesetze des Stoßes .....	100
9.3	Raketenantrieb .....	105
<b>10</b>	<b>Statik des starren Körpers .....</b>	<b>107</b>
10.1	Freiheitsgrade des starren Körpers .....	107
10.2	Kräfte am starren Körper. Drehmoment. Gleichgewichtsbedingungen .....	107
10.3	Kräftepaar .....	112
10.4	Der Schwerpunkt .....	112
10.5	Arten des Gleichgewichts .....	115
<b>11</b>	<b>Dynamik des starren Körpers .....</b>	<b>116</b>
11.1	Bewegung eines frei beweglichen Körpers bei Einwirkung einer Kraft .....	116
11.2	Kinetische Energie der Drehbewegung. Massenträgheitsmoment .....	116
11.3	Arbeit und Leistung bei der Drehbewegung. Grundgesetz der Dynamik .....	119
11.4	Der Drehimpuls (Drall). Drehimpulserhaltungssatz .....	121
11.5	Kreiselbewegungen. Freie Achsen .....	123
11.6	Bewegung des symmetrischen Kreisels .....	125

<b>12</b>	<b>Die Zustandsformen der Stoffe</b> .....	<b>128</b>
12.1	Einteilung der Stoffe. Aggregatzustände .....	128
12.2	Der kristalline Aufbau der Festkörper .....	129
12.3	Bindungsarten .....	132

### III Kontinua

Mechanik der deformierbaren Medien

<b>13</b>	<b>Der deformierbare feste Körper</b> .....	<b>134</b>
13.1	Elastische Verformung. HOOKEsches Gesetz .....	134
13.2	Querkontraktion. Kompressibilität .....	136
13.3	Elastisches Verhalten bei Scherbeanspruchung .....	137
13.4	Der einachsige Spannungszustand .....	138
13.5	Dreiachsiger Spannungs- und Dehnungszustand .....	139
13.6	Zusammenhang zwischen Schubmodul, Elastizitätsmodul und POISSONscher Querkontraktionszahl .....	140
13.7	Plastische Verformung. Spannungs-Dehnungs-Diagramm .....	141
13.8	Härte fester Körper .....	143

<b>14</b>	<b>Ruhende Flüssigkeiten und Gase</b> .....	<b>144</b>
14.1	Druck in Flüssigkeiten (hydrostatischer Druck) .....	144
14.2	Schweredruck. Auftrieb. Schwimmstabilität .....	145
14.3	Druck in Gasen. Zusammenhang zwischen Druck, Volumen und Dichte ...	149
14.4	Schweredruck in Gasen. Barometrische Höhenformel .....	150
14.5	Erscheinungen an Grenzflächen. Kohäsion und Adhäsion .....	152
14.6	Spezifische Oberflächenenergie, Oberflächenspannung .....	152
14.7	Benetzung und Kapillarwirkung .....	154

<b>15</b>	<b>Strömende Flüssigkeiten und Gase (Strömungsmechanik)</b> ....	<b>156</b>
15.1	Das Strömungsfeld. Kennzeichnung und Einteilung von Strömungen .....	156
15.2	Strömungen idealer Flüssigkeiten und Gase. Kontinuitätsgleichung .....	158
15.3	Die BERNOULLISCHE Gleichung. Druckmessung .....	160
15.4	Strömungen realer Flüssigkeiten und Gase. Laminare Strömung .....	164
15.5	Gesetze von HAGEN-POISEUILLE und STOKES .....	165
15.6	Umströmung durch reale Flüssigkeiten und Gase. REYNOLDS-Zahl .....	167
15.7	Die Bewegungsgleichung eines Fluids .....	169

### IV Wärme

Thermodynamik und Gaskinetik

<b>16</b>	<b>Verhalten der Körper bei Temperaturänderung</b> .....	<b>174</b>
16.1	Die Temperatur und ihre Messung .....	174
16.2	Thermische Ausdehnung fester und flüssiger Körper .....	176

16.3	Durch Änderung der Temperatur bewirkte Zustandsänderungen der Gase. Der absolute Nullpunkt .....	178
16.4	Die thermische Zustandsgleichung des idealen Gases .....	181
<b>17</b>	<b>Der I. Hauptsatz der Thermodynamik (Energiesatz) .....</b>	<b>184</b>
17.1	Wärmemenge und Wärmekapazität .....	184
17.2	Innere Energie eines Systems. Formulierung des I. Hauptsatzes .....	186
17.3	Spezifische Wärmekapazität des idealen Gases. Kalorische Zustandsgleichung .....	188
17.4	Anwendung des I. Hauptsatzes auf spezielle Zustandsänderungen des idealen Gases .....	190
17.5	Zustandsänderungen des idealen Gases in offenen Systemen. Technische Arbeit. Enthalpie .....	195
<b>18</b>	<b>Kinetische Gastheorie .....</b>	<b>197</b>
18.1	Die Masse der Atome und Moleküle .....	197
18.2	Druck und mittlere quadratische Geschwindigkeit der Gasmoleküle. Grundgleichung der kinetischen Gastheorie .....	198
18.3	Die Geschwindigkeitsverteilung der Gasmoleküle .....	201
18.4	Molekularenergie und Temperatur. Wärmekapazität der Körper .....	204
18.5	Stoßzahl und mittlere freie Weglänge .....	207
18.6	Gemische idealer Gase. Gesetz von DALTON .....	208
<b>19</b>	<b>Der II. Hauptsatz der Thermodynamik (Entropiesatz) .....</b>	<b>210</b>
19.1	Der CARNOT-Kreisprozess. Wärmekraftmaschine, Kältemaschine und Wärmepumpe .....	210
19.2	Thermodynamische Temperatur .....	214
19.3	Reversible und irreversible Vorgänge. II. Hauptsatz .....	215
19.4	Entropie .....	217
19.5	Entropieänderung des idealen Gases. Irreversible Prozesse .....	222
19.6	Entropie und Wahrscheinlichkeit .....	224
19.7	III. Hauptsatz (Satz von der Unerreichbarkeit des absoluten Nullpunkts) ...	227
<b>20</b>	<b>Reale Gase. Phasenumwandlungen .....</b>	<b>228</b>
20.1	Die VAN-DER-WAALSsche Zustandsgleichung. Gasverflüssigung .....	228
20.2	JOULE-THOMSON-Effekt. Erzeugung tiefer Temperaturen .....	231
20.3	Gleichgewicht zwischen flüssiger und gasförmiger Phase. Sieden und Verdunsten .....	233
20.4	Gleichgewicht zwischen fester und flüssiger Phase. Koexistenz dreier Phasen .....	238
20.5	Lösungen. Siedepunktserhöhung, Gefrierpunktserniedrigung .....	241
<b>21</b>	<b>Ausgleichsvorgänge .....</b>	<b>243</b>
21.1	Wärmeleitung .....	243
21.2	Wärmeübergang, Wärmedurchgang, Konvektion .....	246
21.3	Diffusion .....	248

## V Felder

Gravitation. Elektrizität und Magnetismus

<b>22</b>	<b>Das Gravitationsfeld</b> .....	<b>252</b>
22.1	Nahwirkungstheorie. Der Feldbegriff .....	252
22.2	Gravitationsfeldstärke, Gravitationspotenzial .....	254
22.3	Massen als Senken des Gravitationsfeldes .....	257
22.4	Grundaussagen der allgemeinen Relativitätstheorie .....	259
<b>23</b>	<b>Das elektrostatische Feld</b> .....	<b>261</b>
23.1	Die elektrische Ladung. Ladungsnachweis .....	261
23.2	Ladungen als Quellen bzw. Senken des elektrischen Feldes .....	263
23.3	Kraftwirkungen des elektrischen Feldes. Elektrische Feldstärke .....	264
23.4	Elektrostatisches Potenzial. Spannung .....	267
23.5	Elektrische Ladungen auf Leitern. Influenz .....	269
23.6	Elektrischer Fluss, Flussdichte .....	270
23.7	Das elektrische Zentralfeld (Punktladung und Punktladungssystem) .....	272
23.8	Kapazität. Kondensatoren .....	274
<b>24</b>	<b>Das elektrische Feld in Isolatoren (Dielektrika)</b> .....	<b>277</b>
24.1	Elektrische Polarisation der Dielektrika. Piezoelektrizität .....	277
24.2	Permittivität (Dielektrizitätskonstante), elektrische Suszeptibilität .....	278
24.3	Verhalten von $D$ und $E$ an der Grenzfläche zweier Medien .....	280
24.4	Energieinhalt des elektrischen Feldes .....	282
<b>25</b>	<b>Der Gleichstromkreis</b> .....	<b>284</b>
25.1	Das stationäre elektrische Feld in einem Leiter .....	284
25.2	Stromstärke, Spannung, Widerstand. OHMSches Gesetz .....	284
25.3	Schaltungen und Messmethoden .....	287
25.4	Arbeit und Leistung elektrischer Gleichströme .....	293
<b>26</b>	<b>Elektrische Leitungsvorgänge in Festkörpern und Flüssigkeiten</b> .....	<b>294</b>
26.1	Klassische Theorie der freien Elektronen in Metallen .....	294
26.2	Thermoelektrische Effekte .....	296
26.3	Elektrokinetische Effekte .....	298
26.4	Elektrolytische Stromleitung. FARADAYSche Gesetze .....	298
26.5	Elektrochemische Spannungsquellen .....	300
<b>27</b>	<b>Elektrische Leitungsvorgänge im Vakuum und in Gasen</b> .....	<b>302</b>
27.1	Bewegung freier Ladungsträger im elektrischen Feld .....	302
27.2	Ladungsträgerinjektion, Katodenstrahlen .....	304
27.3	Gasentladungen .....	305
27.4	Plasmaströme .....	308

<b>28</b>	<b>Das magnetostatische Feld der Dipole und Gleichströme</b> . . . . .	<b>309</b>
28.1	Analogien und Unterschiede zum elektrostatischen Feld . . . . .	309
28.2	Kraftwirkungen des magnetischen Feldes auf magnetische Dipole. Magnetische Feldstärke . . . . .	310
28.3	Das Magnetfeld eines geraden Stromleiters. Durchflutungsgesetz . . . . .	311
28.4	Einfache Feldberechnungen . . . . .	313
28.5	Magnetische Flussdichte (Induktion) . . . . .	315
28.6	Kraftwirkungen des magnetischen Feldes auf Stromleiter . . . . .	316
28.7	Bewegung freier Ladungsträger im magnetischen Feld. LORENTZ-Kraft . . . . .	318
28.8	Galvano- und thermomagnetische Effekte. HALL-Effekt. Quanten-HALL-Effekt . . . . .	320
<b>29</b>	<b>Das magnetische Feld in Stoffen</b> . . . . .	<b>322</b>
29.1	Magnetische Polarisation der Stoffe . . . . .	322
29.2	Magnetisierung der Ferromagnetika. Hysterese . . . . .	323
29.3	Der magnetische Kreis. Entmagnetisierung . . . . .	325
<b>30</b>	<b>Elektromagnetische Induktion</b> . . . . .	<b>328</b>
30.1	Das FARADAYSche Induktionsgesetz . . . . .	328
30.2	Selbstinduktion . . . . .	330
30.3	Energieinhalt des magnetischen Feldes . . . . .	332
30.4	Elektromagnetische Induktion in einem bewegten Leiter . . . . .	333
<b>31</b>	<b>Der Wechselstromkreis</b> . . . . .	<b>335</b>
31.1	Wechselspannung, Wechselstrom, Dreiphasenstrom . . . . .	335
31.2	Arbeit und Leistung elektrischer Wechselströme . . . . .	337
31.3	Wechselstromwiderstände. OHMSches Gesetz für Wechselstrom . . . . .	339
31.4	Der Transformator . . . . .	345
31.5	Anharmonische Wechselströme in der Elektronik . . . . .	346
31.6	Gleichrichter und Verstärker. Elektronische Bauelemente . . . . .	347
<b>32</b>	<b>Die MAXWELLSchen Gleichungen</b> . . . . .	<b>351</b>
32.1	Wirbel des magnetischen Feldes. Verschiebungsstrom . . . . .	351
32.2	Wirbel des elektrischen Feldes. Wirbelströme . . . . .	352
32.3	Elektromagnetisches Feld. System der MAXWELLSchen Gleichungen . . . . .	354
32.4	Relativistische Elektrodynamik . . . . .	355
<b>VI</b>	<b>Wellen</b>	
	Mechanische und elektromagnetische Schwingungen und Wellen	
<b>33</b>	<b>Mechanische Schwingungen</b> . . . . .	<b>358</b>
33.1	Lineare Federschwingungen . . . . .	358
33.2	Energiebilanz des harmonischen Oszillators . . . . .	361
33.3	Drehschwingungen . . . . .	362
33.4	Pendelschwingungen . . . . .	364

33.5	Freie gedämpfte Schwingungen .....	366
33.6	Erzwungene Schwingungen .....	369
<b>34</b>	<b>Elektrische Schwingungen .....</b>	<b>373</b>
34.1	Der geschlossene Schwingkreis .....	373
34.2	Strom- und Spannungsresonanz .....	375
34.3	Erzeugung ungedämpfter elektrischer Schwingungen .....	378
<b>35</b>	<b>Überlagerung harmonischer Schwingungen .....</b>	<b>380</b>
35.1	Überlagerung zweier Schwingungen längs gleicher Richtung .....	380
35.2	Gekoppelte Schwingungen .....	382
35.3	Überlagerung zweier Schwingungen längs aufeinander senkrechter Richtungen .....	385
35.4	Überlagerung von harmonischen zu anharmonischen Schwingungen .....	388
35.5	Nichtlineare Schwingungen. Deterministisches Chaos .....	390
<b>36</b>	<b>Allgemeine Wellenlehre .....</b>	<b>394</b>
36.1	Zusammenhang von Schwingungen und Wellen .....	394
36.2	Die eindimensionale Wellengleichung und ihre allgemeine Lösung .....	397
36.3	Transversal- und Longitudinalwellen .....	398
36.4	Stehende Wellen. Eigenschwingungen .....	401
36.5	Wellenausbreitung in ausgedehnten Medien .....	404
<b>37</b>	<b>Schallwellen (Akustik) .....</b>	<b>407</b>
37.1	Wellenausbreitung im Schallfeld. Phasengeschwindigkeit .....	407
37.2	Schallfeldgrößen .....	409
37.3	Schallquellen. Ton, Klang, Geräusch .....	411
37.4	Schallempfänger und Gehör. Schallpegel und Lautstärke .....	412
37.5	Stehende Schallwellen .....	414
37.6	DOPPLER-Effekt .....	416
37.7	MACHScher Kegel .....	418
<b>38</b>	<b>Elektromagnetische Wellen .....</b>	<b>419</b>
38.1	Ausbreitung elektromagnetischer Wellen entlang von Leitungen .....	419
38.2	Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im freien Raum .....	421
38.3	Erzeugung und Nachweis elektromagnetischer Wellen .....	425
38.4	Die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen (H. HERTZ, 1888) .....	427
38.5	Das elektromagnetische Spektrum .....	428
<b>39</b>	<b>Einfluss von Stoffen auf die Wellenausbreitung .....</b>	<b>431</b>
39.1	Absorption und Streuung .....	431
39.2	Phasengeschwindigkeit und Dispersion. Gruppengeschwindigkeit .....	432
39.3	HUYGENSSches Prinzip .....	436
39.4	Reflexion und Brechung (Refraktion). Totalreflexion .....	437
39.5	Optische Dispersion. Prisma, Spektral- und Körperfarben .....	440

<b>40</b>	<b>Strahlenoptik (Geometrische Optik)</b> .....	<b>443</b>
40.1	Lichtstrahlen. FERMATSches Prinzip .....	443
40.2	Reflexion und Brechung von Lichtstrahlen .....	445
40.3	Abbildung durch Spiegel (ebener und gekrümmte Spiegel) .....	447
40.4	Abbildung durch Linsen (dünne und dicke Linsen, Linsensysteme) .....	452
40.5	Das Auge und der Sehvorgang .....	458
40.6	Optische Geräte zur Sehwinkelvergrößerung (Lupe, Mikroskop, Fernrohr) ..	458
40.7	Abbildungsfehler .....	461
<b>41</b>	<b>Wellenoptik</b> .....	<b>462</b>
41.1	Interferenz. Interferenzbedingungen .....	462
41.2	Interferenzen gleicher Neigung und gleicher Dicke .....	464
41.3	Beugung (Diffraction). Das Beugungsphänomen .....	466
41.4	FRAUNHOFERSche Beugung am Spalt und an der Lochblende .....	468
41.5	Auflösungsvermögen optischer Geräte. Holografie .....	471
41.6	FRAUNHOFERSche Beugung am Strichgitter .....	474
41.7	Spektrometer .....	476
41.8	Beugung von RÖNTGENstrahlen am Raumgitter der Kristalle .....	477
41.9	Polarisation. Polarisation des Lichts durch Reflexion und Brechung .....	481
41.10	Polarisation durch Doppelbrechung .....	484
41.11	Interferenz des polarisierten Lichts .....	486
41.12	Drehung der Schwingungsebene des polarisierten Lichts .....	489
41.13	Nichtlineare Optik .....	491
<b>VII</b>	<b>Quanten</b>	
	Struktur und Eigenschaften der Materie	
<b>42</b>	<b>Die Gesetze der Strahlung</b> .....	<b>494</b>
42.1	Das Wesen der Temperaturstrahlung (Wärmestrahlung) .....	494
42.2	Strahlungsphysikalische Größen .....	495
42.3	Emission und Absorption von Strahlung. KIRCHHOFFSches Strahlungsgesetz .....	497
42.4	Das PLANCKSche Strahlungsgesetz .....	499
42.5	Folgerungen aus dem PLANCKSchen Strahlungsgesetz .....	500
42.6	Lichttechnische Größen (Photometrie) .....	503
42.7	Zusammenhang zwischen strahlungsphysikalischen und lichttechnischen Größen .....	506
<b>43</b>	<b>Der Welle-Teilchen-Dualismus der Mikroobjekte</b> .....	<b>507</b>
43.1	Die Teilchennatur des Lichts. Lichtquanten (Photonen) .....	507
43.2	Der lichtelektrische Effekt (Photoeffekt) .....	508
43.3	Der COMPTON-Effekt .....	511
43.4	Rückstoß durch Quantenemission. MÖSSBAUER-Effekt .....	512
43.5	Die Wellennatur der Teilchen .....	513
43.6	Das HEISENBERGSche Unbestimmtheitsprinzip (Unschärferelation) .....	517

<b>44</b>	<b>Atombau und Spektren</b> .....	<b>520</b>
44.1	Die Streuexperimente von LENARD und RUTHERFORD. Das RUTHERFORDSche Atommodell .....	520
44.2	Das Spektrum des Wasserstoffatoms .....	522
44.3	Das BOHRsche Atommodell .....	524
44.4	Die Spektren der Alkaliatome. Bahndrehimpulsquantenzahl .....	528
44.5	Richtungsquantelung des Bahndrehimpulses der Elektronen .....	531
44.6	Das magnetische Bahnmoment der Elektronen. BOHRsches Magneton .....	532
44.7	Elektronenspin und magnetisches Spinnmoment. Die Feinstruktur der Atomspektren .....	533
44.8	Mehrelektronensysteme .....	535
44.9	Aufspaltung der Spektrallinien im Magnetfeld (ZEEMAN-Effekt) .....	536
44.10	Das PAULI-Prinzip und das Periodensystem der Elemente .....	538
44.11	Die RÖNTGENspektren und ihre Deutung .....	542
44.12	Absorption und Streuung von RÖNTGENstrahlen .....	544
44.13	Induzierte Emission. Maser und Laser .....	548
<b>45</b>	<b>Wellenmechanik</b> .....	<b>551</b>
45.1	Die SCHRÖDINGER-Gleichung .....	551
45.2	Elektron im Kastenpotenzial .....	553
45.3	Das wellenmechanische Bild des Atoms .....	555
45.4	Der Tunneleffekt .....	557
<b>46</b>	<b>Elektrische und magnetische Eigenschaften von Festkörpern</b>	<b>559</b>
46.1	Elektrische Leitfähigkeit. Das Modell des Elektronengases .....	559
46.2	Bändermodell des Festkörpers. Metalle, Halbleiter, Isolatoren .....	560
46.3	Elektrische Ströme in Halbleitern. Eigenleitung, Störstellenleitung .....	564
46.4	Der pn-Übergang .....	567
46.5	Halbleiterdiode, Transistor .....	569
46.6	Magnetische Eigenschaften. Dia- und Paramagnetismus .....	571
46.7	Ferromagnetismus, Antiferro- und Ferrimagnetismus .....	573
46.8	Supraleitung. Der JOSEPHSON-Effekt .....	576
46.9	Supraflüssigkeit .....	579
<b>47</b>	<b>Atomkerne</b> .....	<b>580</b>
47.1	Masse, Ladung und Zusammensetzung der Kerne .....	580
47.2	Isotope .....	581
47.3	Isobare, Isotone, Nuklide, Isomere .....	582
47.4	Massendefekt und Bindungsenergie der Kerne .....	582
47.5	Stabilitätskriterien. Kernsystematik .....	584
47.6	Kernkräfte .....	587
47.7	Kernmodelle .....	588

<b>48</b>	<b>Die natürliche Radioaktivität</b> .....	<b>590</b>
48.1	Der $\alpha$ -Zerfall der schweren Kerne .....	590
48.2	Der $\beta$ -Zerfall. Gammastrahlung .....	591
48.3	Das Zerfallsgesetz. Spezifische Aktivität .....	593
48.4	Radioaktive Zerfallsreihen und radioaktives Gleichgewicht .....	595
48.5	Dosimetrie und biologische Wirkung ionisierender Strahlung .....	596
<b>49</b>	<b>Künstliche Kernumwandlungen</b> .....	<b>599</b>
49.1	Arten künstlicher Kernumwandlungen .....	599
49.2	Massen- und Energiebilanz von Kernreaktionen. Wirkungsquerschnitt .....	600
49.3	Kernspaltung. Gewinnung von Kernspaltungsenergie .....	601
49.4	Arten von Kernreaktoren .....	604
49.5	Kernfusion .....	605
<b>50</b>	<b>Elementarteilchen</b> .....	<b>607</b>
50.1	Entwicklung zum Teilchen-„Zoo“ .....	607
50.2	Erhaltungssätze für Baryonenladung, Leptonenladung, Isospin, Strangeness und Hyperladung .....	608
50.3	Die elementaren Teilchen: Leptonen und Quarks .....	610
50.4	Zusammengesetzte Elementarteilchen. Hadronen .....	612
50.5	Die elementaren Kräfte (Wechselwirkungen). Feldquanten .....	613
50.6	Standardmodell der Teilchenphysik. Vereinheitlichte Theorie der elementaren Kräfte .....	615
50.7	Kosmologie. Dunkle Materie und Dunkle Energie .....	616
<b>A</b>	<b>ANHANG: Fehlerrechnung (Messabweichungen)</b> .....	<b>618</b>
A.1	Arten und Ursachen von Messabweichungen .....	618
A.2	Ermittlung von Messergebnis und Messabweichung .....	619
A.3	Zufallsstreuung von Messwerten .....	621
A.4	Fehlerfortpflanzung .....	625
A.5	Geradenausgleich (lineare Regression). Korrelation .....	627
	Bildquellenverzeichnis .....	630
	Lösungen der Aufgaben .....	631
<b>Index</b>	.....	<b>637</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 (°C) angegeben werden. CELSIUS-Temperatur ist gleich KELVIN-Temperatur minus 273,15K.

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	Vorsatz	Vorsatzzeichen	Faktor
Quetta	Q	$10^{30}$	Mega	M	$10^6$	Nano	n	$10^{-9}$
Ronna	R	$10^{27}$	Kilo	k	$10^3$	Piko	p	$10^{-12}$
Yotta	Y	$10^{24}$	Hekto <sup>1</sup>	h	$10^2$	Femto	f	$10^{-15}$
Zetta	Z	$10^{21}$	Deka <sup>1</sup>	da	10	Atto	a	$10^{-18}$
Exa	E	$10^{18}$	Dezi <sup>1</sup>	d	$10^{-1}$	Zepto	z	$10^{-21}$
Peta	P	$10^{15}$	Zenti <sup>1</sup>	c	$10^{-2}$	Yokto	y	$10^{-24}$
Tera	T	$10^{12}$	Milli	m	$10^{-3}$	Ronto	r	$10^{-27}$
Giga	G	$10^9$	Mikro	$\mu$	$10^{-6}$	Quekto	q	$10^{-30}$

<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). □

**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 SI-Einheitensystem

Im SI 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 seit 2019 auch für die Einheiten Kilogramm, Ampere, Kelvin und Mol. 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 seit Mai 2019 gültig ist.

**Die sieben definierenden Konstanten.** Das 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)  
 $c = 299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$
- **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 definierenden Konstanten sollen eine relative Messunsicherheit von mindestens  $10^{-8}$  haben, weshalb die Gravitationskonstante  $\gamma$  (s. 8.1), die nur mit rund  $10^{-4}$  bekannt ist, nicht unter ihnen ist. Dies unterscheidet u. a. das 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 Basisheiten.** Jede Basiseinheit kann durch eine Kombination aus Einheiten der oben aufgeführten definierenden Konstanten dargestellt werden. Für das **K i l o g r a m m** 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>	$1 \text{ A} = (e/1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}) \text{ s}^{-1} = 6,789\,687 \cdot 10^8 f_{\text{Cs}} e$
<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>	$1 \text{ cd} = (K_{\text{cd}}/683) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1} = 2,614\,830 \cdot 10^{10} f_{\text{Cs}}^2 h K_{\text{cd}}$

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

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).

## Teil II

# Teilchen

## Mechanik der Punktmasse und des starren Körpers. Stoffe

Bei der Beschreibung von Bewegungsvorgängen ist es oft zulässig, von den Abmessungen und der Gestalt der beteiligten Körper sowie den Bewegungen ihrer einzelnen Teile gegeneinander (*innere* Bewegungen) abzusehen und die Körper als unveränderliche stoffliche **Teilchen** von konstanter Menge Substanz und gegebenenfalls konstanter elektrischer Ladung zu idealisieren. Das Teilchen dient so als *Denkmodell* für Körper sowohl in der Mikro- als auch in der Makrophysik, indem einerseits z. B. Elektronen, Atomkerne und die Moleküle eines Gases, andererseits aber auch die Planeten, deren Abmessungen klein sind im Verhältnis zu den Räumen, in denen sie sich bewegen, als Teilchen idealisiert werden können.

Für die mathematische Behandlung ist es zweckmäßig, wenn man sich die gesamte stoffliche Substanz sowie die daran gebundene elektrische Ladung des Teilchens in einem Punkt konzentriert denkt, so dass seine Lage durch die drei Koordinaten des Raumes angegeben werden kann. Man spricht dann von einer **Punktmasse** bzw. **Punktladung**. Diese kann keine Drehungen, sondern nur fortschreitende Bewegungen ausführen.

Makroskopische Körper lassen sich durch ein *System von Punktmassen* bzw. *Punktladungen* darstellen, so z. B. die Gase durch die Gesamtheit der Gasmoleküle oder die festen kristallinen **Stoffe** durch die Atome bzw. Ionen des Kristallgitters. Der **starre Körper** kann modellmäßig als ein System starr gekoppelter Punktmassen aufgefasst werden.

# 3

## Kinematik der Punktmasse

Die *Kinematik* ist die *Lehre von den Bewegungen* der Körper, in der die Ursachen der Bewegungen (die beteiligten Kräfte) sowie die durch sie hervorgerufenen Wirkungen auf andere Körper außer Acht bleiben.

### ■ 3.1 Raum, Zeit, Bezugssystem

Jeder physikalische Vorgang läuft *in Raum und Zeit* ab. Das ist daraus zu ersehen, dass in allen Bereichen der Physik jedes Gesetz – offen oder verdeckt (explizit oder implizit) – Raum-Zeit-Beziehungen in Form von Längen und Zeitintervallen enthält.

Zur **Längenmessung** dienen Geräte, mit denen sich zwei Abstandsmarken reproduzierbar einstellen lassen, durch deren Entfernung die *Längeneinheit* festgelegt werden kann. Die zu vermessende Strecke wird dann mit der Längeneinheit verglichen und in Vielfachen oder Teilen derselben ausgedrückt.

Die Längeneinheit ist das **Meter (m)**. Die Meter-Definition basiert (seit 1983) auf einem festgelegten Wert der **Lichtgeschwindigkeit im Vakuum** von 299 792 458 m/s. Sie wurde möglich durch die absolute Messung der Frequenz von Laserstrahlung im sichtbaren Spektralbereich. Da Frequenz  $f$  und Wellenlänge  $\lambda$  der Strahlung mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$  durch die Beziehung  $c = f\lambda$  verknüpft sind (vgl. 36.1), kann die hohe Genauigkeit von Frequenzmessungen zur Darstellung der Längeneinheit genutzt werden. Aus dem oben angegebenen Wert für die Lichtgeschwindigkeit folgt als *Meter-Definition*:

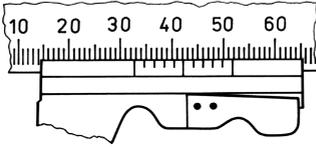
**Das Meter ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Dauer von 1/299 792 458 Sekunde durchläuft.**

Für die praktische Handhabung wird die so definierte Längeneinheit auf körperliche Vergleichsmaßstäbe übertragen, die Abstandsmarken tragen (für eine bestimmte Temperatur und weitere genau festgelegte Umgebungsbedingungen). Die Genauigkeit solcher Vergleichsmaßstäbe beträgt einige  $10^{-7}$ , d. h., bezogen auf die Länge von 1 m beträgt der prinzipiell nicht unterschreitbare Fehler in der Längenangabe einige  $10^{-7}$  m.

Eine außerordentlich hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit besitzen Verfahren zur Längenbestimmung, bei denen als maßverkörperndes Normal die Wellenlänge des Lichts zu Grunde gelegt wird (*optische Interferenzlängenmessung*). Diese Methode besteht vom Prinzip her im Auszählen von Wellenlängen des zur Messung verwendeten Lichts. Auf diese Weise lässt sich das Meter auf Bruchteile der Lichtwellenlänge ( $\approx 10^{-8}$  m) genau vermessen. Bezogen auf die Entfernung Erde–Mond entspricht dies einer Messungengenauigkeit von nur wenigen Metern!

Mit Hilfe von *Endmaßen* lassen sich Längen zwischen etwa 0,1 mm und allgemein 0,25 m mit einer Genauigkeit von einigen Zehntel Mikrometer vermessen. Die häufig anzutreffende *Messschraube* („Mikrometerschraube“) gestattet die Messung von Längen zwischen 0,01 mm und meist 25 mm auf

etwa  $5\ \mu\text{m}$  genau. Mit Hilfe von *Messuhren* mit Taster kann eine Genauigkeit von etwa  $1\ \mu\text{m}$  erreicht werden. Beim *Messschieber* erfolgt die Ablesung der Länge auf dem Maßstab mittels *Nonius* (Bild 3.1).



**Bild 3.1** Nonius an einer geraden Skala. Ablesung: 32,7. Die Dezimalstelle 7 ergibt sich daraus, dass der 7. Teilstrich der kurzen (unteren) Hilfsskala, des Nonius, genau mit einem Teilstrich der (oberen) Hauptskala zusammenfällt.

Die **Zeitmessung** erfolgt mit Hilfe von *Uhren*. Es handelt sich dabei um Messgeräte, deren Rolle jedes beliebige System erfüllen kann, welches einen zeitlich streng periodischen Vorgang ausführt und mit dessen Hilfe ein Zeitintervall reproduzierbar dargestellt werden kann. Die *Zeiteinheit* ist die **Sekunde (s)**. Ihre Definition (1967) geht auf Vorgänge im Atom zurück:

**1 Sekunde ist die Dauer von 9 192 631 770 Schwingungsperioden einer charakteristischen Strahlung des Atoms Caesium 133.**

Das Funktionsprinzip einer *Atomuhr* beruht auf der Wechselwirkung von Strahlungsübergängen im Atom mit elektromagnetischen Hochfrequenzfeldern, die von einem Hilfsgenerator erzeugt werden, unter Ausnutzung der *Resonanz*. Der **Caesium-Frequenz-Standard** entspricht der Frequenz  $f_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$  des Hyperfeinstrukturübergangs des Grundzustandes des  $^{133}\text{Cs}$ -Atoms (s. 44.7) und hat eine Genauigkeit von  $10^{-14}$ , das entspricht einer Abweichung von 1 s in  $\approx 3$  Millionen Jahren.

Durch geeignete Mittelung der Anzeigen mehrerer Atomuhren wird nach internationaler Übereinkunft für die physikalische Zeitmessung die *internationale Atomzeit* (IAT) festgelegt (SI-Sekunden-Definition). Aus astronomischen Ereignissen folgt eine *Weltzeit* UT (universal time), die aus der Erdrotation abgeleitet wird und für astronomische Beobachtungen sowie für die Navigation nach Himmelskörpern maßgebend ist. Die Atomzeit hat langfristig gegen die Weltzeit eine Abweichung, die bei Erreichen einer Sekunde durch Einschieben oder Auslassen einer „Schaltsekunde“ ausgeglichen wird.

**Relativität der Bewegungen.** Jede Bewegung ist eine im Zeitablauf erfolgende Ortsveränderung eines Körpers *relativ zu anderen, willkürlich als ruhend angenommenen Körpern* der Umgebung, die das **Bezugssystem** bilden. Meist wird stillschweigend angenommen, dass der Beobachter stillsteht, das Bezugssystem also ruht. Registriert der Beobachter, dass sich in seiner Umgebung ein Körper bewegt, so kann er ohne Orientierung an anderen Körpern der Umgebung (d. h. ohne Zuhilfenahme eines Bezugssystems) nicht entscheiden, ob er sich selbst bewegt oder der Körper. Man denke hierbei nur an die bekannte Täuschung, der man immer wieder unterliegt, wenn man aus einem stillstehenden Eisenbahnabteil heraus auf einen anfahrenen Zug blickt. Wenn man sich nicht z. B. am Bahnsteig orientiert, hat man den Eindruck, der eigene Zug setze sich in Bewegung. Fahren beide Züge gleich schnell nebeneinander her, so sieht es für den Mitfahrenden aus, als stünden beide Züge still. Wir erkennen daraus:

**Wie jede Bewegung ist auch der Zustand der Ruhe relativ.**

Da zur vollständigen Bestimmung der Lage eines Körpers relativ zu den Körpern der Umgebung (dem Bezugssystem) im Allgemeinen die Angabe von drei Längen nötig ist, wird mit dem Bezugssystem ein *dreidimensionales Koordinatensystem* verknüpft. Meist wählt man ein kartesisches System, in welchem die drei Koordinatenachsen aufeinander senkrecht stehen. Die

# Index

- Abbildungsfehler, 461, 471, 517  
Abbildungsgleichung  
– für sphärische Linsen, 455  
– für sphärische Spiegel, 450  
Abbildungsmaßstab, 450, 455  
Aberration, 461  
abgeschlossenes System, 89, 98, 100, 186, 220  
absolute Temperatur, 175, 181, 214  
absoluter Nullpunkt, 175, 179, 227  
Absorption, 431, 545  
– von elektromagnetischen Wellen, 431  
– von Schallwellen, 431  
Absorptionsgrad, 431, 437, 497  
Absorptionskoeffizient, 431  
Absorptionsquerschnitt, 601  
Additionstheorem der Geschwindigkeiten, 40  
– , relativistisches, 79  
Adhäsion, 152  
Adiabatexponent, 192, 205, 408  
Aggregatzustand, 128, 234, 239, 308  
Akkommodation, 458  
Aktivierungsenergie, 250  
Aktivität, 594, 595  
Akzeptor, 565  
Alkalimetalle, 536  
Alpha-Zerfall, 590  
Altersbestimmung, 595  
Ampere, 300, 317, 578  
Amplitude, 359, 395  
Analysator, 482, 483  
Anfangsbedingungen, 38, 58, 360  
angeregter Zustand, 523  
anharmonische Schwingung, 362, 364, 365, 388,  
390, 391, 412  
Annihilation, 608  
Anomalie des Wassers, 178, 238  
Antenne, 426  
Antifarbe, 612, 614  
Antiferromagnetismus, 574  
Antimaterie, 608  
aperiodischer Grenzfall, 368  
Äquipotenzialfläche, 255, 256, 268, 269, 272  
Äquivalentdosis, 597, 598  
Äquivalentmasse, 299  
Äquivalenzprinzip, 54, 259, 507  
Aräometer, 147  
Arbeit, 82, 119  
– bei der Drehbewegung, 120  
– , Beschleunigungs-, 85  
– eines Gleichstromes, 293  
– elektrischer Wechselströme, 337  
– gegen die Schwerkraft, 83, 96  
– im elektrischen Feld, 267  
ARCHIMEDISches Prinzip, 147  
ARRHENIUS-Gleichung, 249  
Astigmatismus, 461  
Äther, 75, 77, 253  
atomare Masseneinheit, 53, 198  
Atombombe, 582, 603  
Atomkern, 520, 580  
Atommasse, 198  
Atommodell, 520, 521  
Atomrumpf, 528  
Atomuhr, 29  
Atomvolumen, 198  
ATWOODSche Fallmaschine, 53, 55  
Auflagerkräfte, 111  
Auflösungsvermögen  
– eines Elektronenmikroskops, 517  
– optischer Geräte, 471, 477  
Aufspaltung der Terme, 529  
Auftriebskraft, 146–148  
Auge, 458  
AUGER-Effekt, 543, 546  
Ausdehnungsarbeit, 187  
Ausdehnungskoeffizient, 176, 179  
Ausgleichsgerade, 627  
Austauschkräfte, 587  
Austauschreaktion, 599  
Austauschteilchen, 613, 614

- Austauschwechselwirkung, 560  
 Austrittsarbeit, 294, 509  
 AVOGADRO-Konstante, 25, 198  
 AVOGADROSche Regel, 200  
 axialer Vektor, 110
- Bahnbeschleunigung, 45  
 Bahndrehimpuls, 529, 531, 588  
 Bahnkurve, 43  
 BALMER-Serie, 522  
 Bändermodell, 561, 567  
 BARKHAUSEN-Effekt, 575  
 barometrische Höhenformel, 151, 202  
 Baryon, 608, 612  
 Baryonenladung, 609  
 Basis-Schaltung, 349, 570  
 Basiseinheit, 22  
 Basisgrößenart, 22  
 BCS-Theorie, 577  
 Becquerel, 594  
 Beleuchtungsstärke, 505  
 Benetzung, 154  
 BERNOULLISCHE Gleichung, 160, 171  
 Beschleunigung, 31, 36, 39, 47  
 Besetzungsinversion, 549  
 BESSELSches Verfahren, 457  
 Bestrahlungsstärke, 496  
 Beta-Zerfall, 591, 592, 614  
 Betatron, 430  
 BETHE-WEIZSÄCKER-Formel, 588  
 BETHE-WEIZSÄCKER-Zyklus, 605  
 Beugung, 466
  - am Spalt, 468
  - am Strichgitter, 474
  - an einer Lochblende, 470
  - , FRAUNHOFERSche, 468, 469
  - , FRESNELSche, 468
  - von Elektronenstrahlen, 514
  - von RÖNTGENstrahlen, 477
 Beugungsgitter, 475  
 Beugungsscheibchen, 471, 473  
 Beweglichkeit, 249
  - der Ladungsträger, 295
 Bewegungsgleichung, 57, 99
  - , relativistische, 80
 Bewegungsgröße, 55  
 Bezugssystem, 29, 66–68  
 Biegeschwingungen, 404  
 Bindungsenergie
  - der Elektronen, 526, 544
  - des Atomkerns, 588
  - je Nukleon, 584, 585
- Binnendruck, 152  
 BIOT-SAVARTSches Gesetz, 314, 356  
 Blendenzahl, 471, 472  
 Blindleistung, 339  
 Blindstrom, 339  
 Blindwiderstand, 338, 341, 342  
 BLOCH-Wand, 575  
 Bogenentladung, 307  
 Bogenmaß, 41  
 BOHRsche Postulate, 524, 525, 528  
 BOHRscher Radius, 123, 526  
 BOHRsches Atommodell, 123, 524, 527, 555  
 BOHRsches Korrespondenzprinzip, 527  
 BOHRsches Magneton, 533  
 BOLTZMANN-Gleichung, 224, 549  
 BOLTZMANN-Konstante, 25, 175, 200, 225  
 BOLTZMANNsches Verteilungsgesetz, 202  
 Boson, 535  
 BOYLE-MARIOTTESches Gesetz, 149  
 BRAGGSche Gleichung, 480  
 BRAVAIS-Gitter, 130  
 Brechungsgesetz, 437–439, 446  
 Brechwert, 457  
 Brechzahl, 424, 432  
 Bremsstrahlung, 542  
 Brennpunkt, 448, 453  
 Brennweite, 448, 454, 455
  - des Hohlspiegels, 449
  - einer dünnen Linse, 453
  - eines Linsensystems, 456
 BREWSTERSches Gesetz, 482  
 Brille, 457  
 BROWNSche Molekularbewegung, 197, 407, 409  
 Brutreaktion, 603, 604  
 BUNSENSches Ausströmungsgesetz, 163
- Caesium-Frequenz-Standard, 25, 29, 578  
 Candela, 503  
 CARNOT-Prozess, 210, 212, 213, 216, 220  
 CAVENDISH-Experiment, 95  
 CELSIUS-Temperatur, 22, 175  
 chaotische Schwingung, 393  
 CHLADNISCHE Klangfiguren, 404, 556  
 CLAUDIUS-CLAPEYRONsche Gleichung, 235, 238  
 CLAUDIUS-RANKINE-Prozess, 213, 232  
 Colour, 611  
 COMPTON-Effekt, 511  
 COMPTON-Streuung, 512, 545–547  
 COOPER-Paar, 577  
 CORIOLIS-Kraft, 69–71  
 COULOMBSches Gesetz, 134, 273  
 COULOMBSches Reibungsgesetz, 63

- CROOKESSche Lichtmühle, 499  
 CURIE-Punkt, 574  
 CURIE-Temperatur, 323, 574  
 CURIE-WEISSsches Gesetz, 574  
 CURIEsches Gesetz, 573  
 $c_W$ -Wert, 167, 168
- D'ALEMBERTsches Prinzip, 68, 170  
 DALTONsches Gesetz, 208, 223  
 Dampfdruck, 229, 234, 235, 241  
 Dampfdruckkurve, 235, 236  
 Dampfpunkt, 175  
 Dämpfungskonstante, 367  
 DE-BROGLIE-Wellenlänge, 516, 551  
 DEBYE-SCHERRER-Verfahren, 480, 514  
 deduktive Methode, 21  
 Defektelektron, 564  
 Dehnung, 134  
 Deklination, 309  
 Determinismus, 519  
 Deuterium, 581, 605  
 deutliche Sehweite, 457, 458  
 Diamagnetismus, 323, 572  
 Dichte, 54, 178  
 Dielektrikum, 277  
 Dielektrizitätszahl, 279, 423  
 DIESEL-Prozess, 194, 213  
 Diffusion, 248, 249, 582  
 Diffusionsstrom, 248, 567  
 Dimension, 22, 23  
 Diode, 347  
 Dioptrie, 457  
 Dipol, 265, 425–428  
 Dipolmoment, 266, 317  
 Dipolstrahlung, 425  
 Dispersion, 432, 476  
 – , anomale, 433, 435  
 – , elektromagnetischer Wellen, 432  
 – , normale, 432, 435, 441  
 – , optische, 440  
 Dispersionsrelation, 434, 435  
 dissipative Strukturen, 226  
 Domänen, 573, 575  
 Donator, 564, 565  
 Doppelbrechung, 484, 488, 489  
 Doppelleitung, 419  
 Doppelschicht, 298, 300, 568  
 DOPPLER-Effekt, 416  
 Dosimetrie, 596  
 Dotierung, 564  
 Drain-Elektrode, 350, 571  
 Drehbewegung, 45, 116, 119  
 Drehimpuls, 121, 126  
 Drehmoment, 107, 109  
 Drehschwingung, 362  
 Drehsinn, 110  
 Drehspulgalvanometer, 317  
 Drehstrom, 335  
 Drehzahl, 41, 42  
 Dreieckschaltung, 336, 339  
 Driftbewegung, 295  
 Driftgeschwindigkeit, 249, 295  
 Driftstrom, 249, 568  
 Druck, 178  
 – in Flüssigkeiten, 144  
 – in Gasen, 149, 199  
 Druckdifferenz, 160  
 Druckmesssonden, 161, 162  
 Dualismus, 493, 507  
 – des Lichts, 508, 514  
 DUANE-HUNTSches Gesetz, 542  
 Dublettsystem, 536  
 DULONG-PETITsche Regel, 206, 207, 296  
 Dunkelentladung, 306  
 Durchflutungsgesetz, 313  
 Durchlassgrad, 431, 437, 482  
 dynamische Viskosität, 165  
 dynamischer Druck, 161  
 dynamisches Gleichgewicht, 68  
 Dynamomaschine, 334
- Effektivwert, 337, 338, 341, 343, 410  
 Eigenfunktionen, 554  
 Eigenleitung, 564, 566  
 Eigenschwingungen, 385, 401, 403, 415  
 Eigenstrahlung, 542  
 Eigenwert, 359, 403, 554  
 Einfangquerschnitt, 601  
 eingeprägte Kraft, 62, 67, 68  
 Einheiten, 22  
 EINSTEIN-DE-HAAS-Versuch, 573  
 EINSTEINsche Gleichung, 509  
 EINSTEINsches Relativitätsprinzip, 75  
 Eispunkt, 175  
 Elastizitätsmodul, 135, 141  
 elektrische Ladung, 261  
 elektrische Leitfähigkeit, 286, 559  
 elektrischer Schwingkreis, 373, 374  
 Elektrisierung, 280  
 elektrochemische Spannungsquellen, 300  
 elektrochemisches Äquivalent, 299, 300  
 Elektrodynamik, 354, 492  
 – , relativistische, 355  
 elektrokinetische Effekte, 298

- Elektrolyse, 298  
Elektromagnet, 317, 326, 332  
elektromagnetische Induktion, 328, 333  
elektromagnetische Wechselwirkung, 613  
elektromagnetisches Spektrum, 428  
Elektron, 261, 608  
Elektronendichte, 295, 556  
Elektroneneinfang, 593  
Elektronengas, 294, 560  
Elektronenleitung, 294  
Elektronenmikroskop, 472, 516  
Elektronenradius, 283  
Elektronenröhre, 347, 348, 570  
Elektronenspin, 533  
Elektronenstrahloszillograph, 303  
Elektronenzwilling, 546  
Elektronvolt, 268, 302  
Elektroosmose, 298  
Elektrophorese, 298  
elektrostatisches Feld, 309, 354  
elektrostatisches Potenzial, 267, 268, 272  
elementare Kräfte, 613  
Elementarladung, 25, 262, 265  
Elementarteilchen, 612, 616  
Elementarteilchenphysik, 607  
elliptische Schwingung, 386, 488  
Emission (induzierte und spontane), 548  
Emissionsgrad, 498, 501  
Emitter-Schaltung, 349, 570  
Energie, 87, 90  
Energiebändermodell, 561  
Energiedichte  
– der Strahlung, 497  
– des elektrischen Feldes, 283  
– des magnetischen Feldes, 332  
Energiedosis, 597  
Energieflussdichte  
– , akustische, 411  
– , elektromagnetische, 424  
Energielücke, 563  
Energimethode, 361  
Energiequanten, 509  
Energiesatz, 88, 91, 186  
Energieterm, 523  
Energietopf, 590  
Entartung, 529, 531, 562  
Entartungstemperatur, 562  
Enthalpie, 195  
Entmagnetisierungsfaktor, 326  
Entropie, 192, 218, 224, 225  
Entropiesatz, 210, 220  
Erddrehung, 35, 71  
Erstarrungswärme, 234, 238  
erzwungene Schwingung, 369  
ETTINGSHAUSEN-Effekt, 320  
EULERSche Formel, 340  
EULERSche Gleichung der Hydrodynamik, 170, 171  
Excimer-Laser, 550  
Experiment, 20  
FABRY-PÉROT-Interferometer, 476, 477  
Fallbeschleunigung, 34, 71, 95, 254  
Fallgesetz, 34  
FARADAY-Effekt, 486, 491  
FARADAY-Käfig, 270  
FARADAY-Konstante, 299  
FARADAYSche Gesetze, 262, 298  
Farbfehler, 461  
Farbkraft, 614  
Farbladung, 611  
Farbmischung, 441, 442  
Farbtemperatur, 502  
Farbzerlegung, 441  
Faseroptik, 440  
Fata Morgana, 440  
Federkonstante, 85, 358  
Federkraftmesser, 54, 67  
Federschwingung, 358, 384  
Fehlerfortpflanzung, 625, 626  
Fehlergrenze, 620  
Feinstruktur der Spektrallinien, 531, 535  
Feinstrukturkonstante, 526  
Feld, 252  
Feldemission, 305  
Feldquanten, 613  
Feldstärke, 252  
– , elektrische, 264, 272, 281  
– , Gravitations-, 254  
– , magnetische, 310  
Feldstrom, 568  
FERMATSches Prinzip, 445, 446  
FERMI-DIRAC-Statistik, 562  
FERMI-Energie, 295, 561, 563  
FERMI-Niveau, 562  
Fermion, 535  
Fernfeld, 425  
Fernordnung, 128  
Fernrohr, 460, 471  
Ferrimagnetismus, 574  
Ferrite, 323, 574  
Ferromagnetismus, 323, 573, 574  
Festkörper-Impuls laser, 550  
Fettflecksphotometer, 505

- FICKSche Gesetze, 248  
 Fixpunkt, 175  
 Flächenladungsdichte, 271, 272, 276  
 Flächensatz, 93, 122  
 Flavour, 610  
 Fliehkraft, 69  
 Fluchtgeschwindigkeit, 97  
 Flusssdichte  
 – , elektrische, 271  
 – , magnetische, 315, 328, 329  
 Flussquant, 528, 577  
 Flussschlauch, 577  
 FOUCAULTScher Pendelversuch, 71  
 FOURIER-Analyse, 388  
 FRANCK-HERTZ-Versuch, 525  
 freie Achsen, 123, 124  
 freier Fall, 34  
 Freiheitsgrad, 107, 205, 239  
 FRESNELSche Formeln, 482  
 Fundamentalschwingungen, 383–385  
 Funkenentladung, 307  
 Fusionsbombe, 605  
 Fusionsreaktor, 605
- Galaxie, 617  
 GALILEI-Transformation, 73, 74, 77  
 galvanomagnetische Effekte, 320  
 Galvanometer, 291, 297, 334, 345, 510  
 – ballistisches, 263, 270, 328, 369  
 Gammastrahlung, 430, 593  
 Gap, 563  
 Gasentladung, 305, 307  
 Gasgemische, 208  
 Gaskonstante, 182, 209  
 Gaslaser, 550  
 Gasthermometer, 175, 180  
 Gate-Elektrode, 350, 571  
 GAUSS-Funktion, 245  
 GAUSSSche Normalverteilung, 622  
 GAUSSSche Zahlenebene, 340  
 GAY-LUSSACsches Gesetz, 179, 180  
 gedämpfte Schwingung, 368  
 Gefrierpunktserniedrigung, 242  
 Gegeninduktion, 346  
 Gegenkraft, 61  
 Gegenstandsweite, 448, 454  
 Gegenwirkungsprinzip, 61, 62  
 Gehör, 411  
 GEIGER-MÜLLER-Zählrohr, 306, 595  
 gekoppelte Schwingungen, 382  
 Generatorprinzip, 330  
 Geradenausgleich, 627
- Geschwindigkeit, 36  
 Geschwindigkeitsverteilung der Gasmoleküle, 201  
 Gesetz, 20  
 Gewichtskraft, 53, 95  
 gg-Kerne, 586  
 GIBBSsche Phasenregel, 239  
 Gitter-Spektrometer, 476, 477  
 Gitterkonstante, 26, 129, 135, 474, 475, 478–480, 560  
 Gitterschwingungen, 245, 295, 385, 407, 513  
 Glühkatode, 304  
 Gleichdruckprozess, 195  
 Gleichgewicht, 49, 61  
 – , dynamisches, 68  
 – , radioaktives, 596  
 – , stabiles, 115, 227  
 – , statisches, 51, 108  
 – , thermisches, 174, 191  
 – , thermodynamisches, 174, 190, 213, 215  
 Gleichgewichtsarten, 115  
 Gleichgewichtsbedingungen starrer Körper, 109, 110  
 Gleichrichter, 287, 347, 569  
 Gleichstromkreis, 284  
 Gleichverteilungssatz, 205, 206  
 Gleichzeitigkeit, 78  
 Gleitreibungszahl, 64  
 Glimmentladung, 307  
 Gluon, 613, 614  
 Größenart, 22  
 Gradient, 257, 267  
 Grand Unified Theories (GUT), 615  
 grauer Körper, 498  
 Gravitation, 53, 93, 613, 616  
 Gravitationsfeld, 252, 255, 256, 260  
 Gravitationsgesetz, 94  
 Gravitationskonstante, 25, 94, 95, 254, 616  
 Gravitationskraft, 94, 254, 273  
 Graviton, 613  
 Gray, 597  
 Grenzflächenspannung, 154  
 Grenzkontinuum, 526  
 Grenzschrift, 154, 164  
 Grundgesetz der Dynamik, 52, 55, 56, 58, 119  
 Grundschwingung, 388, 403  
 Grundzustand, 123, 321, 523, 554, 559  
 Gruppengeschwindigkeit, 433, 434, 551  
 GSW-Theorie, 615  
 gu-Kerne, 586  
 GUT-Energie, 615, 616

0. Hauptsatz, 174  
 I. Hauptsatz, 186, 187, 190  
 II. Hauptsatz, 210, 216  
 III. Hauptsatz, 227  
 Hadron, 608, 611, 612  
 Haftreibungskraft, 62  
 Haftreibungszahl, 62, 63  
 Haftspannung, 154  
 HAGEN-POISEUILLESches Gesetz, 165  
 Halbleiter, 294, 563  
 Halbleiter-Laser, 550  
 Halbleiterdiode, 348, 569  
 Halbwertsdicke, 548  
 Halbwertshöhe, 151  
 Halbwertszeit, 594–596  
 HALL-Effekt, 320  
 Hangabtriebskraft, 63, 65, 84  
 harmonische Schwingung, 357, 359, 361  
 harmonische Welle, 395, 406  
 harmonischer Oszillator, 359, 374  
 Härte, 132, 143  
 Hauptebene, 453, 456  
 Hauptpunkte, 456  
 Hauptquantenzahl, 525, 540  
 Hauptstrahl, 454  
 Hauptträgheitsachse, 124, 125  
 Heißleiter, 287  
 HEISENBERGSches Unbestimmtheitsprinzip, 518  
 Helium II, 579  
 Helmpfindlichkeitsgrad des Auges, 506  
 HELMHOLTZsche Wirbelsätze, 158  
 HEUSLERSche Legierungen, 323, 574  
 HIGGS-Boson, 615  
 Hintergrundstrahlung, 617  
 Hochtemperatur-Supraleitung, 577  
 Höhenstrahlung, 607  
 Hohlraumstrahlung, 498  
 Hohlspiegel, 448, 449, 451  
 Holografie, 472  
 HOOKEsches Gesetz, 134, 135, 138, 141  
 Hörschwelle, 413  
 Hubarbeit, 83  
 HUYGENS-FRESNELSches Prinzip, 467  
 HUYGENSSches Prinzip, 436, 437, 467, 474, 484  
 Hydratation, 266, 298  
 Hydraulik, 144, 157  
 Hydrodynamik, 156  
 hydrodynamische Ähnlichkeit, 168  
 hydrostatische Waage, 147, 148  
 hydrostatischer Druck, 137, 144, 146  
 Hyperfeinstruktur, 29, 535  
 Hyperladung, 610  
 Hyperon, 607  
 Hyperschall, 407  
 Hysterese, 323–325, 576  
 ideale Flüssigkeit, 158  
 ideales Gas, 149, 158, 179, 198  
 Impedanz, 340  
 Impedanzebene, 341  
 Impuls, 55, 57  
 – , relativistischer, 80  
 Impulserhaltungssatz, 57, 98, 100, 101  
 Impulsmasse, 80  
 Induktionsgesetz, 328, 329, 333  
 induktive Methode, 20  
 induktiver Widerstand, 341  
 Induktivität, 330  
 Inertialsystem, 72, 73, 75  
 Influenz, 270, 311  
 Infrarot-(IR-)Strahlung, 430  
 Infraschall, 407  
 Inklination, 309  
 innere Bewegungen, 27  
 innere Energie, 186, 189, 205, 231  
 innere Kräfte, 98  
 innere Reibung, 164  
 Integrationskonstante, 38, 58, 106  
 Intensität, 413, 414, 431, 470, 476, 496, 509, 542  
 Interferenz, 381, 462, 463, 465  
 – des polarisierten Lichts, 486  
 intermediäre Bosonen, 613  
 internationale Atomzeit (IAT), 29  
 Internationales Einheitensystem (SI), 22  
 Intrinsic-Konzentration, 566  
 Intrinsicdichte (Inversionsdichte), 566  
 Inversionsdichte, 566  
 Inversionstemperatur, 232  
 Ionen, 299  
 Ionendosis, 597, 598  
 Ionisationskammer, 305, 597  
 Ionisierungsenergie, 510, 526  
 Irreversibilität, 220  
 irreversibler Prozess, 215, 222  
 Isentrope, 192, 222  
 Isobare, 185, 187, 190, 194, 213, 582  
 Isolator, 262, 294, 563  
 Isospin, 609  
 Isotherme, 192  
 Isotop, 581  
 isotroper Körper, 141  
 JOSEPHSON-Effekt, 25, 577  
 JOULE-THOMSON-Prozess, 232

- Kalorimetrie, 185  
 kalorische Zustandsgleichung, 189, 231  
 Kältemaschine, 212  
 Kaon, 607  
 Kapazität des Kondensators, 281  
 kapazitiver Widerstand, 342  
 Kapillarität, 154, 155  
 Kataustik, 448, 461  
 Katodenstrahlen, 262, 304  
 Kausalitätsprinzip, 519  
 Kaustik, 450  
 KELVIN-Skala, 175  
 KELVIN-Temperatur, 22  
 Kennlinie  
 – einer Triode, 347  
 – elektrischer Widerstände, 286  
 – von Halbleiterdioden, 348  
 KEPLER-Ellipse, 96  
 KEPLERSche Gesetze, 93, 122  
 KEPLERSches Fernrohr, 460  
 Kernbindungsenergie, 583  
 Kernenergie, 602, 603  
 Kernfusion, 308, 550, 600, 605, 606  
 Kernkraft, 587, 613, 614  
 Kernkraftwerk, 604  
 Kernladungszahl, 521, 580  
 Kernmodelle, 588  
 Kernphotoeffekt, 600  
 Kernradius, 581  
 Kernreaktor, 582, 602, 604  
 Kernspaltung, 600, 601  
 Kernspaltungsbombe, 603, 605  
 Kernspin, 535  
 Kernstreuung, 599  
 Kernumwandlungen, 599  
 Kernverschmelzung, 605  
 KERR-Effekt, 486, 489  
 Kettenreaktion, 603  
 kinetische Energie, 88, 116, 118, 361, 509, 511, 600  
 – , relativistische, 91, 302  
 kinetische Gastheorie, 197, 198  
 Kippschwingung, 390  
 Kippspannung, 304  
 KIRCHHOFFSche Gesetze, 291  
 KIRCHHOFFSches Strahlungsgesetz, 498  
 Klangfarbe, 403, 412  
 Knotenflächen, 556  
 Knotensatz, 291  
 Koerzitivfeldstärke, 324, 576  
 kohärente Einheit, 23  
 Kohärenz, 463, 549  
 Kohäsion, 152  
 Kohäsionsdruck, 152  
 KOHLRAUSCH, Verfahren von, 451  
 Kolbendruck, 144, 146, 161  
 Kollektor-Schaltung, 349, 570  
 Komplementärfarbe, 442, 465  
 Komponentenzerlegung, 40  
 Kompressibilität, 137, 145  
 – des idealen Gases, 149  
 Kompressionsmodul, 137  
 Kondensation, 229, 230, 233  
 Kondensator, 274  
 Konkavspiegel, 448, 449  
 konservative Kraft, 84, 87, 88, 255  
 Kontaktspannung, 296  
 kontinuierliches Spektrum, 390, 441  
 Kontinuitätsgleichung, 159  
 Konvektion, 247, 249  
 Konkavspiegel, 448, 451  
 Kopplungsgrad, 385  
 Koronaentladung, 307  
 Körperfarbe, 442  
 Korrektur, 619  
 Korrelation, 628, 630  
 kosmische Geschwindigkeiten, 96  
 kosmische Strahlung, 430, 607  
 Kosmologie, 616  
 Kovolumen, 228  
 Kraft, 49, 52  
 Krafteck, 51, 108  
 Kräftegleichgewicht, 50  
 Kräftepaar, 112, 116  
 Kräfteparallelogramm, 50  
 Kraftfeld, 91, 252, 264, 310  
 Kraftlinien, 253  
 Kraftstoß, 55, 57  
 Kreisbeschleuniger, 319  
 Kreisbewegung, 41, 42, 44, 69  
 Kreisel, 123, 126  
 Kreisfrequenz, 42, 359  
 Kreisprozess, 186, 188, 210, 219  
 Kreisstrom, 318  
 Kriechfall, 367, 368  
 Kristallgitter, 128, 478, 479  
 kritische Masse, 603  
 Kugelwelle, 405, 406, 437  
 KUNDTsche Staubfiguren, 415  
 Kurzschluss, 289  
  
 Längenkontraktion, 78, 356  
 Lösungen, 241  
 Lösungstension, 300  
 Ladungsträgerkonzentration, 295

- laminare Strömung, 164
- Längenmessung, 28
- LARMOR-Präzession, 537, 572
- Laser, 549, 550
- Laserdiode, 569
- LAUE-Diagramm, 479
- LAUESche Gleichungen, 478
- LAWSON-Kriterium, 606
- LE-CHATELIERSches Prinzip, 242
- LECHER-Leitung, 420
- Leistung, 86, 119
  - eines Gleichstromes, 293
  - elektrischer Wechselströme, 337
  - im Drehstromkreis, 337
- Leitfähigkeit
  - , elektrische, 286, 559
  - , Temperatur-, 244
  - , Wärme-, 243, 246
- Leitungsband, 563
- Leitwert, 286
- LENZsche Regel, 329, 331
- Lepton, 608, 610, 611, 614
- Leptonenladung, 609
- Leuchtdichte, 504, 505
- Leuchtelektron, 528
- Lichtbogen, 287
- Lichtbrechung, 439
- lichtelektrischer Effekt, 304, 508
- Lichtgeschwindigkeit, 423
  - im Vakuum, 25, 74
  - , Messung der, 432
- Lichtleiterkabel, 440
- Lichtquanten, 500, 507
- Lichtstärke, 503, 505
- Lichtstrahlen, 443
- Lichtstrom, 504
- lichttechnische Größen, 495, 503
- Lichtweg, 462
- LINDE-Verfahren, 232
- lineare Regression, 627
- Linienflüchtigkeit des Kraftvektors, 108
- Linienspektrum, 389, 441, 521, 522, 524
- Linke-Hand-Regel, 353
- Linsenformen, 452
- Linsensysteme, 456
- LISSAJOUS-Figuren, 387
- Lithium, 605
- Lochblende, 470
- logarithmisches Dekrement, 367
- Longitudinalwelle, 398, 399
- LORENTZ-Kraft, 318, 320, 321, 333, 356, 577
- LORENTZ-Transformationen, 76, 77
- LOSCHMIDT-Konstante, 200
- Luftdruck, 146, 148, 150, 151
- Luftspalt, 324, 326, 332
- Luftverflüssigung, 232
- Luftwiderstand, 169
- Lumen, 504
- Lupe, 458, 460
- Lux, 504
  
- MACH-Zahl, 168
- MACHscher Kegel, 418
- magische Kerne, 589
- Magnet, 309
- magnetische Feldenergie, 332
- magnetische Induktion, 316
- magnetische Quantenzahl, 531
- magnetische Spannung, 313, 325
- magnetischer Fluss, 310, 326, 328
- magnetischer Kreis, 325, 326, 332
- magnetischer Widerstand, 325
- magnetisches Bahnmoment, 533
- magnetisches Dipolmoment, 311, 589
  - einer Spule, 317
  - eines Kreisstromes, 318
- magnetisches Joch, 332
- magnetisches Spinmoment, 534–536
- Magnetisierung, 322, 574, 575
- Magnetisierungskurve, 323–326
- Magnetohydrodynamik, 308
- magnetostatisches Feld, 309
- Magnetpol, 309
- MAGNUS-Effekt, 163
- Majoritätsträger, 565
- Manometer, 150
- Maschensatz, 291
- Maser, 549
- Masse, 53, 90, 514
  - , relativistische, 80, 81, 90, 507
- Massendefekt, 583
- Massenmittelpunkt, 98, 99, 113
- Massenschwächungskoeffizient, 545
- Massenspektroskopie, 582
- Massenstrom, 105, 156, 248
- Massenträgheitsmoment, 116
- Massenwirkungsgesetz, 566
- Massenzahl, 580
- Materiewelle, 515
- MAXWELL-BOLTZMANN-Statistik, 562
- MAXWELLSche Geschwindigkeitsverteilung, 201, 202
- MAXWELLSche Gleichungen, 351–353, 421
- MAXWELLSche Relation, 423, 428, 432

- Mehrstufenprinzip, 106  
 MEISSNER-OCHSENFELD-Effekt, 576  
 MEISSNERSche Rückkopplungsschaltung, 378, 379  
 Meson, 587, 607, 608, 612  
 Messabweichung, 618  
 Messergebnis, 620  
 metastabiles Niveau, 550  
 Metazentrum, 147  
 MHD-Generator, 308  
 MICHELSON-Experiment, 75, 77  
 Mikroskop, 459, 460, 472  
 MILLERSche Indizes, 479  
 MILLIKAN-Methode, 265, 266  
 Minoritätsträger, 565  
 Mischungstemperatur, 185  
 mittlere freie Weglänge, 207  
 mittlere Geschwindigkeit, 32, 36, 201–203  
 mittlere quadratische Geschwindigkeit, 199, 202, 203  
 mittleres Geschwindigkeitsquadrat, 199  
 Modulation, 427  
 MOHRsche Waage, 147  
 Mol (mol), 182  
 molares Normvolumen, 182  
 Molarität, 241  
 Molekülmasse, 198  
 Molmasse, 198  
 Molwärme, 185, 205, 206  
 Moment, 109  
 MOSFET, 350, 571  
 MÖSSBAUER-Effekt, 512  
 Multiplett, 529  
 Myon, 607, 608, 611
- Nahfeld, 425  
 Nahordnung, 128  
 Nahwirkung, 252, 253  
 Natrium-D-Linie, 531  
 NAVIER-STOKES-Gleichung, 171  
 Nebelkammer, 230, 320, 546  
 Nebenquantenzahl, 529  
 NERNST-Effekt, 320  
 NERNSTsches Wärmetheorem, 227  
 Neukurve, 324  
 Neutrino, 592, 608, 611  
 Neutron, 580, 581  
 Neutronen-Einfang, 599  
 Neutronenstern, 613  
 NEWTONSche Axiome, 51, 52, 61, 68, 254  
 NEWTONSche Ringe, 466  
 NEWTONSches Reibungsgesetz, 164  
 NICOLSches Doppelpisma, 486
- n-Leiter, 565, 567  
 Nonius, 29  
 Nordpol, 309  
 Normal-Wasserstoffelektrode, 300  
 Normalbeschleunigung, 48  
 Normalkraft, 62  
 Normalluftdruck, 151  
 Normalvergrößerung, 459  
 Normzustand, 182  
 Nukleon, 580  
 Nulleffekt, 595  
 Nullpotenzial, 267  
 Nullpunktenergie, 295, 519, 555, 562  
 Nutation, 125, 126
- Oberflächenenergie, 153  
 Oberflächenspannung, 152, 153, 155  
 Oberschwingung, 388, 403, 404  
 Objektiv, 459, 460, 471, 472  
 offenes System, 195, 226  
 OHMSches Gesetz, 285, 286, 295  
 OHMSches Gesetz der Magnetostatik, 325  
 OHMSches Gesetz für Wechselstrom, 343  
 Okular, 459, 460  
 optische Abbildung, 447  
 optische Weglänge, 445, 462  
 Orbitale, 556, 557  
 ordentlicher Strahl, 484  
 Ordnungszahl, 520, 538, 580  
 Orientierungspolarisation, 277  
 Orientierungsquantenzahl, 531  
 Ortsvektor, 47, 58  
 Osmose, 242  
 osmotischer Druck, 242  
 Oszillograph, 369, 387
- Paarbildung, 545–547, 608  
 Parallelschaltung  
 – aus  $R$ ,  $L$  und  $C$ , 343  
 – von Kondensatoren, 275, 282  
 – von Widerständen, 288  
 Paramagnetismus, 323, 572  
 Parität, 614  
 Partialdruck, 208  
 PASCALSches Gesetz, 146  
 PASCHEN-BACK-Effekt, 538  
 PAULI-Prinzip, 540, 561, 611  
 PELTIER-Effekt, 297  
 Pendel, 35  
 Pendelschwingung, 364  
 Periodendauer, 42, 359  
 Periodensystem der Elemente, 538, 539

- Permanentmagnet, 310  
Permeabilitätszahl, 322, 325, 326  
Permittivitätszahl, 279  
Perpetuum mobile, 89, 186, 216  
Phase, 152, 233, 239, 396  
Phasendifferenz, 463  
Phasenfläche, 405, 436, 443, 444  
Phasengeschwindigkeit, 396, 399, 400, 433  
– elektromagnetischer Wellen, 423  
Phasengleichgewicht, 235  
Phasengrenze, 152  
Phasenschieber-Kondensator, 344  
Phasensprung, 402, 403, 464  
Phasenumwandlung, 228, 233  
Phasenverschiebung, 371  
– zwischen Spannung und Strom, 335, 342–344  
Phasenwinkel, 339, 359  
Phononen, 245  
Photodiode, 287  
Photoeffekt, 304, 508, 526, 546  
Photometrie, 503, 504  
photometrisches Grundgesetz, 504  
Photon, 500, 507, 613  
Photozelle, 510  
physikalische Größen, 22  
physikalisches (physisches) Pendel, 364  
Piezoelektrizität, 278  
Pion, 607, 608  
PITOT-Rohr, 161  
PLANCK-Einheiten, 26, 616  
PLANCK-Energie, 616  
PLANCK-Konstante, 25, 500  
PLANCKsche Quantenbedingung, 507  
PLANCKsches Strahlungsgesetz, 500  
PLANCKsches Wirkungsquantum, 518, 544  
Planetenbewegung, 93  
Plasmazustand, 306, 606  
plastische Verformung, 135, 141, 142  
Plattenkondensator, 274  
p-Leiter, 566, 567  
pn-Übergang, 249, 348, 567, 568  
POISSONSche Adiabatangleichung, 192  
POISSONSche Querkontraktionszahl, 136  
polare Achse, 278  
Polarimeter, 486, 490  
Polarisation  
– des Lichts, 481  
– , elektrische, 277  
– , magnetische, 322  
Polarisationsapparat, 486  
Polarisationsfilter, 482  
Polarisationswinkel, 483  
Polarisator, 482, 483  
Polarisierbarkeit, 277  
Polarkoordinaten, 44  
Polstärke, 310  
Polytrope, 193  
Positron, 592  
Potentiometer, 288  
Potenzialfeld, 256  
Potenzialmulde, 362, 553  
Potenzialtopf, 553, 557, 590  
Potenzialtopfmodell  
– der Metalle, 295  
– des Atomkerns, 591  
Potenzialwall, 294, 557, 591  
potenzielle Energie, 87, 96, 255, 361  
POYNTING-Vektor, 424  
PRANDTLsches Staurohr, 161  
Präzession, 126, 127, 531  
Primärelement, 300  
Prisma, 440, 441, 477  
Prismenfernrohr, 460  
Prismen-Spektrometer, 476, 477  
PRONYScher Zaum, 121  
Proton, 261, 580, 581  
Proton-Neutron-Diagramm, 585  
Prozessgröße, 187  
Punktladung, 27, 263, 264, 272  
Punktmasse, 27  
Punktmassen-Systeme, 98  
Pyknometer, 148  
  
Quanten, 493  
Quanten-HALL-Effekt, 25, 321, 578  
Quantenchromodynamik (QCD), 614, 615  
Quantenenergie, 509  
Quantenmechanik, 516, 519, 527, 551  
Quantentheorie des Lichts, 493, 500, 509  
Quantenzahl  
– , innere, 535  
Quantenzahlen, 525, 540  
– , ladungsartige, 608  
Quarkhypothese, 611  
Quarks, 608, 610, 611, 613, 614  
Quelle, 157, 159, 253, 263  
Quellenfeld, 254, 263  
Querkontraktionszahl, 137  
QUINCKESches Resonanzrohr, 416  
  
rad (Radiant), 41  
Radialbeschleunigung, 43  
Radialkraft, 54, 69  
radioaktiver Zerfall, 585

- Radioaktivität  
 – , künstliche, 600  
 – , natürliche, 590  
 Radiometer, 499  
 Rakete, 38, 57, 105, 106  
 Randwinkel, 154  
 RAOULTsches Gesetz der Siedepunktserhöhung, 241  
 Raster-Tunnel-Mikroskop, 558  
 Raum, 28, 30  
 Raumwinkel, 495  
 reale Flüssigkeit, 164, 167  
 reales Gas, 183, 228  
 Rechte-Hand-Regel, 110, 312, 352  
 Rechteck-Schwingung, 389  
 Rechts-Links-Symmetrie, 615  
 Rechtsschraubenregel, 43  
 reduzierte Pendellänge, 365  
 reelles Bild, 447  
 Reflexion, 402, 437  
 Reflexionsgesetz, 438, 445  
 Reflexionsgitter, 474  
 Reflexionsgrad, 437, 482, 498  
 Refraktion, 437  
 Refraktometer, 440  
 Regeneration des Eises, 238  
 Regenbogenspektrum, 522  
 Reibungskraft, 62, 64, 156, 164  
 Reibungswinkel, 63  
 Reihenschaltung  
 – aus  $R$ ,  $L$  und  $C$ , 342  
 – von Kondensatoren, 275, 282  
 – von Widerständen, 287  
 Rekombination, 305, 566  
 relative Atommasse, 198  
 Relativitätsprinzip der klassischen Mechanik, 73  
 Relativitätstheorie, 252, 355, 516  
 – , allgemeine, 54, 259, 616  
 – , spezielle, 74, 76  
 Remanenz, 324  
 Resonanz, 371, 390  
 – im Schwingkreis, 376, 377, 427  
 Resonanzabsorption, 514, 523  
 Resonanzen, 612  
 Resonanzschärfe, 378  
 Resultierende, 39, 49, 50  
 resultierende Kraft, 108  
 reversibler Prozess, 215  
 Reversionspendel, 366  
 REYNOLDS-Zahl, 168  
 RICHARDSON-Gleichung, 304, 510  
 Richtungsquantelung, 532, 535  
 RITZsches Kombinationsprinzip, 523  
 Rohrströmung, 166, 169  
 RÖNTGENstrahlen, 430, 479, 542–544  
 Rotationsenergie, 116  
 Rotationsschwingungen, 375  
 Rotverschiebung, 259, 417, 514  
 Rückstoßprinzip, 105  
 Ruhenergie, 91  
 Ruhmasse, 80, 508  
 RUTHERFORD-Streuung, 273  
 RUTHERFORDsches Atommodell, 520, 524  
 RYDBERG-Frequenz, 522  
 Saccharimeter, 490, 491  
 Sammellinse, 451, 452, 454  
 Satellit, 44, 93, 96  
 Sättigungsdruck, 229, 234, 235, 237  
 Sättigungsfeldstärke, 323, 324  
 Sättigungskonzentration, 241  
 Schallfeldgrößen, 409  
 Schallgeschwindigkeit, 168  
 – in Flüssigkeiten, 408  
 – in Gasen, 408  
 – in Luft, 408  
 schallhartes Medium, 410  
 Schallmauer, 168  
 Schallpegel, 414  
 schallweiches Medium, 410  
 Schallwellen, 77, 408, 410, 414  
 Schallwellenwiderstand, 411  
 Scheinleitwert, 343  
 Scheinwiderstand, 340, 342  
 Scheitelwert, 335, 341  
 Schermodul, 138  
 Scherwelle, 398, 400  
 schiefe Ebene, 55, 63, 118  
 schiefer Wurf, 59  
 Schmelzdruckkurve, 238  
 Schmelzen, 238  
 Schmelzpunkt, 238  
 Schmelzwärme, 234, 238  
 Schmerzschwelle, 413  
 schneller Brüter, 604  
 SCHRÖDINGER-Gleichung, 551, 553  
 Schubmodul, 138, 141  
 Schubspannung, 137  
 Schwächungsgesetz, 431, 544, 545  
 schwache Wechselwirkung, 592, 608, 613, 614  
 schwarze Temperatur, 501  
 schwarzer Körper, 497, 499, 500  
 schwarzes Loch, 259  
 Schwebung, 381–384, 433

- schwere Masse, 53, 254, 514  
Schwerebeschleunigung, 34, 254  
Schweredruck, 145  
– in einer Kugel, 258  
– in Gasen, 150  
Schwerelosigkeit, 68  
Schwerkraft, 49, 58, 94, 613  
Schwerpunkt, 98, 100, 112, 113  
Schwerpunktachse, 124  
Schwerpunktsatz, 100  
Schwimmstabilität, 147  
schwingende Saite, 403  
Schwingfall, 367, 368  
Schwingkreis, 425, 428  
Schwingquarz, 278  
Schwingung, 359  
Schwingungsebene, 424, 481  
Schwingungsenergie, 361  
Schwingungsmittelpunkt, 365, 366  
SEEBECK-Effekt, 176, 297  
Sehwinkel, 458  
Seilkraft, 68, 69  
Seilwelle, 394, 395, 399  
Sekundärelektronenemission, 305  
Sekundärelement, 301  
Selbstinduktion, 330  
Sender, 426–428  
Senke, 157, 159, 253, 263  
senkrechter Wurf, 34, 59  
Serienformel, 522  
Seriengrenze, 526  
SI-Einheitensystem, 22, 578  
– neues, 25, 53, 182, 503  
Sieden, 237  
Siedepunktserhöhung, 241  
Siedeverzug, 230  
Sievert, 597  
Siliciumkugel, 26, 182  
Sinusschwingung, 357  
Sinuswelle, 395  
Skalar, 39  
Skineffekt, 353  
Solarkonstante, 491, 496, 503  
Solenoid, 314  
Source-Elektrode, 350, 571  
Spalt, 468  
Spaltquerschnitt, 601, 603  
Spannung, 135, 268, 269  
Spannungs-Dehnungs-Diagramm, 141  
Spannungsabfall, 284, 286  
Spannungskoeffizient, 180  
Spannungsmesser, 292  
Spannungsquelle, 288, 300  
Spannungsreihe, 300  
Spannungsstoß, 328  
Spannungsteiler, 288  
Spektralanalyse, 441  
spektrale Strahldichte, 496, 503  
Spektralfarben, 441  
Spektrograph (Spektrometer), 476, 477  
Spektrum, 494, 522  
Sperrkreis, 376  
Sperrschicht, 568  
spezifische Oberflächenenergie, 152  
spezifischer Widerstand, 286, 294  
Spiegel, 447–449  
Spin, 533, 536, 588  
Spin-Bahn-Kopplung, 535  
Spinquantenzahl, 534  
Spitzenentladung, 307  
Sprungtemperatur, 576, 577  
Spule, 328, 330  
Standardabweichung, 623  
Standardmodell, 615  
– , kosmisches, 616  
STARK-Effekt, 538  
starke Wechselwirkung, 613  
starrer Körper, 27, 107, 116  
statischer Druck, 161  
statisches Gleichgewicht, 51, 108  
Staudruck, 161  
Staupunkt, 161  
STEFAN-BOLTZMANNsches Gesetz, 501  
stehende Wellen, 401, 402  
STEINERScher Satz, 118, 119  
Steradian, 495  
STERN-GERLACH-Versuch, 534  
Sternschaltung, 336, 339  
STIRLING-Prozess, 213  
Stoffmenge, 182  
STOKESSches Reibungsgesetz, 166  
Störstellenleitung, 564  
Stoß, 100, 101, 103  
Stoßionisation, 306  
Stoßquerschnitt, 207  
Stoßzahl, 101, 207  
Strahlen, 405, 443, 444  
Strahlenoptik, 443  
Strahlungsäquivalent, 506  
Strahlungsdruck, 497  
Strahlungsgleichgewicht, 494  
Strahlungsintensität, 424  
strahlungsphysikalische Größen, 495  
Strahlungspyrometer, 176

- Strahlungswiderstand, 427  
 Strangeness, 609  
 Strangspannung, 336  
 Streckgrenze, 141, 142  
 Streubreite des Mittelwertes, 623  
 Streuexperimente, 520, 581, 611  
 Streufeld, 425  
 Streukoeffizient, 546  
 Streuquerschnitt, 601  
 Streuung, 431, 545, 546  
 Strichgitter, 474  
 stroboskopischer Effekt, 382  
 Strom-Spannungs-Kennlinie, 286  
 Stromdichte, 285  
 – von Flüssigkeiten, 158  
 Stromfaden, 157  
 Stromkreis, 285  
 Stromleiter, 296, 311  
 – im Magnetfeld, 316  
 Stromlinien, 156  
 Stromlinienform, 167  
 Strommesser, 292  
 Stromröhre, 157, 159  
 Stromresonanz, 378  
 Stromstärke  
 – , elektrische, 284  
 – von Flüssigkeiten, 158  
 Strömungsfeld, 156  
 Strömungswiderstand, 167, 169  
 STUDENT-Faktor, 625  
 Sublimation, 234, 239  
 Sublimieren, 238  
 Südpol, 309  
 Superposition von Schwingungen, 380  
 Superpositionsprinzip, 39, 41, 272  
 Supersymmetrie (SUSY), 615, 616  
 Supraflüssigkeit, 579  
 Supraleiter, 559, 576, 577  
 Suszeptibilität  
 – , elektrische, 280  
 – , magnetische, 322, 573  
 Symmetriebrechung, 614  
 Synchrotron, 319  
  
 Tangentenbussole, 315  
 Tangentialbeschleunigung, 48  
 Tauon, 611  
 technische Arbeit, 195  
 technische Kreisprozesse, 213  
 Teilchen, 27  
 Teilchenbeschleuniger, 81, 319, 430, 600  
 Telegrafengleichungen, 419  
 Telegrafie, 429  
 Temperatur, 174, 178, 204, 239  
 Temperaturgradient, 244  
 Temperaturkoeffizient, 286  
 Temperaturleitfähigkeit, 244  
 Temperaturmessung, 297  
 Temperaturstrahlung, 494  
 Termschema, 523, 530, 531  
 Theory of Everything (TOE), 615  
 thermische Ausdehnung, 176  
 thermische Elektronenemission, 304  
 thermische Neutronen, 602  
 thermische Zustandsgleichung, 181  
 thermische Zustandsgrößen, 178, 186  
 thermodynamisches Gleichgewicht, 216  
 thermoelektrische Effekte, 296  
 Thermoelement, 176, 297  
 thermomagnetische Effekte, 321  
 Thermometer, 174, 178  
 thermonukleare Reaktion, 605  
 Thermosäule, 297  
 Thermospannung, 297  
 THOMSON-Effekt, 320  
 THOMSONSche Schwingungsgleichung, 374  
 Thyristor, 349  
 tiefe Temperaturen, 232  
 Toroid, 314, 606  
 Torsion, 363  
 Torsionsmodul, 138  
 Totalreflexion, 439, 440, 483  
 träge Masse, 53, 254, 259, 512, 514  
 Trägheit, 52, 53, 91  
 Trägheitsellipsoid, 124  
 Trägheitsgesetz, 51, 57, 67, 73  
 Trägheitskraft, 67, 69, 70  
 Trägheitsmoment, 116–119  
 Transformator, 345  
 Transformatorprinzip, 330  
 Transistor, 349, 350, 569  
 Transmissionsgrad, 431, 437, 498  
 Transversalwelle, 398, 400  
 Triode, 347  
 Tripelpunkt, 175, 239  
 Tritium, 581, 605  
 Tröpfchenmodell, 584, 588, 589, 601  
 TSCHERENKOV-Zähler, 418  
 Tunnel-Mikroskop, 557  
 Tunneleffekt, 557, 577, 591  
 Tunnelkontakt, 577  
 turbulente Strömung, 164, 169  
 TYNDALL-Effekt, 432

- Überdruck, 146, 150, 153, 163, 181, 183  
Überlagerung harmonischer Schwingungen, 380, 390  
Überlagerung von Bewegungen, 39, 58  
übersättigter Dampf, 230  
ug-Kerne, 586  
Uhrenparadoxon, 78  
Ultraschall, 407  
Umwandlungswärme, 185, 233  
Unabhängigkeitsprinzip, 39  
Unbestimmtheitsprinzip, 519, 527  
Unschärferelation, 518  
Urknall, 616  
Ursache-Wirkung-Beziehung, 58, 519  
Urspannung, 289, 300  
uu-Kerne, 586
- Valenzband, 563  
Valenzelektron, 528  
VAN-DER-WAALS-Bindung, 132  
VAN-DER-WAALS-Gleichung, 228–231  
VAN'T HOFFSches Gesetz des osmotischen Drucks, 242  
Vektor, 39  
Vektorprodukt, 43, 110  
VENTURI-Düse, 161  
verbotene Zone, 563  
Verbrennungsmotor, 213  
Verdampfungswärme, 233, 235  
Verdrängungsarbeit, 196  
Verdunstung, 237  
Verformung, 134  
Vergrößerung, 458, 460, 461  
Vermehrungsfaktor, 603  
Verschiebungsarbeit, 83, 85, 87, 96, 267, 282  
Verschiebungsdichte, 271, 279, 280  
Verschiebungsstrom, 351  
Versetzung, 142  
Verstärkerschaltung, 378  
Verstärkerstufe, 349, 350  
Verstärkerwirkung, 347  
Vertrauensbereich, 624  
verzweigter Stromkreis, 291  
Vierschichtdiode, 348  
Virialsatz, 362  
virtuelles Bild, 447  
Viskosimeter, 167  
Viskosität, 164  
VOLTAspannung, 296  
Volumenarbeit, 187  
Volumendilatation, 137  
Volumenstrom, 158, 162
- Wahrscheinlichkeit  
– , thermodynamische, 224, 225  
Wärmedurchgang, 247  
Wärmekapazität, 184, 188, 296  
Wärmeleiter, 296  
Wärmeleitung, 243–246  
Wärmemenge, 184  
Wärmepumpe, 212, 214  
Wärmestrahlung, 247, 494  
Wärmestrom, 243, 246  
Wärmetönung, 233  
Wärmeübergang, 226, 246  
Wärmewiderstand, 247  
Wasserstoffbombe, 605  
Wasserwellen, 404, 435  
Watt-Waage, 26, 579  
Weakon, 613, 614  
WEBER-FECHNERSches Gesetz, 413  
Wechselspannung, 333, 335, 340  
Wechselstrom, 335, 340  
Wechselstrombrücke, 345  
Wechselstromwiderstände, 339  
Wechselwirkungen, 49, 587, 612, 613, 616  
Wechselwirkungsgesetz, 61  
WEISSsche Bezirke, 574  
Welle, 394, 514  
Welle-Teilchen-Dualismus, 507  
Wellenfeld, 395  
Wellenfront, 436  
Wellenfunktion, 395, 551  
Wellengleichung, 419  
Wellengruppe, 433  
Wellenlänge, 396  
Wellenmechanik, 516, 551, 555  
Wellenmodell, 444  
– des Atoms, 555  
Wellenoptik, 462  
Wellenpaket, 433  
Wellenwiderstand  
– einer Doppelleitung, 420  
– elektromagnetischer Wellen, 424  
Wellenzahl, 396, 406  
Weltzeit UT, 29  
WHEATSTONE-Brücke, 176, 292, 345  
Widerstand  
– , elektrischer, 285  
– , magnetischer, 325  
Widerstandsbeiwert, 167  
Widerstandsthermometer, 176  
WIEDEMANN-FRANZsches Gesetz, 245, 296  
WIENSches Verschiebungsgesetz, 500, 503  
Winkelbeschleunigung, 45, 46

- Winkelfrequenz, 42  
Winkelgeschwindigkeit, 42, 45  
Wirbelbildung, 167  
Wirbelfeld, 254  
wirbelfreie Strömung, 158  
Wirbelsätze, 158  
Wirbelströme, 353  
Wirbelströmung, 157  
Wirkarbeit, 338  
Wirkleistung, 338, 339  
Wirkung, 86  
Wirkungsgrad, 216  
– der CARNOT-Maschine, 211, 216  
– , thermischer, 211  
Wirkungsquantum, 87, 500  
Wirkungsquerschnitt, 207, 601  
Wirkwiderstand, 338, 340, 341  
Wölbspiegel, 448–450  
Wurfbewegung, 35, 58, 60
- XY-Betrieb, 387
- Zählrohr, 306, 597  
Z-Diode, 348  
ZEEMAN-Effekt, 531, 536, 538  
Zeit, 28  
Zeitdilatation, 78, 356  
Zeiteinheit, 29  
Zeitkonstante, 331  
Zeitmessung, 29, 359  
Zeitrichtung, 220  
Zentralfeld, 254  
Zentralkraft, 254  
Zentrifugalbeschleunigung, 70  
Zentrifugalkraft, 69  
Zentrifugalmoment, 124  
Zentripetalbeschleunigung, 43  
Zentripetalkraft, 54  
Zerfallsgesetz, 593  
Zerfallsreihen, 595  
Zerfallswahrscheinlichkeit, 593  
Zerstrahlung, 608  
Zerstreuungslinse, 452, 456  
Zeton, 613  
ZIOLKOWSKI-Zahl, 106  
zirkular polarisierte Welle, 488  
zirkulare Schwingung, 387  
Zirkulation, 157  
Zufall, 519  
Zufallsstreuung, 621  
zugeschnittene Größengleichung, 24, 542  
Zugfestigkeit, 141, 142  
Zugspannung, 135  
Zugversuch, 142  
Zündspannung, 287, 306, 349  
Zustandsänderungen der Gase, 182, 190–193,  
196, 220  
Zustandsdiagramm, 239  
Zustandsgleichungen der Gase, 182, 228  
Zustandsgröße, 174, 187  
Zwangskraft, 61, 82  
Zweistoffsystem, 240  
Zweiweggleichrichtung, 348  
Zwillingsparadoxon, 79  
Zyklotron, 319, 600