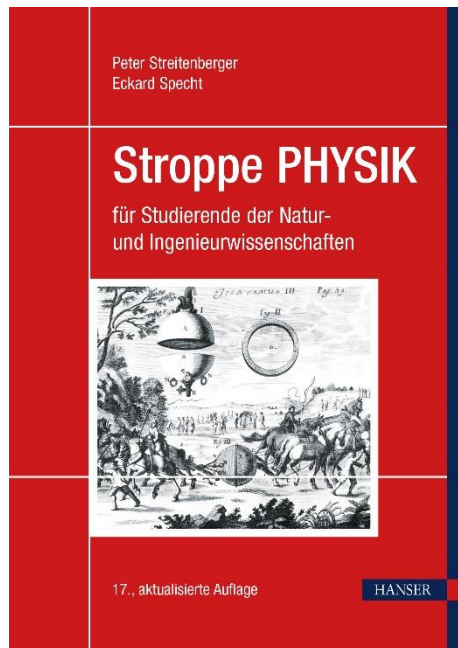


HANSER



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
5	Bewegte Bezugssysteme	66
5.1	Geradlinig beschleunigte Bezugssysteme. Trägheitskräfte	66
5.2	Gleichförmig rotierende Bezugssysteme. Zentrifugalkraft, CORIOLIS-Kraft ..	69
5.3	Inertialsysteme. Relativitätsprinzip der klassischen Mechanik	72
6	Grundzüge der speziellen Relativitätstheorie	74
6.1	Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Die LORENTZ-Transformation	74
6.2	Folgerungen aus der LORENTZ-Transformation	78
6.3	Relativistische Bewegungsgleichung	80
7	Arbeit und Energie	82
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
8	Gravitation	93
8.1	Die KEPLERSchen Gesetze der Planetenbewegung und das Gravitationsgesetz	93
8.2	Arbeit gegen die Schwerkraft. Kosmische Geschwindigkeiten	96
9	Dynamik der Punktmassen-Systeme	98
9.1	Impulserhaltungssatz. Massenmittelpunkt	98
9.2	Die Gesetze des Stoßes	100
9.3	Raketenantrieb	105
10	Statik des starren Körpers	107
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
11	Dynamik des starren Körpers	116
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

12	Die Zustandsformen der Stoffe	128
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

13	Der deformierbare feste Körper	134
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

14	Ruhende Flüssigkeiten und Gase	144
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

15	Strömende Flüssigkeiten und Gase (Strömungsmechanik)	156
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

16	Verhalten der Körper bei Temperaturänderung	174
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
17	Der I. Hauptsatz der Thermodynamik (Energiesatz)	184
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 Zustands- gleichung	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
18	Kinetische Gastheorie.....	197
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
19	Der II. Hauptsatz der Thermodynamik (Entropiesatz)	210
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
20	Reale Gase. Phasenumwandlungen	228
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
21	Ausgleichsvorgänge.....	243
21.1	Wärmeleitung	243
21.2	Wärmeübergang, Wärmedurchgang, Konvektion	246
21.3	Diffusion	248

V Felder

Gravitation. Elektrizität und Magnetismus

22	Das Gravitationsfeld	252
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
23	Das elektrostatische Feld	261
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
24	Das elektrische Feld in Isolatoren (Dielektrika)	277
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
25	Der Gleichstromkreis	284
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
26	Elektrische Leitungsvorgänge in Festkörpern und Flüssigkeiten	294
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
27	Elektrische Leitungsvorgänge im Vakuum und in Gasen	302
27.1	Bewegung freier Ladungsträger im elektrischen Feld	302
27.2	Ladungsträgerinjektion, Katodenstrahlen	304
27.3	Gasentladungen	305
27.4	Plasmaströme	308

28	Das magnetostatische Feld der Dipole und Gleichströme	309
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
29	Das magnetische Feld in Stoffen	322
29.1	Magnetische Polarisation der Stoffe	322
29.2	Magnetisierung der Ferromagnetika. Hysterese	323
29.3	Der magnetische Kreis. Entmagnetisierung	325
30	Elektromagnetische Induktion	328
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
31	Der Wechselstromkreis	335
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
32	Die MAXWELLSchen Gleichungen	351
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
VI	Wellen	
	Mechanische und elektromagnetische Schwingungen und Wellen	
33	Mechanische Schwingungen	358
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
34	Elektrische Schwingungen	373
34.1	Der geschlossene Schwingkreis	373
34.2	Strom- und Spannungsresonanz	375
34.3	Erzeugung ungedämpfter elektrischer Schwingungen	378
35	Überlagerung harmonischer Schwingungen	380
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
36	Allgemeine Wellenlehre	394
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
37	Schallwellen (Akustik)	407
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
38	Elektromagnetische Wellen	419
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
39	Einfluss von Stoffen auf die Wellenausbreitung	431
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

40	Strahlenoptik (Geometrische Optik)	443
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
41	Wellenoptik	462
41.1	Interferenz. Interferenzbedingungen	462
41.2	Interferenzen gleicher Neigung und gleicher Dicke	464
41.3	Beugung (Diffraktion). 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
VII	Quanten	
	Struktur und Eigenschaften der Materie	
42	Die Gesetze der Strahlung	494
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
43	Der Welle-Teilchen-Dualismus der Mikroobjekte	507
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

44	Atombau und Spektren	520
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
45	Wellenmechanik	551
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
46	Elektrische und magnetische Eigenschaften von Festkörpern	559
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
47	Atomkerne	580
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

48	Die natürliche Radioaktivität	590
48.1	Der α -Zerfall der schweren Kerne	590
48.2	Der β -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
49	Künstliche Kernumwandlungen	599
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
50	Elementarteilchen	607
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
A	ANHANG: Fehlerrechnung (Messabweichungen)	618
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
Index	637

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 Meter	m	(vgl. 3.1)
Einheit der Masse:	das Kilogramm	kg	(vgl. 4.3)
Einheit der Zeit:	die Sekunde	s	(vgl. 3.1)
Einheit der elektrischen Stromstärke:	das Ampere	A	(vgl. 28.6)
Einheit der Temperatur:	das Kelvin	K	(vgl. 16.1)
Einheit der Stoffmenge:	das Mol	mol	(vgl. 16.4)
Einheit der Lichtstärke:	die Candela	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 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	Vorsatz- zeichen	Faktor	Vorsatz	Vorsatz- zeichen	Faktor	Vorsatz	Vorsatz- zeichen	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 ¹	h	10^2	Femto	f	10^{-15}
Zetta	Z	10^{21}	Deka ¹	da	10	Atto	a	10^{-18}
Exa	E	10^{18}	Dezi ¹	d	10^{-1}	Zepto	z	10^{-21}
Peta	P	10^{15}	Zenti ¹	c	10^{-2}	Yokto	y	10^{-24}
Tera	T	10^{12}	Milli	m	10^{-3}	Ronto	r	10^{-27}
Giga	G	10^9	Mikro	μ	10^{-6}	Quekto	q	10^{-30}

¹ 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 LT^{-1} (im Unterschied zu ihrer Einheit Meter/Sekunde), die Kraft $F = ma$ die Dimension MLT^{-2} , die Energie die Dimension ML^2T^{-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.

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 ϑ (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.

■ 2.3 Das SI-Einheitensystem

Im SI sind mit dem Caesium-Frequenzstandard f_{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}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)
 $h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}\text{ Js}$ ($\text{Js} = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$)
- **Elementarladung** (vgl. 23.1)
 $e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}\text{ C}$ ($\text{C} = \text{As}$)
- **BOLTZMANN-Konstante** (vgl. 18.2)
 $k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23}\text{ JK}^{-1}$ ($\text{JK}^{-1} = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$)
- **AVOGADRO-Konstante** (vgl. 18.1)
 $N_{\text{A}} = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}\text{ mol}^{-1}$
- das **photometrische Strahlungsäquivalent** K_{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 γ (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_{A} (s. 18.1) und das photometrische Strahlungsäquivalent K_{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_{Cs} und c folgt daraus die *Definition* $1 \text{ kg} = 1,475\,521 \cdot 10^{40} h f_{Cs} / c^2$. Für die sieben Basiseinheiten im neuen SI ergeben sich so die folgenden Definitionen:

Sekunde (s)	$1 \text{ s} = 9\,192\,631\,770 / f_{Cs}$
Meter (m)	$1 \text{ m} = (c/299\,792\,458) \text{ s} = 30,663\,318 c / f_{Cs}$
Kilogramm (kg)	$1 \text{ kg} = (h/6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}) \text{ m}^{-2} \text{ s} = 1,475\,521 \cdot 10^{40} h f_{Cs} / c^2$
Ampere (A)	$1 \text{ A} = (e/1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}) \text{ s}^{-1} = 6,789\,687 \cdot 10^8 f_{Cs} e$
Kelvin (K)	$1 \text{ K} = (1,380\,649 \cdot 10^{-23} / k) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} = 2,266\,665 f_{Cs} h / k$
Mol (mol)	$1 \text{ mol} = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23} / N_A$
Candela (cd)	$1 \text{ cd} = (K_{cd}/683) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1} = 2,614\,830 \cdot 10^{10} f_{Cs}^2 h K_{cd}$

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 $I = U/R_H$ aus der mittels des JOSEPHSON-Effekts gemessenen Spannung U und dem Quanten-HALL-Widerstand R_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	$l_p = \sqrt{\hbar\gamma/c^3} = 1,616 \cdot 10^{-35} \text{ m}$
PLANCK-Zeit	$t_p = l_p/c = \sqrt{\hbar\gamma/c^5} = 5,391 \cdot 10^{-44} \text{ s}$
PLANCK-Masse	$m_p = \sqrt{\hbar c/\gamma} = 2,176 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$
PLANCK-Temperatur	$T_p = m_p c^2/k = \sqrt{\hbar c^3/k} = 1,417 \cdot 10^{32} \text{ K}$

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 λ 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).

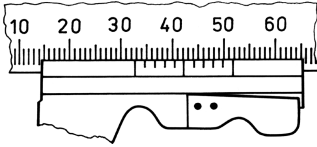


Bild 3.1 Nonius an einer geraden Skala. Ablesung: 32,7. Die Dezimalstelle 7 ergibt sich daraus, dass der 7. Teilstrich der kurzen (unteren) Hilfsskala, des Nonius, genau mit einem Teilstrich der (oberen) Hauptskala zusammenfällt.

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}Cs -Atoms (s. 44.7) und hat eine Genauigkeit von 10^{-14} , das entspricht einer Abweichung von 1 s in ≈ 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
Basisseinheit, 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
BOHRSCHE RADIUS, 123, 526
BOHRSCHE Atommodell, 123, 524, 527, 555
BOHRSCHE Korrespondenzprinzip, 527
BOHRSCHE Magnetron, 533
BOLTZMANN-Gleichung, 224, 549
BOLTZMANN-Konstante, 25, 175, 200, 225
BOLTZMANNSCHE 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
CLAUSIUS-CLAPEYRONSCHE Gleichung, 235, 238
CLAUSIUS-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
- Energiemethode, 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
- Erdrehung, 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
- Fettfleckphotometer, 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
 Katakaustik, 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 Zaun, 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