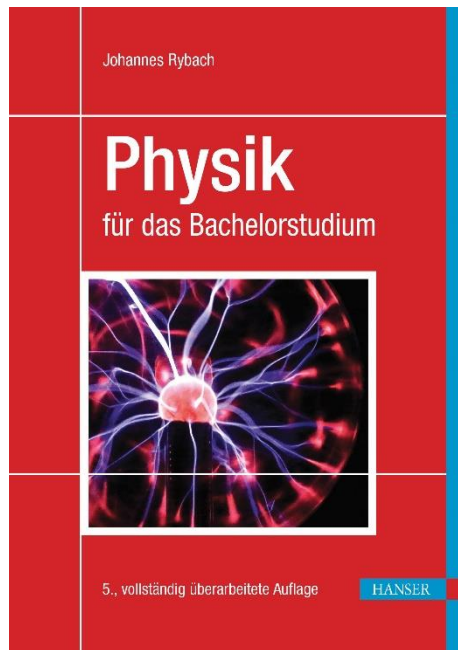


HANSER



Leseprobe

zu

Physik für das Bachelorstudium

von Johannes Rybach

Print-ISBN: 978-3-446-47678-3

E-Book-ISBN: 978-3-446-47754-4

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446476783>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Weil Physik die grundlegende Naturwissenschaft ist, gehört sie in vielen Studiengängen zu den Basisfächern. Manchen Studierenden flößt ihre thematische Breite und theoretische Tiefe allerdings großen Respekt ein – verständlich bei dem oft lückenhaften Physikunterricht in der Schule.

Zusätzlich hat sich das Studium geändert: Die kompakte Bachelor-Ausbildung verlangt ein intensives Selbststudium, und in den spezialisierten Master-Studiengängen werden anschließend auch an Fachhochschulen wissenschaftliche Grundlagenkenntnisse vorausgesetzt. Darum sind selbsterklärende, also anschauliche und verständliche Lehrbücher immer wichtiger geworden.

Dieses Buch unterstützt Sie, liebe Leserin und lieber Leser, auf vielfältige Weise beim Studium der Physik:

- Die Darstellung ist sprachlich lebendig und begrifflich prägnant. Natürlich gehören auch Gleichungen und Formeln dazu, die jeweils sorgfältig eingeführt und verständlich erläutert werden. Die übersichtliche Gestaltung der Buchseiten und ihr zweifarbiger Druck sollen die Lesbarkeit noch erhöhen.
- Der Stoff ist sinnvoll ausgewählt – auch im Hinblick auf Prüfungen – und übersichtlich strukturiert. Viele rot markierte Verweise (**Abschnitt X**) betonen außerdem Zusammenhänge und Analogien zwischen den Kapiteln: Diese Verbindungen gehören ja gerade zu den Stärken der Physik.
- Die sogenannte moderne Physik wird in dieser elementaren Darstellung nicht ausgeklammert, denn viele technische Anwendungen nutzen bereits Quanteneffekte oder benötigen die Relativitätstheorie. Der wachsenden Bedeutung optischer Technologien wurde ebenfalls durch ein eigenes Kapitel Rechnung getragen.
- Am Ende jedes Kapitels stehen Testfragen und exemplarische Übungsaufgaben. Sie sollen wichtige Anwendungen der Gesetze demonstrieren und das Verständnis prüfen sowie vertiefen. Die ausführlichen Musterlösungen (im Anhang) vermitteln die typischen Lösungsideen, Lösungsstrategien und Lösungswege für solche Probleme.

In solchen Kästen finden Sie physikalische Gesetze und Definitionen.



In solchen Kästen finden Sie vollständig durchgerechnete Beispiele zur Erläuterung der Gesetze und Gleichungen, und zwar unmittelbar nach ihrer Einführung.



In weiteren Kästen finden Sie zusätzliche Infos. Eilige Leser könnten sie übergehen, aber vielleicht wäre das schade: Sie ergänzen spezielle Aspekte, erläutern bestimmte Anwendungen, und manche sind einfach nur interessant ...



Klassische Missverständnisse, häufige Denkfehler und typische Verständnisprobleme werden jeweils in diesem Kasten klargestellt.

Dieses Buch ist vollständig in dem Sinne, dass alle wesentlichen Informationen für Studierende mit Physik im Nebenfach darin zu finden sind. Vieles muss aber gerafft oder als Übersicht dargestellt werden; dann verweisen Zitate auf die [Quellen], zum Beispiel Lehr- und Handbücher der Mathematik, Technik oder Chemie. Außerdem sind ergänzende Physikbücher und Aufgabensammlungen im Anhang zusammengestellt.

■ Vorwort zur 5. Auflage

Als dieses Physik-Lehrbuch erschien, war es das erste für die damals neuen Bachelor-Studiengänge. Inzwischen darf es als Standardwerk für die Physiklehre im Nebenfach gelten, insbesondere im Grundstudium der Ingenieurwissenschaften.

Für die fünfte Auflage unter dem neuen Titel „Physik für das Bachelorstudium“ wurde der Inhalt gründlich überarbeitet und aktualisiert. Neben kleineren Fehlerkorrekturen ergab sich dabei die Gelegenheit, das Layout an den aktuellen Hanser-Standard anzupassen. So werden die durchgerechneten Zahlenbeispiele (Icon „Auge“) und die zusätzlichen Infos (Icon „Pfeil“) in übersichtlichen Kästen dargestellt. Besonders hilfreich sind vielleicht diejenigen mit dem Achtung-Icon: klassische Missverständnisse, häufige Denkfehler und typische Verständnisprobleme werden jeweils an der passenden Stelle im Text klargestellt.

Schließlich sind im Buch einige *Anmerkungen* eingefügt, wie schon an dieser Stelle mein *Dank*: Er gilt vor allem meiner Familie für Verständnis und Geduld, meinen Studierenden für Fragen und Rückmeldungen, und nicht zuletzt Frau Natalia Silakova und Frau Christina Kubiak im Carl Hanser Verlag für die sehr gute Zusammenarbeit.

Unverändert geblieben ist die didaktische Ausrichtung des Lehrbuches: Es wendet sich an Studierende, die ohne Vorkenntnisse in Physik einsteigen müssen, aber motiviert dabeibleiben sollen – im besten Fall sogar mit Freude an neuen Erkenntnissen und interessanten Zusammenhängen. Ihnen allen wünsche ich viel Erfolg bei der Arbeit mit „Physik für das Bachelorstudium“.

Langenfeld, im März 2023

Johannes Rybach

Inhalt

Vorwort	V
1 Einstieg	1
1.1 Motivation	1
1.2 Physikalische Größen	2
1.3 Maßsystem und Standards	2
1.4 Größenordnungen	7
1.5 Messgenauigkeit	10
1.6 Vektoren und Koordinaten	13
Zusammenfassung: Einstieg	16
Testfragen zu Kapitel 1	17
Übungsaufgaben zu Kapitel 1	18
2 Mechanik	21
2.1 Kinematik	21
2.1.1 Eindimensionale Bewegungen	21
2.1.1.1 Geschwindigkeit	22
2.1.1.2 Beschleunigung	24
2.1.1.3 Bewegungsgleichung	25
2.1.1.4 Der freie Fall	27
2.1.2 Bewegungen in zwei und drei Dimensionen	29
2.1.2.1 Überlagerung eindimensionaler Bewegungen	29
2.1.2.2 Bezugssysteme und Transformationen	31
Zusammenfassung: Kinematik	33

2.2	Dynamik	33
2.2.1	NEWTONSche Axiome	34
2.2.1.1	Trägheitsgesetz	34
2.2.1.2	Aktionsgesetz	35
2.2.1.3	Reaktionsgesetz	36
2.2.2	Folgerungen aus den NEWTONSchen Axiomen	36
2.2.2.1	Kraft und Impuls	36
2.2.2.2	Abgeschlossenes System und Impulserhaltungssatz ...	37
2.2.3	Mechanische Kräfte	40
2.2.3.1	Trägheitskraft	40
2.2.3.2	Gewichtskraft	40
2.2.3.3	Federkraft und HOOKESches Gesetz	42
2.2.3.4	Reibungskraft	43
	Zusammenfassung: Dynamik	45
2.3	Arbeit, Energie und Leistung	45
2.3.1	Mechanische Arbeit	45
2.3.2	Potenzielle Energie	46
2.3.3	Kinetische Energie	48
2.3.4	Energieerhaltungssatz der Mechanik	48
2.3.5	Stoßgesetze	50
2.3.6	Leistung und Wirkungsgrad	51
	Zusammenfassung: Arbeit, Energie und Leistung	53
2.4	Kinematik und Dynamik der Kreisbewegung	54
2.4.1	Grundbegriffe der Kreisbewegung	54
2.4.2	Radialbeschleunigung	56
2.4.3	Radialkräfte	59
2.4.4	CORIOLIS-Beschleunigung und -Kraft	60
	Zusammenfassung: Kreisbewegung	63
2.5	Rotation starrer Körper	64
2.5.1	Drehmoment	64
2.5.2	Schwerpunkt, Gleichgewicht und Statik	66
2.5.3	Trägheitsmoment	68
2.5.4	Rotationsenergie und Drehimpuls	71
	Zusammenfassung: Rotation starrer Körper	73

2.6	Schwingungen und Wellen	74
2.6.1	Freie ungedämpfte Schwingungen	74
2.6.2	Freie gedämpfte Schwingungen	79
2.6.3	Erzwungene Schwingungen	80
2.6.4	Überlagerung von Schwingungen	83
2.6.4.1	Räumliche Überlagerung	83
2.6.4.2	Zeitliche Überlagerung	85
2.6.4.3	Gekoppelte Schwingungen	86
2.6.5	Harmonische Wellen	87
	Zusammenfassung: Schwingungen und Wellen	91
2.7	Gravitation und Himmelsmechanik	92
2.7.1	KEPLERSche Gesetze	92
2.7.2	NEWTONSches Gravitationsgesetz	94
2.7.3	Gravitationsfeld	98
2.7.4	Ergebnisse der EINSTEINSchen Relativitätstheorien	99
2.7.4.1	Spezielle Relativitätstheorie	99
2.7.4.2	Allgemeine Relativitätstheorie	104
	Zusammenfassung: Gravitation und Himmelsmechanik	105
2.8	Flüssigkeiten und Gase	106
2.8.1	Druck	106
2.8.1.1	Kolbendruck	106
2.8.1.2	Schweredruck	107
2.8.1.3	Luftdruck	108
2.8.1.4	Auftrieb	110
2.8.2	Oberflächenspannung	112
2.8.3	Strömungen	112
2.8.3.1	Reibungsfreie Strömungen	112
2.8.3.2	Viskose Strömungen	114
	Zusammenfassung: Flüssigkeiten und Gase	118
	Testfragen zu Kapitel 2	118
	Übungsaufgaben zu Kapitel 2	120

3	Thermodynamik	127
3.1	Temperatur	127
3.1.1	Skalen und Fixpunkte	128
3.1.2	Thermische Ausdehnung	130
3.1.3	Temperaturmessung	133
	Zusammenfassung: Temperatur	134
3.2	Wärme	135
3.2.1	Wärmekapazität	135
3.2.2	Aggregatzustände	137
3.2.3	Wärmetransport	142
3.2.3.1	Konvektion	142
3.2.3.2	Wärmeleitung	143
3.2.3.3	Wärmestrahlung	146
	Zusammenfassung: Wärme	151
3.3	Ideale Gase	151
3.3.1	Molare Größen	152
3.3.2	Zustandsgleichung	153
3.3.3	Kinetische Gastheorie	155
3.3.3.1	Druck	156
3.3.3.2	Temperatur und Energie	158
3.3.3.3	MAXWELLSche Geschwindigkeitsverteilung und BOLTZMANN-Faktor	158
	Zusammenfassung: Ideale Gase	160
3.4	Zustandsänderungen und erster Hauptsatz	160
3.4.1	Volumenänderungsarbeit	160
3.4.2	Erster Hauptsatz	162
3.4.3	Zustandsänderungen	163
3.4.3.1	Isotherme Zustandsänderung	163
3.4.3.2	Isochore Zustandsänderung	165
3.4.3.3	Isobare Zustandsänderung	166
3.4.3.4	Adiabatische Zustandsänderung	167
	Zusammenfassung: Zustandsänderungen und erster Hauptsatz	169
3.5	Kreisprozesse und zweiter Hauptsatz	169
3.5.1	Kreisprozess von CARNOT	170

3.5.2	Reversibilität und Wirkungsgrad	173
3.5.3	Kreisprozesse bei Motoren	175
3.5.4	Zweiter Hauptsatz	176
3.5.5	Entropie	178
	Zusammenfassung: Kreisprozesse und zweiter Hauptsatz	182
	Testfragen zu Kapitel 3	183
	Übungsaufgaben zu Kapitel 3	184
4	Elektrizität und Magnetismus	189
4.1	Elektrostatik	189
4.1.1	Elektrische Ladungen und die COULOMB-Kraft	189
4.1.2	Elektrisches Feld	192
4.1.3	Potenzial und Spannung	196
4.1.4	Kondensator und Kapazität	199
4.1.4.1	Plattenkondensator	199
4.1.4.2	Dielektrikum im Kondensator	201
4.1.4.3	Kondensator als Energiespeicher	203
	Zusammenfassung: Elektrostatik	205
4.2	Strom und Widerstand	205
4.2.1	Stromstärke und Stromdichte	206
4.2.2	Widerstand	207
4.2.3	Stromkreise und Stromverzweigungen	213
	Zusammenfassung: Strom und Widerstand	219
4.3	Magnetfeld	219
4.3.1	Magnetische Phänomene	219
4.3.2	Strom und Magnetfeld	221
4.3.3	Materie im Magnetfeld	224
4.3.4	Strom und magnetische Kraft	227
4.3.5	LORENTZ-Kraft	230
	Zusammenfassung: Magnetfeld	233
4.4	Elektromagnetische Induktion	234
4.4.1	Induktion durch Bewegung	234
4.4.2	Induktionsgesetz	236
4.4.3	LENZsche Regel	237

4.4.4	Selbstinduktion	239
4.4.5	Energie des Magnetfeldes	241
	Zusammenfassung: Elektromagnetische Induktion	242
4.5	Wechselstrom	242
4.5.1	Generator und Transformator	243
4.5.2	Wechselstromwiderstand	245
4.5.3	Phasenbeziehungen im Wechselstromkreis	248
	Zusammenfassung: Wechselstrom	251
4.6	Elektromagnetische Schwingungen und Wellen	252
4.6.1	Schwingkreis	252
4.6.2	MAXWELLSche Gleichungen	255
4.6.3	Elektromagnetische Wellen	257
4.6.3.1	Abstrahlung	257
4.6.3.2	Ausbreitung	258
4.6.3.3	Eigenschaften	260
	Zusammenfassung: Elektromagnetische Schwingungen und Wellen ..	263
4.7	Grundlagen der Elektronik	264
4.7.1	Elektronen im Vakuum	264
4.7.1.1	Glühelektrischer Effekt	264
4.7.1.2	Beschleunigung im elektrischen Feld	266
4.7.1.3	Ablenkung im magnetischen Feld	268
4.7.2	Elektronen in Gasen	269
4.7.3	Ladungen in Flüssigkeiten	271
4.7.4	Elektronen in Metallen	273
4.7.5	Ladungsträger in Halbleitern	275
4.7.5.1	Eigenleitung	275
4.7.5.2	Störstellenleitung	276
4.7.5.3	pn-Übergang	277
4.7.5.4	Halbleiterdioden	278
4.7.5.5	Transistoren	279
	Zusammenfassung: Grundlagen der Elektronik	281
	Testfragen zu Kapitel 4	282
	Übungsaufgaben zu Kapitel 4	284

5	Optik	289
5.1	Grundlagen der Strahlenoptik	289
5.1.1	Lichtausbreitung	290
5.1.2	Reflexion	292
5.1.3	Brechung und Totalreflexion	295
	Zusammenfassung: Grundlagen der Strahlenoptik	299
5.2	Strahlenoptische Abbildungen	300
5.2.1	Eigenschaften von Linsen	300
5.2.2	Abbildungen mit Linsen	302
5.2.3	Linsensysteme und Abbildungsfehler	305
	Zusammenfassung: Strahlenoptische Abbildungen	307
5.3	Strahlenoptische Instrumente	307
5.3.1	Kamera und Auge	307
5.3.2	Fernrohre	310
5.3.3	Mikroskop	312
	Zusammenfassung: Strahlenoptische Instrumente	314
5.4	Grundlagen der Wellenoptik	315
5.4.1	Interferenz und Kohärenz	315
5.4.2	Wellenausbreitung	319
5.4.3	Beugung	320
	Zusammenfassung: Grundlagen der Wellenoptik	322
5.5	Anwendungen der Wellenoptik	323
5.5.1	Beugungsbegrenztes Auflösungsvermögen	323
5.5.2	Beugungsgitter	326
5.5.3	Holografie	328
5.5.4	Interferometrie	332
	Zusammenfassung: Anwendungen der Wellenoptik	333
5.6	Polarisationsoptik	334
5.6.1	Grundbegriffe	334
5.6.2	Erzeugung polarisierten Lichtes	335
5.6.3	Anwendungen polarisierten Lichtes	338
	Zusammenfassung: Polarisationsoptik	339
	Testfragen zu Kapitel 5	339
	Übungsaufgaben zu Kapitel 5	341

6	Quanten und Atome	345
6.1	Welle-Teilchen-Dualismus	345
6.1.1	Quantenoptik	346
6.1.1.1	Fotoeffekt	346
6.1.1.2	Eigenschaften von Photonen	350
6.1.1.3	COMPTON-Effekt	350
6.1.2	Materiewellen	351
6.1.3	HEISENBERGSche Unschärferelation	353
	Zusammenfassung: Welle-Teilchen-Dualismus	356
6.2	Atomhülle	357
6.2.1	RUTHERFORDSches Planetenmodell	357
6.2.2	BOHRsches Atommodell	358
6.2.3	Quantenzahlen und das PAULI-Prinzip	361
6.2.4	Wellenmodell und Quantenmechanik	365
	Zusammenfassung: Atomhülle	371
6.3	Quanten-Emission und -Absorption	371
6.3.1	Atomspektren	372
6.3.2	Laser	374
6.3.2.1	Stimulierte Emission	375
6.3.2.2	Besetzungsumkehr	376
6.3.2.3	Resonator	377
6.3.2.4	Rubin- und Helium-Neon-Laser	377
6.3.2.5	Eigenschaften und Anwendungen	379
6.3.3	Röntgenstrahlung	381
6.3.3.1	Bremsspektrum	381
6.3.3.2	Charakteristisches Röntgenspektrum	382
6.3.3.3	Anwendungen	383
	Zusammenfassung: Quanten-Emission und -Absorption	384
6.4	Festkörper	385
6.4.1	Bindung und Struktur	385
6.4.2	Bändermodell	387
6.4.3	FERMI-Energie	389
6.4.4	Elektronen- und Löcherleitung	390

6.4.5 Halbleiter-Bauelemente	393
Zusammenfassung: Festkörper	395
6.5 Atomkern	395
6.5.1 Nukleonen	396
6.5.2 Masse und Massendefekt	398
6.5.3 Radioaktivität	400
6.5.3.1 Strahlungen	401
6.5.3.2 Kernumwandlungen	403
6.5.3.3 Aktivität und Dosis	406
6.5.3.4 Strahlungsnachweis	408
6.5.4 Kernenergie	410
6.5.4.1 Kernspaltung	410
6.5.4.2 Kernfusion	412
Zusammenfassung: Atomkern	415
Testfragen zu Kapitel 6	416
Übungsaufgaben zu Kapitel 6	417
Anhang	421
Nützliche mathematische Beziehungen	421
Quellen- und Literaturverzeichnis	425
Verzeichnis der Bildquellen und Bildautoren	427
Index	429

Auf plus.hanser-fachbuch.de finden Sie zu allen Testfragen und Übungsaufgaben ausführliche Antworten und Lösungen.

1

Einstieg

■ 1.1 Motivation

Aus welchem Grund greifen Sie zu diesem Physikbuch? Möchten Sie nur die Prüfung in einem Nebenfach bestehen? Interessiert Sie ein ganz spezielles Thema wie Wellenoptik oder Atomphysik? Brauchen Sie lediglich Hintergrundwissen für ein technisches Problem?

Leider, so werden Sie dann feststellen, erreicht man in der Physik mit Nachschlagen und Auswendiglernen nicht viel: Alle Gebiete sind miteinander verknüpft, und noch die modernste Quantentheorie baut auf der klassischen Mechanik auf. Genau das ist der Vorteil, sagen die Physiker: Man kommt mit dem Verständnis weniger Prinzipien aus, um die gesamte Vielfalt der Natur zu verstehen. Auch aus diesem Grund ist die Physik die Basis vieler anderer Wissenschaften geworden.

Außerdem hat sich ihre Arbeitsweise als erfolgreich und vorbildlich erwiesen: Aus der Fülle der *Phänomene* werden *Gesetze* abgeleitet und vorzugsweise in der klaren Sprache der *Mathematik* formuliert. Sie bilden den Kern einer *Theorie*, die anschließend durch *Experimente* überprüft wird. So entstehen *Modelle*, die naturgemäß nur Näherungen oder Teilaspekte der Wirklichkeit darstellen. Dennoch ermöglichen sie Vorhersagen für den Ablauf *physikalischer Prozesse* oder sogar für neuartige Phänomene. Auch *technische Anwendungen* können auf dieser Basis entwickelt werden.

Vielleicht müssen Sie sich also gründlicher mit der Physik beschäftigen, als Sie ursprünglich vorhatten. Das wird sich lohnen, denn die Physik vermittelt Kenntnisse und Konzepte, die über das Studium hinaus für eine lange Berufspraxis gültig bleiben.

■ 1.2 Physikalische Größen

Die Physik ist keineswegs „Angewandte Mathematik“ (obwohl der Physiker die Mathematik ständig anwendet): Reine Zahlenwerte ergeben in der Naturbeschreibung keinen Sinn, weil die Eigenschaften von *Dingen* und die Konsequenzen von *realen Vorgängen* beschrieben werden sollen. Gegenstände der Physik sind also **Größen**, die als Produkt eines *Zahlenwertes* und einer *Einheit* (auch: „Maßzahl“ und „Maßeinheit“) dargestellt werden:

$$\text{Physikalische Größe} = \text{Zahlenwert} \cdot \text{Einheit}$$

Die beiden Faktoren einer Größe G werden vereinbarungsgemäß durch unterschiedliche Klammern gekennzeichnet:

$$G = \{G\} \cdot [G]$$

Offensichtlich ist die **Einheit** elementar für konkrete Angaben wie etwa *Messergebnisse*: Die Angabe „100 m“ benennt zum Beispiel eine *Länge* (auch „*Strecke*“ oder „*Weg*“) und bezeichnet einhundert Vielfache der Längeneinheit *Meter*. Die Größe „100 s“ gibt dagegen ein *Zeitintervall* an, währenddessen einhundert Mal die Zeiteinheit *Sekunde* verstreicht.



Einheiten

Damit kein Missverständnis entstehen kann: Eine eckige Klammer bedeutet „Die Einheit von ... ist ...“. Für eine Länge gilt zum Beispiel: $[l] = \text{m}$; für ein Zeitintervall $[\Delta t] = \text{s}$. (Manchmal sieht man die *Einheit* statt der Größe in der Klammer; das ist *falsch*.)

■ 1.3 Maßsystem und Standards

Für genaue und überall vergleichbare Größenangaben müssen die Einheiten international definiert und durch *Normale* bzw. *Standards* repräsentiert sein. Das Erstere leistet seit 1960 das **Internationale Einheitensystem** („Système International d’Unités“, darum auch abgekürzt **SI**); mittlerweile ist es in der Europäischen Union und den meisten anderen Staaten sogar gesetzlich vorgeschrieben. Die *Normierung* ist Aufgabe staatlicher Metrologie-Institute (die nicht Wetter-, sondern Messkunde betreiben). In Deutschland hat den gesetzlichen Auftrag dazu die *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB) in Braunschweig.



Größen

Verwenden Sie bei Rechnungen *immer* Größen und *vorzugsweise* SI-Einheiten. Das ist nicht nur physikalisch korrekt, sondern bietet bei der Umformung komplizierter Gleichungen auch eine wertvolle Ergebniskontrolle. Viele Beispiele in den folgenden Kapiteln zeigen, dass über die Basiseinheiten auch scheinbar schwierige Zusammenhänge einfach herzustellen sind.

Eine grundlegende Änderung hat das SI im Jahr 2019 erfahren: Sämtliche Einheiten werden seitdem auf *Naturkonstanten* zurückgeführt, die universal und unabhängig von Messmethoden gelten. Insbesondere kann nun auf das „Urkilogramm“ (Bild 1.1) verzichtet werden, das seit 1889 unter größter Sorgfalt aufbewahrt wird, aber dennoch rund 50 Mikrogramm (Tabelle 1.3) „leichter“ geworden ist. Nach der Ablösung des „Urmeter“ im Jahr 1960 ist damit das letzte anschauliche Normal nur noch ein Museumstück.



Bild 1.1

Das „Urkilogramm“, ein Zylinder aus Platin-Iridium, diente bis 2019 als Massenormal. Trotz sorgfältigster Aufbewahrung unter Glasglocken verlor er an Substanz.

In der Mechanik ([Kapitel 2](#)) werden lediglich drei SI-Einheiten benötigt: neben den oben erwähnten Meter und Sekunde noch das *Kilogramm* zur Angabe einer **Masse**. Diese drei werden als *Basiseinheiten* für die entsprechenden **Basisgrößen** bezeichnet.



Kilogramm

Die Basiseinheit der Masse ist *nicht* das Gramm. „g“ wurde zwar früher zusammen mit „cm“ im *cgs-System* verwendet, aber in *metrischen Systemen* wie dem früheren MKS und dem heutigen SI ist nur das Kilogramm sinnvoll.

Die SI-Einheit der Zeit ist die Sekunde. Sie kann durch „Atomuhren“ mit sehr hoher Genauigkeit standardisiert werden. Bild 1.2 zeigt die derzeit modernste „Cäsium-Fontäne“ der PTB, zusammen mit ihrem Zwilling, die sich gegenseitig kontrollieren. In einer solchen „Springbrunnenuhr“ werden die Cäsiumatome mithilfe von Laserstrahlen extrem gekühlt (Info 3.1) und dadurch verlangsamt, sodass sich die Genauigkeit nochmals deutlich erhöht. Daher beträgt die Gangabweichung inzwischen (Stand 2020) nur 1 Sekunde in 160 Millionen Jahren.



Bild 1.2

Die offizielle Zeitangabe wird in Deutschland von Cäsium-Atomuhren der PTB abgeleitet. Das Bild zeigt das modernste Zwillingsspaar mit der höchsten bisher erreichten Genauigkeit.

Die PTB betreibt übrigens auch einen Zeitsender für die Verbreitung des Zeitnormals. Jedermann kann also mit einer „Funkuhr“ unmittelbar diesen Standard nutzen. Unter anderem beruht die Präzision der Positionsbestimmung und Navigation auf der Erde – z. B. mit dem Global Positioning System (GPS) – letztlich auf der Genauigkeit von Atomuhren.

Wegen des exakten Zeitnormals ist die Einheit der **Länge** 1 m seit 1983 als die Strecke definiert, die das Licht im Vakuum in der Zeit $1/299\,792\,458$ s zurücklegt. Dazu musste die **Lichtgeschwindigkeit** c_0 als *Naturkonstante* exakt festgelegt werden [CODATA]:

$$\text{Vakuum-Lichtgeschwindigkeit: } c_0 = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$



Info 1.1: Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Dass es sich tatsächlich um eine Konstante handelt, begründete ALBERT EINSTEIN (1879 – 1955) in seiner „Speziellen Relativitätstheorie“ (Abschnitt 2.7.4.1). Erstaunlicherweise kann c_0 nicht nur nicht übertroffen werden, sondern bleibt auch bei der Überlagerung von Geschwindigkeiten konstant – das wurde experimentell gezeigt (Info 5.4).

Bei einem materiellen Gegenstand, der mit einer bestimmten, im Vergleich zu c_0 kleinen Geschwindigkeit in Fahrtrichtung aus einem fahrenden Auto geworfen wird, addiert sich selbstverständlich die Fahrzeuggeschwindigkeit zur Wurfgeschwindigkeit. Für das *Licht* der Autoscheinwerfer gilt das aber *nicht*; es breitet sich genauso schnell aus wie bei einem stehenden Auto!

In der gesamten Physik benötigt man neben den drei mechanischen Basisgrößen des SI nur noch vier weitere. Alle sieben sind mit ihren Einheiten und Bezeichnungen in Tabelle 1.1 zusammengefasst:

Tabelle 1.1 Basisgrößen und Basiseinheiten des SI

Art der Basisgröße	Name der Basiseinheit	Formelzeichen für die Basisgröße	Symbol für die Basiseinheit
Länge	Meter	l	m
Zeit	Sekunde	t	s
Masse	Kilogramm	m	kg
Elektrische Stromstärke	Ampere	I	A
Temperatur	Kelvin	T	K
Lichtstärke	Candela	I_V	cd
Stoffmenge	Mol	n	mol

Falls Sie in der Tabelle so wichtige Größen wie „Kraft“ oder „elektrische Spannung“ vermissen: Diese sind nicht elementar und können mit ihren Einheiten aus den Basisgrößen *abgeleitet* werden.



Symbole

Manche physikalischen Größen werden je nach Zusammenhang mit *unterschiedlichen Symbolen* bezeichnet. Zum Beispiel kommt die Einheit „Meter“ in diesem Buch zusammen mit folgenden Buchstaben vor: x, y, z (kartesische Koordinate), a, b, c (Seite eines Dreiecks), r, R (Kreisradius), h (Höhe), l (Länge), d (Durchmesser oder Abstand) und s (Wegstrecke). Andererseits ist die Vielfalt lateinischer Buchstaben begrenzt (griechische werden zusätzlich benutzt, vor arabischen und kyrillischen schrecken die meisten Physiker zurück). Darum können einige Symbole (z. B. E, n, c) *unterschiedliche Größen* bezeichnen! Ihre Bedeutung erschließt sich aber jeweils aus dem Zusammenhang.



Beispiel 1.1: Abgeleitete und SI-fremde Einheiten

Das Licht legt pro Sekunde einen Weg von etwa 300 Millionen Metern zurück. (Dies gilt, wie oben angegeben, im Vakuum, z. B. im Weltall. In Luft ist die Strecke unwesentlich geringer. Die Ursache dafür wird in [Abschnitt 5.1.1](#) erläutert.) Die abgeleitete Einheit für die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit ist also:

$$[c_0] = \text{m} / \text{s}$$

Das gilt für Geschwindigkeiten allgemein. Während allerdings bei Wellen – auch Licht ist eine Wellenerscheinung, siehe [Abschnitt 5.4](#) – häufig das Symbol c verwendet wird, ist in der Mechanik das Symbol v üblich:

$$[v] = \text{m} / \text{s}$$

Als SI-fremde Maßeinheit, die aber vertraut und anschaulich ist, kann man außerdem „Kilometer pro Stunde“ (aber niemals „Stundenkilometer“) angeben:

$$1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = \frac{(1/1000) \text{ km}}{(1/3600) \text{ h}} = 3,6 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Es gibt etliche andere Einheiten außerhalb des SI, die sogar gesetzlich zulässig sind. Für die Größe *Zeit* sind das neben der *Stunde* („hora“) und der *Minute* auch der Tag („dies“) und das *Jahr* („annus“):

$$1 \text{ a} = 365 \text{ d} = 365 \cdot 24 \text{ h} = 365 \cdot 24 \cdot 60 \text{ min}$$

Inkonsequenterweise, aber aus verständlichen Gründen haben viele der abgeleiteten SI-Einheiten spezielle Namen bekommen; diese ehren meistens einen verdienten Wissenschaftler. Alle in diesem Buch verwendeten Einheiten-Namen sind in [Tabelle 1.2](#) zusammengestellt.



Zusammengesetzte Einheiten

Manche Produkte von Einheiten tauchen so häufig auf, dass sie wie eine eigene Einheit verwendet werden. Beispiele in [Tabelle 1.2](#) sind „Newtonmeter“, „Ampere-sekunde“ und „Voltsekunde“, die oft sogar entsprechende Einheitenzeichen bekommen („Nm, As, Vs“). In diesem Buch werden sie der Deutlichkeit halber als Produkt angegeben, wie z. B. (N · m).

Tabelle 1.2 Abgeleitete SI-Einheiten mit selbständigen Namen

Größe	Übliches Symbol bzw. Formelzeichen	Name	Einheitenzeichen	Beziehung zu anderen SI-Einheiten	Einführung in Abschnitt
Frequenz	f	Hertz	Hz	= 1/s	2.6.1
Kraft	F	Newton	N	= kg · m/s ²	2.2.2
Druck	p	Pascal	Pa	= N/m ²	2.8.1
Energie, Arbeit	E, W	Joule	J	= N · m = W · s	2.3.1
Leistung	P	Watt	W	= J/s	2.3.5
Elektrische Ladung	Q	Coulomb	C	= A · s	4.1.1
Elektrische Spannung	U	Volt	V	= W/A	4.1.3
Elektrische Kapazität	C	Farad	F	= C/V	4.1.4
Elektrischer Widerstand	R	Ohm	Ω	= V/A	4.2.2
Elektrischer Leitwert	G	Siemens	S	= A/V	4.2.3
Magnetischer Fluss	Φ	Weber	Wb	= V · s	4.4.2
Magnetische Flussdichte	B	Tesla	T	= Wb/m ²	4.3.2
Induktivität	L	Henry	H	= Wb/A	4.4.4
(Radio-) Aktivität	A	Becquerel	Bq	= 1/s	6.5.3
Energiedosis	D	Gray	Gy	= J/kg	6.5.3
Äquivalentdosis	H	Sievert	Sv	= J/kg	6.5.3

■ 1.4 Größenordnungen

Der Zahlenwert einer physikalischen Größe kann in der Natur extrem klein oder enorm groß auftreten. Man unterscheidet – relativ grob, aber in einer sinnvollen Stufung – **Größenordnungen** von Zahlenwerten als Potenzen von zehn (10^n). Statt der klassischen Schreibweise oder der Exponentialschreibweise können auch *Vorsätze* (bzw. *Vorsilben*) verwendet werden, wie etwa beim *Kilogramm*:

$$1000 \text{ g} = 10^3 \text{ g} = 1 \text{ kg}$$

Die gebräuchlichsten Vorsätze mit ihren Abkürzungen sind in Tabelle 1.3 zusammengestellt.

Tabelle 1.3 Vorsätze und Vorsatzzeichen für dezimale Vielfache und Teile

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

Häufig sind **Abschätzungen** oder *Überschlagsrechnungen* mit der Genauigkeit einer Größenordnung, also bis auf einen Faktor 10, ausreichend und sinnvoll. Das gilt zum einen für die Kontrolle einer Berechnung, die mit Taschenrechner oder Computer durchgeführt wird: Mit einem kleinen Vorzeichenfehler beim Exponenten liefert die Maschine völlig sinnlose Ergebnisse! Zum anderen kann man oft mit einigen groben Schätzwerten eine Information gewinnen, die sich der exakten Berechnung völlig entzieht.



Info 1.2: FERMI-Probleme

Solche „unmöglichen“ Fragestellungen werden auch als „FERMI-Probleme“ bezeichnet: Der berühmte italienisch-amerikanische Physiker FERMI hat die Sprengkraft der ersten Atombombe (im Juli 1945) offenbar lediglich mithilfe einiger Papierschnipsel abgeschätzt. Er warf sie nach der Explosion (natürlich in sicherer Entfernung) einfach in die Höhe und beobachtete, dass sie von der Druckwelle einige Meter fortgeweht wurden. Das Ergebnis seiner darauf basierenden Überschlagsrechnung stimmte gut – nämlich zumindest in der Größenordnung – überein mit den Resultaten der langwierigen Auswertungen von vielen komplizierten Messapparaturen.



Beispiel 1.2: FERMI-Abschätzung

Aufgabe: Für ein irisches „Buch der Rekorde“ soll das dickste Seilknäuel der Welt aufgewickelt werden. Es muss 4 m dick werden, wobei das Seil 4 mm Durchmesser hat. Welche Seillänge muss für den Rekordversuch zur Verfügung stehen?

Lösung: Das Volumen des Seils kann durch einen *Zylinder* angegeben werden, dessen Höhe der gesuchten Seillänge entspricht. Dieses Volumen setzt man für eine Abschätzung der Maximallänge einfach gleich dem angestrebten *Kugelvolumen*. (Wegen der Wickel-Lücken wird der Bedarf etwas geringer sein, aber eine exakte Rechnung ist eben unmöglich.)

$$\pi r^2 l_{\max} = \frac{4}{3} \pi R^3 \Rightarrow l_{\max} = \frac{4R^3}{3r^2}$$

Mit $r = 2 \text{ mm}$ und $R = 2 \text{ m}$ ergibt sich:

$$l_{\max} = \frac{4 \cdot (2 \text{ m})^3}{3(2 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2} = \frac{8 \text{ m}^3}{3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} \approx 2,7 \cdot 10^6 \text{ m}$$

Die *Größenordnung* der Seillänge beträgt also $10^6 \text{ m} = 1000 \text{ km}$.

Tabelle 1.4 Einige Größenordnungen in SI-Einheiten

Masse unserer Galaxis (Milchstraßensystem)	10^{41} kg
Masse der Erde	10^{25} kg
Masse eines Menschen	10^2 kg
Masse des Wasserstoffatoms (H)	10^{-27} kg
Durchmesser unserer Galaxis	10^{21} m
Durchmesser der Erde	10^7 m
Größe eines Menschen	10^0 m
Durchmesser des H-Atomkerns (Proton)	10^{-15} m
Alter der Erde (ca. $\frac{1}{4}$ des Universums)	10^{17} s
Lebenserwartung eines Menschen	10^9 s
Periode zwischen Herzschlägen	10^0 s
Flugzeit des Lichtes durch ein Proton (hypothetisch)	10^{-24} s
Lichtjahr (Strecke, die in 31 536 000 s mit c_0 zurückgelegt wird)	10^{16} m



Beispiel 1.3: Rechnen mit c_0

Aufgaben: Berechnen Sie die Flugzeit des Lichtes t_p für eine Strecke, die dem Durchmesser des Wasserstoff-Atoms entspricht (Tabelle 1.4)! Wie bestimmt man andererseits die Längeneinheit „Lichtjahr“, die in der letzten Zeile dieser Tabelle angegeben ist?

Lösungen: Mit der Definition der Geschwindigkeit aus Beispiel 1.1 und dem abgerundeten Zahlenwert für c_0 aus **Abschnitt 1.3** erhält man für t_p :

$$t_p = \frac{d_p}{c_0} = \frac{10^{-15} \text{ m}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 3,3 \cdot 10^{-24} \text{ s}$$

Ein Lichtjahr ist die Strecke, die das Licht in einem Jahr zurücklegt. Obwohl die Einheit „Lj“ bzw. „ly“ im Internationalen Einheitensystem nicht enthalten ist, wird sie in der Astronomie viel verwendet. Ihre Berechnung ergibt:

$$1 \text{ Lj} = c_0 t = 3 \cdot 10^8 \text{ (m/s)} \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365 \text{ s} = 9,46 \cdot 10^{15} \text{ m}$$

■ 1.5 Messgenauigkeit

Im physikalischen Laborpraktikum stößt man wie bei jeder technischen Messung auf ein scheinbar unbefriedigendes Phänomen: Wenn zum Beispiel die Fallzeit einer Kugel zehnmal mit einer Stoppuhr bestimmt wird, so sind oft alle zehn Messergebnisse verschieden. Welches ist denn nun die „richtige“ Fallzeit; welches Ergebnis ist „wahr“?

Richtig und wahr ist vor allem, dass jede Messung mit *Fehlern* behaftet und darum „unsicher“ ist: Dem „wahren Wert“ kann man sich prinzipiell nur so gut wie möglich annähern. Diese **Messunsicherheit** hat nichts mit *echten* Fehlern zu tun (wie dem Einsatz einer Sanduhr oder dem verzögerten Uhrenstopp nach längerer Kaffeepause). Auch bei größter Sorgfalt können *systematische Messfehler* auftreten (z. B. dass die Uhr zu schnell läuft) – diese muss man erkennen, und abstellen oder korrigieren.

Die zweite Kategorie stellen *zufällige* bzw. *statistische* Fehler dar (z. B. können die Reaktionszeiten bei jeder einzelnen Messung anders sein, aber rein zufällig mal kleiner und mal größer). Ihre mathematische Behandlung liefert das plausible Ergebnis, dass bei solchen „normal verteilten“ Messwerten (s. u.) x_i der arithmetische **Mittelwert** \bar{x} aus allen n Messungen dem „wahren Wert“ am nächsten kommt:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1..n} x_i}{n} \quad (1.1)$$

Index

Symbole

- α -Strahlung 401
- α -Teilchen 399
- β -Strahlung 401
- γ -Strahlung 263, 402
- 0. Hauptsatz der Thermodynamik 133

A

- Abbesche Theorie 325
- Abbildung 292, 302
 - strahlenoptisch 300
- Abbildungsfehler 305
- Abbildungsgleichung 303
- Abbildungsmaßstab 303
- Aberration
 - chromatische 306
 - sphärische 305
- Abklingkoeffizient 79
- Ableitung 23
- Abschätzungen 8
- Absorption 375, 384, 386
- Absorptionsgesetz 402
- Absorptionsgrad 147
- Achse, freie 70
- Additionstheorem 85
- Adhäsionskraft 112
- Adiabatensexponent 167
- Adiabatengleichung 167, 168
- Aggregatzustand 137, 140
- Akkommodation 308
- Akkumulator 272
- Aktivierungsenergie 159
- Aktivität
 - beim Kernzerfall 406
 - optische 338
- Akzeptor 276, 391
- amorph 388
- Ampere 5
- Ampère 206
- Amperemeter 216
- Amplitude 76
- Analysator 334
- Anfangsgeschwindigkeit 26
- Anode 264
- Anomalie des Wassers 132
- Anregungszustände 270
- Antenne 257
- Antineutrino 401
- Antiteilchen 401
- Apertur, numerische 313, 325
- Äquipotenzialfläche 99, 198
- Äquivalentdosis 406
- Äquivalenzprinzip 104
- Arbeit 45
 - mechanische 46
- Arbeitsdiagramm 171
- asphärisch 306
- Astigmatismus 306
- Äther 100, 333
- Atmosphäre 109
- Atombombe 411
- Atomhülle 357
- Atomkern 395
- Atommasse, relative 152, 398
- Atomspektrum 371, 372

- Atomuhr 4
 Atto 8
 Aufenthaltswahrscheinlichkeit 369
 Auflösung 314
 Auflösungsgrenze 324
 Auflösungsvermögen 323, 324
 – des Gitters 327
 Auftrieb 110
 Auge 307, 308, 324
 Augenlinse 308
 Ausdehnung 131
 Ausfallswinkel 292
 Ausgleichskurve 12
 Auslenkung 76
 Ausschlussprinzip 363
 Austrittsarbeit 137, 264, 265, 274, 347
 Auswahlregel 372, 376
 Avogadro-Konstante 152
- B**
- Bahngeschwindigkeit 55
 Balkenwaage 41
 Banden 386
 Bändermodell 388
 Barkhausen-Sprünge 226
 Basiseinheit 3
 Basisgröße 3
 Basisschaltung 280
 Batterie 272
 Bauelement, optoelektronisches 393
 Becquerel 7, 406
 Beleuchtungswelle 330
 Bernoulli 113
 Bernoulli-Gleichung 114
 Bernstein 190
 Beschleunigung 24
 Beschleunigungsarbeit 265
 Besetzungsinversion 394
 Besetzungsumkehr 376
 Besetzungszahl 376
 Beugung 320
 Beugungsbild 322
 Beugungsgitter 326
 Beugungsordnung 326
 Beugungsscheibchen 323
 Bewegung 21
 – gleichförmige 22
 – ungleichförmige 22
 Bewegungsgleichung 25
 Bezugspotenzial 199
 Bezugssehweite 308
 Bezugssystem 31
 – kartesisches 15
 bikonvex 301
 Bildfeldwölbung 306
 Bildgröße 292, 303
 Bild, reelles 302, 310, 328
 Bildumkehr 297
 Bildweite 292, 302
 Bimetallstreifen 133
 Bindung
 – kovalente 385
 – metallische 387
 Bindungselektronen 275
 Bindungsenergie, der Nukleonen 398
 Bleiakkumulator 272
 Bleigießen 139
 Blendenzahl 307
 Blindstrom 247
 Blindwiderstand 247
 Blitz 195
 Blochsche Wände 226
 Bogenlampe 270
 Bogenmaß 54
 Bohmsche Mechanik 368
 Bohrsche Postulate 358
 Bohrsches Atommodell 358, 360
 Boltzmann-Faktor 159, 264, 363, 375, 389
 Boltzmann-Konstante 159
 Boltzmann-Statistik 389
 Bose-Einstein-Kondensat 129
 Boson 400
 Boyle-Mariottesches Gesetz 154
 Bragg-Gitter 383
 Braggsche Reflexionsbedingung 383
 Braunsche Röhre 267
 Brechkraft 305
 Brechung 295

Brechungsindex 291
Brechwert 305
Brechzahl 291, 295
Brechzahlgradient 292
Bremspektrum 382
Bremsstrahlung 381
Brennpunkt 300
Brennpunktstrahl 303
Brennweite 300, 302
Brewster-Fenster 337
Brewster-Winkel 337
Brownsche Molekularbewegung 155
Brückenstrom 216

C

Calcit 335
Camera obscura 292
Candela 5
Carnot-Maschine 171
Carnotscher Kreisprozess 171
Celsius-Skala 129
Compoundkern 410
Compton-Effekt 350
Coriolis-Beschleunigung 61
Coriolis-Kraft 60
Coulomb 7, 189
Coulomb-Barriere 412
Coulomb-Gesetz 191
Coulomb-Kraft 189, 191, 400, 401
Coulomb-Potenzial 368
Curie 408
Curie-Temperatur 226

D

Dampfdruck 141
Dampfdruckkurve 141
Dampfmaschine 174
Dampfturbine 174
Dämpfung 299, 388
Dämpfungskonstante 80
Datenspeicher, holografischer 331
Dauerleistung 52
Dauermagnet 227

de-Broglie-Wellenlänge 351
Defektelektron 276
Deformationsarbeit 51
Dehnung 43
Dekrement, logarithmisches 79
determiniert 355
Deuterium 397
Dewar-Gefäß 183
Dezi 8
Dezibel 299
diamagnetisch 225
Diamant 298
Dichroismus 336
Dichte 47
– optische 291, 338
Dichteanomalie 131, 194
Dichtesprung 139
Dickschicht-Hologramm 330
Dielektrikum 201
Dielektrizitätskonstante des
 Vakuums 192
– absolute 192
Dieselmotor 168, 176
Differenzenquotient 24
Differenzialgleichung 76
Differenzialquotient 23
Differenziation 23
diffus 293
Diffusion 179, 277
Diffusionsspannung 277, 393
Digitalkamera 307
Diode 278
Dioptrie 305
Dipol 258
– elektrostatischer 194
Dipolmoment, elektrisches 386
Dispersion 296, 306
divergent 301
Domäne 225
Donator 276, 391
Doppelbrechung 335
Doppelstern-System 105
Doppler-Effekt 88
Dosimeter 409
Dosis 406

- Dosisgrenzwert 407
- Dosisrate 406
- Dotieren 276, 391
- Drall 71
- Drehachse 55
- Drehimpuls 71
- Drehimpulsquantenzahl 361
- Drehmasse 70
- Drehmoment 64
- Drehpunkt 67
- Drehsinn 56
- Drehstrom 251
- Drei-Niveau-Termschema 376
- Drift 206
- Drossel 247
- Drosselspule 269
- Druck 106
 - statischer 107, 114
- Dublett 373
- Durchbruchspannung 204
- Durchflutungsgesetz 224, 228, 256
- Durchlassspannung 278, 393
- Durchlassstrom 278
- Dynamik 33
- Dynamometer 43

- E**
- Effekt
 - glühelektrischer 264
 - lichtelektrischer 264, 346
- Effektivwert 248
- Eichung 42
- Eigenfrequenz 77, 253, 254
- Eigenleitung 275, 391
- Eigenmagnetfeld 227
- Einfallswinkel 292
- Einheit 2
 - abgeleitete 6
 - zusammengesetzte 6
- Einheitsvektor 15
- Einhüllende 79, 85
- Einkristall 387
- Einschluss, magnetischer 413
- Einstein 99, 368

- Eis 137
- Eisenkern 222, 223
- Elastizitätsmodul 43
- Elektrizität 189
- Elektroauto 273
- Elektrolyse 271
- Elektrolyt 271
- Elektrolytkondensator 202
- Elektromotor 229
- Elektron 206, 264
- Elektronengas 206, 209, 273, 389
- Elektronenkonfiguration 364
- Elektronenmikroskop 352
- Elektronenpaarbindung 275, 385
- Elektronenstrahl-Oszilloskop 267
- Elektronik 264
- Elektronvolt 265, 348
- Elektrostatik 189
- Elementarladung 189, 396
- Elementarmagnet 220
- Elementarwelle 319
- Elementarzelle 386
- Element, galvanisches 271
- Ellipsenbahn 93, 361
- Emission
 - spontane 375
 - stimulierte 375
- Emissionsgrad 147
- Emitterschaltung 280
- Endlagerung 412
- Energie 45, 203
 - elastische 47
 - kinetische 48
 - potenzielle 46
 - thermische 127
- Energieband 387
- Energiebilanz 49
- Energiedosis 406
- Energielecke 390
- Energieniveau 359, 387
 - metastabiles 376, 378
- Energiequelle, regenerativ 415
- Enthalpie 166
- Entladung 270
- Entropie 178

Entspiegelung 319
Erdbeschleunigung 27
Erdkern 97
Erdkruste 97
Erdmagnetfeld 219
Erdmasse 96
Erhaltungssätze 38
Erosion 139
Erregerfrequenz 80
Erstarrungsverzug 139
Erstarrungswärme 137
Eulersche Formel 249
Eulersche Zahl 28
Exa 8
Expansion, isobare 166
Exponentialfunktion 110
Exzentrizität 83, 92

F

Fadenstrahlrohr 269
Fahrenheit 128
Fahrstrahl 92
Fahrwiderstand 44
Faktor, relativistischer 100, 266
Fallbeschleunigung 27
Fallgesetze 27
Fallout 404
Farad 7, 192, 200
Faraday-Effekt 339
Faraday-Käfig 198
Farbfehler 306
Farbtemperatur 149
Fata Morgana 289
Federkonstante 43
Federkraft 42
Federwaage 43
Fehler 10
Fehlerbalken 11
Fehlerfortpflanzung 12
Fehlerrechnung 13
Fehlsichtigkeit 308
Feinstruktur 362
Feldeffekt-Transistor 280
Feld, elektrisches 192
Feldemission 264
Feldgleichung 235
Feldkonstante
– elektrische 192
– magnetische 223
Feldlinie 98
Feldlinienbild 193
Feldstärke
– elektrische 192
– magnetisch 222
Feldteilchen 400
Femto 8
Fermatsches Extremalprinzip 291
Fermi-Dirac-Statistik 389
Fermi-Energie 389
Fermi-Kante 389
Fermi-Niveau 389
Fermi-Probleme 8
Fernfeld 258
Fernrohr 309
– astronomisches 310
– holländisches 312
– terrestrisches 311
ferromagnetisch 225
Festkörper 386
Festkörperlaser 377
Festkörperphysik 273
Feuchte
– absolute 142
– relative 142
Feynman 355
Filterung 84
Fixpunkt 128
Fizeau 290
Flächenladungsdichte 195, 200
Fliehkraft 59
Fluss
– elektrischer 195, 226
– magnetischer 226
Flussdichte 236
– elektrische 196, 200
– magnetische 222, 223, 232
Flüssigkeit, inkompressible 107
Flüssigkristall-Anzeigen 338
Fokus 300

- Fokussierung 307
Formfaktor 240
Fotodiode 279, 393
Fotoeffekt 346
– äußerer 346
– innerer 279, 346, 394
Fotoemission 264
Fotografie 308
Fototransistor 280
Foucault 63
Fourier-Analyse 84
Fourier-Synthese 84
Fourier-Transformation 84
Franck-Hertz-Versuch 360
freie Achsen 70
Fremdatome 276
Frequenz 55
Frequenzfilter 247
Fresnel-Reflex 318
Fresnelsche Formeln 293
Fresnelscher Reflex 294
Fresnelscher Spiegelversuch 316
Fresnelsche Stufenlinse 302
Fundamentalschwingung 87
Funken, Entladung 195, 270
Fusionsreaktor 413
- G**
- Gabor 328
Galilei 96, 312
Galileisches Fernrohr 312
Galilei-Transformation 32, 99, 333
Gap 390
Gas 151
– ideales 151
Gasentladung 269, 360
Gaskonstante
– spezielle 153
– universelle 153
Gastheorie, kinetische 155
Gauss'scher Satz 196
Gefrierpunktanomalie 386
Gefrierpunktserniedrigung 138
Gegen-Drehmoment 72
Gegenkraft 36
Gegenspannungsmethode 348
Gegenstandsgröße 303
Gegenstandsweite 302
Geiger-Müller-Zählrohr 408
Generator 236, 242
Geradsicht-Prisma 298
Gesamtstrahlung 148
Geschwindigkeit 22
Gesetz von Boyle-Mariotte 154
Gesetz von Dalton 141
Gesetz von Gay-Lussac 154
Gesetz von Hagen-Poiseuille 115
Gesetz von Malus 334
Gesetz von Snellius 337
Gewichtskraft 40
Giga 8
Gitter 328
– kubisches 386
Gitter-Auflösung 327
Gitterfehler 386
Gitterkonstante 326
Glanzwinkel 383
Glas 388
Glasfaser 298, 383
Gleichgewicht 67
– indifferent 67
– labil 67
– stabil 67
Gleichrichter 265
Gleichrichtung 278
Gleitreibung 43
Glimmlampe 270
Glockenkurve 11
Glühemission 264
Glühfaden 212
Glühkathode 231, 265
Glühlampe 212
Gluonen 400
GPS 4
Gradmaß 54
Gravitation 92
Gravitationseinschluss 415
Gravitationsfeld 98
Gravitationsfeldstärke 98

Gravitationskonstante 95
 Gravitationskraft 94
 Graviton 400
 Gray 7, 406
 Grenzfall, aperiodischer 79
 Grenzfeldstärke 204
 Grenzfrequenz 348, 382
 Grenzwellenlänge 382
 Grenzwinkel der Totalreflexion 297
 Größe 2
 Größenordnungen 7
 Grundwelle 88
 Grundzustand 359, 375
 Gruppengeschwindigkeit 260
 Guericke, Otto von 108

H

Haftreibung 43
 Halbleiter 210, 275, 386
 Halbleiterdiode 278, 393
 Halbmetall 391
 Halbwertshöhe 109
 Halbwertszeit 403
 Hall-Effekt 232
 Hall-Koeffizient 232
 Hall-Sonde 232
 Haltekraft 59
 Haltetemperatur 137
 Hauptebene 300, 306
 Hauptquantenzahl 359
 Hauptsatz
 – dritter 182
 – erster 163
 – zweiter 177
 heatpipe 143
 Hebel 65
 Heisenbergsche Unschärferelation 353
 Heißleiter 210, 275
 Hekto 8
 Hektopascal 106
 Helium-Neon-Laser 378
 Henry 7, 239
 Hertz 7, 55

Hertzscher Dipol 257
 Higgs-Teilchen 400
 Himmelsmechanik 92
 Hochpass 247
 Hochspannungsleitung 245
 Höhenformel, barometrische 109, 159
 Hohlraumstrahler 147
 Hohlspiegel 293, 304
 Hohlzylinder 69
 Holografie 380
 Hologramm 328
 Hookesches Gesetz 43
 hopping conductivity 276
 Hubarbeit 46
 Hybridisierung 385
 Hystereseschleife 226

I

Imaginärteil 249
 Immersionsflüssigkeit 314
 Impedanz 249
 Impedanzanpassung 215, 244, 260
 Impuls 36, 37
 Impuls eines Photons 350
 Impulserhaltungssatz 37
 Impulssumme 37
 Induktion, elektromagnetische 234
 Induktionsgesetz 236, 256
 Induktionsherd 238
 Induktionsspannung 234
 Induktivität 239, 246
 Inertialsystem 35, 99
 Influenz 191
 Influenzkonstante 192
 Infrarot 262, 263
 – fernes 262
 inkohärent 316
 Innenwiderstand 214
 Instrumente, optische 307, 309
 Integralrechnung 25
 Integrated Circuits 280
 Integrationsgrenze 25
 Intensität 261, 315, 334, 384
 Intensitätsverteilung 321

Interferenz 321
– destruktive 85, 315
– konstruktive 85, 315
Interferenzfarbe 318
Interferenzfilter 318
Interferenzstreifen 332
Interferometrie 331, 380
Ion 206, 271, 274
Ionenbindung 386
Ionendosis 406
Ionisierungsenergie 359
Isentrope 169
Isobare 154
Isochore 154, 165
Isolator 274, 386, 390
– optischer 339
Isotherme 154, 164
Isotop 397

J

Joule 7, 46
Joulesche Wärme 211
Joule-Thomson-Effekt 155

K

Kalibrierung 42
Kalkspat 335
Kalorie 135
Kalorimetrie 135
Kältemaschine 173
Kältemittel 143, 175
Kältetod 182
Kamera 307
Kapazität 199, 247
Kapazitätsdiode 278
Kapillarität 112
Kathode 264
Kelvin 5
Kelvin-Skala 128
Keplersche Gesetze 92, 361
Keplersches Fernrohr 310
Kernchemie 403
Kernenergie 104

Kernkraft 400, 401
Kernphysik 395
Kernradius 397
Kernspaltung 410
Kernumwandlung 401, 403
Kerr-Effekt 338
Kettenreaktion 411
Kilo 8
Kilogramm 3, 5
Kilowattstunde 52
Kinematik 21
Kirchhoffsche Gesetz 213, 214
Kirchhoffsches Strahlungsgesetz 147
Klemmenspannung 214
Knoten 368
Knotenfläche 369
Knotenregel 213
Kochsalz 387
Koerzitivfeldstärke 226
Koexistenz der Phasen 137
Kohärenz 315
– räumliche 316
Kohärenzlänge 316, 330, 380
Kohärenzzeit 316
Kohäsion 112
Kohlenstoff-14 403
Kolbendruck 107
Kollektor 279
Kollektorschaltung 280
Koma 306
Kommunikationstechnik 299
Kompass 219
Komponenten 15
Kompressibilität 109
Kompression, adiabatische 168
Kondensationskeime 142
Kondensationswärme 137
Kondensator 199, 246
– Energie 203
konkav 301
Konstantan 216
Konstruktionsstrahl 302
Kontaktspannung 274
Kontamination 407
Kontinuitätsgleichung 112

Kontrollstab 411
Konvektion 142
– erzwungene 143
– freie 143
konvex 301
Koordinaten 13, 15
Koordinatentransformation 101
Kopenhagener Deutung 368
Kopplungsgrad 87
Korkenzieherregel 64, 221
Körper
– grauer 147, 150
– schwarzer 146
– starrer 64
Korrespondenzprinzip 368
Kosmologie 105
Kovolumen 154
Kraft 35
– magnetische 227
Kraftarm 65
Kraftfeld 98, 192
Kraftlinie 98, 193, 219
Kreisbewegung 54
Kreisfrequenz 56, 76
Kreisprozess 169
Kreuzprodukt 60, 64
Kriechfall 79
Kristallbaufehler 387
Kristalle, photonische 383
Kristallgitter 275, 386
Kriterium von Lord Rayleigh 323
kritische Masse 411
Kugelfallviskosimeter 115
Kugelpackung, dichteste 386
Kugelpendel-Kette 38
Kugelschale 359
Kugelwelle 90
Kunststofffaser 298
Kurzschlussstrom 214
Kurzwellen 262
kWh 211

L

Ladungsdichte 255
Ladungsmenge 189
Ladungsträger-Konzentration 232
Ladungstrennung 190, 194
Lageenergie 46
Lagerpunkt 67
Länge 5
Längenausdehnungskoeffizient 130
Längenkontraktion 102
Längstwellen 262
Langwellen 262
Laplace 60
Laser 316, 374
Laserdiode 279, 394
Laserlinie 379
Lasermedium 377
Laserstrahl 377
Laser-Übergang 376
Lastarm 65
Lateralvergrößerung 303
Lautsprecher, elektrodynamischer 229
Lawineneffekt 269
Lawson-Kriterium 413
LCD 338
Lebensdauer, mittlere 404
Le Chatelier 141
LED 279, 394
Leerlaufspannung 214
Leistung 45, 51
– elektrische 211
Leistungsdichte 380
Leistungsfaktor 251
Leistungszahl 174
Leiterschaukel 234
Leiterschleife 222
Leitfähigkeit 207, 390
Leitungsband 390
Leitwert 207, 216, 251
Lenzsche Regel 237
Leslie-Würfel 147
Leuchtdiode 279, 393
Leuchtelektron 373
Leuchtstofflampe 270

- Licht 256
 Lichtäther-Experiment 333
 Lichtbogen 270
 Lichtdruck 350
 Lichtgeschwindigkeit 4
 Lichtjahr 9
 Lichtleiter 297
 Lichtstärke 5, 311, 314
 Lichtstrahl 289
 Lichtverstärkung 376
 Lichtwellenleiter 299
 limes 23
 Linde-Verfahren 155
 linear polarisiert 334
 Linienspektren 357
 Linse 300
 – dicke 306
 – dünne 300
 – sphärische 300
 Linsenfehler 305
 Linsengleichung 303
 Linsensystem 305
 Lissajous-Figur 83
 Loch 276
 – schwarzes 105
 Lochblende 323
 Löcher 391
 Löcherleitung 206
 Lochkamera 291
 Longitudinalwelle 87
 Lorentz-Kraft 230, 235, 268
 Lorentz-Transformation 33, 100
 Löschkondensator 241
 Lösungsmittel, polares 386
 LRC-Serienschaltung 248
 Luftdruck 108
 Luftkissenbahn 34
 Luftsäule 109
 Luftspule 223
 Lupe 304, 309
 LWL 299
- M**
 Magdeburger Halbkugeln 108
 Magnetfeld 219
 Magnetfeld-Energie 241
 Magnetisierung 225
 Magnetismus 189
 Magnetquantenzahl 362
 Makrozustand 180
 Maschenregel 214
 Masse 3, 5
 – molare 152
 – relativistische 266
 Masse-Energie-Äquivalenz 398
 Maßeinheit 2
 Massendefekt 398
 Masseneinheit, atomare 398
 Massenelement 64
 Massenmittelpunkt 66, 94
 Massenpunkt 21, 64
 Massenträgheitsmoment 69
 Massenzahl 398
 Massenzuwachs 102, 266
 Maßsystem 2
 Maßzahl 2
 Materialien, dichroitische 293
 Materiewelle 351
 Materiewellenfunktion 368
 Matrix-Schreibweise 15
 Maximumsbedingung 326
 Maxwell-Gleichungen 256
 Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung
 159
 Maxwell-Verteilung 389
 Mechanik 21
 Mega 8
 Messgenauigkeit 10
 Messunsicherheit 10
 – statistische 11
 Metall 390
 metastabil 377
 Meter 5
 Michelson-Interferometer 332, 333
 Mikro 8
 Mikroskop 312, 325

- Mikrowellen 262
Mikrozustand 180
Milli 8
Millibar 106
Millimeterwellen 262
Minimumsbedingung 321
Mischungstemperatur 135
Mittelpunktstrahl 303
Mittelwellen 262
Mittelwert 10
Moden 377
Moderator 411
Modulation 85
mol 152
Mol 5
Molekülspektrum 386
Molwärme 152
Momentanbeschleunigung 24
Momentanleistung 52
Monochromator 327
Monopol 220
Mooresches Gesetz 281
Multi-Coating 319
Mutterkern 403
Myon 101
- N**
- Nahfeld 258
Nano 8
Natrium-Entladungslampe 326
Natrium-Liniendublett 372
Natrium-Spektrallinie 296, 327, 362
Natrium-Termschema 374
Naturkonstante 28
Nebel 140
Nebelkammerspur 408
Nebenquantenzahl 361
Nernstsches Wärmetheorem 182
Netzebene 383
Netzhaut 308
Neukurve 226
Neutrino 401
Neutron 396
Neutronensterne 399
- Newton 7, 36
Newtonmeter 65
Newtonsche Axiome 34
Newtonsches Gravitationsgesetz 94
Nicolsches Prisma 336
n-Leiter 276
Nordpol 219
Normaldruck 109
Normale 2
Normalkraft 43
Normal-Vergrößerung 310
Normalverteilung 11
Normvolumen, molares 152
Normzustand 152
Nukleon 396
Nukleonenzahl 396
Nuklid 397
Nullpunkt, absoluter 129
Nullpunktenergie 368
Nutzlast 111
Nutzwelle 413
- O**
- Oberflächenenergie 112
Oberflächenspannung 112
Oberwellen 88
Objektiv 307
Objektive 328
Öffnungsfehler 305
Ohm 7, 207
Ohmsches Gesetz 207
Okular 310, 312
Opernglas 312
Optik 289
– geometrische 291
Orbital 369, 385
Ordnung 321
Ordnungszahl 364, 396
Orientierungspolarisation 202
Ortsvektor 16
Oszillator 80
– elektrischer 253
– harmonischer 253
Otto-Motor 176

P

- Paarbildung 103
- Paradoxon, hydrostatisches 107
- Parallelogramm-Methode 14
- Parallelschaltung 201, 215
- paramagnetisch 225
- Pascal 7, 106
- Pauli-Prinzip 361, 385
- Peltier-Effekt 274
- Peltier-Element 274
- Pendel
 - mathematisches 78
 - physikalisches 77
- Pendellänge, reduzierte 78
- Pendelversuch 63
- Periodendauer 55
- Periodensystem 363, 365
- Permanentmagnet 220
- Permeabilität 225
 - relative 225
- Permeabilitätszahl 225
- Permittivität 203
- Permittivitätszahl 202
- Perpetuum mobile
 - erster Art 163
 - zweiter Art 178
- Peta 8
- Pferdestärke 52
- Phasenbeziehung 248, 316, 328, 330
- Phasengeschwindigkeit 89, 260
- Phasenkonstante 76
- Phasensprung 90, 318
- Phasenverschiebung 248
- Phasenwinkel 76
- Phasenwinkelbeziehung 249
- Photon 350, 400, 402
- Photonenimpuls 350
- Photonenlawine 377
- Photonenmasse 350
- Piko 8
- Pincheffekt 413
- Pion 400
- Pirouette 73
- Planck 346
- Plancksche Strahlungskurven 150, 381
- Plancksches Wirkungsquantum 353
- Planetenmodell 357
- Planspiegel 293
- Plasma 270, 413
- Plattenkondensator 199, 203
- p-Leiter 276
- pn-Übergang 277, 393
- Pockels-Effekt 338
- Pockels-Zelle 338
- Poissonsche Gleichung 168
- Polarimeter 338
- Polarisation 201, 334
 - magnetische 222, 225
- Polarisationsdrehung 335
- Polarisationsfilter 336
- Polarisationsoptik 334
- Polarisator 334
 - gekreuzter 334
- Polarkoordinate 16
- polytrop 169
- Porro-Prisma 298
- Positron 401
- Potenzial 99, 196
 - elektrische 197
- Potenzialbarriere 369
- Potenzialtopf 99, 368
- Poynting-Vektor 260, 320, 349
- Presse, hydraulische 107
- Primärelement 272
- Prinzip des Archimedes 110
- Prinzip vom kleinsten Zwang 141
- Prisma 296
- Probeladung 196
- Proton 396
- Pulslaser 378
- Pumpe 376
- Pumpspeicher-Kraftwerk 52
- Pumpübergang 376
- Punktladung 193
- Punktmasse 66
- Punkt, virtueller 328
- Pupillenöffnung 308
- p-V-Diagramm 170
- Pyrometer 150

Q

Quanten 345
Quantenelektrodynamik 353
Quantenhypothese 345, 358
Quantenmechanik 353, 357, 368
Quantenoptik 346
Quantenzahl 361, 363
Quarks 396
Quarzglasfaser 299
Quecksilbersäule 106
Quellen 193
Quellenspannung 214

R

Radialbeschleunigung 56
Radialkräfte 59
Radiant 54
Radioaktivität 400, 403
Radiusvektor 57
Radon 404
Raketenantrieb 38
Rasterelektronenmikroskop 353
Rastertunnelmikroskop 370
Raumladung 277
Raum-Zeit-Kontinuum 104
Rayleigh-Streuung 336
Reaktanz 247
Reaktionsgesetz 36
Realteil 249
Rechtsschraube 56
Rechtsschraubenregel 64
Rechtssystem 228
Referenzwelle 328
Reflexion 292, 388
– diffuse 294
Reflexionsgrad 293, 394
Regelation des Eises 140
Regenbogen 296
Regressionsanalyse 12
Reibung, innere 114
Reibungselektrizität 190
Reibungsgesetz 43
Reibungskraft 43

Reihenschaltung 201, 215
Relativitätsprinzip 100
Relativitätstheorie
– allgemeine 99, 104, 350
– spezielle 99, 350
Relaxation 376, 377
rem 408
Remanenz 226
resistance 207
Resistanz 245
Resonanzfrequenz 80, 250
Resonanzkatastrophe 82
Resonator 80, 90, 377
Resonatorlänge 377
Reversibilität 173, 176
Reynolds-Zahl 116
Rollreibung 43
Römer 290
Röntgenlinie 382
Röntgen-Röhre 381
Röntgenspektrum, charakteristisches 382
Röntgenstrahlung 262, 350, 381
Rotation 64, 74
– starrer Körper 71
Rotverschiebung 88
Rubinlaser 377
Rückkopplung 254
Rückstoßprinzip 38
Ruhemasse 102, 350
Rutherford 357

S

Saccharimeter 338
Sägezahnspannung 267
Sammellinse 301
Satellit, geostationärer 97
Sättigungsdampfdruck 141
Sättigungspolarisation 226
Satz von Steiner 70
Schallwelle 87
Schaltnetzteil 244
Schaltung, integrierte 280
Schattenwurf 291

- Scheinkraft 40, 60
 Scheinleistung 251
 Scheinwiderstand 249
 Schleusenspannung 278
 Schlieren 289, 292
 Schmelztemperatur 129, 138
 Schmelzwärme 138
 Schrödinger-Gleichung 368, 369
 Schutzleiter 199
 Schutzwiderstand 269
 Schwächung 384
 Schwächungskoeffizient 384
 Schwebung 85, 260
 Schwebungsfrequenz 85
 Schweredruck 107
 Schwerefeld 98
 Schwerkraft 42
 Schwerpunkt 67
 Schwingkreis 241, 254
 Schwingung
 – elektromagnetische 252
 – erzwungene 80
 – freie 74
 – gedämpfte 79
 – gekoppelte 86
 – harmonische 74
 Schwingungsbauch 90
 Schwingungsdämpfer 79
 Schwingungsebene 338
 Schwingungsgleichung 75
 Schwingungsisolierung 81
 Schwingungsknoten 90
 Schwungrad 64
 Schwungscheibe 69
 Seebeck-Effekt 274
 Sehhilfe 308
 Sehweite, deutliche 308
 Sehwinkel 309
 Seilwelle 90
 Sekundärelektronen-Emission 264
 Sekundärelement 272
 Sekunde 3, 5
 Selbstinduktion 239
 Sender 257
 Senken 193
 Serienschaltung 200
 Serienschwingkreis 254
 SI 2
 Sieden 137
 Siedepunkt 386
 Siedepunktserhöhung 138
 Siedetemperatur 138
 Siedeverzug 139
 Siemens 7, 207
 Sievert 7, 407
 Signalspannung 267
 Silizium 274, 275, 387, 391
 Skalarprodukt 46
 Snelliussches Brechungsgesetz 295
 Solarkonstante 261, 347
 Solarzelle 279, 387, 393
 Sommerfeld 361
 Sonnenenergie 415
 Sonnenstrahlung 261
 Spalt 320
 Spannung 196
 – mechanische 43, 131
 Spannungsdoppelbrechung 338
 Spannungsreihe 271
 – elektrochemische 271
 Spannungsteiler 216
 Spektralapparat 327
 Spektrallinien-Serie 372
 Spektrometer 327
 Spektrum 84, 262
 Sperrschicht 278
 Sperrspannung 278, 393
 Spiegelbild 293
 Spin 71, 362, 368, 385
 Spin-Bahn-Kopplung 362
 Spinquantenzahl 362
 Spitzeneffekt 195
 Spitzenleistung 52
 Sprungtemperatur 209
 Spule 245
 Stammfunktion 25
 Standardabweichung 11
 Standards 2
 Statik 68
 Staudruck 114

Stefan-Boltzmann-Gesetz 148
Steigungsdreieck 22
Stelle, signifikante 12
Stirlingscher Kreisprozess 175
Stoffmenge 5
Stokessches Gesetz 115
Störstellenleiter 276
Störstellenleitung 391
Stoß
– elastischer 50
– inelastischer 50
Stoßanregung 378
Stoßgesetze 50
Stoßionisation 269, 278
Stoß zweiter Art 378
Strahl 303
– achsenparalleler 303
– ausgezeichnete 302
– außerordentlicher 335
– ordentlicher 335
Strahlen 289
Strahlenbündel 301
Strahlenexposition 407
Strahlenkrankheit 407
Strahlenschutz 407
Strahlung
– ionisierende 262, 384
– kosmische 101
– radioaktive 401
– ultraviolett 263
Strahlungsdruck 261
Strahlungskonstante 148
Strahlungsnachweis 408
Streuung 336, 388
Strom 205
Stromdichte 206
Stromkreis 213
Stromlinie 117
Stromrichtung, technische 207
Strom-Spannungs-Kennlinie 269
Stromstärke 5, 206
Strömung 112
– laminare 115
– turbulente 116
– viskose 114

Strömungsgeschwindigkeit 112
Strömungsquerschnitt 112
Strömungswiderstand 117
Stromverzweigung 213
Stufenindexfaser 299
Sublimation 140
Südpol, magnetischer 220
Superpositionsprinzip 29, 83, 315
Supraleiter 209
Symbole 5
System 37
– abgeschlossenes 37

T

Tangentialbeschleunigung 56
Taupunkt 142
Teilchencharakter 354
Teilchen, indeterminierte 355
Teilchen-Welle-Dualismus 351, 367
Teleskop 310
Temperatur 5
Temperaturkoeffizient 208
Temperaturmessung 133
Tera 8
Terahertzstrahlung 262
Termschema 359
Tesla 7, 222
t-Faktor 11
Thermodynamik 127
Thermoelement 274
Thermografie 150, 262
Thermometer 127, 134, 274
Thermospannung 274
Thomson 238
Thomsonsche Formel 250, 253
Tiefpass 247
Totalreflexion 297
Totzeit 409
Tragflügel 114
Trägheitsgesetz 35
Trägheitskraft 40
Trägheitsmoment 69
Trägheitsprinzip 35
Transformation 31

- Transformator 237, 243
 Transistor 279, 393
 – unipolarer 280
 Translation 21
 Transmission 388
 Transversalwelle 87, 259
 Trenn-Trafo 244
 Triggerung 267
 Triode 265
 Tripelpunkt 128, 140
 Tritium 397
 Tröpfchenmodell 410
 Tubuslänge 313
 Tubusrohr 312
 Tunneldiode 393
 Tunneleffekt 370
 Tunnelstrom 393
- U**
- Überlichtgeschwindigkeit 101, 266
 Übersetzungsverhältnis 244
 Übertrager 244
 UHF 262
 Ultrakurzwellen 262
 Ultraschall 88
 Ultraviolette Strahlung 262
 Umkehrfunktion 110
 Umkehrprisma 297, 311
 Umlaufspannung, magnetische 224
 Unbestimmtheitsbeziehung 353
 Unschärferelation 353, 354
 Unterdruck 114
 U-V-W-Regel 228
- V**
- Vakuum-Diode 264
 Vakuum-Lichtgeschwindigkeit 6, 290
 Vakuumröhre 347
 Valenzband 390
 Valenzelektron 373, 387
 Van-der-Waals-Zustandsgleichung 154
 Vektor 13
 Vektorprodukt 65
 Verarmungszone 277
 Verbindung, binäre 275
 Verbrennungsmotor 175
 Verdampfungsenthalpie 138, 166
 Verdampfungswärme 137
 Verdunstungskälte 140
 Vergrößerung 309
 – nutzbare 313
 Verlustleistung 211
 Vermehrungsfaktor 411
 Verschiebung 14
 Verschiebungspolarisation 202
 Verschiebungsstrom 255
 Verteilungskurve 158
 Vertrauensbereich 11
 Vertrauensniveau 11
 Verzeichnung 306
 VHF 262
 Vieldrahtkammer 408
 Viele-Welten-Interpretation 368
 Vielstrahlinterferenz 317
 virtuell 293
 Viskosität 114
 Vollzylinder 69
 Volt 7, 197
 Voltmeter 216
 Volumenänderungsarbeit 162
 Volumenausdehnungskoeffizient 131
 Volumenstrom 113
 Vorsätze 7
- W**
- Wahrscheinlichkeitsverteilung 355
 Wärme 127, 135
 – latente 137
 Wärmedämmung 144
 Wärmedämmwert 145
 Wärmedurchgang 145
 Wärmedurchgangskoeffizient 145
 Wärmekapazität 152
 – molare 152
 – spezifische 135
 Wärmekraftmaschine 172
 Wärmelehre 127

- Wärmeleitfähigkeit 144
 - Wärmeleitung 145
 - Wärmemenge 135
 - Wärmepumpe 143, 173
 - Wärmerohr 143
 - Wärmestrahlung 146
 - Wärmestrom 143
 - Wärmetod 182
 - Wärmetransport 142
 - Wärmeübergang 145
 - Wärmeübergangskoeffizient 145
 - Wasserdampf 137
 - Wassermolekül 385
 - Wassersäule 108
 - Wasser, schweres 397
 - Wasserstoffatom 372
 - Wasserstoffbombe 413
 - Watt 7, 51, 211
 - Wattsekunde 51
 - Weber 7, 236
 - Wechselstrom 242
 - Wechselstromleistung 251
 - Wechselstromwiderstand 245
 - Wechselwirkung
 - schwache 400
 - starke 400
 - Weglänge, optische 295, 332
 - Weg-Zeit-Diagramm 22
 - Weißabgleich 149
 - Weisscher Bezirk 225
 - Welle 89
 - ebene 90
 - elektromagnetische 257
 - harmonische 88
 - stehende 90, 377
 - Wellencharakter 354
 - Wellenenergie 315
 - Wellenfläche 90, 315
 - Wellenfront 315, 320
 - Wellengruppe 260
 - Wellenlänge 89
 - Wellenleiter 260
 - Wellenmaschine 87
 - Wellenoptik 315
 - Wellenpaket 380
 - Wellenstrahl 320
 - Wellenwiderstand 260
 - Wellenzug 316
 - Welle-Teilchen-Dualismus 353, 382
 - Weltbild
 - geozentrisches 96
 - heliozentrisches 96
 - Wendel 212
 - Wheatstonesche Brückenschaltung 216
 - Widerstand 205
 - kapazitiver 247
 - spezifischer 209, 274
 - Widerstandsbeiwert 117
 - Wien-Konstante 149
 - Wilsonsche Nebelkammer 408
 - Windkanal 117
 - Winkelbeschleunigung 55
 - Winkelgeschwindigkeit 55
 - Wirbel 116
 - Wirbelfeld 220, 256
 - elektrisches 258
 - magnetisches 258
 - Wirbelstrom 237
 - Wirbelsturm 62
 - Wirkleistung 251
 - Wirkung 346, 353
 - Wirkungsgrad 51, 173
 - Wirkungsquantum 346
 - Wirkwiderstand 245
 - Wölbspiegel 293, 305
 - Wolframfaden 212
 - Wurf
 - schiefer 31
 - waagerechter 30
- X**
- Xenon 270
- Z**
- Zahl, komplexe 249
 - Zählrate 409
 - Zählrohr 408
 - Zahnradmethode 290

- Z-Diode 278
- Zeigerdiagramm 249
- Zeit 4, 5
- Zeitdilatation 101
- Zeitkonstante 218
- Zener-Diode 393
- Zener-Effekt 278
- Zenti 8
- Zentrifugalkraft 59
- Zentripetal-Beschleunigung 58
- Zentripetalkraft 59
- Zerfallsgesetz 403
- Zerfallskonstante 403
- Zerfallsreihe 404
- Zerlegung, spektrale 296, 327
- Zerstreuungslinse 301
- Zone, verbotene 388, 393, 394
- Zustand
 - angeregter 359
 - eingeschwungener 80
- Zustandsänderung 163
 - adiabatische 167
 - isobare 166
 - isochore 165
 - isotherme 163
- Zustandsgleichung des idealen Gases 153
- Zustandsgröße 127, 163
- Zwischenbild 310
 - reelles 310, 312
- Zylinderspule 221, 240