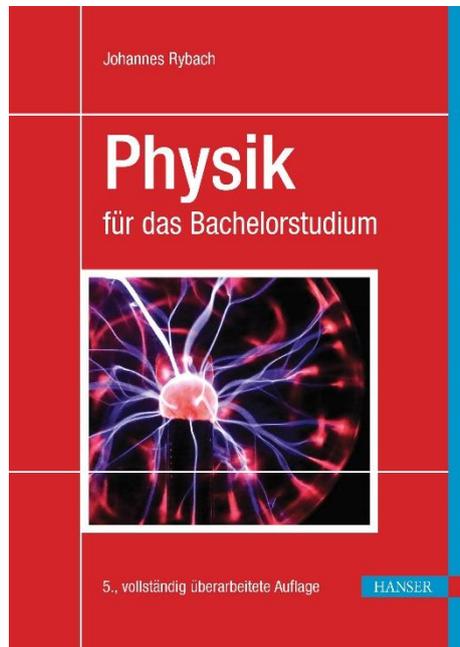


# HANSER



## 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

<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
<b>1 Einstieg</b> .....	<b>1</b>
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
<b>Zusammenfassung: Einstieg</b> .....	<b>16</b>
Testfragen zu Kapitel 1 .....	17
Übungsaufgaben zu Kapitel 1 .....	18
<b>2 Mechanik</b> .....	<b>21</b>
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
<b>Zusammenfassung: Kinematik</b> .....	<b>33</b>

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
	<b>Zusammenfassung: Dynamik</b> .....	<b>45</b>
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
	<b>Zusammenfassung: Arbeit, Energie und Leistung</b> .....	<b>53</b>
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
	<b>Zusammenfassung: Kreisbewegung</b> .....	<b>63</b>
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
	<b>Zusammenfassung: Rotation starrer Körper</b> .....	<b>73</b>

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
	<b>Zusammenfassung: Schwingungen und Wellen .....</b>	<b>91</b>
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
	<b>Zusammenfassung: Gravitation und Himmelsmechanik .....</b>	<b>105</b>
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
	<b>Zusammenfassung: Flüssigkeiten und Gase .....</b>	<b>118</b>
	Testfragen zu Kapitel 2 .....	118
	Übungsaufgaben zu Kapitel 2 .....	120

<b>3</b>	<b>Thermodynamik</b>	<b>127</b>
3.1	Temperatur	127
3.1.1	Skalen und Fixpunkte	128
3.1.2	Thermische Ausdehnung	130
3.1.3	Temperaturmessung	133
	<b>Zusammenfassung: Temperatur</b>	<b>134</b>
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
	<b>Zusammenfassung: Wärme</b>	<b>151</b>
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
	<b>Zusammenfassung: Ideale Gase</b>	<b>160</b>
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
	<b>Zusammenfassung: Zustandsänderungen und erster Hauptsatz</b>	<b>169</b>
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
	<b>Zusammenfassung: Kreisprozesse und zweiter Hauptsatz</b>	<b>182</b>
	Testfragen zu Kapitel 3	183
	Übungsaufgaben zu Kapitel 3	184
<b>4</b>	<b>Elektrizität und Magnetismus</b>	<b>189</b>
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
	<b>Zusammenfassung: Elektrostatik</b>	<b>205</b>
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
	<b>Zusammenfassung: Strom und Widerstand</b>	<b>219</b>
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
	<b>Zusammenfassung: Magnetfeld</b>	<b>233</b>
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
	<b>Zusammenfassung: Elektromagnetische Induktion .....</b>	<b>242</b>
4.5	Wechselstrom .....	242
4.5.1	Generator und Transformator .....	243
4.5.2	Wechselstromwiderstand .....	245
4.5.3	Phasenbeziehungen im Wechselstromkreis .....	248
	<b>Zusammenfassung: Wechselstrom .....</b>	<b>251</b>
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
	<b>Zusammenfassung: Elektromagnetische Schwingungen und Wellen ..</b>	<b>263</b>
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
	<b>Zusammenfassung: Grundlagen der Elektronik .....</b>	<b>281</b>
	Testfragen zu Kapitel 4 .....	282
	Übungsaufgaben zu Kapitel 4 .....	284

<b>5</b>	<b>Optik</b> .....	<b>289</b>
5.1	Grundlagen der Strahlenoptik .....	289
5.1.1	Lichtausbreitung .....	290
5.1.2	Reflexion .....	292
5.1.3	Brechung und Totalreflexion .....	295
	<b>Zusammenfassung: Grundlagen der Strahlenoptik</b> .....	<b>299</b>
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
	<b>Zusammenfassung: Strahlenoptische Abbildungen</b> .....	<b>307</b>
5.3	Strahlenoptische Instrumente .....	307
5.3.1	Kamera und Auge .....	307
5.3.2	Fernrohre .....	310
5.3.3	Mikroskop .....	312
	<b>Zusammenfassung: Strahlenoptische Instrumente</b> .....	<b>314</b>
5.4	Grundlagen der Wellenoptik .....	315
5.4.1	Interferenz und Kohärenz .....	315
5.4.2	Wellenausbreitung .....	319
5.4.3	Beugung .....	320
	<b>Zusammenfassung: Grundlagen der Wellenoptik</b> .....	<b>322</b>
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
	<b>Zusammenfassung: Anwendungen der Wellenoptik</b> .....	<b>333</b>
5.6	Polarisationsoptik .....	334
5.6.1	Grundbegriffe .....	334
5.6.2	Erzeugung polarisierten Lichtes .....	335
5.6.3	Anwendungen polarisierten Lichtes .....	338
	<b>Zusammenfassung: Polarisationsoptik</b> .....	<b>339</b>
	Testfragen zu Kapitel 5 .....	339
	Übungsaufgaben zu Kapitel 5 .....	341

<b>6</b>	<b>Quanten und Atome</b> .....	<b>345</b>
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
	<b>Zusammenfassung: Welle-Teilchen-Dualismus</b> .....	<b>356</b>
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
	<b>Zusammenfassung: Atomhülle</b> .....	<b>371</b>
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
	<b>Zusammenfassung: Quanten-Emission und -Absorption</b> .....	<b>384</b>
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
<b>Zusammenfassung: Festkörper .....</b>	<b>395</b>
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
<b>Zusammenfassung: Atomkern .....</b>	<b>415</b>
Testfragen zu Kapitel 6 .....	416
Übungsaufgaben zu Kapitel 6 .....	417
<b>Anhang .....</b>	<b>421</b>
Nützliche mathematische Beziehungen .....	421
Quellen- und Literaturverzeichnis .....	425
Verzeichnis der Bildquellen und Bildautoren .....	427
<b>Index .....</b>	<b>429</b>

Auf [plus.hanser-fachbuch.de](http://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 <sup>2</sup>	2.2.2
Druck	$p$	Pascal	Pa	= N/m <sup>2</sup>	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	$\Phi$	Weber	Wb	= V · s	4.4.2
Magnetische Flussdichte	$B$	Tesla	T	= Wb/m <sup>2</sup>	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	$\mu$	$10^{-6}$
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)	$10^{41} \text{ kg}$
Masse der Erde	$10^{25} \text{ kg}$
Masse eines Menschen	$10^2 \text{ kg}$
Masse des Wasserstoffatoms (H)	$10^{-27} \text{ kg}$
Durchmesser unserer Galaxis	$10^{21} \text{ m}$
Durchmesser der Erde	$10^7 \text{ m}$
Größe eines Menschen	$10^0 \text{ m}$
Durchmesser des H-Atomkerns (Proton)	$10^{-15} \text{ m}$
Alter der Erde (ca. $\frac{1}{4}$ des Universums)	$10^{17} \text{ s}$
Lebenserwartung eines Menschen	$10^9 \text{ s}$
Periode zwischen Herzschlägen	$10^0 \text{ s}$
Flugzeit des Lichtes durch ein Proton (hypothetisch)	$10^{-24} \text{ s}$
Lichtjahr (Strecke, die in 31 536 000 s mit $c_0$ zurückgelegt wird)	$10^{16} \text{ m}$



### 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

- $\alpha$ -Strahlung 401
- $\alpha$ -Teilchen 399
- $\beta$ -Strahlung 401
- $\gamma$ -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
- Energieücke 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  
 Gaussscher 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

Hertscher 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  
Lasodiode 279, 394  
Laselinie 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  
Nullpunktsenergie 368  
Nutzlast 111  
Nutzschwelle 413
- O**
- Oberflächenenergie 112  
Oberflächenspannung 112  
Oberwellen 88  
Objektiv 307  
Objektwelle 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  
Stokessesches 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