

Naturkonstanten in SI-Einheiten



Die numerischen Werte basieren auf den Empfehlungen der CODATA 2014.

Größe	Symbol	Wert	Fehler
Vakuumlichtgeschwindigkeit	c	$2.997\,924\,58 \cdot 10^8 \text{ m/s}$	exakt
Gravitationskonstante	G	$6.674\,08 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$	$0.000\,31 \cdot 10^{-11}$
Elementarladung	e, e_0	$1.602\,176\,620\,8 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$0.000\,000\,009\,8 \cdot 10^{-19}$
Plancksche Konstante	h	$6.626\,070\,040 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$	$0.000\,000\,081 \cdot 10^{-34}$
	$\hbar = (2\pi)^{-1}h$	$1.054\,571\,800 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$	$0.000\,000\,013 \cdot 10^{-34}$
Avogadro-Konstante	N_A	$6.022\,140\,857 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	$0.000\,000\,074 \cdot 10^{23}$
Faraday-Konstante	$F = N_A e_0$	$9.648\,533\,289 \cdot 10^4 \text{ C/mol}$	0.000 59
Elektronenmasse	m_e	$9.109\,383\,56 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	$0.000\,000\,11 \cdot 10^{-31}$
		$0.510\,998\,946\,1 \text{ MeV}$	$0.000\,000\,003\,1$
Rydberg-Konstante	$R_\infty = (2h)^{-1}m_e c \alpha^2$	$1.097\,373\,156\,850\,8 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$	0.000 065
Feinstrukturkonstante	$\alpha = e_0^2(2\epsilon_0 h c)^{-1}$	$7.297\,352\,566\,4 \cdot 10^{-3}$	$0.000\,000\,001\,7 \cdot 10^{-3}$
	α^{-1}	137.035 999 139	0.000 000 031
Elektronenradius	$r_e = \hbar(m_e c)^{-1} \alpha$	$2.817\,940\,322\,7 \cdot 10^{-15} \text{ m}$	$0.000\,000\,001\,9 \cdot 10^{-15}$
e^- -Compton-Wellenlänge	$\lambda_C = h(m_e c)^{-1}$	$2.426\,310\,236\,7 \cdot 10^{-12} \text{ m}$	$0.000\,000\,001\,1 \cdot 10^{-12}$
Bohrscher Radius	$a_0 = r_e \alpha^{-2}$	$0.529\,177\,210\,67 \cdot 10^{-10} \text{ m}$	$0.000\,000\,000\,12 \cdot 10^{-10}$
Atomare Masseneinheit	$u = \frac{1}{12}m(^{12}\text{C})$	$1.660\,539\,040 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	$0.000\,000\,020 \cdot 10^{-27}$
Protonenmasse	m_p	$1.672\,621\,898 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	$0.000\,000\,021 \cdot 10^{-27}$
		$938.272\,081\,3 \text{ MeV}$	0.000 005 8
Neutronenmasse	m_n	$1.674\,927\,471 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	$0.000\,000\,021 \cdot 10^{-27}$
		$939.565\,413\,3 \text{ MeV}$	0.000 005 8
Magnetisches Flussquantum	$\Phi_0 = h(2e_0)^{-1}$	$2.067\,833\,831 \cdot 10^{-15} \text{ Wb}$	$0.000\,000\,013 \cdot 10^{-15}$
Spez. Elektronenladung	$-e_0 m_e^{-1}$	$-1.758\,820\,024 \cdot 10^{11} \text{ C/kg}$	$0.000\,000\,011 \cdot 10^{11}$
Bohrsches Magneton	$\mu_B = e_0 \hbar(2m_e)^{-1}$	$9.274\,009\,994 \cdot 10^{-24} \text{ J/T}$	$0.000\,005\,7 \cdot 10^{-26}$
Magn. Moment des Elektrons	μ_e	$-9.284\,764\,620 \cdot 10^{-24} \text{ J/T}$	$0.000\,005\,7 \cdot 10^{-26}$
Kern-Magneton	$\mu_N = e_0 \hbar(2m_p)^{-1}$	$5.050\,783\,699 \cdot 10^{-27} \text{ J/T}$	$0.000\,000\,031 \cdot 10^{-27}$
Magn. Moment des Protons	μ_p	$1.410\,606\,787\,3 \cdot 10^{-26} \text{ J/T}$	$0.000\,000\,009\,7 \cdot 10^{-26}$
Gyromagnetisches Verhältnis	γ_p	$2.675\,221\,900 \cdot 10^8 \text{ rad/s} \cdot \text{T}$	$0.000\,000\,018 \cdot 10^8$
Quanten-Hallwiderstand	R_H	$2.581\,280\,745\,55 \cdot 10^4 \Omega$	0.000 005 9
Molare Gaskonstante	R	$8.314\,459\,8 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$	0.000 004 8
Boltzmann-Konstante	$k, k_B = RN_A^{-1}$	$1.380\,648\,52 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$	$0.000\,000\,79 \cdot 10^{-23}$
Stefan-Boltzmann-Konstante	$\sigma = \pi^2 k_B^4 (60 \hbar^3 c^2)^{-1}$	$5.670\,367 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$	$0.000\,013 \cdot 10^{-8}$
Wiensche Konstante	$b = \lambda_{\max} T$	$2.897\,772\,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$	$0.000\,001\,7 \cdot 10^{-3}$
Magnetische Feldkonstante	μ_0	$1.256\,637\,0614 \dots \cdot 10^{-6} \text{ N/A}^2$	exakt
Elektrische Feldkonstante	$\epsilon_0 = (\mu_0 c^2)^{-1}$	$8.854\,187\,817 \dots \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$	exakt

	Inhaltsverzeichnis	I	⇒
	Tabellenverzeichnis	XXI	⇒
1	Kinematik	1	⇒
2	Dynamik	32	⇒
3	Starre Körper	83	⇒
4	Mikromechanik	117	⇒
5	Gravitation und Relativitätstheorie	123	⇒
6	Mechanik der deformierbaren Körper	144	⇒
7	Nichtlineare Dynamik, Chaos und Fraktale	197	⇒
	Formelzeichen Mechanik	213	⇒
8	Tabellen zur Mechanik	214	⇒
9	Schwingungen	235	⇒
10	Wellen	265	⇒
11	Akustik	287	⇒
12	Optik	309	⇒
	Formelzeichen Schwingungen, Wellen, Akustik und Optik	379	⇒
13	Tabellen zu Schwingungen, Akustik und Optik	381	⇒
14	Ladungen und Ströme	389	⇒
15	Elektrisches und magnetisches Feld	405	⇒
16	Anwendungen in der Elektrotechnik	461	⇒
17	Stromleitung in Flüssigkeiten, in Gasen und im Vakuum	505	⇒
18	Plasmaphysik	526	⇒
	Formelzeichen Elektrizitätslehre	544	⇒
19	Tabellen zur Elektrizitätslehre	546	⇒
20	Gleichgewicht und Zustandsgrößen	565	⇒
21	Wärme, Energieumwandlung und Zustandsänderungen	612	⇒
22	Phasenumwandlungen, Reaktionen und Wärmeausgleich	651	⇒
	Formelzeichen Wärmelehre	699	⇒
23	Tabellen zur Thermodynamik	702	⇒
24	Photonen – Elektromagnetische Strahlung und Lichtquanten	733	⇒
25	Materiewellen – Wellenmechanik der Teilchen	739	⇒
26	Atom- und Molekülphysik	762	⇒
27	Elementarteilchenphysik – das Standard-Modell	791	⇒
28	Kernphysik	813	⇒
29	Festkörperphysik	869	⇒
	Formelzeichentabelle Mikrophysik	967	⇒
30	Tabellen zur Quantenphysik	972	⇒
31	Messungen und Messfehler	991	⇒
32	Vektorrechnung	1006	⇒
33	Differenzial- und Integralrechnung	1011	⇒
34	Tabellen zum SI-System	1015	⇒
	Nobelpreisträger für Physik	1021	⇒
	Sachwortverzeichnis	1031	⇒

**Taschenbuch
der
Physik**



Edition
Harri 
Deutsch 

Taschenbuch der Physik

Formeln, Tabellen, Übersichten

Herausgegeben von
Prof. Dr. Dr. h. c. Horst Stöcker

8. Auflage

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsselberger Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

Europa-Nr.: 56740

Herausgeber:

Professor Dr. Dr. *h c* Horst Stöcker

Judah M. Eisenberg Professor Laureatus an der Goethe-Universität Frankfurt am Main,
Gründungsvorstandsvorsitzender und Senior Fellow des FIAS (Frankfurt Institute for Advanced Studies),
Gründungsdirektor der FIGSS (Frankfurt International Graduate School of Sciences),
Wissenschaftlicher Geschäftsführer des GSI Helmholtzzentrums für Schwerionenforschung (2007 – 2015).

8. Auflage

Druck 5 4 3 2 1

ISBN 978-3-8085-5875-1

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

© 2018 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten

<http://www.europa-lehrmittel.de>

Satz: Satzherstellung Dr. Naake, 09618 Brand-Erbisdorf

Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald

Druck: Media-Print Informationstechnologie GmbH, 33100 Paderborn

Autoren:

Dr. **Christoph Best**, von Neumann Institute of Computing, NIC, Forschungsanlage Jülich (Mechanik) mit
Dipl.-Ing. Helmut Kutz, Mauerwerke AG, Oberndorf,

Prof. Dr. Rudolf Pitka, FH Frankfurt

Dr. **Kordt Griepenkerl**, Uni Frankfurt, (Schwingungen und Wellen, Akustik, Optik) mit

Prof. Dr. Steffen Bohrmann, Hochschule Mannheim,

Dipl.-Phys. Klaus Horn, FH Frankfurt

Dr. **Christian Hofmann**, Deutsche Bank, (Elektrizität, Magnetismus) mit

Dr. Klaus-Jürgen Lutz, Uni Frankfurt,

Prof. Dr. Rudolf Taute, FH der Telekom, Berlin,

Prof. Dr. Georg Terlecki, FH Rheinland-Pfalz, Abt. Kaiserslautern

Prof. Dr. **Christoph Hartnack**, Ecole de Mines et Subatech, Nantes (Thermodynamik) mit

Dipl.-Betriebswirt (BA) Jochen Gerber, FH Frankfurt und Arthur D. Little, Schwalbach,

Dr. Ludwig Neise, Uni Frankfurt

Prof. Dr. **Alexander Andreeff**, ehem. TU Dresden, (Quantenphysik) mit

Dr. Markus Hofmann, Uni Frankfurt und SUN Microsystems,

Dr. Christian Spieles, Uni Frankfurt und Kreditanstalt für Wiederaufbau

Mit Beiträgen von

Prof. Dr. Hans Babovsky, TU Ilmenau,

Dr. Heiner Heng, Freudenberg & Co., Weinheim,

Dipl.-Phys. Frank Heyder, Physikalisches Institut, Frankfurt,

Dr. André Jahns, Uni Frankfurt,

Prof. Dr. Peter Junglas, FHWT Vechta/Diepholz/Oldenburg

Prof. Dr. Karl-Heinz Kampert, Technische Uni und Forschungszentrum Karlsruhe,

Prof. Dr. Ralf Rüdiger Kories, Hochschule für Telekommunikation, Leipzig,

Dipl.-Ing. chem. Imke Krüger-Wiedorn, Naturwissenschaftl.-Techn. Akademie Isny und Byk-Gülden,

St.R. Dipl.-Phys. Christiane Lesny, Uni Frankfurt,

Prof. Dr.-Ing. Holger Lutz, FH Gießen-Friedberg,

Prof. Dr.-Ing. Monika Lutz, FH Gießen-Friedberg,

Dr. Raffaele Mattiello, Uni Frankfurt,

Dr. Jörg Müller, University of Tennessee, Knoxville,

Dr. Jürgen Müller, Denton Vacuum, Inc., und APD Cryogenics, Inc., Frankfurt,

Prof. Dr. Gottfried Münzenberg, Uni Gießen und GSI Darmstadt,

Akad. Oberrat Dr. habil. Helmut Oeschler, TH Darmstadt,

Prof. Dr. Roland Reif, ehem. TU Dresden,

Akad. Oberrat Dr. Joachim Reinhardt, Uni Frankfurt,

Dr. Hans-Georg Reusch, Uni Münster und IBM Wissenschaftliches Zentrum Heidelberg,

Dr. Matthias Rosenstock, Nova Data,

Dr. Wolfgang Schäfer, Bosch-Telekom, Paris,

Prof. Dr. Alwin Schempp, Inst. für Angewandte Physik, Uni Frankfurt,

Prof. Dr.-Ing. Heinz Schmidt-Walter, Hochschule Darmstadt,

Prof. Dr. Bernd Schürmann, Siemens AG, München,

Phys.-Techn. Ass. Astrid Steidl, NTA Isny,

Dr. Jürgen Theis, Infracerv,

Prof. Dr. Thomas Weis, Uni Dortmund,

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Wendt, Hochschule Esslingen,

Dr. Michael Wiedorn, Gesamthochschule Essen und PSI Bern,

Dr. Bernd Wolf, Physikalisches Institut, Uni Frankfurt,

Dr.-Ing. Dieter Zetsche, Vorstandsvorsitzender der Daimler AG, Stuttgart.

Mit zahlreichen Beiträgen aus den Physik-Lehrbuchreihen von

Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Walter Greiner, Uni Frankfurt, und

Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Werner Martienssen, Physikalisches Institut, Frankfurt

Vorwort

Die vielfältigen **Anwendungen der Physik** bestimmen heute weite Bereiche der Ingenieur- und Naturwissenschaften. In Ausbildung und Praxis wird es daher immer wichtiger, die **Grundlagen der Physik** und **aktueller Messmethoden** griffbereit zu haben.

Das **Taschenbuch der Physik** wurde von einem Team erfahrener Hochschuldozenten, Wissenschaftler und in der Praxis stehender Ingenieure unter dem Gesichtspunkt „**Physik griffbereit**“ erstellt: Alle wichtigen Formeln, Tabellen und **Anwendungen** sind hier kompakt zusammengestellt.

Das **Taschenbuch der Physik** vereint

- **Basiswissen** für Abiturienten, Fachoberschüler und Studenten im **Grundstudium**,
- **Aufbauwissen** für **fortgeschrittene** Studenten und
- den physikalischen **Background** für den **berufstätigen** Ingenieur und Wissenschaftler.

Das **Taschenbuch der Physik** ist hervorragend geeignet als

- rasch verfügbare Informationsquelle für Klausuren und Prüfungen,
- sicheres Hilfsmittel beim Lösen von Problemen und Übungsaufgaben,
- aktuelles **Nachschlagewerk** für den Berufspraktiker.

Jedes Kapitel ist für sich eine selbstständige Einheit und enthält alle wichtigen

- ▲ **Begriffe, Formeln, Regeln und Sätze**,
- **Beispiele** und praktische **Anwendungen**,
- ▶ Hinweise auf wichtige **Fehlerquellen**, Tips und Querverweise,
- wichtige **Messverfahren** für die Praxis sowie

zahlreiche **Tabellen** von Naturkonstanten und Materialeigenschaften.

Hervorzuheben ist die einheitliche Behandlung und Darstellung der physikalischen Begriffe und Formeln: Zu jeder Größe sind alle Eigenschaften wie Messverfahren, wichtige Gesetze, verwandte Größen, Materialkonstanten, SI-Einheiten, Dimensionen, Umwandlungen und Anwendungshinweise zusammengetragen und kompakt dargestellt.

Begriffsboxen erleichtern den schnellen Überblick:

Begriff/ Gesetz	SI-Einheit		
	Symbol	Einheit	Benennung
Formeln

Das **Taschenbuch der Physik** ist – wie das **Taschenbuch mathematischer Formeln und moderner Verfahren** von H. Stöcker (Hrsg.) – geeignet als **Nachschlagewerk** zum Lehr- und Lernbuch **Physik – Der Grundkurs** von R. Pitka, St. Bohrmann, H. Stöcker, G. Terlecki und H. Zetsche.

Vorwort zur achten Auflage

Wert und Nutzen des *Taschenbuch der Physik* für alle Nutzer in der Lehre, in Schule und Studium und nicht zuletzt in der beruflichen Anwendung sind international anerkannt: Sowohl die französische Ausgabe mit dem wunderbar aussagekräftigen Titel *Toute la Physique* als auch die amerikanisch/englische Ausgabe *Handbook of Physics* finden in den jeweiligen großen Sprachräumen beachtliche, Herausgeber und Verlag erfreuende Resonanz.

In der deutschen Ausgabe wird erstmals eine zweite Farbe eingesetzt, um die Orientierung in dem umfassenden Referenzwerk noch einmal zu verbessern.

Das besondere Angebot neben der Buchausgabe ist die Online-Version in der Europathek <https://www.europathek.de>, dem Medienregal des Verlages Europa-Lehrmittel. Die Online-Version bietet den kompletten Text, eine komfortable Suchfunktion, farbige Grafiken und alle Tabellen als pdf-Dateien.

Herausgeber, Autoren und Verlag wünschen ausdrücklich Ihre kritischen und lobenden Hinweise.

Herausgeber und Verlag Europa-Lehrmittel
Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsselderger Str. 23
42781 Haan-Gruiten
lektorat@europa-lehrmittel.de
<http://www.europa-lehrmittel.de>

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

XXI

I Mechanik

1	Kinematik	1
1.1	Beschreibung von Bewegungen	1
1.1.1	Bezugssysteme	1
1.1.2	Zeit	5
1.1.3	Länge, Fläche, Volumen	7
1.1.4	Winkel	8
1.1.5	Mechanische Systeme	10
1.2	Bewegung in einer Dimension	11
1.2.1	Geschwindigkeit	11
1.2.1.1	Durchschnittsgeschwindigkeit	12
1.2.1.2	Momentangeschwindigkeit	13
1.2.2	Beschleunigung	14
1.2.3	Einfache Bewegungen in einer Dimension	16
1.3	Bewegung in mehreren Dimensionen	19
1.3.1	Geschwindigkeitsvektor	20
1.3.2	Beschleunigungsvektor	22
1.3.3	Freier Fall und Wurf	25
1.4	Drehbewegung	27
1.4.1	Winkelgeschwindigkeit	27
1.4.2	Winkelbeschleunigung	29
1.4.3	Bahngeschwindigkeit	30
2	Dynamik	32
2.1	Grundgesetze der Dynamik	32
2.1.1	Masse und Impuls	32
2.1.1.1	Masse	32
2.1.1.2	Impuls	34
2.1.2	Newtonsche Gesetze	34
2.1.2.1	Trägheit (Erstes Newtonsches Gesetz)	34
2.1.2.2	Grundgesetz der Dynamik (Zweites Newtonsches Gesetz)	35
2.1.2.3	Kraft	36
2.1.2.4	Reaktionsprinzip (Drittes Newtonsches Gesetz)	37
2.1.2.5	Trägheitskräfte	38
2.1.2.6	D'Alembertsches Prinzip	39
2.1.2.7	Zusammensetzung von Kräften	39
2.1.2.8	Zerlegung von Kräften	40
2.1.3	Bahndrehimpuls	43
2.1.4	Drehmoment	44
2.1.5	Dynamisches Grundgesetz für Drehbewegungen	46
2.2	Kräfte	47
2.2.1	Gewichtskraft	47
2.2.2	Federkräfte und Torsionskräfte	48
2.2.3	Reibungskräfte	50
2.2.3.1	Haftreibung	50
2.2.3.2	Gleitreibung	51

	2.2.3.3	Rollreibung	51
	2.2.3.4	Seilreibung	52
2.3		Trägheitskräfte in rotierenden Bezugssystemen	53
	2.3.1	Zentripetalkraft und Zentrifugalkraft	53
	2.3.2	Corioliskraft	55
2.4		Arbeit und Energie	57
	2.4.1	Arbeit	57
	2.4.2	Energie	59
	2.4.3	Kinetische Energie	60
	2.4.4	Potenzielle Energie	60
		2.4.4.1 Hubarbeit gegen Gravitationskraft	61
		2.4.4.2 Verformungsarbeit und Spannungsenergie einer Feder	62
	2.4.5	Reibungsarbeit	63
2.5		Leistung	64
	2.5.1	Wirkungsgrad	64
2.6		Stoßprozesse	65
	2.6.1	Elastische, gerade, zentrale Stöße	67
	2.6.2	Elastische, schiefe, zentrale Stöße	68
	2.6.3	Elastischer, schiefer Stoß mit einem ruhenden Körper	69
	2.6.4	Unelastische Stöße	71
		2.6.4.1 Teilunelastische Stöße	71
		2.6.4.2 Total unelastischer Stoß	71
2.7		Raketen	71
	2.7.1	Schubkraft	72
	2.7.2	Raketengleichung	73
2.8		Massenpunktsysteme	74
	2.8.1	Bewegungsgleichungen	74
	2.8.2	Impulserhaltungssatz	76
	2.8.3	Drehimpulserhaltungssatz	77
	2.8.4	Energieerhaltungssatz	77
2.9		Lagrange- und Hamilton-Gleichungen	78
	2.9.1	Lagrange-Gleichungen und Hamiltonsches Prinzip	78
	2.9.2	Hamilton-Gleichungen	81
3		Starre Körper	83
3.1		Kinematik	83
	3.1.1	Dichte	83
	3.1.2	Schwerpunkt	83
	3.1.3	Kinematische Grundgrößen	85
3.2		Statik	87
	3.2.1	Kraftvektoren	87
	3.2.2	Drehmoment	89
	3.2.3	Kräftepaar	91
	3.2.4	Gleichgewichtsbedingungen der Statik	92
	3.2.5	Technische Mechanik	94
		3.2.5.1 Lagerreaktionen	94
		3.2.5.2 Fachwerke	94
	3.2.6	Maschinen	95
		3.2.6.1 Hebel	95
		3.2.6.2 Keile und Schrauben	96
		3.2.6.3 Rollen	97

3.3	Dynamik	100
3.4	Trägheitsmoment und Drehimpuls	100
3.4.1	Massenträgheitsmoment	100
3.4.1.1	Satz von Steiner	102
3.4.1.2	Trägheitsmomente geometrischer Körper	103
3.4.2	Drehimpuls	105
3.4.2.1	Gleichgewicht bei Drehbewegungen	106
3.5	Arbeit, Energie und Leistung	106
3.5.1	Kinetische Energie	107
3.5.2	Potenzielle Energie der Torsion	109
3.6	Kreiselttheorie	109
3.6.1	Trägheitstensor	110
3.6.2	Nutation und Präzession	112
3.6.2.1	Nutation	112
3.6.2.2	Präzession	113
3.6.2.3	Kreiselmomente	115
3.6.3	Anwendungen von Kreiseln	115
4	Mikromechanik	117
4.1	Dünnschichttechnik	117
4.2	Belichtungs- und Ätzverfahren	118
4.3	Anwendungen	119
4.3.1	Sensoren	119
4.3.2	Aktoren	121
4.3.3	Technische Anwendungen	121
5	Gravitation und Relativitätstheorie	123
5.1	Gravitationsfeld	123
5.1.1	Gravitationsgesetz	123
5.1.2	Planetenbewegung	125
5.1.3	Planetensystem	126
5.1.3.1	Sonne und Planeten	126
5.1.3.2	Satelliten	129
5.2	Spezielle Relativitätstheorie	130
5.2.1	Relativitätsprinzip	130
5.2.2	Lorentz-Transformation	132
5.2.2.1	Addition der Geschwindigkeit	135
5.2.3	Relativistische Effekte	136
5.2.3.1	Längenkontraktion	136
5.2.3.2	Zeitdilatation	137
5.2.4	Relativistische Dynamik	137
5.2.4.1	Relativistische Massenzunahme	137
5.2.4.2	Relativistische kinetische Energie	139
5.3	Allgemeine Relativitätstheorie und Kosmologie	140
5.3.1	Sterne und Galaxien	141
5.3.1.1	Sternentwicklung	142
6	Mechanik der deformierbaren Körper	144
6.1	Elastizitätslehre	144
6.1.1	Spannung	144
6.1.1.1	Zug, Biegung, Scherung, Torsion	145

6.1.2	Elastische Verformung	146
6.1.2.1	Dehnung	147
6.1.2.2	Querdehnung	148
6.1.2.3	Allseitige Kompression	149
6.1.2.4	Biegung eines Stabes (Balkens)	150
6.1.2.5	Scherung	154
6.1.2.6	Torsion	154
6.1.2.7	Energie und Arbeit bei Verformungen	156
6.1.3	Plastische Verformung	156
6.1.3.1	Bereiche bei Zugbelastung	157
6.1.3.2	Knickung	158
6.1.3.3	Härte	159
6.2	Hydrostatik, Aerostatik	161
6.2.1	Flüssigkeiten und Gase	161
6.2.2	Druck	161
6.2.2.1	Kolbendruck	162
6.2.2.2	Schweredruck in Flüssigkeiten	163
6.2.2.3	Kompressibilität	165
6.2.2.4	Schweredruck in Gasen	165
6.2.2.5	Pumpen	167
6.2.3	Auftrieb	169
6.2.4	Kohäsion, Adhäsion, Oberflächenspannung	171
6.2.4.1	Kapillarität	172
6.3	Hydrodynamik, Aerodynamik	174
6.3.1	Strömungsfeld	174
6.3.2	Grundgleichungen idealer Strömungen	175
6.3.2.1	Kontinuitätsgleichung	176
6.3.2.2	Eulersche Gleichung	178
6.3.2.3	Gesetz von Bernoulli	179
6.3.2.4	Torricellisches Ausflussgesetz	181
6.3.2.5	Saugeffekte	183
6.3.2.6	Auftrieb an umströmten Körpern	183
6.3.3	Reale Strömungen	185
6.3.3.1	Innere Reibung	185
6.3.3.2	Navier-Stokes-Gleichung	187
6.3.3.3	Laminare Strömung in einem Rohr	187
6.3.3.4	Umströmung einer Kugel	189
6.3.3.5	Bernoulli-Gleichung	190
6.3.4	Turbulente Strömungen	190
6.3.4.1	Widerstandsbeiwert	191
6.3.5	Ähnlichkeitsgesetze	192
6.3.5.1	Rohrreibung	194
6.3.6	Strömungen mit Dichteänderungen	195
7	Nichtlineare Dynamik, Chaos und Fraktale	197
7.1	Dynamische Systeme und Chaos	197
7.1.1	Dynamische Systeme	198
7.1.1.1	Zustandsraum und Phasenraum	199
7.1.2	Konservative Systeme	203
7.1.2.1	Satz von Liouville	203
7.1.2.2	Integrabilität	204

7.1.3	Dissipative Systeme	205
7.1.3.1	Seltsame Attraktoren, deterministisches Chaos	205
7.2	Bifurkationen	207
7.2.1	Logistische Abbildung	207
7.2.2	Universalität	210
7.3	Fraktale	210
Formelzeichen Mechanik		213
8	Tabellen zur Mechanik	214
8.1	Dichte	214
8.1.1	Festkörper	214
8.1.1.1	Metallische Legierungen	215
8.1.1.2	Nichtmetalle	216
8.1.2	Flüssigkeiten	219
8.1.3	Gase	220
8.2	Elastische Eigenschaften	221
8.3	Dynamische Eigenschaften	224
8.3.1	Reibungszahlen	224
8.3.2	Kompressibilität	226
8.3.2.1	Gase	226
8.3.2.2	Flüssigkeiten und Festkörper	228
8.3.3	Viskosität	229
8.3.4	Strömungswiderstand	232
8.3.5	Oberflächenspannung	233
II	Schwingungen, Wellen, Akustik und Optik	
9	Schwingungen	235
9.1	Freie ungedämpfte Schwingungen	239
9.1.1	Federpendel	239
9.1.2	Fadenpendel	241
9.1.3	Physisches Pendel	243
9.1.4	Torsionsschwingung	245
9.1.5	Flüssigkeitspendel	246
9.1.6	Elektrischer Schwingkreis	247
9.2	Gedämpfte Schwingungen	248
9.2.1	Reibung	249
9.2.1.1	Gleitreibung und Rollreibung	249
9.2.1.2	Viskose Reibung	250
9.2.1.3	Newtonsche Reibung	252
9.2.2	Gedämpfter elektrischer Schwingkreis	253
9.3	Erzwungene Schwingungen	254
9.4	Überlagerung von Schwingungen	256
9.4.1	Überlagerung von Schwingungen gleicher Frequenz	256
9.4.2	Überlagerung von Schwingungen ungleicher Frequenz	258
9.4.3	Überlagerung von Schwingungen in ungleicher Richtung und mit verschiedener Frequenz	259
9.4.4	Fourier-Analyse, Zerlegung nach Schwingungen	261
9.5	Gekoppelte Schwingungen	262

10	Wellen	265
10.1	Grundlegende Eigenschaften von Wellen	265
10.2	Polarisation	271
10.3	Interferenz	271
10.3.1	Kohärenz	271
10.3.2	Interferenz	272
10.3.3	Stehende Wellen	273
10.3.3.1	Stehende Wellen in einseitig eingespannten Stäben	274
10.3.3.2	Stehende Wellen auf Saiten	275
10.3.3.3	Stehende Wellen im Kundtschen Rohr	275
10.3.4	Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen	276
10.4	Doppler-Effekt	277
10.4.1	Mach-Wellen und Mach-Stoßwellen	278
10.5	Brechung	279
10.6	Reflexion	280
10.6.1	Phasenbeziehungen	280
10.7	Dispersion	281
10.8	Beugung	281
10.8.1	Beugung am Spalt	282
10.8.2	Beugung am Gitter	283
10.9	Modulation von Wellen	284
10.10	Oberflächenwellen und Schwerewellen	285
11	Akustik	287
11.1	Schallwellen	287
11.1.1	Schallgeschwindigkeit	287
11.1.2	Schallkenngrößen	288
11.1.2.1	Schallausschlag	290
11.1.2.2	Schallschnelle und Wellenwiderstand	290
11.1.2.3	Energiedichte	291
11.1.2.4	Schallintensität und Schallleistung	291
11.1.3	Verhältnisgrößen	292
11.2	Schallquellen und Schallempfänger	294
11.2.1	Mechanische Schallsender	294
11.2.1.1	Schwingende Luftsäulen	295
11.2.2	Elektroakustische Schallwandler	296
11.2.2.1	Schallempfänger oder Mikrophone	297
11.2.3	Schallabsorption	299
11.2.4	Schalldämmung	301
11.2.4.1	Nachhall	302
11.2.5	Strömungsgeräusch	302
11.3	Ultraschall	302
11.4	Physiologische Akustik und das Gehör	303
11.4.1	Schallempfindung	304
11.4.2	Bewertete Schallpegel	305
11.5	Musikalische Akustik	305
12	Optik	309
12.1	Geometrische Optik	310
12.1.1	Optische Abbildung – Grundbegriffe	312

12.1.2	Reflexion	315
12.1.2.1	Ebener Spiegel	315
12.1.2.2	Konkavspiegel oder Hohlspiegel	316
12.1.2.3	Konvexspiegel oder Wölbspiegel	319
12.1.3	Brechung	319
12.1.3.1	Brechungsindex	319
12.1.3.2	Negativer Brechungsindex	320
12.1.3.3	Brechungsgesetz	321
12.1.3.4	Fresnelsche Formeln	322
12.1.3.5	Regenbogen	323
12.1.3.6	Totalreflexion	323
12.1.3.7	Lichtwellenleiter	325
12.1.3.8	Brechung am Prisma	329
12.1.3.9	Brechung an planparallelen Platten	331
12.1.3.10	Brechung an Kugeloberflächen	332
12.2	Linsen	332
12.2.1	Dicke Linsen	333
12.2.2	Dünne Linsen	338
12.3	Linsensysteme	339
12.3.1	Linsen mit Blenden	340
12.3.2	Abbildungsfehler	340
12.3.2.1	Gradientenindex-Linsen	342
12.4	Optische Instrumente	343
12.4.1	Lochkamera	343
12.4.2	Fotokamera	344
12.4.3	Auge	344
12.4.4	Auge und optische Instrumente	346
12.4.4.1	Lupe	346
12.4.4.2	Mikroskop	346
12.4.4.3	Fernrohr	348
12.5	Wellenoptik	350
12.5.1	Streuung	350
12.5.2	Beugung und Auflösungsbegrenzung	351
12.5.3	Brechung im Wellenbild	353
12.5.4	Interferenz	354
12.5.5	Diffraktive optische Elemente	358
12.5.5.1	Beugungsgitter	358
12.5.5.2	Fresnel-Zonenplatte	358
12.5.5.3	Fresnel-Zonenlinse	359
12.5.5.4	Hologramme	360
12.5.5.5	Computergenerierte Hologramme	361
12.5.6	Dispersion	362
12.5.7	Spektralapparate	364
12.5.8	Polarisation des Lichts	364
12.5.8.1	Polarisation durch Reflexion	366
12.5.8.2	Polarisation durch Brechung	366
12.6	Photometrie	369
12.6.1	Photometrische Größen	369
12.6.1.1	Strahler	371

12.6.1.2	Spektrale Größen	373
12.6.1.3	Reflexion, Absorption, Transmission	373
12.6.2	Lichttechnische Größen	375
Formelzeichen Schwingungen, Wellen, Akustik und Optik		379
13	Tabellen zu Schwingungen, Akustik und Optik	381
13.1	Tabellen zu Schwingungen und Akustik	381
13.2	Tabellen zur Optik	385
III	Elektrizitätslehre	
14	Ladungen und Ströme	389
14.1	Elektrische Ladung	389
14.1.1	Coulombsches Gesetz	391
14.2	Elektrische Ladungsdichte	392
14.3	Elektrischer Strom	394
14.3.1	Ampèresches Gesetz	395
14.4	Elektrische Stromdichte	396
14.4.1	Elektrisches Strömungsfeld	397
14.5	Elektrischer Widerstand und elektrischer Leitwert	398
14.5.1	Elektrischer Widerstand	398
14.5.2	Elektrischer Leitwert	399
14.5.3	Spezifischer Widerstand und elektrische Leitfähigkeit	399
14.5.4	Beweglichkeit von Ladungsträgern	400
14.5.5	Temperaturabhängigkeit des Widerstandes	401
14.5.6	Veränderliche Widerstände	402
14.5.7	Schaltung von Widerständen	403
15	Elektrisches und magnetisches Feld	405
15.1	Elektrisches Feld	405
15.2	Influenz	406
15.2.1	Elektrische Feldlinien	406
15.2.2	Elektrische Feldstärke von Punktladungen	410
15.3	Kraft	410
15.4	Elektrische Spannung	411
15.5	Elektrisches Potenzial	412
15.5.1	Äquipotenzialflächen	413
15.5.2	Feldstärke und Potenzial einiger Ladungsverteilungen	413
15.5.3	Elektrischer Fluss	416
15.5.4	Verschiebungsdichte im Vakuum	418
15.6	Elektrische Polarisierung	419
15.6.1	Dielektrikum	420
15.7	Kapazität	422
15.7.1	Plattenkondensator	422
15.7.2	Parallelschaltung von Kondensatoren	423
15.7.3	Reihenschaltung von Kondensatoren	423
15.7.4	Kapazitäten einfacher Leiteranordnungen	424
15.8	Energie und Energiedichte des elektrischen Feldes	425
15.9	Elektrisches Feld an Grenzflächen	426
15.10	Magnetisches Feld	427
15.11	Magnetismus	427
15.11.1	Magnetische Feldlinien	428

15.12	Magnetische Flussdichte	429
15.13	Magnetischer Fluss	431
15.14	Magnetische Feldstärke	433
15.15	Magnetische Spannung und magnetischer Kreis	434
15.15.1	Durchflutungssatz	436
15.15.2	Biot-Savartsches Gesetz	437
15.15.3	Magnetfeld eines geraden Leiters	439
15.15.4	Magnetische Felder einiger Stromverteilungen	440
15.16	Materie im Magnetfeld	441
15.16.1	Diamagnetismus	442
15.16.2	Paramagnetismus	443
15.16.3	Ferromagnetismus	443
15.16.4	Antiferromagnetismus	446
15.16.5	Ferrimagnetismus	447
15.17	Magnetische Felder an Grenzflächen	447
15.18	Induktion	448
15.18.1	Bewegungsinduktion	448
15.18.2	Transformatorische Induktion	449
15.19	Selbstinduktion	450
15.19.1	Induktivitäten geometrischer Leiteranordnungen	451
15.19.2	Magnetischer Leitwert	452
15.20	Gegeninduktion	453
15.20.1	Transformator	454
15.21	Energie und Energiedichte des Magnetfeldes	455
15.22	Maxwellsche Gleichungen	457
15.22.1	Verschiebungsstrom	457
15.22.2	Elektromagnetische Wellen	458
15.22.3	Poynting-Vektor	460
16	Anwendungen in der Elektrotechnik	461
16.1	Gleichstromkreis	462
16.1.1	Kirchhoffsche Gesetze im Gleichstromkreis	463
16.1.2	Widerstände im Gleichstromkreis	463
16.1.3	Reale Spannungsquelle	465
16.1.4	Leistung und Energie im Gleichstromkreis	466
16.1.5	Leistungsanpassung	468
16.1.6	Strom- und Spannungsmessung	468
16.1.6.1	Strommessung	468
16.1.6.2	Spannungsmessung	468
16.1.6.3	Leistungsmessung	469
16.1.7	Widerstandsbestimmung mittels Kompensationsmethode	469
16.1.8	Auf- und Entladung von Kondensatoren	470
16.1.9	Ein- und Ausschalten des Stroms im RL -Kreis	472
16.2	Wechselstromkreis	473
16.2.1	Wechselgrößen	473
16.2.1.1	Zeitlicher Mittelwert periodischer Funktionen	474
16.2.2	Darstellung von Sinusgrößen im Zeigerdiagramm	475
16.2.3	Rechenregeln für Zeigergrößen	477
16.2.4	Grundbegriffe der Wechselstromtechnik	480
16.2.4.1	Komplexer Widerstand	480

16.2.4.2	Ohmsches Gesetz im Komplexen	481
16.2.4.3	Komplexer Leitwert	481
16.2.4.4	Leistung im Wechselstromkreis	483
16.2.4.5	Komplexe Leistung	484
16.2.4.6	Kirchhoffsche Gesetze für Wechselstromkreise	485
16.2.4.7	Reihenschaltung komplexer Widerstände	485
16.2.4.8	Parallelschaltung komplexer Widerstände	485
16.2.5	Grundbauelemente im Wechselstromkreis	486
16.2.5.1	Ohmscher Widerstand	486
16.2.5.2	Kapazität	487
16.2.5.3	Induktivität	488
16.2.5.4	Komplexe Widerstände der einfachsten Zweipole	489
16.2.6	Reihenschaltung von Widerstand und Kapazität	489
16.2.7	Parallelschaltung von Widerstand und Kapazität	490
16.2.8	Parallelschaltung von Widerstand und Induktivität	491
16.2.9	Reihenschaltung von Widerstand und Induktivität	492
16.2.10	Reihenschwingkreis	493
16.2.11	Parallelschwingkreis	494
16.2.12	Äquivalenz von Reihenschaltung und Parallelschaltung	496
16.2.13	Radiowellen	497
16.3	Elektrische Maschinen	498
16.3.1	Prinzipielle Funktionsweise	499
16.3.2	Gleichstrommaschine	500
16.3.3	Drehstrommaschine	502
16.3.3.1	Synchronmaschine	502
16.3.3.2	Asynchronmaschine	503
17	Stromleitung in Flüssigkeiten, in Gasen und im Vakuum	505
17.1	Elektrolyse	505
17.1.1	Stoffmenge	505
17.1.2	Ionen	505
17.1.3	Elektroden	506
17.1.4	Elektrolyte	506
17.1.4.1	Elektrische Leitfähigkeit eines Elektrolyten	506
17.1.4.2	Faradaysche Gesetze	508
17.1.4.3	Elektrische Doppelschicht	509
17.1.4.4	Nernst-Gleichung	510
17.1.5	Galvanische Elemente	510
17.1.5.1	Elektrolytische Polarisierung	511
17.1.5.2	Brennstoffelemente	512
17.1.5.3	Akkumulatoren	512
17.1.5.4	Schaltung galvanischer Elemente	513
17.1.6	Elektrokinetische Effekte	513
17.1.6.1	Elektrophorese	513
17.1.6.2	Elektroosmose	514
17.1.6.3	Strömungselektrizität	514
17.2	Stromleitung in Gasen	514
17.2.1	Unselbstständige Gasentladung	514
17.2.1.1	Driftgeschwindigkeit von Ionen in Gasen	514
17.2.1.2	Elektrische Leitfähigkeit von Gasen	515