

**Taschenbuch
der
Physik**



Edition
Harri 
Deutsch 

Taschenbuch der Physik

Formeln, Tabellen, Übersichten

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

7., korrigierte Auflage

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

Europa-Nr.: 56764 (Mit Multiplattform-CD-ROM DeskTop Physik)

Europa-Nr.: 56740 (Ohne Multiplattform-CD-ROM DeskTop Physik)

Autor:

Professor Dr. Dr. *h c* Horst Stöcker

Judah M. Eisenberg Professor Laureatus an der Johann Wolfgang 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.

7., korrigierte Auflage

Druck 5 4 3 2 1

ISBN 978-3-8085-5677-1 (Mit Multiplattform-CD-ROM DeskTop Physik)

ISBN 978-3-8085-5675-7 (Ohne Multiplattform-CD-ROM DeskTop Physik)

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

© 2013 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, Mauterwerke 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, Infrasarv,

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 siebten Auflage

Erstmals erscheint das *Taschenbuch der Physik* in der *Edition Harri Deutsch* beim Verlag Europa-Lehrmittel.

Wert und Nutzen des *Taschenbuch der Physik* 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.

Das besondere Angebot neben der Buchausgabe ist die Ausgabe mit einer beigelegten Multiplattform-CD-ROM. Diese bietet den kompletten Text, eine komfortable Suchfunktion, farbige Grafiken und alle Tabellen als pdf-Dateien. Zudem enthält sie über 100 Java-Applets, die von Prof. P. Junglas mit der von ihm entwickelten Open-Source PhysBeans-Bibliothek erstellt wurden.

Buch und CD-ROM bilden ein umfassendes Referenzwerk für alle Nutzer in der Lehre, in Schule und Studium und vor allem in der beruflichen Anwendung, und das zu einem außerordentlich günstigen Preis-Leistungs-Verhältnis.

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

Herausgeber und Verlag Europa-Lehrmittel
Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsseldorfer 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 Spannenergie 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	Kreiseltheorie	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	Toricellisches 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	238
9.1.1	Federpendel	238
9.1.2	Fadenpendel	240
9.1.2.1	Schwingung und Kreisbewegung	242
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 Schalleistung	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 Polarisation	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 Polarisation	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

17.2.1.3	Rekombination	515
17.2.1.4	Strom-Spannungskennlinie eines Gases	516
17.2.2	Selbstständige Gasentladung	517
17.2.2.1	Entladungstypen selbstständiger Gasentladungen	517
17.2.2.2	Strom-Spannungs-Charakteristik einer Gasentladung	518
17.3	Elektronenemission	518
17.3.1	Glühemission	518
17.3.2	Photoemission	519
17.3.3	Feldemission	520
17.3.4	Sekundärelektronenemission	520
17.4	Elektronenröhren	520
17.4.1	Röhrendiode	521
17.4.2	Röhrentriode	522
17.4.2.1	Röhrenkenngrößen	522
17.4.3	Tetrode	524
17.4.4	Kathodenstrahlen	524
17.4.5	Kanalstrahlen	524
18	Plasmaphysik	526
18.1	Eigenschaften eines Plasmas	526
18.1.1	Plasmakenngrößen	526
18.1.1.1	Ionisationsgrad	526
18.1.1.2	Verteilungsfunktionen des Plasmas	527
18.1.1.3	Energieinhalt des Plasmas	529
18.1.1.4	Elektrische Leitfähigkeit von Plasmen	529
18.1.1.5	Wärmeleitfähigkeit eines Plasmas	530
18.1.1.6	Abschirmung und Debye-Länge	530
18.1.1.7	Plasmaschwingungsfrequenz	531
18.1.2	Plasmastrahlung	532
18.1.3	Plasmen in Magnetfeldern	532
18.1.3.1	Bewegung geladener Teilchen in äußeren Feldern	532
18.1.3.2	Ladungsträgerbewegung im Magnetfeld mit Stößen	534
18.1.3.3	Driftbewegung im äußeren elektrischen Feld	534
18.1.3.4	Kontinuumstheorien	534
18.1.4	Plasmawellen	535
18.1.4.1	Plasmaakustische Wellen in Plasmen	535
18.1.4.2	Magnetohydrodynamische Wellen	536
18.1.4.3	Elektromagnetische Wellen in Plasmen	536
18.1.4.4	Landau-Dämpfung	537
18.2	Erzeugung von Plasmen	537
18.2.1	Thermische Plasmaerzeugung	537
18.2.2	Plasmaerzeugung durch Kompression	538
18.2.2.1	Pinch-Effekt	538
18.3	Energieerzeugung mit Plasmen	539
18.3.1	MHD-Generator	540
18.3.2	Kernfusionsreaktoren	540
18.3.3	Fusion unter magnetischer Halterung	542
18.3.4	Fusion unter Trägheitseinschluss	542

19	Tabellen zur Elektrizitätslehre	546
19.1	Metalle und Legierungen	546
19.1.1	Spezifischer elektrischer Widerstand	546
19.1.2	Spannungsreihen	548
19.2	Dielektrika	550
19.3	Praktische Tabellen der Elektrotechnik	556
19.4	Magnetische Eigenschaften	558
19.5	Ferromagnetische Eigenschaften	560
19.5.1	Magnetische Anisotropie	562
19.6	Ferrite	563
19.7	Antiferromagnete	564
19.8	Ionenbeweglichkeit	564
IV	Wärmelehre	
20	Gleichgewicht und Zustandsgrößen	565
20.1	Systeme, Phasen und Gleichgewicht	565
20.1.1	Systeme	565
20.1.1.1	Isolierte oder abgeschlossene Systeme	565
20.1.1.2	Geschlossene Systeme	565
20.1.1.3	Offene Systeme	566
20.1.2	Phasen	566
20.1.3	Gleichgewicht	567
20.2	Zustandsgrößen	569
20.2.1	Begriffsbestimmung	569
20.2.1.1	Extensive Zustandsgrößen	569
20.2.1.2	Intensive Zustandsgrößen	569
20.2.1.3	Spezifische und molare Größen	570
20.2.2	Temperatur	570
20.2.2.1	Temperatureinheiten	571
20.2.2.2	Eichpunkte	572
20.2.2.3	Temperaturmessung	572
20.2.2.4	Kelvin-Skala und absoluter Nullpunkt	574
20.2.3	Druck	575
20.2.3.1	Druckeinheiten	576
20.2.3.2	Druckmessung	577
20.2.4	Teilchenzahl, Stoffmenge und Avogadrozahl	579
20.2.5	Entropie	581
20.3	Thermodynamische Potenziale	583
20.3.1	Prinzip der maximalen Entropie – Prinzip der minimalen Energie	583
20.3.2	Innere Energie als Potenzial	583
20.3.2.1	Innere Energie des idealen Gases	583
20.3.3	Entropie als thermodynamisches Potenzial	584
20.3.3.1	Entropie des idealen Gases	584
20.3.4	Freie Energie	585
20.3.5	Enthalpie	585
20.3.5.1	Enthalpie des idealen Gases	587
20.3.5.2	Enthalpie und Phasenübergänge	587
20.3.5.3	Reaktionsenthalpie und Satz von Hess	587