

H. Pfeifer/H. Schmiedel

Grundwissen
Experimentalphysik

Grundwissen Experimentalphysik

Von Prof. Dr. Dr. h.c. Harry Pfeifer
und Prof. Dr. Herbert Schmiedel
Universität Leipzig



B. G. Teubner Verlagsgesellschaft
Stuttgart · Leipzig 1997

Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier.

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Pfeifer, Harry:

Grundwissen Experimentalphysik /
von Harry Pfeifer und Herbert Schmiedel. –
Stuttgart ; Leipzig : Teubner, 1997

ISBN-13:978-3-8154-3025-5 e-ISBN-13:978-3-322-83423-2

DOI: 10.1007/978-3-322-83423-2

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© B. G. Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig 1997

Umschlaggestaltung: E. Kretschmer, Leipzig

Vorwort

Das vorliegende Buch ist aus Vorlesungen entstanden, die an der Universität Leipzig in den 80er- und 90er-Jahren für Studierende der Physik, Geophysik, Kristallographie und Informatik gehalten wurden. Es unterscheidet sich von den bisher erschienenen deutschen Lehrbüchern der Experimentalphysik vor allem in folgender Hinsicht:

- Das Gesamtgebiet der Experimentalphysik wird auf nur ca. 600 Seiten umfassend dargestellt.

- Im Inhaltsverzeichnis wurde bewußt auf eine Gruppierung der 29 Abschnitte in die üblichen Teilgebiete der Physik, wie Mechanik, Optik usw., verzichtet. Der Hauptgrund dafür ist der mit wachsender Erkenntnis immer enger werdende Zusammenhang dieser Teilgebiete. Wenn man beispielsweise die Gruppierung

Mechanik	Abschn. 01 - 05
Wärme	Abschn. 06 - 15
Elektrik	Abschn. 16 - 20
Optik	Abschn. 21 - 25
Quantenphysik	Abschn. 26 - 29

vornehmen würde, fiel es schwer zu begründen, warum die elektromagnetischen Wellen (Abschn. 20.2) zur Elektrik und nicht zur Optik gehören oder warum die Wärmestrahlung (Abschn. 25) ein Teil der Optik und nicht der Quantenphysik ist. Besonders problematisch würde eine solche Einteilung im Hinblick auf die Quantenphysik, die voll in den anderen vier Teilgebieten aufgehen könnte.

- Es wurden Textteile ausgewählt und durch Kleindruck abgesetzt, die bei einer ersten Durchsicht des Buches übersprungen werden können, da sie entweder die mathematische Ableitung einer Formel oder Ergänzungen zum behandelten Stoffgebiet enthalten. Bei Ableitungen kann der Leser diese Art der Darstellung auch nutzen, um seine Fähigkeiten und Kenntnisse selbst zu überprüfen, indem er den kleingedruckten Text abdeckt und dann versucht, die Ableitung der betreffenden Formel zu finden.

- Bei jedem neu eingeführten und durch Fettdruck hervorgehobenen Fachwort wird dahinter in Klammern das entsprechende englische Wort angegeben. Da sowohl das deutsche als auch das englische Fachwort jeweils gekoppelt im Sachverzeichnis erscheinen, wie z.B. *Doppelbrechung (birefringence)* und *birefringence (Doppelbrechung)*, lässt sich dieses Sachverzeichnis auch als deutsch-englisches und englisch-deutsches Fachwörterbuch der Experimentalphysik verwenden. Zusammen mit dem Anhang *A7 Redewendungen bei Veröffentlichungen in englischer Sprache*

werden damit dem Leser fachliche Ergänzungen zum Schulenglisch geboten, die ihm im Hinblick auf die dominierende Rolle der englischen Sprache in der physikalischen Fachliteratur nützlich sein werden.

Zur Bedeutung der im Text wiederholt verwendeten Bezeichnungen *spezifisch*, *molar* usw. gilt: Eine Größe, deren Zahlenwert sich additiv aus den Zahlenwerten von Untersystemen zusammensetzt, nennt man **extensiv** (extensive). Beispiele sind die Masse, das Volumen oder die Energie. Größen, deren Zahlenwerte unabhängig von der Ausdehnung des Systems sind, nennt man dagegen **intensiv** (intensive). Beispiele sind die Temperatur, der Druck oder das chemische Potential. Das Adjektiv **spezifisch** (specific) bzw. **molar** (molar) vor dem Namen einer extensiven Größe bedeutet, dass die betreffende Größe durch die Masse bzw. durch die Stoffmenge (Anzahl der Mole) dividiert wurde, wodurch sie zu einer intensiven Größe wird. Beispiele sind die spezifische und die molare Wärmekapazität.

Jeweils am Anfang der 29 Abschnitte findet der Leser einen originellen Ausspruch eines berühmten Wissenschaftlers, der zum Nachdenken und Schmunzeln anregen und das Studium etwas würzen soll. Bei den Lebensdaten der Physiker wurde die Nation mit Absicht weggelassen. Einerseits spielt man ja - erfreulicherweise - auch keine Nationalhymne nach einem besonders gelungenen wissenschaftlichen Vortrag und andererseits "ist die Fälschung der Wissenschaftsgeschichte eine alte Kunst, in der sich die löblichen Nationen den Rang ablaufen" (A. Einstein).

Für zahlreiche Hinweise bei der Abfassung und Überarbeitung des Manuskripts sind wir den Herren Professoren Jörg Kärger, Dieter Geschke und Dieter Michel sowie Herrn Dr. Martin Staudte, langjähriger Vorlesungsassistent am Physikalischen Institut der Universität Leipzig, sehr zu Dank verpflichtet. Dem Verlag, insbesondere Herrn Jürgen Weiß, gilt unser Dank für die angenehme Zusammenarbeit. Schon im voraus danken wir all jenen Lesern, die uns auf noch vorhandene Fehler und auf Ungeschicklichkeiten bei der Darstellung hinweisen werden.

Leipzig, Mai 1997

H. Pfeifer, H. Schmiedel

Inhalt

1	Physikalische Größen und ihre Messung	9
1.1	Physikalische Größen	9
1.2	Das SI (Système International d'Unités)	10
1.3	Messfehler	12
2	Mechanik der Massenpunkte	15
2.1	Eindimensionale Bewegungen	15
2.2	Mehrdimensionale Bewegungen	17
	Der schiefe Wurf	17
	Die Kreisbewegung	18
2.3	Kraft und Masse	20
	Die drei Newton'schen Axiome	20
	Schwere und träge Masse	22
	Das Pendel	23
2.4	Impuls und Energie	27
	Der Impulssatz	27
	Der Energiesatz	28
	Raketenbewegung	31
	Der unelastische und der elastische Stoß	32
2.5	Reibung	35
	Reibung auf einer Unterlage	35
	Reibung in einem Medium	38
2.6	Gravitation	40
	Das Newton'sche Gravitationsgesetz	40
	Die Kepler'schen Gesetze	42
	Die kosmischen Geschwindigkeiten, die Gezeiten	44
2.7	Trägheitskräfte	45
3	Mechanik der starren Körper	48
3.1	Ruhende starre Körper	48
3.2	Drehbewegungen	50
	Punktmassen	50
	Starre Körper	51
3.3	Der Kreisel	57
4	Mechanik der deformierbaren Körper	59
4.1	Ruhende Fluide (Flüssigkeiten und Gase)	60
	Der Schweredruck inkompressibler Fluide (Flüssigkeiten)	62
	Der Schweredruck idealer Gase	65
4.2	Oberflächen- und Grenzflächenspannung	67

	Oberflächenspannung - - - - -	67
	Grenzflächenspannung - - - - -	70
4.3	Strömungen - - - - -	72
	Strömungen reibungsfreier Fluide - - - - -	74
	Strömungen realer Fluide - - - - -	77
4.4	Deformation von Festkörpern - - - - -	82
5	Schwingungen und Wellen - - - - -	85
5.1	Schwingungen - - - - -	85
	Freie Schwingungen des linearen Oszillators - - - - -	86
	Erzwungene Schwingungen des linearen Oszillators - - - - -	88
	Überlagerung von Schwingungen - - - - -	90
5.2	Wellen - - - - -	92
5.3	Wellenausbreitung - - - - -	97
	Stehende Wellen - - - - -	97
	Der Doppler-Effekt - - - - -	99
5.4	Schallwellen (Akustik) - - - - -	101
	Größen des Schallfeldes - - - - -	102
	Die Lautstärke - - - - -	103
6	Die Zustandsgleichung idealer Gase - - - - -	106
6.1	Ableitung der Zustandsgleichung, das Gleichverteilungsgesetz - - - - -	106
6.2	Spezialfälle der Zustandsgleichung, die Wärmeausdehnung - - - - -	109
6.3	Die Boltzmann-Verteilung - - - - -	110
7	Wärmekapazitäten - - - - -	112
8	Der erste Hauptsatz der Wärmelehre - - - - -	116
9	Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre - - - - -	121
9.1	Der Carnot'sche Kreisprozess - - - - -	121
9.2	Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre - - - - -	127
10	Die Entropie - - - - -	129
10.1	Definition und Eigenschaften der Entropie - - - - -	129
10.2	Die Entropie des idealen Gases - - - - -	131
10.3	Entropie und Wahrscheinlichkeit - - - - -	132
10.4	Entropie und Zeitumkehr - - - - -	133
11	Thermodynamische Potentiale	
	und der dritte Hauptsatz der Wärmelehre - - - - -	135
11.1	Thermodynamische Potentiale - - - - -	135

11.2	Der dritte Hauptsatz der Wärmelehre	137
12	Wärmeleitung und Diffusion	139
12.1	Die Wärmeleitungsgleichungen	140
12.2	Die Diffusionsgleichungen	143
12.3	Wärmeleitung und Selbstdiffusion in Gasen	146
13	Dämpfe und reale Gase	148
13.1	Van-der-Waals'sche Gleichung, Virialentwicklung	148
13.2	Der Joule-Thomson-Effekt	153
13.3	Hygrometrie	155
14	Koexistenz und Übergänge bei Aggregatzuständen	157
14.1	Flüssigkeit und Dampf	157
14.2	Festkörper und Flüssigkeit	159
14.3	Festkörper, Flüssigkeit und Dampf	161
15	Lösungen, osmotischer Druck	164
16	Elektrische Gleichfelder (Elektrostatik)	167
16.1	Elektrische Ladungen	167
16.2	Elektrische Feldstärke, elektrisches Potential, elektrische Spannung	169
16.3	Leiter im elektrischen Feld	171
16.4	Kapazität, Energiedichte des elektrischen Feldes	173
16.5	Elektrischer Dipol	178
16.6	Dielektrika	180
17	Elektrische Gleichströme	187
17.1	Grundbegriffe, Ohm'sches Gesetz, Kirchhoff'sche Regeln	187
17.2	Anwendungen	191
17.3	Elektrische Leistung	194
18	Magnetfelder	195
18.1	Das Biot-Savart'sche Gesetz und die Berechnung von Magnetfeldern	195
18.2	Messung von Magnetfeldern, das magnetische Erdfeld	200
18.3	Induktion	204
	Das Induktionsgesetz	204
	Die Lorentz-Kraft	206
	Selbstinduktion	212
18.4	Magnetostatik	215

19	Mechanismen der Elektrizitätsleitung	223
19.1	Metalle	223
	Existenz und Beweglichkeit freier Elektronen in Metallen	223
	Abhängigkeit des Widerstands von äußeren Parametern	226
19.2	Elektrolyte	230
	Grundlagen, die Faraday'schen Gesetze	230
	Die Leitfähigkeit von Elektrolyten	232
19.3	Galvani'sche Elemente	236
19.4	Freie Elektronen	241
19.5	Gasentladungen, Plasma	245
	Gasentladungen	245
	Plasma	252
20	Elektrische Wechselströme und elektromagnetische Wellen	254
20.1	Elektrische Wechselströme	254
	Grundlagen	254
	Elektrische Schwingkreise	259
	Nichtlineare Theorie elektrischer Schwingungen	266
	Der Transformator	269
20.2	Elektromagnetische Wellen	272
	Die Maxwell'schen Gleichungen	272
	Die Entstehung elektromagnetischer Wellen	275
	Das elektromagnetische Spektrum, die Lichtgeschwindigkeit	284
	Die spezielle Relativitätstheorie	287
21	Geometrische Optik	293
21.1	Reflexion und Brechung	293
	Reflexion	294
	Brechung	299
	Atomistische Deutung der Dispersion	307
21.2	Optische Instrumente	311
22	Wellenoptik	323
22.1	Kohärenz	323
22.2	Interferenz	326
22.3	Interferenz inkohärenter Strahlungsquellen	328
22.4	Zwei- und dreidimensionale Gitter	329
	Optische Gitter (2-dimensionale Gitter)	329
	Kristallgitter (3-dimensionale Gitter)	334
22.5	Der Spalt	338
22.6	Auflösungsvermögen optischer Geräte	340
	Spektrales Auflösungsvermögen	340

	Räumliches Auflösungsvermögen - - - - -	346
22.7	Das Huygens'sche Prinzip - - - - -	350
22.8	Holografie - - - - -	354
23	Polarisation des Lichtes - - - - -	356
23.1	Die Fresnel'schen Formeln - - - - -	357
23.2	Natürliche Doppelbrechung - - - - -	362
23.3	Zirkular und elliptisch polarisiertes Licht - - - - -	368
23.4	Künstliche Doppelbrechung - - - - -	370
23.5	Optische Aktivität - - - - -	372
	Drehung der Polarisationssebene - - - - -	372
	Nichtreziproke Bauelemente - - - - -	376
	Klassische Interpretation der Verdet'schen Konstanten und des Zeeman-Effektes - - - - -	378
24	Absorption und Streuung - - - - -	381
24.1	Absorption - - - - -	381
24.2	Streuung an isolierten Teilchen - - - - -	385
24.3	Streuung in kondensierter Materie - - - - -	387
25	Wärmestrahlung - - - - -	391
25.1	Grundbegriffe, Photometrie - - - - -	391
25.2	Strahlungsformeln - - - - -	398
25.3	Pyrometrie / Farben - - - - -	406
26	Welle-Teilchen-Dualismus - - - - -	410
26.1	Das Photon - - - - -	410
	Eigenschaften des Photons - - - - -	410
	Anwendungen - - - - -	411
26.2	Materiewellen - - - - -	416
26.3	Quantenmechanik - - - - -	418
	Axiome der Quantenmechanik - - - - -	418
	Kräftefreie Teilchen - - - - -	420
	Teilchen im Kasten - - - - -	423
	Der Tunneleffekt - - - - -	426
27	Atome, Moleküle und Festkörper - - - - -	429
27.1	Das Wasserstoffatom - - - - -	429
	Die Schrödinger-Gleichung - - - - -	429
	Diskussion der Lösungen - - - - -	435
	Das Bohr'sche Atommodell und das Korrespondenzprinzip - - - - -	438

	Der Drehimpuls der Elektronenbahnbewegung	440
	Der Eigendrehimpuls des Elektrons und der Atomkerne	442
27.2	Atombau und Atomspektren	454
	Das Pauli-Verbot und der Bau der Atome	454
	Atomspektren	457
27.3	Moleküle	464
	Heteropolare und homöopolare Bindung	464
	Molekülspektren	470
27.4	Festkörper	479
	Das Bändermodell	480
	Boltzmann-, Bose- und Fermi-Statistik	485
	Elektronen und Defektelektronen	489
	Elektrizitätsleitung durch Grenzflächen	499
	Transistoren	510
28	Der Atomkern	512
28.1	Kernstruktur	512
28.2	Radioaktivität	515
	Der α -Zerfall	517
	Die β -Zerfälle	519
	Die γ -Strahlung	522
	Strahlendosimetrie	522
28.3	Kernreaktionen	525
	Kernspaltung	527
	Kernfusion	529
29	Elementarteilchen	530
29.1	Entdeckung neuer Teilchen	530
29.2	Eigenschaften und Klassifikation der Elementarteilchen	539
	Anhang	548
A 1	Konstanten der Experimentalphysik	548
A 2	Abgeleitete Einheiten des SI mit besonderen Namen	551
A 3	Definition von Einheiten, die nicht zum SI gehören	552
A 4	Periodisches System der Elemente	556
A 5	Elektronenkonfiguration der neutralen Atome im Grundzustand	558
A 6	Einige mathematische Formeln	560
A 7	Redewendungen bei Veröffentlichungen in englischer Sprache	564
A 8	Literatur	568
	Sachverzeichnis	571
	Näherungswerte für physikalische Konstanten und Energieumrechnungen	610