





Hans-Ulrich Harten

# Physik für Mediziner

## Eine Einführung

Unter Mitarbeit von  
H. Nägerl J. Schmidt H.-D. Schulte

Sechste, völlig überarbeitete  
und aktualisierte Auflage

Mit 441 teilweise zweifarbigen Abbildungen und 2 Farbtafeln

Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg GmbH

---

Prof. em. Dr. Hans-Ulrich Harten, IV. Physikalisches Institut  
der Universität Göttingen, Bunsenstraße 13, 37073 Göttingen

Mitarbeiter:

Priv.-Doz. Dr. Hans Nägerl, IV. Physikalisches Institut  
der Universität Göttingen, Bunsenstraße 13, 37073 Göttingen

Dr. Jörg Schmidt, Physiologisches Institut  
der Universität Göttingen, Humboldtallee 23, 37073 Göttingen

Dr. Hans-Dieter Schulte, IV. Physikalisches Institut  
der Universität Göttingen, Bunsenstraße 13, 37073 Göttingen

1. Auflage 1974  
2. Auflage 1975

3. Auflage 1977  
4. Auflage 1980

1. Nachdruck 1985  
5. Auflage 1987

Italienische Lizenzausgabe erschienen 1980 bei Piccin Editore, Padova  
Spanische Lizenzausgabe erschienen 1977 bei Cientifico-Medica, Barcelona

ISBN 978-3-540-56759-2

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Harten, Hans-Ulrich: Physik für Mediziner : eine Einführung / Hans-Ulrich Harten.  
Unter Mitarb. von H. Nägerl ... 6., völlig überarb. und  
aktualisierte Aufl.

ISBN 978-3-540-56759-2

ISBN 978-3-662-22293-5 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-22293-5

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1974, 1975, 1977, 1980, 1987 und 1993

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag 1993

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Produkthaftung: Für Angaben über Dosierungsanweisungen und Applikationsformen kann vom Verlag keine Gewähr übernommen werden. Derartige Angaben müssen vom jeweiligen Anwender im Einzelfall anhand anderer Literaturstellen auf ihre Richtigkeit überprüft werden.

Gesamtherstellung: Konrad Tritsch, Graphischer Betrieb, Würzburg  
15/3130-54 3 2 1 0 Gedruckt auf säurefreiem Papier

# Vorwort

Die Physik handelt von den Naturgesetzen, und die galten schon, als die Erde noch wüst und leer war. Verstöße gegen die Naturgesetze werden nicht bestraft, sie sind gar nicht erst möglich. Das gilt auch für organisches Leben und die ärztliche Kunst. Herz und Lunge, Magen und Darm, Auge, Ohr und das ganze Nervensystem agieren in den Naturgesetzen. Nur dort, wo man die Raffinesse, mit der dies beim Gesunden geschieht, so einigermaßen durchschaut, darf der Kranke auf eine Therapie hoffen, die an der Wurzel ansetzt und nicht nur am Symptom.

Die Natur folgt quantitativen Gesetzen; sie braucht den Menschen nicht zu fragen, ob ihm das gefällt. Zum Leben muß der Mensch seine Körpertemperatur recht genau konstanthalten; beim Gehen und Laufen müssen die Kräfte aller beteiligten Muskeln exakt aufeinander abgestimmt sein. Medikamente muß der Arzt korrekt dosieren. *Sola dosis facit venenum*, hat Paracelsus gesagt – allein die Dosis macht das Gift. In hinreichend geringer Dosis verträgt der Mensch Zyankali durchaus; Kochsalz ist in passender Dosis lebenswichtig, in hoher Dosis wäre es tödlich, wenn es nicht als Brechmittel wirkte. Eine genaue Dosierung erfordert den Umgang mit Maß und Zahl. Die Physik betreibt diesen Umgang extensiv. Darum läßt sich ein Physikbuch auch nicht so leicht lesen wie ein Kriminalroman. Einer „Physik für Mediziner“ geht es nicht nur um physikalische Tatbestände, es geht auch um das Denken in quantitativen Zusammenhängen. Dazu braucht man mathematischen Formalismus, vom Dreisatz bis zum Integral. Wer die Physik nutzen will, darf ihren Formeln nicht ausweichen.

Dem Verlag, vertreten vor allem durch Frau Anne C. Repnow, ist zu danken, daß er dem Buch eine neue Gestalt gegeben hat, Frau Susanne Schimmer für sorgsame Betreuung des Manuskripts. In Kästen gesetzte sog. *concurrent organizer* begleiten jetzt den laufenden Text wie Wegmarken; *pre organizer* vor den Abschnitten zeigen, wo es langgehen soll. Am Ende jedes Hauptabschnitts bilden „Übungsfragen“ und „Formeln“ den *post organizer*. Die Fragen dienen der Selbstkontrolle; sie sind durchweg nicht leicht zu beantworten. Lernen erschöpft sich nun einmal nicht im bloßen Aufnehmen vorgedruckter Gedankengänge, es erfordert eigenes Tun, eigene Arbeit; sie kann niemandem, der es ernst meint, erspart werden. Die „Antworten“ im Anhang sollen darum lediglich eigene Überlegungen bestätigen, nicht zu ihnen hinführen. Wer sich mit den Fragen befaßt, dem können die extrem knapp und darum zumeist nur in Formeln formulierten Zusammenhänge eine Gedächtnisstütze bieten.

Da der Text vollständig neu gesetzt werden mußte, ergab sich die Möglichkeit, Stoffauswahl und Darstellung von Grund auf zu überdenken und zu versuchen, das Buch durch neue Formulierungen, Kürzungen und auch Streichungen übersichtlicher und leichter lesbar zu machen.

Göttingen, Mai 1993

Die Verfasser

# Einige Hinweise zum Gebrauch dieses Buches

Primär ist dieses Buch als Lehrbuch geschrieben, es läßt sich aber auch als Nachschlagewerk benutzen. Am liebsten möchte es fortlaufend von vorn bis hinten gelesen werden: Nachfolgende Kapitel rechnen damit, daß der Inhalt der vorausgegangenen bekannt ist. Hinweise im Text machen auf Querverbindungen aufmerksam; in der Natur hängt alles mit allem zusammen, sie ist nicht in Kapitel aufgeteilt wie ein Buch.

Kleingedrucktes darf der eilige Leser überschlagen, ohne gleich befürchten zu müssen, daß er den Faden verliert oder durch's Examen fällt. Er verzichtet lediglich auf die Butter zum Brot.

Was eingerahmt in Kästen steht, gehört demgegenüber zum Tragenden, zum Gerippe: unverzichtbar, für sich allein aber geradezu Symbol des Verderbens.

Den einzelnen Abschnitten vorangestellte sog. „Pre-Organizer“ geben an, wohin es im folgenden Text gehen soll; die „Zusammenhänge“ am Ende fassen so kurz und knapp wie möglich zusammen.

Lernen erschöpft sich nicht im Aufnehmen vorgedruckter Gedankengänge: Es erfordert eigenes Tun. Dies anzuregen, ist der Sinn der zusammengefaßten „Fragen“ an den Enden der Abschnitte. Sie sind kein Beiwerk und sollten nicht ausgelassen werden, auch wenn ihre Beantwortung zuweilen Mühe macht. Wer sich mit diesem Buch einläßt, muß deshalb Bleistift, Papier und Taschenrechner bereitlegen. Vieles in der Physik läßt sich nicht beantworten ohne die Kenntnis einzelner Natur- und Materialkonstanten. Nur wenige von ihnen verdienen es, auswendig gelernt zu werden; den Rest schlägt man nach. Was der Inhalt dieses Buches verlangt, findet sich im Anhang – dazu auch einige Erinnerungen an Bekanntes aus der Mathematik.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Grundbegriffe</b>	<b>1</b>
1.1	Physikalische Größen und ihre Einheiten	1
1.1.1	Physikalische Größen	1
1.1.2	Zeit	4
1.1.3	Länge, Fläche, Volumen	5
1.1.4	SI-Einheiten	10
1.2	Mengenangaben	11
1.2.1	Masse und Stoffmenge	11
1.2.2	Dichten und Gehalte	12
1.3	Mathematische Hilfsmittel	14
1.3.1	Meßfehler und Meßunsicherheiten	14
1.3.2	Vektoren und Skalare	18
1.3.3	Winkelfunktionen	21
1.3.4	Exponentialfunktion und Logarithmus	23
1.3.5	Potenzfunktionen	26
1.3.6	Algebraische Gleichungen	27
<b>2</b>	<b>Mechanik starrer Körper</b>	<b>31</b>
2.1	Kinematik	31
2.1.1	Geschwindigkeit und Fahrstrecke (Integration)	31
2.1.2	Fahrstrecke und Geschwindigkeit (Differentiation)	34
2.1.3	Überlagerung von Geschwindigkeiten	36
2.1.4	Beschleunigung	37
2.1.5	Kinematik der Drehbewegungen	40
2.1.6	Zur Kinematik von Gelenken	41
2.2	Statik starrer Körper	42
2.2.1	Kräfte	43
2.2.2	Gewichtskraft und Gravitation	46
2.2.3	Hubarbeit	47
2.2.4	Energie und Leistung	48
2.2.5	Hebel und Drehmoment	51
2.2.6	Die Grundgleichungen der Statik	54
2.2.7	Gleichgewichte	56

2.3	Dynamik starrer Körper .....	59
2.3.1	Die Grundgleichung der Mechanik .....	59
2.3.2	Reibung .....	61
2.3.3	Kinetische Energie .....	62
2.3.4	Impuls .....	63
2.3.5	Trägheitskräfte .....	66
2.3.6	Dynamik der Drehbewegungen .....	68
2.3.7	Trägheitsmoment und Drehimpuls .....	71
<b>3</b>	<b>Mechanik deformierbarer Körper .....</b>	<b>77</b>
3.1	Die Aggregatzustände .....	77
3.2	Festkörper .....	78
3.2.1	Struktur der Festkörper .....	79
3.2.2	Verformung von Festkörpern .....	80
3.2.3	Viskoelastizität .....	83
3.3	Hydrostatik .....	83
3.3.1	Stempeldruck .....	84
3.3.2	Schweredruck .....	85
3.3.3	Auftrieb .....	87
3.3.4	Manometer .....	88
3.3.5	Pumpen .....	89
3.3.6	Kompressibilität .....	91
3.3.7	Blutdruckmessung .....	92
3.4	Grenzflächen .....	93
3.4.1	Kohäsion .....	93
3.4.2	Adhäsion .....	96
3.5	Hydrodynamik .....	98
3.5.1	Zähigkeit (Viskosität) .....	98
3.5.2	Laminare Strömung .....	100
3.5.3	Turbulente Strömung .....	104
3.5.4	Staudruck .....	105
<b>4</b>	<b>Mechanische Schwingungen und Wellen .....</b>	<b>111</b>
4.1	Mechanische Schwingungen .....	111
4.1.1	Oszillatoren .....	111
4.1.2	Harmonische Schwingungen .....	112
4.1.3	Gedämpfte Schwingungen .....	116
4.1.4	Erzwungene Schwingungen .....	117
4.1.5	Überlagerung von Schwingungen .....	118
4.2	Seilwellen .....	121



---

4.3	Schallwellen .....	124
4.3.1	Schallerzeugung .....	124
4.3.2	Schallnachweis .....	126
4.3.3	Schallstärke und Lautstärke .....	127
4.3.4	Schallausbreitung .....	130
<b>5</b>	<b>Wärmelehre .....</b>	<b>135</b>
5.1	Temperatur .....	135
5.1.1	Temperaturmessung .....	135
5.1.2	Ausdehnungskoeffizienten .....	138
5.1.3	Das ideale Gas .....	139
5.1.4	Partialdruck und Partialvolumen .....	141
5.2	Thermische Bewegung .....	141
5.2.1	Wärme .....	142
5.2.2	Molekularbewegung .....	144
5.2.3	Wärmeleitung .....	146
5.2.4	Diffusion .....	147
5.2.5	Osmose .....	150
5.3	Phasenumwandlungen .....	153
5.3.1	Umwandlungswärmen .....	153
5.3.2	Schmelzwärme .....	154
5.3.3	Lösungs- und Solvatationswärme .....	155
5.3.4	Verdampfung .....	156
5.3.5	Dampfdruck und Dampfdichte .....	157
5.3.6	Luftfeuchtigkeit .....	158
5.3.7	Verdampfungsenthalpie .....	160
5.3.8	Zustandsdiagramme .....	161
5.3.9	Absorption und Adsorption .....	164
5.4	Zum Wärmehaushalt des Menschen .....	165
5.4.1	Konvektion .....	165
5.4.2	Temperaturstrahlung .....	167
5.4.3	Transpiration .....	169
5.5	Wärmenutzung .....	170
5.5.1	Die Sonderstellung der Energieform „Wärme“ .....	170
5.5.2	Zum Wärmehaushalt der Erde .....	172
<b>6</b>	<b>Elektrizitätslehre .....</b>	<b>177</b>
6.1	Die wichtigsten Meßgrößen .....	177
6.1.1	Elektrische Spannung .....	177
6.1.2	Elektrischer Strom .....	180
6.1.3	Leistung und Energie .....	181
6.1.4	Elektrische Ladung .....	183

---

6.2	Die wichtigsten Zusammenhänge	184
6.2.1	Elektrischer Widerstand	184
6.2.2	Das Ohmsche Gesetz	184
6.2.3	Joulesche Wärme	186
6.2.4	Kapazität	187
6.2.5	Energie des geladenen Kondensators	189
6.3	Wechselspannung	189
6.3.1	Effektivwerte	190
6.3.2	Kapazitiver Widerstand	191
6.4	Elektrische Netzwerke	193
6.4.1	Die Kirchhoffschen Gesetze	193
6.4.2	Resistivität	195
6.4.3	Spannungsteiler	196
6.4.4	Innenwiderstände	198
6.4.5	Hoch- und Tiefpaß	200
6.4.6	Kondensatorentladung und e-Funktion	201
6.5	Elektrisches Feld	203
6.5.1	Energie des elektrischen Feldes	203
6.5.2	Kräfte im homogenen Feld	205
6.5.3	Elektrisches Potential	206
6.5.4	Das Potentialfeld	207
6.5.5	Spezielle elektrische Felder	211
6.5.6	Kräfte zwischen Ladungen	212
6.6	Materie im elektrischen Feld	214
6.6.1	Influenz	214
6.6.2	Elektrische Abschirmung	216
6.6.3	Die Elementarladung	217
6.6.4	Das quasifreie Elektron	218
6.6.5	Zur Dielektrizitätszahl	219
6.6.6	Das freie Elektron	220
6.6.7	Das Elektronvolt	223
6.6.8	Ruhmasse und relativistische Masse	224
6.6.9	Gasentladung	225
6.7	Elektrochemie	228
6.7.1	Dissoziation	228
6.7.2	Elektrolyte	229
6.8	Grenzflächen	232
6.8.1	Membranspannung	233
6.8.2	Galvani-Spannung	234
6.8.3	Thermospannung	236
6.9	Etwas Elektrophysiologie	238
6.9.1	Die Auswertung des EKG nach Einthoven	238

---

6.9.2	Elektrische Unfälle	239
6.9.3	Schutzmaßnahmen	240
6.10	Magnetostatik	243
6.10.1	Magnetische Felder	244
6.10.2	Materie im magnetischen Feld	247
6.10.3	Kräfte im Magnetfeld	248
6.11	Magnetodynamik	250
6.11.1	Induktion	250
6.11.2	Wirbelströme	253
6.11.3	Transformatoren	254
6.11.4	Selbstinduktion	255
6.11.5	Induktiver Widerstand	257
6.12	Elektrische Schwingungen	258
6.12.1	Impedanz	258
6.12.2	Elektrische Resonanz	260
6.12.3	Der Schwingkreis	262
6.12.4	Die Schwingungsdifferentialgleichung	265
6.12.5	Überlagerung von Schwingungen	266
6.12.6	Geschlossene elektrische Feldlinien	267
6.12.7	Der schwingende elektrische Dipol	269
<b>7</b>	<b>Optik</b>	<b>281</b>
7.1	Elektromagnetische Wellen	281
7.1.1	Der strahlende Dipol	281
7.1.2	Spektralbereiche	283
7.1.3	Wellenausbreitung	285
7.2	Geometrische Optik	287
7.2.1	Lichtbündel	287
7.2.2	Spiegelung	290
7.2.3	Brechung	292
7.2.4	Dispersion	295
7.2.5	Abbildung durch einfache Brechung	296
7.2.6	Abbildung durch Linsen	298
7.2.7	Linienfehler	301
7.2.8	Bildkonstruktion	303
7.2.9	Das Auge	307
7.2.10	Fehlsichtigkeit und Brillen	309
7.2.11	Optische Instrumente	311
7.2.12	Der Kondensator	314
7.3	Energieumsatz durch Strahlung	316
7.3.1	Strahlungs- und Lichtmeßgrößen	317
7.3.2	Optische Absorption	318

---

7.3.3	Temperaturstrahlung .....	321
7.3.4	Farbsehen .....	322
7.4	Wellenoptik .....	324
7.4.1	Polarisiertes Licht .....	324
7.4.2	Interferenz .....	326
7.4.3	Kohärenz .....	329
7.4.4	Beugung .....	330
7.4.5	Interferenzen im weißen Licht .....	335
7.5	Quantenoptik .....	336
7.5.1	Das Lichtquant .....	336
7.5.2	Energiezustände und Spektren .....	338
7.5.3	Laser .....	342
7.5.4	Röntgenstrahlen .....	343
7.5.5	Der Compton-Effekt .....	346
7.6	Elektronenoptik .....	347
7.6.1	Elektronenbeugung .....	347
7.6.2	Elektronenmikroskope .....	348
7.6.3	Die Unschärferelation .....	350
<b>8</b>	<b>Atom- und Kernphysik .....</b>	<b>357</b>
8.1	Aufbau des Atoms .....	357
8.1.1	Das Bohrsche Atommodell .....	357
8.1.2	Elektronenwolken .....	359
8.1.3	Das Pauli-Prinzip .....	360
8.1.4	Charakteristische Röntgenstrahlung .....	360
8.2	Aufbau des Atomkerns .....	361
8.2.1	Kernspinresonanz-Tomographie .....	362
8.2.2	Nukleonen und Nuklide .....	363
8.2.3	Der Massendefekt .....	364
8.2.4	Radioaktivität .....	365
8.2.5	Nachweis radioaktiver Strahlen .....	367
8.2.6	Zerfallsgesetz .....	370
8.2.7	Kernspaltung und künstliche Radioaktivität .....	372
8.2.8	Antimaterie .....	373
<b>9</b>	<b>Ionisierende Strahlung .....</b>	<b>377</b>
9.1	Dosimetrie .....	377
9.1.1	Energie- und Äquivalentdosis .....	377
9.1.2	Ionendosis .....	379
9.1.3	Aktivität und Dosis .....	380

---

9.2	Strahlennutzen, Strahlenschaden .....	381
9.2.1	Röntgen-Diagnose .....	381
9.2.2	Radioaktive Tracer .....	383
9.2.3	Strahlentherapie .....	384
9.2.4	Natürliche Exposition .....	385
9.2.5	Zivilisationsbedingte Exposition .....	386
9.2.6	Strahlenschutz .....	387
<b>10</b>	<b>Regelung und Information .....</b>	<b>391</b>
10.1	Regelung .....	391
10.1.1	Wirkungsabläufe .....	391
10.1.2	Der Regelkreis .....	393
10.1.3	Gegenkopplung und Mitkopplung .....	394
10.1.4	P-, I- und D-Regler .....	396
10.1.5	Biologische Regelkreise .....	397
10.2	Information .....	398
10.2.1	Informationsübertragung .....	398
10.2.2	Wie mißt man „Information“? .....	401
10.2.3	Zur Informationsverarbeitung .....	402
	<b>Antworten .....</b>	<b>405</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>423</b>
	<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>429</b>