



---

Hans-Ulrich Harten

# Physik für Mediziner

## Eine Einführung

Unter Mitarbeit von

H. Nägerl J. Schmidt H.-D. Schulte

Siebte, korrigierte Auflage

Mit 441 teilweise zweifarbigen Abbildungen und 2 Farbtafeln



Springer

---

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

Mitarbeiter:

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

1. Auflage 1974

2. Auflage 1975

3. Auflage 1977

4. Auflage 1980

1. Nachdruck 1985

5. Auflage 1987

6. Auflage 1993

Italienische Lizenzausgabe erschienen 1980 bei Piccin Editore, Padova

Spanische Lizenzausgabe erschienen 1977 bei Cientifico-Medica, Barcelona

ISBN 978-3-540-58789-7

ISBN 978-3-662-09319-1 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-09319-1

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Harten, Hans-Ulrich:

Physik für Mediziner : eine Einführung / Hans-Ulrich Harten. Unter Mitarb. von H. Nägerl ...

– 7. korr. Aufl. – Berlin ; Heidelberg ; New York ; London ; Paris ; Tokyo ; Hong Kong ; Barcelona ;

Budapest : Springer, 1995

(Springer-Lehrbuch)

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, 1993, 1995

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1995.

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

15/3130-543210 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 ärztliche Kunst. Herz und Lunge, Magen und Darm, Auge, Ohr und das ganze Nervensystem, ob gesund, ob krank, agieren im Rahmen der Naturgesetze. Ärzte ebenso.

Die Natur folgt quantitativen Gesetzen; sie braucht den Menschen nicht zu fragen, ob ihm das gefällt. *Sola dosis facit venenum*, hat Paracelsus gesagt – allein die Dosis macht das Gift. 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 ihr auch um das Denken in quantitativen Zusammenhängen. Dazu braucht der Mensch den mathematischen Formalismus; sein Kopf ist nun einmal so gebaut. Wer die Physik nutzen will, darf ihren Formeln nicht ausweichen.

Wer Medizin studiert, befaßt sich mit der Physik nicht um ihrer selbst willen und möchte darum physikalische Zusammenhänge, wenn es denn schon sein muß, wenigstens an medizinischen Beispielen erläutern bekommen. Dem sind aber Grenzen gesetzt. Die Natur kennt ihre Gesetze, deren Begrenzungen, aber auch deren Möglichkeiten, besser als jeder Physiker und jeder Arzt. Die Raffinesse, mit der sie sie zur Konstruktion funktionsfähiger Lebewesen unterschiedlichster Art ausnutzt, ist faszinierend zu sehen, aber nur für den, der in der Physik schon leidlich Bescheid weiß. Wer sich diese Kenntnisse erst noch erwerben will, dem helfen technische Beispiele oftmals mehr, denn sie sind primitiver und darum leichter zu durchschauen.

Das Buch hat einen neuen Umschlag bekommen. Text und Layout wurden erst zur vorigen Auflage völlig überarbeitet, brauchten also nicht verändert zu werden. In Kästen gesetzte sog. *concurrent organizer* begleiten den laufenden Text wie Wegmarken; *pre organizer* vor den Abschnitten zeigen, wo es langgehen soll. Am Ende jedes Hauptabschnitts bildet ein Kapitel „Fragen und Zusammenhänge“ 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.

Auch dieses Mal lag die Betreuung des Buches beim Verlag in den bewährten Händen der Damen Anne C. Repnow und Susanne Schimmer. Ihnen gilt unser besonderer Dank.

Göttingen, Januar 1995

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> .....	1
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> .....	31
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	Linsenfehler .....	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>