

# **Physik für Mediziner**

Von Dr. phil. Detlef Kamke  
em. Professor an der Universität Bochum

und Dr.-Ing. Dr. rer. nat. h.c. Wilhelm Walcher  
em. Professor an der Universität Marburg

2., überarbeitete und erweiterte Auflage  
Mit 533 Bildern und 112 Beispielen



**B. G. Teubner Stuttgart 1994**

# **Inhalt**

## **1 Methode der Physik: beobachten und schließen**

## **2 Raum und Zeit**

2.1	Physikalische Größe; Länge und Längeneinheit . . . . .	22
2.2	Praktische Längenmessung . . . . .	24
2.3	Ausmessung des Raumes; Koordinatensystem . . . . .	25
2.4	Flächen- und Rauminhalt . . . . .	26
2.5	Ebener und räumlicher Winkel (Raumwinkel) . . . . .	29
2.6	Zeit und Frequenz . . . . .	30

## **3 Grundbegriffe der Mechanik**

3.1	Geradlinige Bewegung, Geschwindigkeit und Beschleunigung . . . . .	33
3.1.1	Geschwindigkeit . . . . .	33
3.1.2	Schreibende Meßgeräte . . . . .	36
3.1.3	Beschleunigung . . . . .	37
3.1.4	Beschleunigung des freien Falls . . . . .	39
3.2	Bewegung in der Ebene . . . . .	40
3.2.1	Bahnkurve, Geschwindigkeitsvektor, Addition von Vektoren . . . . .	40
3.2.2	Kreisbewegung als Spezialfall . . . . .	42
3.3	Bewegung im Raum . . . . .	45
3.4	Ergänzungen . . . . .	46
3.4.1	Der gekrümmte Raum . . . . .	46
3.4.2	Raum-Zeit-Kontinuum, hohe Geschwindigkeiten . . . . .	46
3.5	Kraft und Masse . . . . .	47
3.5.1	Ursachen von Beschleunigung und Trägheit . . . . .	47
3.5.2	Wechselwirkung, actio = reactio . . . . .	50
3.5.3	Drehmoment, Kräfte bei der Kreisbewegung . . . . .	52

3.6 Beispiele für die „Trägheit der Materie“ . . . . .	54
3.7 Schwerelosigkeit . . . . .	56
<b>4 Größen- und Einheitensysteme</b>	
4.1 Basisgrößen und Basiseinheiten . . . . .	58
4.2 Bezogene Größen . . . . .	58
4.3 Ergänzung: Centimeter-Gramm-Sekunde (c-g-s)-System und technisches Einheitensystem . . . . .	60
4.4 Unsaubere Größenbezeichnungen . . . . .	61
<b>5 Grundlagen der Struktur der Materie</b>	
5.1 Eigenschaften und Formen der Materie . . . . .	62
5.1.1 Feste Körper . . . . .	63
5.1.2 Flüssigkeiten . . . . .	64
5.1.3 Gase. . . . .	65
5.2 Atome und Moleküle . . . . .	65
5.3 Atome und Atomkerne . . . . .	69
5.4 Aufbau der zusammenhängenden Materie . . . . .	73
5.5 Stoffmenge . . . . .	75
5.5.1 Einfache Mengengrößen. . . . .	75
5.5.2 Mengenbezogene Größen . . . . .	76
Stoffmengenbezogene Größen oder molare Größen – Volumenbezogene Größe oder „Dichte“ – Massenbezogene oder spezifische Größen	
5.5.3 Stoffgemische . . . . .	79
Relative Häufigkeit der Teilchen – Anteil (Gehalt) der Komponenten im Gemisch – Konzentration der Komponenten im Gemisch – Molalität – Einige Ergänzungen	
<b>6 Körper und Materie im mechanischen Gleichgewicht</b>	
6.1 Gleichgewicht, Kräfteaddition und Kräftezerlegung . . . . .	87
6.2 Schwerpunkt, Massenmittelpunkt, Standfestigkeit . . . . .	92
6.3 Dehnung und Scherung fester Stoffe . . . . .	95
6.3.1 Dehnung . . . . .	95
6.3.2 Scherung . . . . .	99

6.3.3	Elastische Beanspruchung der Materie (Spannungszustand) . . . . .	100
	Beispiele des Spannungs–Dehnungs–Zustandes im menschlichen Körper – Muskeln als aktiv elastische Stoffe – Dehnung von Gefäßwandungen	
6.4	Flüssigkeiten . . . . .	109
6.4.1	Druck, Stempeldruck, Kompressibilität . . . . .	109
6.4.2	Schweredruck, Auftrieb, Flüssigkeitsmanometer . . . . .	113
6.4.3	Druckgefälle in der rotierenden Flüssigkeit einer Zentrifuge . . . . .	117
6.5	Gase . . . . .	119
6.5.1	Kompressibilität . . . . .	119
6.5.2	Druckmessung . . . . .	120
6.5.3	Schweredruck, Luftdruck in der Erdatmosphäre . . . . .	121
<b>7</b>	<b>Wechselwirkungen und Felder</b>	
7.1	Übersicht; einige Arten von Kräften . . . . .	124
7.2	Gravitationskraft . . . . .	124
7.2.1	Gravitationsgesetz . . . . .	124
7.2.2	Kraftfeld, Feldstärke. . . . .	125
7.3	Elektrische Kräfte . . . . .	126
7.3.1	Elektrische Ladung . . . . .	127
7.3.2	Elektrische Leiter, elektrisches Netz und elektrische Ladung. . . . .	130
7.3.3	Elektrisches Feld, Coulomb-Gesetz . . . . .	131
7.3.4	Elektrisches Feld der Punktladung und des elektrischen Dipols. . . . .	132
7.3.5	Elektrische Wechselwirkung im atomaren und molekularen Bereich . . . . .	135
	Atomhülle – Chemische Bindungskräfte – Bindung in festen Stoffen – Dipolkräfte	
7.4	Magnetische Kräfte . . . . .	142
7.5	Kernkraft . . . . .	143
7.6	Arbeit, Energie und Leistung . . . . .	143
7.6.1	Arbeit in der Mechanik . . . . .	144
	Hubarbeit im Schwerkraftfeld – Spannarbeit bei elastischen Federn – Beschleunigungsarbeit	
7.6.2	Leistung . . . . .	149
7.6.3	Energie . . . . .	150
	Energiesatz der Mechanik – Energieinhalt des gespannten Muskels – Reibung zwischen festen Körpern – Fahrrad-Ergometer zur Leistungsmessung	
7.6.4	Arbeit im elektrischen Feld, Spannung und Potential . . . . .	158
	Elektrische Spannung im Feld der Punktladung und des Dipols – Energie; Elektronenvolt als Energieeinheit	

7.6.5	Energieinhalt der Stoffe: Bindungsenergie, chemische Energie Atome – Moleküle – Chemische Energie – Brennwert der Stoffe	164
7.6.6	Energie aus Atomkernen . . . . .	171
7.7	Ergänzung: Impuls und Drehimpuls . . . . .	172
7.7.1	Impuls . . . . .	172
7.7.2	Drehenergie . . . . .	175
7.7.3	Drehimpuls . . . . .	177

## 8 Thermische Energie (Wärme)

8.1	Wärme gleich ungeordnete (thermische) Energie. . . . .	180
8.2	Temperaturmessung, Temperaturskalen . . . . .	183
8.2.1	Thermometrie . . . . .	183
8.2.2	Flüssigkeitsthermometer. . . . .	183
8.2.3	Andere Temperaturskalen . . . . .	185
8.2.4	Andere Thermometer . . . . .	186
	Widerstands-Thermometer – Thermoelement-Thermometer – Strahlungsmesser als Thermometer	
8.2.5	Temperatur des menschlichen Körpers . . . . .	187
8.3	Stoffe bei Änderung der Temperatur (Thermische Zustandsgleichung) . . . . .	188
8.3.1	Feste Stoffe . . . . .	188
8.3.2	Flüssigkeiten . . . . .	191
8.3.3	Gase. . . . .	192
8.3.4	Gasgemische . . . . .	197
8.4	Diffusion . . . . .	200
8.4.1	Diffusion als kinetischer Vorgang . . . . .	200
8.4.2	Lösungen und Gasaufnahme in Flüssigkeiten . . . . .	204
8.4.3	Osmotischer Druck . . . . .	209
8.5	Änderungen der thermischen Energie . . . . .	212
8.5.1	Änderung der thermischen Energie eines Körpers durch Wärmeaustausch . . . . .	212
8.5.2	Spezifische und molare Wärmekapazität der Stoffe . . . . .	214
8.5.3	Messung von Wärmemengen: Kalorimetrie . . . . .	217
8.6	Allgemeiner Energiesatz: erster Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .	219
8.7	Einige thermodynamische Prozesse; Carnot-Prozeß und thermodynamische Temperatur . . . . .	221
8.7.1	Isotherme Prozesse . . . . .	221
8.7.2	Adiabatische Prozesse . . . . .	222

8.7.3	Innere Energie $U$ und Enthalpie $H$	224
8.7.4	Biologische Prozesse	224
8.7.5	Carnot-Prozeß und thermodynamische Temperatur	225
8.8	Entropie, zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	227
8.8.1	Entropie	227
8.8.2	Reversible und irreversible Vorgänge	228
8.8.3	Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	229
8.8.4	Stabilität	231
8.9	Wärmeaustausch durch Wärmeleitung und Konvektion	232
8.9.1	Wärmeleitung und Konvektion	232
8.9.2	Wärmeverlust im Gegenstrom	235
8.10	Schmelzen, Sieden, Verdampfen: Änderung des Aggregatzustandes	237
8.10.1	Erwärmungsdiagramm, Haltepunkte der Temperatur	237
8.10.2	Dampfdruck und Verdampfungswärme	239
8.10.3	Luftfeuchtigkeit	246
8.10.4	Gefrierpunktterniedrigung, Siedepunkterhöhung und Dampfdruckerniedrigung bei Zweistoffsystemen mit einer nichtflüchtigen Komponente Siedepunkt, Tripelpunkt, Erstarrungspunkt reiner Stoffe – Siedepunkterhöhung, Gefrierpunktterniedrigung	250
8.10.5	Gefriertrocknung	253
8.10.6	Tiefe Temperaturen	255

## 9 Strömungsvorgänge

9.1	Strömung fluider Medien	256
9.1.1	Stromstärke, Stromdichte, Kontinuitätsgleichung	256
9.1.2	Bernoullisches Strömungsgesetz für reibungsfreie Strömungen	259
9.1.3	Dynamische Viskosität (Zähigkeit, innere Reibung) fluider Stoffe	264
9.1.4	Strömung durch Rohre, Hagen-Poiseuillesches Gesetz	269
9.1.5	Strömungswiderstand, Strömungen in verzweigten Systemen	271
9.1.6	Sedimentation	273
9.1.7	Turbulenz	275
9.1.8	Strömungen im Gefäßsystem des menschlichen Körpers Herzarbeit – Strömung und Druckabfall – Messung des Blutdrucks	276
9.1.9	Zwei weitere Anwendungen der Strömungsgesetze Strömungsart in der Luftröhre – Infusionsströmung	282
9.2	Elektrischer Gleichstrom	287
9.2.1	Elektrische Felder, metallische Körper, Kapazität	287

9.2.2	Elektrischer Strom und seine Wirkungen . . . . .	292
	Stromstärke, Ladung, Stromdichte – Magnetische Wirkung des elektrischen Stromes – Chemische Wirkung des elektrischen Stromes – Wärmewirkung des elektrischen Stromes	
9.2.3	Meßgeräte für den elektrischen Strom . . . . .	296
9.2.4	Strömungsgesetze für den elektrischen Strom . . . . .	298
	Strom-Spannungs-Kennlinie, elektrischer Widerstand, elektrischer Leitwert – Resistivität und Leitfähigkeit – Spannungsabfall, Spannungsteiler-(Potentiometer-)Schaltung – Elektrische Leistung	
9.2.5	Elektrische Netzwerke . . . . .	306
	Kirchhoffsche Gesetze – Strom- und Spannungsmesser – Spannungsquellen – Brückenschaltung – Einschaltvorgang eines Stromkreises mit Kondensator	
9.3	Mechanismus der elektrischen Leitung . . . . .	312
9.3.1	Ladungsträger . . . . .	312
9.3.2	Elektrische Leitung in Metallen . . . . .	313
	Elektrische Leitfähigkeit der Metalle – Temperaturabhängigkeit der Resistivität bzw. der Leitfähigkeit	
9.3.3	Halbleiter . . . . .	316
9.3.4	Elektrische Leitung in Flüssigkeiten . . . . .	318
	Elektrische Leitfähigkeit von Flüssigkeiten, insbesondere von wässrigen Lösungen – Dissoziation, Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit der Elektrolyte – Ladungs- und Materietransport in flüssigen Leitern, Faradaysche Gesetze	
9.3.5	Elektrophorese und Iontophorese . . . . .	323
9.3.6	Elektrische Leitung im Vakuum . . . . .	325
	Vakuum und Ladungsträger – Photoemission – Thermische Emission von Elektronen – Die Elektronenröhre als Gleichrichter (Gleichrichterdiode) – Die Elektronenröhre als steuerbares Schaltelement (Triode) – Die Elektronenstrahlröhre	
9.3.7	Elektrische Leitung in Gasen . . . . .	333
	Träger-Erzeugung – Niederdruck-Gasentladung – Gasentladungslampen – Elektrizitätsleitung in Gasen unter Normaldruck	
9.4	Magnetfelder . . . . .	337
9.4.1	Magnetfeld und magnetische Feldstärke . . . . .	337
9.4.2	Kraft auf Ströme und bewegte Ladungen im Magnetfeld . . . . .	339
9.4.3	Zeitlich veränderliche Magnetfelder: elektromagnetische Induktion . . . . .	342
9.5	Der menschliche Körper unter dem Einfluß elektrischer Spannungen, Ströme und Felder . . . . .	348
9.5.1	Strömungsfeld in Leitern beliebiger räumlicher Ausdehnung . . . . .	348
9.5.2	Der menschliche Körper als Leiter . . . . .	352
9.5.3	Empfindungen und Wirkungen bei Gleichstrom und niederfrequentem Wechselstrom . . . . .	354
9.5.4	Wirkung des elektrischen Stromes auf den Nerv . . . . .	356

**10 Wechselspannung und Wechselstrom**

10.1	Wechselspannungserzeugung durch elektromagnetische Induktion . . . . .	358
10.2	Kondensator und Spule im Wechselstromkreis . . . . .	362
10.2.1	Wirkwiderstand (Gleichstromwiderstand) eines Leiters . . . . .	362
10.2.2	Kondensator . . . . .	363
10.2.3	Spule . . . . .	364
10.2.4	Wirkwiderstand, Spule und Kondensator in Serie geschaltet. . . . .	365
10.3	Leistung des Wechselstromes . . . . .	367
10.4	Wiedergabe elektrischer Pulse mittels einfacher Schaltmittel . . . . .	368
10.4.1	<i>R-C</i> -Glied . . . . .	368
10.4.2	<i>R-L</i> -Glied . . . . .	368
10.5	Der Transformator . . . . .	368
10.6	Wirbelströme . . . . .	370

**11 Materie im elektrischen und magnetischen Feld**

11.1	Isolierende (nicht-leitende) Stoffe im elektrischen Feld. . . . .	371
11.2	Materie im Magnetfeld . . . . .	375

**12 Grenzflächen**

12.1	Oberfläche einer Flüssigkeit . . . . .	379
12.2	Grenzflächen . . . . .	380
12.3	Verdampfungs-, Sublimations- und Lösungswärme (bzw. -Energie) . . . . .	381
12.4	Makroskopische Phänomene, Oberflächenspannung . . . . .	382
12.5	Elektrische Phänomene an der Grenzfläche zweier fester Stoffe . . . . .	384
12.5.1	Grenzfläche Metall–Metall (Thermospannung). . . . .	384
12.5.2	Grenzfläche Halbleiter–Halbleiter . . . . .	385
12.6	Elektrische Phänomene an der Grenzfläche mit Elektrolyten . . . . .	386
12.6.1	Grenzfläche Metall–Elektrolyt . . . . .	386
12.6.2	Galvanische Elemente . . . . .	387
12.6.3	Grenzfläche Elektrolyt–Elektrolyt . . . . .	389
12.6.4	Diffusionsspannung an der Grenzfläche zweier Elektrolyte . . . . .	389
12.6.5	Grenzflächen mit Isolatoren . . . . .	392

**13 Schwingungs-Vorgänge**

13.1	Schwingungen mechanischer Systeme . . . . .	393
13.2	Dämpfung . . . . .	396
13.3	Schwingungs-Anfachung und Resonanz . . . . .	401
13.4	Zwei gekoppelte Oszillatoren . . . . .	404
13.5	Viele gekoppelte Oszillatoren: Wellen auf Leitungen . . . . .	408
13.5.1	Ein Modell einer Leitung . . . . .	408
13.5.2	Ausbreitung eines Rucks und eines Pulses auf der Modelleleitung . . . . .	409
13.5.3	Ausbreitung einer Sinuswelle auf der Modelleleitung . . . . .	410
13.5.4	Reflexion einer sich auf einer Pendelkette (Leitung) ausbreitenden Welle . . . . .	411
13.6	Schallwellen . . . . .	413
13.6.1	Schallfeld-Wechselgrößen . . . . .	413
13.6.2	Ausbreitungs- (Fortpflanzungs-)Geschwindigkeit . . . . .	413
13.6.3	Wellenwiderstand (Schall-Kenn-Impedanz) . . . . .	415
13.6.4	Schallstrahlung, Intensität, Absorption . . . . .	416
13.6.5	Eigenschwingungen, Spektrum, Beugung der Schallwelle . . . . .	422
13.6.6	Ohr und Gehör des Menschen . . . . .	425
13.7	Elektromagnetische Schwingungen . . . . .	434
13.7.1	Elektrische und magnetische Feldenergie . . . . .	434
13.7.2	Der elektrische Oszillatator (Schwingkreis) . . . . .	436
13.7.3	Der elektrisch schwingende Dipol (Dipol-Oszillatator) . . . . .	441
13.7.4	Elektromagnetisches Feld der Dipolantenne, elektromagnetische Strahlung . . . . .	443
13.7.5	Der menschliche Körper im elektromagnetischen Feld . . . . .	445
	Physikalische Grundlagen – Einige Arten der Hochfrequenz-Wärme-Behandlung	
13.7.6	Strahlungsschwächung, Eindringtiefe . . . . .	449

**14 Optik**

14.1	Lichtquellen, Lichtgeschwindigkeit . . . . .	451
14.2	Strahlenoptik . . . . .	453
14.2.1	Lichtstrahlen . . . . .	453
14.2.2	Reflexionsgesetz, Spiegel . . . . .	454
14.2.3	Brechung des Lichtes, Brechungsgesetz . . . . .	458
14.2.4	Optische Linsen . . . . .	462
	Gekrümmte Grenzfläche zweier durchsichtiger Stoffe – Optische Linsen – Abbildungsgleichung	

14.2.5 Einige optische Geräte . . . . .	470
Zwei (dünne) Linsen mit gemeinsamer optischer Achse – Geometrische Optik des menschlichen Auges – Strukturelle (Längen-)Auflösung des Auges – Vergrößerung – Lupe – Mikroskop	
14.2.6 Abbildungsfehler . . . . .	480
Sphärischer oder Öffnungs-Fehler – Astigmatismus	
14.3 Dispersion, Spektrum . . . . .	482
14.3.1 Abhängigkeit der Brechzahl von der Farbe (Frequenz) des Lichtes	482
14.3.2 Chromatischer oder Farb-Fehler der Linsen	483
14.3.3 Geometrisch-optischer Farbfehler des menschlichen Auges	485
14.3.4 Spektrum, Spektralapparat . . . . .	486
14.3.5 Farbensehen	489
14.4 Wellenoptik . . . . .	490
14.4.1 Überlagerung von Wellen, Interferenz . . . . .	490
14.4.2 Huygenssches Prinzip, Beugung am Spalt und an der Lochblende	493
14.4.3 Anwendung: Auge und Mikroskop . . . . .	496
Auge – Mikroskop – Phasenkontrast-Mikroskop	
14.4.4 Optisches Gitter, spektrales Auflösungsvermögen . . . . .	503
Optisches Gitter – Spektrales Auflösungsvermögen von Gitter und Prismen	
14.4.5 Dünne Schichten . . . . .	505
14.4.6 Polarisiertes Licht . . . . .	506
Erzeugung polarisierten Lichtes, Doppelbrechung – Zirkular polarisiertes Licht – Polarisator und Analysator – Drehung der Polarisationsebene durch feste Stoffe – Drehung der Polarisationsebene durch Flüssigkeiten, Saccharimetrie	
14.5 Lichtmessung, Absorption, Extinktion. . . . .	515
14.5.1 Lichtmessung (Photometrie)	515
14.5.2 Lichtempfindlichkeit des menschlichen Auges . . . . .	520
14.5.3 Absorption und Extinktion . . . . .	521
<b>15 Strahlung – insbesondere energiereiche Strahlung</b>	
15.1 Atom- und Molekülspektren. . . . .	527
15.1.1 Energie der Atom- und Molekülzustände . . . . .	527
15.1.2 Emissions- und Absorptionsspektrum . . . . .	529
15.2 Thermische Strahlung fester Stoffe . . . . .	531
15.3 Röntgenstrahlung . . . . .	535
15.3.1 Erzeugung und Eigenschaften der Röntgenstrahlung . . . . .	535
15.3.2 Das Spektrum der Röntgenstrahlung . . . . .	538
15.3.3 Messung der Röntgenstrahlung . . . . .	542

15.3.4	Schwächung, Absorption und Härte von Röntgen- und Gamma-Strahlung . . . . .	547
15.3.5	Strahlendosis, Strahlendosisleistung . . . . .	554
15.4	Radioaktivität und Kernstrahlung . . . . .	560
15.4.1	Bindungsenergié der Atomkerne . . . . .	560
15.4.2	Die Strahlung der radioaktiven Stoffe . . . . .	562
15.4.3	Gesetz des radioaktiven Zerfalls, Aktivität, Halbwertszeit . . . . .	565
15.4.4	Radioaktive Zerfallsreihen, radioaktives Gleichgewicht . . . . .	569
15.4.5	Energie der Strahlung der radioaktiven Stoffe . . . . .	573
15.4.6	Schwächung (Absorption) von Kernstrahlung in Materie Strahlungsdetektoren – Schwächung von Strahlung schwerer Teilchen – Schwächung von Elektronenstrahlung – Schwächung von Gammastrahlung – Schwächung von Neutronenstrahlung – Zusammenfassung	575
15.5	Wechselwirkung von Kernstrahlung mit Atomkernen . . . . .	584
15.5.1	Kernreaktionen . . . . .	584
15.5.2	Neutronen und künstliche Radioaktivität Erzeugung von Neutronen – Messung von Neutronen – Künstliche Radioaktivität, Aktivierung	585
15.5.3	Kernspaltung . . . . .	591

## **16 Steuerung und Regelung**

16.1	Steuerung . . . . .	594
16.2	Regelung, Regelkreis . . . . .	595
16.3	Regler . . . . .	599

## **17 Statistik**

17.1	Stichprobe und Merkmal . . . . .	602
17.2	Systematische und zufällige Abweichungen . . . . .	603
17.3	Häufigkeit (Häufigkeitsverteilung) und Wahrscheinlichkeit, Stab- und Staffeldiagramm . . . . .	603
17.4	Häufigkeitsverteilung, Normalverteilung . . . . .	607
17.4.1	Ein Beispiel: Häufigkeitsverteilung der Erythrozyten-Konzentration . . . . .	607
17.4.2	Normalverteilung – Gauß-Verteilung . . . . .	608
17.5	Auswertung der Daten einer Stichprobe, arithmetisches Mittel und empirische Standardabweichung . . . . .	610