

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, $\text{actio} = \text{reactio}$	50
3.5.3	Drehmoment, Kräfte bei der Kreisbewegung	52

3.6	Beispiele für die „Trägheit der Materie“	54
3.7	Schwereelosigkeit	56

4 Größen- und Einheitensysteme

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

5 Grundlagen der Struktur der Materie

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	

6 Körper und Materie im mechanischen Gleichgewicht

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
7	Wechselwirkungen und Felder	
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 Schwerfeld – 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 Leistungs- messung	
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	164
	Atome – Moleküle – Chemische Energie – Brennwert der Stoffe	
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	Wärmetransport 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	Gefrierpunktniedrigung, Siedepunkterhöhung und Dampfdruckerniedrigung bei Zweistoffsystemen mit einer nichtflüchtigen Komponente	250
	Siedepunkt, Tripelpunkt, Erstarrungspunkt reiner Stoffe – Siedepunkterhöhung, Gefrierpunktniedrigung	
8.10.5	Gefriertrocknung	253
8.10.6	Tiefe Temperaturen	255

9 Strömungsvorgänge

9.1	Strömung fluiden 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) fluiden 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	276
	Herzarbeit – Strömung und Druckabfall – Messung des Blutdrucks	
9.1.9	Zwei weitere Anwendungen der Strömungsgesetze	282
	Strömungsart in der Luftröhre – Infusionsströmung	
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	R - C -Glieder	368
10.4.2	R - L -Glieder	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 Modelleitung	409
13.5.3	Ausbreitung einer Sinuswelle auf der Modelleitung	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 Oszillator (Schwingkreis)	436
13.7.3	Der elektrisch schwingende Dipol (Dipol-Oszillator)	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 Prisma	
14.4.5	Dünne Schichten	505
14.4.6	Polarisiertes Licht	506
	Erzeugung polarisierten Lichtes, Doppelbrechung – Zirkular polarisiertes Licht – Polarisator und Analysator – Drehung der Polarisationssebene durch feste Stoffe – Drehung der Polarisationssebene 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
15	Strahlung – insbesondere energiereiche Strahlung	
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	Bindungsenergie 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	575
	Strahlungsdetektoren – Schwächung von Strahlung schwerer Teilchen – Schwächung von Elektronenstrahlung – Schwächung von Gamma- strahlung – Schwächung von Neutronenstrahlung – Zusammenfassung	
15.5	Wechselwirkung von Kernstrahlung mit Atomkernen	584
15.5.1	Kernreaktionen	584
15.5.2	Neutronen und künstliche Radioaktivität	585
	Erzeugung von Neutronen – Messung von Neutronen – Künstliche Radioaktivität, Aktivierung	
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-Konzen- tration	607
17.4.2	Normalverteilung – Gauß-Verteilung.	608
17.5	Auswertung der Daten einer Stichprobe, arithmetisches Mittel und empirische Standardabweichung	610