

**Mechanik**

1.	Raum und Zeit .....	3
1.1	Physikalische Größen und Einheiten .....	3
1.1.1	Länge als Beispiel .....	3
1.1.2	Basiseinheiten des internationalen Einheitensystems .....	6
1.1.3	Längenmessung .....	7
1.1.4	Zeitmessung .....	10
1.1.5	Winkelmaße .....	11
1.2	Bewegungen im Raum .....	12
1.2.1	Geschwindigkeit .....	12
1.2.2	Beschleunigung .....	16
1.2.3	Kreisbewegung .....	17
1.2.4	Berechnung des Weges aus Geschwindigkeit und Beschleunigung .....	19
2.	Masse und Kraft .....	22
2.1	Die träge Masse .....	22
2.2	Wirkung von Kräften .....	24
2.2.1	Newton'sche Axiome .....	24
2.2.2	Verschiedene Arten von Kräften .....	26
2.2.2.1	Gravitation .....	26
2.2.2.2	Trägheitskraft .....	28
2.2.2.3	Zentrifugal- und Zentripetalkraft .....	29
2.2.3	Statisches und dynamisches Gleichgewicht von Kräften .....	31
2.2.4	Schwerelosigkeit .....	31
2.2.5	Dynamometer (Kraft einer gespannten Feder) .....	32
2.2.6	Druck (Kraft auf eine Fläche) .....	32
2.2.7	Drehmoment .....	33
2.2.7.1	Trägheitsmoment .....	33
2.2.7.2	Kräftepaar .....	34
2.2.7.3	Anwendung auf den Hebel .....	35
2.2.7.4	Schwerpunkt .....	36
2.2.7.5	Die Hebelwaage .....	38
2.2.7.6	Indifferentes, stabiles und labiles Gleichgewicht .....	39
2.2.8	Impuls und Drehimpuls .....	40
2.2.9	Reibung .....	42
3.	Arbeit, Energie, Leistung .....	45
3.1	Ein Beispiel für den Begriff „Arbeit“ .....	45
3.2	Energieformen .....	46
3.3	Leistung, Wirkung .....	49
4.	Erhaltungssätze .....	51
4.1	Energieerhaltungssatz .....	51

4.2	Impulserhaltungssatz . . . . .	53
4.3	Stoß als Beispiel für Energie- und Impulserhaltung . . . . .	54
4.4	Drehimpulserhaltungssatz . . . . .	55
5.	Mechanische Eigenschaften von Stoffen . . . . .	57
5.1	Wechselwirkungen zwischen Atomen und Molekülen . . . . .	58
	5.1.1 Bindungsarten . . . . .	58
	5.1.2 Molekulares Bild der Aggregatzustände . . . . .	62
	5.1.2.1 Gase . . . . .	62
	5.1.2.2 Festkörper . . . . .	62
	5.1.2.3 Thermische Bewegung und Schmelzvorgang . . . . .	65
	5.1.2.4 Flüssigkeiten . . . . .	65
	5.1.3 Grenzflächen . . . . .	65
5.2	Makroskopische mechanische Eigenschaften von Festkörpern . . . . .	68
	5.2.1 Homogene Körper . . . . .	68
	5.2.2 Verformung von festen Körpern unter dem Einfluß von Kräften . . . . .	69
5.3	Makroskopische mechanische Eigenschaften von Flüssigkeiten . . . . .	72
	5.3.1 Hydrostatis . . . . .	72
	5.3.1.1 Spezifische Oberflächenenergie (Oberflächenspannung) . . . . .	72
	5.3.1.2 Druck in Flüssigkeiten . . . . .	76
	5.3.2 Hydrodynamik . . . . .	83
	5.3.2.1 Die Kontinuitätsgleichung . . . . .	83
	5.3.2.2 Zähe Flüssigkeiten (Viskosität, Laminare Strömung, Turbulente Strömung, Strömungsgesetze und Blutkreislauf) . . . . .	85

## **Mechanische Schwingungen und Wellen, Akustik**

6.	Schwingungen . . . . .	96
6.1	Pendel als mechanisches schwingungsfähiges System . . . . .	97
6.2	Differentialgleichung der ungedämpften Schwingung . . . . .	98
6.3	Gedämpfte Schwingungen . . . . .	101
6.4	Erzwungene Schwingungen . . . . .	102
6.5	Anharmonische Schwingungen . . . . .	104
	6.5.1 Überlagerung von harmonischen Schwingungen . . . . .	104
	6.5.2 Zerlegung anharmonischer Schwingungen in harmonische Teilschwingungen . . . . .	106
	6.5.3 Schwebung . . . . .	106
6.6	Gekoppelte Pendel . . . . .	107
	6.6.1 Zwei gekoppelte Pendel . . . . .	107
	6.6.2 Übergang von der Pendelkette zu einfachen Eigenschwingungen ausgedehnter Körper . . . . .	109
7.	Wellen . . . . .	112
7.1	Ausbreitung von Schwingungen . . . . .	112
7.2	Doppler-Effekt . . . . .	118
7.3	Gedämpfte Wellen . . . . .	120
7.4	Anharmonische Wellen . . . . .	121
7.5	Verhalten von Wellen an der Grenzfläche zwischen verschiedenen Medien . . . . .	124
7.6	Überlagerung von Wellen . . . . .	127
7.7	Stehende Wellen . . . . .	128

7.8	Schallwellen (Akustik) . . . . .	131
7.9	Schallfeldgrößen . . . . .	134
7.10	Schallempfindungen . . . . .	137
7.11	Stimme und Gehör beim Menschen . . . . .	139
7.12	Ultraschall . . . . .	141
	7.12.1 Ultraschalldiagnostik . . . . .	142

## **Wärmelehre**

8.	Wärme und Temperatur . . . . .	146
8.1	Einleitung . . . . .	146
8.2	Wärmeenergie . . . . .	146
8.3	Wärmekapazität, spezifische Wärme . . . . .	147
8.4	Temperaturskalen . . . . .	148
8.5	Temperatur-Meßgeräte . . . . .	149
	8.5.1 Ausdehnungsthermometer . . . . .	149
	8.5.2 Thermoelement . . . . .	151
	8.5.3 Widerstandsthermometer . . . . .	152
9.	Ideale Gase . . . . .	153
9.1	Zustandsgrößen, Zustandsgleichung . . . . .	153
9.2	Zustandsänderungen . . . . .	153
9.3	Adiabatische Zustandsgleichungen . . . . .	154
9.4	Zustandsgleichung von Gasgemischen . . . . .	155
10.	Kinetische Gastheorie . . . . .	156
10.1	Gasdruck . . . . .	156
10.2	Kinetische Energie und Temperatur . . . . .	157
10.3	Freiheitsgrade und Gleichverteilungssatz . . . . .	157
10.4	Geschwindigkeitsverteilung . . . . .	158
10.5	Volumenarbeit . . . . .	159
10.6	Wärmekapazität idealer Gase . . . . .	160
11.	Reale Gase, Van der Waals'sche Zustandsgleichung . . . . .	162
12.	Hauptsätze der Wärmelehre . . . . .	164
12.1	Innere Energie . . . . .	164
12.2	Der 1. Hauptsatz der Wärmelehre . . . . .	165
12.3	Reversible und irreversible Prozesse . . . . .	165
12.4	Entropie . . . . .	167
12.5	Der 2. Hauptsatz der Wärmelehre . . . . .	169
12.6	Energiebilanz beim lebenden Organismus . . . . .	169
13.	Thermodynamische Eigenschaften von Stoffen . . . . .	171
13.1	Thermische Ausdehnung . . . . .	171
13.2	Wärmetransport, Wärmetransport . . . . .	172
13.3	Stoffgemische . . . . .	173
	13.3.1 Konzentration und Gehalt einer Lösung . . . . .	174
	13.3.2 Echte Lösung, kolloidales System . . . . .	175
	13.3.3 Henry-Daltonsches Gesetz . . . . .	175
	13.3.4 Hydratation, Solvatation . . . . .	176

13.3.5	Diffusion . . . . .	176
13.3.6	Osmose . . . . .	177
13.3.7	Phasenübergänge . . . . .	179
13.3.7.1	Umwandlungswärmen . . . . .	179
13.3.7.2	Lösungswärmen . . . . .	181
13.3.7.3	Reaktionswärmen . . . . .	181
13.3.7.4	Dampfdruck . . . . .	182
13.3.7.5	Dampfdruckerniedrigung, Siedepunktserhöhung und Gefrierpunkts- erniedrigung . . . . .	183
13.3.7.6	Koexistenz von Phasen, Phasengleichgewichte . . . . .	185

## Elektrizitätslehre

14.	Elektrische und magnetische Größen . . . . ,	187
14.1	Vorbemerkung . . . . .	187
14.2	Ladung . . . . .	187
	14.2.1 Ladungsmenge . . . . .	187
	14.2.2 Kraft zwischen elektrischen Ladungen . . . . .	188
14.3	Spannung . . . . .	189
	14.3.1 Definition der Spannung . . . . .	189
	14.3.2 Spannungsquellen . . . . .	190
14.4	Strom . . . . .	192
14.5	Widerstand, Leitwert . . . . .	193
	14.5.1 Leiter, Nichtleiter . . . . .	193
	14.5.2 Spezifischer Widerstand, spezifische Leitfähigkeit . . . . .	194
	14.5.3 Strom-Spannungs-Kennlinie von Leitern . . . . .	195
14.6	Netzwerke . . . . .	196
	14.6.1 Schaltbilder . . . . .	196
	14.6.2 Innenwiderstand einer Spannungsquelle . . . . .	197
	14.6.3 Kirchhoffsche Gesetze des elektrischen Stromes . . . . .	199
14.7	Elektrostatisches Feld . . . . .	202
	14.7.1 Kraftwirkung auf eine Ladung im Feld . . . . .	202
	14.7.2 Arbeit und Energie im elektrischen Feld . . . . .	204
	14.7.3 Kondensator und Kapazität . . . . .	206
	14.7.4 Kräfte auf einen Dipol im Feld . . . . .	208
	14.7.5 Materie im Feld . . . . .	209
	14.7.6 Energieinhalt des elektrischen Feldes . . . . .	213
	14.7.7 Piezo- und Pyroelektrizität . . . . .	213
14.8	Magnetfeld . . . . .	214
	14.8.1 Feldstärke und magnetische Induktion . . . . .	214
	14.8.2 Kräfte auf einen magnetischen Dipol . . . . .	218
	14.8.3 Induktionsvorgänge . . . . .	218
	14.8.4 Maxwellsche Gleichungen . . . . .	220
	14.8.5 Lorentz-Kraft . . . . .	221
	14.8.6 Selbstinduktion . . . . .	223
	14.8.7 Energieinhalt des magnetischen Feldes . . . . .	223
	14.8.8 Lenzsche Regel . . . . .	224
	14.8.9 Magnetfelder des menschlichen Körpers . . . . .	224
14.9	Zeitabhängige Spannungen und Ströme . . . . .	225
	14.9.1 Ein- und Ausschaltvorgänge . . . . .	225

14.9.1.1	Einschalt- und Ausschaltvorgang beim Kondensator . . . . .	225
14.9.1.2	Einschalt- und Ausschaltvorgang bei der Spule . . . . .	228
14.9.2	Sinusförmige Wechselspannungen und Wechselströme . . . . .	229
14.9.3	Dreiphasen-Spannung, Drehstrom . . . . .	231
14.9.4	Nicht-sinusförmige Wechselspannungen, Spannungsimpulse . . . . .	232
14.9.5	Wechselstrom-Kreise . . . . .	233
14.9.5.1	Kapazitiver Widerstand . . . . .	233
14.9.5.2	Induktiver Widerstand . . . . .	234
14.9.5.3	Wechselstromkreise mit Ohmschem, kapazitivem und induktivem Widerstand . . . . .	235
14.9.6	Resonanz-Schwingkreise . . . . .	237
14.9.7	Elektromagnetische Wellen . . . . .	239
14.9.7.1	Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen . . . . .	242
14.9.7.2	Ausbreitungsrichtung elektromagnetischer Wellen . . . . .	243
14.9.8	Leistung des elektrischen Stroms . . . . .	243
<b>15.</b>	<b>Mikroskopische elektrische Vorgänge . . . . .</b>	<b>247</b>
15.1	Biologische Potentiale . . . . .	247
15.1.1	Entstehung von Spannungen an Grenzflächen . . . . .	247
15.1.2	Summenpotentiale . . . . .	250
15.2	Mechanismen der Stromleitung . . . . .	251
15.2.1	Stromleitung im Vakuum . . . . .	252
15.2.2	Stromleitung in Gasen . . . . .	253
15.2.3	Stromleitung in Elektrolyten . . . . .	255
15.2.4	Stromleitung in Festkörpern . . . . .	261
15.3	Halbleiterelektronik . . . . .	265
15.3.1	Halbleiterdiode . . . . .	265
15.3.2	Transistor . . . . .	267
15.3.3	Feldeffekt-Transistor . . . . .	268
15.4.3	Digitalelektronik . . . . .	269
<b>16.</b>	<b>Elektrische Geräte . . . . .</b>	<b>274</b>
16.1	Meßgeräte . . . . .	274
16.1.1	Das Drehspul-Meßwerk . . . . .	275
16.1.2	Das Digital-Meßgerät . . . . .	277
16.1.3	Messung von Strom und Spannung . . . . .	278
16.1.4	Elektronenstrahl-Oszilloskop und Bildschirm . . . . .	281
16.1.5	Ladungsmessung . . . . .	286
16.1.6	Messung von Ohmschen Widerständen . . . . .	286
16.1.7	Rauschen . . . . .	288
16.2	Technische elektrische Geräte . . . . .	288
16.2.1	Dynamo-Maschine . . . . .	288
16.2.2	Elektro-Motor . . . . .	289
16.2.3	Transformator . . . . .	289
16.2.4	Sender und Empfänger . . . . .	292
<b>Optik</b>		
17.	Optische Strahlung . . . . .	296
17.1	Einleitung . . . . .	296

17.2	Lichtmeßgrößen . . . . .	297
17.3	Strahlungsquellen . . . . .	299
17.4	Bohrsches Atommodell . . . . .	299
17.5	Emission von Licht aus Atomen . . . . .	302
17.6	Das Emissions-Spektrum des Atoms . . . . .	304
17.7	Absorption von Licht in Atomen . . . . .	306
17.8	Emission und Absorption glühender Körper . . . . .	306
17.9	Wärmestrahlung und Temperaturgleichgewicht . . . . .	307
	17.9.1 Emission und Absorption des Schwarzen Körpers . . . . .	308
	17.9.2 Strahlungsgesetze . . . . .	310
17.10	Der Laser . . . . .	312
	17.10.1 Laser in der Medizin . . . . .	314
17.11	Fluoreszenz, Phosphoreszenz, Lumineszenz . . . . .	314
18.	Wellenoptik . . . . .	316
18.1	Kohärenz von Wellen . . . . .	316
18.2	Interferenz von Wellen . . . . .	316
	18.2.1 Interferenzfähigkeit . . . . .	316
	18.2.2 Interferometrie . . . . .	319
	18.2.3 Holographie . . . . .	322
18.3	Beugung elektromagnetischer Wellen . . . . .	324
	18.3.1 Das Huygens'sche Prinzip . . . . .	324
	18.3.2 Beugung an Spalten . . . . .	325
	18.3.3 Beugung am Draht . . . . .	328
	18.3.4 Das Beugungsgitter . . . . .	328
	18.3.5 Beugung an kreisförmigen Blenden (Beugungsunschärfe) . . . . .	330
	18.3.6 Beugung von Röntgenstrahlen . . . . .	332
18.4	Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in Materie . . . . .	333
	18.4.1 Der Brechungsindex . . . . .	333
	18.4.2 Das Absorptionsgesetz . . . . .	334
	18.4.3 Der Zusammenhang zwischen Absorption und Dispersion . . . . .	337
	18.4.4 Dichroismus und Doppelbrechung . . . . .	337
	18.4.5 Spannungsdoppelbrechung . . . . .	339
18.5	Spektralanalyse . . . . .	339
	18.5.1 Lambert-Beersches Gesetz . . . . .	340
	18.5.2 Extinktion kolloidaler Systeme . . . . .	342
18.6	Polarisation elektromagnetischer Wellen . . . . .	343
	18.6.1 Polarisationszustand . . . . .	343
	18.6.2 Erzeugung und Untersuchung von linear polarisiertem Licht . . . . .	344
	18.6.3 Optische Aktivität und Faraday-Effekt . . . . .	348
18.7	Materiewellen . . . . .	349
19.	Geometrische Optik . . . . .	353
19.1	Lichtausbreitung . . . . .	353
19.2	Optische Symbole . . . . .	354
19.3	Gesetze der Geometrischen Optik . . . . .	355
	19.3.1 Reflexion . . . . .	355
	19.3.2 Abbildung durch Spiegel . . . . .	356
	19.3.3 Brechung . . . . .	359
	19.3.4 Intensitäten von gebrochenem und reflektiertem Strahl . . . . .	361

19.3.5	Zerlegung von Licht in seine Spektralfarben mit Hilfe des Prismas . . . . .	361
19.3.6	Totalreflexion . . . . .	362
19.3.7	Optoelektronik . . . . .	364
19.4	Abbildung mit Linsen . . . . .	365
19.4.1	Abbildung durch brechende Flächen . . . . .	365
19.4.2	Die Abbildungsgleichung für eine brechende Fläche . . . . .	367
19.4.3	Spezialfälle der Abbildungsgleichung . . . . .	368
19.4.4	Die Abbildungsgleichung für eine Linse . . . . .	369
19.4.5	Klassifizierung von Linsen . . . . .	370
19.4.6	Konstruktion von Strahlengängen . . . . .	371
19.4.7	Abbildungsfehler . . . . .	374
19.4.8	Die Abbildungsgleichung für ein System aus zwei Linsen . . . . .	377
19.4.9	Kardinalelemente von dicken Linsen und Linsensystemen . . . . .	378
19.4.10	Die Schärfentiefe (Tiefenschärfe) . . . . .	379
19.4.11	Das Auge . . . . .	380
19.4.12	Optische Vergrößerung . . . . .	387
19.4.13	Vergrößerung bei Betrachtung mit dem Auge . . . . .	387
20.	Einige optische Instrumente . . . . .	390
20.1	Lupe . . . . .	390
20.2	Projektions-Apparate . . . . .	391
20.3	Lichtmikroskop . . . . .	391
20.4	Elektronenmikroskop . . . . .	397
20.5	Das Fernrohr . . . . .	400
20.6	Photometer . . . . .	401
20.7	Strahlungsmeßgeräte . . . . .	403
20.8	Die Kamera . . . . .	405
21.	Ionisierende Strahlung . . . . .	406
21.1	Atomkerne . . . . .	406
21.1.1	Elementarteilchen . . . . .	406
21.1.2	Aufbau der Atomkerne . . . . .	407
21.2	Radioaktivität . . . . .	409
21.2.1	Kernumwandlungen . . . . .	409
21.2.2	Natürliche Radionuklide . . . . .	412
21.2.3	Zerfallsgesetz . . . . .	414
21.2.4	Radioaktives Gleichgewicht . . . . .	415
21.2.5	Wechselwirkung energiereicher geladener Teilchen mit Materie . . . . .	416
21.2.6	Wechselwirkung von Neutronen mit Materie . . . . .	418
21.2.7	Strahlungsdetektoren . . . . .	419
21.2.8	Medizinische Anwendung von Radionukliden . . . . .	422
21.2.9	Kernspaltung und Kernfusion . . . . .	427
21.2.10	Künstliche Kernumwandlung . . . . .	430
21.3	Röntgenstrahlen . . . . .	431
21.3.1	Bremsstrahlung, charakteristische Strahlung . . . . .	431
21.3.2	Erzeugung ultraharter Röntgenstrahlung durch Teilchenbeschleuniger . . . . .	434
21.3.3	Wechselwirkung von Röntgen- und Gamma-Strahlung mit Materie . . . . .	437
21.3.4	Röntgenbildaufnahmen . . . . .	440
21.4	Dosimetrie . . . . .	442

22.	Regelung und Steuerung . . . . .	446
23.	Informationsübertragung . . . . .	449

## Anhang

A.1	Mathematische Beschreibung physikalischer Zusammenhänge . . . . .	451
A.2	Fehlerabschätzung . . . . .	452
2.1	Größenordnungsmäßige Angabe von Meßfehlern . . . . .	453
2.2	Ursachen von Fehlern . . . . .	454
2.2.1	Fehler durch die Meßapparatur . . . . .	454
2.2.2	Fehler durch das Meßobjekt . . . . .	454
2.3	Methoden der Fehlerabschätzung . . . . .	454
2.3.1	Meßfehler der Einzelgröße . . . . .	455
2.3.2	Fehlerfortpflanzung . . . . .	458
2.3.3	Fehler einer Funktion . . . . .	459
2.4	Signifikanz-Tests . . . . .	460
A.3	Rechnen mit Vektoren . . . . .	461
A.4	Das Exponentialgesetz . . . . .	464
A.5	Einige mathematische Beziehungen, die im Text verwendet wurden . . . . .	465
A.6	Einige Naturkonstanten . . . . .	470
A.7	Aufgaben . . . . .	471
A.8	Lösungen . . . . .	483
	Register . . . . .	501