

Einleitung	1
Mechanik	3
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	4
1.1.3 Längenmessung	7
1.1.4 Zeitmessung	9
1.1.5 Winkelmaße	10
1.2 Bewegungen im Raum	11
1.2.1 Geschwindigkeit	11
1.2.2 Beschleunigung	13
1.2.3 Kreisbewegung	14
1.2.4 Berechnung des Weges aus Geschwindigkeit und Beschleunigung	16
2. Masse und Kraft	18
2.1 Die träge Masse	18
2.2 Wirkung von Kräften	19
2.2.1 Newton'sche Axiome	19
2.2.2 Verschiedene Arten von Kräften	20
2.2.2.1 Gravitation	20
2.2.2.2 Trägheitskraft	22
2.2.2.3 Zentrifugal- und Zentripetalkraft	22
2.2.3 Statisches und dynamisches Gleichgewicht von Kräften	23
2.2.4 Schwerelosigkeit	23
2.2.5 Dynamometer (Kraft einer gespannten Feder)	24
2.2.6 Druck (Kraft auf eine Fläche)	24
2.2.7 Drehmoment	24
2.2.7.1 Trägheitsmoment	25
2.2.7.2 Kräftepaar	25
2.2.7.3 Hebel	26
2.2.7.4 Schwerpunkt	27
2.2.7.5 Die Hebelwaage	28
2.2.7.6 Stabiles, indifferentes und labiles Gleichgewicht; Standfestigkeit	28
2.2.8 Impuls und Drehimpuls	29
2.2.9 Reibung	30
3. Arbeit, Energie, Leistung	32
3.1 Ein Beispiel für den Begriff <i>Arbeit</i>	32
3.2 Energieformen	33
3.3 Leistung, Wirkung	36
4. Erhaltungssätze	37
4.1 Energieerhaltungssatz	37
4.2 Impulserhaltungssatz	38
4.3 Der Stoß als Beispiel für Energie- und Impulserhaltung	39
4.4 Drehimpulserhaltungssatz	40
5. Mechanische Eigenschaften von Stoffen	41
5.1 Wechselwirkungen zwischen Atomen und Molekülen	42
5.1.1 Bindungsarten	42
5.1.2 Molekulares Bild der Aggregatzustände	44
5.2 Makroskopische mechanische Eigenschaften von Festkörpern	47
5.2.1 Homogene Körper	47
5.2.2 Verformung von festen Körpern unter dem Einfluss von Kräften	48
5.3 Makroskopische mechanische Eigenschaften von Flüssigkeiten	51
5.3.1 Grenzflächen	51
5.3.2 Hydrostatik	54
5.3.2.1 Kapillarität	54
5.3.2.2 Druck in Flüssigkeiten	56
5.3.3 Hydrodynamik	61
5.3.3.1 Die Kontinuitätsgleichung	61

5.3.3.2	Zähe Flüssigkeiten	63	5.3.3.2.4	Strömungsgesetze und Blutkreislauf	69
5.3.3.2.1	Viskosität	63	5.4	Nanotechnologie	71
5.3.3.2.2	Laminare Strömung	65			
5.3.3.2.3	Turbulente Strömung	68			

Mechanische Schwingungen und Wellen

75

6.	Schwingungen	75	7.	Wellen Teil I: Mechanische und Akustische Wellen	89
6.1	Pendel als mechanisches schwingungsfähiges System	76	7.1	Ausbreitung von Schwingungen in Wellenfeldern	89
6.2	Differentialgleichung der ungedämpften Schwingung	77	7.2	Beschreibung von Wellenfeldern	91
6.3	Gedämpfte Schwingungen	79	7.3	Akustik	93
6.4	Erzwungene Schwingungen	81	7.4	Der Doppler-Effekt	99
6.5	Anharmonische Schwingungen	83	7.5	Gedämpfte Wellen	101
6.5.1	Überlagerung von harmonischen Schwingungen	83	7.6	Anharmonische Wellen: Schallwellen als Beispiel	102
6.5.2	Zerlegung anharmonischer Schwingungen in harmonische Teilschwingungen	84	7.7	Überlagerung von Wellen, Interferenz	106
6.5.3	Schwebung	85	7.8	Das Huygens'sche Prinzip	107
6.6	Gekoppelte Pendel	85	7.9	Wellen an der Grenzfläche zwischen verschiedenen Medien	109
6.6.1	Zwei gekoppelte Pendel	85	7.10	Stehende Wellen	110
6.6.2	Übergang von der Pendelkette zu Eigenschwingungen ausgedehnter Körper	87	7.11	Schallempfindungen: Akustik der Musik	113
			7.12	Stimme und Gehör beim Menschen	115
			7.13	Ultraschall	117

Wärmelehre

123

8.	Wärme und Temperatur	123	9.2	Zustandsänderungen	129
8.1	Einleitung	123	9.3	Adiabatische Zustandsgleichungen	130
8.2	Wärmeenergie/Wärmemenge	123	9.4	Zustandsgleichung von Gasgemischen	130
8.3	Wärmekapazität	124	10.	Kinetische Gastheorie	131
8.4	Temperaturskalen	125	10.1	Gasdruck	121
8.5	Temperatur-Messgeräte	126	10.2	Kinetische Energie und Temperatur	132
8.5.1	Ausdehnungsthermometer	126	10.3	Freiheitsgrade und Gleichverteilungssatz	132
8.5.2	Thermoelement	127	10.4	Geschwindigkeitsverteilung	133
8.5.3	Widerstandsthermometer	128	10.5	Volumenarbeit	135
8.5.4	Digitalthermometer	128	10.6	Wärmekapazität von Gasen	135
9.	Ideale Gase	129			
9.1	Zustandsgrößen, Zustandsgleichung	129			

11. Reale Gase, Van der Waals'sche Zustandsgleichung	136	13.3 Stoffgemische	146
12. Hauptsätze der Wärmelehre	138	13.3.1 Gehaltsangaben von Lösungen	146
12.1 Innere Energie	138	13.3.2 Echte Lösung, kolloidales System, grobe Dispersion	147
12.2 Der 1. Hauptsatz der Wärmelehre	139	13.3.3 Henry-Dalton'sches Gesetz	148
12.3 Reversible und irreversible Prozesse	139	13.3.4 Hydratation, Solvation	148
12.4 Entropie	141	13.3.5 Diffusion	148
12.5 Der 2. Hauptsatz der Wärmelehre	142	13.3.6 Osmose	149
12.6 Energiebilanz beim lebenden Organismus	143	13.3.7 Phasenübergänge	151
13. Thermodynamische Eigenschaften von Stoffen	144	13.3.7.1 Umwandlungswärmen	151
13.1 Thermische Ausdehnung	144	13.3.7.2 Lösungswärmen	152
13.2 Wärmeübergang, Wärmetransport	144	13.3.7.3 Reaktionswärmen	153
		13.3.7.4 Dampfdruck	153
		13.3.7.5 Dampfdruckerniedrigung, Siedepunkterhöhung und Gefrierpunktserniedrigung	155
		13.3.7.6 Koexistenz von Phasen, Phasengleichgewichte	156

Elektrizitätslehre

159

14. Elektrische und magnetische Größen	159	14.7 Elektrostatisches Feld	170
14.1 Vorbemerkung	159	14.7.1 Kraftwirkung auf eine Ladung im Feld	170
14.2 Ladung	159	14.7.2 Arbeit und Energie im elektrischen Feld	172
14.2.1 Ladungsmenge	159	14.7.3 Kondensator und Kapazität	173
14.2.2 Kraft zwischen elektrischen Ladungen	160	14.7.4 Kräfte auf einen Dipol im Feld	174
14.3 Spannung	161	14.7.5 Materie im Feld	175
14.3.1 Definition der Spannung	161	14.7.6 Energieinhalt des elektrischen Feldes	178
14.3.2 Spannungsquellen	162	14.7.7 Piezo- und Pyroelektrizität	178
14.4 Strom	163	14.8 Magnetfeld	178
14.5 Widerstand, Leitwert	165	14.8.1 Feldstärke und magnetische Induktion	179
14.5.1 Leiter, Nichtleiter	165	14.8.2 Kräfte auf einen magnetischen Dipol	182
14.5.2 Spezifischer Widerstand, spezifische Leitfähigkeit	165	14.8.3 Lorentz-Kraft	182
14.5.3 Strom-Spannungs-Kennlinie von Leitern	166	14.8.4 Induktionsvorgänge	184
14.6 Netzwerke	167	14.8.5 Selbstinduktion	185
14.6.1 Schaltbilder	167	14.8.6 Energieinhalt des magnetischen Feldes	186
14.6.2 Innenwiderstand einer Spannungsquelle	168	14.8.7 Lenz'sche Regel	186
14.6.3 Kirchhoff'sche Gesetze des elektrischen Stromes	169	14.8.8 Magnetfelder des menschlichen Körpers	187

X	Inhalt	
14.9	Zeitabhängige Spannungen und Ströme 188	15.1.1 Entstehung von Spannungen an Grenzflächen 204
14.9.1	Ein- und Ausschaltvorgänge 188	15.1.2 Summenpotentiale 207
14.9.1.1	Einschalt- und Ausschaltvorgang beim Kondensator 188	15.2 Mechanismen der Stromleitung 208
14.9.1.2	Ein- und Ausschaltvorgang bei der Spule 190	15.2.1 Stromleitung im Vakuum 209
14.9.2	Sinusförmige Wechselspannungen und Wechselströme 190	15.2.2 Stromleitung in Gasen 210
14.9.3	Dreiphasen-Spannung, Drehstrom 192	15.2.3 Stromleitung in Elektrolyten 212
14.9.4	Nicht-sinusförmige Wechselspannungen, Spannungsimpulse 193	15.2.4 Stromleitung in Festkörpern 217
14.9.5	Wechselstrom-Kreise 193	15.3 Halbleiterelektronik 221
14.9.5.1	Kapazitiver Widerstand 193	15.3.1 Halbleiterdiode 221
14.9.5.2	Induktiver Widerstand 194	15.3.2 Transistor 222
14.9.5.3	Wechselstromkreise mit Ohm'schem, kapazitivem und induktivem Widerstand 195	15.3.3 Feldeffekt-Transistor 223
14.9.6	Resonanz-Schwingkreise 196	15.3.4 Digitalelektronik 223
14.9.7	Elektromagnetische Wellen 198	16. Elektrische Geräte 226
14.9.7.1	Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen 201	16.1 Messgeräte 226
14.9.7.2	Ausbreitungsrichtung elektromagnetischer Wellen 201	16.1.1 Das Drehspul-Messwerk 227
14.9.7.3	Maxwell'sche Gleichungen 201	16.1.2 Das Digital-Messgerät 228
14.9.8	Leistung des elektrischen Stroms 202	16.1.3 Messung von Strom und Spannung 229
15. Mikroskopische elektrische Vorgänge 204		16.1.4 Elektronenstrahl-Oszilloskop (Oszillograph) und Bildschirm 232
15.1	Biologische Potentiale 204	16.1.5 Analoge Ladungsmessung 236
		16.1.6 Messung von Ohm'schen Widerständen 236
		16.1.7 Rauschen 237
		16.2 Technische elektrische Geräte 238
		16.2.1 Dynamo-Maschine 238
		16.2.2 Elektro-Motor 239
		16.2.3 Transformator 239
		16.2.4 Sender und Empfänger 241

Optik

245

17. Optische Strahlung 245	17.8 Absorption von Licht in Atomen und Molekülen 258
17.1 Einleitung 245	17.9 Emission und Absorption glühender Stoffe 259
17.2 Licht-Messgrößen 246	17.10 Temperaturstrahlung und Temperaturgleichgewicht 260
17.3 Strahlungsquellen 249	17.10.1 Thermische Emission und Absorption 261
17.4 Bohr'sches Atommodell 249	17.10.2 Strahlungsgesetze 263
17.5 Emission von Licht aus Atomen 252	17.11 Fluoreszenz, Phosphoreszenz, Lumineszenz 265
17.6 Kohärenz, spontane und induzierte Emission 255	
17.7 Das Emissionsspektrum der Atome 256	

17.12	LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) 268	19.3.2	Abbildung durch Spiegel 310
17.12.1	Funktionsweise und Eigenschaften 268	19.3.3	Brechung 311
17.12.2	Laser in der Medizin 272	19.3.4	Intensitäten von gebrochenem und reflektiertem Strahl 312
18.	Wellen Teil II: Wellenoptik _____ 275	19.3.5	Zerlegung von Licht in seine Spektralfarben mit Hilfe des Prismas 313
18.1	Interferenz von Wellen 275	19.3.6	Totalreflexion 313
18.1.1	Interferenzfähigkeit 275	19.3.7	Optoelektronik 315
18.1.2	Anwendung der Interferenz: Die Interferometrie 278	19.4	Abbildung mit Linsen 316
18.1.3	Holografie 280	19.4.1	Abbildung durch brechende Flächen 316
18.2	Beugung elektromagnetischer Wellen 281	19.4.2	Die Abbildungsgleichung für eine brechende Fläche 318
18.2.1	Beugung an Spalten 281	19.4.3	Spezialfälle der Abbildungsgleichung 319
18.2.2	Das Beugungsgitter 284	19.4.4	Die Abbildungsgleichung für eine Linse 319
18.2.3	Beugung an kreisförmigen Blenden (Beugungsunschärfe) 286	19.4.5	Klassifizierung von Linsen 320
18.2.4	Beugung von Röntgen-Strahlen 287	19.4.6	Die Abbildungsgleichung für ein System aus zwei Linsen 321
18.3	Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in Materie 288	19.4.7	Kardinalelemente von dicken Linsen und Linsensystemen 322
18.3.1	Der Brechungsindex und das Brechungsgesetz 288	19.4.8	Konstruktion von Strahlengängen 323
18.3.2	Das Absorptionsgesetz 290	19.4.9	Optische Vergrößerung 325
18.3.3	Der Zusammenhang zwischen Absorption und Dispersion 293	19.4.10	Die Schärfentiefe (Tiefenschärfe) 325
18.3.4	Dichroismus und Doppelbrechung 293	19.4.11	Abbildungsfehler 326
18.3.5	Spannungsdoppelbrechung 294	19.5	Das Auge 328
18.4	Spektralanalyse 295	19.5.1	Optische Abbildung im Auge 328
18.4.1	Lambert-Beer'sches Gesetz 296	19.5.2	Fehlsichtigkeit 330
18.4.2	Extinktion kolloidaler Systeme 297	19.5.3	Empfindlichkeit 331
18.5	Polarisation elektromagnetischer Wellen 298	19.5.4	Bildverarbeitung 332
18.5.1	Polarisationszustand 298	19.5.5	Farbsehen 334
18.5.2	Erzeugung und Untersuchung von linear polarisiertem Licht 300	19.5.6	Vergrößerung bei Betrachtung mit dem Auge 336
18.5.3	Optische Aktivität und Faraday-Effekt 303	20.	Einige abbildende und spektroskopische Instrumente _____ 337
18.6	Materiewellen 303	20.1	Lupe 337
19.	Geometrische Optik _____ 306	20.2	Projektions-Apparate 337
19.1	Lichtausbreitung 307	20.3	Lichtmikroskop 338
19.2	Optische Symbole, Strahlengänge und Bilder 308	20.4	Elektronenmikroskop 345
19.3	Reflexion und Brechung in der Geometrischen Optik 309	20.5	Raster-Sonden-Mikroskopie 349
19.3.1	Reflexion 309	20.6	Fernrohr 350
		20.6.1	Adaptive Optik 351
		20.7	Photometer 352
		20.8	Strahlungsmessgeräte 355
		20.9	Die Kamera 357

Atomkerne, Ionisierende Strahlung

347

21.1	Atomkerne	359	21.2.9	Kernspaltung und Kernfusion	381
21.1.1	Elementarteilchen	359	21.2.10	Künstliche Kernumwandlung, Aktivierung	383
21.1.2	Aufbau der Atomkerne	360	21.3	Röntgen-Strahlen	384
21.1.3	Kernmagnetische Resonanz	362	21.3.1	Bremsstrahlung, charakteristische Strahlung	384
21.2	Radioaktivität	364	21.3.2	Erzeugung ultraharter Röntgen-Strahlung durch Teilchenbeschleuniger	386
21.2.1	Kernumwandlungen	364	21.3.3	Wechselwirkung von Röntgen- und Gammastrahlung mit Materie	387
21.2.2	Natürliche Radionuklide	367	21.3.4	Röntgenbildaufnahmen	390
21.2.3	Zerfallsgesetz	369	21.4	Dosimetrie	392
21.2.4	Radioaktives Gleichgewicht	370	21.5	Bemerkungen zum Strahlenschutz	394
21.2.5	Wechselwirkung energiereicher geladener Teilchen mit Materie	371			
21.2.6	Wechselwirkung von Neutronen mit Materie	373			
21.2.7	Strahlungsdetektoren	373			
21.2.8	Medizinische Anwendung von Radionukliden; Bestrahlungstechniken	377			

Regelung, Steuerung, Informationsübertragung

397

22.	Regelung und Steuerung	397	23.	Computergestützte Informationsübertragung in der Medizin	399
-----	------------------------	-----	-----	--	-----

Aufgaben und Lösungen

405

24.1	Aufgaben	405	24.2	Lösungen	419
------	----------	-----	------	----------	-----

Anhang

441

A.1	Mathematische Beschreibung physikalischer Zusammenhänge	441	2.3.1	Messfehler der Einzelgröße	446
A.2	Fehlerabschätzung	442	2.3.2	Fehlerfortpflanzung	447
2.1	Größenordnungsmäßige Angabe von Messfehlern	443	2.3.3	Fehler einer Funktion	448
2.2	Ursachen von Fehlern	444	2.4	Signifikanz-Tests	449
2.2.1	Fehler durch die Messapparatur	444	A.3	Rechnen mit Vektoren	450
2.2.2	Fehler durch das Messobjekt	444	A.4	Das Exponentialgesetz	452
2.3	Methoden der Fehlerabschätzung	446	A.5	Weitere mathematische Beziehungen	454
			A.6	Einige Naturkonstanten	457
			A.7	Angelsächsisches Einheitensystem	458

Register

461