

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Überblick	1
1.1	Die Bedeutung des Experimentes	2
1.2	Der Modellbegriff in der Physik	3
1.3	Historischer Rückblick	5
1.3.1	Die antike Naturphilosophie	5
1.3.2	Die Entwicklung der klassischen Physik	6
1.3.3	Die moderne Physik	9
1.4	Unser heutiges physikalisches Weltbild	10
1.5	Beziehungen zwischen Physik und Nachbarwissenschaften	13
1.5.1	Biophysik und medizinische Physik	13
1.5.2	Astrophysik	13
1.5.3	Geophysik und Meteorologie	14
1.5.4	Physik und Technik	14
1.5.5	Physik und Philosophie	15
1.6	Die Grundgrößen in der Physik, ihre Normale und Messverfahren	15
1.6.1	Längeneinheiten	16
1.6.2	Messverfahren für Längen	17
1.6.3	Zeiteinheiten	19
1.6.4	Zeitmessungen	22
1.6.5	Masseneinheiten und ihre Messung	22
1.6.6	Stoffmengeneinheit	23
1.6.7	Temperatureinheit	23
1.6.8	Einheit der elektrischen Stromstärke	24
1.6.9	Einheit der Lichtstärke	24
1.6.10	Winkeleinheiten	24
1.7	Maßsysteme	25
1.8	Messgenauigkeit und Messfehler	26
1.8.1	Systematische Fehler	26
1.8.2	Statistische Fehler. Messwertverteilung und Mittelwert	26
1.8.3	Streuungsmaße	28
1.8.4	Fehlerverteilungsgesetz	29
1.8.5	Fehlerfortpflanzung	30
1.8.6	Ausgleichsrechnung	32
	Zusammenfassung	34
	Aufgaben	34
	Literatur	35
2	Mechanik eines Massenpunktes	37
2.1	Das Modell des Massenpunktes. Bahnkurve	38
2.2	Geschwindigkeit und Beschleunigung	39

2.3	Gleichförmig beschleunigte Bewegung	41
2.3.1	Der freie Fall	41
2.3.2	Der schräge Wurf	41
2.4	Bewegungen mit nicht-konstanter Beschleunigung	42
2.4.1	Die gleichförmige Kreisbewegung	42
2.4.2	Die allgemeine krummlinige Bewegung	43
2.5	Kräfte	45
2.5.1	Kräfte als Vektoren. Addition von Kräften	45
2.5.2	Kraftfelder	46
2.5.3	Messung von Kräften. Diskussion des Kraftbegriffes	47
2.6	Die Grundgleichungen der Mechanik	48
2.6.1	Die Newtonschen Axiome	48
2.6.2	Träge und schwere Masse	50
2.6.3	Die Bewegungsgleichung eines Teilchens in einem beliebigen Kraftfeld	51
2.7	Der Energiesatz der Mechanik	54
2.7.1	Arbeit und Leistung	54
2.7.2	Wegunabhängige Arbeit. Konservative Kraftfelder	56
2.7.3	Potentielle Energie	57
2.7.4	Der Energiesatz der Mechanik	59
2.7.5	Zusammenhang zwischen Kraftfeld und Potential	59
2.8	Drehimpuls und Drehmoment	60
2.9	Gravitation und Planetenbewegungen	62
2.9.1	Die Keplerschen Gesetze	62
2.9.2	Newtons Gravitationsgesetz	64
2.9.3	Planetenbahnen	64
2.9.4	Das effektive Potential	66
2.9.5	Gravitationsfeld ausgedehnter Körper	67
2.9.6	Experimentelle Prüfung des Gravitationsgesetzes	69
2.9.7	Experimentelle Bestimmung der Erdbeschleunigung	72
	Zusammenfassung	74
	Aufgaben	75
	Literatur	77
3	Bewegte Bezugssysteme und spezielle Relativitätstheorie	79
3.1	Relativbewegung	80
3.2	Inertialsysteme und Galilei-Transformation	80
3.3	Beschleunigte Bezugssysteme, Trägheitskräfte	81
3.3.1	Geradlinig beschleunigte Bezugssysteme	81
3.3.2	Rotierende Bezugssysteme	83
3.3.3	Zentrifugal- und Corioliskräfte	85
3.3.4	Zusammenfassung	88
3.4	Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	88
3.5	Lorentz-Transformationen	90
3.6	Spezielle Relativitätstheorie	91
3.6.1	Das Problem der Gleichzeitigkeit	91
3.6.2	Minkowski-Diagramme	92
3.6.3	Skalenlängen	93
3.6.4	Lorentz-Kontraktion von Längen	94
3.6.5	Zeitdilatation	95

3.6.6	Zwillings-Paradoxon	97
3.6.7	Raumzeit-Ereignisse und Kausalität	99
	Zusammenfassung	100
	Aufgaben	101
	Literatur	102
4	Systeme von Massenpunkten. Stöße	103
4.1	Grundbegriffe	104
4.1.1	Massenschwerpunkt	104
4.1.2	Reduzierte Masse	105
4.1.3	Drehimpuls eines Teilchensystems	106
4.2	Stöße zwischen zwei Teilchen	108
4.2.1	Grundgleichungen	108
4.2.2	Elastische Stöße im Laborsystem	109
4.2.3	Elastische Stöße im Schwerpunktsystem	111
4.2.4	Inelastische Stöße	113
4.2.5	Newton-Diagramme	115
4.3	Was lernt man aus der Untersuchung von Stößen?	115
4.3.1	Streuung in einem kugelsymmetrischen Potential	116
4.3.2	Reaktive Stöße	118
4.4	Stöße bei relativistischen Energien	119
4.4.1	Relativistische Massenzunahme	119
4.4.2	Kraft und relativistischer Impuls	121
4.4.3	Die relativistische Energie	122
4.4.4	Inelastische Stöße bei relativistischen Energien	123
4.4.5	Relativistischer Energiesatz	123
4.5	Erhaltungssätze	124
4.5.1	Impulserhaltungssatz	124
4.5.2	Energieerhaltungssatz	125
4.5.3	Drehimpulserhaltung	125
4.5.4	Erhaltungssätze und Symmetrien	125
	Zusammenfassung	127
	Aufgaben	127
	Literatur	128
5	Dynamik starrer ausgedehnter Körper	129
5.1	Das Modell des starren Körpers	130
5.2	Massenschwerpunkt	130
5.3	Die Bewegung eines starren Körpers	131
5.4	Kräfte und Kräftepaare	132
5.5	Trägheitsmoment und Rotationsenergie	134
5.5.1	Steinerscher Satz	134
5.6	Bewegungsgleichung der Rotation eines starren Körpers	137
5.6.1	Rotation um eine Achse bei konstantem Drehmoment	138
5.6.2	Drehschwingungen um eine feste Achse	139
5.6.3	Vergleich von Translation und Rotation	140
5.7	Rotation um freie Achsen; Kreiselbewegungen	140
5.7.1	Trägheitstensor und Trägheitsellipsoid	140
5.7.2	Hauptträgheitsmomente	142

5.7.3	Freie Achsen	144
5.7.4	Die Eulerschen Gleichungen	145
5.7.5	Der kräftefreie symmetrische Kreisel	145
5.7.6	Präzession des symmetrischen Kreisels	148
5.7.7	Überlagerung von Nutation und Präzession	149
5.8	Die Erde als symmetrischer Kreisel	150
	Zusammenfassung	152
	Aufgaben	153
	Literatur	153
6	Reale feste und flüssige Körper	155
6.1	Atomares Modell der Aggregatzustände	156
6.2	Deformierbare feste Körper	157
6.2.1	Hookesches Gesetz	158
6.2.2	Querkontraktion	159
6.2.3	Scherung und Torsionsmodul	160
6.2.4	Biegung eines Balkens	161
6.2.5	Elastische Hysterese, Deformationsarbeit	163
6.2.6	Die Härte eines Festkörpers	164
6.3	Ruhende Flüssigkeiten, Hydrostatik	164
6.3.1	Freie Verschiebbarkeit und Oberflächen von Flüssigkeiten	165
6.3.2	Statischer Druck in einer Flüssigkeit	165
6.3.3	Auftrieb und Schwimmen	168
6.4	Phänomene an Flüssigkeitsgrenzflächen	169
6.4.1	Oberflächenspannung	169
6.4.2	Grenzflächen und Haftspannung	171
6.4.3	Kapillarität	174
6.4.4	Zusammenfassung	175
6.5	Reibung zwischen festen Körpern	175
6.5.1	Haftreibung	175
6.5.2	Gleitreibung	176
6.5.3	Rollreibung	176
6.5.4	Bedeutung der Reibung in der Technik	178
6.6	Die Erde als deformierbarer Körper	178
6.6.1	Polabplattung der rotierenden Erde	178
6.6.2	Gezeitenverformung	179
6.6.3	Wirkungen der Gezeiten	182
6.6.4	Messung der Erdverformung	183
	Zusammenfassung	184
	Aufgaben	185
	Literatur	186
7	Gase	187
7.1	Makroskopische Betrachtung	188
7.2	Luftdruck und barometrische Höhenformel	189
7.3	Kinetische Gastheorie	192
7.3.1	Das Modell des idealen Gases	192
7.3.2	Grundgleichungen der kinetischen Gastheorie	192
7.3.3	Mittlere kinetische Energie und absolute Temperatur	193
7.3.4	Verteilungsfunktion	194

7.3.5	Maxwell-Boltzmannsche Geschwindigkeitsverteilung	195
7.3.6	Stoßquerschnitt und mittlere freie Weglänge	199
7.4	Experimentelle Prüfung der kinetischen Gastheorie	200
7.4.1	Molekularstrahlen	200
7.5	Transportprozesse in Gasen	202
7.5.1	Diffusion	202
7.5.2	Brownsche Bewegung	205
7.5.3	Wärmeleitung in Gasen	206
7.5.4	Viskosität von Gasen	207
7.5.5	Zusammenfassung	208
7.6	Die Erdatmosphäre	208
	Zusammenfassung	211
	Aufgaben	212
	Literatur	213
8	Strömende Flüssigkeiten und Gase	215
8.1	Grundbegriffe und Strömungstypen	216
8.2	Euler-Gleichung für ideale Flüssigkeiten	218
8.3	Kontinuitätsgleichung	218
8.4	Bernoulli-Gleichung	220
8.5	Laminare Strömungen	223
8.5.1	Innere Reibung	223
8.5.2	Laminare Strömung zwischen zwei parallelen Wänden	225
8.5.3	Laminare Strömungen durch Rohre	226
8.5.4	Kugelfall-Viskosimeter, Stokessches Gesetz	226
8.6	Navier-Stokes-Gleichung	227
8.6.1	Wirbel und Zirkulation	228
8.6.2	Helmholtzsche Wirbelsätze	230
8.6.3	Die Entstehung von Wirbeln	230
8.6.4	Turbulente Strömungen; Strömungswiderstand	232
8.7	Aerodynamik	233
8.7.1	Der dynamische Auftrieb	233
8.7.2	Zusammenhang zwischen dynamischem Auftrieb und Strömungswiderstand	234
8.7.3	Kräfte beim Fliegen	235
8.8	Ähnlichkeitsgesetze; Reynolds'sche Zahl	236
8.9	Nutzung der Windenergie	237
	Zusammenfassung	243
	Aufgaben	244
	Literatur	245
9	Vakuum-Physik	247
9.1	Grundlagen und Grundbegriffe	248
9.1.1	Die verschiedenen Vakuumbereiche	248
9.1.2	Einfluss der Wandbelegung	249
9.1.3	Saugvermögen und Saugleistung von Pumpen	249
9.1.4	Strömungsleitwerte von Vakuumleitungen	250
9.1.5	Erreichbarer Enddruck	251

9.2	Vakuumerzeugung	252
9.2.1	Mechanische Pumpen	252
9.2.2	Diffusionspumpen	256
9.2.3	Kryo- und Sorptionspumpen	257
9.3	Messung kleiner Drücke	259
9.3.1	Flüssigkeitsdruckmessgeräte	259
9.3.2	Membranmanometer	260
9.3.3	Wärmeleitungsmanometer	260
9.3.4	Ionisations- und Penning-Vakuummeter	261
9.3.5	Reibungsvakuummeter	261
	Zusammenfassung	262
	Aufgaben	262
	Literatur	263
10	Wärmelehre	265
10.1	Temperatur und Wärmeenergie	266
10.1.1	Temperaturmessung, Thermometer und Temperaturskala	266
10.1.2	Thermische Ausdehnung fester und flüssiger Körper	268
10.1.3	Thermische Ausdehnung von Gasen, Gasthermometer	271
10.1.4	Absolute Temperaturskala	271
10.1.5	Wärmemenge und spezifische Wärme	272
10.1.6	Molvolumen und Avogadro-Konstante	274
10.1.7	Innere Energie und molare Wärmekapazität idealer Gase	274
10.1.8	Spezifische Wärme eines Gases bei konstantem Druck	275
10.1.9	Molekulare Deutung der spezifischen Wärme	275
10.1.10	Spezifische Wärmekapazität fester Körper	277
10.1.11	Schmelzwärme und Verdampfungswärme	278
10.2	Wärmetransport	279
10.2.1	Konvektion	279
10.2.2	Wärmeleitung	279
10.2.3	Das Wärmerohr (Heatpipe)	284
10.2.4	Methoden der Wärmeisolierung	284
10.2.5	Wärmestrahlung	286
10.2.6	Thermische Solarenergienutzung	291
10.3	Die Hauptsätze der Thermodynamik	293
10.3.1	Zustandsgrößen	293
10.3.2	Der erste Hauptsatz der Thermodynamik	294
10.3.3	Spezielle Prozesse als Beispiele für den ersten Hauptsatz	295
10.3.4	Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	297
10.3.5	Der Carnotsche Kreisprozess	297
10.3.6	Äquivalente Formulierungen des zweiten Hauptsatzes	300
10.3.7	Die Entropie	301
10.3.8	Reversible und irreversible Prozesse	304
10.3.9	Freie Energie und Enthalpie	305
10.3.10	Chemische Reaktionen	306
10.3.11	Thermodynamische Potentiale; Zusammenhang zwischen Zustandsgrößen	307
10.3.12	Gleichgewichts-Zustände	308
10.3.13	Der dritte Hauptsatz (Nernstsches Theorem)	309
10.3.14	Thermodynamische Maschinen	310
10.4	Thermodynamik realer Gase und Flüssigkeiten	314
10.4.1	Van-der-Waalssche Zustandsgleichung	315
10.4.2	Stoffe in verschiedenen Aggregatzuständen	316
10.4.3	Lösungen und Mischzustände	323

10.5	Vergleich der verschiedenen Zustandsänderungen	325
10.6	Energiequellen und Energie-Umwandlung	325
10.6.1	Wasserkraftwerke	327
10.6.2	Gezeitenkraftwerke	327
10.6.3	Wellenkraftwerk	329
10.6.4	Geothermie-Kraftwerke	329
10.6.5	Solar-thermische Kraftwerke	330
10.6.6	Photovoltaik Anlagen	331
10.6.7	Bio-Energie	331
10.6.8	Energiespeicher	331
	Zusammenfassung	332
	Aufgaben	333
	Literatur	334
11	Mechanische Schwingungen und Wellen	335
11.1	Der freie ungedämpfte Oszillator	336
11.2	Darstellung von Schwingungen	337
11.3	Überlagerung von Schwingungen	338
11.3.1	Eindimensionale Überlagerungen	338
11.3.2	Zweidimensionale Überlagerung, Lissajous-Figuren	341
11.4	Der freie gedämpfte Oszillator	342
11.4.1	$\gamma < \omega_0$, d. h. schwache Dämpfung	343
11.4.2	$\gamma > \omega_0$, d. h. starke Dämpfung	344
11.4.3	$\gamma = \omega_0$	344
11.5	Erzwungene Schwingungen	345
11.5.1	Stationärer Zustand	345
11.5.2	Einschwingvorgang	347
11.6	Energiebilanz bei der Schwingung eines Massenpunktes	348
11.7	Parametrischer Oszillator	349
11.8	Gekoppelte Oszillatoren	350
11.8.1	Gekoppelte Federpendel	351
11.8.2	Erzwungene Schwingungen zweier gekoppelter Pendel	352
11.8.3	Normalschwingungen	353
11.9	Mechanische Wellen	354
11.9.1	Verschiedene Darstellungen harmonischer ebener Wellen	355
11.9.2	Zusammenfassung	356
11.9.3	Allgemeine Darstellung beliebiger Wellen. Wellengleichung	356
11.9.4	Verschiedene Wellentypen	357
11.9.5	Ausbreitung von Wellen in verschiedenen Medien	359
11.9.6	Energiedichte und Energietransport in einer Welle	364
11.9.7	Dispersion, Phasen- und Gruppengeschwindigkeit	365
11.10	Überlagerung von Wellen	367
11.10.1	Kohärenz und Interferenz	368
11.10.2	Überlagerung zweier harmonischer Wellen	368
11.11	Beugung, Reflexion und Brechung von Wellen	370
11.11.1	Huygenssches Prinzip	370
11.11.2	Beugung an Begrenzungen	371
11.11.3	Zusammenfassung	372
11.11.4	Reflexion und Brechung von Wellen	373

11.12	Stehende Wellen	374
11.12.1	Eindimensionale stehende Wellen	374
11.12.2	Experimentelle Demonstration stehender Wellen	375
11.12.3	Zweidimensionale Eigenschwingungen von Membranen	376
11.13	Wellen bei bewegten Quellen	378
11.13.1	Doppler-Effekt	378
11.13.2	Wellenfronten bei bewegten Quellen	379
11.13.3	Stoßwellen	380
11.14	Akustik	381
11.14.1	Definitionen	381
11.14.2	Druckamplitude und Energiedichte von Schallwellen	382
11.14.3	Erzeugung von Schallwellen	383
11.14.4	Schalldetektoren	383
11.14.5	Ultraschall	384
11.14.6	Anwendungen des Ultraschalls	384
11.14.7	Verfahren der Ultraschalldiagnostik	385
11.15	Physik der Musikinstrumente	386
11.15.1	Einteilung der Musikinstrumente	387
11.15.2	Akkorde, Tonleitern und Stimmungen	387
11.15.3	Physik der Geige	388
11.15.4	Physik beim Klavierspiel	390
	Zusammenfassung	391
	Aufgaben	392
	Literatur	394
12	Nichtlineare Dynamik und Chaos	395
12.1	Stabilität dynamischer Systeme	397
12.2	Logistisches Wachstumsgesetz und Feigenbaum-Diagramm	401
12.3	Parametrischer Oszillator	403
12.4	Bevölkerungsexplosion	404
12.5	Systeme mit verzögerter Rückkopplung	405
12.6	Selbstähnlichkeit	406
12.7	Fraktale	406
12.8	Mandelbrot-Mengen	408
12.9	Folgerungen für unser Weltverständnis	412
	Zusammenfassung	412
	Aufgaben	413
	Literatur	414
13	Anhang	415
13.1	Vektorrechnung	416
13.1.1	Definition des Vektors	416
13.1.2	Darstellung von Vektoren	416
13.1.3	Polare und axiale Vektoren	417
13.1.4	Addition von Vektoren	417
13.1.5	Multiplikation von Vektoren	418
13.1.6	Differentiation von Vektoren	419

13.2	Koordinatensysteme	421
13.2.1	Kartesische Koordinaten	421
13.2.2	Zylinderkoordinaten	422
13.2.3	Sphärische Koordinaten (Kugelkoordinaten)	423
13.3	Komplexe Zahlen	424
13.3.1	Rechenregeln für komplexe Zahlen	424
13.3.2	Polardarstellung	425
13.4	Fourieranalyse	425
14	Lösungen der Übungsaufgaben	427
	Sachverzeichnis	459