

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Überblick	1
1.1	Die Bedeutung des Experiments	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	14
1.5.2	Astrophysik	14
1.5.3	Geophysik und Meteorologie	14
1.5.4	Physik und Technik	15
1.5.5	Physik und Philosophie	15
1.6	Die Grundgrößen in der Physik, ihre Normale und Messverfahren	16
1.6.1	Längeneinheiten	17
1.6.2	Messverfahren für Längen	18
1.6.3	Zeiteinheiten	20
1.6.4	Zeitmessungen	22
1.6.5	Masseneinheiten und ihre Messung	23
1.6.6	Stoffmengeneinheit	23
1.6.7	Temperatureinheit	24
1.6.8	Einheit der elektrischen Stromstärke	24
1.6.9	Einheit der Lichtstärke	24
1.6.10	Winkeleinheiten	25
1.7	Maßsysteme	26
1.8	Messgenauigkeit und Messfehler	26
1.8.1	Systematische Fehler	26
1.8.2	Statistische Fehler. Messwertverteilung und Mittelwert	27
1.8.3	Streuungsmaße	28
1.8.4	Fehlerverteilungsgesetz	29
1.8.5	Fehlerfortpflanzung	31
1.8.6	Ausgleichsrechnung	32
	Zusammenfassung	34
	Übungsaufgaben	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	48
2.6	Die Grundgleichungen der Mechanik	49
2.6.1	Die Newtonschen Axiome	49
2.6.2	Träge und schwere Masse	51
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	Newton's Gravitationsgesetz	64
2.9.3	Planetenbahnen	64
2.9.4	Das effektive Potential	67
2.9.5	Gravitationsfeld ausgedehnter Körper	67
2.9.6	Experimentelle Prüfung des Gravitationsgesetzes	70
2.9.7	Experimentelle Bestimmung der Erdbeschleunigung	71
	Zusammenfassung	73
	Übungsaufgaben	74
3	Bewegte Bezugssysteme und spezielle Relativitätstheorie	77
3.1	Relativbewegung	78
3.2	Inertialsysteme und Galilei-Transformation	78
3.3	Beschleunigte Bezugssysteme, Trägheitskräfte	79
3.3.1	Geradlinig beschleunigte Bezugssysteme	79
3.3.2	Rotierende Bezugssysteme	81
3.3.3	Zentrifugal- und Corioliskräfte	83
3.3.4	Zusammenfassung	86
3.4	Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	86
3.5	Lorentz-Transformationen	87
3.6	Spezielle Relativitätstheorie	89
3.6.1	Das Problem der Gleichzeitigkeit	89
3.6.2	Minkowski-Diagramme	90
3.6.3	Skalenlängen	91
3.6.4	Lorentz-Kontraktion von Längen	92
3.6.5	Zeitdilatation	93
3.6.6	Zwillingss-Paradoxon	95
3.6.7	Raumzeit-Ereignisse und Kausalität	97
	Zusammenfassung	98
	Übungsaufgaben	99
4	Systeme von Massenpunkten. Stöße	101
4.1	Grundbegriffe	102
4.1.1	Massenschwerpunkt	102
4.1.2	Reduzierte Masse	103
4.1.3	Drehimpuls eines Teilchensystems	104
4.2	Stöße zwischen zwei Teilchen	106
4.2.1	Grundgleichungen	106
4.2.2	Elastische Stöße im Laborsystem	107
4.2.3	Elastische Stöße im Schwerpunktsystem	109

4.2.4	Inelastische Stöße	111
4.2.5	Newton-Diagramme	113
4.3	Was lernt man aus der Untersuchung von Stößen?	114
4.3.1	Streuung in einem kugelsymmetrischen Potential	114
4.3.2	Reaktive Stöße	117
4.4	Stöße bei relativistischen Energien	118
4.4.1	Relativistische Massenzunahme	118
4.4.2	Kraft und relativistischer Impuls	119
4.4.3	Die relativistische Energie	120
4.4.4	Inelastische Stöße bei relativistischen Energien	121
4.4.5	Relativistischer Energiesatz	122
4.5	Erhaltungssätze	123
4.5.1	Impulserhaltungssatz	123
4.5.2	Energieerhaltungssatz	123
4.5.3	Drehimpulserhaltung	123
4.5.4	Erhaltungssätze und Symmetrien	123
	Zusammenfassung	125
	Übungsaufgaben	125
5	Dynamik starrer ausgedehnter Körper	127
5.1	Das Modell des starren Körpers	128
5.2	Massenschwerpunkt	128
5.3	Die Bewegung eines starren Körpers	129
5.4	Kräfte und Kräftelepaare	130
5.5	Trägheitsmoment und Rotationsenergie	132
5.5.1	Steinerscher Satz	132
5.6	Bewegungsgleichung der Rotation eines starren Körpers	135
5.6.1	Rotation um eine Achse bei konstantem Drehmoment	136
5.6.2	Drehschwingungen um eine feste Achse	137
5.6.3	Vergleich von Translation und Rotation	138
5.7	Rotation um freie Achsen; Kreiselbewegungen	138
5.7.1	Trägheitstensor und Trägheitsellipsoid	138
5.7.2	Hauptträgheitsmomente	140
5.7.3	Freie Achsen	142
5.7.4	Die Eulerschen Gleichungen	143
5.7.5	Der kräftefreie symmetrische Kreisel	143
5.7.6	Präzession des symmetrischen Kreisels	146
5.7.7	Überlagerung von Nutation und Präzession	147
5.8	Die Erde als symmetrischer Kreisel	148
	Zusammenfassung	150
	Übungsaufgaben	151
6	Reale feste und flüssige Körper	153
6.1	Atomares Modell der Aggregatzustände	154
6.2	Deformierbare feste Körper	156
6.2.1	Hooke'sches Gesetz	156
6.2.2	Querkontraktion	157
6.2.3	Scherung und Torsionsmodul	158
6.2.4	Biegung eines Balkens	159
6.2.5	Elastische Hysterese, Deformationsarbeit	161
6.2.6	Die Härte eines Festkörpers	162
6.3	Ruhende Flüssigkeiten, Hydrostatik	163
6.3.1	Freie Verschiebbarkeit und Oberflächen von Flüssigkeiten	163
6.3.2	Statischer Druck in einer Flüssigkeit	163
6.3.3	Auftrieb und Schwimmen	166

6.4	Phänomene an Flüssigkeitsgrenzflächen	167
6.4.1	Oberflächenspannung	167
6.4.2	Grenzflächen und Haftspannung	169
6.4.3	Kapillarität	171
6.4.4	Zusammenfassung	172
6.5	Reibung zwischen festen Körpern	172
6.5.1	Haftreibung	172
6.5.2	Gleitreibung	173
6.5.3	Rollreibung	174
6.5.4	Bedeutung der Reibung in der Technik	175
6.6	Die Erde als deformierbarer Körper	176
6.6.1	Polabplattung der rotierenden Erde	176
6.6.2	Gezeitenverformung	177
6.6.3	Wirkungen der Gezeiten	180
6.6.4	Messung der Erdverformung	180
	Zusammenfassung	182
	Übungsaufgaben	182
7	Gase	185
7.1	Makroskopische Betrachtung	186
7.2	Luftdruck und barometrische Höhenformel	187
7.3	Kinetische Gastheorie	189
7.3.1	Das Modell des idealen Gases	189
7.3.2	Grundgleichungen der kinetischen Gastheorie	189
7.3.3	Mittlere kinetische Energie und absolute Temperatur	190
7.3.4	Verteilungsfunktion	191
7.3.5	Maxwell-Boltzmannsche Geschwindigkeitsverteilung	192
7.3.6	Stoßquerschnitt und mittlere freie Weglänge	196
7.4	Experimentelle Prüfung der kinetischen Gastheorie	197
7.4.1	Molekularstrahlen	197
7.5	Transportprozesse in Gasen	199
7.5.1	Diffusion	200
7.5.2	Brownsche Bewegung	202
7.5.3	Wärmeleitung in Gasen	203
7.5.4	Viskosität von Gasen	204
7.5.5	Zusammenfassung	205
7.6	Die Erdatmosphäre	206
	Zusammenfassung	208
	Übungsaufgaben	209
8	Strömende Flüssigkeiten und Gase	211
8.1	Grundbegriffe und Strömungstypen	212
8.2	Euler-Gleichung für ideale Flüssigkeiten	214
8.3	Kontinuitätsgleichung	214
8.4	Bernoulli-Gleichung	216
8.5	Laminare Strömungen	219
8.5.1	Innere Reibung	219
8.5.2	Laminare Strömung zwischen zwei parallelen Wänden	221
8.5.3	Laminare Strömungen durch Rohre	222
8.5.4	Kugelfall-Viskosimeter, Stokessches Gesetz	223
8.6	Navier-Stokes-Gleichung	223
8.6.1	Wirbel und Zirkulation	224
8.6.2	Helmholtzsche Wirbelsätze	226
8.6.3	Die Entstehung von Wirbeln	226
8.6.4	Turbulente Strömungen; Strömungswiderstand	228

8.7	Aerodynamik	229
8.7.1	Der dynamische Auftrieb	229
8.7.2	Zusammenhang zwischen dynamischem Auftrieb und Strömungswiderstand	231
8.7.3	Kräfte beim Fliegen	232
8.8	Ähnlichkeitgesetze; Reynolds'sche Zahl	232
8.9	Nutzung der Windenergie	233
	Zusammenfassung	238
	Übungsaufgaben	239
9	Vakuum-Physik	241
9.1	Grundlagen und Grundbegriffe	242
9.1.1	Die verschiedenen Vakuumbereiche	242
9.1.2	Einfluss der Wandbelegung	243
9.1.3	Saugvermögen und Saugleistung von Pumpen	244
9.1.4	Strömungsleitwerte von Vakuumleitungen	244
9.1.5	Erreichbarer Enddruck	245
9.2	Vakuumerzeugung	246
9.2.1	Mechanische Pumpen	246
9.2.2	Diffusionspumpen	249
9.2.3	Kryo- und Sorptionspumpen	251
9.3	Messung kleiner Drücke	252
9.3.1	Flüssigkeitsdruckmessgeräte	253
9.3.2	Membranmanometer	253
9.3.3	Wärmeleitungsmanometer	254
9.3.4	Ionisations- und Penning-Vakuummeter	255
9.3.5	Reibungsvakuummeter	255
	Zusammenfassung	256
	Übungsaufgaben	256
10	Wärmelehre	259
10.1	Temperatur und Wärmeenergie	260
10.1.1	Temperaturmessung, Thermometer und Temperaturskala	260
10.1.2	Thermische Ausdehnung fester und flüssiger Körper	262
10.1.3	Thermische Ausdehnung von Gasen, Gasthermometer	265
10.1.4	Absolute Temperaturskala	266
10.1.5	Wärmemenge und spezifische Wärme	266
10.1.6	Molvolumen und Avogadro-Konstante	268
10.1.7	Innere Energie und molare Wärmekapazität idealer Gase	268
10.1.8	Spezifische Wärme eines Gases bei konstantem Druck	269
10.1.9	Molekulare Deutung der spezifischen Wärme	269
10.1.10	Spezifische Wärmekapazität fester Körper	271
10.1.11	Schmelzwärme und Verdampfungswärme	272
10.2	Wärmetransport	273
10.2.1	Konvektion	273
10.2.2	Wärmeleitung	274
10.2.3	Das Wärmerohr (Heatpipe)	278
10.2.4	Methoden der Wärmeisolierung	279
10.2.5	Wärmestrahlung	281
10.2.6	Thermische Solarenergienutzung	286
10.3	Die Hauptsätze der Thermodynamik	288
10.3.1	Zustandsgrößen	288
10.3.2	Der erste Hauptsatz der Thermodynamik	289
10.3.3	Spezielle Prozesse als Beispiele für den ersten Hauptsatz	290
10.3.4	Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	291
10.3.5	Der Carnotsche Kreisprozess	292
10.3.6	Äquivalente Formulierungen des zweiten Hauptsatzes	295

10.3.7	Die Entropie	296
10.3.8	Reversible und irreversible Prozesse	299
10.3.9	Freie Energie und Enthalpie	300
10.3.10	Chemische Reaktionen	301
10.3.11	Thermodynamische Potentiale; Zusammenhang zwischen Zustandsgrößen	302
10.3.12	Gleichgewichts-Zustände	302
10.3.13	Der dritte Hauptsatz (Nernstsches Theorem)	303
10.3.14	Thermodynamische Maschinen	305
10.4	Thermodynamik realer Gase und Flüssigkeiten	308
10.4.1	Van-der-Waalssche Zustandsgleichung	308
10.4.2	Stoffe in verschiedenen Aggregatzuständen	310
10.4.3	Lösungen und Mischzustände	316
10.5	Vergleich der verschiedenen Zustandsänderungen	318
10.6	Energiequellen und Energie-Umwandlung	318
10.6.1	Wasserkraftwerke	320
10.6.2	Gezeitenkraftwerke	320
10.6.3	Wellenkraftwerk	321
10.6.4	Geothermie-Kraftwerke	321
10.6.5	Solar-thermische Kraftwerke	322
10.6.6	Photovoltaik Anlagen	323
10.6.7	Bio-Energie	323
10.6.8	Energiespeicher	323
	Zusammenfassung	325
	Übungsaufgaben	326
11	Mechanische Schwingungen und Wellen	327
11.1	Der freie ungedämpfte Oszillator	328
11.2	Darstellung von Schwingungen	329
11.3	Überlagerung von Schwingungen	330
11.3.1	Eindimensionale Überlagerungen	330
11.3.2	Zweidimensionale Überlagerung, Lissajous-Figuren	333
11.4	Der freie gedämpfte Oszillator	335
11.4.1	$\gamma < \omega_0$, d. h. schwache Dämpfung	335
11.4.2	$\gamma > \omega_0$, d. h. starke Dämpfung	336
11.4.3	$\gamma = \omega_0$	336
11.5	Erzwungene Schwingungen	337
11.5.1	Stationärer Zustand	338
11.5.2	Einschwingvorgang	340
11.6	Energiebilanz bei der Schwingung eines Massenpunktes	340
11.7	Parametrischer Oszillator	341
11.8	Gekoppelte Oszillatoren	343
11.8.1	Gekoppelte Federpendel	343
11.8.2	Erzwungene Schwingungen zweier gekoppelter Pendel	344
11.8.3	Normalschwingungen	345
11.9	Mechanische Wellen	346
11.9.1	Verschiedene Darstellungen harmonischer ebener Wellen	347
11.9.2	Zusammenfassung	348
11.9.3	Allgemeine Darstellung beliebiger Wellen. Wellengleichung	348
11.9.4	Verschiedene Wellentypen	349
11.9.5	Ausbreitung von Wellen in verschiedenen Medien	352
11.9.6	Energiedichte und Energietransport in einer Welle	357
11.9.7	Dispersion, Phasen- und Gruppengeschwindigkeit	357
11.10	Überlagerung von Wellen	359
11.10.1	Kohärenz und Interferenz	359
11.10.2	Überlagerung zweier harmonischer Wellen	360

11.11	Beugung, Reflexion und Brechung von Wellen	362
11.11.1	Huygenssches Prinzip	362
11.11.2	Beugung an Begrenzungen	363
11.11.3	Zusammenfassung	364
11.11.4	Reflexion und Brechung von Wellen	364
11.12	Stehende Wellen	366
11.12.1	Eindimensionale stehende Wellen	366
11.12.2	Experimentelle Demonstration stehender Wellen	367
11.12.3	Zweidimensionale Eigenschwingungen von Membranen	368
11.13	Wellen bei bewegten Quellen	370
11.13.1	Doppler-Effekt	370
11.13.2	Wellenfronten bei bewegten Quellen	371
11.13.3	Stoßwellen	372
11.14	Akustik	373
11.14.1	Definitionen	373
11.14.2	Druckamplitude und Energiedichte von Schallwellen	374
11.14.3	Erzeugung von Schallwellen	375
11.14.4	Schalldetektoren	375
11.14.5	Ultraschall	376
11.14.6	Anwendungen des Ultraschalls	377
11.14.7	Verfahren der Ultraschalldiagnostik	377
11.15	Physik der Musikinstrumente	378
11.15.1	Einteilung der Musikinstrumente	379
11.15.2	Akkorde, Tonleitern und Stimmungen	379
11.15.3	Physik der Geige	381
11.15.4	Physik beim Klavierspiel	382
	Zusammenfassung	383
	Übungsaufgaben	385
12	Nichtlineare Dynamik und Chaos	387
12.1	Stabilität dynamischer Systeme	389
12.2	Logistisches Wachstumsgesetz und Feigenbaum-Diagramm	393
12.3	Parametrischer Oszillator	395
12.4	Bevölkerungsexplosion	396
12.5	Systeme mit verzögterer Rückkopplung	397
12.6	Selbstähnlichkeit	398
12.7	Fraktale	399
12.8	Mandelbrot-Mengen	400
12.9	Folgerungen für unser Weltverständnis	403
	Zusammenfassung	403
	Übungsaufgaben	404
13	Anhang	405
13.1	Vektorrechnung	406
13.1.1	Definition des Vektors	406
13.1.2	Darstellung von Vektoren	406
13.1.3	Polare und axiale Vektoren	407
13.1.4	Addition von Vektoren	407
13.1.5	Multiplikation von Vektoren	408
13.1.6	Differentiation von Vektoren	409
13.2	Koordinatensysteme	412
13.2.1	Kartesische Koordinaten	412
13.2.2	Zylinderkoordinaten	412
13.2.3	Sphärische Koordinaten (Kugelkoordinaten)	413

13.3	Komplexe Zahlen	414
13.3.1	Rechenregeln für komplexe Zahlen	415
13.3.2	Polardarstellung	415
13.4	Fourieranalyse	416
14	Lösungen der Übungsaufgaben	417
Farbtafel		449
Literaturverzeichnis		457
Sachverzeichnis		463