

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung und Überblick</b>	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
<b>2</b>	<b>Mechanik eines Massenpunktes</b>	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	<b>Bewegte Bezugssysteme und spezielle Relativitätstheorie</b> . . . . .	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	Zwillings-Paradoxon . . . . .	95
3.6.7	Raumzeit-Ereignisse und Kausalität . . . . .	97
	Zusammenfassung . . . . .	98
	Übungsaufgaben . . . . .	99
4	<b>Systeme von Massenpunkten. Stöße</b> . . . . .	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 Schwerpunktssystem . . . . .	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
<b>5</b>	<b>Dynamik starrer ausgedehnter Körper . . . . .</b>	<b>127</b>
5.1	Das Modell des starren Körpers . . . . .	128
5.2	Massenschwerpunkt . . . . .	128
5.3	Die Bewegung eines starren Körpers . . . . .	129
5.4	Kräfte und Kräfepaare . . . . .	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
<b>6</b>	<b>Reale feste und flüssige Körper . . . . .</b>	<b>153</b>
6.1	Atomares Modell der Aggregatzustände . . . . .	154
6.2	Deformierbare feste Körper . . . . .	156
6.2.1	Hookesches 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

<b>6.4</b>	<b>Phänomene an Flüssigkeitsgrenzflächen . . . . .</b>	<b>167</b>
6.4.1	Oberflächenspannung . . . . .	167
6.4.2	Grenzflächen und Haftspannung . . . . .	169
6.4.3	Kapillarität . . . . .	171
6.4.4	Zusammenfassung . . . . .	172
<b>6.5</b>	<b>Reibung zwischen festen Körpern . . . . .</b>	<b>172</b>
6.5.1	Haftriebung . . . . .	172
6.5.2	Gleitreibung . . . . .	173
6.5.3	Rollreibung . . . . .	174
6.5.4	Bedeutung der Reibung in der Technik . . . . .	175
<b>6.6</b>	<b>Die Erde als deformierbarer Körper . . . . .</b>	<b>176</b>
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
	<b>Zusammenfassung . . . . .</b>	<b>182</b>
	<b>Übungsaufgaben . . . . .</b>	<b>182</b>
<b>7</b>	<b>Gase . . . . .</b>	<b>185</b>
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
	<b>Zusammenfassung . . . . .</b>	<b>208</b>
	<b>Übungsaufgaben . . . . .</b>	<b>208</b>
<b>8</b>	<b>Strömende Flüssigkeiten und Gase . . . . .</b>	<b>211</b>
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	Ähnlichkeitsgesetze; Reynolds'sche Zahl . . . . .	232
8.9	Nutzung der Windenergie . . . . .	233
	Zusammenfassung . . . . .	237
	Übungsaufgaben . . . . .	238
<b>9</b>	<b>Vakuum-Physik . . . . .</b>	<b>239</b>
9.1	Grundlagen und Grundbegriffe . . . . .	240
9.1.1	Die verschiedenen Vakuumbereiche . . . . .	240
9.1.2	Einfluss der Wandbelegung . . . . .	241
9.1.3	Saugvermögen und Saugleistung von Pumpen . . . . .	242
9.1.4	Strömungsleitwerte von Vakuumleitungen . . . . .	242
9.1.5	Erreichbarer Enddruck . . . . .	243
9.2	Vakuumerzeugung . . . . .	244
9.2.1	Mechanische Pumpen . . . . .	244
9.2.2	Diffusionspumpen . . . . .	247
9.2.3	Kryo- und Sorptionspumpen . . . . .	249
9.3	Messung kleiner Drücke . . . . .	250
9.3.1	Flüssigkeitsdruckmessgeräte . . . . .	251
9.3.2	Membranmanometer . . . . .	251
9.3.3	Wärmeleitungsmanometer . . . . .	252
9.3.4	Ionisations- und Penning-Vakuummeter . . . . .	253
9.3.5	Reibungsvakuummeter . . . . .	253
	Zusammenfassung . . . . .	254
	Übungsaufgaben . . . . .	254
<b>10</b>	<b>Wärmelehre . . . . .</b>	<b>257</b>
10.1	Temperatur und Wärmeenergie . . . . .	258
10.1.1	Temperaturmessung, Thermometer und Temperaturskala . . . . .	258
10.1.2	Thermische Ausdehnung fester und flüssiger Körper . . . . .	260
10.1.3	Thermische Ausdehnung von Gasen, Gasthermometer . . . . .	263
10.1.4	Absolute Temperaturskala . . . . .	264
10.1.5	Wärmemenge und spezifische Wärme . . . . .	264
10.1.6	Molvolumen und Avogadro-Konstante . . . . .	266
10.1.7	Innere Energie und molare Wärmekapazität idealer Gase . . . . .	266
10.1.8	Spezifische Wärme eines Gases bei konstantem Druck . . . . .	267
10.1.9	Molekulare Deutung der spezifischen Wärme . . . . .	267
10.1.10	Spezifische Wärmekapazität fester Körper . . . . .	269
10.1.11	Schmelzwärme und Verdampfungswärme . . . . .	270
10.2	Wärmetransport . . . . .	271
10.2.1	Konvektion . . . . .	271
10.2.2	Wärmeleitung . . . . .	272
10.2.3	Das Wärmerohr (Heatpipe) . . . . .	276
10.2.4	Methoden der Wärmeisolierung . . . . .	277
10.2.5	Wärmestrahlung . . . . .	279
10.2.6	Thermische Solarenergienutzung . . . . .	284
10.3	Die Hauptsätze der Thermodynamik . . . . .	286
10.3.1	Zustandsgrößen . . . . .	286
10.3.2	Der erste Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .	287
10.3.3	Spezielle Prozesse als Beispiele für den ersten Hauptsatz . . . . .	288
10.3.4	Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .	289
10.3.5	Der Carnotsche Kreisprozess . . . . .	290
10.3.6	Äquivalente Formulierungen des zweiten Hauptsatzes . . . . .	293

10.3.7	Die Entropie . . . . .	294
10.3.8	Reversible und irreversible Prozesse . . . . .	297
10.3.9	Freie Energie und Enthalpie . . . . .	298
10.3.10	Chemische Reaktionen . . . . .	299
10.3.11	Thermodynamische Potentiale; Zusammenhang zwischen Zustandsgrößen . . . . .	300
10.3.12	Gleichgewichts-Zustände . . . . .	300
10.3.13	Der dritte Hauptsatz (Nernstsches Theorem) . . . . .	301
10.3.14	Thermodynamische Maschinen . . . . .	303
10.4	Thermodynamik realer Gase und Flüssigkeiten . . . . .	306
10.4.1	Van-der-Waalssche Zustandsgleichung . . . . .	306
10.4.2	Stoffe in verschiedenen Aggregatzuständen . . . . .	308
10.4.3	Lösungen und Mischzustände . . . . .	314
10.5	Vergleich der verschiedenen Zustandsänderungen . . . . .	316
10.6	Energiequellen und Energie-Umwandlung . . . . .	316
10.6.1	Wasserkraftwerke . . . . .	318
10.6.2	Gezeitenkraftwerke . . . . .	318
10.6.3	Wellenkraftwerk . . . . .	319
10.6.4	Geothermie-Kraftwerke . . . . .	319
10.6.5	Solar-thermische Kraftwerke . . . . .	320
10.6.6	Photovoltaik Anlagen . . . . .	321
10.6.7	Bio-Energie . . . . .	321
10.6.8	Energiespeicher . . . . .	321
	Zusammenfassung . . . . .	323
	Übungsaufgaben . . . . .	324
<b>11</b>	<b>Mechanische Schwingungen und Wellen . . . . .</b>	<b>325</b>
11.1	Der freie ungedämpfte Oszillatator . . . . .	326
11.2	Darstellung von Schwingungen . . . . .	327
11.3	Überlagerung von Schwingungen . . . . .	328
11.3.1	Eindimensionale Überlagerungen . . . . .	328
11.3.2	Zweidimensionale Überlagerung, Lissajous-Figuren . . . . .	331
11.4	Der freie gedämpfte Oszillatator . . . . .	333
11.4.1	$\gamma < \omega_0$ , d. h. schwache Dämpfung . . . . .	333
11.4.2	$\gamma > \omega_0$ , d. h. starke Dämpfung . . . . .	334
11.4.3	$\gamma = \omega_0$ (aperiodischer Grenzfall) . . . . .	334
11.5	Erzwungene Schwingungen . . . . .	335
11.5.1	Stationärer Zustand . . . . .	336
11.5.2	Einschwingvorgang . . . . .	338
11.6	Energiebilanz bei der Schwingung eines Massenpunktes . . . . .	338
11.7	Parametrischer Oszillatator . . . . .	339
11.8	Gekoppelte Oszillatoren . . . . .	341
11.8.1	Gekoppelte Federpendel . . . . .	341
11.8.2	Erzwungene Schwingungen zweier gekoppelter Pendel . . . . .	342
11.8.3	Normalschwingungen . . . . .	343
11.9	Mechanische Wellen . . . . .	344
11.9.1	Verschiedene Darstellungen harmonischer ebener Wellen . . . . .	345
11.9.2	Zusammenfassung . . . . .	346
11.9.3	Allgemeine Darstellung beliebiger Wellen. Wellengleichung . . . . .	346
11.9.4	Verschiedene Wellentypen . . . . .	347
11.9.5	Ausbreitung von Wellen in verschiedenen Medien . . . . .	350
11.9.6	Energiedichte und Energietransport in einer Welle . . . . .	355
11.9.7	Dispersion, Phasen- und Gruppengeschwindigkeit . . . . .	355
11.10	Überlagerung von Wellen . . . . .	357
11.10.1	Kohärenz und Interferenz . . . . .	357
11.10.2	Überlagerung zweier harmonischer Wellen . . . . .	358

11.11	Beugung, Reflexion und Brechung von Wellen . . . . .	360
11.11.1	Huygenssches Prinzip . . . . .	360
11.11.2	Beugung an Begrenzungen . . . . .	361
11.11.3	Zusammenfassung . . . . .	362
11.11.4	Reflexion und Brechung von Wellen . . . . .	362
11.12	Stehende Wellen . . . . .	364
11.12.1	Eindimensionale stehende Wellen . . . . .	364
11.12.2	Experimentelle Demonstration stehender Wellen . . . . .	365
11.12.3	Zweidimensionale Eigenschwingungen von Membranen . . . . .	366
11.13	Wellen bei bewegten Quellen . . . . .	368
11.13.1	Doppler-Effekt . . . . .	368
11.13.2	Wellenfronten bei bewegten Quellen . . . . .	369
11.13.3	Stoßwellen . . . . .	370
11.14	Akustik . . . . .	371
11.14.1	Definitionen . . . . .	371
11.14.2	Druckamplitude und Energiedichte von Schallwellen . . . . .	372
11.14.3	Erzeugung von Schallwellen . . . . .	373
11.14.4	Schalldetektoren . . . . .	373
11.14.5	Ultraschall . . . . .	374
11.14.6	Anwendungen des Ultraschalls . . . . .	375
11.14.7	Verfahren der Ultraschalldiagnostik . . . . .	375
11.15	Physik der Musikinstrumente . . . . .	376
11.15.1	Einteilung der Musikinstrumente . . . . .	377
11.15.2	Akkorde, Tonleitern und Stimmungen . . . . .	377
11.15.3	Physik der Geige . . . . .	379
11.15.4	Physik beim Klavierspiel . . . . .	380
	Zusammenfassung . . . . .	381
	Übungsaufgaben . . . . .	383
12	<b>Nichtlineare Dynamik und Chaos . . . . .</b>	385
12.1	Stabilität dynamischer Systeme . . . . .	387
12.2	Logistisches Wachstumsgesetz und Feigenbaum-Diagramm . . . . .	391
12.3	Parametrischer Oszillatator . . . . .	393
12.4	Bevölkerungsexplosion . . . . .	394
12.5	Systeme mit verzögterer Rückkopplung . . . . .	395
12.6	Selbstähnlichkeit . . . . .	396
12.7	Fraktale . . . . .	397
12.8	Mandelbrot-Mengen . . . . .	398
12.9	Folgerungen für unser Weltverständnis . . . . .	401
	Zusammenfassung . . . . .	401
	Übungsaufgaben . . . . .	402
13	<b>Anhang . . . . .</b>	403
13.1	Vektorrechnung . . . . .	404
13.1.1	Definition des Vektors . . . . .	404
13.1.2	Darstellung von Vektoren . . . . .	404
13.1.3	Polare und axiale Vektoren . . . . .	405
13.1.4	Addition von Vektoren . . . . .	405
13.1.5	Multiplikation von Vektoren . . . . .	406
13.1.6	Differentiation von Vektoren . . . . .	407
13.2	Koordinatensysteme . . . . .	410
13.2.1	Kartesische Koordinaten . . . . .	410
13.2.2	Zylinderkoordinaten . . . . .	410
13.2.3	Sphärische Koordinaten (Kugelkoordinaten) . . . . .	411

13.3	Komplexe Zahlen . . . . .	412
13.3.1	Rechenregeln für komplexe Zahlen . . . . .	413
13.3.2	Polardarstellung . . . . .	413
13.4	Fourieranalyse . . . . .	414
<b>14</b>	<b>Lösungen der Übungsaufgaben . . . . .</b>	<b>415</b>
	<b>Farbtafeln . . . . .</b>	<b>447</b>
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>455</b>
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>461</b>