

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung und Überblick</b>	<b>1</b>
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	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>	<b>37</b>
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	Newtons 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
<b>3</b>	<b>Bewegte Bezugssysteme und spezielle Relativitätstheorie</b>	<b>77</b>
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
<b>4</b>	<b>Systeme von Massenpunkten. Stöße</b>	<b>101</b>
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	<b>Dynamik starrer ausgedehnter Körper</b>	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 Kräftepaare	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	<b>Reale feste und flüssige Körper</b>	153
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

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	<b>Gase</b> . . . . .	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	<b>Strömende Flüssigkeiten und Gase</b> . . . . .	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	Ähnlichkeitsgesetze; Reynolds'sche Zahl . . . . .	232
8.9	Nutzung der Windenergie . . . . .	233
	Zusammenfassung . . . . .	238
	Übungsaufgaben . . . . .	239
<b>9</b>	<b>Vakuum-Physik . . . . .</b>	<b>241</b>
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
<b>10</b>	<b>Wärmelehre . . . . .</b>	<b>259</b>
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-Waalsche 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
<b>11</b>	<b>Mechanische Schwingungen und Wellen</b>	<b>327</b>
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	<b>Nichtlineare Dynamik und Chaos . . . . .</b>	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 verzögerter 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	<b>Anhang . . . . .</b>	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
	Farbtafeln . . . . .	449
	Literaturverzeichnis . . . . .	457
	Sachverzeichnis . . . . .	463