

# 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	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	Winkleinheiten	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
<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 . . . . .	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
<b>3</b>	<b>Bewegte Bezugssysteme und spezielle Relativitätstheorie . . . . .</b>	<b>79</b>
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
<b>4</b>	<b>Systeme von Massenpunkten. Stöße</b>	<b>103</b>
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
<b>5</b>	<b>Dynamik starrer ausgedehnter Körper</b>	<b>129</b>
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
<b>6</b>	<b>Reale feste und flüssige Körper</b>	<b>155</b>
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
<b>7</b>	<b>Gase</b>	<b>187</b>
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
<b>8</b>	<b>Strömende Flüssigkeiten und Gase . . . . .</b>	<b>215</b>
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
<b>9</b>	<b>Vakuum-Physik . . . . .</b>	<b>247</b>
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
<b>10</b>	<b>Wärmelehre . . . . .</b>	<b>265</b>
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
<b>11</b>	<b>Mechanische Schwingungen und Wellen</b>	<b>335</b>
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
<b>12</b>	<b>Nichtlineare Dynamik und Chaos . . . . .</b>	<b>395</b>
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
<b>13</b>	<b>Anhang . . . . .</b>	<b>415</b>
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