

# 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
<b>5</b>	<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
<b>6</b>	<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
<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
	Zusammenfassung	208
	Übungsaufgaben	208
<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 Oszillator	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 Oszillator	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 Oszillator	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	Huygensssches 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
<b>12</b>	<b>Nichtlineare Dynamik und Chaos . . . . .</b>	<b>385</b>
12.1	Stabilität dynamischer Systeme . . . . .	387
12.2	Logistisches Wachstumsgesetz und Feigenbaum-Diagramm . . . . .	391
12.3	Parametrischer Oszillator . . . . .	393
12.4	Bevölkerungsexplosion . . . . .	394
12.5	Systeme mit verzögerter 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
<b>13</b>	<b>Anhang . . . . .</b>	<b>403</b>
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>