
Wolfgang Demtröder

Experimentalphysik 1

Mechanik und Wärme

Vierte, neu bearbeitete und aktualisierte Auflage

Mit 595, meist zweifarbigen Abbildungen,
9 Farbtafeln, 40 Tabellen,
zahlreichen durchgerechneten Beispielen
und 167 Übungsaufgaben
mit ausführlichen Lösungen

 Springer

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung und Überblick

1.1	Die Bedeutung des Experimentes	1
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	7
1.3.3	Die moderne Physik	9
1.4	Unser heutiges physikalisches Weltbild	11
1.5	Beziehungen zwischen Physik und Nachbarwissenschaften	15
1.5.1	Biophysik und medizinische Physik	15
1.5.2	Astrophysik	16
1.5.3	Geophysik und Meteorologie	16
1.5.4	Physik und Technik	16
1.5.5	Physik und Philosophie	17
1.6	Die Grundgrößen in der Physik, ihre Normale und Messverfahren .	18
1.6.1	Längeneinheiten	19
1.6.2	Messverfahren für Längen	20
1.6.3	Zeiteinheiten	22
1.6.4	Zeitmessungen	25
1.6.5	Masseneinheiten und ihre Messung	26
1.6.6	Stoffmengeneinheit	27
1.6.7	Temperatureinheit	27
1.6.8	Einheit der elektrischen Stromstärke	27
1.6.9	Einheit der Lichtstärke	27
1.6.10	Winkleinheiten	28
1.7	Maßsysteme	29
1.8	Messgenauigkeit und Messfehler	29
1.8.1	Systematische Fehler	30
1.8.2	Statistische Fehler. Messwertverteilung und Mittelwert ...	30
1.8.3	Streuungsmaße	32
1.8.4	Fehlerverteilungsgesetz	32
1.8.5	Fehlerfortpflanzung	34
1.8.6	Ausgleichsrechnung	35
	Zusammenfassung	37
	Übungsaufgaben	38

2. Mechanik eines Massenpunktes

2.1	Das Modell des Massenpunktes. Bahnkurve	39
2.2	Geschwindigkeit und Beschleunigung	41
2.3	Gleichförmig beschleunigte Bewegung	42
2.3.1	Der freie Fall	43
2.3.2	Der schräge Wurf	43
2.4	Bewegungen mit nicht-konstanter Beschleunigung	44
2.4.1	Die gleichförmige Kreisbewegung	44
2.4.2	Die allgemeine krummlinige Bewegung	46
2.5	Kräfte	47
2.5.1	Kräfte als Vektoren. Addition von Kräften	48
2.5.2	Kraftfelder	49
2.5.3	Messung von Kräften. Diskussion des Kraftbegriffes	50
2.6	Die Grundgleichungen der Mechanik	51
2.6.1	Die Newtonschen Axiome	51
2.6.2	Träge und schwere Masse	53
2.6.3	Die Bewegungsgleichung eines Teilchens in einem beliebigen Kraftfeld	54
2.7	Der Energiesatz der Mechanik	57
2.7.1	Arbeit und Leistung	57
2.7.2	Wegunabhängige Arbeit. Konservative Kraftfelder	59
2.7.3	Potentielle Energie	61
2.7.4	Der Energiesatz der Mechanik	62
2.7.5	Zusammenhang zwischen Kraftfeld und Potential	63
2.8	Drehimpuls und Drehmoment	64
2.9	Gravitation und Planetenbewegungen	66
2.9.1	Die Keplerschen Gesetze	66
2.9.2	Newtons Gravitationsgesetz	67
2.9.3	Planetenbahnen	68
2.9.4	Das effektive Potential	71
2.9.5	Gravitationsfeld ausgedehnter Körper	71
2.9.6	Experimentelle Prüfung des Gravitationsgesetzes	74
2.9.7	Experimentelle Bestimmung der Erdbeschleunigung	76
	Zusammenfassung	78
	Übungsaufgaben	79

3. Bewegte Bezugssysteme und spezielle Relativitätstheorie

3.1	Relativbewegung	83
3.2	Inertialsysteme und Galilei-Transformation	83
3.3	Beschleunigte Bezugssysteme, Trägheitskräfte	85
3.3.1	Geradlinig beschleunigte Bezugssysteme	85
3.3.2	Rotierende Bezugssysteme	87
3.3.3	Zentrifugal- und Corioliskräfte	89
3.3.4	Zusammenfassung	91
3.4	Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	92
3.5	Lorentz-Transformationen	94
3.6	Spezielle Relativitätstheorie	95

3.6.1	Das Problem der Gleichzeitigkeit	96
3.6.2	Minkowski-Diagramme	97
3.6.3	Lorentz-Kontraktion von Längen	98
3.6.4	Zeitdilatation	100
3.6.5	Zwillings-Paradoxon	102
3.6.6	Raumzeit-Ereignisse und Kausalität	105
	Zusammenfassung	106
	Übungsaufgaben	106
4.	Systeme von Massenpunkten. Stöße	
4.1	Grundbegriffe	109
4.1.1	Massenschwerpunkt	109
4.1.2	Reduzierte Masse	110
4.1.3	Drehimpuls eines Teilchensystems	111
4.2	Stöße zwischen zwei Teilchen	113
4.2.1	Grundgleichungen	114
4.2.2	Elastische Stöße im Laborsystem	115
4.2.3	Elastische Stöße im Schwerpunktsystem	117
4.2.4	Inelastische Stöße	119
4.2.5	Newton-Diagramme	121
4.3	Was lernt man aus der Untersuchung von Stößen?	122
4.3.1	Streuung in einem kugelsymmetrischen Potential	122
4.3.2	Reaktive Stöße	125
4.4	Stöße bei relativistischen Energien	126
4.4.1	Relativistische Massenzunahme	127
4.4.2	Kraft und relativistischer Impuls	128
4.4.3	Die relativistische Energie	129
4.4.4	Inelastische Stöße bei relativistischen Energien	130
4.4.5	Relativistischer Energiesatz	131
4.5	Erhaltungssätze	132
4.5.1	Impulserhaltungssatz	132
4.5.2	Energieerhaltungssatz	132
4.5.3	Drehimpulserhaltung	133
4.5.4	Erhaltungssätze und Symmetrien	133
	Zusammenfassung	134
	Übungsaufgaben	135
5.	Dynamik starrer ausgedehnter Körper	
5.1	Das Modell des starren Körpers	137
5.2	Massenschwerpunkt	138
5.3	Die Bewegung eines starren Körpers	139
5.4	Kräfte und Kräftepaare	139
5.5	Trägheitsmoment und Rotationsenergie	141
5.5.1	Steinerscher Satz	142
5.6	Bewegungsgleichung der Rotation eines starren Körpers	145
5.6.1	Rotation um eine Achse bei konstantem Drehmoment	145
5.6.2	Drehschwingungen um eine feste Achse	146

5.6.3	Vergleich von Translation und Rotation	147
5.7	Rotation um freie Achsen; Kreiselbewegungen	147
5.7.1	Trägheitstensor und Trägheitsellipsoid	148
5.7.2	Hauptträgheitsmomente	149
5.7.3	Freie Achsen	152
5.7.4	Die Eulerschen Gleichungen	153
5.7.5	Der kräftefreie symmetrische Kreisel	154
5.7.6	Präzession des symmetrischen Kreisels	156
5.7.7	Überlagerung von Nutation und Präzession	157
5.8	Die Erde als symmetrischer Kreisel	159
	Zusammenfassung	162
	Übungsaufgaben	163

6. Reale feste und flüssige Körper

6.1	Atomares Modell der Aggregatzustände	165
6.2	Deformierbare feste Körper	167
6.2.1	Hookesches Gesetz	167
6.2.2	Querkontraktion	169
6.2.3	Scherung und Torsionsmodul	170
6.2.4	Biegung eines Balkens	171
6.2.5	Elastische Hysterese, Deformationsarbeit	174
6.2.6	Die Härte eines Festkörpers	175
6.3	Ruhende Flüssigkeiten, Hydrostatik	175
6.3.1	Freie Verschiebbarkeit und Oberflächen von Flüssigkeiten	175
6.3.2	Statischer Druck in einer Flüssigkeit	176
6.3.3	Auftrieb und Schwimmen	179
6.4	Phänomene an Flüssigkeitsgrenzflächen	180
6.4.1	Oberflächenspannung	180
6.4.2	Grenzflächen und Haftspannung	182
6.4.3	Kapillarität	185
6.4.4	Zusammenfassung	186
6.5	Reibung zwischen festen Körpern	186
6.5.1	Haftreibung	186
6.5.2	Gleitreibung	187
6.5.3	Rollreibung	188
6.5.4	Bedeutung der Reibung in der Technik	189
6.6	Die Erde als deformierbarer Körper	190
6.6.1	Polabplattung der rotierenden Erde	190
6.6.2	Gezeitenverformung	191
6.6.3	Wirkungen der Gezeiten	195
6.6.4	Messung der Erdverformung	195
	Zusammenfassung	197
	Übungsaufgaben	198

7. Gase

7.1	Makroskopische Betrachtung	199
7.2	Luftdruck und barometrische Höhenformel	200

7.3	Kinetische Gastheorie	202
7.3.1	Das Modell des idealen Gases	202
7.3.2	Grundgleichungen der kinetischen Gastheorie	203
7.3.3	Mittlere kinetische Energie und absolute Temperatur	204
7.3.4	Verteilungsfunktion	205
7.3.5	Maxwell-Boltzmannsche Geschwindigkeitsverteilung	206
7.3.6	Stoßquerschnitt und mittlere freie Weglänge	209
7.4	Experimentelle Prüfung der kinetischen Gastheorie	211
7.4.1	Molekularstrahlen	211
7.5	Transportprozesse in Gasen	213
7.5.1	Diffusion	214
7.5.2	Brownsche Bewegung	216
7.5.3	Wärmeleitung in Gasen	217
7.5.4	Viskosität von Gasen	219
7.5.5	Zusammenfassung	220
7.6	Die Erdatmosphäre	220
	Zusammenfassung	222
	Übungsaufgaben	223
8.	Strömende Flüssigkeiten und Gase	
8.1	Grundbegriffe und Strömungstypen	225
8.2	Euler-Gleichung für ideale Flüssigkeiten	227
8.3	Kontinuitätsgleichung	228
8.4	Bernoulli-Gleichung	229
8.5	Laminare Strömungen	233
8.5.1	Innere Reibung	233
8.5.2	Laminare Strömung zwischen zwei parallelen Wänden ...	236
8.5.3	Laminare Strömungen durch Rohre	236
8.5.4	Kugelfall-Viskosimeter, Stokessches Gesetz	237
8.6	Navier-Stokes-Gleichung	238
8.6.1	Wirbel und Zirkulation	239
8.6.2	Helmholtzsche Wirbelsätze	241
8.6.3	Die Entstehung von Wirbeln	242
8.6.4	Turbulente Strömungen; Strömungswiderstand	243
8.7	Aerodynamik	244
8.7.1	Der dynamische Auftrieb	245
8.7.2	Zusammenhang zwischen dynamischem Auftrieb und Strömungswiderstand	247
8.7.3	Kräfte beim Fliegen	248
8.8	Ähnlichkeitsgesetze; Reynolds'sche Zahl	248
8.9	Nutzung der Windenergie	250
	Zusammenfassung	253
	Übungsaufgaben	254
9.	Vakuum-Physik	
9.1	Grundlagen und Grundbegriffe	257
9.1.1	Die verschiedenen Vakuumbereiche	257

9.1.2	Einfluss der Wandbelegung	258
9.1.3	Saugvermögen und Saugleistung von Pumpen	259
9.1.4	Strömungsleitwerte von Vakuumleitungen	260
9.1.5	Erreichbarer Enddruck	261
9.2	Vakuumerzeugung	262
9.2.1	Mechanische Pumpen	262
9.2.2	Diffusionspumpen	266
9.2.3	Kryo- und Sorptionspumpen	268
9.3	Messung kleiner Drücke	270
9.3.1	Flüssigkeitsdruckmessgeräte	270
9.3.2	Membranmanometer	271
9.3.3	Wärmeleitungsmanometer	271
9.3.4	Ionisations- und Penning-Vakuummeter	272
9.3.5	Reibungsvakuummeter	273
	Zusammenfassung	274
	Übungsaufgaben	274

10. Wärmelehre

10.1	Temperatur und Wärmemenge	277
10.1.1	Temperaturmessung, Thermometer und Temperaturskala ..	278
10.1.2	Thermische Ausdehnung fester und flüssiger Körper	280
10.1.3	Thermische Ausdehnung von Gasen, Gasthermometer ...	283
10.1.4	Absolute Temperaturskala	284
10.1.5	Wärmemenge und spezifische Wärme	284
10.1.6	Molvolumen und Avogadro-Konstante	286
10.1.7	Innere Energie und spezifische Molwärme idealer Gase ..	287
10.1.8	Spezifische Wärme eines Gases bei konstantem Druck ...	287
10.1.9	Molekulare Deutung der spezifischen Wärme	288
10.1.10	Spezifische Wärme fester Körper	290
10.1.11	Schmelzwärme und Verdampfungswärme	291
10.2	Wärmetransport	292
10.2.1	Konvektion	292
10.2.2	Wärmeleitung	293
10.2.3	Das Wärmerohr (Heatpipe)	298
10.2.4	Methoden der Wärmeisolierung	299
10.2.5	Wärmestrahlung	301
10.2.6	Thermische Solarenergienutzung	307
10.3	Die Hauptsätze der Thermodynamik	309
10.3.1	Zustandsgrößen	309
10.3.2	Der erste Hauptsatz der Thermodynamik	311
10.3.3	Spezielle Prozesse als Beispiele für den ersten Hauptsatz ..	312
10.3.4	Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	313
10.3.5	Der Carnotsche Kreisprozess	314
10.3.6	Äquivalente Formulierungen des zweiten Hauptsatzes	317
10.3.7	Die Entropie	317
10.3.8	Reversible und irreversible Prozesse	321
10.3.9	Thermodynamische Potentiale	323

10.3.10	Chemische Reaktionen	324
10.3.11	Zusammenhang zwischen Zustandsgrößen und thermodynamischen Potentialen	325
10.3.12	Gleichgewichts-Zustände	325
10.3.13	Der dritte Hauptsatz (Nernstsches Theorem)	326
10.3.14	Thermodynamische Maschinen	328
10.4	Thermodynamik realer Gase und Flüssigkeiten	331
10.4.1	Van-der-Waalssche Zustandsgleichung	332
10.4.2	Stoffe in verschiedenen Aggregatzuständen	334
10.4.3	Lösungen und Mischzustände	341
	Zusammenfassung	343
	Übungsaufgaben	345

11. Mechanische Schwingungen und Wellen

11.1	Der freie ungedämpfte Oszillator	347
11.2	Darstellung von Schwingungen	348
11.3	Überlagerung von Schwingungen	349
11.3.1	Eindimensionale Überlagerungen	350
11.3.2	Zweidimensionale Überlagerung, Lissajous-Figuren	353
11.4	Der freie gedämpfte Oszillator	354
11.5	Erzwungene Schwingungen	357
11.6	Energiebilanz bei der Schwingung eines Massenpunktes	360
11.7	Parametrischer Oszillator	362
11.8	Gekoppelte Oszillatoren	363
11.8.1	Gekoppelte Federpendel	364
11.8.2	Erzwungene Schwingungen zweier gekoppelter Pendel	366
11.8.3	Normalschwingungen	367
11.9	Mechanische Wellen	368
11.9.1	Verschiedene Darstellungen harmonischer ebener Wellen	368
11.9.2	Zusammenfassung	370
11.9.3	Allgemeine Darstellung beliebiger Wellen. Wellengleichung	370
11.9.4	Verschiedene Wellentypen	371
11.9.5	Ausbreitung von Wellen in verschiedenen Medien	374
11.9.6	Energiedichte und Energietransport in einer Welle	379
11.9.7	Dispersion, Phasen- und Gruppengeschwindigkeit	380
11.10	Überlagerung von Wellen	382
11.10.1	Kohärenz und Interferenz	382
11.10.2	Überlagerung zweier harmonischer Wellen	383
11.11	Beugung, Reflexion und Brechung von Wellen	385
11.11.1	Huygenssches Prinzip	385
11.11.2	Beugung an Begrenzungen	387
11.11.3	Zusammenfassung	388
11.11.4	Reflexion und Brechung von Wellen	388
11.12	Stehende Wellen	390
11.12.1	Eindimensionale stehende Wellen	390
11.12.2	Experimentelle Demonstration stehender Wellen	391

11.12.3	Zweidimensionale Eigenschwingungen von Membranen . . .	393
11.13	Wellen bei bewegten Quellen	394
11.13.1	Doppler-Effekt	394
11.13.2	Wellenfronten bei bewegten Quellen	396
11.13.3	Stoßwellen	398
11.14	Akustik	398
11.14.1	Definitionen	399
11.14.2	Druckamplitude und Energiedichte von Schallwellen	399
11.14.3	Erzeugung von Schallwellen	401
11.14.4	Schalldetektoren	401
11.14.5	Ultraschall	402
11.15	Physik der Musikinstrumente	404
11.15.1	Einteilung der Musikinstrumente	405
11.15.2	Akkorde, Tonleitern und Stimmungen	405
11.15.3	Physik der Geige	407
11.15.4	Physik beim Klavierspiel	409
	Zusammenfassung	410
	Übungsaufgaben	412

12. Nichtlineare Dynamik und Chaos

12.1	Stabilität dynamischer Systeme	417
12.2	Logistisches Wachstumsgesetz und Feigenbaum-Diagramm	421
12.3	Parametrischer Oszillator	423
12.4	Bevölkerungsexplosion	424
12.5	Systeme mit verzögerter Rückkopplung	426
12.6	Selbstähnlichkeit	427
12.7	Fraktale	428
12.8	Mandelbrot-Mengen	429
12.9	Folgerungen für unser Weltverständnis	432
	Zusammenfassung	433
	Übungsaufgaben	434

Anhang

A.1	Vektorrechnung	435
1.1	Definition des Vektors	435
1.2	Darstellung von Vektoren	435
1.2.1	Kartesische Koordinaten	435
1.2.2	Sphärische oder Polarkoordinaten	436
1.2.3	Zylindrische Koordinaten	436
1.3	Polare und axiale Vektoren	436
1.4	Addition von Vektoren	437
1.5	Multiplikation von Vektoren	437
1.5.1	Multiplikation eines Vektors mit einem Skalar	437
1.5.2	Das Skalarprodukt	437
1.5.3	Das Vektorprodukt	438
1.5.4	Mehrfache Produkte	438
1.6	Differentiation von Vektoren	439

1.6.1	Vektorfelder	439
1.6.2	Differentiation eines Vektors nach einer skalaren Größe ..	439
1.6.3	Der Gradient einer skalaren Größe	440
1.6.4	Die Divergenz eines Vektorfeldes	440
1.6.5	Die Rotation eines Vektorfeldes	441
1.6.6	Mehrfach-Differentiationen	441
A.2	Koordinatensysteme	442
2.1	Kartesische Koordinaten	442
2.2	Zylinderkoordinaten	442
2.3	Sphärische Koordinaten (Kugelkoordinaten)	443
A.3	Komplexe Zahlen	444
3.1	Rechenregeln für komplexe Zahlen	445
3.2	Polardarstellung	446
A.4	Fourieranalyse	446
Farbtafeln	481
Literaturverzeichnis	489
Sachwortverzeichnis	495