

Horst Hansel / Werner Neumann

Physik

Mechanik und Wärmelehre

Mit Übungsaufgaben
von Reiner Wedeil • Peter Gehrman • Axel Mertens • Roland Stolle

Mit 289 Abbildungen und 27 Tabellen

Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg • Berlin • Oxford

Inhalt

	Zur Begriffsbildung und Arbeitsweise der Physik	15
1.1	Physik zwischen Philosophie und Technik	15
1.2	Physikalische Systeme, Meßvorgang, physikalische Größe, Größenart	17
1.3	Größengleichung, Zahlenwertgleichung	19
1.4	Experiment und Erkenntnisfindung	20
1.5	Makrophysik und Mikrophysik	22
1.6	Klassisches Kausalitätsprinzip	23
1.7	Denkmodelle	24
	Grundgrößenarten der Mechanik	25
2.1	Grundgrößenart Zeit	25
2.1.1	Messung von Zeiten, Basiseinheit Sekunde	25
2.1.2	Frequenz, Kreisfrequenz, Periodendauer	28
2.2	Grundgrößenart Länge	29
2.2.1	Messung von Längen, Basiseinheit Meter	29
2.2.2	Ebener und räumlicher Winkel	33
2.3	Raum und Zeit in der nichtrelativistischen Mechanik	36
2.4	Grundgrößenart Masse, Basiseinheit Kilogramm	37
	Der Massenpunkt	39
3.1	Denkmodell Massenpunkt	39
3.2	Arten der Bewegung	39
3.3	Bewegung des Massenpunktes	42
3.3.1	Geschwindigkeit, Winkelgeschwindigkeit	42
3.3.2	Beschleunigung, Winkelbeschleunigung	47
3.4	Newtonsche Axiomatik	50
3.4.1	Kraft, träge Masse, Impuls, 1.Newtonsches Axiom	50
3.4.2	Wirkung und Gegenwirkung, 2. Newtonsches Axiom	57
3.4.3	Zusammensetzung und Zerlegung von Kräften, 3. Newtonsches Axiom	58
3.5	Lösung einfacher mechanischer Bewegungsprobleme, chaotische Bewegungen	61
3.6	Das Prinzip von D'ALEMBERT	64
3.7	Gravitation	67
3.7.1	Keplersche Gesetze	67
3.7.2	Träge und schwere Masse, Gravitationsgesetz	68
3.7.3	Gewicht, Erdbeschleunigung	75
3.7.4	Feldbegriff, Gravitationsfeld	77

3.7.5	Anwendungen des Gravitationsgesetzes	78
3.8	Arbeit und Energie	83
3.8.1	Arbeit und Leistung	83
3.8.2	Konservative Kräfte, potentielle und kinetische Energie	89
3.9	Erhaltungssatz der Energie	91
3.10	Aufgaben	95
4	Systeme von Massenpunkten	97
4.1	Innere und äußere Kräfte, Massenmittelpunkt, Impuls- erhaltungssatz	97
4.2	Lagrange-Funktion, Lagrangesche Gleichungen 2. Art	103
4.3	Hamiltonsche Gleichungen	107
4.4	Hamiltonsches Prinzip	110
4.5	Aufgaben	112
5	Der starre Körper	114
5.1	Zum Aufbau der Körper aus Atomen	114
5.2	Denkmodell starrer Körper	115
5.3	Statik des starren Körpers	118
5.3.1	Drehmoment, Gleichgewichtsbedingungen für den starren Körper, Kräftepaar	118
5.3.2	Stabiles, labiles und indifferentes Gleichgewicht	125
5.4	Bewegung des starren Körpers	127
5.4.1	Drehimpuls, Trägheitstensor	127
5.4.2	Rotation um feste Achsen	130
5.4.2.1	Beschreibung von Lage, Geschwindigkeit und Beschleunigung eines rotierenden Körpers, Arbeitsaufwand bei der Drehung	130
5.4.2.2	Trägheitsmoment, Satz von STEINER	134
5.4.2.3	Bewegungsgleichung des um eine feste Achse rotierenden Körpers	139
5.4.3	Erhaltungssatz des Drehimpulses	141
5.4.4	Rotation um freie Achsen	145
5.4.5	Kreiselbewegungen	151
5.5	Aufgaben	156
6	Der deformierbare Körper	159
6.1	Spannungs-Dehnungs-Diagramm	159
6.1.1	Hookesches Gesetz	163
6.2	Elastische und unelastische Stöße	165
6.3	Hydro- und Aerostatik	171
6.3.1	Fester, flüssiger und gasförmiger Aggregatzustand	171
6.3.2	Druck, Kompressionsmodul	174
6.3.2.1	Druckverteilung und Schweredruck in inkompressiblen Flüssigkeiten	175
6.3.2.2	Schweredruck in Gasen	180
6.3.3	Auftrieb	183
6.3.4	Oberflächenspannung und Kapillarität	185
6.3.4.1	Spezifische Oberflächenenergie einer Flüssigkeit, Oberflächenspannung	185

6.3.4.2	Kapillarität	190
6.4	Innere Reibung von Flüssigkeiten und Gasen	191
6.5	Hydro- und Aerodynamik	195
6.5.1	Bahnlinien und Stromlinien, Modellvorstellungen von Strömungen	195
6.5.2	Ideale Strömungen, Bernoullische Gleichung	199
6.5.3	Laminare Strömungen	203
6.5.4	Reale Strömungen, Turbulenz, Reynoldssche Zahl	206
6.6	Aufgaben	214
Thermodynamische Systeme		216
7.1	Grundgröße Temperatur, Celsius-Temperatur	217
7.2	Wärmemenge und Energie	220
7.2.1	Spezifische Wärmekapazität, Wärmemenge, Maßeinheit Kalorie	220
7.2.2	Wärmemenge als Form der Energie	222
7.3	Zustandsänderungen fester, flüssiger und gasförmiger Körper	224
7.3.1	Wärmeausdehnung von festen und flüssigen Körpern	224
7.3.2	Zustandsänderungen von Gasen	227
7.3.2.1	Gay-Lussacsches Gesetz, absolute Temperatur	227
7.3.2.2	Boyle-Mariottesches Gesetz	229
7.3.2.1	Gasthermometer	230
7.3.3	Zustandsgleichungen	231
7.3.3.1	Relative Isotopenmasse, relative Atommasse, relative Molekülmasse	236
7.3.3.2	Zustandsgleichung des idealen Gases, Partialdruck, Daltonsches Gesetz	236
7.3.3.2.1	Bestimmung der relativen Atom- und Molekülmassen	240
7.3.3.3	Eine Zustandsgleichung für reale Gase	240
7.4	Axiomatik der phänomenologischen Thermodynamik	244
7.4.1	Zustandsgrößen, Zustandsfunktionen, reversible Prozesse	244
7.4.2	1. Hauptsatz	245
7.4.2.1	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck und konstantem Volumen	247
7.4.2.2	Adiabatische Zustandsänderungen	250
7.4.2.3	Joule-Thomson-Effekt, Verflüssigung von Gasen	252
7.4.3	2. Hauptsatz	254
7.4.3.1	Kreisprozesse	256
7.4.3.2	Entropie	262
7.4.3.3	Thermodynamische Temperaturskala	265
7.4.4	Unerreichbarkeit des absoluten Nullpunktes	267
7.4.5	Allgemeine Gleichgewichtsbedingung, thermodynamische Potentiale	268
7.5	Thermodynamik einiger Systeme mit mehreren Phasen oder Komponenten	271
7.5.1	Gibbssche Phasenregel	273
7.5.2	Einkomponentensysteme	275
7.5.2.1	p-T-Diagramm	275
7.5.2.2	Latente Wärmemengen	277
7.5.2.3	Dampfdruck- und Schmelzdruckkurve	279
7.5.3	Osmotischer Druck als Beispiel eines Mehrkomponentensystems	284
7.6	Aufgaben	287

	Molekularkinetik und Statistik	290
8.1	Wärmebewegung	290
8.2	Boltzmann-Statistik	292
8.3	Kinetische Gastheorie	300
8.3.1	Molekularkinetische Deutung des Gasdruckes	301
8.3.2	Avogadrosche Konstante	303
8.3.3	Zustandsgleichung idealer Gase	304
8.3.4	Molekularkinetische Deutung der Konstanten a und b der van der Waalschen Gleichung	305
8.3.5	Molekularkinetischer Temperaturbegriff	307
8.3.6	Gleichverteilungssatz	308
8.3.6.1	Einige Anwendungen des Gleichverteilungssatzes	310
8.3.7	Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung	313
8.3.8	Transportvorgänge	316
8.3.8.1	Mittlere freie Weglänge	316
8.3.8.2	Allgemeine Transportgleichung	319
8.3.8.2.1	Innere Reibung von Gasen	320
8.3.8.2.2	Wärmeleitung	321
8.3.8.2.3	Diffusion	322
8.4	Zum Entropiebegriff	324
8.5	Masse und Größe von Atomen und Molekülen	326
8.6	Zur Thermodynamik irreversibler Prozesse	328
8.7	Aufgaben	335
	Schwingungen	337
9.1	Harmonische Schwingungen	337
9.1.1	Mathematische Darstellung, Schwingungs- differentialgleichung	337
9.1.2	Mechanische Schwingungen	341
9.1.2.1	Harmonischer Oszillator	341
9.1.2.2	Pendel	343
9.1.2.3	Drehschwingungen	348
9.1.3	Gedämpfte harmonische Schwingungen	349
9.1.4	Erzwungene harmonische Schwingungen	353
9.1.5	Überlagerung harmonischer Schwingungen gleicher Frequenz	356
9.1.5.1	Überlagerung bei gleicher Schwingungsrichtung	357
9.1.5.2	Überlagerung bei zueinander senkrechten Schwingungs- richtungen	359
9.2	Anharmonische Schwingungen	363
9.2.1	Anharmonische Schwingung als Überlagerung harmonischer Schwingungen	363
9.2.1.1	Überlagerung bei gleicher Schwingungsrichtung	363
9.2.1.2	Überlagerung bei zueinander senkrechten Schwingungs- richtungen	370
9.2.2	Amplitudenmodulierte Schwingung, Schwebung	373
9.2.3	Phasenmodulierte Schwingung	376
9.3	Darstellung beliebiger Zeitfunktionen durch harmonische Schwingungen	377
9.4	Aufgaben	381

10	Wellen	383
10.1	Harmonische Wellen	383
10.1.1	Mathematische Darstellung, Phasengeschwindigkeit, Wellendifferentialgleichung	383
10.1.2	Mechanische Wellen	393
10.1.2.1	Harmonische Wellen längs einer gespannten Saite unendlicher Länge.	393
10.1.2.2	Schallwellen	395
10.1.2.2.1	Schallwellen in festen Körpern	395
10.1.2.2.2	Schallwellen in Flüssigkeiten und Gasen.	398
10.1.2.2.3	Erzeugung von Schallwellen.	401
10.1.2.2.4	Schallfeld.	402
10.1.2.2.4.1	Charakteristische Größen des Schallfeldes.	402
10.1.2.2.4.2	Schalleistung, Schallintensität	405
10.1.2.2.4.3	Abschätzung von Druck-, Bewegungs- und Geschwin- digkeitsamplitude.	408
10.1.2.2.4.4	Schallabsorption.	410
10.1.2.2.5	Doppler-Effekt.	411
10.1.3	Überlagerung harmonischer Wellen gleicher Frequenz und Wellenlänge.	414
10.1.3.1	Überlagerung harmonischer Wellen gleicher Frequenz, gleicher Wellenlänge und gleicher Richtung der Wellen- funktion, Interferenz	415
10.1.3.1.1	Stehende Wellen	418
10.1.3.1.1.1	Bestimmung der Schallgeschwindigkeit	421
10.1.3.2	Polarisation	424
10.2	Anharmonische Wellen.	426
10.2.1	Anharmonische Welle als Überlagerung von harmonischen Wellen	426
10.2.2	Gruppengeschwindigkeit.	428
10.3	Darstellung von Wellenzügen endlicher Länge.	432
10.4	Beugung	432
10.4.1	Huygens-Fresnelsches Prinzip.	434
10.4.1.1	Einige Anwendungen des Huygens-Fresnelschen Prinzips.	436
10.4.1.1.1	Reflexionsgesetz	436
10.4.1.1.2	Brechungsgesetz	438
10.4.1.1.3	Druckwelle eines Körpers mit Überschallgeschwindigkeit	440
10.5	Aufgaben.	442
Anhang		443
A. 1	Umformung trigonometrischer Funktionen	443
A. 2	Differentialrechnung	444
A. 3	Reihenentwicklungen.	447
A. 4	Unbestimmtes Integral	449
A. 5	Bestimmtes Integral	450
A. 6	Doppelintegral	451
A. 7	Dreifachintegral.	454
A. 8	Komplexe Zahlen.	455
A. 9	Vektoren.	459
A. 10	Differentiation eines Vektors nach einem Skalar.	463

A. 11	Skalares Produkt	464
A. 12	Vektorielltes Produkt	466
A. 13	Gradient	468
A. 14	Einige wichtige Beziehungen der Vektoralgebra	470
A. 15	Linienintegral	470
A. 16	Tensoren 2. Stufe	473
A. 17	Lösung einer Differentialgleichung durch die Methode der Trennung der Variablen	477
A. 18	Gewöhnliche lineare Differentialgleichung 2. Ordnung mit konstanten Koeffizienten	478
A. 19	Fourier-Reihen	482
A. 20	Fourier-Integral	484
A. 21	Normalform der Ebenengleichung	487
A. 22	Zum Hamiltonschen Prinzip	488
A. 23	Zur Rotation um freie Achsen	490
A. 24	Darstellung der kritischen Daten eines Gases durch die Konstanten a , b und R	492
A. 25	Berechnung von $c_p - c_v$ für ein reales Gas	493
A. 26	Zum Joule-Thomson-Effekt	495
A. 27	Entropiezuwachs bei der Diffusion von Gasen	497
A. 28	Entropiezuwachs beim Temperatenausgleich	499
A. 29	Herleitung der Clausius-Clapeyronschen Gleichung, Bestimmung der Maxwellschen Geraden	500
A. 30	Zur Temperaturabhängigkeit des Dampfdruckes	503
A. 31	Thermodynamische Herleitung des van't Hoff'schen Gesetzes	503
A. 32	Wahrscheinlichkeit	505
A. 33	Permutationen	507
A. 34	Zur Berechnung der inneren Energie des idealen Gases	508
A. 35	Zum Gleichverteilungssatz	509
A. 36	Zur Maxwellschen Geschwindigkeitsverteilung	510
A. 37	Lösung der Differentialgleichung des gedämpften Feder- schwingers	512
A. 38	Lösung der Differentialgleichung der erzwungenen Schwingung	513
A. 39	Entwicklung einer Rechteckschwingung und einer Kipp- schwingung in eine Fourier-Reihe	515
A. 40	Berechnung des Fourier-Integrales eines Rechteckimpulses	517
A. 41	Berechnung der zeitlichen Mittelwerte von Wellenfunktionen	518
A. 42	Lösungen der Aufgaben	519