

Paul A. Tipler

Physik

Aus dem Amerikanischen übersetzt von
Michael Baumgartner, Denny Fliegner, Andreas Jedynek, Birgit Marter,
Matthias Marx, Thomas Meigen, Wolfgang Paul und Michael Zillgitt

Herausgeber der deutschen Ausgabe:
Dieter Gerlich und Götz Jerke

Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg • Berlin • Oxford

Inhalt

1	Einheitensysteme	1
1.1	Physikalische Größen und Einheiten	1
1.2	Meßgenauigkeit und Meßfehler	3
1.3	Die Dimension einer physikalischen Größe	5
1.4	Rechnen mit physikalischen Größen	6
	Zusammenfassung	9
	<i>Essay: Hans Christian von Baeyer, Fermis Lösung</i>	10
	Aufgaben	13
Teil 1	Mechanik	
	Bewegung in einer Dimension	19
2.1	Durchschnittsgeschwindigkeit	20
2.2	Momentangeschwindigkeit	23
2.3	Beschleunigung	26
2.4	Integration	28
2.5	Bewegung mit konstanter Beschleunigung	31
	Zusammenfassung	37
	Aufgaben	38
3	Bewegung in zwei und drei Dimensionen	43
3.1	Verschiebungsvektor und Vektoraddition	43
3.2	Vektoraddition in Komponentenschreibweise	45
3.3	Einheitsvektoren und Multiplikation von Vektoren mit Skalaren	47
3.4	Der Geschwindigkeitsvektor	48
3.5	Der Beschleunigungsvektor	50
3.6	Relativgeschwindigkeit	52
3.7	Wurfbewegungen	53
3.8	Kreisbewegung	61
	Zusammenfassung	64
	Aufgaben	66
4	Die Newtonschen Axiome	71
4.1,	Das erste Newtonsche Axiom: das Trägheitsgesetz	72
4.2	Kraft, Masse und das zweite Newtonsche Axiom	74

4.3	Die Gewichtskraft	78
4.4	Das dritte Newtonsche Axiom	80
4.5	Kräfte in der Natur	82
4.6	Anwendungen zur Lösung von Bewegungsproblemen	86
	Zusammenfassung	93
	Aufgaben	95
5	Die Newtonschen Axiome II: Anwendungen	99
5.1	Reibung	99
5.2	Strömungswiderstand	109
5.3	Bewegungsprobleme im Fall von mehreren miteinander verbundenen Körpern	110
5.4	Scheinkräfte	114
5.5	Numerische Methoden	118
	Zusammenfassung	121
	Aufgaben	123
6	Arbeit und Energie	129
6.1	Arbeit und kinetische Energie: Bewegung in einer Dimension bei konstanter Kraft	130
6.2	Arbeit bei veränderlicher Kraft	134
6.3	Arbeit und Energie in drei Dimensionen	137
6.4	Die potentielle Energie	142
6.5	Potentielle Energie und Gleichgewicht in einer Dimension	147
6.6	Die Erhaltung der mechanischen Energie	150
6.7	Der verallgemeinerte Energiesatz der Mechanik	158
6.8	Energieerhaltung	163
6.9	Leistung	165
	Zusammenfassung	167
	Aufgaben	170
7	Teilchensysteme und Impulserhaltung	177
7.1	Der Massenmittelpunkt	177
7.2	Bewegung des Massenmittelpunkts	182
7.3	Impulserhaltung	185
7.4	Das Massenmittelpunktsystem als Bezugssystem	190
7.5	Kinetische Energie eines Systems von Teilchen	192
7.6	Stöße in einer Dimension	195
7.7	Stöße in drei Dimensionen	203
7.8	Kraftstoß und zeitliches Mittel einer Kraft	206
7.9	Raketenantrieb	210
	Zusammenfassung	213
	<i>Essay: Ralph A. Llewellyn, Die Entdeckung des Neutrinos</i>	216
	Aufgaben	219
^	Drehbewegungen	225
8.1	Winkelgeschwindigkeit und Winkelbeschleunigung	225
8.2	Drehmoment und Trägheitsmoment	229
8.3	Die kinetische Energie der Drehbewegung	234
8.4	Berechnung von Trägheitsmomenten	236
8.5	Der Drehimpuls	242
8.6	Rollende Körper	249
8.7	Der Vektorcharakter der Drehgrößen und das Kreuzprodukt	256
8.8	Statistisches und dynamisches Ungleichgewicht	262
8.9	Kreiselbewegungen	263
	Zusammenfassung	265
	Aufgaben	267

	Statisches Gleichgewicht des starren Körpers	279
9.1	Gleichgewichtsbedingungen	279
9.2	Der Schwerpunkt	281
9.3	Einige Beispiele für statisches Gleichgewicht	283
9.4	Kräftepaare	287
9.5	Stabilität des Gleichgewichtes	288
	Zusammenfassung	291
	Aufgaben	292
10	Gravitation	299
10.1	Die Keplerschen Gesetze	299
10.2	Das Newtonsche Gravitationsgesetz	303
10.3	Messung der Gravitationskonstanten	309
10.4	Schwere und träge Masse	311
10.5	Verlassen von gebundenen Bahnen um die Erde	312
10.6	Potentielle Energie, Gesamtenergie und Umlaufbahnen	318
10.7	Das Gravitationsfeld einer Kugelschale und einer Vollkugel	321
	Zusammenfassung	327
	<i>Essay: A.P. French, Isaac Newton (1642-1727)</i>	329
	Aufgaben	333
	Mechanik deformierbarer Körper	339
11.1	Dichte	339
11.2	Spannung und Dehnung	342
11.3	Druck in einer Flüssigkeit	345
11.4	Auftrieb und Archimedisches Prinzip	349
11.5	Oberflächenspannung und Kapillarität	353
11.6	Fluiddynamik und Bernoulli-Gleichung	356
11.7	Viskose Strömung	" 362
	Zusammenfassung	365
	<i>Essay: Robert G. Hunt, Die Aerodynamik des Radfahrens</i>	368
	Aufgaben	371
Teil 2 Schwingungen und Wellen		
12	i Schwingungen	379
12.1	Harmonische Schwingungen	379
12.2	Harmonische Schwingung und Kreisbewegung	387
12.3	Energiebilanz bei harmonischen Schwingungen	388
12.4	Massen an senkrecht aufgehängten Federn	392
12.5	Pendel	394
12.6	Bewegungen in der Nähe von Gleichgewichtspunkten	400
12.7	Gedämpfte Schwingungen	401
12.8	Erzwungene Schwingung und Resonanz	406
	Zusammenfassung	409
	<i>Essay: James S. Walker, Chaos - eine ordentliche Unordnung</i>	411
	Aufgaben	416
13	Mechanische Wellen	423
13.1	Wellenberge	424
13.2	Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen	429
13.3	Harmonische Wellen	431
13.4	Energieübertragung durch Wellen	434
13.5	Superposition und Interferenz harmonischer Wellen	435

13.6	Stehende Wellen	438
13.7	Überlagerung stehender Wellen	446
13.8	Wellengleichung	448
	Zusammenfassung	451
	Aufgaben	454
14	Akustik	459
14.1	Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen	459
14.2	Harmonische Schallwellen	462
14.3	Wellen in drei Dimensionen: Intensität	466
14.4	Interferenz: Schwebungen	470
14.5	Stehende Schallwellen	476
14.6	Harmonische Analyse und Synthese	481
14.7	Wellenpakete und Dispersion	483
14.8	Reflexion, Brechung und Beugung	484
14.9	Der Doppler-Effekt	487
	Zusammenfassung	493
	<i>Essay: Jack L. Flinner, Seismische Wellen</i>	497
	Aufgaben	502
Teil 3 Thermodynamik		
15	Temperatur	509
15.1	Temperaturskalen	509
15.2	Gasthermometer und die absolute Temperatur	512
15.3	Thermische Ausdehnung	514
15.4	Die Zustandsgleichung für ideale Gase	518
15.5	Die molekulare Deutung der Temperatur: die kinetische Gastheorie	522
15.6	Die Van-der-Waals-Gleichung	528
15.7	Phasendiagramme	530
	Zusammenfassung	533
	Aufgaben	535
16	Wärme und der Erste Hauptsatz der Thermodynamik	539
16.1	Wärmekapazität und spezifische Wärme	540
16.2	Phasenübergänge und latente Wärme	543
16.3	Wärmeübertragung	546
16.4	Der Erste Hauptsatz der Thermodynamik	554
16.5	Die innere Energie eines idealen Gases	557
16.6	Volumenarbeit und das P-V-Diagramm eines Gases	559
16.7	Wärmekapazitäten und der Gleichverteilungssatz	562
16.8	Adiabatische Zustandsänderung	568
	Zusammenfassung	571
	<i>Essay: Jerrold H. Krenz, Der Energiehaushalt der Erde und die globale Erwärmung</i>	575
	Aufgaben	579
17	Die Verfügbarkeit der Energie	585
17.1	Wärmekraftmaschinen und der Zweite Hauptsatz	586
17.2	Kältemaschinen und der Zweite Hauptsatz	590
17.3	Die Gleichwertigkeit der Formulierungen des Zweiten Hauptsatzes	591
17.4	Der Carnot-Wirkungsgrad	592
17.5	Wärmepumpen	597

17.6	Entropie und Unordnung	599
17.7	Entropie und Wahrscheinlichkeit	605
17.8	Der Dritte Hauptsatz der Thermodynamik	607
	Zusammenfassung	608
	Aufgaben	610
Teil 4	Elektrizität und Magnetismus	
18	Das elektrische Feld I: Diskrete Ladungsverteilungen	617
18.1	Elektrische Ladung	618
18.2	Leiter, Nichtleiter und Influenz	621
18.3	Das Coulombsche Gesetz	623
18.4	Das elektrische Feld	627
18.5	Elektrische Feldlinien	632
18.6	Bewegungen von Punktladungen in elektrischen Feldern	635
18.7	Elektrische Dipole in elektrischen Feldern	636
	Zusammenfassung	638
	Aufgaben	640
19	Das elektrische Feld II: Kontinuierliche Ladungsverteilungen	645
19.1	Berechnung des elektrischen Feldes mit Hilfe des Coulombschen Gesetzes	646
19.2	Das Gaußsche Gesetz	654
19.3	Berechnung des elektrischen Feldes mit Hilfe des Gaußschen Gesetzes	658
19.4	Ladung und Feld auf den Oberflächen von leitenden Gegenständen	669
19.5	Mathematische Herleitung des Gaußschen Gesetzes	674
	Zusammenfassung	675
	Aufgaben	677
20	Das elektrische Potential	681
20.1	Elektrisches Potential und Potentialdifferenz	681
20.2	Das Potential eines Systems von Punktladungen	685
20.3	Elektrostatische potentielle Energie	690
20.4	Berechnung des elektrischen Potentials kontinuierlicher Ladungsverteilungen	691
20.5	Elektrisches Feld und Potential	698
20.6	Äquipotentialflächen, Ladungsfluß und dielektrischer Durchschlag	704
	Zusammenfassung	710
	<i>Essay: Richard Zallen, Elektrostatik und Xerographie</i>	713
	Aufgaben	715
21	Kapazität, Dielektrika und elektrostatische Energie	721
21.1	Der Plattenkondensator	722
21.2	Der Zylinderkondensator	724
21.3	Dielektrika	725
21.4	Die Speicherung elektrischer Energie	729
21.5	Zusammenschaltung von Kondensatoren	733
	Zusammenfassung	739
	Aufgaben	740
22	Elektrischer Strom	747
22.1	Strom und die Bewegung von Ladungen	747
22.2	Widerstand und Ohmsches Gesetz	751

22.3	Die Energie des elektrischen Stroms	756
22.4	Zusammenschaltung von Widerständen	761
22.5	Ein mikroskopisches Modell der elektrischen Leitfähigkeit von Metallen	765
	Zusammenfassung	769
	<i>Essay: Elizabeth Pflügl Nickles, Reizleitung in Nervenzellen</i>	772
	Aufgaben	776
23	Gleichstromkreise	781
23.1	Die Kirchhoffschen Regeln	782
23.2	RC-Kreise	790
23.3	Amperemeter, Voltmeter und Ohmmeter	798
	Zusammenfassung	801
	Aufgaben	803
24	Das Magnetfeld	811
24.1	Die magnetische Kraftwirkung	812
24.2	Die Bewegung einer Punktladung in einem Magnetfeld	818
24.3	Das auf Leiterschleifen und Magnete ausgeübte Drehmoment	827
24.4	Der Hall-Effekt	831
	Zusammenfassung	835
	Aufgaben	837
25	Die Quellen des magnetischen Feldes	843
25.1	Das magnetische Feld einer bewegten Punktladung	844
25.2	Das magnetische Feld von Strömen: Das Gesetz von Biot und Savart	848
25.3	Die Definition des Ampere	858
25.4	Das Amperesche Gesetz	860
	Zusammenfassung	866
	Aufgaben	869
26	Magnetische Induktion	875
26.1	Der magnetische Fluß	876
26.2	Induktionsspannung und Faradaysches Gesetz	877
26.3	Die Lenzsche Regel	881
26.4	Induktionsspannung durch Bewegung	883
26.5	Wirbelströme	887
26.6	Generatoren und Motoren	889
26.7	Induktivität	891
26.8	Lfl-Kreise	895
26.9	Die Energie des Magnetfelds	898
	Zusammenfassung	900
	<i>Essay: Syun-Ichi Akasofu, Das Polarlicht</i>	903
	Aufgaben	907
27	Magnetismus in Materie	915
27.1	Magnetisierung und magnetische Suszeptibilität	916
27.2	Atomare magnetische Momente	920
27.3	Paramagnetismus	922
27.4	Ferromagnetismus	925
27.5	Diamagnetismus	928
	Zusammenfassung	930
	Aufgaben	933

28	Wechselstromkreise	937
28.1	Wechselspannung an einem Widerstand	938
28.2	Wechselströme in Spulen und Kondensatoren	943
28.3	Zeigerdiagramme	949
28.4	<i>LC</i> - und <i>LCR</i> -Kreise ohne Wechselspannungsquelle	950
28.5	<i>LCR</i> -Kreise mit Wechselspannungsquelle - erzwungene Schwingungen	955
28.6	Der Transformator	965
28.7	Gleichrichtung und Verstärkung	969
	Zusammenfassung	973
	<i>Essay</i> : John Dentler, <i>Elektromotoren</i>	976
	Aufgaben	985
29	Maxwellsche Gleichungen und elektromagnetische Wellen	991
29.1	Der Maxwellsche Verschiebungsstrom	992
29.2	Die Maxwellschen Gleichungen	995
29.3	Die Wellengleichung für elektromagnetische Wellen	998
29.4	Energie und Impuls einer elektromagnetischen Welle	1002
29.5	Das elektromagnetische Spektrum	1007
	Zusammenfassung	1011
	<i>Essay</i> : C.W.F. Everitt, <i>James Clerk Maxwell (1831-1879)</i>	1013
	Aufgaben	1016
Teil 5	Optik	
	Licht	1023
0.1	Die Lichtgeschwindigkeit	1025
30.2	Die Ausbreitung des Lichts: das Huygenssche Prinzip	1028
30.3	Reflexion	1030
30.4	Brechung	1032
30.5	Das Fermatsche Prinzip	1042
30.6	Polarisation	1044
	Zusammenfassung	1050
	<i>Essay</i> : Robert Greenler, <i>Jenseits des (sichtbaren) Regenbogens</i>	1051
	Aufgaben	1053
	Geometrische Optik	1059
	Ebene Spiegel	1059
	Sphärische Spiegel	1062
	Durch Brechung erzeugte Bilder	1068
	Dünne Linsen	1071
	Abbildungsfehler	1081
	Zusammenfassung	1083
	Aufgaben	1085
34	Optische Instrumente	1089
32.1	Das Auge	1089
32.2	Die Lupe	1093
32.3	Die Kamera	1095
32.4	Das Mikroskop	1098
32.5	Das Teleskop	1099
	Zusammenfassung	1104
	Aufgaben	1106

k	Interferenz und Beugung	1109
33.	Phasendifferenz und Kohärenz	1109
33.	Interferenz an dünnen Schichten	1111
33.	Das Michelson-Interferometer	1114
33.	Das Interferenzmuster an einem Doppelspalt	1116
33.	Vektoraddition von harmonischen Wellen	1120
33.	Interferenzmuster bei drei oder mehr äquidistanten Quellen	1122
33.	Beugungsmuster an einem Einzelspalt	1125
33.	Interferenz- und Beugungsmuster beim Doppelspalt	1130
33.	Fraunhofersche und Fresnelsche Beugung	1131
33.10	Beugung und Auflösung	1132
33.11	Beugungsgitter	1135
	Zusammenfassung	1139
	Aufgaben	1141
Teil 6	Moderne Physik	
34	Relativitätstheorie	1149
34.	Das Newtonsche Relativitätsprinzip	1150
34.	Das Michelson-Morley-Experiment	1152
34.	Die Einsteinschen Postulate	1156
34.	Die Lorentz-Transformation	1157
34.	Uhrensynchronisation und Gleichzeitigkeit	1164
34.	Der Doppler-Effekt	1168
34.	Das Zwillingsparadoxon	1169
34.	Die Geschwindigkeitstransformation	1171
34.	Relativistischer Impuls	1174
34.10	Relativistische Energie und Masse-Energie-Äquivalenz	1176
34.11	Allgemeine Relativitätstheorie	1183
	Zusammenfassung	1186
	Aufgaben	1189
35	Ursprünge der Quantentheorie	1195
35.1	Strahlung des schwarzen Körpers und Plancksches Wirkungsquantum	1197
35.2	Der photoelektrische Effekt	1199
35.3	Röntgenstrahlung	1202
35.4	Compton-Streuung	1204
35.5	Energiequantisierung in Atomen und Bohrsches Atommodell	1206
35.6	Welleneigenschaften des Elektrons und Quantenmechanik	1212
	Zusammenfassung	1216
	Aufgaben	1218
36	Quantenmechanik	1221
36. 1	Wellenfunktionen von Teilchen	1221
36. 2	Wellenpakete	1225
36. 3	Die Unschärferelation	1230
36. 4	Der Welle-Teilchen-Dualismus	1233
36. 5	Die Schrödinger-Gleichung	1234
36. 6	Das Teilchen im Kastenpotential	1237
36. 7	Das Teilchen in einem Potentialtopf mit endlich hohen Wänden	1241
36. 8	Erwartungswerte	1244
36. 9	Der quantenmechanische harmonische Oszillator	1246

36.10	Reflexion und Transmission an einem Potentialwall	1249
36.11	Die Schrödinger-Gleichung in drei Dimensionen	1253
36.12	Die Schrödinger-Gleichung für zwei identische Teilchen	1255
	Zusammenfassung	1257
	Aufgaben	1260
37	Atome	1265
37.1	Das Wasserstoffatom	1266
37.2	Die Wellenfunktionen des Wasserstoffatoms	1270
37.3	Magnetische Momente und der Elektronenspin	1275
37.4	Der Stern-Gerlach-Versuch	1277
37.5	Die Addition der Drehimpulse und die Spin-Bahn-Kopplung	1279
37.6	Das Periodensystem	1282
37.7	Spektren im sichtbaren und im Röntgen-Bereich	1289
37.8	Absorption, Streuung und stimulierte Emission	1292
37.9	Der Laser	1293
	Zusammenfassung	1298
	<i>Essay: DJ. Wineland, Atomfallen und Laserkühlung</i>	1300
	Aufgaben	1306
38	Moleküle	1309
38.1	Die chemische Bindung	1310
38.2	Mehratomige Moleküle	1317
38.3	Energieniveaus und Spektren zweiatomiger Moleküle	1322
	Zusammenfassung	1330
	Aufgaben	1332
39	Festkörper	1335
39.1	Die Struktur von Festkörpern	1336
39.2	Das klassische Konzept des Elektronengases und seine Grenzen	1344
39.3	Das Fermi-Elektronengas	1345
39.4	Die Quantentheorie der elektrischen Leitung	1353
39.5	Das Bändermodell der Festkörper	1356
39.6	Dotierte Halbleiter	1359
39.7	Halbleiterübergangsschichten und ihre Anwendungen	1361
39.8	Supraleitung	1367
	Zusammenfassung	1372
	<i>Essay: Samuel J. Williamson, SQUIDS</i>	1376
	<i>Essay: Ellen D. Williams, Raster-Tunnel-Mikroskopie</i>	1380
	Aufgaben	1383
40	Kernphysik	1389
40.1	Eigenschaften der Kerne	1390
40.2	Kernspinresonanz	1396
40.3	Radioaktivität	1398
40.4	Kernreaktionen	1403
40.5	Kernspaltung, Kernfusion und Kernreaktionen	1405
40.6	Wechselwirkung von Teilchen mit Materie	1413
	Zusammenfassung	1418
	Aufgaben	1421
41	Elementarteilchen	1425
41.1	Hadronen und Leptonen	1425
41.2	Spin und Antiteilchen	1428
41.3	Erhaltungssätze	1431

41.4	Das Quark-Modell	1434
41.5	Feldquanten	1438
41.6	Die Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung	1439
41.7	Das Standardmodell	1439
41.8	Große Vereinheitlichte Theorien	1441
	Zusammenfassung	1442
	Aufgaben	1443
42	Astrophysik und Kosmologie	1445
42.1	Unser Stern, die Sonne	1446
42.2	Die Sterne	1453
42.3	Die Entwicklung der Sterne	1457
42.4	Kataklysmische Ereignisse	1460
42.5	Endzustände der Sterne	1463
42.6	Galaxien	1466
42.7	Gravitation und Kosmologie	1472
42.8	Kosmogogenesis	1474
	Zusammenfassung	1478
	Aufgaben	1480
	Weiterführende Literatur	1483
	Namen- und Sachverzeichnis	1485