

Paul A. Tipler Gene Mosca

# Physik

Für Wissenschaftler und Ingenieure

Zweite deutsche Auflage

herausgegeben von Dietrich Pelte

Aus dem Amerikanischen übersetzt von Michael Basler,  
Renate Marianne Dohmen, Carsten Heinisch, Walter Kuhn,  
Anna Schleitzer und Michael Zillgitt

1	Einheitensysteme	1
1.1	Physikalische Größen und Maßeinheiten	3
1.2	Dimensionen physikalischer Größen	5
1.3	Die Exponentialschreibweise	6
1.4	Messgenauigkeit und Messfehler	8
1.5	Signifikante Stellen und Größenordnungen	11

## Teil 1: Mechanik

2	Eindimensionale Bewegung	19
2.1	Verschiebung, Geschwindigkeit und Tempo	20
2.2	Beschleunigung	27
2.3	Gleichförmig beschleunigte Bewegung	29
2.4	Integration	39
3	Bewegung in zwei und drei Dimensionen	49
3.1	Der Verschiebungsvektor	50
3.2	Allgemeine Eigenschaften von Vektoren	50
3.3	Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung	55
3.4	Erster Spezialfall: Der schräge Wurf	60
3.5	Zweiter Spezialfall: Die Kreisbewegung	68
4	Die Newton'schen Axiome	77
4.1	Das erste Newton'sche Axiom: Das Trägheitsgesetz	78
4.2	Kraft, Masse und das zweite Newton'sche Axiom	79
4.3	Die Gewichtskraft	81
4.4	Die Naturkräfte	82
4.5	Kräfte diagramme und ihre Anwendung	85
4.6	Das dritte Newton'sche Axiom	94

4.7	Aufgabenstellungen mit zwei und mehr Körpern	96
-----	--	----

## 5 Anwendungen der Newton'schen Axiome 105

5.1	Reibung	106
5.2	Krummlinige Bewegung	119
5.3	Trägheits-oder Scheinkräfte	125
5.4	Widerstandskräfte*	128
5.5	Numerische Integration: Das Euler-Verfahren	129

## 6 Arbeit und Energie 139

6.1	Arbeit und kinetische Energie	140
6.2	Das Skalarprodukt	148
6.3	Arbeit und Energie in drei Dimensionen	155
6.4	Potenzielle Energie	157

## 7 Energieerhaltung 171

7.1	Die Erhaltung der mechanischen Energie	172
7.2	Der Energieerhaltungssatz	181
7.3	Masse und Energie	191
7.4	Quantisierung der Energie	194

## 8 Teilchensysteme und die Erhaltung des linearen Impulses 201

8.1	Der Massenmittelpunkt	202
8.2	Bestimmung des Massenmittelpunkts durch Integration	206
8.3	Bewegung des Massenmittelpunkts	208
8.4	Impulserhaltung	213
8.5	Kinetische Energie eines Systems von Teilchen	218

8.6 Stöße	218	11.2 Das Newton'sche Gravitationsgesetz	337
8.7 Das Massenmittelpunktsystem als Bezugssystem	233	11.3 Die potenzielle Energie der Gravitation	344
8.8 Systeme mit veränderlicher Masse: Strahlantrieb	236	11.4 Das Gravitationsfeld	350
9 Drehbewegungen	247	11.5 Berechnung des Gravitationsfelds einer Kugelschale durch Integration	354
9.1 Kinematik der Drehbewegung: Winkelgeschwindigkeit und Winkelbeschleunigung	248	12 Statisches Gleichgewicht und Elastizität	365
9.2 Die kinetische Energie der Drehbewegung	251	12.1 Gleichgewichtsbedingungen	366
9.3 Berechnung von Trägheitsmomenten	253	12.2 Der Schwerpunkt	366
9.4 Das zweite Newton'sche Axiom für Drehbewegungen: Der Drehimpuls	262	12.3 Einige Beispiele für statisches Gleichgewicht	367
9.5 Anwendungen des zweiten Newton'schen Axioms	265	12.4 Kräftepaare	375
9.6 Rollende Körper	272	12.5 Statisches Gleichgewicht in beschleunigten Bezugssystemen	376
10 Die Drehimpulserhaltung	287	12.6 Stabilität des Gleichgewichts	378
10.1 Die Vektornatur der Rotation	288	12.7 Unbestimmbare Probleme	380
10.2 Drehmoment und Drehimpuls	290	12.8 Spannung und Dehnung	380
10.3 Die Drehimpulserhaltung	297	13 Fluide	391
10.4 Die Quantisierung des Drehimpulses	309	13.1 Dichte	392
R Die spezielle Relativitätstheorie	317	13.2 Druck in einem Fluid	393
R.1 Das Relativitätsprinzip und die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	318	13.3 Auftrieb und archimedisches Prinzip	399
R.2 Bewegte Stäbe	319	13.4 Bewegte Fluide	405 •
R.3 Bewegte Uhren	320	Teil 2: Schwingungen und Wellen	
R.4 Noch einmal bewegte Stäbe	324	14 Schwingungen	423
R.5 Weit voneinander entfernte Uhren und Gleichzeitigkeit	325	14.1 Harmonische Schwingung	424
R.6 Anwendung der Gesetzmäßigkeiten der speziellen Relativitätstheorie	326	14.2 Energie des harmonischen Oszillators	432
R.7 Relativistischer Impuls, Masse und Energie	329	14.3 Einige schwingende Systeme	435
11 Gravitation	333	14.4 Gedämpfte Schwingungen	446
11.1 Die Kepler'schen Gesetze	334	14.5 Erzwungene Schwingungen und Resonanz	451
		15 Ausbreitung von Wellen	463
		15.1 Einfache Wellenbewegungen	464
		15.2 Periodische Wellen, harmonische Wellen	471

- 15.3 Wellen in drei Dimensionen 477
- 15.4 Wellenausbreitung an Hindernissen 482
- 15.5 Der Doppler-Effekt 487
  
- 16 Überlagerung und stehende Wellen 501
- 16.1 Überlagerung von Wellen 502
- 16.2 Stehende Wellen 510
- 16.3 Überlagerung von stehenden Wellen 518
- 16.4 Harmonische Analyse und Synthese 521
- 16.5 Wellenpakete und Dispersion 522

### Teil 3: Thermodynamik

- 17 Temperatur und die kinetische Gastheorie 533
- 17.1 Thermisches Gleichgewicht und Temperatur 534
- 17.2 Celsius- und Fahrenheit-Skala 534
- 17.3 Gasthermometer und die absolute Temperatur 536
- 17.4 Die Zustandsgleichung für das ideale Gas 539
- 17.5 Die kinetische Gastheorie 542
  
- 18 Wärme und der Erste Hauptsatz der Thermodynamik 553
- 18.1 Wärmekapazität und spezifische Wärmekapazität 554
- 18.2 Phasenübergänge und latente Wärme 557
- 18.3 Joules Experiment und der Erste Hauptsatz der Thermodynamik 560
- 18.4 Die innere Energie eines idealen Gases 562
- 18.5 Volumenarbeit und das  $P$ - $V$ -Diagramm eines Gases 563
- 18.6 Wärmekapazitäten von Gasen 567
- 18.7 Wärmekapazitäten von Festkörpern 572
- 18.8 Das Versagen des Gleichverteilungssatzes 573
- 18.9 Die reversible adiabatische Kompression eines Gases 576

- 19 Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik 585
- 19.1 Wärmekraftmaschinen und der Zweite Hauptsatz 587
- 19.2 Kältemaschinen und der Zweite Hauptsatz 591
- 19.3 Die Gleichwertigkeit der Formulierungen des Zweiten Hauptsatzes 592
- 19.4 Der Carnot'sche Kreisprozess 594
- 19.5 Wärmepumpen 600
- 19.6 Irreversibilität und Unordnung 601
- 19.7 Entropie 602
- 19.8 Entropie und die Verfügbarkeit der Energie 608
- 19.9 Entropie und Wahrscheinlichkeit 609
- 19.10 Der Dritte Hauptsatz 610
  
- 20 Thermische Eigenschaften und Vorgänge 617
- 20.1 Thermische Ausdehnung 618
- 20.2 Die Van-der-Waals-Gleichung und Flüssigkeits-Dampf-Isothermen 621
- 20.3 Phasendiagramme 623
- 20.4 Wärmeübertragung 624

### Teil 4: Elektrizität und Magnetismus

- 21 Das elektrische Feld I: Diskrete Ladungsverteilungen 641
- 21.1 Elektrische Ladung 642
- 21.2 Leiter und Nichtleiter 644
- 21.3 Das Coulomb'sche Gesetz 647
- 21.4 Das elektrische Feld 652
- 21.5 Elektrische Feldlinien 658
- 21.6 Bewegung von Punktladungen in elektrischen Feldern 661
- 21.7 Elektrische Dipole in elektrischen Feldern 665

- 22 Das elektrische Feld II: Kontinuierliche Ladungsverteilungen 673
- 22.1 Berechnung von  $E$  mit dem Coulomb'schen Gesetz 674
- 22.2 Das Gauß'sche Gesetz 682
- 22.3 Berechnung von  $E$  mit dem Gauß'schen Gesetz 685
- 22.4 Diskontinuität von  $E_n$  687
- 22.5 Ladung und Feld auf Leiteroberflächen 689
- 22.6 Ableitung des Gauß'schen Gesetzes aus dem Coulomb'schen Gesetz 691
- 23 Das elektrische Potenzial 713
- 23.1 Die Potentialdifferenz 714
- 23.2 Das Potenzial eines Punktladungssystems 715
- 23.3 Die Berechnung des elektrischen Felds aus dem Potenzial 717
- 23.4 Die Berechnung des elektrischen Potentials ( $f$ )> kontinuierlicher Ladungsverteilungen 722
- 23.5 Äquipotentialflächen 729
- 24 Elektrostatische Energie und Kapazität 745
- 24.1 Die elektrische Energie 746
- 24.2 Die Kapazität 749
- 24.3 Speicherung elektrischer Energie 752
- 24.4 Kondensatoren, Batterien und elektrische Stromkreise 756
- 24.5 Dielektrika 762
- 24.6 Molekulare Betrachtung von Dielektrika 768
- 25 Elektrischer Strom - Gleichstromkreise 781
- 25.1 Elektrischer Strom und die Bewegung von Ladungsträgern 782
- 25.2 Widerstand und Ohm'sches Gesetz 785
- 25.3 Energetische Betrachtung elektrischer Stromkreise 787
- 25.4 Zusammenschaltung von Widerständen 793
- 25.5 Die Kirchhoff'schen Regeln 799
- 25.6 AC-Stromkreise 808
- 26 Das Magnetfeld 823
- 26.1 Die magnetische Kraft 824
- 26.2 Die Bewegung einer Punktladung in einem Magnetfeld 830
- 26.3 Das auf Leiterschleifen und Magnete ausgeübte Drehmoment 839
- 26.4 Der Hall-Effekt 844
- 27 Quellen des Magnetfelds 853
- 27.1 Das Magnetfeld bewegter Punktladungen 854
- 27.2 Das Magnetfeld von Strömen: Das Biot-Savart'sche Gesetz 854
- 27.3 Der Gauß'sche Satz für Magnetfelder 869'
- 27.4 Das Ampere'sche Gesetz 870
- 27.5 Magnetismus in Materie 874
- 28 Die magnetische Induktion 893
- 28.1 Der magnetische Fluss 894
- 28.2 Induktionsspannung und Faraday'sches Gesetz 896
- 28.3 Die Lenz'sche Regel 900
- 28.4 Induktion durch Bewegung 905
- 28.5 Wirbelströme 911
- 28.6 Induktivität 912
- 28.7 Die Energie des Magnetfelds 915
- 28.8 i?L-Stromkreise 916
- 28.9 Magnetische Eigenschaften von Supraleitern 921
- 29 Wechselstromkreise 931
- 29.1 Wechselstromgeneratoren 932
- 29.2 Wechselspannung an einem Ohm'schen Widerstand 933
- 29.3 Wechselstromkreise 936
- 29.4 Zeigerdiagramme 940

29.5 LC- und #LC-Stromkreise ohne Wechselspannungsquelle 941

29.6 Erzwungene Schwingungen in RLC-Stromkreisen 945

29.7 Der Transformator 953

30 Die Maxwell'schen Gleichungen - Elektromagnetische Wellen 965

30.1 Der Maxwell'sche Verschiebungsstrom 966

30.2 Die Maxwell'schen Gleichungen 970

30.3 Elektromagnetische Wellen 970

30.4 Die Wellengleichung für elektromagnetische Wellen 979

## Teil 5: Licht

31 Eigenschaften des Lichts 991

31.1 Welle-Teilchen-Dualismus 992

31.2 Lichtspektren 992

31.3 Lichtquellen 993

31.4 Die Lichtgeschwindigkeit 1001

31.5 Die Ausbreitung des Lichts 1005

31.6 Reflexion und Brechung 1006

31.7 Polarisation 1017

31.8 Ableitung des Reflexions- und des Brechungsgesetzes 1024

32 Optische Abbildungen 1033

32.1 Spiegel 1034

32.2 Linsen 1046

32.3 Abbildungsfehler 1061

32.4 Optische Instrumente 1062

33 Interferenz und Beugung 1079

33.1 Phasendifferenz und Kohärenz 1080

33.2 Interferenz an dünnen Schichten 1081

33.3 Interferenzmuster beim Doppelspalt 1084

33.4 Beugungsmuster beim Einzelspalt 1087

33.5 Vektoraddition harmonischer Wellen 1091

33.6 Fraunhofer'sche und Fresnel'sche Beugung- 1099

33.7 Beugung und Auflösung 1100

33.8 Beugungsgitter 1103

## Teil 6: Moderne Physik: Quantenmechanik, Relativitätstheorie und die Struktur der Materie

34 Welle-Teilchen-Dualismus und Quantenphysik 1115

34.1 Licht 1116

34.2 Die Teilchennatur des Lichts: Photonen 1117

34.3 Energiequantisierung in Atomen 1122

34.4 Elektronen und Materiewellen 1122

34.5 Die Interpretation der Wellenfunktion 1126

34.6 Der Welle-Teilchen-Dualismus 1128

34.7 Ein Teilchen im Kasten 1130

34.8 Erwartungswerte 1134

34.9 Energiequantisierung in anderen Systemen 1137

35 Anwendungen der Schrödinger-Gleichung 1143

35.1 Die Schrödinger-Gleichung 1144

35.2 Ein Teilchen im Kasten mit endlich hohem Potenzial 1146

35.3 Der harmonische Oszillator 1148 i

35.4 Reflexion und Transmission von Elektronenwellen an Potenzialbarrieren 1151

35.5 Die Schrödinger-Gleichung in drei Dimensionen 1157

35.6 Die Schrödinger-Gleichung für zwei identische Teilchen 1160

36 Atome 1165

36.1 Das Atom und die Atomspektren 1166.

36.2 Das Bohr'sche Modell des Wasserstoffatoms 1167

36.3 Quantentheorie der Atome 1171

36.4	Quantentheorie des Wasserstoffatoms	1174	40.2	Radioaktivität	1297
36.5	Spin-Bahn-Kopplung und Feinstruktur	1179	40.3	Kernreaktionen	1304
36.6	Das Periodensystem der Elemente	1181	40.4	Kernspaltung und Kernfusion	1306
36.7	Spektren im sichtbaren und im Röntgenbereich	1189	41	Elementarteilchen und die Entstehung des Universums	1321
37	Moleküle	1199	41.1	Hadronen und Leptonen	1322
37:1	Die chemische Bindung	1200	41.2	Spin und Antiteilchen	1325
37.2	Mehratomige Moleküle	1206	41.3	Erhaltungssätze	1327
37.3	Energieniveaus und Spektren zweiatomiger Moleküle	1208	41.4	Quarks	1332
38	Festkörper	1219	41.5	Feldquanten	1335
38.1	Die Struktur von Festkörpern	1220	41.6	Die Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung	1335
38.2	Eine mikroskopische Betrachtung der elektrischen Leitfähigkeit	1223	41.7	Das Standardmodell	1336
38.3	Das Fermi-Elektronengas	1227	41.8	Die Entwicklung des Universums	1337
38.4	Die Quantentheorie der elektrischen Leitfähigkeit	1233	Anhang		
38.5	Das Bändermodell der Festkörper	1235	A	1344	
38.6	Halbleiter	1237	B	1347	
38.7	Halbleiterübergangsschichten und Bauelemente	1238	C	1350	
38.8	Supraleitung	1244	D	1352	
38.9	Die Fermi-Dirac-Verteilung	1247	Abbildungsnachweis	1359	
39	Relativitätstheorie	1255	Index	1363	
39.1	Das Newton'sche Relativitätsprinzip	1256			
39.2	Die Einstein'schen Postulate	1257			
39.3	Die Lorentz-Transformation	1258			
39.4	Uhrensynchronisation und Gleichzeitigkeit	1266			
39.5	Die Geschwindigkeitstransformation	1273			
39.6	Der relativistische Impuls	1276			
39.7	Die relativistische Energie	1278			
39.8	Die allgemeine Relativitätstheorie	1284			
40	Kernphysik	1293			
40.1	Eigenschaften der Kerne	1294			