

# Arbeitsbuch zur Theoretischen Physik



T. Fließbach und H. Walliser

# Arbeitsbuch zur Theoretischen Physik

Repetitorium und Übungsbuch

4. Auflage

Springer Spektrum, Heidelberg · Berlin · Oxford

Autoren:

Prof. Dr. Torsten Fließbach  
fliessbach@physik.uni-siegen.de

Priv.-Doz. Dr. Hans Walliser  
walliser@physik.uni-siegen.de

# Vorwort

Das vorliegende Buch bezieht sich auf die vier Lehrbücher [1, 2, 3, 4] zur Theoretischen Physik von T. Fließbach. Wir folgen einem häufig geäußerten Wunsch der Leser und präsentieren hier die Lösungen zu den in den Lehrbüchern aufgeführten Übungsaufgaben. Das Buch besteht aus den vier Teilen Mechanik, Elektrodynamik, Quantenmechanik und Statistische Physik, die jeweils einem Lehrbuch entsprechen. Jeder Teil in einem der Lehrbücher (mit mehreren Kapiteln) wird hier auf ein Kapitel reduziert.

In jedem Kapitel wird der relevante Stoff zunächst in der Form eines knappen Repetitoriums zusammengestellt. Er wird dabei soweit erklärt, dass die Zusammenhänge von dem Leser verstanden werden, der die Lehrbücher schon einmal durchgearbeitet hat. Dieser Repetitoriumsteil enthält in der Regel alle Formeln, die für die nachfolgenden Aufgaben benötigt werden. Das Repetitorium sollte insbesondere auch bei Prüfungsvorbereitungen nützlich sein. Auf die Zusammenfassung des Stoffs folgen die zugehörigen Übungsaufgaben und ihre Lösungen. Die Lösungen werden ausführlich dargestellt und diskutiert.

Der Sinn von Aufgaben liegt darin, dass sie vom Studenten möglichst eigenständig bearbeitet werden. Diese Arbeit muss natürlich vor der Lektüre der hier angebotenen Lösungen liegen! Unsere Musterlösungen dienen dann zur Kontrolle der selbst erarbeiteten Lösung. Außerdem dürfte die Diskussion des Lösungswegs und der Lösung zu einem vertieften Verständnis führen.

Die Übungsaufgaben sind weitgehend deckungsgleich mit denen der aktuellen Auflagen [1, 2, 3, 4] der Lehrbücher. Dieses Arbeitsbuch ist aber so gestaltet, dass es unabhängig von diesen Lehrbüchern benutzt werden kann; dazu trägt nicht zuletzt der Repetitoriumsteil bei. Die Auswahl der Aufgaben orientiert sich an dem Bezug zum Stoff der Lehrbücher; insofern haben wir keine umfassende Aufgabensammlung angestrebt. Eine Liste der Aufgaben steht am Ende des Inhaltsverzeichnisses. Aus diesem Aufgabenverzeichnis ergibt sich auch die Zuordnung zu den Aufgaben in den Lehrbüchern.

Für die vorliegende vierte Auflage wurden zahlreiche Korrekturen vorgenommen. Bei Daniel Hollarek, Gerhard Schäfer, Nikolas Schnellbächer, Peter Szilas und Herbert Weigel und weiteren Lesern früherer Auflagen bedanken wir uns für wertvolle Hinweise. Fehlermeldungen oder andere Anmerkungen sind jederzeit willkommen (vorzugsweise an [walliser@physik.uni-siegen.de](mailto:walliser@physik.uni-siegen.de) oder [fliessbach@physik.uni-siegen.de](mailto:fliessbach@physik.uni-siegen.de)). Eventuelle Korrekturen sind auf der Homepage [www2.uni-siegen.de/~flieba/](http://www2.uni-siegen.de/~flieba/) zu finden.

## Literaturangaben

- [1] T. Fließbach, *Mechanik*, 8. Auflage, Springer Spektrum, Heidelberg 2020
- [2] T. Fließbach, *Elektrodynamik*, 6. Auflage, Springer Spektrum, Heidelberg 2012
- [3] T. Fließbach, *Quantenmechanik*, 6. Auflage, Springer Spektrum, Heidelberg 2018
- [4] T. Fließbach, *Statistische Physik*, 6. Auflage, Springer Spektrum, Heidelberg 2018

# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Mechanik</b>	<b>1</b>
1	Elementare Newtonsche Mechanik . . . . .	1
2	Lagrangeformalismus . . . . .	21
3	Variationsprinzipien . . . . .	37
4	Zentralpotenzial . . . . .	56
5	Starrer Körper . . . . .	73
6	Kleine Schwingungen . . . . .	90
7	Hamiltonformalismus . . . . .	105
8	Kontinuumsmechanik . . . . .	116
9	Relativistische Mechanik . . . . .	125
<b>II</b>	<b>Elektrodynamik</b>	<b>143</b>
10	Tensoranalysis . . . . .	143
11	Elektrostatik . . . . .	158
12	Magnetostatik . . . . .	207
13	Maxwellgleichungen: Grundlagen . . . . .	221
14	Maxwellgleichungen: Anwendungen . . . . .	240
15	Elektrodynamik in Materie . . . . .	273
16	Elemente der Optik . . . . .	294
<b>III</b>	<b>Quantenmechanik</b>	<b>311</b>
17	Schrödingers Wellenmechanik . . . . .	311
18	Eigenwerte und Eigenfunktionen . . . . .	334
19	Eindimensionale Probleme . . . . .	359
20	Dreidimensionale Probleme . . . . .	373
21	Abstrakte Formulierung . . . . .	408
22	Operatorenmethode . . . . .	427
23	Näherungsmethoden . . . . .	457
24	Mehrteilchensysteme . . . . .	487

**IV Statistische Physik 507**

25	Mathematische Statistik . . . . .	507
26	Grundzüge der Statistischen Physik . . . . .	518
27	Thermodynamik . . . . .	545
28	Statistische Ensembles . . . . .	582
29	Spezielle Systeme . . . . .	602
30	Phasenübergänge . . . . .	642
31	Nichtgleichgewichtsprozesse . . . . .	662

**Register 669**

# Aufgabenverzeichnis

In der ersten Spalte ist die laufende Nummer der Aufgabe in diesem Buch angegeben. Die zweite Spalte gibt die Nummer der Aufgabe in einem der Lehrbücher [1, 2, 3, 4] an; so bezeichnet ed7.3 die Aufgabe 7.3 in der Elektrodynamik [2]. Die dritte Spalte gibt den Titel der Aufgabe an. Jeweils am Beginn eines Aufgabenblocks ist schließlich noch die Seitenzahl angegeben.

## Mechanik

### *Elementare Newtonsche Mechanik*

8

1.1	me 1.1	Beschleunigung in Kugelkoordinaten
1.2	me 2.1	Abstürzender Satellit
1.3	me 2.2	Regentropfen im Schwerefeld
1.4	me 2.3	Schwingungsperiode eines anharmonischen Oszillators
1.5	me 2.4	Einfluss der Zeitdefinition auf die Bewegungsgleichung
1.6	me 3.1	Erzwungene Schwingungen
1.7	me 3.2	Weg(un)abhängigkeit der Arbeit
1.8	me 3.3	Freier Fall mit Reibung
1.9	me 3.4	Förderband – Energiebilanz
1.10	me 4.1	Potenzial für Coulombkraft
1.11	me 6.1	Corioliskraft beim freien Fall

### *Lagrangeformalismus*

28

2.1	me 8.1	Massenpunkt auf Kurve im Schwerefeld
2.2	me 8.2	Massenpunkt auf Kugeloberfläche
2.3	me 8.3	Hantel auf konzentrischen Kreisen
2.4	me 8.4	Beschleunigte schiefe Ebene
2.5	me 9.1	Bewegung in kugelsymmetrischem Potenzial
2.6	me 9.2	Form der kinetischen Energie
2.7	me 9.3	Teilchen im elektromagnetischen Feld
2.8	me 10.1	Kleine Schwingungen des Doppelpendels
2.9	me 10.2	Hantel mit Reibungskraft
2.10	me 11.1	Totale Zeitableitung in der Lagrangefunktion

### *Variationsprinzipien*

42

3.1	me 12.1	Brachistochrone
3.2	me 12.2	Seifenhaut
3.3	me 13.1	Besetzungszahlen aus maximaler Entropie
3.4	me 13.2	Isoperimetrisches Problem
3.5	me 13.3	Geodätische Linien auf Kreiszylinder
3.6	me 14.1	Minimale Wirkung für Teilchen im Schwerefeld

3.7	me14.2	Äquivalenz von Lagrangefunktionen	
3.8	me15.1	Symmetrie des Potenzials $U = \alpha/r^2$	
3.9	me15.2	Teilchen im homogenen elektrischen Feld	
3.10	me15.3	Translationsinvarianz im Vielteilchensystem	
3.11	me15.4	Erhaltungsgrößen des sphärischen Oszillators	
<i>Zentralpotenzial</i>			62
4.1	me16.1	Zur Wahl der verallgemeinerten Koordinaten	
4.2	me16.2	Einsetzen von Erhaltungsgrößen in die Lagrangefunktion	
4.3	me16.3	Bahnkurven im sphärischen Oszillatorpotenzial	
4.4	me17.1	Lenzscher Vektor	
4.5	me17.2	Keplerbahnen in kartesischen Koordinaten	
4.6	me17.3	Erdsatellit auf Kreisbahn	
4.7	me17.4	Periheldrehung	
4.8	me18.1	Rutherfordstreuung	
4.9	me18.2	Streuquerschnitt für $U(r) = \alpha/r^2$	
4.10	me18.3	Streuung harter Kugeln	
<i>Starrer Körper</i>			79
5.1	me20.1	Steinerscher Satz	
5.2	me20.2	Trägheitstensor des homogenen Würfels	
5.3	me20.3	Trägheitstensor des homogenen Quaders	
5.4	me20.4	Trägheitstensor des homogenen Ellipsoids	
5.5	me20.5	Abplattung der Erde	
5.6	me21.1	Kontraktion eines Tensors	
5.7	me22.1	Symmetrischer Kreisel mit konstantem Drehmoment	
5.8	me22.2	Drehmoment senkrecht zum Drehimpuls	
5.9	me23.1	Zylinder mit Unwucht	
5.10	me23.2	Schaukelbewegung einer Halbkugel	
<i>Kleine Schwingungen</i>			93
6.1	me24.1	Kraftstoß auf Oszillator	
6.2	me25.1	Transformation zu Normalkoordinaten	
6.3	me26.1	Standardverfahren für Doppelpendel	
6.4	me26.2	Normalkoordinaten für Molekülschwingung	
6.5	me26.3	Lineare Kette mit festen Randbedingungen	
6.6	me26.4	Eindimensionales Kristallmodell I	
6.7	me26.5	Eindimensionales Kristallmodell II	
<i>Hamiltonformalismus</i>			109
7.1	me27.1	Hamiltonfunktion für Massenpunkt auf Kreiskegel	
7.2	me27.2	Hamiltonfunktion für Teilchen im elektromagnetischen Feld	
7.3	me27.3	Massenpunkt auf rotierender Stange	
7.4	me27.4	Ebenes Pendel im Phasenraum	
7.5	me27.5	Liouvillescher Satz	
7.6	me28.1	Beispiel für kanonische Transformation	
7.7	me28.2	Erzeugende für kanonische Transformation	

<i>Kontinuumsmechanik</i>	121
8.1 me30.1	Saitenschwingung für gegebene Anfangsbedingungen
8.2 me30.2	Lösungsmethode nach d'Alembert
8.3 me32.1	Verallgemeinerung der Bernoulli-Gleichung
8.4 me32.2	Lagrangedichte für inkompressible Flüssigkeit
<i>Relativistische Mechanik</i>	131
9.1 me34.1	Inverse Lorentztransformation
9.2 me34.2	Matrixschreibweise für Wegelement
9.3 me35.1	Lebensdauer von Myonen
9.4 me35.2	Momentaufnahme einer vorbeifliegenden Kugel
9.5 me35.3	Zeitverschiebung für Satelliten
9.6 me37.1	Levi-Civita-Tensor im Minkowskiraum
9.7 me38.1	Konstanz von $u^\alpha u_\alpha$
9.8 me39.1	Kinetische Energie im Schwerpunkt- und Laborsystem
9.9 me39.2	Relativistische Bewegung im elektrischen Feld
9.10 me39.3	Uhrzeit in beschleunigtem System
9.11 me40.1	Erhaltungsgrößen der relativistischen Lagrangefunktion
9.12 me40.2	Relativistische Lagrangefunktion für Teilchen im Feld
9.13 me40.3	Relativistische Hamiltonfunktion für Teilchen im Feld
<b>Elektrodynamik</b>	
<i>Tensoranalysis</i>	148
10.1 ed1.1	Verifikation des Stokesschen Satzes
10.2 ed1.2	Verifikation des Gaußschen Satzes
10.3 ed1.3	Elliptische Zylinderkoordinaten
10.4 ed1.4	Rotation für orthogonale Koordinaten
10.5 ed1.5	Divergenz für orthogonale Koordinaten
10.6 ed2.1	Rechnen mit Gradient, Divergenz und Rotation
10.7 ed2.2	Tensor zweiter Stufe
10.8 ed2.3	Levi-Civita-Tensor
10.9 ed2.4	Produktregel für den Nabla-Operator
10.10 ed2.5	Rotation des Gradienten
10.11 ed2.6	Kontraktion zweier Levi-Civita-Tensoren
10.12 ed3.1	$\delta$ -Funktion als Funktionenfolge
10.13 ed3.2	Integraldarstellung der $\delta$ -Funktion
10.14 ed3.3	Darstellung der $\delta$ -Funktion als Summe
10.15 ed3.4	$\delta$ -Funktion einer Funktion
10.16 ed4.1	Lorentztensor zweiter Stufe
<i>Elektrostatik</i>	169
11.1 ed5.1	Ladungsdichte für Kugelschale und Kreisscheibe
11.2 ed6.1	Gaußsches Gesetz: Punktladung in einer Kugel
11.3 ed6.2	Homogen geladene Kugel
11.4 ed6.3	Homogen geladener Kreiszylinder

11.5	ed6.4	Elektrostatisches Potenzial des Wasserstoffatoms
11.6	ed6.5	NaCl-Kristall
11.7	ed6.6	Parallele geladene Drähte
11.8	ed6.7	Homogen geladener dünner Stab
11.9	ed7.1	Poisson-Gleichung auf ein- und zweidimensionalem Gitter
11.10	ed7.2	Poisson-Gleichung auf dem Gitter: Hohler Metallwürfel
11.11	ed7.3	Durch Metallplatten begrenztes Volumen I
11.12	ed7.4	Durch Metallplatten begrenztes Volumen II
11.13	ed7.5	Variationsprinzip für die Feldenergie
11.14	ed8.1	Punktladung vor geerdeten Metallplatten
11.15	ed8.2	Punktladung vor Metallkugel
11.16	ed8.3	Kugelkondensator
11.17	ed8.4	Plattenkondensator auf dem Gitter
11.18	ed8.5	Komplexes Potenzial
11.19	ed8.6	Potenzialströmung um eine bewegte Kugel
11.20	ed8.7	Wärmeleitungsgleichung
11.21	ed9.1	Vollständigkeitsrelation für Sinusfunktionen
11.22	ed9.2	Legendre-Polynom aus der Rekursionsformel
11.23	ed9.3	Legendre-Differentialgleichung
11.24	ed9.4	Normierung der Legendre-Polynom
11.25	ed9.5	Laplace-Gleichung in kartesischen und Zylinderkoordinaten
11.26	ed10.1	Homogen geladener Kreisring
11.27	ed10.2	Zwei parallele Kreisringe
11.28	ed10.3	Homogen geladene Kreisscheibe
11.29	ed10.4	Homogen geladenes Rotationsellipsoid
11.30	ed11.1	Zugeordnete Legendre-Polynom
11.31	ed11.2	Entwicklung des Skalarprodukts nach Kugelfunktionen
11.32	ed11.3	Kugelschale mit vorgegebenem Potenzial
11.33	ed12.1	Multipole des homogen geladenen Stabs
11.34	ed12.2	Singularität des Punktdipolfelds
11.35	ed12.3	Kartesische und sphärische Quadrupolkomponenten
11.36	ed12.4	Quadrupol-Tensor von Rotationsellipsoid und Kreiszylinder

*Magnetostatik*

210

12.1	ed13.1	Geschwindigkeit der Metallelektronen
12.2	ed14.1	Stromdurchflossener Hohlzylinder
12.3	ed14.2	Stromdurchflossener Draht
12.4	ed14.3	Zylinderspule
12.5	ed15.1	Lokalisierte Stromverteilung
12.6	ed15.2	Zylindersymmetrische Stromverteilung
12.7	ed15.3	Stromdurchflossene Leiterschleife
12.8	ed15.4	Helmholtz-Spulen
12.9	ed15.5	Rotierende, homogen geladene Kugel
12.10	ed15.6	Oberflächenströme der homogen magnetisierten Kugel
12.11	ed15.7	Kleiner Permanentmagnet

<i>Maxwellgleichungen: Grundlagen</i>	227
13.1 ed16.1	Induktion in bewegter rechteckiger Leiterschleife
13.2 ed16.2	Induktion in bewegter kreisförmiger Leiterschleife
13.3 ed16.3	Induktion im rotierenden Kreisring
13.4 ed16.4	Magnetfeld im sich entladenden Plattenkondensator
13.5 ed16.5	Felddrehimpuls der rotierenden geladenen Kugel
13.6 ed17.1	Fouriertransformation der Wellengleichung
13.7 ed17.2	Lösung der eindimensionalen Wellengleichung
13.8 ed18.1	Relativistische Bewegungsgleichungen
13.9 ed18.2	Teilchen im konstanten elektrischen Feld
13.10 ed18.3	Teilchen im konstanten magnetischen Feld
13.11 ed18.4	Homogene Maxwellgleichungen
13.12 ed18.5	Ladung als Lorentzskalar
13.13 ed19.1	Eichtransformation
13.14 ed19.2	Erhaltung des Viererimpulses
<i>Maxwellgleichungen: Anwendungen</i>	251
14.1 ed20.1	Ebene elektromagnetische Welle
14.2 ed20.2	Eindimensionales Wellenpaket
14.3 ed20.3	Zirkular polarisiertes Wellenpaket
14.4 ed22.1	Invarianten des elektromagnetischen Felds
14.5 ed22.2	Felder einer vorbeifliegenden Ladung
14.6 ed22.3	Energiestrom einer gleichförmig bewegten Ladung
14.7 ed22.4	Ladung ist unabhängig von der Geschwindigkeit
14.8 ed22.5	Elektromagnetische Massen der bewegten geladenen Kugel
14.9 ed22.6	Zur Aberration
14.10 ed23.1	Retardierte Potenziale der gleichförmig bewegten Ladung
14.11 ed24.1	Periodische Ladungsdichte
14.12 ed24.2	Geladenes Teilchen auf Kreisbahn
14.13 ed24.3	Mehrere geladene Teilchen auf Kreisbahn
14.14 ed24.4	Magnetische Dipol- und elektrische Quadrupolstrahlung
14.15 ed24.5	Antenne mit angelegter Wechselspannung
14.16 ed24.6	Antennengitter
14.17 ed24.7	Bewegungsgleichung mit Strahlungskraft
14.18 ed25.1	Klassisches Wasserstoffatom
14.19 ed25.2	Strukturfunktion für kubisches Gitter
14.20 ed26.1	Magnetfeld im Kondensator
14.21 ed26.2	Schwingkreis
<i>Elektrodynamik in Materie</i>	285
15.1 ed30.1	Punktladung und Dielektrikum
15.2 ed30.2	Potenzial aus externer Ladungsdichte und Polarisation
15.3 ed30.3	Homogen polarisierte Kugel
15.4 ed31.1	Dipoleinstellung im thermischen Gleichgewicht
15.5 ed31.2	Leitfähigkeit in SI-Einheiten
15.6 ed32.1	Vektorpotenzial aus externer Stromdichte und Magnetisierung
15.7 ed32.2	Homogen magnetisierte Kugel

- 15.8 ed32.3 Magnetisierung durch äußeres Feld  
 15.9 ed32.4 Hochpermeable Kugelschale im äußeren Feld

- Elemente der Optik* 300

- 16.1 ed36.1 Streuung am Strichgitter  
 16.2 ed37.1 Komplexer Brechungsindex  
 16.3 ed37.2 Totalreflexion  
 16.4 ed37.3 Fresnelsche Formeln für polarisiertes Licht  
 16.5 ed37.4 Alternative Form der Fresnelschen Formeln  
 16.6 ed37.5 Regenbogen  
 16.7 ed37.6 Alternative Herleitung des Brechungsgesetzes  
 16.8 ed38.1 Brechungsgesetz aus dem Fermatschen Prinzip  
 16.9 ed38.2 Ortsabhängiger Brechungsindex

## Quantenmechanik

- Schrödingers Wellenmechanik* 319

- 17.1 qm1.1 Interferenz  
 17.2 qm1.2 Comptoneffekt  
 17.3 qm3.1 Eichinvarianz  
 17.4 qm4.1 Kontinuitätsgleichung für komplexes Potenzial  
 17.5 qm4.2 Kontinuitätsgleichung für 2-Elektronensystem  
 17.6 qm5.1 Ortsoperator in der Impulsdarstellung  
 17.7 qm5.2 Schrödingergleichung in der Impulsdarstellung  
 17.8 qm5.3 Harmonischer Oszillator in der Impulsdarstellung  
 17.9 qm5.4 Impulserwartungswert für reelle Wellenfunktion  
 17.10 qm5.5 Wignertransformierte  
 17.11 qm6.1 Kommutator hermitescher Operatoren  
 17.12 qm6.2 Ersetzungsregel für nichtvertauschende Größen  
 17.13 qm6.3 Zeitumkehrinvarianz  
 17.14 qm7.1 Unschärferelation für Wassertropfen  
 17.15 qm7.2 Poor man's oscillator  
 17.16 qm7.3 Gleichheitszeichen in der Unschärferelation

- Eigenwerte und Eigenfunktionen* 344

- 18.1 qm10.1 Eigenwertgleichung für Ortsoperator  
 18.2 qm10.2 Dreidimensionaler Paritätsoperator  
 18.3 qm11.1 Phasenraumvolumen des Oszillators  
 18.4 qm12.1 Lennard-Jones-Potenzial  
 18.5 qm12.2 Konstruktion von Oszillatorwellenfunktionen  
 18.6 qm12.3 Explizite Darstellung der Hermitepolynome  
 18.7 qm12.4 Oszillator mit Wand  
 18.8 qm12.5 Oszillator im elektrischen Feld  
 18.9 qm12.6 Erzeugende Funktion für Hermitepolynome  
 18.10 qm13.1 Dreidimensionaler Kasten  
 18.11 qm13.2 Entartung im dreidimensionalen Oszillator  
 18.12 qm14.1 Vollständigkeit der Oszillatorenfunktionen

- 18.13 qm15.1 Zeitabhängige Lösung im Potenzialtopf  
 18.14 qm15.2 Gaußpaket im Oszillator  
 18.15 qm15.3 Ehrenfest-Gleichungen  
 18.16 qm16.1 Floquet-Theorem

*Eindimensionale Probleme*

363

- 19.1 qm19.1 Reflexion und Transmission für Deltapotenzial  
 19.2 qm19.2 Molekülmodell  
 19.3 qm19.3 Energieband im periodischen Potenzial  
 19.4 qm19.4 Vollständigkeit der Deltapotenzial-Lösungen  
 19.5 qm20.1 Reflexion und Transmission für Potenzialtopf  
 19.6 qm21.1 Transmission durch Potenzialbarriere

*Dreidimensionale Probleme*

383

- 20.1 qm23.1 Kommutatorrelationen für den Drehimpuls  
 20.2 qm23.2 Drehimpulsoperatoren in Kugelkoordinaten  
 20.3 qm25.1 Zu den Besselfunktionen  
 20.4 qm25.2 Deuteron  
 20.5 qm26.1 Streuwelle für repulsiven Kasten  
 20.6 qm26.2 Woods-Saxon-Potenzial  
 20.7 qm27.1 Streulänge für das Kastenpotenzial  
 20.8 qm27.2 Niederenergieentwicklung für die Streuphase  
 20.9 qm27.3 Streuung an der harten Kugel  
 20.10 qm27.4 Streuung am Potenzialwall  
 20.11 qm27.5 Nukleon-Nukleon-Streuung im Singulett-Zustand  
 20.12 qm28.1 Rekursionsformel für Laguerre-Polynome  
 20.13 qm28.2 Zweidimensionaler harmonischer Oszillator  
 20.14 qm28.3 Landauniveaus  
 20.15 qm28.4 Anisotroper harmonischer Oszillator  
 20.16 qm29.1 Virialsatz für Wasserstoffproblem  
 20.17 qm29.2 Wasserstoffradialfunktionen zu maximalem Drehimpuls  
 20.18 qm29.3 Zeeman-Effekt  
 20.19 qm29.4 Klein-Gordon-Gleichung

*Abstrakte Formulierung*

413

- 21.1 qm31.1 Impuls- und Ortsoperator in der Impulsdarstellung  
 21.2 qm31.2 Produkt zweier Operatoren  
 21.3 qm32.1 Unitärer Operator  
 21.4 qm32.2 Oszillator in kartesischen und sphärischen Koordinaten  
 21.5 qm33.1 Ammoniakmolekül im elektrischen Feld  
 21.6 qm33.2 Butadienmolekül  
 21.7 qm33.3 Benzolmolekül  
 21.8 qm33.4 Neutrale Kaonen

*Operatorenmethode*

434

- 22.1 qm34.1 Norm des Oszillatorenzustands  $\hat{a}|n\rangle$   
 22.2 qm34.2 Matrixdarstellungen für harmonischen Oszillator  
 22.3 qm34.3 Kommutator in Matrixdarstellung

22.4	qm34.4	Matrixelemente von $\hat{x}$ , $\hat{x}^2$ und $\hat{x}^3$
22.5	qm34.5	Summenregel
22.6	qm34.6	Impulsdarstellung der Oszillatorenzustände
22.7	qm34.7	Grundzustand des dreidimensionalen Oszillators
22.8	qm34.8	Kohärenter Zustand
22.9	qm35.1	Zum Heisenbergbild
22.10	qm35.2	Wellenpaket im eindimensionalen Oszillator
22.11	qm36.1	Ortsdarstellung für Drehimpuls $1/2$
22.12	qm36.2	Matrixdarstellung für Drehimpuls $l = 0$ und $l = 2$
22.13	qm36.3	Kommutatorrelation in Matrixdarstellung
22.14	qm37.1	Eigenwertgleichung für Spin
22.15	qm37.2	Spinpräzession im Magnetfeld
22.16	qm37.3	Zu den Pauli-Matrizen
22.17	qm37.4	Polarisation eines Teilchenstrahls
22.18	qm38.1	Multiplizität der Drehimpulszustände
22.19	qm38.2	Kopplung von Bahndrehimpuls und Spin
22.20	qm38.3	Kopplung zweier Spin-1 Teilchen
22.21	qm38.4	Zwei ungekoppelte harmonische Oszillatoren
22.22	qm38.5	Hamiltonoperator für zwei Spins $1/2$

*Näherungsmethoden*

465

23.1	qm39.1	Oszillatoren mit quadratischer Störung
23.2	qm39.2	Oszillatoren mit kubischer Störung
23.3	qm39.3	Oszillatoren mit quartischer Störung
23.4	qm39.4	Endliche Ausdehnung des Atomkerns
23.5	qm41.1	Wasserstoffatom im äußeren Magnetfeld
23.6	qm41.2	Spin-Bahn-Kopplung im Atomkern
23.7	qm41.3	Pionisches Atom
23.8	qm42.1	Zeitabhängige Störung im Zweizustandssystem
23.9	qm43.1	Dipolauswahlregeln
23.10	qm43.2	Intensitätsverhältnis beim Übergang $2p \rightarrow 1s$
23.11	qm43.3	Photoeffekt
23.12	qm44.1	Variationsrechnung für Wasserstoffatom
23.13	qm44.2	Variationsrechnung für sphärischen Oszillatoren
23.14	qm44.3	Variationsrechnung für Stark-Effekt
23.15	qm45.1	Ladungsformfaktor in Bornscher Näherung

*Mehrteilchensysteme*

493

24.1	qm47.1	Schalenmodell des Atomkerns
24.2	qm48.1	Drehimpuls des $(1s)^2 2p$ -Zustands
24.3	qm48.2	Hundsche Regel
24.4	qm48.3	Heliumatom
24.5	qm48.4	Abschirmung im Heliumatom
24.6	qm49.1	Intensitäten im Raman-Spektrum
24.7	qm49.2	$H_2^+$ -Molekül
24.8	qm49.3	Morsepotenzial

**Statistische Physik***Mathematische Statistik*

509

25.1	st1.1	Unentdeckte Druckfehler
25.2	st1.2	Gemeinsamer Geburtstag
25.3	st2.1	Drei Richtige im Lotto
25.4	st3.1	Näherungsausdruck für Fakultät
25.5	st3.2	Abschätzung einer Korrelation
25.6	st3.3	Poissonverteilung
25.7	st3.4	Random walk und Diffusionsgleichung
25.8	st4.1	Überlagerung zweier Gaußverteilungen
25.9	st4.2	Summe von zwei Zufallsvariablen

*Grundzüge der Statistischen Physik*

530

26.1	st5.1	Phasenraum des Oszillators
26.2	st6.1	Exponentialfunktion mit sehr großem Exponenten
26.3	st6.2	Zustandssumme für Gasgemisch
26.4	st6.3	Volumen der $n$ -dimensionalen Kugel
26.5	st6.4	Ideales Spinsystem
26.6	st8.1	Ideales Gas in einer Kugel
26.7	st8.2	Heizen im Winter
26.8	st9.1	Entropieänderung bei Durchmischung
26.9	st10.1	Druckbeiträge in einem Gasgemisch
26.10	st11.1	Entropieänderung bei Wärmeaustausch I
26.11	st11.2	Entropieänderung bei Wärmeaustausch II
26.12	st11.3	Entropie eines Gummibands
26.13	st12.1	Kurvendiskussion für $f(x) = x - 1 - \ln x$
26.14	st12.2	Entropieänderung bei Wärmeaustausch III
26.15	st13.1	Magnetisierung im idealen Spinsystem
26.16	st13.2	Entropie und Temperatur im Zweiniveausystem

*Thermodynamik*

555

27.1	st15.1	Wegintegral und vollständiges Differenzial
27.2	st16.1	Kompressibilität und Schallgeschwindigkeit
27.3	st16.2	Spezielle Volumen-Druck-Relation
27.4	st16.3	Entropie des idealen Gases
27.5	st16.4	Durchmischung eines Gases
27.6	st17.1	Zustandsgleichung für volumenunabhängige Energie
27.7	st17.2	Spezielle Zustandsgleichung
27.8	st17.3	Energiedichte des Photonengases
27.9	st17.4	Thermodynamische Relationen aus freier Enthalpie
27.10	st17.5	Thermodynamische Relationen aus Enthalpie
27.11	st17.6	Extremalbedingung für Enthalpie
27.12	st17.7	Dichteprofil der Erdatmosphäre
27.13	st17.8	Entropie, Wärmekapazität und Zustandsgleichung
27.14	st17.9	Differenz $C_P - C_V$ für Festkörper
27.15	st17.10	Differenz $C_P - C_V$ für van der Waals-Gas

27.16	st18.1	Isotherme quasistatische Expansion
27.17	st18.2	Adiabatische Expansion des van der Waals-Gases
27.18	st18.3	Expansionskoeffizient des van der Waals-Gases
27.19	st18.4	Inversionskurve im Joule-Thomson-Prozess
27.20	st19.1	Effektivität eines Kühlschranks
27.21	st19.2	Carnotprozess mit idealem Gas
27.22	st19.3	Spezieller Kreisprozess
27.23	st19.4	Stirling-Prozess mit idealem Gas
27.24	st20.1	Maxwellrelationen für großkanonisches Potenzial
27.25	st20.2	Differenzial für Energie pro Teilchen
27.26	st20.3	Chemisches Potenzial für ideales Gas
27.27	st20.4	Ableitung der Duhem-Gibbs-Relation
27.28	st21.1	Gefrierpunktterniedrigung beim Schlittschuhlaufen?
27.29	st21.2	Dampfdruckkurve aus Clausius-Clapeyron-Gleichung
27.30	st21.3	Expansionskoeffizient entlang der Dampfdruckkurve
27.31	st21.4	Koexistenzkurve für zwei gasförmige Phasen
27.32	st21.5	Sieden einer Salzlösung
27.33	st21.6	Gelöster Stoff in beiden Phasen

*Statistische Ensembles*

587

28.1	st22.1	Energieschwankung im kanonischen Ensemble
28.2	st22.2	Teilchenzahlenschwankung im großkanonischen Ensemble
28.3	st23.1	Entropie für verschiedene Makrozustände
28.4	st23.2	Maximum der Entropie unter Nebenbedingungen
28.5	st24.1	Wärmekapazität im Zweiniveausystem
28.6	st24.2	Wärmekapazität für $N$ Teilchen im Oszillator
28.7	st24.3	Geschwindigkeitsverteilung für $v_x$
28.8	st24.4	Verschiedene Mittelwerte für Maxwellverteilung
28.9	st24.5	Verteilung der Relativgeschwindigkeiten
28.10	st24.6	Isotopentrennung
28.11	st24.7	Konvektives Gleichgewicht
28.12	st24.8	Energieschwankung im idealen Gas
28.13	st25.1	Gibbs-Paradoxon

*Spezielle Systeme*

614

29.1	st26.1	Adiabatische Entmagnetisierung
29.2	st26.2	Spezifische Wärme und Suszeptibilität im Spinsystem
29.3	st26.3	Allgemeines ideales Spinsystem
29.4	st27.1	Vibrationsanteil für hohe und tiefe Temperaturen
29.5	st27.2	Anharmonische Korrekturen im Vibrationsanteil
29.6	st27.3	Rotationsanteil für die Moleküle $H_2$ , $D_2$ und $HD$
29.7	st27.4	Massenwirkungsgesetz
29.8	st28.1	Van der Waals-Gleichung auf Molzahl bezogen
29.9	st28.2	Virialkoeffizienten aus Potenzial
29.10	st28.3	Virialkoeffizienten für Lennard-Jones-Potenzial
29.11	st29.1	Quantenzahlen im unendlichen Potenzialkasten
29.12	st29.2	Zustandssummen für drei Teilchen

29.13	st29.3	Schwankung der Besetzungszahlen im Quantengas
29.14	st31.1	Spezifische Wärme des Bosegases für hohe Temperaturen
29.15	st31.2	Bosegas im Oszillator
29.16	st31.3	Bosegas in zwei Dimensionen
29.17	st32.1	Geschwindigkeits-Mittelwerte im Fermigas
29.18	st32.2	Relativistisches ideales Fermigas
29.19	st32.3	Strom aus Glühkathode
29.20	st32.4	Paulischer Paramagnetismus
29.21	st32.5	Temperaturabhängige Korrektur zum Paramagnetismus
29.22	st33.1	Schwingungsmoden der linearen Kette
29.23	st33.2	Spezifische Wärme des Phononengases für tiefe Temperaturen
29.24	st33.3	Mittlere Phononenanzahl im Debye-Modell
29.25	st33.4	Einstein-Modell
29.26	st34.1	Mittlere Photonenanzahl im Strahlungshohlraum
29.27	st34.2	Temperaturunterschied Europa-Äquator
29.28	st34.3	Bereich des sichtbaren Lichts in der Planckverteilung
29.29	st34.4	Oberflächentemperatur der Sonne

<i>Phasenübergänge</i>	651
------------------------	-----

30.1	st35.1	Singularität durch unendliche Summe
30.2	st36.2	Freie Energie im Weissschen Modell
30.3	st36.3	Spezifische Wärme im Weissschen Modell
30.4	st37.1	Dimensionslose van der Waals-Gleichung
30.5	st37.2	Van der Waals-Gleichung für Stickstoff
30.6	st37.3	Energie und Entropie des van der Waals-Gases
30.7	st37.4	Dieterici-Gas
30.8	st40.1	Kritische Exponenten des van der Waals-Gases
30.9	st40.2	Landau-Energie für das van der Waals-Gas

<i>Nichtgleichgewichtsprozesse</i>	666
------------------------------------	-----

31.1	st42.1	Kontinuitätsgleichung für Teilchendichte
31.2	st43.1	Lösung der Diffusionsgleichung
31.3	st43.2	Temperaturschwankung im Erdboden

