

Gunnar Lindström   Rudolf Langkau  
Wolfgang Scobel

---

# Physik kompakt 3

Quantenphysik  
und Statistische Physik

Zweite Auflage  
Mit 170 Abbildungen



Springer

Professor Dr. Dr. h.c. Gunnar Lindström  
Professor Dr. Rudolf Langkau  
Professor Dr. Wolfgang Scobel  
Universität Hamburg  
Institut für Experimentalphysik  
Luruper Chaussee 149  
22761 Hamburg, Deutschland  
e-mail: [gunnar.lindstroem@desy.de](mailto:gunnar.lindstroem@desy.de)  
[wolfgang.scobel@desy.de](mailto:wolfgang.scobel@desy.de)

---

Die erste Auflage erschien in zwei Teilbänden in dem 6teiligen Werk *Physik kompakt* in der Reihe: Vieweg Studium – Grundkurs Physik, herausgegeben von Hanns Ruder, bei Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH

---

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme:  
Physik kompakt. -  
Berlin ; Heidelberg ; New York ; Barcelona ; Hongkong ; London ; Mailand ; Paris ; Tokio : Springer  
(Springer-Lehrbuch)  
Bd. 3. Quantenphysik und Statistische Physik / Gunnar Lindström ... - 2. Aufl. - 2002  
ISBN 3-540-43139-X

ISBN 3-540-43139-X 2. Auflage Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York  
ein Unternehmen der BertelsmannSpringer Science+Business Media GmbH

<http://www.springer.de>

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002  
Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Datenkonvertierung von Fa. LE-TeX, Leipzig  
Einbandgestaltung: *design & production* GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

SPIN: 10860389 56/3141/ba - 5 4 3 2 1 0

---

# Inhaltsverzeichnis

---

## Teil I Quantenphysik

---

<b>1</b>	<b>Grenzen der klassischen Physik</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Atomarer Aufbau der Materie</b> .....	<b>7</b>
2.1	Atom- und Elektronen-Hypothese .....	7
2.2	Physikalische Begriffe und Zusammenhänge .....	11
2.3	Experimentelle Methoden zur Bestimmung der LOSCHMIDT-Zahl und der Elementarladung .....	12
<b>3</b>	<b>Quantennatur elektromagnetischer Strahlung</b> .....	<b>21</b>
3.1	Strahlung des Schwarzen Körpers .....	21
3.2	Spezifische Wärme fester Substanzen .....	28
3.3	Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung mit Materie: Fotoeffekt, Compton-Effekt, Paareffekt. Das Photon .....	30
<b>4</b>	<b>Wellennatur der Teilchenstrahlung</b> .....	<b>41</b>
4.1	Hypothese von DE BROGLIE .....	41
4.2	Experimente zum Nachweis von Materiewellen .....	44
4.3	Darstellung von Materiewellen, Wellenpakete .....	50
<b>5</b>	<b>Welle-Teilchen-Dualismus und Unschärferelation</b> .....	<b>55</b>
5.1	Welle-Teilchen-Dualismus .....	55
5.2	Unschärferelation .....	62
5.3	Beispiel zur Energie-Zeit-Unschärfe .....	68
<b>6</b>	<b>Atomspektren und Atommodelle</b> .....	<b>79</b>
6.1	Atomare Linienspektren .....	79
6.2	Ältere Atommodelle (Historischer Rückblick) .....	81
6.3	BOHRsches Atommodell (1913) .....	86
<b>7</b>	<b>Wellenfunktion</b> .....	<b>93</b>
7.1	Wiederholung und Zusammenfassung .....	93
7.2	Erläuterung des Begriffs Wahrscheinlichkeit .....	94

7.3	Wellenfunktion zur Beschreibung eines quantenmechanischen Zustands, allgemeiner Fall .....	96
<b>8</b>	<b>Schrödinger-Gleichung</b> .....	101
8.1	Die Wellenfunktion als Lösung der Differentialgleichung, axiomatische Bedeutung, Eigenschaften .....	101
8.2	Die Wellengleichung der klassischen Physik als Konsequenz der gültigen Axiome .....	102
8.3	Plausibilitätsbetrachtung zum Verständnis der SCHRÖDINGER-Gleichung .....	105
8.4	Eigenschaften der SCHRÖDINGER-Gleichung und allgemeine Konsequenzen für ihre Lösungen .....	108
<b>9</b>	<b>Erwartungswerte, Operatoren, Eigenwerte, Eigenfunktionen</b> .....	117
9.1	Erwartungswerte .....	117
9.2	Operatoren, Korrespondenzprinzip .....	121
9.3	Eigenwertgleichung, Eigenwerte und Eigenfunktionen .....	124
9.4	Entwicklung einer Wellenfunktion nach Eigenfunktionen eines hermiteschen Operators .....	129
9.5	Zusammenfassung der Axiome der Quantenmechanik .....	132
<b>10</b>	<b>Heisenbergsche Unschärferelation und Ehrenfest-Theorem als Konsequenz der Axiome</b> .....	135
10.1	HEISENBERGSche Unschärferelation .....	135
10.2	EHRENFEST-Theorem .....	136
<b>11</b>	<b>Lösung der SCHRÖDINGER-Gleichung in einfachen Beispielen</b> .....	139
11.1	Streuung freier Teilchen an einer Potentialstufe .....	139
11.2	Tunneleffekt durch eine Potentialbarriere .....	147
11.3	Kastenpotential, gebundene Zustände .....	153
11.4	Eindimensionaler harmonischer Oszillator .....	159
11.5	Gebundene und ungebundene Zustände, allgemeines .....	164
<b>12</b>	<b>Das Wasserstoff-Atom, Ein-Elektron-Systeme</b> .....	167
12.1	Aufstellung und Lösung der SCHRÖDINGER-Gleichung .....	167
12.2	Wellenfunktionen des Ein-Elektron-Systems .....	181
12.3	Emission und Absorption elektromagnetischer Strahlung, Auswahlregeln für Dipolstrahlung, Termschema .....	187
<b>13</b>	<b>Magnetisches Dipolmoment von Bahndrehimpuls und Eigendrehimpuls des Elektrons</b> .....	197
13.1	Bahndrehimpuls und magnetisches Moment, ZEEMAN-Effekt .....	197

13.2 Spin und magnetisches Moment des Elektrons, STERN-GERLACH-Experiment und RICHARDSON-EINSTEIN-DE HAAS-Effekt . . . . .	201
13.3 Spin-Bahn-Wechselwirkung, Feinstruktur . . . . .	204
<b>14 Mehr-Elektronen-Atome . . . . .</b>	<b>215</b>
14.1 Modell unabhängiger Teilchen . . . . .	215
14.2 Zentralfeld-Näherung, Abschirmung des Kernpotentials durch die Elektronenhülle . . . . .	218
14.3 Elektronen als ununterscheidbare = identische Teilchen. Antisymmetrische und symmetrische Wellenfunktion. Austausch-Wechselwirkung . . . . .	222
14.4 Berücksichtigung des Elektronenspins. Ortswellenfunktion, Spinwellenfunktion und Gesamtwellenfunktion. Antisymmetrie der Gesamtwellenfunktion. Elektronen als Fermionen . . . . .	225
14.5 Das Niveauschema des He-Atoms . . . . .	227
14.6 PAULI-Prinzip, Grundzustände der Viel-Elektronen-Atome. Periodisches System der Elemente . . . . .	229

---

**Teil II Statistische Physik**

---

<b>1 Quantenmechanische Grundlagen . . . . .</b>	<b>235</b>
<b>2 Verteilungen und Mikrozustände . . . . .</b>	<b>237</b>
<b>3 Die Wahrscheinlichkeit für einen Zustand . . . . .</b>	<b>243</b>
3.1 Grundsätzliches zum Begriff der Wahrscheinlichkeit . . . . .	243
3.2 Die Wahrscheinlichkeits-Hypothese . . . . .	244
<b>4 Der Gleichgewichtszustand . . . . .</b>	<b>247</b>
4.1 Allgemeine Vorbemerkungen . . . . .	247
4.2 Das Auffinden des Gleichgewichtszustandes . . . . .	247
4.3 Der Gleichgewichtszustand bei der BOLTZMANN-Statistik . . . . .	251
4.4 Der Gleichgewichtszustand bei der BOSE-Statistik . . . . .	252
4.5 Der Gleichgewichtszustand bei der FERMI-Statistik . . . . .	253
4.6 Formaler Vergleich der drei Verteilungen . . . . .	254
4.7 Zur Bedeutung der Parameter $\alpha$ und $\beta$ . . . . .	254
<b>5 Energieniveaus bei einem idealen Gas . . . . .</b>	<b>263</b>
5.1 Vorbemerkung . . . . .	263
5.2 Energieniveaus in einem eindimensionalen Potentialtopf . . . . .	263
5.3 Energieniveaus in einem dreidimensionalen Potentialtopf . . . . .	265

5.4	Quantenzustände im Impulsraum . . . . .	269
5.5	Zustandsdichte und Besetzungsdichte . . . . .	273
<b>6</b>	<b>Mittelwerte und Streuungen physikalischer Größen . . . . .</b>	<b>277</b>
6.1	Mittelwerte . . . . .	277
6.2	Schwankungen und Streuungen . . . . .	279
6.3	Streuung der Besetzungszahlen im Gleichgewichtszustand . . . . .	280
<b>7</b>	<b>Anwendungen des Modells des idealen Gases . . . . .</b>	<b>285</b>
7.1	Ideales Gas aus Massenpunkten . . . . .	285
7.1.1	Zustandssumme und Energie-Verteilung . . . . .	285
7.1.2	Betrachtungen im Phasenraum . . . . .	290
7.1.3	Druck und Zustandsgleichung . . . . .	295
7.1.4	Ideales Gas im Schwerefeld . . . . .	298
7.2	Ideales Gas aus zweiatomigen Molekülen . . . . .	301
7.2.1	Allgemeines . . . . .	301
7.2.2	Ideales Gas aus rotierenden zweiatomigen Molekülen . . . . .	303
7.2.3	Ideales Gas aus schwingenden zweiatomigen Molekülen . . . . .	307
7.2.4	Ideales Gas aus elektrischen Dipolen im elektrischen Feld . . . . .	310
7.3	Ideales Gas aus Photonen (Hohlraum-Strahlung) . . . . .	316
7.4	Ideales Gas aus Phononen (Wärmekapazität fester Körper) . . . . .	324
7.5	Ideales Gas aus Elektronen (Leitungselektronen in Metallen) . . . . .	334
7.6	Ideales Gas aus Nukleonen (FERMI-Gas-Modell der Atomkerne) . . . . .	346
<b>8</b>	<b>Der Nullte Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .</b>	<b>349</b>
<b>9</b>	<b>Der Erste Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .</b>	<b>353</b>
<b>10</b>	<b>Anwendung des Ersten Hauptsatzes bei der Beschreibung spezieller Zustandsänderungen . . . . .</b>	<b>361</b>
<b>11</b>	<b>Wärme­kraft­ma­schin­en . . . . .</b>	<b>367</b>
11.1	Allgemeine Vorbemerkungen . . . . .	367
11.2	Die STIRLING-Maschine . . . . .	368
11.3	Die CARNOT-Maschine . . . . .	373
11.4	Die Photonengas-Maschine . . . . .	377
<b>12</b>	<b>Die Entropie . . . . .</b>	<b>383</b>
12.1	Allgemeine Einführung des Begriffes . . . . .	383
12.2	Entropieänderungen an Beispielen ausgewählter Prozesse . . . . .	387
12.3	Die statistische Definition der Entropie . . . . .	395
12.4	Entropie und physikalische Korrektur der BOLTZMANNschen Zählung . . . . .	398

---

<b>13</b>	<b>Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik</b> . . . . .	405
<b>14</b>	<b>Der Übergang zum realen Gas</b> . . . . .	407
14.1	Vorbemerkung . . . . .	407
14.2	Der Virialsatz für ein Teilchensystem . . . . .	407
14.3	Das innere und das äußere Virial . . . . .	409
14.4	Die VAN DER WAALS'sche Näherung für das innere Virial . . .	412
14.5	Verflüssigung und Verdampfung . . . . .	416
14.6	Die innere Energie eines realen Gases in der VAN DER WAAL'schen Näherung . . . . .	424
14.7	Der JOULE-THOMSON-Effekt . . . . .	427
	<b>Sachwortverzeichnis</b> . . . . .	431