

# BERGMANN-SCHAEFER

## Lehrbuch der Experimentalphysik

Band IV, Teil 1

# Aufbau der Materie

Herausgegeben von H. Gobrecht

Autoren:

Klaus Becker, Hans Bucka, Jürgen Dietrich, Jürgen Geiger,  
Heinrich Gobrecht, Klaus Gobrecht, Achim Hese, Kurt Hunger,  
Konrad Ibel, Heinz Küsters, Martin Lambeck, Günther Lehner,  
Hilbert von Löhneysen, Horst Nelkowski, Dietrich Neubert,  
Udo Scherz, Rolf Seiwert †, Hugo Strunz, Ludwig Thomas,  
Roger Thull, Kurt Ueberreiter, Hans-Günther Wagemann,  
Burkhard Wende

**Physikalische Bibliothek**  
Fachbereich 5  
Technische Hochschule Darmstadt  
Hochschulstraße 2  
**D-6100 Darmstadt**

LBS 89 / 101



Walter de Gruyter · Berlin · New York · 1981

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort . . . . .	V
Autorenverzeichnis . . . . .	VII

## I. Kapitel. Einführung

von Prof. Dr.-Ing. Heinrich Gobrecht, Technische Universität Berlin

1. Historische Betrachtung . . . . .	1
2. Erkenntnisse und Arbeitsmethoden seit 1900 . . . . .	7
3. Die Forschung in der Zukunft . . . . .	13

## II. Kapitel. Die Elektronenhülle des Atoms

von Prof. Dr. rer. nat. Rolf Seiwert †, Technische Fachhochschule Berlin

1. Die ältere Atomtheorie	
1.1 Das Rutherford-Bohrsche Atommodell . . . . .	17
1.2 Das Energieniveauschema und die Spektralserien des Wasserstoffatoms . . . . .	24
1.3 Das Sommerfeldsche Atommodell . . . . .	26
1.4 Emissions- und Absorptionsprozesse . . . . .	29
2. Die Wellenmechanik des Atoms mit einem Elektron	
2.1 Die Wellenfunktion . . . . .	31
2.2 Die Operatoren einiger physikalischer Größen . . . . .	37
2.3 Die Eigenwerte und Eigenfunktionen der Operatoren der z-Komponente und des Quadrates des Drehimpulses . . . . .	42
2.4 Die Lösung der zeitunabhängigen Schrödinger-Gleichung . . . . .	45
2.5 Die Wahrscheinlichkeitsdichte . . . . .	51
3. Das magnetische Moment des Atoms mit einem Elektron	
3.1 Das zum Bahndrehimpuls gehörende magnetische Moment . . . . .	55
3.2 Der Stern-Gerlach-Versuch, der Elektronenspin, das zugehörige magnetische Moment und der Gesamtdrehimpuls des Elektrons . . . . .	59
3.3 Die relativistische und spinabhängige Korrektur der Energiewerte . . . . .	62
4. Die Emission und Absorption der Strahlung	
4.1 Die Übergangswahrscheinlichkeit und die Oszillatorenstärke . . . . .	65
4.2 Linienerweiterung . . . . .	70
4.3 Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeit $A_{\beta\alpha}$ . . . . .	72
5. Das Periodensystem der Elemente	
5.1 Das Pauli-Prinzip . . . . .	82
5.2 Das Ordnen der Elemente nach ihren chemischen Eigenschaften und der Elektro- nenzahl . . . . .	84
5.3 Die Anwendung des Paulischen Ausschließungsprinzips . . . . .	85
5.4 Der Atomradius und die Ionisierungsenergie . . . . .	91
6. Das Mehrelektronenatom	
6.1 Die LS-Kopplung und die Niveaubezeichnungen . . . . .	93
6.2 Parität, Auswahlregeln und Metastabilität . . . . .	98
6.3 Die zu einer Elektronenanordnung gehörenden Terme . . . . .	101

6.4	Die Wechselwirkungen in einem Mehrelektronenatom . . . . .	104
6.5	Die Abweichung vom Coulomb-Feld . . . . .	105
6.6	Die elektrostatische Wechselwirkung zwischen den Elektronen . . . . .	106
6.7	Die Spin-Bahn-Wechselwirkung . . . . .	109
6.8	Die Bedingungen für die LS- und die jj-Kopplung . . . . .	110
6.9	Die radiale Ladungsverteilung . . . . .	112
6.10	Die Atome der I. Gruppe des Periodensystems. . . . .	114
6.11	Das Heliumatom und die Atome der II. Gruppe des Periodensystems. . . . .	119
7.	Atome im homogenen Magnetfeld	
7.1	Der Landésche g-Faktor beim Zeeman-Effekt . . . . .	121
7.2	Der normale Zeeman-Effekt . . . . .	125
7.3	Der anomale Zeeman-Effekt . . . . .	129
7.4	Der Paschen-Back-Effekt . . . . .	130
7.5	Der Übergang vom Zeeman- zum Paschen-Back-Effekt . . . . .	133
7.6	Der Lamb-Shift . . . . .	135
7.7	Der Para- und der Diamagnetismus der Atome. . . . .	139
7.8	Der Hamilton-Operator für ein Elektron im Magnetfeld . . . . .	143
8.	Atome im homogenen elektrischen Feld	
8.1	Der Stark-Effekt beim Wasserstoffatom . . . . .	144
8.2	Der Stark-Effekt bei den Mehrelektronenatomen . . . . .	148
8.3	Die Herabsetzung der Ionisierungsenergie . . . . .	149
9.	Röntgenstrahlen	
9.1	Das Emissions- und das Absorptionsspektrum . . . . .	151
9.2	Die charakteristische Röntgenstrahlung. . . . .	152
9.3	Die Absorption der Röntgenstrahlen . . . . .	159
9.4	Der Auger-Effekt . . . . .	162
9.5	Röntgenbremsstrahlung. . . . .	164
10.	Elastische Stöße zwischen Atomen	
10.1	Der Stoßquerschnitt und die Stoßzahl . . . . .	168
10.2	Die Abhängigkeit der Wechselwirkungsenergie vom Abstand der Stoßpartner . . . . .	169
10.3	Die Bewegung der Stoßpartner im ortsfesten, Massenmittelpunkts- und Relativ-Koordinatensystem . . . . .	171
10.4	Die Abhängigkeit des Ablenkwinkels und des Streuwinkels vom Stoßparameter . . . . .	173
10.5	Der differentielle und der totale Streuquerschnitt. . . . .	175
10.6	Die Erzeugung von langsamen Atomstrahlen und die Messung des Teilchenflusses . . . . .	181
11.	Unelastische Stöße zwischen Atomen	
11.1	Übersicht über die Stoßprozesse, die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Stoßquerschnitte und die Spinerhaltung. . . . .	183
11.2	Apparaturen zur Untersuchung der Stoßanregung, der Stoßionisierung und des Ladungsaustauschs . . . . .	185
11.3	Anregende Stöße . . . . .	188
11.4	Ionisierende Stöße. . . . .	191
11.5	Der Ladungsaustausch . . . . .	194
11.6	Unelastische Stöße zwischen angeregten und unangeregten Atomen . . . . .	196
	Literatur zum II. Kapitel . . . . .	199

### III. Kapitel. Moleküle und Bindungsarten

von Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Geiger, Universität Kaiserslautern

1.	Einleitung . . . . .	203
2.	Elektronenbeugung an Molekülen . . . . .	207
3.	Bestimmung der Kernabstände aus Elektronenbeugungsuntersuchungen . . . . .	213
4.	Rotation eines starren Moleküls . . . . .	216
5.	Quantisierung der Rotation . . . . .	219
6.	Optische Übergänge zwischen Rotationsniveaus, Rotationspektren . . . . .	221
7.	Spektroskopie im Mikrowellenbereich . . . . .	223
8.	Thermische Besetzung von Rotationsniveaus. . . . .	225

9.	Der harmonische Oszillator als Modell für ein schwingendes Molekül . . . . .	227
10.	Quantisierung des linearen harmonischen Oszillators . . . . .	229
11.	Optische Übergänge zwischen Schwingungsniveaus . . . . .	232
12.	Schwingungen mehratomiger Moleküle, Normalschwingungen und Normalkoordinaten	236
13.	Schwingungsniveaus, Eigenfunktionen und Auswahlregeln für Schwingungsübergänge bei mehratomigen Molekülen. . . . .	244
14.	Torsionsschwingungen . . . . .	246
15.	Inversionsschwingungen . . . . .	247
16.	Der Ammoniak-Maser. . . . .	249
17.	Der Raman-Effekt. . . . .	252
18.	Der anharmonische Oszillator . . . . .	258
19.	Das Morse-Potential. . . . .	262
20.	Der nicht-starre Rotator, Zentrifugalverzerrung . . . . .	263
21.	Der schwingende Rotator. . . . .	265
22.	Elektronenzustände eines zweiatomigen Moleküls. . . . .	267
23.	Potentialkurven zweiatomiger Moleküle . . . . .	269
24.	Born-Oppenheimer-Theorem. . . . .	270
25.	Schwingungsstruktur eines Elektronenbandensystems . . . . .	273
26.	Intensitäten in einem Elektronenbandensystem . . . . .	274
27.	Rotationsstruktur eines Elektronenbandensystems, Bandenzweige und Bandkanten . .	280
28.	Symmetrie der Moleküleigenfunktion. . . . .	283
29.	Einfluß des Kernspins auf das Molekülspektrum. . . . .	286
30.	Molekülaufbau und Elektronenzustände . . . . .	288
31.	Molekülorbitale (MO) . . . . .	289
32.	Das Heitler-London-Verfahren (Valenzbindungs-Methode) am Beispiel des Wasserstoff-Moleküls . . . . .	302
33.	Vergleich von Valenzbindungs (VB)- und Molekülorbitalverfahren (MO). . . . .	309
34.	Bindungen in mehratomigen Molekülen. . . . .	309
35.	Aromatische Moleküle und konjugierte Doppelbindungen . . . . .	313
	Literatur zum III. Kapitel . . . . .	314

## IV. Kapitel. Flüssigkeiten

### A. Nichtelektrolytische Flüssigkeiten

von Prof. Dr. rer. nat. Kurt Ueberreiter, Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin-Dahlem

1.	Struktur der Flüssigkeiten . . . . .	317
2.	Ansätze zur statistischen Theorie des flüssigen Zustandes . . . . .	324
3.	Kinetische Eigenschaften der Flüssigkeiten. . . . .	328
	Literatur zum Abschnitt A. . . . .	334

### B. Hochpolymere Flüssigkeiten

von Prof. Dr. rer. nat. Kurt Ueberreiter, Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin-Dahlem

1.	Aufbau der Makromoleküle . . . . .	335
2.	Form der Makromoleküle. . . . .	336
3.	Mathematische Beschreibung der Gestalt eines Makromoleküls . . . . .	340
4.	Zustandsdiagramm der Polymeren. . . . .	345
5.	Gummielastischer Zustand der Polymeren . . . . .	347
6.	Der visko-elastische Zustand . . . . .	354
7.	Der flüssige Zustand. . . . .	356
	Literatur zum Abschnitt B. . . . .	358

**C. Eingefrorene Flüssigkeiten (Gläser)**

von Prof. Dr. rer. nat. Kurt Ueberreiter, Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft,  
Berlin-Dahlem

1. Struktur der Gläser . . . . .	359
2. Äußere Erscheinungen des Glasübergangs. . . . .	362
3. Theorien zur Glasbildung. . . . .	364
4. Glasumwandlung und Bau der Moleküle . . . . .	367
Literatur zum Abschnitt C . . . . .	368

**D. Flüssige Kristalle**

von Prof. Dr. rer. nat. Kurt Ueberreiter, Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft,  
Berlin-Dahlem

1. Arten von Flüssigkristallen . . . . .	369
2. Molekulare Ordnung der Flüssigkristalle . . . . .	370
3. Chemische Konstitution der Flüssigkristalle . . . . .	372
4. Technische Anwendung der Flüssigkristalle . . . . .	374
Literatur zum Abschnitt D. . . . .	378

**E. Elektrolytische Flüssigkeiten**

von Prof. Dr. Ing. Dr. rer. nat. habil. Roger Thull, Universität Erlangen-Nürnberg

1. Van't Hoff'sches Gesetz; Dissoziationstheorie von Svante Arrhenius . . . . .	379
2. Die Struktur elektrolytischer Flüssigkeiten. . . . .	385
Literatur zum Abschnitt E . . . . .	414

**V. Kapitel. Der feste Körper****1. Kristalle      a) Struktur**

von Prof. Dr. phil. habil. Dr. sc. techn. Hugo Strunz, Technische Universität Berlin

Das Raumgitter und die 230 Raumgruppen . . . . .	415
Strukturbestimmung . . . . .	430
Strukturtypen . . . . .	449
Literatur zum Abschnitt 1a . . . . .	453

**1. Kristalle      b) Gitterschwingungen**

von Prof. Dr. rer. nat. Udo Scherz, Technische Universität Berlin

1. Einleitung . . . . .	454
2. Zweiatomige lineare Kette . . . . .	455
3. Dispersionskurven der Kristalle . . . . .	458
4. Phononen. . . . .	459
5. Messung von Dispersionskurven durch Neutronenspektrometrie. . . . .	470
6. Spezifische Wärmekapazität . . . . .	473
Literatur zum Abschnitt 1b . . . . .	475

**1. Kristalle      c) Lichtabsorption und Dispersion**

von Prof. Dr.-Ing. Heinrich Gobrecht, Technische Universität Berlin

1. Einleitung . . . . .	476
2. Die optischen Konstanten . . . . .	477

2.1	Der Absorptionskoeffizient $\alpha$ und die Brechzahl $n$ . . . . .	477
2.2	Reflexionsgrad und Transmissionsgrad . . . . .	480
2.3	Dispersionstheorie . . . . .	481
2.4	Plasmaoszillation . . . . .	482
2.5	Die Oszillatorenstärke . . . . .	483
2.6	Streuung . . . . .	486
3.	Meßmethoden bei Kristallen . . . . .	487
3.1	Meßmethoden mit zwei unabhängigen Größen . . . . .	487
3.2	Reflexionsmessungen . . . . .	489
3.3	Meßmethoden mit einer Größe . . . . .	489
3.4	Die Kramers-Kronig-Relation (KKR) . . . . .	490
4.	Experimentelle Grundlagen und Technik . . . . .	492
4.1	Klassische Methoden der Spektroskopie . . . . .	493
4.2	Lichtleitwert $\Lambda$ . . . . .	495
4.3	Prismenspektrometer . . . . .	496
4.4	Gitterspektrometer . . . . .	496
4.5	Fabry-Perot-Interferometer . . . . .	497
4.6	Lichtstarke Spektroskopie hoher Auflösung . . . . .	497
4.7	Modulations-Spektroskopie . . . . .	502
4.8	Laser-Spektroskopie . . . . .	503
5.	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	504
5.1	Dielektrika . . . . .	505
5.2	Metalle . . . . .	510
5.3	Supraleiter . . . . .	513
5.4	Halbleiter . . . . .	514
6.	Magneto-optische Effekte . . . . .	521
6.1	Zyklotronresonanz . . . . .	521
6.2	Faraday- und Voigt-Effekt . . . . .	522
6.3	Magneto-oszillatorische Effekte . . . . .	523
7.	Kristallfeldaufspaltung . . . . .	528
8.	Raman- und Brillouin-Streuung . . . . .	531
9.	Nichtlineare Optik . . . . .	534
9.1	Frequenzverdopplung . . . . .	534
9.2	Zwei-Photonen-Spektroskopie . . . . .	537
9.3	Optische parametrische Verstärker . . . . .	539
	Literatur zum Abschnitt V,c . . . . .	542

**1. Kristalle            d) Paramagnetische Resonanzen**

von Dr. rer. nat. Jürgen Dietrich, Technische Universität Berlin

1.	Allgemeine Beschreibung . . . . .	543
2.	Klassische Rechnung für die Kerninduktion . . . . .	544
3.	Quantenmechanische Behandlung . . . . .	548
4.	Statistik und Relaxation . . . . .	552
5.	Technologie der Resonanz-Spektrometer . . . . .	556
6.	Aufbau eines ESR-Spektrometers (Abb. V,107) . . . . .	559
7.	Anwendungen der NMR . . . . .	560
8.	Anwendungen der ESR . . . . .	563
9.	Sondertechniken . . . . .	565
	Literatur zum Abschnitt 1 d . . . . .	568

**1. Kristalle            e) Energiezustände in Kristallen (Bandstrukturen)**

von Prof. Dr. rer. nat. Udo Scherz, Technische Universität Berlin

1.	Einleitung . . . . .	569
2.	Der Idealkristall . . . . .	571
3.	Gestörte Kristalle . . . . .	598
	Literatur zum Abschnitt 1 e . . . . .	607

## 1. Kristalle      f) Fehlordnungen

von Dr. rer. nat. Dietrich Neubert, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Berlin

Überblick . . . . .	608
Punktfehler . . . . .	608
Versetzungen . . . . .	616
Grenzflächen . . . . .	633
Literatur zum Abschnitt 1f . . . . .	635

## 2. Metalle

von Prof. Dr.-Ing. Ludwig Thomas, Technische Universität Berlin

2.1 Kennzeichnung der Metalle. . . . .	636
2.2 Experimentelle Methoden . . . . .	636
2.3 Einstoffsysteme . . . . .	638
2.4 Mehrstoffsysteme . . . . .	650
2.5 Phasenumwandlungen. . . . .	656
2.6 Mechanische Eigenschaften. . . . .	666
2.7 Durch die Elektronenstruktur bestimmte Eigenschaften von Metallen . . . . .	683
Literatur zum Abschnitt 2 . . . . .	695

## 3. Halbleiter

von Prof. Dr.-Ing. Hans-Günther Wagemann, Technische Universität, Berlin

3.1 Definition des Halbleiters. . . . .	696
3.2 Übersicht über Halbleiter . . . . .	697
3.3 Energiebänder-Modell und Leitungstypen kristalliner Halbleiter. . . . .	698
3.4 Das Fermi-Niveau und die Berechnung der Ladungsträgerkonzentrationen im thermodynamischen Gleichgewicht kristalliner Halbleiter . . . . .	705
3.5 Transporterscheinungen . . . . .	712
3.6 Generations- und Rekombinationsprozesse. . . . .	718
3.7 Die Halbleiter-Oberfläche. . . . .	723
3.8 Einige grundlegende Experimente der Halbleiterphysik. . . . .	727
3.9 Halbleiter-Sperrschichten. . . . .	735
3.10 Amorphe Halbleiter . . . . .	751
Literatur zum Abschnitt 3 . . . . .	754

## 4. Lumineszenz und Photoleitung

von Prof. Dr.-Ing. Horst Nelkowski, Technische Universität Berlin

4.1 Einführung . . . . .	755
4.2 Lumineszenzmodelle . . . . .	760
Das Zentrenmodell 761, Das Bändermodell 770	
4.3 Die Elektrolumineszenz. . . . .	787
4.4 Spezielle Leuchtstoffe und Anwendungen der Lumineszenz . . . . .	796
Binäre Verbindungen 796, Organische Leuchtstoffe 804	
4.5 Photoeffekte in Halbleitern . . . . .	805
Photoleitung in homogenem Material 806, Photokapazitive Effekte 812, Photoeffekte an p-n Übergängen und Metall-Halbleiter Kontakten 814, Optoelektronik 819	
Literatur zum Abschnitt 4 . . . . .	822

## 5. Magnetismus

von Prof. Dr.-Ing. Martin Lambeck, Technische Universität Berlin

5.1	Definitionen und Einheiten . . . . .	824
5.2	Erscheinungsformen des Magnetismus . . . . .	825
5.3	Das Bohr-Van Leeuwen Theorem . . . . .	828
5.4	Deutung magnetischer Vorgänge. . . . .	829
5.5	Diamagnetismus und chemische Bindung. . . . .	830
5.6	Paramagnetismus und Hundesche Regel . . . . .	833
5.7	Die Wirkung des Kristallfeldes . . . . .	837
5.8	Magnetismus der Leitungselektronen . . . . .	839
5.9	Spontane Magnetisierung als Kollektivphänomen . . . . .	841
	Bandmodell des Ferromagnetismus 842, Badersche Regeln 844, Oszillierende Austauschkopplung 846, Amorphe Ferromagnetika 847, Superaustausch und Antiferromagnetismus 848, Ferrimagnetismus 851, Schwache Ferromagnetika 852	
5.10	Magnetische Bereiche und Wände . . . . .	853
	Austauschenergie 854, Kristallenergie 855, Spannungsenergie 856, Feldenergie und Entmagnetisierung 857, Bereichsaufteilung 858, Wandenergie 860, Einbereichteilchen 862, Dünne Schichten 863, Methoden der Bereichsabbildung 866	
5.11	Ummagnetisierungsvorgänge . . . . .	867
	Wandverschiebung, Nachwirkung und Barkhausen-Effekt 868, Rotation 871, Weichmagnetische Werkstoffe 873, Amorphe Werkstoffe 873, Magnetische Blasen (Bubbles) 874, Hartmagnetische Stoffe 875, Stoffe mit Austauschanisotropie 877, Spingläser 878, Relaxation 878	
	Literatur zum Abschnitt 5 . . . . .	879

## 6. Gläser und Spingläser bei tiefen Temperaturen

von Dr. Hilbert von Löhneysen, Technische Hochschule Aachen

6.1	Einleitung . . . . .	881
6.1	Amorphe Dielektrika . . . . .	882
6.3	Amorphe Metalle . . . . .	887
6.4	Spingläser. . . . .	892
6.5	Schlußbemerkung . . . . .	895
	Literatur zum Abschnitt 6 . . . . .	896

## VI. Kapitel. Makroskopische Quantenzustände

### (Supraleitung und Supraflüssigkeit)

von Dr. Klaus H. Gobrecht, Institut Laue-Langevin, Grenoble

1.	Einleitung . . . . .	897
2.	Supraleitung . . . . .	898
2.1	-Elektrizitätsleitung in Metallen . . . . .	898
2.2	Cooper-Paare. . . . .	901
2.3	BCS-Theorie . . . . .	901
2.4	Verschwinden des Widerstandes . . . . .	902
2.5	Kritischer Strom und Energielücke . . . . .	904
2.6	Isotopeneffekt . . . . .	905
2.7	Tunneleffekt und Phononenspektroskopie . . . . .	906
2.8	Vorkommen der Supraleitung . . . . .	908
2.9	Thermische Eigenschaften . . . . .	909
2.10	Meißner-Ochsenfeld-Effekt . . . . .	911
2.11	Kritische Feldstärke. . . . .	912
2.12	Thermodynamik des Phasenübergangs . . . . .	915



2.13	Typ II-Supraleiter . . . . .	918
2.14	Flußliniengitter . . . . .	921
2.15	Erzeugung hoher Magnetfelder. . . . .	922
2.16	Flußquantisierung . . . . .	924
2.17	Josephson-Effekte . . . . .	925
3.	Flüssiges Helium . . . . .	928
3.1	Phasendiagramm . . . . .	929
3.2	$\lambda$ -Punkt . . . . .	930
3.3	Zwei-Flüssigkeiten-Modell . . . . .	931
3.4	Wärmeleitung . . . . .	932
3.5	Zweiter Schall . . . . .	933
3.6	Heliumfilm . . . . .	934
3.7	Kritische Geschwindigkeit . . . . .	935
3.8	Anregungsspektrum . . . . .	936
3.9	Rotierendes Helium . . . . .	937
3.10	Quantisierte Wirbel . . . . .	940
3.11	Wirbelfadengitter . . . . .	942
3.12	$^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ -Gemische. . . . .	943
3.13	Entmischungskryostat . . . . .	945
3.14	Supraflüssiges $^3\text{He}$ . . . . .	947
4.	Zusammenfassender Vergleich der Eigenschaften von Supraleitern und He II . . . . .	950
4.1	Transporteigenschaften . . . . .	950
4.2	Einfluß der elektrischen Ladung. . . . .	952
4.3	Phasenkohärenzeffekte . . . . .	954
4.4	Schwankungserscheinungen . . . . .	955
4.5	Schlußbemerkung . . . . .	957
	Literatur zum VI. Kapitel . . . . .	957

## VII. Kapitel. Elementarteilchen

von Prof. Dr. rer. nat. Hans Bucka, Technische Universität Berlin

1.	Einleitung . . . . .	959
2.	Phänomenologische Beschreibung von Wechselwirkungen . . . . .	961
3.	Symmetrieeigenschaften von Teilchen und Wechselwirkungen und Erhaltungssätze . . . . .	965
3.1	Energie, Impuls, Drehimpuls . . . . .	966
3.2	Parität. . . . .	969
3.3	Ladungskonjugation. . . . .	972
3.4	Teilchen und Antiteilchen . . . . .	974
3.5	Erhaltungssätze für Teilchenzahlen und Statistik . . . . .	977
3.6	Isospin, G-Parität . . . . .	979
3.7	Strangeness. . . . .	982
4.	Multipletts im Baryonen- und Mesonenspektrum . . . . .	985
4.1	Teilchenzustände des Baryonen- und Mesonenspektrums. . . . .	985
4.2	Beschreibung von Multipletts in den Hadronenspektren bezüglich der Quantenzahlen von Isospin, Strangeness und Charm mit Hilfe von Quarkbasiszuständen. . . . .	991
4.3	Energieaufspaltung der Multipletts, „broken Symmetrie“ . . . . .	1001
4.4	Elektromagnetische Eigenschaften und $U$ -Spin-Multipletts. . . . .	1003
4.5	Berücksichtigung des Spins und weiterer Freiheitsgrade zur Beschreibung der Multipletts des Hadronen-Spektrums . . . . .	1004
4.6	Beschreibung von Multipletts des Mesonenspektrums unter Berücksichtigung von Spin und Bahndrehimpulszuständen . . . . .	1010
5.	Experimentelle Untersuchungen der starken Wechselwirkung . . . . .	1014
5.1	Streuphasen der $\pi$ -Meson-Nukleon-Streuung und Resonanzzustände der Nukleonen . . . . .	1014
5.2	Resonanzen im $\pi$ -Mesonen-System . . . . .	1017
5.3	Bestimmung von Matrixelementen und Quantenzahlen aus der Dichteverteilung in Dalitz-Diagrammen . . . . .	1024
5.4	Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung . . . . .	1030
5.5	Teilchen mit Strangeness . . . . .	1035

6.	Einige allgemeine Relationen zur Übergangsamplitude mit Berücksichtigung von Teilchenreaktionen bei hohen Energien . . . . .	1037
6.1	Streuphasen, Wirkungsquerschnitt und optisches Theorem. . . . .	1038
6.2	Dispersionsrelationen . . . . .	1039
6.3	Eigenschaften der Vorwärts- und Rückwärtsstreuung bei hohen Energien und Mandelstamm-Diagramme. . . . .	1046
6.4	Regge-Trajectories und Energieabhängigkeit des Wirkungsquerschnitts vom Impulsübertrag. . . . .	1052
6.5	Veneziano-Amplituden . . . . .	1057
7.	Untersuchungen von Prozessen der schwachen Wechselwirkung . . . . .	1058
7.1	$\beta$ -Wechselwirkung der Nukleonen; allgemeine Form der Wechselwirkung. . . . .	1059
7.2	Zerfall von $\pi$ -Mesonen und $\mu$ -Mesonen . . . . .	1071
7.3	Allgemeine Gesichtspunkte zur schwachen Wechselwirkung bezüglich der Strangeness- und Charm-Quantenzahl . . . . .	1077
7.4	Zerfall geladener $K$ -Mesonen in zwei und drei $\pi$ -Mesonen und Nichterhaltung der Parität. . . . .	1079
7.5	Eigenschaften der neutralen $K$ -Mesonen . . . . .	1081
7.6	Zerfälle durch schwache Wechselwirkung und Isospin . . . . .	1089
7.7	Neutrino-Reaktionen bei hohen Energien . . . . .	1090
8.	Untersuchungen von Prozessen der elektromagnetischen Wechselwirkung . . . . .	1091
8.1	Photonen und Fermionen . . . . .	1092
8.2	Elektromagnetische Momente . . . . .	1104
8.3	Formfaktoren . . . . .	1106
8.4	Erzeugung von Teilchenzuständen durch elektromagnetische Wechselwirkung . . . . .	1108
8.5	Spontane Zerfälle . . . . .	1112
	Literatur zum VII. Kapitel . . . . .	1115

## VIII. Kapitel. Kernphysik

von Prof. Dr. rer. nat. Achim Hese, Technische Universität Berlin

1.	Grundlegende Begriffe . . . . .	1117
	Zusammensetzung, Nomenklatur und Systematik der Atomkerne . . . . .	1117
	Einheiten und Definitionen . . . . .	1120
2.	Quantenmechanische Elemente, Symmetrien und Invarianzen. . . . .	1125
	Translationsinvarianz . . . . .	1129
	Galileiinvarianz . . . . .	1131
	Rotationsinvarianz . . . . .	1131
	Raumspiegelungsinvarianz . . . . .	1141
	Permutationssymmetrie. . . . .	1142
	Isospin-Invarianz. . . . .	1144
3.	Grundeigenschaften der Atomkerne. . . . .	1157
	Kernmassen und Bindungsenergien . . . . .	1159
	Die Dichteverteilung von Protonen und Neutronen im Kern – Der Kernradius . . . . .	1166
—	Die Isotopieverschiebung von Spektrallinien . . . . .	1179
	Exotische Atome . . . . .	1189
	Kerndrehimpulse und Kernmomente . . . . .	1198
4.	Die Kernkräfte. . . . .	1231
	Das Deuteron . . . . .	1231
	Die Nukleon-Nukleon-Streuung . . . . .	1242
	Mesonentheorie der Kernkräfte . . . . .	1259
5.	Kernmodelle . . . . .	1267
	Das Fermi-Gas-Modell. . . . .	1267
	Die Weizsäcker-Formel . . . . .	1274
	Das Schalenmodell . . . . .	1277
	Kollektive Modelle . . . . .	1302

6.	Der Zerfall instabiler Kerne . . . . .	1308
	Zerfallsgesetze und Einheiten . . . . .	1308
	Der $\alpha$ -Zerfall . . . . .	1315
	Kernspaltung . . . . .	1326
	Elektromagnetische Übergänge . . . . .	1328
	Der $\beta$ -Zerfall – die Form des erlaubten Spektrums . . . . .	1345
7.	Kernreaktionen . . . . .	1353
	Erhaltungssätze bei Kernreaktionen . . . . .	1355
	Resonanzen . . . . .	1361
	Literatur zum VIII. Kapitel . . . . .	1365

## IX. Kapitel. Reaktorphysik und Aspekte der Reaktorsicherheit

von Dr. Heinz Küsters, Kernforschungszentrum Karlsruhe

1.	Aufgabenstellung der Reaktorphysik . . . . .	1369
2.	Neutronenphysikalische Grundlagen . . . . .	1372
2.1	Die Spaltneutronen . . . . .	1372
2.2	Wechselwirkung von Neutronen mit Materie . . . . .	1375
	Wirkungsquerschnitte, mittlere freie Weglänge 1375, Die inelastische Streuung 1379, Die elastische Streuung 1382, Streuprozesse von Neutronen unterhalb 1 eV, Thermali- sierung 1386, Einfangresonanzen 1388	
3.	Allgemeine physikalische Eigenschaften von Reaktoren . . . . .	1390
3.1	Die Kettenreaktion . . . . .	1390
3.2	Die Energieabhängigkeit der Neutronenausbeute $\eta(E)$ und wesentliche Folgerungen . . . . .	1391
3.3	Neutronenmultiplikation in $U^{238}$ oder Natur-Uran . . . . .	1393
3.4	Physikalische Anforderungen an einen Neutronen-Moderator . . . . .	1394
3.5	Kühlmittel und Strukturmaterial . . . . .	1395
3.6	Der kritische Zustand eines Reaktors . . . . .	1397
3.7	Neutronenzyklus in Thermischen und Schnellen Reaktoren . . . . .	1398
4.	Neutronenbremsung in unendlich ausgedehnten Medien: Energieverteilung der Neutronen . . . . .	1400
4.1	Neutronenflußdichte und Reaktionsrate . . . . .	1401
4.2	Bilanzgleichung für die Neutronen-Reaktionsraten . . . . .	1402
4.3	Abbremsung in Moderatorbereichen, $1/E$ -Spektrum . . . . .	1402
4.4	Abbremsung im Resonanzbereich der schweren Kerne, Resonanzfeinstruktur der Energieverteilung . . . . .	1404
4.5	Abbremsung im Bereich breiter Streuresonanzen, numerische Spektrumsbestimmung . . . . .	1406
4.6	Das Multigruppenverfahren, effektive Wirkungsquerschnitte . . . . .	1406
4.7	Energieverteilung thermischer Neutronen . . . . .	1409
4.8	Resonanzeinfang im unendlich ausgedehnten Medium . . . . .	1411
5.	Neutronen-Diffusion: Die Ortsverteilung der Neutronen in Reaktoren . . . . .	1414
5.1	Die Diffusionsgleichung . . . . .	1415
5.2	Randbedingungen und Gültigkeitsgrenzen der Diffusionstheorie . . . . .	1417
5.3	Einfache Lösungsformen der Diffusionsgleichung . . . . .	1419
5.4	Heterogene Systeme, die Einheits-Zelle . . . . .	1422
6.	Die stationäre Multigruppen-Diffusionsgleichung; Kritikalität und Neutronenmulti- plikationskonstante als Eigenwert . . . . .	1424
6.1	Die Multigruppenform der Diffusionsgleichung . . . . .	1424
6.2	Kritikalität . . . . .	1424
6.3	Eigenwert der Diffusionsgleichung und Neutronenmultiplikation . . . . .	1425
6.4	Die Vierfaktorenformel . . . . .	1426
7.	Physikalische Auslegungsdaten eines frischen Reaktors . . . . .	1428
7.1	Das Spaltstoffinventar und andere Auslegungsdaten für die wichtigsten Vertreter heutiger Leistungsreaktor-Baulinien . . . . .	1428
7.2	Leistungsverteilung . . . . .	1437

8.	Veränderungen der Neutronenmultiplikation während des Reaktorbetriebs; Grundsätzliche Bemerkungen . . . . .	1438
8.1	Änderung der Isotopenzusammensetzung . . . . .	1438
8.2	Spaltstoffüberschuß . . . . .	1439
8.3	Brennstoffmanagement . . . . .	1439
8.4	Temperaturänderungen . . . . .	1440
8.5	Kühlmittelverlust . . . . .	1442
8.6	Zeitverhalten des Reaktors bei vorgegebener Erhöhung der Neutronenmultiplikation . . . . .	1442
9.	Behandlung des Langzeitverhaltens von Reaktoren . . . . .	1446
9.1	Die Abbrandgleichung . . . . .	1446
9.2	Der Abbrand des Spaltstoffes . . . . .	1448
9.3	Plutoniumaufbau . . . . .	1449
9.4	Plutoniumrückführung . . . . .	1450
9.5	Spaltproduktaufbau . . . . .	1450
9.6	Reaktivitätsbilanz eines Reaktors . . . . .	1451
9.7	Konversions- und Brutraten . . . . .	1452
10.	Reaktordynamik . . . . .	1453
10.1	Die kinetischen Gleichungen . . . . .	1453
10.2	Das Modell des Punktreaktors . . . . .	1456
10.3	Einfache Lösungen der Punktkinetischen Gleichungen ohne Rückwirkung . . . . .	1459
10.4	Einfache Reaktivitätsstörungen mit Temperaturrückwirkung über den Dopplereffekt . . . . .	1461
11.	Reaktor- und Kraftwerksregelung . . . . .	1464
11.1	Begriffsbestimmungen . . . . .	1464
11.2	Reaktorsteuerung . . . . .	1464
11.3	Reaktorregelung bei langsamen Reaktivitätsänderungen . . . . .	1464
11.4	Überwachung des Betriebszustandes . . . . .	1465
11.5	Kraftwerksregelung . . . . .	1466
12.	Reaktorsicherheit . . . . .	1467
12.1	Begriffsbestimmungen . . . . .	1468
12.2	Störereignisse in einer Reaktoranlage . . . . .	1469
12.3	Beherrschung von Störfällen durch das Reaktorsicherheitssystem . . . . .	1471
12.4	Zerstörung des Reaktorkerns . . . . .	1474
12.5	Unfälle an Reaktoranlagen . . . . .	1486
12.6	Häufigkeit von Reaktorstörfällen und Risikobetrachtungen . . . . .	1487
	Anhang: Die Neutronentransportgleichung . . . . .	1496
	Literatur zum IX. Kapitel . . . . .	1504

## X. Kapitel. Das Plasma

von Prof. Dr.-Ing. Burkhard Wende, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Berlin

1.	Überblick und Abgrenzung . . . . .	1507
2.	Plasmabegriff und Debye-Theorie . . . . .	1509
3.	Einige Elementarprozesse in Gasen und Plasmen. – Wechselwirkungen zwischen Atomen, Elektronen, Ionen und Photonen . . . . .	1513
3.1	Stoßquerschnitt, Stoßfrequenz, freie Weglänge . . . . .	1513
3.2	Elastische Stöße . . . . .	1517
3.3	Unelastische Stöße . . . . .	1522
4.	Plasma im vollständigen thermodynamischen Gleichgewicht, Grundlegende Temperaturabhängigkeiten . . . . .	1527
5.	Energieaustauschprozesse im Plasma und lokales thermodynamisches Gleichgewicht . . . . .	1532
6.	Erzeugung von Laborplasmen; Anwendungen . . . . .	1541
6.1	Laborplasmen . . . . .	1541
6.2	Anwendungen . . . . .	1547
7.	Energieinhalt (Enthalpie und spezifische Wärmekapazität . . . . .	1550
8.	Transportvorgänge . . . . .	1556
8.1	Elektrische Leitfähigkeit . . . . .	1557
8.2	Wärmeleitfähigkeit . . . . .	1562

9.	Plasma in elektrischen und magnetischen Feldern . . . . .	1565
9.1	Teilchenmodell . . . . .	1565
9.2	Magnetohydrodynamik und Magnetohydrostatik . . . . .	1570
10.	Wellen im Plasma . . . . .	1575
11.	Strahlung von Plasmen im optischen Bereich . . . . .	1579
11.1	Emission, Absorption, Kirchhoff-Satz . . . . .	1580
11.2	Strahlung aus „großen“ Plasmavolumen . . . . .	1581
11.3	Emission und Absorption von Spektrallinien. . . . .	1583
11.4	Verbreiterung von Spektrallinien . . . . .	1588
11.5	Emission und Absorption kontinuierlicher Strahlung . . . . .	1594
	Literatur zum X. Kapitel . . . . .	1600

## XI. Kapitel. Fusionsexperimente

von Prof. Dr. rer. nat. Günther Lehner, Universität Stuttgart

1.	Kernphysikalische Grundlagen. . . . .	1603
2.	Magnetohydrodynamik und Magnetohydrostatik . . . . .	1613
3.	Der Pinch-Effekt. . . . .	1616
3.1	Der z-Pinch-Effekt. . . . .	1617
3.2	Der $\Theta$ -Pinch-Effekt . . . . .	1623
4.	Toroidaler Plasmaeinschluß . . . . .	1625
4.1	Rotationssymmetrische toroidale Anordnungen. . . . .	1626
4.2	Nicht rotationssymmetrische toroidale Anordnungen. . . . .	1640
5.	Spiegelmaschinen . . . . .	1642
6.	Trägheitseinschluß. . . . .	1644
7.	Zusammenfassung . . . . .	1648
	Literatur zum XI. Kapitel . . . . .	1648

## XII. Kapitel. Aufbau der Sterne

von Prof. Dr. rer. nat. Kurt Hunger, Universität und Sternwarte Kiel

1.	Einleitung . . . . .	1651
1.1	Allgemeiner Überblick . . . . .	1651
1.2	Historische Bemerkungen. . . . .	1652
2.	Beobachtungen . . . . .	1653
2.1	Integrale Zustandsgrößen. . . . .	1653
2.2	Zustandsdiagramme . . . . .	1656
3.	Gleichgewichtsbedingungen . . . . .	1660
3.1	Hydrostatisches Gleichgewicht. Massenbilanz . . . . .	1660
3.2	Energiegleichgewicht . . . . .	1662
3.3	Energietransport. . . . .	1666
4.	Konstitutive Gleichungen. . . . .	1677
4.1	Zustandsgleichung $P(\rho, T)$ . . . . .	1678
4.2	Opazitätskoeffizient $\kappa(\rho, T)$ . . . . .	1680
4.3	Kernenergie-Erzeugung $\epsilon(\rho, T)$ . . . . .	1683
5.	Lösungen der Aufbaugleichungen . . . . .	1690
5.1	Randbedingungen, „Eindeutigkeits“-Satz (Russel-Vogt-Theorem) . . . . .	1690
5.2	Lösungsmethoden. . . . .	1692
5.3	Standard-Transformation, Homologe Sterne. . . . .	1693
5.4	Vollkonvektive Sterne. Hayashi-Grenze. . . . .	1698
6.	Sternentwicklung . . . . .	1701
6.1	Sternentstehung . . . . .	1701
6.2	Hauptreihen-Phase. . . . .	1705

6.3	Nachhauptreihen-Entwicklung. Alter von Sternhaufen . . . . .	1707
6.4	Rote Riesen. He-Flash . . . . .	1710
6.5	Massenverlust. Spätphasen . . . . .	1715
7.	Endstadien . . . . .	1718
7.1	Weißer Zwerge . . . . .	1718
7.2	Neutronensterne, Röntgensterne . . . . .	1720
7.3	Schwarze Löcher (kollabierte Sterne). . . . .	1723
8.	Schlußbetrachtung . . . . .	1724
	Literatur zum XII. Kapitel . . . . .	1724

### XIII. Kapitel. Neutronenexperimente

von Dr. rer. nat. Konrad Ibel, Institut Laue-Langevin, Grenoble

1.	Einleitung . . . . .	1725
2.	Fundamentale Eigenschaften der Neutronen und ihrer Wechselwirkung mit Materie . . . . .	1727
2.1	Fundamentale Eigenschaften des Neutrons. . . . .	1727
2.2	Definition des Wirkungsquerschnitts . . . . .	1728
2.3	Kernstreuung und magnetische Streuung. . . . .	1730
2.4	Kohärente und inkohärente Streuung. . . . .	1733
2.5	Brechzahl . . . . .	1734
2.6	Inelastische Streuung . . . . .	1735
2.7	Streugesetz und Korrelationsfunktion . . . . .	1736
3.	Experimentelle Technik . . . . .	1737
3.1	Einleitung . . . . .	1737
3.2	Neutronenquellen . . . . .	1738
3.3	Kollimatoren. . . . .	1740
3.4	Neutronenleiter . . . . .	1741
3.5	Monochromatoren. . . . .	1742
3.6	Detektoren. . . . .	1744
3.7	Diffraktometer. . . . .	1745
3.8	Spektrometer für inelastische Neutronenstreuung . . . . .	1748
4.	Strukturuntersuchungen . . . . .	1752
4.1	Einleitung . . . . .	1752
4.2	Lage von Wasserstoffatomen . . . . .	1754
4.3	Magnetische Beugung . . . . .	1755
4.4	Fehlordnungen. . . . .	1758
4.5	Ungeordnete ausgedehnte Strukturen. . . . .	1759
4.6	Flüssigkeiten . . . . .	1762
4.7	Geordnete ausgedehnte Strukturen . . . . .	1764
4.8	Ausgedehnte magnetische Strukturen. . . . .	1765
5.	Dynamik der Materie . . . . .	1767
5.1	Einleitung . . . . .	1767
5.2	Phononen. . . . .	1769
5.3	Magnonen . . . . .	1770
5.4	Kollektive Bewegungen in Flüssigkeiten . . . . .	1771
5.5	Molekularspektroskopie . . . . .	1772
5.6	Lokalisierte Diffusionsbewegungen . . . . .	1774
5.7	Translatorische Diffusionsbewegungen . . . . .	1776
6.	Weiterentwicklungen . . . . .	1777
6.1	Polarisierte Neutronen . . . . .	1777
6.2	Gepulste Reaktoren . . . . .	1778
6.3	Ultrakalte Neutronen . . . . .	1778
	Literatur zum XIII. Kapitel . . . . .	1779

**XIV. Kapitel. Strahlungsdosimetrie unter besonderer Berücksichtigung integrierender Festkörperdosimeter**

von Prof. Dr. Klaus Becker, Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin

Einleitung . . . . .	1781
Einheiten . . . . .	1782
Historisches . . . . .	1783
Anwendungsgebiete . . . . .	1784
Thermolumineszenzdosimetrie (TLD) . . . . .	1787
Lithiumfluorid . . . . .	1790
Andere TLD-Phosphore . . . . .	1797
Dosimeterausführung und -Auswertung . . . . .	1802
Kernspürätzverfahren . . . . .	1805
Radiophotolumineszenz . . . . .	1815
Exoelektronenemission . . . . .	1820
Siliziumdioden zur Neutronendosimetrie . . . . .	1822
Optische Absorptionsänderungen . . . . .	1824
Sonstige Verfahren . . . . .	1826
Literatur zum XIV. Kapitel . . . . .	1827
Namen- und Sachregister . . . . .	XXIII
Konstanten . . . . .	XLIV
Umrechnungsfaktoren für Energieeinheiten . . . . .	XLV