

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 α 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 Λ	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	λ -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	^3He - ^4He -Gemische.	943
3.13	Entmischungskryostat	945
3.14	Supraflüssiges ^3He	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 π -Meson-Nukleon-Streuung und Resonanzzustände der Nukleonen	1014
5.2	Resonanzen im π -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	β -Wechselwirkung der Nukleonen; allgemeine Form der Wechselwirkung.	1059
7.2	Zerfall von π -Mesonen und μ -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 π -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 α -Zerfall	1315
	Kernspaltung	1326
	Elektromagnetische Übergänge	1328
	Der β -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 Θ -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	Weiße 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