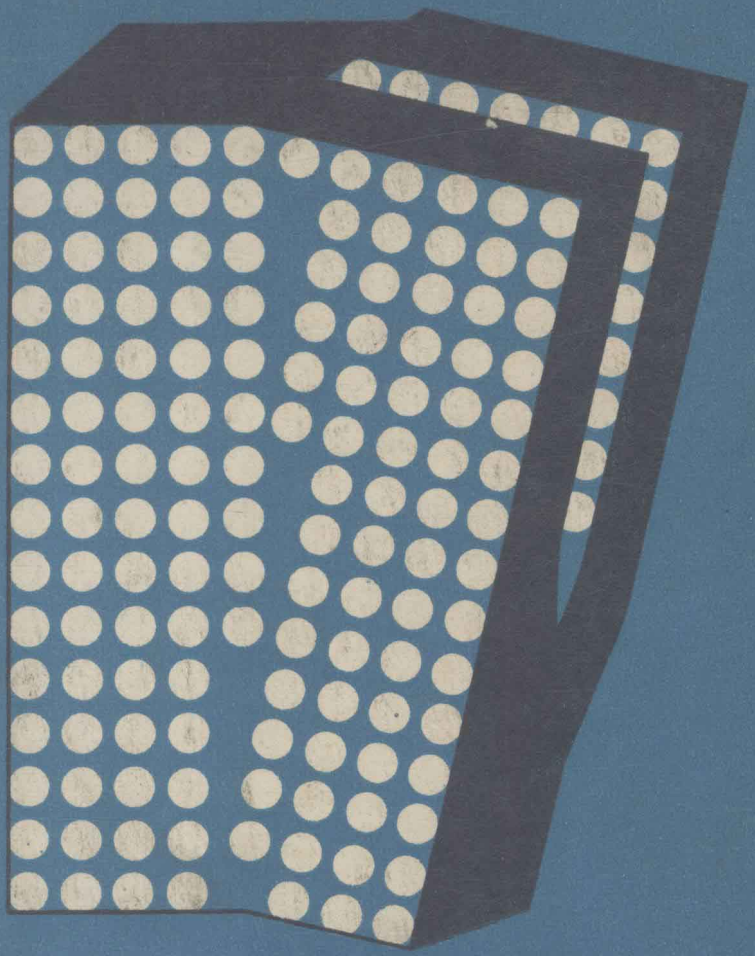
# LINDNER GRUNDRISS DER FESTKÖRPERPHYSIK



Grundriß der Festkörperphysik

# Grundriß der Festkörperphysik

von Studiendirektor
HELMUT LINDNER
Mittweida

Mit 227 Bildern
und 12 Tabellen

VEB FACHBUCHVERLAG LEIPZIG

© VEB Fachbuchverlag Leipzig 1978
1. Auflage
Lizenznummer 114-210/16/78
LSV 1183
Verlagslektor: Dipl.-Phys. Klaus Vogelsang
Gestaltung: Lore Jacobi
Printed in GDR
Satz und Druck: Fachbuchdruck Naumburg
Redaktionsschluß: 15. 8. 1978
Bestellnummer: 546 361 5
DDR 12,— M

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

# Vorwort

Aus den sehr zahlreich gewordenen Sonderzweigen der Physik tritt das Gebiet der Festkörperphysik immer markanter und bedeutungsvoller hervor. In ihrem Mittelpunkt steht die Frage, wie die fast unerschöpfliche Fülle natürlicher und technologisch geschaffener Eigenschaften der festen Körper von Grund auf, d. h. aus ihrem atomaren Feinbau heraus, zu verstehen ist. Mit deren Beantwortung weist sie sogleich Wege und Möglichkeiten auf, diese für die verschiedensten Zweige der menschlichen Produktion gezielt zu verändern und neu zu synthetisieren. Die Festkörperphysik durchdringt daher fast alle übrigen Teilgebiete der Physik und ist im Grunde genommen nichts anderes als eine auf die speziellen Probleme der festen Körper angewandte allgemeine Physik.

Dabei zeigt sich, daß trotz aller Verschiedenheit der makroskopisch zutage tretenden Phänomene die mechanischen, thermischen, optischen, elektrischen und magnetischen Eigenschaften fast ausschließlich aus der Struktur, d. h. der Anordnung der kleinsten Teilchen, resultieren. Im Vordergrund aller Betrachtungen stehen daher immer wieder das Kristallgitter und die in ihm wirkenden Kräfte und Wechselwirkungen.

Jeder Studierende der technischen Wissenschaften, aber auch jeder Werktätige, der verantwortungsbewußt an der Weiterentwicklung der Technik mitarbeitet, sollte sich daher die Grundlagen, Anwendungsmöglichkeiten und Entwicklungstendenzen der Festkörperphysik zu eigen machen. In diesem Sinne soll das Buch helfen, einen ersten Einblick in die für dieses Gebiet typischen Begriffe und Denkmodelle zu vermitteln, die für ein weiteres Vordringen und die Bewältigung speziellerer Probleme unerläßlich sind.

Da besonders häufig auf Zusammenhänge der elementaren Atomphysik zurückgegriffen werden muß, wurden diese – auf das unumgänglich Notwendige beschränkt – in einem besonderen Abschnitt 14. zusammengestellt. In allen Gleichungen und Beispielen kommen ausschließlich SI-Einheiten zur Verwendung. Dies ist besonders bei den magnetischen Größen zu beachten, da die in den einschlägigen Tabellen stehenden Werte noch häufig in CGS-Einheiten angegeben werden.

Den heute allgemein eingeführten Richtlinien entsprechend sind alle vektoriellen Größen mit halbfetten Buchstaben gedruckt, z. B. $\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$, $\boldsymbol{H}$, $\boldsymbol{B}$. Sie sind mathematisch

nach den Regeln der Vektorrechnung zu verknüpfen. Alle übrigen, mit mageren Buchstaben gedruckten Formelzeichen stellen lediglich skalare Größen dar. Hinweise auf Gleichungen, die im gleichen Abschnitt stehen, sind durch ihre jeweilige Nummer, z. B. (6), gekennzeichnet, während auf Gleichungen in anderen Abschnitten noch durch die zusätzliche Nummer des betreffenden Abschnittes hingewiesen wird, z. B. (14/6).

Verfasser und Verlag

# Inhaltsverzeichnis


| | | |
|---|---|---|
| **1.** | **Kristalle und Kristallgitter** | 15 |
| 1.1. | Kristallsysteme | 15 |
| 1.2. | Das Gesetz der rationalen Indizes | 16 |
| 1.3. | Das Kristallgitter | 18 |
| 1.3.1. | Die primitive Elementarzelle | 19 |
| 1.3.2. | Die BRAVAIS-Gitter | 19 |
| 1.3.3. | WIGNER-SEITZ-Zellen | 21 |
| 1.3.4. | Netzebenen | 21 |
| 1.3.5. | Praktisch wichtige Gittertypen | 22 |
| 1.4. | Die Ermittlung der Kristallstruktur | 24 |
| 1.4.1. | Die Beugung von Röntgenstrahlen am Kristallgitter | 24 |
| 1.4.2. | Die BRAGGsche Bedingung | 25 |
| 1.4.3. | Experimentelle Verfahren der Röntgenbeugung | 25 |
| 1.4.4. | Die Beugung von Neutronen am Kristallgitter | 26 |
| 1.5. | Das reziproke Gitter | 26 |
| 1.5.1. | Der Wellenzahlvektor | 26 |
| 1.5.2. | Reziproke Vektoren | 27 |
| 1.5.3. | Der reziproke Gittervektor | 27 |
| 1.5.4. | Reziproke Gitter | 28 |
| 1.6. | BRILLOUIN-Zonen | 30 |
| **2.** | **Die Bindungskräfte im Festkörper** | 31 |
| 2.1. | Die Bindungsenergie | 31 |
| 2.2. | Bindungsarten | 31 |
| 2.2.1. | Die Kristalle der Edelgase | 32 |
| 2.2.2. | Die Ionenkristalle | 33 |
| 2.2.3. | Kristalle mit Atombindung | 34 |
| 2.2.4. | Die Kristalle der Metalle | 35 |
| **3.** | **Gitterfehler** | 37 |
| 3.1. | Kristallite und Korngrenzen | 37 |
| 3.2. | Arten der Gitterfehler | 37 |
| 3.3. | Einzelne Fehlstellen | 38 |

3.3.1. Leerstellen und Zwischengitterplätze . . . . . 38
3.3.2. Zur Entstehung der Leerstellen . . . . . 38
3.3.3. Die Ionenleitung . . . . . 39
3.3.4. Fremdstörstellen . . . . . 39
3.3.5. Farbzentren . . . . . 39
3.4. Linienhafte Fehlordnungen . . . . . 40
3.4.1. Stufenversetzung . . . . . 40
3.4.2. Schraubenversetzung . . . . . 41
3.5. Flächenhafte Fehlordnungen . . . . . 42
3.5.1. Stapelfehler . . . . . 42
3.5.2. Kleinwinkelkorngrenzen . . . . . 42
3.6. Sichtbarmachung von Gitterfehlern . . . . . 43
3.6.1. Ätzgrübchen . . . . . 43
3.6.2. Oberflächendekoration . . . . . 43
3.6.3. Röntgentopografie . . . . . 44
3.6.4. Elektronenmikroskopischer Beugungskontrast . . . . . 45
3.6.5. Spannungsoptischer Kontrast . . . . . 46

**4. Mechanische Eigenschaften der Festkörper** . . . . . 47

4.1. Elastische Eigenschaften . . . . . 47
4.1.1. Das Hookesche Gesetz . . . . . 47
4.1.2. Poissonsche Zahl und Schallgeschwindigkeit . . . . . 47
4.1.3. Elastizität von Einkristallen . . . . . 48
4.2. Plastische Eigenschaften . . . . . 49
4.2.1. Deformation durch Schubspannung . . . . . 49
4.2.2. Schubfestigkeit fester Körper . . . . . 49
4.2.3. Die Verfestigungskurve polykristalliner Festkörper . . . . . 51
4.3. Plastische Verformung von Einkristallen . . . . . 52
4.3.1. Entstehung von Gleitpaketen . . . . . 52
4.3.2. Gleitung und Versetzung . . . . . 53
4.4. Verformbarkeit und Versetzungsdichte . . . . . 53
4.5. Verfestigung und Versetzungen . . . . . 54
4.6. Reißfestigkeit und Bindungsenergie . . . . . 55

**5. Gitterschwingungen und Phononen** . . . . . 56

5.1. Die Entstehung von Gitterschwingungen . . . . . 56
5.2. Das Spektrum der Gitterschwingungen . . . . . 56
5.3. Die maximale Eigenfrequenz eines Gitterbausteins . . . . . 57
5.4. Phononen . . . . . 58
5.4.1. Phononen als Teilchen . . . . . 58
5.4.2. Arten der Phononen . . . . . 59
5.5. Phononenspektren . . . . . 60
5.5.1. Die Dispersionsrelation im Kristall . . . . . 62
5.5.2. Die Geschwindigkeit der Phononen . . . . . 62
5.6. Thermische Phononen . . . . . 63
5.7. Wechselwirkungen der Phononen mit anderen Teilchen . . . . . 64

5.7.1. Absorption und Streuung von Licht . . . . . 64
5.7.2. Stöße zwischen Photonen und Phononen . . . . . 65
5.7.3. Die BRILLOUIN-Streuung . . . . . 66
5.7.4. Streuung von Neutronen an Phononen . . . . . 66

**6. Thermische Eigenschaften der Festkörper** . . . . . 68

6.1. Die spezifische Wärmekapazität . . . . . 68
6.2. Charakteristische und DEBYE-Temperatur . . . . . 69
6.3. Die Wärmeleitung im Festkörper . . . . . 70
6.3.1. Streuprozesse zwischen Phononen . . . . . 70
6.3.2. Die Wärmeleitfähigkeit . . . . . 70

**7. Die Metalle als Stromleiter** . . . . . 73

7.1. Die klassische Elektronentheorie . . . . . 73
7.1.1. Die Dichte des Elektronengases . . . . . 73
7.1.2. Die mittlere thermische Geschwindigkeit der Elektronen . . . . . 74
7.1.3. Driftgeschwindigkeit und OHMsches Gesetz . . . . . 74
7.1.4. Die JOULEsche Wärme . . . . . 76
7.1.5. Das WIEDEMANN-FRANZsche Gesetz . . . . . 76
7.1.6. Das Versagen der klassischen Elektronentheorie . . . . . 78
7.2. Quantenmechanische Betrachtung des Elektronengases . . . . . 78
7.2.1. Der $k$-Raum des freien Elektronengases . . . . . 78
7.2.2. FERMI-Kugel und Grenzenergie . . . . . 79
7.2.3. FERMI-Geschwindigkeit und Temperatur . . . . . 80
7.2.4. Der elektrische Widerstand der Metalle . . . . . 81
7.2.4.1. Allgemeines Verhalten . . . . . 81
7.2.4.2. Die MATTHIESSENsche Regel . . . . . 82
7.2.5. Das FERMIsche Verteilungsgesetz . . . . . 83
7.2.6. FERMI-Verteilung und Temperatur . . . . . 85
7.2.7. Die Gasentartung . . . . . 86
7.3. Die spezifische Wärmekapazität des Elektronengases . . . . . 86
7.4. FERMI-Flächen in Metallen . . . . . 87
7.4.1. FERMI-Kugeln im reziproken Gitter . . . . . 87
7.4.2. Der DE-HAAS-VAN-ALPHEN-Effekt . . . . . 89

**8. Das Bändermodell** . . . . . 91

8.1. Die Entstehung von Energiebändern . . . . . 91
8.2. Anordnungen von Energiebändern . . . . . 93
8.3. Die Struktur von Energiebändern . . . . . 94
8.3.1. Energieverteilung freier Elektronen . . . . . 94
8.3.2. Die Entstehung von Energielücken . . . . . 95
8.3.3. Energielücken und BRILLOUIN-Zonen . . . . . 96
8.3.4. Bandstruktur und effektive Masse . . . . . 97
8.4. Messung der Beweglichkeit und der effektiven Masse von Ladungsträgern . . . . . 99
8.4.1. Der HALL-Effekt . . . . . 99
8.4.2. Die Zyklotronresonanz . . . . . 100

**9. Halbleiter** . . . 102

9.1. Reine (undotierte) Halbleiter . . . 102
9.1.1. Arten der Halbleiter . . . 102
9.1.2. Herstellung reinsten Materials . . . 103
9.1.3. Die Eigenleitung . . . 106
9.1.3.1. Die Entstehung der Eigenleitung . . . 106
9.1.3.2. Elektronen und Löcher . . . 107
9.1.3.3. Die Bandstruktur der Halbleiter . . . 108

9.2. Dotierte Halbleiter . . . 109
9.2.1. Entstehung der n- und p-Leitung . . . 109
9.2.2. Das Bändermodell des dotierten Halbleiters . . . 110

9.3. Die Trägerdichte in Halbleitern . . . 112
9.3.1. Anwendung der FERMI-Statistik auf Halbleiter . . . 112
9.3.2. Zustands- und Intrinsicdichte . . . 113
9.3.3. Die Lage des FERMI-Niveaus . . . 113

9.4. Das Massenwirkungsgesetz . . . 114
9.5. Die Trägerbeweglichkeiten . . . 116
9.6. Die Messung der Driftbeweglichkeit . . . 118

9.7. Die pn-Kombination . . . 118
9.7.1. Der stromlose pn-Übergang . . . 118
9.7.1.1. Herstellungswege . . . 118
9.7.1.2. Vorgänge im pn-Übergang . . . 121
9.7.1.3. Die Entstehung der Sperrschicht . . . 121
9.7.1.4. Der Potentialverlauf . . . 122
9.7.1.5. Das Bändermodell des pn-Überganges . . . 122
9.7.2. Der pn-Übergang bei Stromfluß . . . 123
9.7.2.1. Polung in Flußrichtung . . . 123
9.7.2.2. Polung in Sperrichtung . . . 123
9.7.2.3. Die Kennlinie des pn-Überganges . . . 124
9.7.3. Anwendungen . . . 124

**10. Optische Eigenschaften der Festkörper** . . . 125

10.1. Die Wirkung elektromagnetischer Strahlen . . . 125
10.1.1. Allgemeiner Überblick . . . 125
10.1.2. Durchlässigkeit und Brechung . . . 126
10.1.3. Die Absorption von $\gamma$- und Röntgenstrahlen . . . 126

10.2. Die Absorption in Metallen . . . 127

10.3. Die Absorption in Halbleitern und Ionenkristallen . . . 128
10.3.1. Absorptionskanten . . . 128
10.3.2. Absorption und Elektronendichte . . . 129
10.3.3. Direkte und indirekte Übergänge . . . 130

10.4. Weitere Wirkungen der Strahlenabsorption . . . 130
10.4.1. Die Fotoleitfähigkeit . . . 130
10.4.2. Fotodioden . . . 131
10.4.3. Fotoelemente . . . 132

10.5. Lumineszenz . . . 133
10.5.1. Die STOKESsche Regel . . . 133


此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

10.5.2. Arten der Lumineszenz in Festkörpern . . . 133
10.5.3. Injektionslichtquellen (Leuchtdioden) . . . 135
10.5.4. Leuchtkondensatoren . . . 136
10.6. Exzitonen . . . 136

**11. Die Supraleitung . . . 138**

11.1. Supraleiter I. Art . . . 138
11.1.1. Sprungtemperatur und Dauerstrom . . . 138
11.1.2. Magnetfeld und Supraleitung . . . 139
11.2. Elektronentheoretische Deutung der Supraleitung . . . 140
11.2.1. Erste Anhaltspunkte . . . 140
11.2.2. Cooper-Paare . . . 141
11.2.3. Die Energielücke . . . 142
11.2.4. Die Messung der Energielücke . . . 143
11.3. Der Suprastrom als Quantenerscheinung . . . 143
11.3.1. Das Flußquant . . . 143
11.3.2. Messung des Flußquants . . . 144
11.3.3. Der Josephson-Effekt . . . 145
11.3.3.1. Der Josephson-Gleichstrom . . . 145
11.3.3.2. Der Josephson-Wechselstrom . . . 146
11.4. Supraleiter II. Art . . . 147
11.4.1. Kritische Größen . . . 147
11.4.2. Flußschläuche . . . 148
11.4.3. Harte Supraleiter . . . 149

**12. Magnetische Eigenschaften der Festkörper . . . 152**

12.1. Magnetische Grundeigenschaften und Grundgrößen . . . 152
12.1.1. Grundgrößen des magnetischen Feldes . . . 152
12.1.2. Allgemeines Verhalten der Stoffe im Magnetfeld . . . 153
12.2. Der atomare Ursprung des Magnetismus . . . 154
12.2.1. Das magnetische Bahn- und Spinmoment . . . 154
12.2.2. Dia- und paramagnetische Festkörper . . . 155
12.2.3. Der Paramagnetismus der Metalle . . . 156
12.3. Struktureller Magnetismus . . . 157
12.3.1. Spinstrukturen . . . 157
12.3.2. Spinstruktur und Atombau . . . 157
12.3.3. Die Austauschenergie . . . 158
12.4. Der Ferromagnetismus . . . 159
12.4.1. Die Magnetisierungskurve . . . 159
12.4.2. Ferromagnetismus und Temperatur . . . 161
12.4.3. Domänen . . . 161
12.4.4. Die Bloch-Wände und ihre Verschiebung . . . 163
12.5. Der Antiferromagnetismus . . . 164
12.6. Der Ferrimagnetismus . . . 164
12.6.1. Allgemeine Eigenschaften ferrimagnetischer Stoffe . . . 164

12.6.2. Zylinderdomänen in dünnen Schichten . . . . . 166
12.6.3. Bewegung und Detektion von Zylinderdomänen . . . . . 167

**13. Die dielektrischen Eigenschaften der Festkörper . . . . . 169**

13.1. Das elektrische Feld im Festkörper . . . . . 169
13.1.1. Die Feldgrößen . . . . . 169
13.1.2. Die Entelektrisierung . . . . . 170
13.2. Atomare Ursachen der Polarisation . . . . . 170
13.2.1. Die permanente Polarisation . . . . . 170
13.2.2. Die Verschiebungspolarisation . . . . . 171
13.2.3. Die Orientierungspolarisation . . . . . 172
13.2.4. Polarisierbarkeit und Dielektrizitätszahl . . . . . 172
13.3. Ferroelektrische Erscheinungen . . . . . 173
13.3.1. Ferroelektrische Dielektrika . . . . . 173
13.3.2. Die Sättigungspolarisation . . . . . 174
13.3.3. Ferroelektrizität und Temperatur . . . . . 174
13.3.4. Ferroelektrische Hysteresis und Domänen . . . . . 175
13.3.5. Antiferroelektrische Kristalle . . . . . 176
13.4. Die Piezoelektrizität . . . . . 176
13.4.1. Piezoelektrizität und Druckspannung . . . . . 176
13.4.2. Atomare Ursache der Piezoelektrizität . . . . . 178
13.4.3. Ferroelektrische Keramiken . . . . . 178
13.4.4. Der inverse piezoelektrische Effekt . . . . . 180
13.4.5. Wirkungsgrad und Anwendungen des piezoelektrischen Effektes . . . 180

**14. Atomphysikalische Grundlagen . . . . . 181**

14.1. Anzahl, Masse und Raumbeanspruchung der Atome . . . . . 181
14.2. Ergebnisse der klassischen Wärmetheorie . . . . . 182
14.3. Das MAXWELL-BOLTZMANNsche Verteilungsgesetz . . . . . 183
14.4. Wellen und Teilchen . . . . . 184
14.4.1. Energiequanten . . . . . 184
14.4.2. Energie und Impuls von Teilchen und Strahlungsquanten . . . . . 185
14.4.3. Der Dualismus Welle-Teilchen . . . . . 185
14.5. Das BOHRsche Atommodell . . . . . 186
14.5.1. Die Bestandteile des Atoms . . . . . 186
14.5.1.1. Der Atomkern . . . . . 186
14.5.1.2. Die Atomhülle . . . . . 187
14.5.2. Die BOHRschen Postulate . . . . . 187
14.5.3. Das Wasserstoffatom . . . . . 187
14.5.3.1. Der Atomradius . . . . . 187
14.5.3.2. Die Energie des kreisenden Elektrons . . . . . 188
14.5.3.3. Anregung und Serienformeln . . . . . 188
14.5.3.4. Ionisierung . . . . . 189
14.5.4. Die weiteren Quantenzahlen . . . . . 190
14.5.4.1. Die Hauptquantenzahl $n$ . . . . . 190
14.5.4.2. Die Nebenquantenzahl $l$ . . . . . 190
14.5.4.3. Die magnetische Quantenzahl $m$ . . . . . 191

14.5.4.4. Die Spinquantenzahl $s$ . . . . . 191
14.5.5. Der Aufbau der größeren Atome . . . . . 191
14.5.5.1. Das PAULI-Prinzip . . . . . 191
14.5.5.2. Schalenbau und Periodensystem . . . . . 192
14.6. Das Orbitalmodell . . . . . 193
14.6.1. Die Weiterführung der Quantentheorie . . . . . 193
14.6.2. Die physikalische Bedeutung der Wellenfunktion . . . . . 194
14.6.3. Beispiele für Orbitalmodelle . . . . . 194

**Anhang:** Tabelle 11. Eigenschaften fester Körper . . . . . 196
Tabelle 12. Eigenschaften von Halbleitern . . . . . 202
Literatur- und Quellenverzeichnis . . . . . 203
Bildquellenverzeichnis . . . . . 204
Sachwortverzeichnis . . . . . 205

# 1. Kristalle und Kristallgitter

## 1.1. Kristallsysteme

Der systematischen Erforschung der Festkörper kommt ein sehr günstiger Umstand entgegen: Sie bestehen überwiegend aus Kristallen. Meist sind es winzig kleine Kriställchen, die mit dem bloßen Auge einzeln nicht erkennbar und zu einer äußerlich gestaltlosen Masse zusammengewachsen sind. In Ausnahmefällen aber treten sie uns in prachtvoll ausgebildeten Exemplaren entgegen (Bild 1.1). Schon der äußere Anblick läßt vermuten, daß ihre atomaren Bestandteile ein mathematisch exaktes Gefüge bilden. Körper, denen eine solche innere Kristallstruktur fehlt, stehen daher mehr am Rande der eigentlichen Festkörperphysik. Wir schließen deshalb die amorphen Stoffe, z. B. die (mitunter als besonders zähe Flüssigkeiten bezeichneten) Gläser, die aus unregelmäßig verschlungenen Riesenmolekülen polymerisierten Plaste und nicht zuletzt auch die organischen Feststoffe, wie Holz oder Knochen, aus unseren Betrachtungen aus.

Der Formenreichtum der Kristalle ist auf den ersten Blick verwirrend. Man findet kaum zwei natürlich gewachsene Exemplare, die sich in der Art der zur Ausbildung gelangten Flächen völlig gleichen. Wohl aber wurde schon frühzeitig (NIKOLAUS STENO, 1669) gefunden, daß an den Kristallkanten eines bestimmten Stoffes immer die gleichen charakteristischen Winkel wiederkehren. Dieses **Gesetz von der Konstanz der Winkel** fordert also für alle Individuen einer Kristallart die absolute Gleichheit der Winkel zwischen einander entsprechenden Flächen.

Ein auffallendes Merkmal vieler Kristalle ist ihre Symmetrie. Aufgrund von Symmetriebetrachtungen ist es dann schließlich auch gelungen, die Vielfalt der Kristalle auf **Kristallsysteme** zurückzuführen, indem man, ähnlich wie in der Geometrie, ein dem jeweiligen Kristalltyp angepaßtes Achsensystem (Bild 1.2) zugrunde legt, auf das sich dann alle Flächen des Kristalls leicht beziehen lassen.

Folgende Kristallsysteme werden unterschieden (Bild 1.3):

**a) Das kubische System:** 3 gleich lange Achsen schneiden sich unter rechten Winkeln (Beispiel: der Würfel oder das von 8 gleichseitigen Dreiecken begrenzte Oktaeder).

**b) Das tetragonale System:** 2 gleich lange Achsen bilden einen rechten Winkel, die 3. Achse von abweichender Länge steht senkrecht auf beiden (Beispiel: Säule mit quadratischem Querschnitt).

**c) Das orthorhombische System:** 3 ungleich lange Achsen schneiden sich unter rechten Winkeln (Beispiel: Quader).

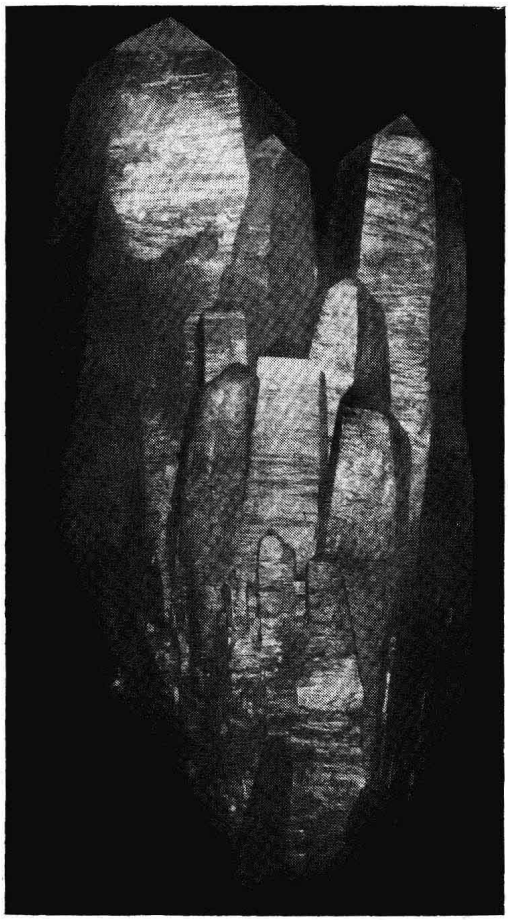


Bild 1.1 Natürlich gewachsene Quarzkristalle

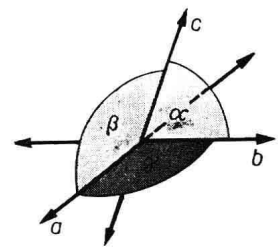



Bild 1.2 Achsen- und Winkelbezeichnungen

**d) Das rhomboedrische System:** 3 gleich lange Achsen schneiden sich unter gleich großen, aber nicht rechten Winkeln (Beispiel: Rhomboeder, d. i. ein in Richtung der Raumdiagonalen zusammengeschobener oder gestreckter Würfel).

**e) Das hexagonale System:** 3 gleich lange Achsen schneiden sich unter Winkeln von 60°, eine 4. Achse von abweichender Länge steht senkrecht auf der von den anderen Achsen gebildeten Ebene (Beispiel: 6seitiges Prisma oder 6seitige Pyramide).

**f) Das monokline System:** 2 Achsen von ungleicher Länge schneiden sich schiefwinklig, die 3. Achse von abweichender Länge steht senkrecht auf den beiden anderen.

**g) Das trikline System:** 3 ungleich lange Achsen schneiden sich unter ungleichen Winkeln.

## 1.2. Das Gesetz der rationalen Indizes

Im allgemeinen Fall kann eine Kristallfläche so liegen, daß sie alle 3 Achsen schneidet. Damit ist ihre Lage durch die Angabe der 3 Achsenabschnitte, die mit $a$, $b$, $c$ bezeichnet werden, festgelegt. Da eine Fläche sich während des Kristallwachstums nur parallel

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com