Festkörper-physik



Festkörper-physik

Buscherowsky, Gau, Schmitz, Wendt

Volk und Wissen
Volkseigener Verlag Berlin
1980

Autoren:
Dr. Hubert Buscherowsky — Kapitel 5; 7
Barbara Gau — Kapitel 8; 11; 12
Ingrid Schmitz — Kapitel 8; 9; 10
Prof. Dr. Joachim Wendt — Kapitel 1; 2; 3; 4; 6

Redaktion: Günter Meyer

Dieses Buch kann für den fakultativen Unterricht an Erweiterten Oberschulen verwendet werden.

© Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin 1977
2. Auflage
Ausgabe 1977
Lizenz-Nr. 203 1000/80 (UN 02 17 04—2)
LSV 0681
Zeichnungen: Mechthild Estenfelder
Einband: Manfred Behrendt
Typografische Gestaltung: Atelier vwv
Printed in the German Democratic Republic
Gesamtherstellung: VEB Druckerei „Thomas Müntzer", 582 Bad Langensalza
Schrift: 10/11 p Gill Monotype
Redaktionsschluß: 25. 4. 1980
Bestell-Nr. 706 865 1
DDR: 6,10 M

Inhalt

1.	Zur Bedeutung der Festkörperphysik	7
2.	Aufbau der Festkörper	15
3.	Kristallformen und Kristallgitter	26
4.	Kristallisation	42
5.	Bindungstypen und Eigenschaften von Festkörpern	54
6.	Realkristalle	75
7.	Röntgenfeinstrukturuntersuchungen	84
8.	Elektronenleitung in Festkörpern	98
9.	Herstellung von Transistoren	127
10.	Optische Eigenschaften von Festkörpern	138
11.	Magnetische Eigenschaften von Festkörpern	168
12.	Thermoelektrische Eigenschaften von Festkörpern	190
	Experimente	202
	Lösungen	209

Zur Benutzung des Buches

Dieses Lehrbuch enthält ausgewählt und systematisch geordnet einen Lehrgang zur Festkörperphysik. Um ein selbständiges Erarbeiten von Erkenntnissen zu ermöglichen, befinden sich neben an den entsprechenden Stellen eingefügte Fragen zum Inhalt des dargestellten Bildungsgutes auch durchgerechnete Beispiele, Aufgaben und Lösungen, Informationstexte für die Ausarbeitung von Schülervorträgen, Literaturangaben und Anleitungen zu Experimenten im Buch. Diese Elemente wurden in den Text aufgenommen, damit dem Leser günstige Möglichkeiten des Kenntniserwerbs gegeben werden. Deshalb sind in den Aufträgen und Aufgaben auch verschiedene Verfahren und Methoden der Erkenntnisgewinnung, so wie sie im Studium angewendet werden, deutlich gemacht.
Der Inhalt des Buches umfaßt etwa den Bereich der Festkörperphysik, der im fakultativen Unterricht an der Erweiterten Oberschule der DDR entsprechend dem Lehrgang „Festkörperphysik I und II" behandelt werden kann.
Zur einheitlichen Kennzeichnung werden folgende Symbole verwendet:

- ● Aufgaben und Fragen
- ① Aufgaben (fortlaufend numeriert), zu denen im Anhang eine Lösung angegeben ist
- ▼ Experimente, die Ziffer gibt an, daß es hierzu eine Beschreibung und Anleitung im Anhang gibt
- ↗ bedeutet Hinweis auf eine entsprechend genannte Textstelle oder ein Bild
- | bedeutet Text, der zur Erläuterung, zur weiteren Information und zur Vorbereitung auf die Durchführung von besonderen Aufträgen dienen soll



1. Zur Bedeutung der Festkörperphysik

Ein Panzer ist ein kompliziertes technisches System, das unter verschiedenen Bedingungen funktionsfähig sein muß. Die ständige Gefechtsbereitschaft, der Entwicklungsstand der Technik und Strategie und Taktik der Streitkräfte erfordern bei solchen Kampfmitteln den Einsatz von Werkstoffen, die hohen Belastungen standhalten

---

Werkstoffe, die zum Beispiel hohen mechanischen Belastungen standhalten, sind bekannt. Die Eigenschaften dieser Werkstoffe hängen im wesentlichen von ihrem inneren Aufbau ab. Wenn man die Eigenschaften der Werkstoffe (z. B. Festigkeit) verbessern will, dann muß man den inneren Aufbau untersuchen und gezielt beeinflussen.
Das Wissenschaftsgebiet, das die Erforschung des inneren Aufbaus und des Zusammenhangs zwischen Struktur und Eigenschaften der Stoffe zum Inhalt hat, ist die Festkörperphysik.

Zur historischen Entwicklung

Bereits im Altertum wurden die Bodenschätze verwendet, um die natürlichen Eigenschaften der in ihnen enthaltenen Metalle auszunutzen. Durch Beobachtung erkannte man, mit welchen Mitteln einzelne Eigenschaften, vor allem die mechanische Festigkeit von Metallen, verbessert werden konnten. Auf die Zeit der vorwiegend auf Beobachtung äußerer Erscheinungsformen der Festkörperstoffe gegründeten Wissenschaften folgte die Periode, in der die Wissenschaftler tiefer in die Zusammenhänge zwischen Eigenschaften dieser Stoffe und deren innerem Aufbau eindrangen.
Bis in die zwanziger Jahre unseres Jahrhunderts interessierte die Menschen an den Werkstoffen vor allem die mechanische Festigkeit. In vielen Fällen haben auch optische Eigenschaften (Schmuckgegenstände, optische Instrumente), elektrische Eigenschaften (Entwicklung der Elektroenergiewirtschaft im 19. Jahrhundert) und thermische Eigenschaften (Schmelzen von Metallen) das Interesse der Techniker und Wissenschaftler hervorgerufen. Für eine gemeinsame Bezeichnung aller festen Körper wurde ihre bedeutsamste und auffälligste Eigenschaft, die Festigkeit, ausschlaggebend. Man prägte den Begriff **Festkörper**.



Bild 8/1 Zinnschachtofen A
mit Vorherd D
Darstellung aus der Schrift
„De re metallica"
von G. Agricola aus dem Jahre 1556

Heute werden alle kristallinen Stoffe zu den Festkörpern gezählt. In ihnen sind die Atome oder Moleküle regelmäßig angeordnet.
Die Nutzung der Mineralien, Gesteine und Erze wurde lange Zeit nur auf empirischer Grundlage betrieben. Die systematische Untersuchung und Darstellung ihrer Eigenschaften und Vorkommen begann mit den Arbeiten von Georg Agricola (1494 bis 1555). Nach Studien in Leipzig, Bologna, Venedig und Padua praktizierte er zunächst als Arzt in Joachimsthal und war später Bürgermeister in Chemnitz. 1527 begann er mit dem Sammeln von Gesteinen und Mineralien im Erzgebirge. Dabei erwarb er auch Kenntnisse über das Bergwerks- und Hüttenwesen, wovon seine Veröffentlichungen künden.
In seiner Schrift „De natura fossilium" (Über die Natur der Gesteine und Mineralien) legte er die Unterscheidungsmerkmale für Mineralien erstmals fest. Von ihnen wird auch heute noch bei der Mineralbestimmung ausgegangen. Bis zur Zeit von M. W. Lomonossow (1711 bis 1765) und D. J. Hauy (1743 bis 1822) blieb die Mineralogie eine auf Beobachtung und Vergleich gegründete beschreibende Wissenschaft. Lomonossow und Hauy begannen mit der genauen Messung an Kristallen. Im Verlauf der Entwicklung entstanden für die in der Natur vorkommenden Körper und Stoffe unterschiedliche Bezeichnungen.

● *Fertigen Sie eine Zusammenstellung von Bezeichnungen für Mineralien an! Literatur: J. Bohm, Kristalle. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1975, Seite 85 bis 95.*

Kristall ist ein Festkörper, der von gleichmäßig ausgebildeten ebenen Flächen begrenzt wird. Er entsteht aus einem Keim durch Wachstum. Erfolgt dieses Wachstum so, daß alle Bausteine gleiche Orientierung haben, so heißt der Kristall *Einkristall.*

Kristallit ist ein Kristall von sehr geringem Volumen. Kristallite entstehen bei Vorhandensein vieler Keime infolge der gegenseitigen Wachstumsbehinderung. Kristallite bilden *polykristalline Körper,* wie zum Beispiel metallische Werkstoffe oder Gesteine.

Mineralien sind chemisch und physikalisch homogene Festkörper, die zumeist im kristallinen Zustand als natürliche Bestandteile in der Erdkruste vorkommen.

Gesteine setzen sich aus mehreren Mineralien zusammen und bestehen in ihrem Aufbau aus Kristalliten.

▼ Es wird ein Feldstein zerschlagen. Die Bruchfläche wird mit einer Lupe betrachtet. Beschreiben Sie die Beobachtungsergebnisse an Bruchflächen verschiedener Gesteine!

● *Fertigen Sie eine Übersicht über das Aussehen, die Zusammensetzung, die Eigenschaften und die Anwendung der Mineralien Brauneisenstein, Kalkspat und Gips an! Beschaffen Sie sich die Informationen hierzu aus Chemielehrbüchern, Lehrbüchern der Mineralogie und aus Nachschlagewerken!*

Es dauerte Jahrhunderte, bis man sich von der Beschreibung der äußeren Gestalt eines Kristalls löste und den Zusammenhang zwischen äußerer Form und innerem Aufbau sowie zwischen diesem und den Eigenschaften fand. Von verschiedenen Wissenschaftlern wurde schon frühzeitig die Vermutung geäußert, daß die Festkörper aus kleinen Bausteinen bestehen müßten. J. Kepler schrieb in seiner Arbeit „Über den sechseckigen Schnee" im Jahre 1611, daß die Schneekristalle regelmäßig, aus kleinsten Teilchen, aufgebaut sein müßten.

● *Fertigen Sie ein Konspekt über Keplers Schrift „Über den sechseckigen Schnee" an! Benutzen Sie den Artikel von Safranovskij in der Zeitschrift „Wissenschaft und Fortschritt" 21 (1971), H. 12, S. 572!*

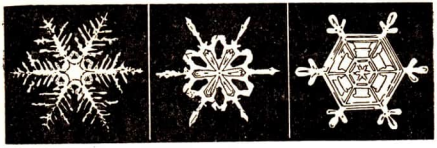


Bild 9/1 Schneekristalle. Sie besitzen eine sechszählige Symmetrie um eine Achse durch den Mittelpunkt des Kristalls

Anfertigen eines Konspektes. In einem Konspekt erfolgt die knappe Zusammenfassung wesentlicher Informationen eines Artikels oder eines Buches. Es können dabei einzelne Formulierungen wörtlich übernommen werden (Zitate). Diese werden im Konspekt durch Setzen von Anführungszeichen und Angabe der Seite, der das Zitat entnommen ist, kenntlich gemacht. Ausführliche Abschriften sind bei Konspekten zu vermeiden. In Stichpunkten wird Wesentliches übersichtlich erfaßt. Dabei kann ein klarer Überblick durch die Anfertigung einer schematischen Darstellung gewonnen werden. Versuchen Sie, ein Schema zu entwerfen, aus dem wichtige Beziehungen zwischen den Einzelheiten in dem Artikel von Safranovskij deutlich hervorgehen! Bei der Anfertigung des Konspektes sollten Sie für mögliche Ergänzungen Platz lassen.

In der Schrift Keplers wird erstmals ein Zusammenhang zwischen der äußeren Form der Kristalle und ihrem inneren Aufbau hergestellt. Damit beginnt die wissenschaftliche Kristallografie.
In der *Kristallografie* werden äußere Gestalt, Eigenschaften und Veränderungen an Kristallen untersucht.
Die Annahme vom Zusammenhang zwischen äußerer Gestalt und innerem Aufbau der Kristalle wurde 1784 durch R. J. Hauy wieder aufgegriffen. Bild 10/1 zeigt, wie er sich den Aufbau der Kristalle aus kleinen würfelförmigen Teilchen vorstellte.

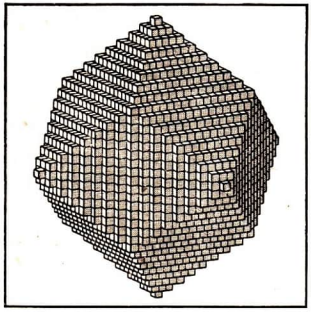


Bild 10/1 Aufbau
eines Kristalls aus Würfeln nach der Vorstellung von Hauy

M. von Laue konnte 1912 experimentell mit Hilfe von Röntgenstrahlen nachweisen, daß die Atome, Ionen oder Moleküle in Festkörpern regelmäßig angeordnet sind. Sie bilden ein **Kristallgitter**. Damit war die Möglichkeit gefunden, den Zusammenhang zwischen der Anordnung der Atome, Ionen oder Moleküle im Festkörper und seinen Eigenschaften auf experimentellem Wege zu erforschen.

● *Geben Sie an, wie die experimentellen Bedingungen des Experiments „Wellenlänge des Lichtes", Praktikumsheft Physik Klasse 11, S. 7/8, abgewandelt werden müssen, wenn der Abstand a der Bausteine eines Festkörpers bestimmt werden soll!*

Einen bedeutenden Anteil an der wissenschaftlichen Entwicklung der Mineralogie, Kristallographie und Festkörperphysik haben neben vielen Wissenschaftlern der Welt russische und sowjetische Physiker. Nach der Begründung der russischen Mineralogie durch M. Lomonossow veröffentlichte 1890 J. S. Fjodorow (1853 bis 1919) eine Arbeit über Symmetrien an regulären Kristallsystemen. Unabhängig von A. Schoenfließ (1853 bis 1928) konnte er gleichzeitig mit diesem durch mathematische Überlegungen nachweisen, daß es nur 230 Raumgruppen der Symmetrie für Kristalle geben kann. Diese ließen eine Zuordnung zu sieben Kristallsystemen zu (↗ S. 26 ff). Bedeutende Fortschritte bei der Aufklärung der Kristallstrukturen sowie der mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Festkörper konnten durch die sowjetischen Wissenschaftler unter Leitung von J. A. Joffe am Leningrader physikalisch-technischen Institut erbracht werden. Joffe führte eine neue Auffassung über die Ursachen für die mechanische Festigkeit von Kristallen ein. So konnte er die Wirkung von Oberflächendefekten auf die Festigkeit von Ionenkristallen nachweisen. Seit 1930 widmete sich Joffe der systematischen Erforschung von Halbleitern. Zusammen mit J. A. Frenkel (1894 bis 1954) erklärte er erstmals den Mechanismus der Gleichrichterwirkung von Halbleiterdioden (↗ Kapitel 8). Joffe klärte auch den thermoelektrischen Effekt bei Halbleitern auf. Auf seine Untersuchungen hin wurden thermoelektrische Umformer in der Sowjetunion gebaut (↗ Kapitel 12). Nach Frenkel wurden Kristallfehler, die von ihm entdeckt wurden, benannt (↗ Kapitel 6).

Zur gegenwärtigen Bedeutung der Festkörper

In den vergangenen sechs Jahrzehnten wurden viele weitere Eigenschaften der Festkörper entdeckt und erforscht. Ursache hierfür sind die Wechselbeziehungen zwischen der Entwicklung der Gesellschaft und dem wissenschaftlich-technischen Fortschritt, die auf technischem Gebiet solche Bereiche erschlossen hat wie zum Beispiel Raumfahrt, Kernenergie, Elektronik, Meß-, Steuer- und Regeltechnik, Datenverarbeitung, Automatisierung von Werkzeugmaschinen und Fertigungsstrecken, Überschallflugverkehr u. v. a. m.
In diesen Bereichen herrschen Bedingungen, die Werkstoffe mit besonderen Eigenschaften erfordern. Bauelemente, deren Werkstoffe hohen Belastungen standhalten müssen, sind unter anderem:

- Brennkammern in Raketentriebwerken,
- Leitungssysteme und Pumpen in Kernkraftwerken,
- Sonnenbatterien in Raumfahrzeugen,

- Elektronische Leiteinrichtungen für Panzerabwehrraketen,
- Sender und Empfänger für die Bildübertragung mit Satelliten,
- Elektronische und elektrische Kontroll- und Steuersysteme in Kraftwerken,
- Magnetspeicher in Datenverarbeitungsanlagen,
- Werkzeugwerkstoffe.

- *Geben Sie an, worin die extremen Betriebsbedingungen der genannten Baugruppen bestehen!*
- *Legen Sie sich eine Bilder- und Artikelsammlung zu folgenden Themen an:*
  - *Festkörper und ihre Anwendung in der Produktion,*
  - *Neue Forschungsergebnisse in der Festkörperphysik,*
  - *Experimentelle Verfahren in der Festkörperphysik.*

Aufgaben der Festkörperphysik

Wenn man vom Problem der Rohstoffversorgung und vom steigenden Bedarf an Werkstoffen ausgeht, so ergeben sich zwei Untersuchungsrichtungen auf dem Gebiet der Festkörperphysik:

- Verbesserung bereits vorhandener Eigenschaften von Festkörpern,
- Herstellung neuer Werkstoffe mit vorgeplanten Eigenschaften.

In beiden Forschungsrichtungen geht es um die Anwendung von Festkörpern, die Forschungen werden als **Anwendungsforschung** bezeichnet. Diese kann nur dann gute Ergebnisse erreichen, wenn sie auf sicheren Kenntnissen und Erkenntnissen über die innere Struktur der Festkörper und über den Zusammenhang zwischen Struktur und Eigenschaften aufbauen kann.
Experimentelle und theoretische Forschung, die als Grundlage für die Anwendung von Forschungsergebnissen dient, wird **Grundlagenforschung** genannt. Zwischen der Grundlagenforschung und der Anwendungsforschung bestehen enge Wechselbeziehungen. So sind Aussagen über die optischen Eigenschaften eines Halbleiters beispielsweise nur möglich, wenn zuvor experimentelle Resultate zum Aufbau von Modellvorstellungen über die energetischen Zustände der Elektronen im Festkörper geführt haben. Aus den gewonnenen Kenndaten des realen Objektes sind Rückschlüsse auf die Richtigkeit der verwendeten Modellvorstellungen möglich.

- *Wiederholen Sie die Schrittfolge für die Erarbeitung eines Modells in der Physik! Verwenden Sie „Wissensspeicher Physik" Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin 1974!*

In der Festkörperphysik ist die Schaffung von Ersatzobjekten, von Modellen, für die Wirklichkeit sehr schwierig, da Festkörper aus einer großen Anzahl von Teilchen bestehen. Alle diese Teilchen stehen miteinander in Wechselwirkung. Festkörper sind **Vielteilchensysteme** im Sinne der Quantenmechanik.

In der Festkörperphysik werden untersucht:

- alle physikalischen Eigenschaften kristalliner Körper,
- Zusammenhänge zwischen dem inneren Aufbau und den Eigenschaften eines Festkörpers,
- Wechselwirkungen zwischen Festkörpern und ihrer Umgebung (mit anderen Festkörpern, Flüssigkeiten, Gasen und elektromagnetischen Feldern).

Bei Forschungen auf dem Gebiet der Festkörperphysik werden experimentelle Verfahren aus allen Gebieten der Physik angewendet. Das hat unter anderem seine Ursache in der Vielfalt der Eigenschaften von Festkörpern. Zum Beispiel wird zur Analyse des Abstandes der Bausteine im Kristall die **Röntgenstrukturanalyse** angewendet (Bild 84/1). Für die Analyse von Vorgängen an der Oberfläche von Metallen werden häufig **Elektronenmikroskope** eingesetzt (Bild 13/1).
Für einfache Untersuchungen an Metalloberflächen oder an Gesteinsproben genügen häufig Beobachtungen unter dem **Lichtmikroskop**.
Von den Eigenschaften der Festkörper werden in diesem Buch jene ausführlich behandelt, deren Untersuchung und Verbesserung von großer volkswirtschaftlicher Bedeutung ist wie zum Beispiel die mechanische Festigkeit von Werkstoffen und solche, deren technische Nutzung erst in letzter Zeit bedeutende Fortschritte gemacht hat, wie elektrische, magnetische, optische und thermoelektrische Eigenschaften.
Im vorliegenden Lehrbuch werden verschiedene Inhalte der Festkörperphysik behandelt (vgl. Übersicht auf S. 14).
Manche Fragestellungen zu den mechanischen Eigenschaften von Festkörpern lassen sich anhand der Kenntnisse der Atomanordnung beantworten. Dazu zählen Fragen nach den Bindungsverhältnissen und nach dem Mechanismus des Kristallwachstums. Die Aussagekraft der hierbei durchgeführten Überlegungen wird erhöht, wenn zusätzlich zu den geometrischen noch energetische Verhältnisse betrachtet werden (Kapitel 3, 5).

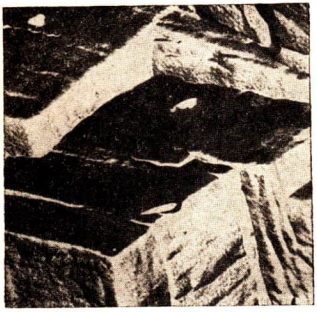
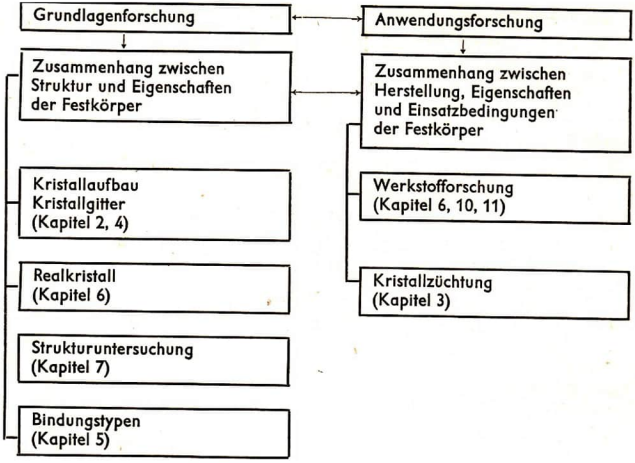
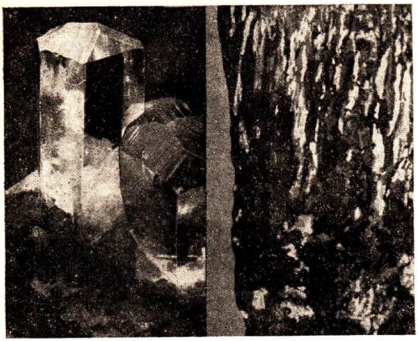


Bild 13/1 Elektronenmikroskopische Abbildung einer Aluminiumoberfläche mit würfelförmigen Kristalliten



Oft ist es erforderlich, vom Verhalten der Elektronen im Vielteilchensystem auszugehen. Das gilt besonders bei der Untersuchung der optischen, elektrischen und magnetischen Eigenschaften der Festkörper. Die Elektronenzustände sind auch wichtig, wenn die Bindungskräfte im Kristallgitter erklärt werden sollen (Kapitel 5, 8, 11).



2. Aufbau der Festkörper

Bild 15/1 Orthoklaskristall (links), der unter natürlichen Bedingungen gewachsen ist und Bruchfläche eines spröden grobkörnigen Werkstoffes (rechts). Bei ungestörtem Wachstum können sich große Einkristalle bilden, wie sie von vielen Mineralien bekannt sind. Gesteine und Metalle treten normalerweise in polykristalliner Form auf

Die gleichmäßige äußere Form eines Einkristalls deutet auf eine regelmäßige Anordnung der Bausteine in seinem Inneren hin.
Wenn die Bausteine im Innern eines Kristalls in einer bestimmten, u. U. etwa stoffabhängigen Art angeordnet sind, dann können solche Eigenschaften wie Zusammenhalt (mechanische Festigkeit), Lichtdurchlässigkeit, Magnetisierbarkeit u. a. bei gleichmäßiger Anordnung richtungsabhängig sein.
Eine experimentelle Untersuchung der Eigenschaften im Zusammenhang mit seinem inneren Aufbau kann Aufschluß darüber geben, in welchen Fällen eine Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften bei Festkörpern vorliegt. Auf Grund der dabei gewonnenen Erkenntnisse können Wissenschaftler und Techniker Werkstoffe mit vorbestimmten Eigenschaften herstellen.

Mechanische Festigkeit von Festkörpern

Das Seil einer elektrischen Hochspannungs-Freileitung muß verschiedenen Bedingungen entsprechen. Zum Beispiel soll bei der Energiefortleitung der Energieverlust infolge des Leitungswiderstandes möglichst gering bleiben. Das erreicht man durch Verwendung eines Werkstoffes mit guter elektrischer Leitfähigkeit (↗ Kapitel 8), der aber meist eine geringe mechanische Festigkeit besitzt. Außerdem soll der Werkstoffeinsatz für die Freileitung möglichst gering sein. Das erreicht man durch geringen Seilquerschnitt und großen Abstand der Leitungsmasten, was wiederum eine hohe mechanische Festigkeit erfordert. Wird das Leitungsseil zwischen den Masten gespannt, dann wirkt am Seil mit dem Querschnitt A eine Zugkraft F. Im belasteten Zustand setzt der Werkstoff des Seiles dieser mechanischen Belastung einen mechanischen Widerstand entgegen, man bezeichnet diesen Widerstand als

Spannung σ

Die Spannung σ ist gleich dem Quotienten aus der Kraft F und der belasteten Querschnittsfläche A	$\sigma = \frac{F}{A}$

Oberhalb einer bestimmten Spannung σ_B wird der Zusammenhalt des Festkörpers zerstört. σ_B wird als Bruchfestigkeit oder Bruchspannung bezeichnet. Diese Kenngröße eines Werkstoffes nimmt je nach stofflicher Zusammensetzung, Gefügestruktur und Vorhandensein von Kristallfehlern (↗ Kapitel 6) sehr unterschiedliche Werte an.

Bruchfestigkeit von Werkstoffen bei Zugbelastung

Werkstoff	σ_B in kp · mm^{-2}	Werkstoff	σ_B in kp · mm^{-2}
Blei	1,5	Gußeisen	15
Papier	1,5	Kupfer	23
Glas (Jena)	2,3	Messing	40
Aluminium	9,2	Stahl	30 bis 400
Zink	13	Eisenwhisker	1340

Bei geringer Zugbelastung dehnt sich jeder Festkörper proportional zur wirkenden Kraft. Bei abnehmender Belastung geht die Dehnung in gleichem Maße wieder zurück. Diese Erscheinung bezeichnet man als **Elastizität** eines Festkörpers. Sie kann ebenfalls wie die Festigkeit aus dem inneren Aufbau des Festkörpers erklärt werden.
In Festkörpern sind die Atome, Ionen oder Moleküle über größere Entfernungen regelmäßig angeordnet. Diese Anordnung der Teilchen heißt **Kristallgitter**. Die Teilchen bezeichnet man als Gitterbausteine.

● *Bereiten Sie sich auf einen Vortrag zum Thema „Die Kräfte zwischen den Teilchen in Kristallgittern" vor! Benutzen Sie folgende Literatur: Sommer. Wissensspeicher Chemie, Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin 1975, S. 46, 54, 55; Podgornowa/Kondakow. Aus der Festkörperphysik. Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin 1975, S. 29 bis 32.*

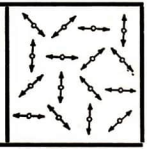
Vortrag: (Erarbeitungsschritte)

1. Lesen Sie die angegebene Literatur und notieren Sie wesentliche Zusammenhänge!
2. Fertigen Sie nach erneutem Lesen eine vorläufige Gliederung für Ihren Vortrag an!
3. Notieren Sie, zu welchen Gliederungspunkten Sie weitere Informationen benötigen!

4. Beschaffen Sie sich die Informationen nach 3. aus weiterführender Literatur, die in den oben angegebenen Büchern genannt ist!
5. Notieren Sie sich die Leitgedanken Ihres Vortrages!
6. Überprüfen Sie, zu welchen Abschnitten Ihres Vortrages Skizzen oder Notizen an der Tafel oder auf einem Tageslichtschreiber erforderlich sind. Achten Sie darauf, daß Ihre Mitschüler klare Vorstellungen über die von Ihnen dargelegten Sachverhalte gewinnen!
7. Fertigen Sie entsprechende Skizzen und Notizen für die Tafel an!

Im Ergebnis des Vortrages gelangt man zu folgender Erkenntnis:

In Festkörpern sind die Gitterbausteine auf Gitterplätzen angeordnet, an denen sie entsprechend der Temperatur des Körpers Schwingungen mit unterschiedlicher Amplitude ausführen.



Verformbarkeit der Festkörper

Bei der Belastung eines Festkörpers wirkt der inneren Anziehungskraft zwischen den Gitterbausteinen eine äußere Zugkraft entgegen. Im Bereich der Elastizität, d. h. in dem der Festkörper keine bleibende Verformung erfährt, vergrößern sich die Abstände zwischen den Teilchen nur soweit, daß bei einer Entlastung infolge Anziehungskraft zwischen den Teilchen diese wieder in ihre ursprüngliche Lage im Gitter zurückkehren. Es liegt eine *elastische* Verformung vor.
Wenn der Abstand der Teilchen beim Einwirken einer äußeren Kraft so groß wird, daß die Kraft zwischen den Gitterbausteinen überwunden wird, dann ist die *Elastizitätsgrenze* überschritten. Die Teilchen nehmen nach einer Entlastung ihre ursprüngliche Lage nicht wieder ein. Es liegt eine *plastische* Verformung vor. Diese ist nicht umkehrbar.
Das plastische Verhalten eines Werkstoffes kann mit dem Wirken einer Kraft zwischen den Gitterbausteinen allein nicht mehr erklärt werden (↗ Kapitel 6).

Isotropie in Festkörpern

In der Regel kann man ein Metall in verschiedenen Richtungen belasten und erhält unter gleichen Bedingungen gleiche Dehnungen. Die Abhängigkeit der Festigkeit und der Elastizität von der Richtung der Belastung im Werkstoff kann mit folgendem Experiment untersucht werden.

▼ Aus einer Aluminiumfolie werden zwei zueinander rechtwinklig liegende Streifen von gleicher Breite und gleicher Länge ausgeschnitten. Beide Streifen reißen bei etwa gleicher Zugbelastung.

Das Zugbelastungsexperiment zeigt, daß das Metall Aluminium keine bevorzugte Richtung in bezug auf Belastbarkeit hat. Der Grund dafür liegt im Aufbau der Metalle aus vielen regellos angeordneten Kristalliten.

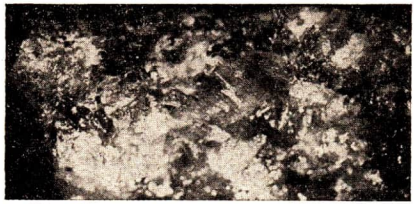


Bild 18/1 Gesteine sind Polykristalle. In ihnen gibt es Kristallite unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung

Festkörper, die aus einer Zusammenlagerung vieler regellos angeordneter Kristallite bestehen, heißen Polykristalle. In ihnen sind die Eigenschaften richtungsunabhängig. Sie zeigen isotropes Verhalten.

Anisotropie in Festkörpern

● *Wiederholen Sie Ihre Kenntnisse über die Polarisation des Lichtes! Benutzen Sie das Lehrbuch Physik Klasse 11! Erklären Sie an Hand einer Skizze folgende Begriffe: Lichtvektor; Polarisationsrichtung; natürliches Licht; Polarisationsebene; Drehwinkel der Polarisation!*

▼ Es ist eine Geräteanordnung aufzubauen, mit der Polarisationsexperimente durchgeführt werden können. Die Polarisationsfilter werden so eingestellt, daß auf einem Schirm Dunkelheit eintritt, wenn Licht durch die Filter gelenkt wird. Beobachten Sie die unterschiedliche Helligkeit auf dem Schirm, wenn Sie verschiedene Plastefolien senkrecht zum Lichtweg zwischen Polarisator und Analysator spannen!

Die Erscheinung der Doppelbrechung (Bild 19/1) hängt von der Richtung ab, mit der das Licht in den Kristall eintritt. In Richtung der sogenannten optischen Achse verschwindet sie ganz.
Spröde Einkristalle lassen sich entlang bestimmter Ebenen leicht spalten, was sehr deutlich an Glimmer zu beobachten ist.

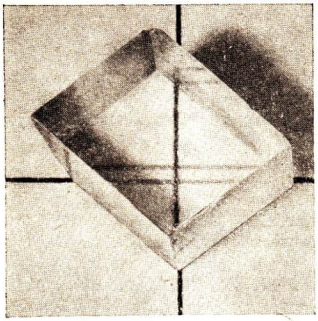


Bild 19/1 Die Doppelbrechung des Lichtes am Kalkspatkristall ist durch die Anisotropie der optischen Eigenschaften erklärbar. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes ist in den verschiedenen Richtungen nicht gleich groß

▼ Ein Glimmerplättchen wird auf eine feste Unterlage gelegt. Eine Nadel wird mit der Spitze daraufgesetzt und erhält einen leichten Schlag mit einem Hammer. Danach ist die Oberfläche des Glimmerplättchens zu betrachten.

● *Skizzieren Sie Ihre Beobachtungen zum Versuch über mechanisches Verhalten!*

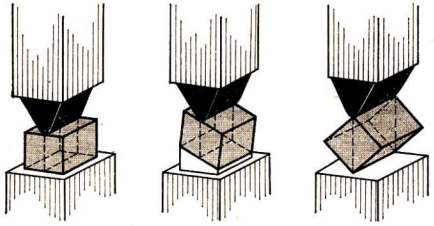


Bild 19/2 Anisotropie der Druckfestigkeit beim Kochsalz

Einkristalle haben richtungsabhängige physikalische Eigenschaften. Sie zeigen anisotropes Verhalten.

Anordnung der Teilchen in Festkörpern und Flüssigkeiten

In Festkörpern und Flüssigkeiten stehen die Teilchen miteinander in Wechselwirkung. Über die Kraftwirkung zwischen den Gitterbausteinen eines Festkörpers kann eine Aussage getroffen werden, wenn der Übergang vom festen in den flüssigen Zustand untersucht wird. Dieser Übergang erfordert die Zuführung von Energie, z. B. durch Erwärmen.

● *Vergleichen Sie die Begriffe Wärmemenge und innere Energie miteinander, und geben Sie die Definition für diese Größen an!*
Welche der Größen ist eine Zustandsgröße?
(Lehrbuch Physik Kl. 11, S. 95; Wissensspeicher Physik, S. 160)

Durch die Zufuhr von Wärmeenergie erhöht sich der Energiebetrag jedes Kristallbausteins. Diese Energieerhöhung führt zu größeren Schwingungsweiten der Teilchen um ihre Ruhelage. Der Abstand der Teilchen vergrößert sich, die Anziehungskraft ist nicht mehr ordnend wirksam. Schließlich schmilzt der Festkörper. Eine quantitative Aussage über die Kraft zwischen den Teilchen eines Stoffes gibt die

spezifische Schmelzwärme q_s.

Die spezifische Schmelzwärme q_s eines Stoffes ist definiert als Quotient aus der Schmelzwärme W_s und der Masse m des geschmolzenen Stoffes.	$q_s = \frac{W_s}{m}$

Der Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand erfordert ebenfalls eine Wärmezufuhr. Dabei steigt zunächst die Temperatur der Flüssigkeit. Die Energie der Teilchen nimmt zu, so daß sie die Oberfläche der Flüssigkeit verlassen können. Sie bilden ein Gas. Der ursprüngliche Ordnungszustand ist verlorengegangen.

Eine quantitative Aussage über die Kraft zwischen den Flüssigkeitsteilchen gibt die

spezifische Verdampfungswärme q_v.

Die spezifische Verdampfungswärme q_v ist definiert als Quotient aus der Verdampfungswärme W_v und der Masse m des verdampften Stoffes.	$q_v = \frac{W_v}{m}$

Thermische Kenngrößen einiger Stoffe

Stoff	spezifische Schmelzwärme q_s in $J \cdot kg^{-1}$	Verdampfungswärme q_v in $J \cdot kg^{-1}$
Natrium	$1{,}13 \cdot 10^5$	$46{,}95 \cdot 10^5$
Zink	$1{,}10 \cdot 10^5$	$17{,}8 \cdot 10^5$
Blei	$0{,}26 \cdot 10^5$	$9{,}32 \cdot 10^5$
Quecksilber	$0{,}11 \cdot 10^5$	$2{,}97 \cdot 10^5$
Wasser	$3{,}35 \cdot 10^5$	$22{,}56 \cdot 10^5$

● *Welche Schlußfolgerungen ziehen Sie aus den Werten für die spezifische Schmelzwärme über die Bindung zwischen den Teilchen der genannten Stoffe?*

① Welche Eismasse kann durch die Wärmemenge geschmolzen werden, die beim Verbrennen von 2 kg Steinkohle frei wird?
② Welche Wärmemenge muß Blei mit einer Masse von 5 kg und 20 °C zugeführt werden, wenn dieses vollständig geschmolzen werden soll?
③ Welche Endtemperatur wird erreicht, wenn Eis mit einer Masse von 2 kg und 0 °C in Wasser mit einer Masse von 25 kg und 50 °C geschmolzen wird?

Nahordnung. Die niedrige spezifische Schmelzwärme deutet darauf hin, daß die Strukturänderung beim Übergang vom festen in den flüssigen Aggregatzustand nur gering ist. Es ist daher zu vermuten, daß Flüssigkeiten in ihrem Aufbau den Festkörpern mehr ähneln als den Gasen.
Diese Vermutung konnte durch Röntgenstrukturuntersuchungen bestätigt werden (Bild 21/1).
Die Ergebnisse der Röntgenstrukturuntersuchung zeigen, daß die Teilchen in Festkörpern und in Flüssigkeiten regelmäßig angeordnet sind. In der unmittelbaren Umgebung eines Flüssigkeitsteilchens, etwa bis zur Entfernung von fünf Molekülradien, liegt eine andere Anordnung der Teilchen vor als in größerer Entfernung. In Flüssigkeiten ist die Ordnung der Teilchen infolge der Wärme-

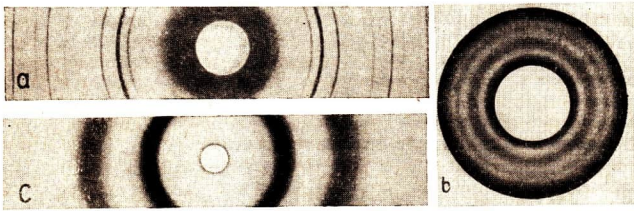


Bild 21/1 a) Beugungsdiagramm von Röntgenstrahlen an Aluminium
b) Beugungsdiagramm von Röntgenstrahlen an einem Hochpolymer
c) Beugungsdiagramm von Röntgenstrahlen an flüssigem Natrium

bewegung in makroskopischen Bereichen (Fernordnung) nicht konstant. Daher zeigen die Beugungsaufnahmen von Flüssigkeiten nur einen verwaschenen Beugungsring.

In Flüssigkeiten ist der Ordnungszustand nur in mikroskopischen Bereichen (einige Molekülradien) konstant. Es liegt eine Nahordnung der Teilchen vor.

Fernordnung. In Festkörpern ist die Kraft zwischen den Gitterbausteinen so groß, daß diese keine Translation ausführen können. Sie führen Schwingungen um eine Ruhelage aus. Die regelmäßige Anordnung der Teilchen bleibt über große Entfernungen erhalten. Ist der Abstand zweier benachbarter Teilchen in einer Richtung a, so ist der Abstand zum zehnten Teilchen 9a und der zum tausendsten 999a.

In Festkörpern liegt eine Fernordnung der Teilchen vor.

Nichtkristalline feste Stoffe heißen amorph.
In ihnen liegt eine Nahordnung der Teilchen vor. Sie sind in ihrem Aufbau den Flüssigkeiten ähnlich.

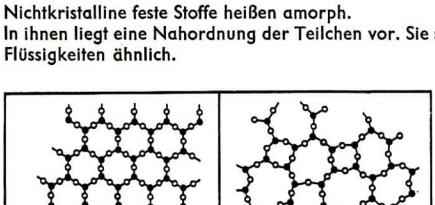


Bild 22/1 a) Fernordnung der Moleküle in kristallinem Quarz b) Nahordnung der Moleküle in Quarzglas

Gefüge von Legierungen und Keimbildung

Metalle werden meist nicht rein, sondern als Legierungen, das sind Lösungen eines Metalls oder eines Nichtmetalls in einem anderen Metall (Mischkristallbildung), verwendet. Solche Festkörper zeigen andere Eigenschaften als die betreffenden Stoffe in reiner Form. Durch das Legieren verändern sich Festig-

keit, Härte, chemische Beständigkeit, Schmelztemperatur usw. Für die Weiterentwicklung von Legierungen und für deren Einsatz hat die Gefügeuntersuchung Bedeutung. Als *Gefüge* wird die Anordnung der Kristallite im Metall bezeichnet. Gefügeuntersuchungen erfolgen in metallografischen Laboratorien. Die Wissenschaft, die sich mit den theoretischen Grundlagen und den Methoden der Metalluntersuchung befaßt, heißt *Metallografie*. Aus der Untersuchung der Gefügestruktur kann häufig auf die Bearbeitungsart eines Metalls oder auf die Art von Materialfehlern geschlossen werden. Für die genaue Bestimmung einzelner Bestandteile eines Gefüges muß dieses sichtbar gemacht werden.

▼ Stellen Sie unter Verwendung der angegebenen Literatur mit einem Kursmikroskop oder einem Kleinmikroskop C und einer Spiegelreflexkamera eine Geräteanordnung für mikrofotografische Aufnahmen zusammen! Die Beleuchtung erfolgt mit Lampen (60 W) und Sammellinsen ($f = 120$ mm) schräg von der Seite. Fertigen Sie Mikroaufnahmen von verschieden bearbeiteten (gehämmert bzw. poliert) Metalloberflächen an!

Die im Gefüge vorhandenen Kristallite werden als *Körner* bezeichnet. Sie bilden im Metall die sogenannte *Kornstruktur*. Durch verschiedene Ätzverfahren können entweder die *Kornflächen* oder die *Korngrenzen* sichtbar gemacht werden. Bei polykristallinen Stoffen (Gesteine, Metalle, Legierungen) sind mikrofotografische Aufnahmen der Kornstruktur zur Einschätzung von Qualität und Zusammensetzung des Stoffes geeignet.
Das Gefüge von Legierungen wird durch thermische (Glühen) oder mechanische Beeinflussung (Walzen, Schmieden) verändert. Bei der Bearbeitung mit Werkzeugen können ebenfalls Fehler im Kristall erzeugt werden (Kapitel 6), die zu einer Verfestigung führen. Die Ausrichtung der Kristallite in Metallen kann sogar soweit geführt werden, daß einige Eigenschaften des Werkstoffes anisotrop werden.

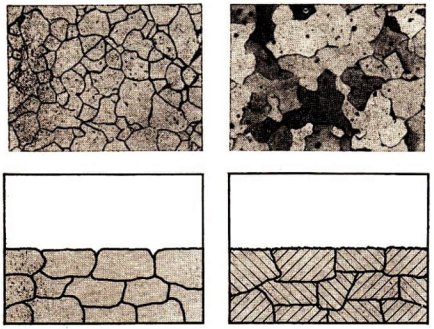


Bild 23/1 Mikrofotografische Aufnahmen von Metallgefügen
links: Korngrenzenätzung (Reineisen)
rechts: Kornflächenätzung (Reineisen)

▼ Führen Sie unter Verwendung der angegebenen Literatur die Untersuchung des Gefüges von Messing- und von Aluminiumblech durch! Fertigen Sie Mikrofotografien in verschiedenem Vergrößerungsmaßstab von einer unbearbeiteten und von einer geglühten Oberfläche an!

Literatur: H. Schuhmann. Metallografie. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig 1969; Emons/Keune/Seyfarth. Chemische Mikroskopie. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig 1973, S. 193 bis 196.

Vorbereitung des Experiments

1. Fertigen Sie auf Grund des Literaturstudiums Notizen auf Karteikarten an! Notieren Sie Zielstellungen für die Oberflächenuntersuchung!
2. Verschaffen Sie sich einen Überblick über mögliche Strukturen bei Metalloberflächen (Ätzen)!
3. Fertigen Sie eine Zusammenstellung über mögliche Ätzmittel für Metalloberflächen an!
4. Betrachten Sie vor der Anfertigung von Mikroaufnahmen die Metalloberflächen nach dem Schleifen und nach dem Ätzen durch ein Mikroskop!
5. Halten Sie die Aussagen über die Oberflächenbeschaffenheit in einem Protokoll fest! Achten Sie auf die Farben der Kristallite!
6. Fertigen Sie Mikrofotografien an!

Arbeitsschutzhinweise. Beim Arbeiten mit konzentrierten Säuren und Laugen ist äußerste Vorsicht geboten. Notieren Sie sich in Stichworten wichtige Hinweise für das Arbeiten mit Säuren und Laugen! Diese entnehmen Sie dem Wissensspeicher Chemie, Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin 1974, und der „Arbeitsschutzverordnung für den naturwissenschaftlichen Unterricht" vom 25. 5. 1967, S. 15.
Das Beobachtungsprotokoll muß sehr sorgfältig geführt werden. Es ist für den Vergleich mit Ergebnissen von Wiederholungsexperimenten wichtig. Das Laborprotokoll über Werkstoffuntersuchungen kann für die Qualität einer ganzen Produktionsserie entscheidend sein. Deshalb müssen im Protokoll stets alle Bedingungen angegeben werden, die bei der Oberflächenbearbeitung vorhanden waren.

Das Gefüge von Metallen entsteht dadurch, daß bei Abkühlung in einer Metallschmelze an den stets vorhandenen Keimen viele Kristallite wachsen, bis sich ein fester Verband gebildet hat.
Die Teilchen eines Stoffes lagern sich unter bestimmten Bedingungen (*Keimbildung*) zu größeren Verbänden zusammen. Dies erfolgt unter Energieabgabe, also dann, wenn die Energie des Verbandes kleiner ist als die Summe der Energien der Einzelteilchen.
Wenn sich weitere Teilchen an den Keim bzw. Kristallit anlagern, so wird Energie, die *Bindungsenergie*, frei. Wird diese Energie von der Umgebung des

Keimes (Lösung oder Schmelze) aufgenommen, so bleibt das Teilchen mit dem Keim verbunden. Nimmt es jedoch durch Stöße von benachbarten Teilchen Energie auf, so kann es sich wieder vom Keim lösen. Im ersten Falle wächst der Keim, im zweiten zerfällt er wieder.
Die Anzahl der vorhandenen Kristallisationskeime ist entscheidend dafür, ob ein grobkörniger oder feinkörniger Polykristall entsteht. Sind viele Kristallisationskeime vorhanden, dann entsteht ein feinkörniges Gefüge.

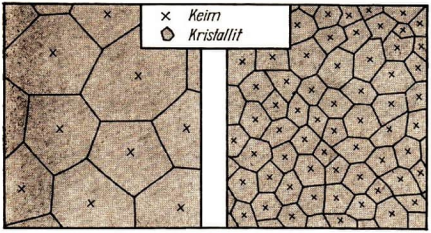
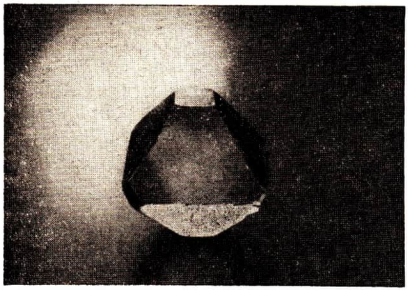


Bild 25/1 Einfluß der Anzahl der Kristallisationskeime auf die Ausbildung des Gefüges
links: grobkörniger Polykristall (wenig Keime)
rechts: feinkörniger Polykristall (viele Keime)

Die Anzahl der Kristallisationskeime in einer erstarrenden Metallschmelze bestimmt die Feinkörnigkeit des Gefüges.

Zusammenfassung

Kristalle bestehen aus einer regelmäßigen Anordnung von Atomen, Ionen oder Molekülen in Gittern. Die damit verbundene Fernordnung der Gitterbausteine ist der wesentliche Unterschied gegenüber Flüssigkeiten und amorphen Stoffen.
Festkörper mit einheitlicher Ordnungsstruktur werden als Einkristalle bezeichnet. Einkristalle können einzeln oder im Gefügeverband vorkommen. Im letzteren Fall werden sie als Kristallite oder Körner bezeichnet.
Einkristalle besitzen richtungsabhängige Eigenschaften. Sie sind anisotrop.
Die meisten Festkörper bestehen aus vielen Kristalliten. Sie sind polykristallin. Sind die Kristallite regellos angeordnet, so erscheint der Festkörper isotrop. Seine Stoffeigenschaften besitzen keine bevorzugte Richtung.
Günstige mechanische Eigenschaften lassen sich mit einem feinkörnigen Gefüge erzielen. Dies bildet sich bei Vorhandensein vieler Kristallisationskeime aus.
Beim Übergang eines Festkörpers in den flüssigen Zustand werden die Bindungen zwischen den Gitterbausteinen gelöst. Eine Ordnung ist wegen der vorhandenen Wärmebewegung der Teilchen in der Flüssigkeit nur noch in mikroskopischen Bereichen vorhanden. In Flüssigkeiten existiert eine Nahordnung der Teilchen.



3. Kristallformen und Kristallgitter

Bild 26/1 Alaunkristalle zeigen stets die gleiche Kristallform eines Würfels oder Oktaeders. Das ist insofern bemerkenswert, als Alaun aus mehreren Stoffen, nämlich Aluminium, Kalium, Schwefel, Sauerstoff und außerdem Kristallwasser besteht.

Im voranstehenden Kapitel über den Aufbau der Festkörper waren bereits einige Zusammenhänge zwischen dem inneren Aufbau und einigen physikalischen Eigenschaften der Festkörper dargestellt worden. Die äußere Form der kristallinen Festkörper wurde aber noch nicht in die Betrachtungen einbezogen.
So wie Alaun haben auch viele andere Mineralien ihre typische Kristallform. Sie ist neben der Härte, Farbe und dem Glanz ein wichtiges Kennzeichen für Mineralien. Es ist zu vermuten, daß zwischen der Form und der inneren Struktur der Kristalle ein Zusammenhang besteht.
Dieser Zusammenhang kann zwischen der Lage der Kristallfläche und der Anordnung der Kristallbausteine im Kristallgitter bestehen.

Gesetz der Winkelkonstanz

Bei unterschiedlichen Kristallisationsbedingungen ist der Winkel zwischen den Flächen 1 und 2 der verschiedenen Kristallformen des Festkörpers Quarz doch immer der gleiche (Bild 26/2).

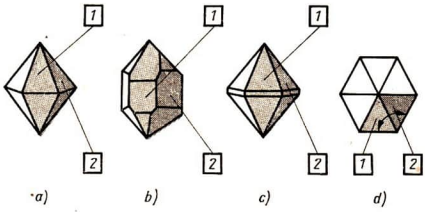


Bild 26/2 Kristallformen des Quarzes, die sich unter verschiedenen Kristallisationsbedingungen gebildet haben. Sie sind entstanden aus
a) einer Schmelze,
b) einer heißen Lösung,
c) einer abgekühlten Lösung
d) Draufsicht für alle drei Quarzkristallformen

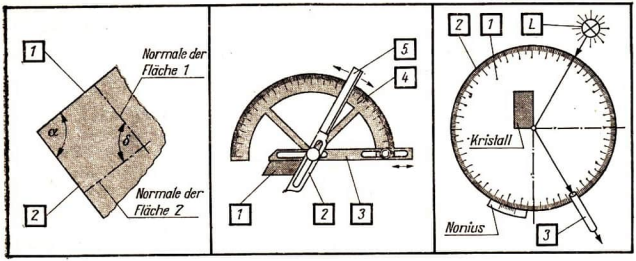


Bild 27/1 links: Beziehung zwischen Flächenwinkel α und Normalenwinkel δ
Mitte: Anlegegoniometer
Der Kristall (1) wird zwischen die Schenkel (2) und (3) gelegt. Auf dem Teilkreis (4) kann der gesuchte Winkel am Schenkel (5) abgelesen werden.
rechts: Reflexionsgoniometer. Der Kristall wird auf einem Tischchen (1) mit Winkelteilung (2) so angeordnet, daß eine Kante im Mittelpunkt des Tischchens senkrecht steht. Von einer Lichtquelle L aus fällt Licht auf eine Kristallfläche und wird von dieser reflektiert. Der reflektierte Strahl wird mit einem Fernrohr (3) beobachtet.

Für die Kristallografie ergibt sich aus diesem Sachverhalt eine Möglichkeit des Systematisierens, indem ein relativ einfach meßbarer Winkel, entweder der

- Flächenwinkel α, oder der
- Normalenwinkel δ,

zur Kennzeichnung der Kristallform benutzt wird.
Dieses Systematisierungsverfahren wurde um 1670 von Niels Stensen eingeführt. Zur Winkelmessung wird das Anlegegoniometer (Bild 27/1) benutzt.

▼ Fertigen Sie aus einem Plastwinkelmesser und einem Plastlineal ein Anlegegoniometer! Bestimmen Sie damit die Flächenwinkel eines Kristalles!

Genauere Messungen als mit dem Anlegegoniometer sind mit dem Reflexionsgoniometer (Bild 27/1) möglich.
Wenn der Goniometertisch mit dem Kristall gedreht wird, dann wandert der reflektierte Lichtstrahl aus dem Fernrohr heraus. Es läßt sich eine Einstellung finden, für die der Lichtstrahl an der zweiten Fläche so reflektiert wird, daß er wieder im Fernrohr zu beobachten ist. Der Drehwinkel des Tischchens, der dann am Teilkreis abgelesen wird, ist der Normalenwinkel.
Unter natürlichen Entstehungsbedingungen nehmen Kristalle nur selten die Idealform, die geometrische Grundform (Bild 28/1) an. Es treten Abweichungen von dieser Grundform auf. Aber auch in solchen Fällen bilden die Flächen-

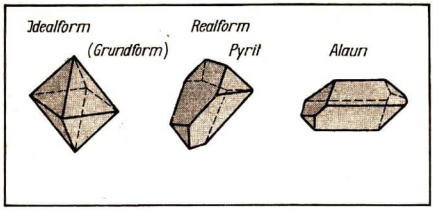


Bild 28/1 Ideale Oktaederform und Abweichungen bei den realen Kristallen des Pyrit und Alaun

normalen den jeweils stoffspezifischen Winkel. Diesen Sachverhalt bezeichnet man als das

Gesetz der Winkelkonstanz.

Bei allen Kristallen eines Stoffes sind die Flächenwinkel zwischen analogen Flächen gleich groß.

Bei Stoffen, die in mehreren Modifikationen (Kristallarten) vorkommen, gilt diese Aussage für Kristalle der gleichen Modifikation.
Das Auftreten verschiedener Kristallarten bei gleicher stofflicher Zusammensetzung wird Polymorphie oder Allotropie (bei chemischen Elementen) genannt.

● *Verschaffen Sie sich einen Überblick über die Allotropie bei Kohlenstoff und Zinn! (Podgornowa/Kondakow, Aus der Festkörperphysik. Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin 1975, S. 55/56)!*

Koordinatensysteme

Die Richtungsabhängigkeit der physikalischen Eigenschaften der Kristalle erfordert eine Bezeichnung jener Richtungen im Kristall, in denen beispielsweise die Wärmeleitung bestimmte Werte aufweist. Auch die Polarisation des Lichtes beim Einfall unter vorgegebenem Winkel zur Kristallfläche macht deren Bezeichnung erforderlich. Zur Klassifikation der verschiedenen Kristalle ist eine mathematische Beschreibung der Kristallformen erforderlich. Dazu wird der Kristall in ein Koordinatensystem eingeordnet (Bild 29/1).

Ein Koordinatensystem ist durch die Winkel α; β; γ zwischen den Koordinatenachsen und die auf diesen gewählten Basisvektoren $\vec{a}$; $\vec{b}$; $\vec{c}$ charakterisiert. Die Längen der Basisvektoren werden mit a; b; c bezeichnet.

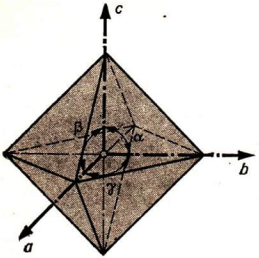


Bild 29/1 Räumliches Koordinatensystem mit eingefügtem Oktaeder eines Alaunkristalls

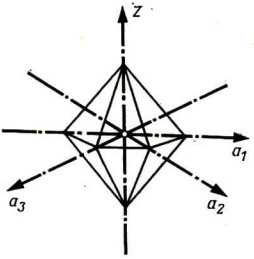


Bild 29/2 Einordnung eines regelmäßigen Quarzkristalls in ein Koordinatensystem. Auf den Achsen a_1, a_2 und a_3 liegen die Basisvektoren $\vec{a}$, $\vec{b}$ und $\vec{c}$. Sie haben gleiche Längen. Der Basisvektor $\vec{d}$ liegt auf der z-Achse. Seine Länge unterscheidet sich von den Längen der Basisvektoren $\vec{a}$, $\vec{b}$ und $\vec{c}$

● *Zeigen Sie durch geometrische Überlegungen, daß die Achsenabschnitte, die durch ein reguläres Oktaeder abgeschnitten werden, in allen drei Raumrichtungen gleich lang sind!*

▼ Fertigen Sie sich aus Plasttrinkröhrchen und Plastilin ein räumliches Modell des Alaunkristalls an! Wählen Sie eine Kantenlänge von 5 cm!

Für die einfache Beschreibung eines oktaedrischen Kristalls wird ein Koordinatensystem mit folgenden Eigenschaften gewählt:

$$a = b = c; \qquad \alpha = \beta = \gamma = 90°.$$

Damit die Kristalle durch die Koordinaten einfach beschrieben werden können, genügen nicht immer Systeme mit drei Achsen. Zur Beschreibung des Quarzes eignet sich (↗ Bild 29/2) ein Koordinatensystem mit vier Achsen.

● *Geben Sie an, welche Winkel zwischen den Achsen a und b, a und c und b und c in Bild 29/2 gewählt wurden!*

Zur Beschreibung aller vorkommenden Kristallformen genügen 7 Koordinatensysteme. Ihnen werden 7 Kristallsysteme zugeordnet.

1. Triklines Kristallsystem $\quad a \neq b \neq c; \quad \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90°$
2. Monoklines Kristallsystem $\quad a \neq b \neq c; \quad \alpha = \gamma = 90°, \ \beta \neq 90°$
3. Rhombisches Kristallsystem $\quad a \neq b \neq c; \quad \alpha = \beta = \gamma = 90°$

4. Rhomboedrisches Kristallsystem $a = b = c;\quad \alpha = \beta = \gamma \neq 90°$
5. Hexagonales Kristallsystem $a = b \neq c;\quad \alpha = \beta = 90°,\ \gamma = 120°$
6. Tetragonales Kristallsystem $a = b \neq c;\quad \alpha = \beta = \gamma = 90°$
7. Kubisches Kristallsystem $a = b = c;\quad \alpha = \beta = \gamma = 90°$

● *Fertigen Sie Skizzen von den vorgegebenen Koordinatensystemen an!*

Punkte, Richtungen und Ebenen im Koordinatensystem

Punkte. Jedem Raumpunkt können Koordinaten zugeordnet werden.

④ Geben Sie die Koordinaten der Punkte P_1, P_2, P_3, P_4 und P_5 im Bild 30/1 an!

Richtungen. Die Drehung der Polarisationsebene des Lichtes oder die Piezoelektrizität sind bei vielen Einkristallen anisotrop. Wenn die Richtungsabhängigkeit physikalischer Eigenschaften beschrieben werden soll, so muß zunächst eine Möglichkeit geschaffen werden, Richtungen im Kristall zu kennzeichnen. Zur Kennzeichnung wird in der Kristallografie wie folgt verfahren: Die zu bezeichnende Richtungsgerade wird so parallel verschoben, daß sie durch den Ursprung des Koordinatensystems verläuft. Sie trifft dann auf mehrere Gitterpunkte des Kristallgitters. Die Koordinaten des ersten Gitterpunktes, durch den die Gerade verläuft, bezeichnen dann die Richtung der Geraden. Sie werden in eckige Klammern gesetzt (Bild 30/2).
Derartige Richtungsangaben sind natürlich abhängig von dem gewählten Koordinatensystem und unterscheiden sich von Kristallsystem zu Kristallsystem.

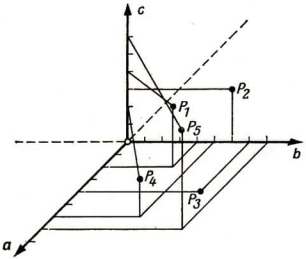


Bild 30/1 Punkte in einem Koordinatensystem

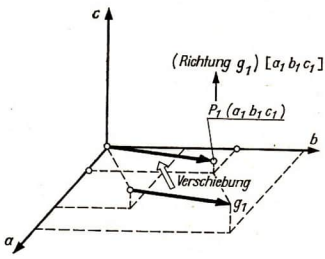


Bild 30/2 Kristallografische Kennzeichnung von Richtungen in Kristallen

Ebenen. Sollen die Flächen des Oktaeders (Bild 29/1) beschrieben werden, so läßt sich ein Verfahren anwenden, bei dem die räumliche Lage einer Fläche durch die Achsenabschnitte, die diese auf den Koordinatenachsen abschneidet, gekennzeichnet wird (Bild 31/1).

● *Wofür ist die Kennzeichnung von kristallografischen Flächen erforderlich? Vergleichen Sie mit den Aussagen auf Seite 18!*

Die Fläche schneidet die Koordinatenachsen in der Entfernung $8a$; $4b$ und $2c$ vom Ursprung. Demzufolge sind die Koeffizienten der Achsenabschnitte dieser Fläche (Bild 31/1) $m = 8$, $n = 4$ und $p = 2$.
a; b; c sind die Längen der Einheitsvektoren des Koordinatensystems.
Werden die Reziprokwerte der Koeffizienten m, n und p gleichnamig gemacht, so können die Zähler der Brüche ebenfalls zur Kennzeichnung der Flächenlage benutzt werden. Im vorliegenden Fall gilt:

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{8}; \quad \frac{1}{n} = \frac{1}{4}; \quad \frac{1}{p} = \frac{1}{2}; \qquad \frac{1}{m} : \frac{1}{n} : \frac{1}{p} = \frac{1}{8} : \frac{1}{4} : \frac{1}{2} = 1 : 2 : 4.$$

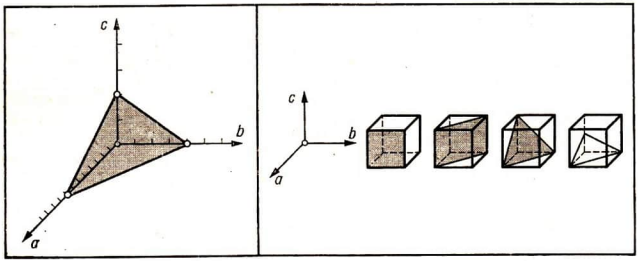


Bild 31/1 (links) Kristallebene im Raum
(rechts) Lage verschiedener Kristallebenen im rechtwinkligen Koordinatensystem

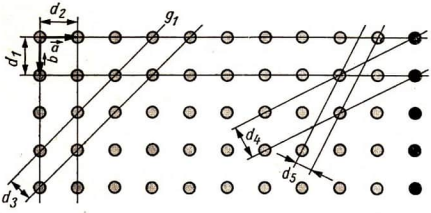


Bild 31/2 Netzlinien in einem ebenen Gitter d_1; d_2; d_3; d_4; d_5: Netzlinienabstände

Das Zahlentripel (1 2 4) stellt eine geeignete Größe zur Kennzeichnung der Fläche dar. Diese Zahlen h, k, l heißen Millersche Indizes.

⑥ Kennzeichnen Sie die im Bild 31/1 rechts angegebenen Flächen!

Im Bild 31/2 sind in Analogie zur räumlichen Lage einer Fläche Geraden in ein ebenes Punktgitter eingezeichnet.
Die Achsen des Koordinatensystems sind durch die Basisvektoren $\vec{a}$ und $\vec{c}$ gekennzeichnet. Die Gerade g_1 schneidet die Achsen bei $3a$ und $3b$. Die reziproken Werte der Koeffizienten sind dann

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{3} \qquad \frac{1}{n} = \frac{1}{3}.$$

Damit wird

$$\frac{1}{m} : \frac{1}{n} = \frac{1}{3} : \frac{1}{3}.$$

Die Millerschen Indizes sind dann (11).
Parallel zur Geraden g_1 lassen sich beliebig viele weitere Geraden im ebenen Gitter ziehen. Sie alle sind durch die gleichen Indizes (11) gekennzeichnet. Diese Geraden werden als Netzlinien bezeichnet. Auf der gleichen Netzlinie liegen die Gitterpunkte gleich dicht. Der Abstand gleich indizierter Netzlinien in einem Kristall ist konstant.
Im Raumgitter treten an die Stelle der Netzlinien Flächen im Kristall, die durch drei Millersche Indizes gekennzeichnet sind. Auf ihnen liegen ebenfalls die Gitterpunkte gleich dicht. Derartige Flächen heißen Netzebenen des Kristalls. Der konstante Abstand gleicher Netzebenen wird Netzebenenabstand d genannt.

Symmetrien

An einem Schmetterling (Bild 33/1) läßt sich eine Mittellinie finden, so daß die rechte Hälfte der an dieser Linie gespiegelten linken Hälfte entspricht. Der Körper ist spiegelsymmetrisch bezüglich der Mittellinie. Die äußere Gestalt von Tieren, Blättern und Blüten ist meist symmetrisch.

Spiegelung, Drehung. Symmetrische Figuren lassen sich durch Spiegelungen, aber auch durch Drehungen erzeugen. An Kristallen lassen sich solche Symmetrien beobachten. Es ist möglich, Symmetrieelemente (Spiegelungen, Drehungen oder Kombinationen aus diesen) anzugeben, die zum Beispiel aus einer Flächennormale sämtliche anderen Normalen des Kristalls erzeugen.
Durch den Gipskristall (Bild 33/2) läßt sich eine Achse so legen, daß bei einer Drehung um einen bestimmten Winkel einzelne Punkte oder Kanten ineinander überführt werden.



Bild 33/1 Symmetrie in der Natur

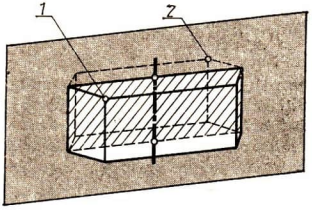


Bild 33/2 Symmetrieebene an einem Kristall aus Gips

● *Wie groß ist der Winkel, um den der Gipskristall (Bild 33/2) gedreht werden muß, damit der Punkt 1 in den Punkt 2 überführt wird?*

Zähligkeit. Symmetrieachsen werden nach ihrer Zähligkeit unterschieden. Diese gibt an, wie oft bei einer vollen Drehung um die Achse der Kristall mit sich selbst zur Deckung kommt.

● *Welche Zähligkeit liegt bei den Drehachsen im Bild 33/3 vor?*
● *Geben Sie die Zähligkeit für die Drehachse des Gipskristalls (Bild 33/2) an!*

Die Bezeichnungen der Drehachsen sind aus dieser Zähligkeit abgeleitet. Es ist leicht zu zeigen, daß ein regelmäßiges Fünfeck, also eine Fläche mit der Zähligkeit fünf, aber auch jedes regelmäßige n-Eck mit $n > 6$ nicht geeignet ist, eine Ebene lückenlos auszufüllen.

Zähligkeit	Achsen-bezeichnung
1	monogonal
2	digonal
3	trigonal
4	tetragonal
6	hexagonal

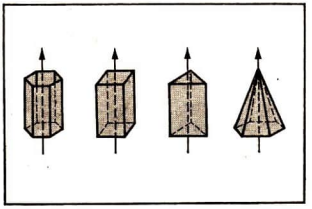


Bild 33/3 Verschiedene Drehachsen an Kristallformen

▼ Fertigen Sie sich aus Papier geometrische Körper (Kuben, Pyramiden usw.) an, und stechen Sie durch die Mittelpunkte der Seitenflächen oder in Richtung der Raumdiagonalen nacheinander eine Stricknadel oder eine Fahrradspeiche! Bestimmen Sie durch Drehen der Körper um diese die Zähligkeit der Drehachsen!

● *Bestimmen Sie die Zähligkeit und die Spiegelungsebene der Kristalle in Bild 33/3!*

Durch Drehung oder Verschiebung kann ein Punkt oder eine Fläche eines Kristalls mit einem anderen Punkt oder einer anderen Fläche zur Deckung gebracht werden. Drehungen oder Verschiebungen heißen daher Deckoperationen oder auch Symmetrieoperationen.
Kristalle werden nach den verschiedenen Symmetrieoperationen in Kristallklassen eingeteilt.

⑥ Es sind für die im Bild 34/1 angegebenen Kristalle b und c Symmetrieoperationen anzugeben!

Bei der Darstellung im Bild 34/1 sind für Kalziumkarbonat zwei verschiedene Kristallformen angegeben. Diese Erscheinung kommt auch bei anderen Stoffen vor. Man nennt sie **Polymorphie.**

Polymorphie liegt vor, wenn zu ein und demselben Stoff verschiedene Kristallformen mit unterschiedlichen Symmetrien vorhanden sind.

● *Weitere Informationen über Symmetrien finden Sie in: I. S. Shebudow, Elektrische Kristalle, Akademie-Verlag, Berlin 1975, S. 11 bis 28; J. Bohm, Kristalle. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1975, Seite 55 bis 66.*

⑦ Liegt bei den im Bild 29/2 angegebenen Kristallformen des Quarzes eine Polymorphie vor?

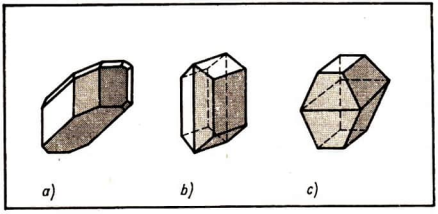


Bild 34/1
Mögliche Kristallformen
a) Kupfersulfat
b) Kalziumkarbonat (Aragonit)
c) Kalziumkarbonat (Kalkspat)

Kristallgitter und Elementarzelle

Die Anordnung der Atome, Ionen und Moleküle im Alaunkristall (Bild 35/1) kann zu der äußeren Form eines Einkristalls führen, wie sie im Bild 26/1 gezeigt ist. Die genannten Teilchen sind regelmäßig im Raum angeordnet. Sie bilden ein Gitter mit einer Fernordnung (↗ S. 22).
Damit der Aufbau eines Kristallgitters mathematisch beschrieben werden kann, muß von der Ausdehnung und Form der Kristallbausteine abstrahiert werden. Die Atome, Moleküle und Ionen werden zunächst durch Kugeln, die Kugeln durch ihre Schwerpunkte ersetzt. Auf diese Weise erhält man ein Punktgitter. Viele Kristallgitter sind aus mehreren Punktgittern zusammengefügt. So kann der Natriumchlorid-Kristall aus zwei Punktgittern, einem Gitter der Natriumlonen (Ebene f_1) und einem Gitter der Chlorid-Ionen (Ebene f_2), zusammengesetzt werden (Bild 35/2). Das heißt, Kristalle, die aus mehreren chemischen Elementen bestehen, kann man sich durch Ineinanderschieben einfacher Gitter (für eine Atomsorte) aufgebaut denken.
Die einzelnen Punkte des Punktgitters lassen sich durch Symmetrieoperationen ineinander überführen. Eine erste Klassifizierung aller möglicher Punktgitter

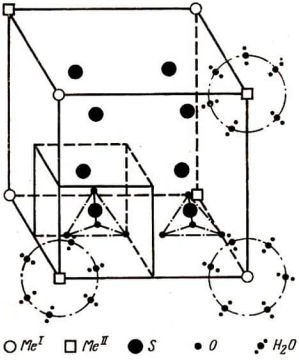


Bild 35/1 Anordnung der Gitterbausteine im Alaunkristall. Alaune sind Mischkristalle. Sie bestehen aus Sulfaten eines einwertigen und eines dreiwertigen Metalls (in der Regel Aluminium). Der Kristall enthält außerdem Kristallwasser

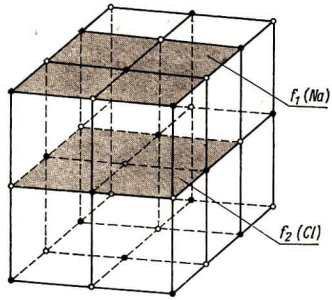


Bild 35/2 Zwei flächenzentrierte Würfelgitter von Natrium- und Chlorid-Ionen sind ineinander geschoben

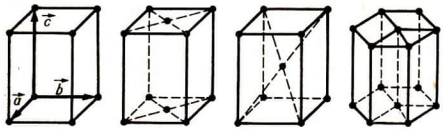


Bild 36/1
Punktgitter von Bravais
a) primitiv monoklin
b) einseitig flächenzentriert rhombisch
c) raumzentriert kubisch
d) hexagonal

hat 1850 A. Bravais (1811 bis 1863) vorgenommen. Bild 36/1 zeigt einige Punktgitter von Bravais.
Die Gitterpunkte in den Punktgittern nach Bravais entstehen durch ein- oder mehrmalige Verschiebung des Punktes aus dem Koordinatenursprung um die Vektoren *a*, *b* und *c*. Punktgitter werden daher auch als Translationsgitter bezeichnet.
Werden die Translationsgitter mit den Kristallsystemen verglichen, so zeigt sich eine Analogie. Die innere Struktur des Kristalls findet ihre Widerspiegelung in der äußeren Form. Beide korrespondieren miteinander.
Man kann sich die Frage stellen, wie klein ein Bruchstück eines Kristalls sein dürfte, wenn es die Gesetzmäßigkeit des Kristallaufbaus noch vollständig wiedergeben soll. Für einen kubischen Kristall ist dieser Teil im Bild 36/2 hervorgehoben. Beim Natriumchlorid-Kristall ist es ein flächenzentrierter Würfel.

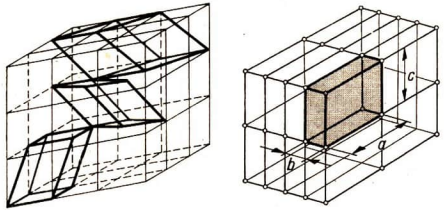


Bild 36/2 links
Verschiedene Elementarzellen im Raumgitter
rechts Gitterkonstante in der Elementarzelle eines Raumgitters

Er kann durch einmaliges Aufspannen der Basisvektoren $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ erzeugt werden. Durch Aneinanderreihen vieler solcher Würfel in alle drei Raumrichtungen läßt sich die ganze Kristallstruktur aufbauen. Diesen Würfel (in anderen Kristallsystemen sind es andere Körper) bezeichnet man als **Elementarzelle.**

Die kleinste Einheit eines Kristalls, die noch die Gesetzmäßigkeit des Kristalls widerspiegelt, wird Elementarzelle genannt.

An einer einfachen kubischen Elementarzelle läßt sich die Zugehörigkeit einzelner Bausteine zu verschiedenen Zellen erkennen: Jeder Gitterpunkt ist

Eckpunkt von acht Elementarzellen. Denkt man sich eine Elementarzelle herausgeschnitten, so gehört von den acht Eckpunkten jeweils ein Achtel zu ihr. Für das Natriumchlorid war im Bild 35/2 dargestellt, daß es aus zwei flächenzentrierten kubischen Elementarzellen aufgebaut werden kann.

⑧ Wieviel Ionen gehören zur Elementarzelle des Natrium- und Chlor-Untergitters im Natriumchlorid?

⑨ Kupfer kristallisiert in einem kubisch-raumzentrierten Gitter. Wieviel Kupfer-Ionen gehören zu einer Elementarzelle?

⑩ Es wird angenommen, daß sich die Kupfer-Ionen gegenseitig berühren. Die Dichte des Kupfers beträgt $\gamma = 8{,}9\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$. Es ist der Abstand der Kupfer-Ionen zu berechnen!
(Hinweis: relative Atommasse und das Mol sind zur Berechnung heranzuziehen.)

● *Stellen Sie in einer Übersicht die Zusammenhänge zwischen Kristallgitter und Kristallsystem dar!*
Merke! Beim Herausarbeiten von Beziehungen in einem System spielt der Systematisierungsgesichtspunkt eine Rolle. Am einfachsten lassen sich Beziehungen zwischen Begriffen aufspüren.
Verschaffen Sie sich einen Überblick über Systematisierungsgesichtspunkte anhand: H. Smitmans, Studieren aber wie? VEB Verlag Tribüne, Berlin 1969, S. 157 bis 162.

Gitterkonstante. Die Längen der Basisvektoren $\vec{a}$, $\vec{b}$ und $\vec{c}$ einer Elementarzelle heißen Gitterkonstanten. Den Zusammenhang zwischen Gitterkonstante und Dichte eines Stoffes zeigen die Werte für die beiden Kohlenstoffmodifikationen Graphit und Diamant.

	Elementarzelle	Dichte ϱ	Gitterkonstante a
Graphit	hexagonal	$2{,}22\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$	$2{,}08 \cdot 10^{-8}$ cm
Diamant	kubisch-flächenzentriert	$3{,}15\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$	$1{,}35 \cdot 10^{-8}$ cm

Ein Mol eines Stoffes enthält $6{,}02 \cdot 10^{23}$ Teilchen. Diese Zahl wurde auf verschiedene Weise experimentell ermittelt. Die erste Bestimmung nahm Perrin (1870 bis 1942) vor.

● *Bereiten Sie einen Vortrag zum Thema „Die Bestimmung der Teilchenzahl je Mol durch Perrin" vor! Benutzen Sie zur Vorbereitung folgende Literatur: Grimsehl, Lehrbuch der Physik Band I, B. G. Teubner Verlag Leipzig 1971, S. 536 bis 541; A. Kitaigorodski „Unwahrscheinliches — möglich oder unmöglich?" VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1975, S. 153 ff.*

Die Größe der Teilchen in einem Kristall ist nicht so eindeutig angebbar wie ihre Anzahl. Für die elektrischen Kräfte von Ionen ist die Reichweite nicht eindeutig bestimmt. Bei der Annäherung zweier Ionen tritt eine kontinuierliche Wechselwirkung entlang der Annäherungsstrecke auf. Dadurch ändert sich ständig die „Größe der Ionen". Mit verschiedenen Untersuchungsverfahren werden unterschiedliche Werte für die Ionenradien ermittelt. Ein Verfahren geht von der Dichte der Kristalle aus und bestimmt mit Hilfe der relativen Atommassen das Volumen der Ionen. Dabei wird das Modell der dichtesten Kugelpackung für die Anordnung der Ionen im Kristall verwendet. Es wird eine bestimmte Raumerfüllung angenommen. Die quantitative Erfassung derselben erfolgt durch die

Pa ckungsdichte des Kristalls.

Unter der Packungsdichte eines Kristalls ist das Verhältnis des Volumens V_A der Atome oder Ionen in einem Raumgebiet zum Volumen V dieses Raumgebietes zu verstehen.	$P = \frac{V_A}{V}$

Packungsdichten von Elementarzellen

Primitive kubische Elementarzelle	$P = 52\%$
Raumzentrierte kubische Elementarzelle	$P = 68\%$
Flächenzentrierte kubische Elementarzelle	$P = 74\%$
Hexagonal dichteste Kugelpackung	$P = 74\%$

Beispiel: Welchen Atomradius besitzt Eisen, das eine kubisch-raumzentrierte Elementarzelle bildet?

Gegeben: $\varrho = 7{,}86\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$
$A_r = 56$
$u = 1{,}66 \cdot 10^{-24}\ \mathrm{g}$

$P = 68\%$

Gesucht: r_A

$$r_A = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_A}{4 \cdot \pi}}$$

$$r_A = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 8{,}05 \cdot 10^{-24}\ \mathrm{cm^3}}{4 \cdot 3{,}14}}$$

Lösung: $m_A = A_r \cdot u$
$m_A = 56 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-24}\ \mathrm{g}$
$m_A = 9{,}3 \cdot 10^{-23}\ \mathrm{g}$

$$V_A = \frac{m_A}{\varrho} \cdot P$$

$$V_A = \frac{9{,}3 \cdot 10^{-23}\ \mathrm{g} \cdot 68}{7{,}86\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}} \cdot 100}$$

$$V_A = 8{,}05 \cdot 10^{-24}\ \mathrm{cm^3}$$

$$r_A = \sqrt[3]{1920 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{cm^3}}$$

$$r_A = 1{,}24 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{cm}$$

⑪ Magnesiumkristalle besitzen eine hexagonal dichteste Kugelpackung. Wie groß ist das Volumen des Magnesiumatoms?

Die auf diesem Wege gewonnenen Atomradien stimmen sehr gut mit Werten überein, die aus Röntgenstrukturuntersuchungen gewonnen wurden. Dabei wird aus dem Abstand der Atome, wie er sich aus der Röntgenbeugungsaufnahme bestimmen läßt, der Atomradius errechnet (Fe: $r_A = 1{,}239 \cdot 10^{-8}$ cm). Aus Tabellen röntgenografisch bestimmter Radien für Ionen sind folgende Werte entnommen:

Al^{+++} : $r_A = 0{,}5 \cdot 10^{-8}$ cm, Mg^{++} : $r_A = 0{,}65 \cdot 10^{-8}$ cm.

⑫ Geben Sie eine Erklärung für den Unterschied zwischen Atom- und Ionenradius desselben chemischen Elements!

Einige Kristallstrukturen

Viele Stoffe kristallisieren in ähnlichen Gitterstrukturen, und zwar dann, wenn die Größe der Gitterbausteine und der Betrag der Kräfte zwischen ihnen im wesentlichen übereinstimmt. Sie unterscheiden sich dann nur in den Werten ihrer Gitterkonstanten.

Dichteste Kugelpackung. Metalle kristallisieren im kubischen oder im hexagonalen Gitter. Werden die Metallatome durch Tischtennisbälle dargestellt, so läßt sich die dichteste Kugelpackung auf folgende Weise veranschaulichen: Zunächst wird eine Schicht aus Kugeln gelegt. Darüber wird eine zweite Schicht so angeordnet, daß die Kugeln in die Vertiefungen der ersten Schicht passen. Für die dritte Schicht gibt es zwei Möglichkeiten der Anordnung:

- Die Kugeln der dritten Schicht liegen über den verbleibenden Vertiefungen der ersten Schicht.
- Die Kugeln der dritten Schicht liegen über den Kugeln der ersten Schicht.

Im ersten Fall entsteht ein kubisch-flächenzentriertes Gitter, im zweiten Fall ein hexagonales (Bild 39/1).

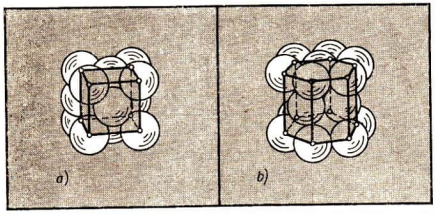


Bild 39/1 Dichteste Kugelpackung in Metallgittern
a) kubisch-flächenzentriertes Gitter (die flächenzentrierten Atome sind als Gitterbausteine nicht mit dargestellt
b) hexagonales Gitter

Im kubisch-flächenzentrierten Gitter kristallisieren unter anderem folgende Stoffe:

Silber, Aluminium, Gold, Kupfer, Kalzium, Blei.

Eine hexagonal dichteste Kugelpackung bilden folgende Stoffe:
Kadmium, Magnesium, Zink.

In Kristallen mit dichtester Kugelpackung ist ein Teilchen stets von 12 unmittelbaren Nachbarn umgeben.
Die Anzahl gleicher Teilchen, die ein Gitterteilchen umgeben, heißt **Koordinationszahl**. Sie ist neben der Anzahl der Teilchen, die zu einer Elementarzelle gehören, für die Kristallstruktur charakteristisch.

Cäsiumchloridstruktur. Die Untergitter sind einfach kubisch. Zwei solche Gitter für Cäsium und Chlor sind ineinander gesetzt. So befindet sich jedes Ion im Mittelpunkt eines Würfels, dessen Ecken aus Ionen der anderen Art bestehen (Bild 40/1). In der Cäsiumchloridstruktur kristallisieren Ammoniumchlorid, Legierungen aus Ag-Mg; Al-Ni; Cu-Zn (Messing).

⑬ Wie groß ist die Koordinationszahl in Kristallen, die in der Cäsiumchloridstruktur kristallisieren?
⑭ Es sind die Koordinaten des Cäsium-Ions und des Chlorid-Ions zu bestimmen!

Zinkblendestruktur. Die Zinkatome sind auf ein kubisch-flächenzentriertes Gitter verteilt. Die Schwefelatome befinden sich auf einem anderen kubisch-flächenzentrierten Gitter. Die Elementarzelle enthält vier Zink- und vier Schwefel-Atome. In der Zinkblendestruktur kristallisieren folgende Stoffe:

Kupferchlorid, Silberjodid, Kadmiumsulfid, Indiumarsenid, Siliziumkarbid.

⑮ Wie groß ist die Koordinationszahl in Kristallen, die in der Zinkblendestruktur kristallisieren?
⑯ Es sind die Gitterpunkte in Indiumarsenid (Gitterkonstante $a = 0{,}604$ mm) kristallografisch zu kennzeichnen!

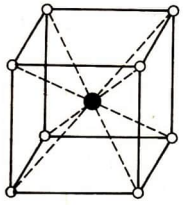


Bild 40/1 Gitterstruktur von Cäsiumchlorid

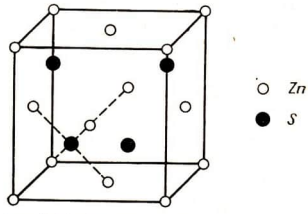


Bild 40/2 Gitterstruktur von Zinksulfid

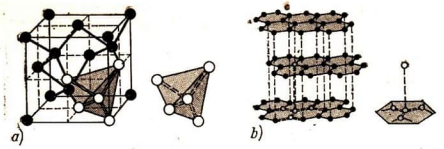


Bild 41/1
a) Kristallgitter von Diamant
b) Kristallgitter von Graphit

Die **Diamantstruktur** (Bild 41/1) ist dadurch ausgezeichnet, daß zwischen den Teilchen im Gitter besonders starke Kräfte wirken. Das Gitter ist kubisch-flächenzentriert mit weiteren in das Innere der Elementarzelle eingefügten Kohlenstoffatomen. Die Koordinationszahl im Diamantgitter beträgt 4.

Erkenntnisweg

1. Fragestellung:

Die in der Natur vorkommenden unterschiedlichen und auffallend regelmäßig geformten Kristalle veranlassen zu der Frage, ob die äußere Form sich durch die Anordnungsmöglichkeiten der Teilchen erklären läßt.

2. Folgerungen:

Durch Vergleich vieler Kristalle gleicher stofflicher Zusammensetzung konnte das Gesetz der Winkelkonstanz für die Winkel zwischen gleichen Kristallflächen formuliert werden.
Die Daltonsche Atomhypothese führt zur Annahme eines gitterförmigen Aufbaus der Kristalle. Mit Hilfe von Koordinatensystemen kann eine Symmetrie an verschiedenen Kristallformen beschrieben und daraus deduktiv abgeleitet werden, daß es 14 Translationsgitter geben kann.

3. Experimentelle Prüfung:

Die Modellvorstellungen über die Anordnung der Teilchen im Kristall konnten durch Röntgenfeinstrukturuntersuchungen bestätigt werden.

4. Anwendung der Erkenntnisse:

Durch experimentelle Forschung (Winkelmessung, Röntgenstrahlbeugung) können neue Erkenntnisse über den Kristallaufbau gewonnen werden.
Auf Grund der fortgeschrittenen Theorie der chemischen Bindung (Heitler 1927) entwickelten Bernal und Kitaigorodski Hypothesen über die Struktur organischer Verbindungen im festen Zustand. Sie konnten nachweisen, daß auch organische Substanzen kristallinen Aufbau besitzen.
Durch die Kenntnis der Gitterkonstanten und der Kristallstrukturen lassen sich Vorhersagen über die Mischbarkeit von Metallen treffen. Sie bietet die wissenschaftliche Grundlage für die Verbesserung der Eigenschaften bestimmter Werkstoffe bzw. für die Herstellung von Werkstoffen mit neuen Eigenschaften.



4. Kristallisation

Bild 42/1 Rauchquarz ist ein durch Beimengungen verschiedener Stoffe rauchbraun gefärbtes Siliziumdioxid. Der abgebildete Einkristall entstand in der Natur durch langsames und ungestörtes Wachstum. Dieser Kristall befindet sich heute in der Mineraliensammlung der Bergakademie Freiberg

---

Vor der Entstehung von Kristallen liegen die kristallbildenden Stoffe entweder in geschmolzenem, gelöstem oder in gasförmigem Zustand vor. Von welchen physikalischen Größen hängt es jedoch ab, ob bei der Kristallisation einheitliche große Kristalle oder viele kleine Kristalle entstehen?
In jedem Falle wird bei einer Kristallisation der Gleichgewichtszustand zwischen der Ausgangsphase und dem sich bildenden Kristall von Bedeutung sein. Da diese entsprechenden physikalischen Größen meßbar und auch reproduzierbar sind, kann der Vorgang des Kristallwachstums unter Laborbedingungen nachvollzogen und technisch genutzt werden.

Löslichkeit und Sättigung

Das Wachsen der Kristalle kann sichtbar gemacht werden.

▼ Ein Tropfen einer Kochsalzlösung wird auf einen Objektträger gegeben, auf einen zweiten ein Tropfen Natriumkarbonatlösung. Sie werden unter dem Mikroskop betrachtet. Gibt man einen Tropfen der gleichen Lösung auf ein Diapositivgläschen und schiebt dies in die Halterung eines Diaprojektors, so ist der Kristallisationsvorgang auf dem Bildschirm sichtbar. Die Beobachtungen sind zu protokollieren.

Die Beobachtung zeigt, daß sich aus den Lösungen verschiedene Kristallformen ausbilden. Das entspricht den Gesetzmäßigkeiten, nach denen die Kristallbausteine im Gitter angelagert werden. Es ist außerdem zu erkennen, daß die Kristallisation vom Innern des Tropfens nach außen fortschreitet. Bei Natrium-

chlorid entstehen kleine Würfel und bei Natriumkarbonat nadelförmige kleine Kristalle, die sternförmig von einem Zentrum nach außen wachsen.
Aus der gleichen Lösung können bei sehr langsamer Kristallisation große regelmäßige Kristalle entstehen.

▼ Herstellung von Kaliumalaunkristallen
15 g Kaliumalaun ($KAl(SO_4)_2 \cdot 12\ H_2O$) werden in 100 ml Wasser von 40 °C gelöst. Das Gefäß wird mit einem sauberen Tuch abgedeckt, so daß keine Staubteilchen in die Lösung gelangen können, und erschütterungsfrei aufgestellt. Das Wasser verdunstet langsam. Es lagern sich die Teilchen des Alauns zu Kristallen zusammen.

Gesättigte Lösungen. Lösungen sind homogene Mischungen von festen, flüssigen oder gasförmigen Stoffen in Flüssigkeiten. Die Flüssigkeiten heißen Lösungsmittel.

● *Geben Sie einen Überblick über Einteilungsmöglichkeiten für Lösungen! Durch welche quantitative Größe ist die Löslichkeit eines Stoffes bestimmt? Benutzen Sie „Wissensspeicher Chemie" Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin!*

Die Sättigungskonzentration ist ein Maß für die Löslichkeit eines Stoffes. Sie ist temperaturabhängig.

Sättigungskonzentration einiger Salze in Wasser (in g Stoff je 100 g Wasser) bei verschiedenen Temperaturen

chemisches Symbol	Name	0 °C	20 °C	40 °C	80° C
$AgNO_3$	Silbernitrat	122	222	376	669
$CuCl_2$	Kupferchlorid	41,4	43,5	45,6	49,8
$CuSO_4$	Kupfersulfat	14,3	20,7	28,5	55,0
KJ	Kaliumjodid	127,5	144	160	192
KBr	Kaliumbromid	53,2	65,2	75,5	95,0
$KMnO_4$	Kaliumpermanganat	2,83	6,4	12,56	22,2 (60 °C)
$MgSO_4 \cdot 7\ H_2O$	Magnesiumsulfat	—	26,2	31,3	—
NH_4Cl	Ammoniumchlorid	29,4	37,2	45,8	65,6
$NaNO_3$	Natriumnitrat	73	88	104	148
$PbCl_2$	Bleichlorid	0,67	0,99	1,45	2,62
$KAl(SO_4)_2 \cdot 12\ H_2O$	Kaliumalaun	3,0	5,9	11,7	71,0

Enthält eine Lösung 20,7 g Kupfersulfat in 100 g Wasser, so ist sie bei 20 °C gesättigt, bei einer Temperatur von 40 °C jedoch ist diese Lösung noch ungesättigt.

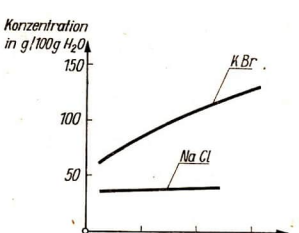


Bild 44/1 Abhängigkeit der Sättigungskonzentration von der Temperatur

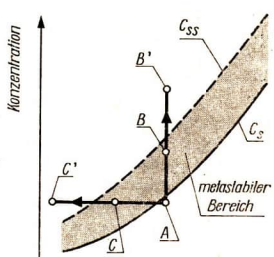


Bild 44/2 Sättigungsbereich und Bereich der Übersättigung. Die Kurve C_{ss} ist durch die Verbindung aller Punkte entstanden, an denen spontane Keimbildung erfolgte. Sie wird Grenzkurve für spontane Keimbildung genannt. Zwischen der Sättigungskurve und dieser Grenzkurve liegt ein metastabiler Bereich, in dem ein Kristallwachstum ohne störende Keimbildung möglich ist. Dieser Bereich heißt Ostwald-Miers-Bereich

Die Abhängigkeit der Sättigungskonzentration von der Temperatur ist im Bild 44/1 für zwei Beispiele dargestellt.

● *Für welche Stoffe (↗ Tabelle) ist die Sättigungskonzentration nur sehr wenig temperaturabhängig?*

Befindet sich in einer Lösung mehr gelöster Stoff als die Sättigungskonzentration angibt, so heißt die Lösung übersättigt. Sie kann durch äußere Einflüsse (Erschütterung, Staubpartikel, Kristallkeime) in den gesättigten Zustand überführt werden, indem gelöste Teilchen als Festkörper ausfallen. Eine übersättigte Lösung befindet sich also im labilen Gleichgewicht.
Es gibt zwei Verfahren, um übersättigte Lösungen herzustellen; das Unterkühlungsverfahren und das Verdunstungsverfahren.

Unterkühlungsverfahren. Eine bei einer gegebenen Temperatur gesättigte Lösung wird langsam abgekühlt (A→C, Bild 44/2). Da bei niedrigeren Temperaturen die Sättigungskonzentration in der Regel geringer ist, liegt eine übersättigte Lösung vor. Diese existiert solange, bis eine Kristallisation eingeleitet wurde oder solange die Kristallisation noch nicht beendet ist.

Verdunstungsverfahren. Es wird bei einer vorgegebenen Temperatur eine gesättigte Lösung hergestellt. Durch Verdunsten wird der Lösung ein Teil des Lösungsmittels entzogen (A→B, Bild 44/2). Dadurch steigt die Konzentration. Die für die Temperatur gültige Sättigungskonzentration wird überschritten.

1
▼ Auf zwei verschiedenen Wegen sind übersättigte Lösungen herzustellen.

Kristallwachstum

Beim Wachsen eines Kristalls lagern sich die Gitterbausteine gesetzmäßig an einen vorhandenen Kristall. Bei dieser Anlagerung wird Bindungsenergie freigesetzt, wenn es sich um exotherme Kristallisationsvorgänge handelt.

▼ Es werden 100 g Natriumsulfat in 100 g Wasser bei einer Temperatur von 50 °C gelöst. Die Lösung wird filtriert und ein Thermometer hineingestellt. Die Lösung wird langsam abgekühlt. Durch Einbringen eines Kristallkeimes aus Natriumsulfat oder durch Kratzen mit einem Glasstab an der Innenseite des Lösungsgefäßes wird die Kristallisation eingeleitet. Zu dieser Zeit und danach in Abständen von etwa 10 Sekunden wird die Temperatur abgelesen.

▼ Es ist die Temperaturerhöhung bei der Kristallisation von Natriumazetat aus der Schmelze zu bestimmen. Hierzu wird Natriumazetat in einem Becherglas geschmolzen und langsam auf 20 °C abgekühlt. Die Temperaturänderung beim Erstarrungsvorgang ist abzulesen. Außerdem ist die Temperatur bei Beginn der Kristallisation (Schmelztemperatur) zu bestimmen.

In den übersättigten Salzlösungen liegen die Kristallbausteine häufig als Ionen vor. Die Anlagerung von Ionen und anderen Teilchen an einen Kristall erfolgt bevorzugt an jenen Stellen, an denen die größte Energie frei wird (Bild 45/1).

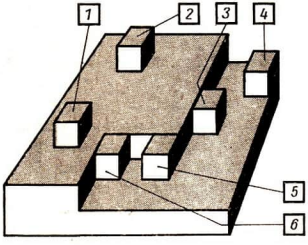


Bild 45/1 Anlagerungsstellen für Ionen beim Wachstum eines Ionenkristalls. Die Zahlenwerte geben die Wahrscheinlichkeit für die Anlagerung eines Ions an der betreffenden Stelle des Kristalls an. 1:0,06; 2:0,09; 3:0,181; 4:0,247; 5:0,494; 6:0,874

● *Ordnen Sie die im Bild 45/1 angegebenen Anlagerungsstellen nach der Größe der frei werdenden Energie!*
Es ist eine Stelle zu bezeichnen, an der nach vollständiger Ausbildung einer Kristallfläche die Anlagerung weiterer Teilchen erfolgt!

Um ein gleichmäßiges Kristallwachstum zu erreichen, muß die frei werdende Bindungsenergie im bereits gebildeten Kristall abgeführt werden. Sonst würde die Schmelztemperatur in der Umgebung der Anlagerungsstelle überschritten.

● *Erklären Sie die Folgen einer zu geringen Wärmeableitung für den Kristallisationsvorgang aus einer Schmelze und aus einer Lösung!*

Gleichzeitig mit einer Wärmeableitung muß auch für die Heranführung weiterer Teilchen des kristallisierenden Stoffes gesorgt werden. Die Lösungskonzentration in der Umgebung des wachsenden Kristalls muß groß genug sein, damit keine Auflösung der Kristallsubstanz erfolgt. Beim Wachsen von Kristallen in Lösungen wird also eine Übersättigung die Neigung der Ionen zur Anlagerung vergrößern. In einer Schmelze müssen die Teilchen leicht beweglich sein, um durch Diffusion an den Kristall zu gelangen. Mit zunehmender Abkühlung einer Schmelze wird diese zäher. Die Beweglichkeit der Teilchen nimmt ab. Ihre Anlagerung an den Kristall erfolgt langsamer. Die Kristallisationsgeschwindigkeit wird durch folgende Bedingungen erhöht:

— schnelle Wärmeableitung;
— hohe Konzentration;
— große Übersättigung;
— leichte Diffusionsmöglichkeit.

● *Erklären Sie, warum eine Wasserpfütze an der Oberfläche schnell, aber nur langsam in der Tiefe gefriert!*
Warum bildet das Kalziumkarbonat keine großen Einkristalle aus einer wäßrigen Lösung?

Wachstumsgeschwindigkeit und Kristallform

Die Geschwindigkeit des Kristallwachstums ist richtungsabhängig. Die verschiedenen Kanten und Flächen des Kristalls vergrößern sich unterschiedlich schnell (Bild 47/1).
Wird die Zufuhr von Anlagerungsteilchen zu einem Kristall zu gering, so verringert sich die Wachstumsgeschwindigkeit. An weit hervortretenden Stellen des Kristalls kann aber eine noch ausreichende Versorgung mit der übersättigten Lösung vorhanden sein. Dort bilden sich Verästelungen (Dendrite). Diese bilden sich auch beim Erstarren von Schmelzen wegen der dabei sich erhöhenden Zähigkeit der Restschmelze. Typische Beispiele sind Schneeflocken und Eiskristalle.

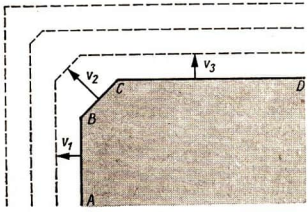


Bild 47/1 Unterschiedlich schnelles Wachstum eines Kristalls in verschiedenen Richtungen

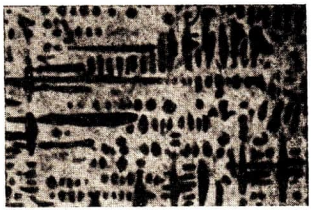


Bild 47/2
Dendrite in Schnellschnittstahl. Verästelte Kristallbildungen heißen Dendrite oder Tannenbaumkristalle.

2 3
4 5 Nach den Experimentierhinweisen sind Einkristalle aus verschiedenen Stoffen zu züchten! Hinweise über Löslichkeit der Stoffe ↗ Bohm, Kristalle. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1975, S. 84.

Die Form der Kristalle ist durch die Konzentration der Lösung, den verwendeten Stoff und durch vorhandene Beimengungen bestimmt. Die bisher genannten Kristallisationsvorgänge bezogen sich auf Stoffe mit Ionenbeziehung (z. B. Salze) oder auf solche von metallischer Struktur. Liegen andere Bindungsarten vor, so muß die Anlagerung der Kristallbausteine von den geltenden energetischen Verhältnissen aus neu betrachtet werden (Bild 45/1). Außer von der chemischen Bindung der kristallisierenden Stoffe wird die Anlagerung an bestimmten Stellen auch durch Fehler im Kristallgitter beeinflußt, so daß die verschiedensten Wachstumsformen (wie z. B. Nadeln, Spiralflächen u. a.) im Kristall beobachtet werden können.

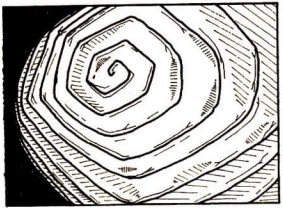


Bild 47/3 Spiraliges Wachstum der Kristallschichten von Siliziumkarbid

Gesteinsbildung. Sind in einer Lösung oder Schmelze mehrere kristallbildende Bestandteile enthalten, so kristallisieren jene zuerst, deren Sättigungskonzentration überschritten ist oder die die höchste Schmelztemperatur besitzen. Dadurch wird es möglich, bestimmte Stoffgemenge von Verunreinigungen durch

Umkristallisieren zu trennen. Aus dem zu reinigenden Gemenge wird bei relativ hoher Temperatur eine gesättigte Lösung hergestellt. Beim Abkühlen scheidet sich zunächst jener Stoff aus, dessen Löslichkeit bei der niedrigeren Temperatur so gering ist, daß seine Sättigungskonzentration überschritten wurde. Die übrigen Stoffe verbleiben noch in der Lösung.

Für die Trennung von Stoffen aus einer Schmelze ist die Bildung der Erdkruste ein Beispiel: Aus dem Magma, einer hochtemperierten Schmelze verschiedener Stoffe, kristallisierten beim Abkühlen zunächst die Stoffe mit der höchsten Schmelztemperatur. In der Erdrinde ist viel Siliziumdioxid (SiO_2) vorhanden, das eine sehr hohe Schmelztemperatur besitzt. An diesem Beispiel sei gezeigt, wie vielfältig die Formen eines Stoffes sein können. Zunächst entstanden Kristalle von Kristobalit, danach die des β-Tridymits. Auch α-Quarz und β-Quarz befinden sich in der Erdrinde. Letztere kristallisierten aus Lösungen in heißem Wasserdampf. Vor allem in Höhlungen, in denen ein ungestörtes Wachstum möglich war, werden große Quarzkristalle gefunden. Bild 48/1 zeigt die Abhängigkeit der Entstehung verschiedener Quarzmodifikationen von der Temperatur und dem Druck. Es sei erwähnt, daß die Entstehung der Modifikationen auch noch von anderen Faktoren abhängt (z. B. Anwesenheit bestimmter Stoffe).

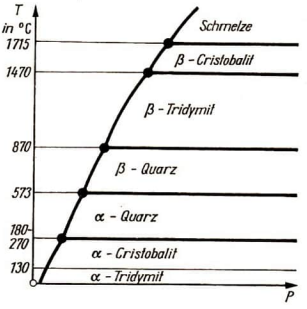


Bild 48/1 Abhängigkeit der Kristallisation verschiedener Quarzmodifikationen von Druck und Temperatur. Da die verschiedenen Kristallformen bei unterschiedlichen Temperaturen entstanden sind, kann auf die beim Kristallisationsprozeß vorhandene Temperatur geschlossen werden. Solche Quarzkristalle können also als „geologisches Thermometer" genutzt werden.

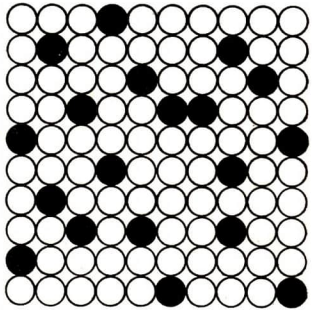


Bild 48/2 Bei der Mischkristallbildung werden Atome, die nicht zum Grundmetall gehören, an Gitterplätzen des Metallgitters angeordnet. Der Einbau dieser Fremdatome kann regelmäßig oder unregelmäßig erfolgen. Durch den Einbau der fremden Atome kann sich der Abstand der Gitterbausteine, die Gitterkonstante des Gitters, in der Umgebung der Fremdatome verändern (Verzerrungen)

Legierungen. Eine Metallschmelze, die mehrere Bestandteile enthält, erstarrt in der Regel nicht bei einer konstanten Temperatur. Sie besitzt keinen Erstarrungspunkt, sondern einen Temperaturbereich, in dem die Kristallisation erfolgt. Kristalline Körper, die aus mehreren Stoffen bestehen und metallischen Charakter besitzen, heißen *Legierungen*. Die Eigenschaften der Legierungen hängen nicht nur von der stofflichen Zusammensetzung, sondern auch vom Kristallisationsvorgang (schnelles oder langsames Abkühlen der Schmelzen) ab.
Wenn ein Metall andere Metallatome in sein Gitter aufnehmen kann, so entstehen *Mischkristalle*. Die fremden Atome sind an Gitterplätzen des Grundmetalls angeordnet.

Für eine vollständige Mischkristallbildung müssen einige Bedingungen erfüllt sein:

- Vollständige Mischbarkeit der Metalle,
- Gleicher Gittertyp der Metalle,
- Geringer Unterschied in den Gitterkonstanten (maximal 14%),
- Chemische Ähnlichkeit der Metalle.

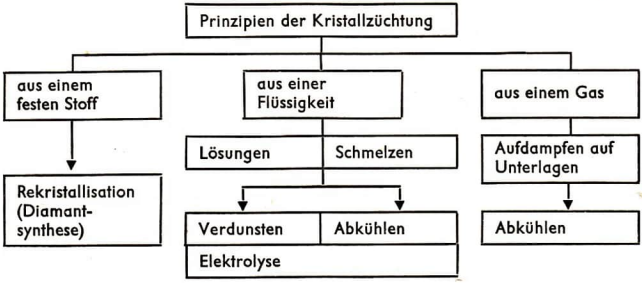
Aus Mischkristallen bestehen zum Beispiel Kupfer-Nickel-Legierungen. Durch den Einbau von Fremdatomen, deren Durchmesser sich von dem der Grundmetallatome unterscheidet, entstehen im Gitter einer Legierung Verzerrungen (↗ Kapitel 6).
Es vergrößern sich vor allem Härte und Zugfestigkeit der Legierungen (↗ Kapitel 2) gegenüber diesen Eigenschaften der reinen Metalle.
Die Gitterverzerrungen bewirken eine Erhöhung des elektrischen Widerstandes, da die Bewegung von Leitungselektronen durch diese behindert wird. Aus einer Schmelze kann aber unter bestimmten Bedingungen auch eine andere Legierungsstruktur, ein Gemenge von Kristallarten entstehen, wenn während der Kristallisation eine Entmischung eintritt.

Kristallzüchtung

Für wissenschaftliche Untersuchungen und technische Anwendungen werden Einkristalle benötigt. Ihre Züchtung erfolgt häufig aus einer Lösung oder einer Schmelze. Eine Ausnahme bildet die Herstellung von Diamanten, die erstmals 1960 in der Sowjetunion gelang. Man arbeitet mit Graphit bei Temperaturen von 2000 °C bis 3000 °C und Drücken von 60000 at bis 100000 at. Die ständige Entwicklung der Experimentiergeräte, der Meßgeräte und der Regeleinrichtungen und die zunehmende Kenntnis über die Vorgänge im atomaren Bereich haben zu vielfältigen Verfahren der Kristallzüchtung geführt. Auch komplizierte Wachstumsprozesse, wie sie bei der Herstellung von Edelsteinen und Halbedelsteinen auftreten, werden heute beherrscht.

● *Bereiten Sie sich auf einen Vortrag zum Thema:*
„Verfahren der Kristallzüchtung" vor!
Nutzen Sie die nachfolgend angegebene Literatur!
Lexikon „Atom" VEB Bibliografisches Institut, Leipzig 1970; Brockhaus „abc Physik" VEB Brockhaus Verlag Leipzig 1971; K. Th. Wilke, Methoden der Kristallzüchtung, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1963; J. Bohm, Kristalle, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1975, S. 96 bis 123; H. Lux, „Anorganisch-chemische Experimentierkunst", J. A. Barth, Leipzig 1970
Berücksichtigen Sie für die Vorbereitung Ihres Vortrages die Hinweise auf Seite 16!

Für die Kristallzüchtung sind folgende Prinzipien anwendbar:



Der Aufbau einer Anlage für die Züchtung von Kristallen aus Lösungen ist im Bild 50/1 dargestellt.

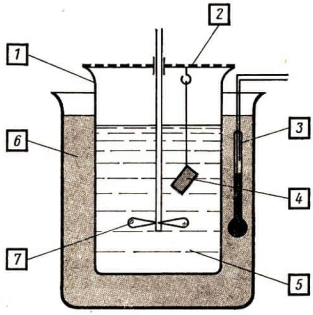


Bild 50/1 Einfache Geräteanordnung für das Züchten von Kristallen aus der Lösung:
Das Züchtungsgefäß (1) und der Thermostat (3) befinden sich in einem Wasserbad (6). Beim Verdunstungsverfahren hat der Deckel (2) des Gefäßes eine Öffnung, damit die Lösungsmitteldämpfe entweichen können. Der Kristallit (4) hängt in der Lösung (5). Die Lösung wird langsam mit einem Rührwerk (7) bewegt, damit keine Konzentrationsunterschiede entstehen. Beim Abkühlungsverfahren wird die Sättigungstemperatur nach dem Einhängen der Kristalle um 0,2 grd bis 0,5 grd je Tag gesenkt.

▼ Bauen Sie mit Schülerexperimentiergeräten Ihrer Physiksammlung eine Anordnung zur Züchtung von Kristallen aus Lösungen auf! Die Temperaturregelung kann auch elektronisch erfolgen. Nutzen Sie zur Information: Elektrische Messung nichtelektrischer Größen. Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin 1975, S. 32; 46; 74

Zur Kristallzüchtung aus der Schmelze wurden mehrere wichtige Verfahren entwickelt:

Kristallzüchtung aus der Schmelze

Verfahren nach Bridgman	Verfahren nach Czochralski	Verfahren nach Verneuil
Langsames Absenken des Tiegels mit der Schmelze	Kristallkeim wird eingetaucht und langsam aus der Schmelze herausgezogen	feinkörniges Material wird in Gasflamme geschmolzen und wächst auf Einkristall

Kristallzüchtungen aus Schmelzen sind nur dann möglich, wenn die Stoffe durch das Schmelzen chemisch nicht verändert werden. Beim Ziehen von Einkristallen aus einer Schmelze muß die Ziehgeschwindigkeit gleich der Wachstumsgeschwindigkeit des Kristalls sein und das Temperaturgefälle zwischen Kristall und Schmelze einen konstanten Wert besitzen.
Nach dem Bridgman-Verfahren werden Metalleinkristalle und Kristalle für die optische Industrie gezüchtet. Dazu zählen die für ultraviolette und ultrarote Strahlung durchlässigen Kristalle aus Lithiumfluorid (LiF) und Kalziumfluorid (CaF_2).

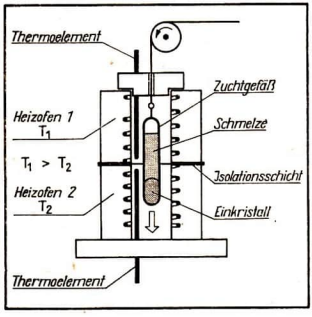


Bild 51/1 Schema einer Züchtungsanlage für das Verfahren nach Bridgman
Das Zuchtgefäß mit der Schmelze wird langsam zwischen zwei Heizöfen abgesenkt. Thermoelemente sorgen für die Einstellung einer Temperaturdifferenz zwischen den beiden Heizöfen. Im Gefäß bildet sich von unten nach oben ein Einkristall.

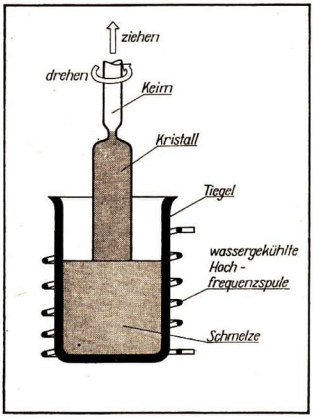


Bild 52/1 Schema einer Züchtungsapparatur für das Czochralski-Verfahren
Beim Czochralski-Verfahren wird der Kristall an einem drehbaren Stab aus einer Schmelze gezogen. Die Schmelze wird durch eine wassergekühlte Hochfrequenzspule geheizt. Die Schmelze befindet sich in einem Tiegel. Ein Thermoelement sorgt für eine konstante Temperatur in der Schmelze. Zwischen ihr und dem Kristall wird eine bestimmte Temperaturdifferenz aufrecht erhalten. Vom Tiegelmaterial dürfen keine Atome in die Schmelze gelangen. Mit dem Czochralski-Verfahren werden heute vor allem Einkristalle gezüchtet, die in der Halbleiterindustrie Verwendung finden. Es werden bis zu 0,2 m lange Germanium-Einkristalle oder 1,50 m lange Siliziumkristalle gewonnen. Auch metallische Einkristalle für wissenschaftliche Untersuchungen werden nach diesem Verfahren gezogen. Die Ziehgeschwindigkeit beträgt dabei 10 bis 20 cm · min^{-1}. Kristalle des Halbmetalls Germanium können mit einer Geschwindigkeit von 5 cm · h^{-1} gezogen werden.

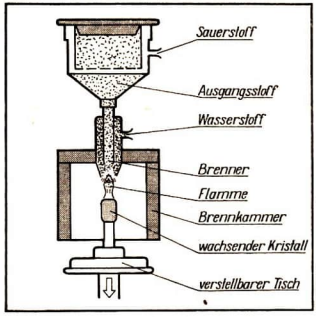


Bild 52/2 Schema einer Züchtungsanlage für das Verneuil-Verfahren
Bei diesem Verfahren wird der feinpulverisierte Stoff in eine Knallgasflamme geblasen. Die Tröpfchen des geschmolzenen Pulvers treffen auf einen Einkristall, wo sie eine Flüssigkeitsschicht bilden. Der Kristall wächst in die ständig sich erneuernde Schmelze hinein. Der Vorteil des Verneuil-Verfahrens besteht darin, daß der Festkörperstoff nicht mit anderen Stoffen in Berührung kommt. Das Verneuil-Verfahren wird zur Züchtung von Edelsteinen benutzt. Der VEB Elektrochemisches Kombinat Bitterfeld stellt nach diesem Verfahren Korunde und Spinelle her.
Die gewonnenen künstlichen Edelsteine werden unter anderem als Schmucksteine und vor allem als Lagersteine in der Uhrenindustrie verwendet. Werden dem Ausgangsstoff (Al_2O_3) Schwermetallsalze zugesetzt, so entstehen farbige Edelsteine. Durch den Zusatz von Chromoxid (Cr_2O_3) entstehen beispielweise rote Rubinkristalle. Diese werden für die Herstellung von Festkörperlasern verwendet.

Erkenntnisweg

1. Fragestellung

Im vorliegenden Fall wird die Fragestellung aus empirisch gewonnenen Ergebnissen abgeleitet, denn es wurde beobachtet, daß bei gleicher chemischer Zusammensetzung sowohl Einkristalle als auch Polykristalle in der Natur vorkommen.
Unter welchen Bedingungen entstehen aus der gleichen Substanz große Einkristalle oder polykristallines Material?
Wie erfolgt das Kristallwachstum?

2. Folgerung

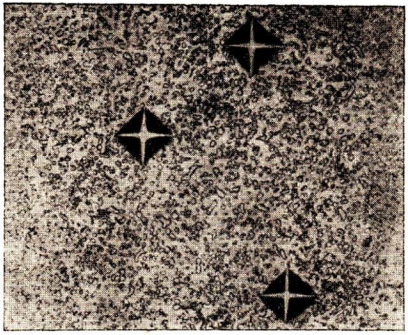
Durch Vergleichen mit vorhandenen Erkenntnissen lassen sich Folgerungen gewinnen, die hypothetischen Charakter tragen. Aus der Kenntnis der Kristallentstehung unter verschiedenen geologischen Bedingungen ergibt sich die Hypothese, daß aus einem bestimmten Stoff unterschiedliche Kristalle entstehen, wenn die Bedingungen (Temperatur, Konzentration und Fremdstoffbeimengungen) geändert werden.

3. Experimentelle Prüfung

Durch geeignete Wahl der Versuchsapparaturen und der Versuchsbedingungen läßt sich der Einfluß von Temperatur, Konzentration und Fremdstoffbeimengungen auf die Kristallbildung untersuchen.
Eine Kristallisation erfolgt aus übersättigten Lösungen oder Schmelzen.
Die Kristallbausteine lagern sich so an einen Kristallkeim an, daß ein größtmöglicher Energiegewinn eintritt.
Durch Fremdstoffbeimengungen wird das Wachstum der Kristalle so verändert, daß andere Formen entstehen.

4. Anwendung

Die Erkenntnisse über den Kristallisationsvorgang finden bei der Kristallzüchtung Anwendung. Es lassen sich Einkristalle aus der festen, der flüssigen oder der gasförmigen Phase züchten.



5. Bindungstypen und Eigenschaften von Festkörpern

Bild 54/1 Bei der Bestimmung der Härte von Festkörpern wird eine kleine Diamantpyramide mit einem Druckstempel in den zu untersuchenden Probekörper eingedrückt. Das Verhältnis der Druckkraft zur Oberfläche des bleibenden Eindruckes ergibt ein Maß für die Härte des Festkörpers

Metalle sind meist gut verformbar, Salze dagegen spröde und weniger fest. Diamant und einige wenige Verbindungen sind sehr hart. Noch weit mehr als in den mechanischen Eigenschaften unterscheiden sich Festkörper in ihrer elektrischen Leitfähigkeit. Eigenschaften von Festkörpern hängen von deren Struktur und diese hängt wiederum von den Bindungsverhältnissen im Festkörper ab. Aus der in einem Festkörper vorherrschenden typischen Bindung der Teilchen kann man demnach auf makrophysikalisch meßbare Eigenschaften des Festkörpers schließen. Die Bindungsverhältnisse sind wiederum weitgehend abhängig von der Elektronenverteilung in den Atomhüllen der Elemente.

Modelle für die Atomhülle und Quantenzahlen

Ende des 19. Jahrhunderts konnten Lichterscheinungen weitgehend auf der Grundlage der klassischen Wellenvorstellung erklärt werden.

- *Geben Sie einen knappen Überblick über Lichterscheinungen, die mit Hilfe des Wellenmodells erklärt werden können! (Verwenden Sie zur Erarbeitung den Wissensspeicher Physik!)*

Nach der Entdeckung des äußeren lichtelektrischen Effekts durch W. Hallwachs (1888) wurde deutlich, daß sowohl mit dem klassischen Wellenmodell als auch mit dem klassischen Teilchenmodell allein dieser Effekt nicht mehr erklärbar ist.

- *Entwickeln Sie ein Versuchsprinzip zum äußeren lichtelektrischen Effekt, und stellen Sie die zu erwartenden Ergebnisse zusammen! (Lehrbuch Physik, Klasse 11, S. 41 ff.)*

Eine befriedigende Erklärung dieses Effekts wurde durch die Entwicklung eines Photonenmodells des Lichtes möglich (A. Einstein, 1905). Danach kann man Licht so auffassen, daß es aus „Energieportionen" (Lichtquanten, Photonen) besteht. Es gilt für die
Energie eines Lichtquants:

$$W = h \cdot f$$

- *Erklären Sie die Bedeutung der einzelnen Größen in der Gleichung für die Energie eines Lichtquants!*
- *Erläutern Sie den Welle-Teilchen-Dualismus des Lichtes! (Lehrbuch Physik, Klasse 11, S. 68 ff.)*

Durch diese Auffassung von der „Quantisierung" der Energie wurden gleichzeitig weitere Möglichkeiten zum Auswerten der Daten geschaffen, die aus spektroskopischen Untersuchungen vorlagen (G. Kirchhoff, R. Bunsen, 1859; ↗ charakteristische Röntgenstrahlung, S. 88).
Mit dem Photonenmodell wurde ein Quantenmodell geschaffen, das Eigenschaften des klassischen Wellenmodells (Frequenz f) mit Eigenschaften des klassischen Teilchenmodells (Photonen mit der Energie W) vereinigt. Damit wurde erstmals bei der Erkenntnisgewinnung in der Physik deutlich, daß Modelle des makrophysikalischen Bereichs nicht ohne weiteres für das Erklären mikrophysikalischer Erscheinungen herangezogen werden können.
Licht hat seinen Ursprung im Innern der Atome. Nach der Quantenvorstellung müssen Atome demnach Lichtenergie quantenhaft („in kleinen Portionen") abgeben beziehungsweise aufnehmen. Letzteres konnte überzeugend mit dem Franck-Hertz-Versuch (1914) bestätigt werden. Dabei wurden auch die Kenntnisse über die Atomhülle erweitert, indem man berechtigt annahm, daß den Elektronen in der Atomhülle diskrete Energiewerte zukommen müssen. Danach können sich Elektronen in der Atomhülle nur auf bestimmten **Energieniveaus** befinden.

- *Erläutern Sie den Franck-Hertz-Versuch! (Versuchsanordnung, Versuchsergebnisse und deren Deutung; Lehrbuch Physik, Klasse 11, S. 50 ff.)*

Obwohl die Ergebnisse aus dem Franck-Hertz-Versuch noch im guten Einklang mit den Erkenntnissen aus dem Rutherford-Bohrschen Atommodell standen, wurden die Unzulänglichkeiten dieses Modells in der Folgezeit durch das Entdecken der Welleneigenschaften von Teilchen (C. J. Davisson, 1923; L. de Broglie, 1924) immer deutlicher. Danach sind jedem Strom sich schnellbewegender Teilchen (z. B. Elektronen) Welleneigenschaften zuzuordnen. Es gilt für die
Wellenlänge mikrophysikalischer Teilchen:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

● *Erläutern Sie die vorstehende Gleichung! Welche Größen stammen aus dem klassischen Wellenbild, welche aus dem klassischen Teilchenbild?*

Die von L. de Broglie entwickelte Theorie ermöglichte die widerspruchsfreie Ableitung der im Bohrschen Atommodell „festgesetzten" Annahmen (Postulate); gleichzeitig war sie Grundlage für die Weiterentwicklung der Modelle für die Atomhülle im wellenmechanischen Atommodell.

● *Geben Sie einen Überblick über Modelle für die Atomhülle und insbesondere über die Bohrschen Postulate! (Wissensspeicher Physik, S. 286 ff.)*

Mit der Entwicklung der Wellenmechanik (E. Schrödinger, 1926; W. Heisenberg, 1927) wurden vor allem mathematische Methoden gefunden, die es ermöglichen, Ergebnisse der älteren Quantentheorie logisch zwingend herzuleiten. Unter anderem wurde es nun möglich, die einen Elektronenzustand in der Atomhülle charakterisierenden **Quantenzahlen** exakter zu bestimmen. Damit mußten die Vorstellungen über Elektronen als klassische Teilchen auf Bahnen um den Atomkern aufgegeben werden. Stattdessen gelang es, Aufenthaltswahrscheinlichkeiten für die Elektronen der Atomhülle zu berechnen.

● *Sprechen Sie zu wesentlichen Merkmalen des Orbitalmodells in einem Kurzvortrag! Gehen Sie dabei von den Kenntnissen aus dem Chemieunterricht aus! (Lehrbuch Chemie, Klasse 11, S. 7 ff.)*

Jeder Elektronenzustand in der Hülle eines Atoms kann durch vier Quantenzahlen gekennzeichnet werden.

Übersicht über Quantenzahlen

Quantenzahl	Symbol	erlaubte Werte
Hauptquantenzahl	n	$n = 1, 2, 3, \ldots$
Nebenquantenzahl	l	$0 \leqq l \leqq n - 1$
Magnetquantenzahl	m	$-l \leqq m \leqq +l$
Spinquantenzahl	s	$s = +\frac{1}{2}, \; -\frac{1}{2}$

Die Hauptquantenzahl n kennzeichnet die Energie der Elektronen in der Atomhülle. Elektronen mit annähernd gleicher Energie werden **Energieniveaus** zugeordnet (↗ S. 57). Raumbereiche des wahrscheinlichsten Aufenthalts von Elektronen mit gleichem Energieniveau werden als *Elektronenschalen* bezeichnet; die K-Schale erhält man für $n = 1$, die L-Schale für $n = 2$ usw. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeiten können durch die *radiale Wahrscheinlichkeitsdichte* gekennzeichnet werden.

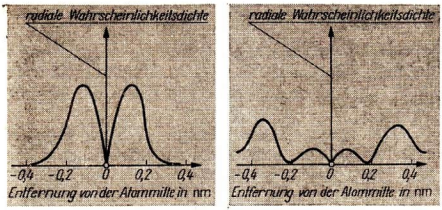


Bild 57/1 Radiale Wahrscheinlichkeitsdichte; links für 1-s-Elektronen, rechts für 2-s-Elektronen

● *Deuten Sie die Darstellungen im Bild 57/1 mit Hilfe der Vorstellung von Elektronenschalen!*

Feine Unterschiede in den Energieniveaus der Elektronen, die zu **Unterniveaus** führen, werden durch die **Nebenquantenzahl** *l* erfaßt;
für $l = 0$ erhält man die s-Niveaus,
für $l = 1$ die p-Niveaus usw.
Ein Energieniveauschema für Elektronen in der Atomhülle enthält demnach die Energieniveaus und die dazugehörigen Unterniveaus (Bild 57/2).
Im Bild 57/2 ist zu erkennen, daß die Niveaus um so höher liegen, je größer *n* und *l* sind. Dabei werden die Energiedifferenzen aufeinanderfolgender Niveaus mit wachsendem *n* und *l* kleiner.
Die **Magnetquantenzahl** *m* kennzeichnet die Komponente des Bahndrehimpulses eines Elektrons in Magnetfeldrichtung, wenn man das Elektron im klassischen Teilchenbild mit Eigenrotation auffaßt. Weil Atome ein inneres Magnetfeld haben, behält *m* bei Abwesenheit eines äußeren Magnetfeldes seine Bedeutung (↗ magnetisches Bahnmoment, S. 171).
Durch die **Spinquantenzahl** *s* wird schließlich der Drehimpuls infolge Eigenrotation des Elektrons (unter der erwähnten Modellvorstellung) selbst erfaßt (↗ Spinmoment, S. 172).
Unterscheiden sich Elektronen in den Quantenzahlen, so unterscheiden sie sich auch in den Energien. Die Änderung der Hauptquantenzahl *n* ist mit einer größeren Energieänderung verbunden als die Änderung der Nebenquantenzahl *l*.

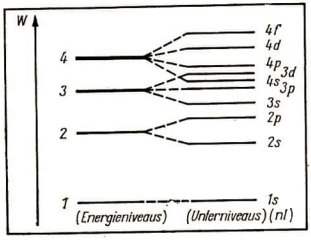


Bild 57/2 Energieniveauschema Energieniveauschemata lassen sich prinzipiell nur durch komplizierte Rechnungen ermitteln.

Entsprechendes gilt für die anderen Quantenzahlen in der dargestellten Reihenfolge.
Wie bereits aufgezeigt, charakterisiert andererseits die Hauptquantenzahl *n* die radiale Ausdehnung des Orbitals, während die Form bzw. Gestalt des Orbitals durch die Nebenquantenzahl *l* und dessen Orientierung durch die Magnetquantenzahl *m* bestimmt werden.
Bei der Untersuchung von Elektronenzuständen gelangte 1925 der Physiker W. Pauli zu der Annahme, daß es in einem Atom **nicht** zwei Elektronen geben kann, die in allen 4 Quantenzahlen übereinstimmen. Wenn solche „verbotenen" Zustände ausgeschlossen werden — man bezeichnet diesen Sachverhalt als **Pauli-Verbot** —, ist die Besetzung der einzelnen Energieniveaus im Grundzustand eines Atoms exakt angebbar.

Besetzung der Energieniveaus bis n = 3 (K-, L- und M-Schale) im Grundzustand

n	*l*	*m*	*s*	maximale Anzahl der Elektronenzustände	
1	0 (s)	0	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	2	
2	0 (s)	0	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	2	8
	1 (p)	−1, 0, +1	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	6	
3	0 (s)	0	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	2	
	1 (p)	−1, 0, +1	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	6	18
	2 (d)	−2, −1, 0, +1, +2	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	10	

● *Informieren Sie sich über die Elektronenkonfiguration der Atome im Wissensspeicher Chemie! Eignen Sie sich die Schreibweise für die Elektronenzustände an!*

Beispiel: Elektronenkonfiguration von Aluminium im Grundzustand

$$1s^2 \quad \overbrace{2s^2 \quad 2p^6 \quad 3s^2}^{2p_x^2 \; 2p_y^2 \; 2p_z^2} \quad 3p^1$$

● *Ermitteln Sie die Elektronenbesetzung für Kalzium im Grundzustand! Gehen Sie dabei von der Übersicht im Wissensspeicher Chemie, Seite 29, aus!*

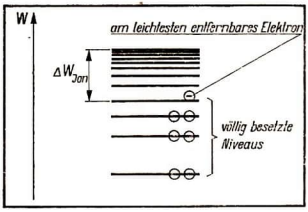


Bild 59/1 Energieniveaus und Ionisierungsenergie

Die Verringerung des Abstandes der Niveaus mit wachsenden Werten für n erfolgt in der Weise, daß sie für $n \rightarrow \infty$ einem Grenzwert zustreben. Erreicht ein Elektron diesen Grenzwert, so hat es sich völlig vom Atom losgelöst. Die Energie, die notwendig ist, um das äußerste Elektron eines Atoms im Grundzustand auf diesen Grenzwert der Energie zu bringen, nennt man **Ionisierungsenergie** (Bild 59/1). Das Atom wird zum Ion.

Zusammenfassung. Durch vier Quantenzahlen — Hauptquantenzahl, Nebenquantenzahl, Magnetquantenzahl, Spinquantenzahl — wird der Zustand eines Elektrons in der Atomhülle bestimmt. Unter Beachtung der Quantenzahlen, ihrer erlaubten Werte sowie des Pauli-Verbots kann der Aufbau der Elektronenhülle eines Atoms im Grundzustand angegeben werden.

Chemische Bindung

Durch die chemische Bindung wird die Art des Zusammenhalts von Teilchen (Atome, Ionen, Atomgruppen, Moleküle) in Kristallen charakterisiert.
Der Zusammenhalt der Teilchen (Gitterbausteine) der Kristalle läßt sich durch folgende Bindungstypen erklären:

- Ionenbeziehung
  (heteropolare Bindung, elektrovalente Bindung);
- Atombindung
  (homöopolare Bindung, kovalente Bindung);
- Metallische Bindung;
- Van-der-Waalssche Bindung.

Zunächst galten die Bindungen als grundverschieden und waren bis auf die Ionenbeziehung mehr oder weniger unklar. Erst mit der Entwicklung der Quantenvorstellung (↗ S. 55, ↗ Quantenzahlen, S. 56) konnten die übrigen Bindungstypen in ihrem Wesen erklärt werden.

● *Geben Sie in einem Kurzvortrag einen Überblick über Arten chemischer Bindung! (Lehrbuch Chemie, Klasse 8, S. 27 ff.)*

Ionenbeziehung

Ionenbeziehung besteht ausgeprägt bei Salzkristallen (z. B. Natriumchlorid-Kristalle). Sie entsteht dadurch, daß Atome der metallischen Elemente leicht durch Abgabe von Elektronen der äußeren Schale Kationen bilden, während Atome der nichtmetallischen Elemente ebenfalls leicht durch Einbau von Elektronen in die äußere Schale Anionen bilden.

Beispiel: $Na \cdot \rightarrow [Na]^+ + e,$

$$e + \cdot\ddot{\underset{\cdot\cdot}{Cl}}: \rightarrow [:\ddot{\underset{\cdot\cdot}{Cl}}:]^-$$

Durch Ionenbildung erreichen diese Atome die energetisch relativ stabile Anordnung der Elektronen in der Atomhülle der Edelgase (Edelgaskonfiguration). Jedes Ion ist von einem kugelsymmetrischen elektrostatischen Feld umgeben; Kationen und Anionen treten jeweils untereinander in Wechselwirkung entsprechend dem

Coulombschen Gesetz

$$F = \frac{1}{4\pi \cdot \varepsilon} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

- *Erläutern Sie den Einfluß des Wassers ($\varepsilon_r = 81$) auf die Coulombsche Anziehungskraft zwischen den Ionen bei der Dissoziation!*

Bei Annäherung von Kationen und Anionen tritt zunächst nach dem Coulombschen Gesetz eine starke Anziehungskraft auf. Sobald sich die äußeren Schalen der Ionen berühren, kommt es gleichzeitig zu einer elektrostatischen Abstoßung zwischen den Ionen, so daß sich ein **Gleichgewichtsabstand** zwischen jeweils zwei entgegengesetzt geladenen Ionen einstellt.
Die Existenz eines Gleichgewichtsabstandes läßt sich veranschaulichen, indem man die potentielle Gesamtenergie der beiden Ionen in Abhängigkeit vom Abstand ihrer Zentren aufträgt (Bild 60/1). Im Zustand niedrigster Energie (Minimum dieser Kurve) befindet sich das System im Gleichgewicht.

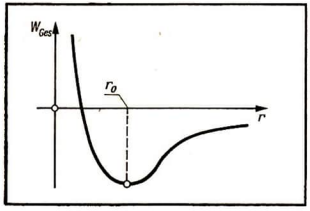


Bild 60/1 Potentielle Gesamtenergie eines Systems, das aus einem Kation und einem Anion besteht, in Abhängigkeit vom Abstand ihrer Zentren; r_0: Gleichgewichtsabstand der Zentren

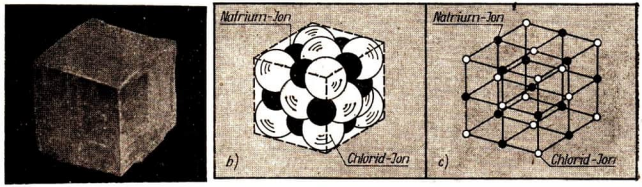


Bild 61/1 Natriumchlorid-Ionenkristall: a) Realkristall;
b) räumliches Modell; c) Ionengittermodell

Sowohl der Atomabstand in Molekülen (↗ Atombindung, S. 64) als auch die Gitterkonstante in Kristallen (↗ S. 37) sind durch ein derartiges Energieminimum festgelegt; nur sind im letzteren Fall die Beiträge einer größeren Anzahl von Nachbar-Bausteinen zu berücksichtigen.
Die Ionenbeziehung hat innerhalb des Kristalls keine räumliche Vorzugsrichtung infolge der symmetrischen Ladungsverteilung; z. B. besteht im Natriumchlorid-Kristall zwischen einem Chlorid-Ion und den 6 Natrium-Ionen in der Umgebung jeweils gleichstarke Wechselwirkung und umgekehrt.
Durch die Ionenbeziehung werden **Ionenkristalle** gebildet (Bild 61/1).
Da die Ionenbeziehung eine starke Bindung ist, besitzen Ionenkristalle in der Regel eine gewisse Härte. Schmelz- und Siedetemperaturen dieser Festkörper sind relativ hoch. Ohne Energiezufuhr besitzen Ionenkristalle nur eine geringe elektrische Leitfähigkeit.

Einige Eigenschaften von Ionenkristallen

Kristall	Gitterkonstante a in nm	Schmelztemperatur ϑ in °C	Linearer Ausdehnungskoeffizient α in grd^{-1}	Härte (nach Brinell) in $kp \cdot mm^{-2}$
Na^+Cl^-	0,282	800	$120 \cdot 10^{-6}$	12,4
K^+Cl^-	0,314	770	$115 \cdot 10^{-6}$	5,8

● *Vergleichen Sie entsprechende Eigenschaften in Abhängigkeit von der Gitterkonstante a!*

Gitterenergie. Die Gitterenergie erhält man in erster Näherung, wenn man die Summe der Energien aus der Anziehung (Coulombenergie) und der Abstoßung der Ionen bildet.
Bei genauerer Betrachtung müßten dabei noch die Van-der-Waalssche Energie (↗ Van-der-Waalssche Bindung, S. 70) und die Nullpunktsenergie (Energie bei $T = 0K$) erfaßt werden.

Energiewerte einiger Ionenkristalle (in 10^6 Ws je Ionenpaar)

Kristall	Coulombenergie	Abstoßungsenergie	Gitterenergie (theoretisch)
Li^+F^-	−1,98	+0,31	−1,67
Li^+Br^-	−1,44	+0,16	−1,28
$Ca^{2+}O^{2-}$	−6,67	+0,93	−5,74

Energiebilanz bei Ionenbeziehung. Eine Ionenbeziehung wird dann energetisch stabil, wenn der durch die Coulomb-Wechselwirkung freiwerdende Energiebetrag größer ist als der Energiebetrag, der zum Bilden der Ionen notwendig ist. Die Differenz zwischen der Coulombenergie und der Energie zum Bilden der Ionen wird als **Bindungsenergie** bezeichnet.

Energiebilanz für K^+Cl^-:

Ionisierungsenergie für Kalium: + 4,34 eV,

Elektronenaffinität für Chlor: − 3,82 eV.

Die Elektronenaffinität ist ein Maß für die Ablösearbeit eines Elektrons aus der äußeren Schale des Anions; sie charakterisiert das Bestreben des Atoms, ein Elektron einzufangen.

Liegen nun beide Stoffe im gasförmigen Zustand vor, so ist zum Bilden eines Ionenpaares eine Energie $W = (+ 4{,}34 - 3{,}82)$ eV, $W = + 0{,}52$ eV erforderlich. Andererseits erhält man für die Coulombenergie

$$W_C = -\frac{1}{4\pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r}$$

und mit $r = 0{,}314$ nm $W_C \approx - 4{,}58$ eV.

Die freiwerdende Energie beträgt demnach

$$\Delta W = (- 4{,}58 + 0{,}52)\ \text{eV},$$

$$\underline{\Delta W \approx - 4{,}06\ \text{eV}}.$$

⑰ Ermitteln Sie die Bindungsenergie für Na^+Cl^-!
($r = 0{,}281$ nm; Ionisierungsenergie für Natrium: + 5,14 eV; Elektronenaffinität für Chlor: − 3,82 eV)

Denkt man sich die Ionen eines Ionengitters als starre Kugeln, die einander berühren, so kann man den Radius dieser Kugeln als **Ionenradius** angeben. Beim Bilden von Ionen aus neutralen Atomen verändern sich die Elektronenkonfigurationen der Atome zur Edelgaskonfiguration. Das ist mit einer Änderung des Radius vom Atom zum Ion verbunden, da sich dabei die Coulomb-Wechselwirkung zwischen dem Atomkern und den Elektronen in der Hülle verändert. Fügt man einem Atom Elektronen zu, so führt das im allgemeinen zur Radiusvergrößerung und umgekehrt.

Atom- und Ionenradien einiger Elemente (in nm)

	Element					
	H	Fe	Mg	Cl	Br	J
neutraler Atomradius	0,037	0,154	0,130	0,099	0,114	0,133
Edelgas-Ionenradius	0,208	0,095	0,065	0,181	0,195	0,216

- *Handelt es sich beim Wasserstoff-Ion in der Tabelle um H^+ oder H^-?*
- *Erklären Sie, warum der Ionenradius vom Chlor zum Jod ansteigt!*

Für stabile Ionenkristalle muß man nun aus energetischer Sicht annehmen, daß die Anionen mit den Kationen in Kontakt stehen, der Abstand zweier entgegengesetzt geladener Ionen aber größer als die Summe aus den entsprechenden Ionenradien ist. Mit Abnahme des Ionenradius der Kationen (r_K) oder der Anionen (r_A) kann es zur Annäherung jeweils gleichartiger Ionen kommen, so daß der Kristall instabil wird. Er geht dann oftmals in eine andere Struktur mit niedrigerer Koordinationszahl (↗ S. 40) über.

- *Begründen Sie die Erscheinung der Strukturveränderung!*

Man kann einen **Grenzradienquotienten** $\frac{r_K}{r_A}$ angeben, bei dem ein Kristall in der vorliegenden Struktur gerade noch stabil ist.

CaCl-Struktur (KZ 8): $\frac{r_K}{r_A} > 0{,}732;$

NaCl-Struktur (KZ 6): $0{,}732 > \frac{r_K}{r_A} > 0{,}414$;

ZnS-Struktur (KZ 4): $0{,}414 > \frac{r_K}{r_A} > 0{,}225$

Diese Vorstellungen über Ionenbeziehung und Ionenkristalle sind Modellvorstellungen eines Grenztyps der Bindung bzw. des Festkörpers. Es gibt keinen völlig idealen Ionenkristall; so ist in Cäsiumfluorid (CsF), einer Verbindung des elektropositivsten Metalls mit dem elektronegativsten Nichtmetall, beispielsweise ein geringer Anteil Atombindung vorhanden und erst recht in allen anderen Ionenkristallen.
Auch die folgenden Bindungstypen charakterisieren jeweils Grenzfälle chemischer Bindung.

Atombindung

Während bei der Verbindung von Metall- und Nichtmetallatomen durch Umverteilung von Ladungen ein energetisch bevorzugter Zustand eintritt (↗ Ionenbeziehung, S. 60), wird dieser Zustand vorwiegend bei Nichtmetallatomen untereinander durch Austausch von Elektronen erreicht. Im Unterschied zur Ionenbeziehung nennt man diese Bindung **Atombindung**. Die durch Atombindung entstehenden Kristalle werden als **Atomkristalle** (kovalente Kristalle) bezeichnet.
Beispiele: Diamant, Germanium, Zinksulfid, Methan, Chlor.

Die Atombindung beruht auf einem quantenmechanischen Austauschprozeß von Elektronen der äußeren Schalen der beteiligten Atome (Durchdringung der Orbitale). Dabei wird eine der Wertigkeit der Elemente (Bindigkeit) entsprechende Anzahl von Elektronen zwischen den Atomen so ausgetauscht, daß sie praktisch den beteiligten Atomen gleichzeitig angehören; es entstehen jeweils **Elektronenpaare**. Jeweils zwei Elektronen halten sich gemeinsam im gleichen Raumbereich auf; sie unterscheiden sich nur durch ihren Spin (↗ Spinquantenzahl, S. 57; ↗ Pauli-Verbot, S. 58).
Vergleicht man die Elektronendichteverteilung im Molekül mit der Dichteverteilung, die man bei Überlagerung der Elektronendichten der beiden Atome erhalten würde, stellt man im Molekül eine Erhöhung der Dichte im Raumbereich zwischen den beiden beteiligten Atomen fest. Bei Atombindung ist damit die Elektronendichte in verschiedenen Richtungen von einem Atom aus unterschiedlich (räumliche Gerichtetheit der Atombindung). Zwischen den beteiligten Atomen liegt jeweils ihr Maximum.
Beispiel: Wasserstoffmolekül: $H\cdot + .H \rightarrow H:H$ oder $H-H$

- *Inwiefern wird bei Atombindung Edelgaskonfiguration der beteiligten Atome erreicht?*
- *Informieren Sie sich über σ- und π-Bindungen im Wissensspeicher Chemie, S. 47 f.!*

Eine wesentliche Bedingung für das Zustandekommen einer Atombindung ist, daß jeweils einfach besetzte Orbitale mit Elektronen antiparallelen Spins vorhanden sind (↗ Pauli-Verbot, S. 58).

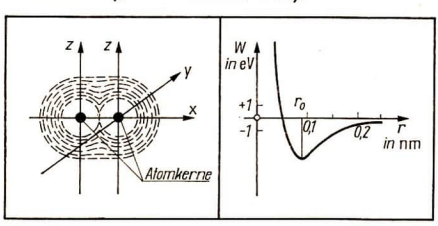


Bild 64/1
links: Gegenseitige Durchdringung der zwei 1-s-Orbitale der Wasserstoffatome im Wasserstoffmolekül; rechts: Gesamtenergie eines Wasserstoffmoleküls r_0: Gleichgewichtsabstand

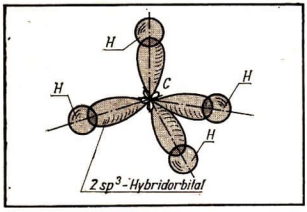


Bild 65/1 Methanmolekül mit vier 2-sp³-Hybridorbitalen des Kohlenstoffatoms

● *Weisen Sie die Notwendigkeit dieser Bedingung mit Hilfe des Pauli-Verbots am Beispiel des Wasserstoffmoleküls nach!*

Beispiel: Wasserstoffmolekül $H\cdot + .H \rightarrow H : H$

$\uparrow \quad \downarrow \quad \uparrow\downarrow$

Ähnlich wie bei anderen Bindungsarten stellt sich ein **Gleichgewichtsabstand der Atomkerne** ein (Bild 64/1), wobei sich das System im Zustand minimaler Energie befindet.
Die Atombindung ist etwa gleich stark wie die Ionenbeziehung. Die räumliche Gerichtetheit der Atombindung zeigt sich insbesondere, wenn p-Elektronen (p-Orbitale) an der Bindung beteiligt sind und bei Ausbildung von **Hybridorbitalen.**

● *Erklären Sie den Vorgang der Hybridisierung (Lehrbuch Chemie, Klasse 11)!*

Beispiel: Methanmolekül (Bild 65/1)

Die Gerichtetheit der Atombindung verhindert die dichteste Kugelpackung im Molekül. Es entstehen Gitter (Atom- oder Molekülgitter) niedriger Koordinationszahl (↗ S. 40) wie z. B. Atomgitter beim Diamant mit KZ 4 (Bild 41/1). *Diamant* ist ein Beispiel dafür, daß Atomkristalle mit tetraedischer Anordnung der Atome sehr fest sind. Kohlenstoff kann unter bestimmten Bedingungen durch Atombindung auch das Atomgitter des *Graphits* bilden (Bild 41/1).
Allerdings liegt bei Graphitkristallen in z-Richtung **keine** Atombindung, sondern eine der metallischen Bindung ähnliche Bindung vor.

● *Vergleichen Sie elektrische und mechanische Eigenschaften von Diamant und Graphit unter Beachtung ihrer Kristallstruktur!*

Räumliche Kristalle mit reiner Atombindung sind vorwiegend bei vierwertigen Atomen möglich. Diese weisen stets eine Zinksulfid-Struktur auf (KZ 4) wie z. B. C, Ge, Si, SiC.
Die Atombindung ist um so fester, je mehr Elektronen von jedem Atom für gemeinsame Elektronenpaare bereitgestellt werden. Hohe Bindungsfestigkeit

führt zu hoher Schmelz- und Siedetemperatur sowie zu großer Härte der Festkörper. Die meisten Kristalle zeigen weder reine Atombindung noch reine Ionenbeziehung; sie besitzen **gemischte Bindung.**

Metallische Bindung

● *Geben Sie einen Überblick über wesentliche Eigenschaften von Metallen!*

Bei den bisher dargelegten Modellvorstellungen über Bindungstypen genügte es, vorwiegend 2-Teilchen-Systeme zu betrachten und auf die Wechselwirkung dieser Teilchen mit weiteren Teilchen in der Umgebung hinzuweisen.
Im Unterschied dazu kann man die metallische Bindung aber nur unter Beachtung der Wechselwirkungen innerhalb eines größeren Teilchenensembles erklären. Diese Bindung tritt in **Metallkristallen** auf. Der Zustand niedrigster Energie, als Voraussetzung für jede Bindung, wird dabei auf andere Weise realisiert.

● *Erläutern Sie die metallische Bindung auf der Grundlage der atomistischen Modellvorstellung! (Lehrbuch Chemie, Klasse 8, S. 38 ff.)*

Die Bindungssituation in Metallen kann mit verschiedenen Modellen erörtert werden. Im folgenden soll die metallische Bindung auf der Grundlage des Orbital-Modells und der Atombindung näher betrachtet werden. Dazu wird zunächst zwischen zwei Metallatomen eine Bindung angenommen, die weitgehend der Atombindung (↗ S. 64) entspricht. Wenn sich zwei Atome so weit nähern, daß sich Orbitale zu überlappen beginnen, kombinieren Orbitale gleicher Energie untereinander. Es bilden sich zwei Verbindungsorbitale, eines mit höherer — *antibindendes Orbital* — und eines mit niedrigerer Energie — *bindendes Orbital*. Die beiden Elektronen der Atome besetzen nun prinzipiell das Orbital mit der niedrigeren Energie (Bild 67/1a), wodurch die Gesamtenergie des Systems erniedrigt wird und eine feste Bindung entsteht.
Fügt man weitere Metallatome hinzu, so kann man feststellen, daß sich ein Elektron nicht wie bei der Atombindung längere Zeit am gleichen Atom aufhält, sondern dem ganzen System gleichzeitig angehört. In einer Anordnung aus *N* Atomen existieren dann *N* Orbitale, die sich über das System erstrecken. Ihre Energieniveaus gehen aus den atomaren Niveaus durch N-fache Aufspaltung hervor. Zu einem solchen Verhalten neigen besonders die äußeren s-Elektronen der Metalle.
Ein Stück Metall handlicher Größe enthält etwa 10^{23} Atome mit ebenso vielen äußeren Elektronen. Das atomare s-Niveau ist dabei 10^{23}fach aufgespaltet. Es ist praktisch ein ganzer Energiebereich so dicht mit Niveaus belegt, daß man die einzelnen Niveaus nicht mehr auseinanderhalten kann. Somit ist ein Bereich erlaubter Elektronenenergien entstanden, der als **Energieband** bezeichnet wird (Bild 67/1b).

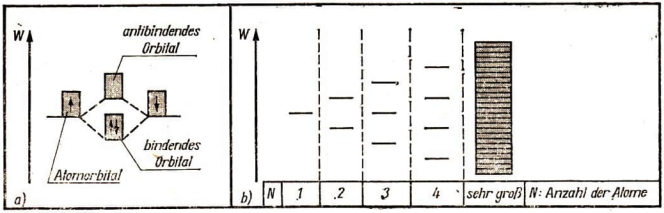


Bild 67/1 a) Energieniveaus und Besetzung der bindenden und antibindenden Orbitale;
b) Entstehung eines Energiebandes im Metall

Die Existenz eines breiten Energiebandes deutet darauf hin, daß sich die Außenelektronen der Metallatome im metallischen Festkörper nahezu frei bewegen können. Sie können beliebige Energien annehmen und sind nicht mehr den ursprünglichen Metallatomen zuzuordnen („Elektronengas"). Man bezeichnet sie auch als frei bewegliche Elektronen oder — da sie die gute elektrische Leitfähigkeit der Metalle bewirken — als **Leitungselektronen.**

Energiebändermodell eines Festkörpers

Quantenphysikalische Berechnungen sowie Experimente bestätigen die Richtigkeit der Annahme von Energiebändern in Metallen. Die Breite der Energiebänder hängt u. a. vom Abstand zwischen den Gitterbausteinen eines Metallkristalls ab. Je kleiner der Gitterabstand r ist, um so breiter spalten die Bänder auf, und zwar für höherliegende Energieniveaus stärker als für tieferliegende (Bild 67/2a).

● *Sprechen Sie in einem Kurzvortrag zur Leitfähigkeit von Metallen und Halbleitern (Art der Ladungsträger, Herkunft der Ladungsträger, Widerstandsverhalten)!*

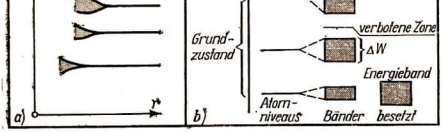


Bild 67/2
a) Aufspaltung der Energieniveaus in einem Metallkristall in Abhängigkeit vom Gitterabstand r;
b) Entstehung von Energiebändern in einem Festkörper;
W_F: Fermi-Energie

Die Bänder im Bild 67/2b kennzeichnen jeweils mögliche und damit **erlaubte Energiezustände** für die Elektronen (im Energieintervall ΔW); die dazwischenliegenden Gebiete werden als **verbotene Zonen** bezeichnet. Im Vergleich mit diskreten Energieniveaus (↗ S. 57) können die Elektronen sich in einem Energieband also in größeren Energiebeträgen innerhalb des Intervalls ΔW unterscheiden.

In einem Kristall liegt der energetisch niedrigste Zustand dann vor, wenn jedes Energieniveau bis zum höchstmöglichen Niveau im Grundzustand besetzt ist und jeder darüberliegende Zustand unbesetzt ist. Der Energiewert, der den besetzten vom unbesetzten Teil des Energiebandes abtrennt, wird **Fermi-Energie** W_F genannt (Bild 67/2b).

Aus Erfahrung ist bekannt, daß im Grundzustand eines Festkörpers kein elektrischer Strom fließt. Es sind sämtliche, in den Energiebändern äußerst dicht gepackte Energieniveaus bis zur Fermi-Energie besetzt, sämtliche Niveaus oberhalb der Fermi-Energie unbesetzt. Ein Strom wird nur möglich, wenn man das System aus dem Grundzustand herausbringt, d. h., einige Elektronen über das Fermi-Niveau hinaus anhebt. Das gelingt mit solchen Elektronen leicht, deren Energie nur wenig unter der Fermi-Energie liegt. Eine Möglichkeit der Energiezufuhr besteht darin, daß man an die Enden eines metallischen Festkörpers (z. B. Kupferdraht) eine elektrische Spannung legt. Dabei wird den Elektronen durch das elektrische Feld Energie vermittelt; das System erreicht einen Zustand, in welchem sich die Geschwindigkeiten der Elektronen nicht mehr im Mittel kompensieren. Es stellt sich eine mittlere Driftgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Feldrichtung ein, d. h., es fließt ein elektrischer Strom.

Damit Niveaus in der Nähe der Fermi-Energie umbesetzt werden können, müssen oberhalb der Fermi-Energie weitere Niveaus vorhanden sein. Das ist aber nur bei unvollständig besetzten Bändern der Fall. Ein vollbesetztes Band bietet keine Möglichkeit zu einer Änderung und kann deshalb nicht zum Strom beitragen. Ein Band ist dann voll besetzt, wenn jedes Metallatom des Gitters zwei Elektronen zur Auffüllung zur Verfügung stellt (analog zu der Tatsache, daß ein Molekül-Orbital mit zwei Elektronen voll besetzt ist).

Einwertige Metalle (z. B. Na, Ag):
Das Energieband, das aus den Niveaus der äußeren s-Elektronen der Atome hervorgegangen ist, ist genau halbvoll besetzt, weil jedes Atom nur ein einziges äußeres s-Elektron beisteuert. Diese Metalle sind deshalb gute Leiter.

Zweiwertige Metalle (z. B. Mg, Zn):
Das Energieband, das aus den Niveaus der äußeren s-Elektronen hervorgegangen ist, scheint voll besetzt, weil jedes Atom zwei s-Elektronen zur Metallbindung beisteuert. Hier überlagern sich aber Bänder, die aus höherliegenden, im Atom unbesetzten Niveaus hervorgegangen sind, mit dem s-Band. So liegen wieder unvollständig besetzte Bänder vor, die eine elektrische Leitfähigkeit dieser Metalle ermöglichen. Die Leitfähigkeit dieser Metalle ist allerdings nicht so gut wie die der einwertigen Metalle.

● *Vergleichen Sie die spezifischen elektrischen Widerstände von Kupfer und Aluminium! Versuchen Sie, die elektrische Leitfähigkeit dieser Metalle mit Hilfe des Bändermodells zu deuten!*

Werden auf die Elektronen im Metallkristall größere Energiebeträge übertragen ($W \gg W_F$), so können sie als **freie Elektronen** den Kristall verlassen.

● *Geben Sie Möglichkeiten an, durch welche Vorgänge frei beweglichen Elektronen Energie zugeführt werden kann, so daß sie als freie Elektronen den Metallverband verlassen!*

Da, wie bereits erwähnt, nur der Energiebereich in der Nähe der Fermi-Energie für die elektrische Leitfähigkeit von Bedeutung ist, brauchen die tieferliegenden schmalen Bänder der inneren Elektronen beim Deuten der elektrischen Leitfähigkeit nicht mit in die Betrachtung einbezogen werden.
Das energetisch höchstliegende voll besetzte Band wird als **Valenzband** bezeichnet. Das energetisch niedrigste unbesetzte oder nur teilweise mit Elektronen besetzte Band wird als **Leitfähigkeitsband** bezeichnet. Man kann mit Hilfe des Bändermodells nunmehr Festkörper hinsichtlich ihrer elektrischen Leitfähigkeit klassifizieren:

Metalle	**Halbleiter und Isolatoren**
Das energetisch höchstliegende, noch mit Elektronen besetzte Band ist im unangeregten Zustand nicht vollständig besetzt, bzw. das eventuell völlig besetzte höchstliegende Band (Valenzband) überschneidet sich mit dem darüberliegenden leeren Band (Leitfähigkeitsband).	Das Band (Leitfähigkeitsband), das energetisch über dem höchstliegenden, vollbesetzten Energieband (Valenzband) liegt, ist durch eine verbotene Zone von diesem Energieband getrennt. Zum „Anheben" von Elektronen aus diesem Energieband sind größere Energiebeträge erforderlich (↗ Leitungsvorgang in Halbleitern, S. 100).

Die Tabelle auf der folgenden Seite 70 enthält einige weitere Eigenschaften metallischer Festkörper, die über die Stärke der metallischen Bindung Aufschluß geben. Interessant ist dabei ein Vergleich bestimmter Eigenschaften in Abhängigkeit von der Anzahl der Bindungselektronen bzw. den Werten für die Gitterkonstante.

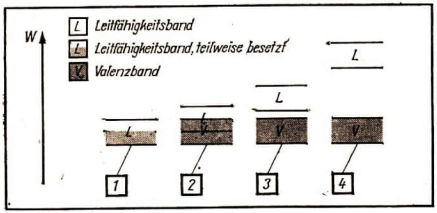


Bild 69/1 Möglichkeiten für Energiebänderanordnungen in Festkörpern;
1 — einwertiges Metall,
2 — zweiwertiges Metall
3 — Eigenhalbleiter,
4 — Isolator

Einige Eigenschaften von Metallkristallen

Metallkristall	Anzahl der Bindungselektronen	Gitterkonstante a in nm	Schmelztemperatur ϑ in °C	Linearer Ausdehnungskoeffizient α in grd^{-1}	Härte (nach Brinell) in $kp\ mm^{-2}$
Na	1	0,372	97,7	$71 \cdot 10^{-6}$	0,07
K	1	0,462	63,5	$84 \cdot 10^{-6}$	0,037
Mg	2	0,286	658	$23{,}1 \cdot 10^{-6}$	16
Zr	4	0,293	1727		160

● *Vergleichen Sie bestimmte Eigenschaften von Metallkristallen*
a) in Abhängigkeit von der Anzahl der Bindungselektronen,
b) bei Variation der Gitterkonstanten
sowie
c) mit denjenigen entsprechender Ionenkristalle (↗ S. 61)!

Van-der-Waalssche Bindung

Bereits bei Ionenbeziehung oder Atombindung wurde deutlich, daß die Modellvorstellungen über Bindungen sich jeweils auf Grenzfälle beziehen. Im Realfall liegen in einem Festkörper Bindungsverhältnisse vor, die zwischen mehreren Bindungstypen liegen.
Neben Bindungskräften, die von den Hauptwertigkeiten (Bindigkeiten) der Elemente abhängen (Ionenbeziehung, Atombindung, Metallische Bindung), können vor allem zwischen Molekülen in Kristallen Kräfte auftreten, die eine schwächere Bindung bewirken (Zwischenmolekulare Kräfte). Diese Kräfte werden *Van-der-Waalssche Kräfte* genannt.
Solche schwächeren Bindungen treten vor allem in Flüssigkeiten und komprimierten Gasen sowie in organischen Kristallen auf.
Die Ursache für Van-der-Waalssche Kräfte liegt darin, daß die Moleküle vieler Stoffe zwar insgesamt elektrisch neutral sind, aber die Schwerpunkte der positiven und negativen Ladungen innerhalb eines Moleküls nicht zusammenfallen. Durch diese räumliche Trennung der Ladungsschwerpunkte entstehen elektrische Dipole (Dipolmoleküle). Zwischen den Ladungsschwerpunkten der Dipolmoleküle tritt elektrostatische Wechselwirkung auf (↗ S. 60).

● *Informieren Sie sich über das Dipolmolekül H_2O im Wissensspeicher Chemie!*

Kristalle, bei denen die Moleküle des Gitters durch Van-der-Waalssche Bindung zusammenhalten, nennt man **Molekülkristalle**. Zum Beispiel wird der innermolekulare Zusammenhalt der Gitterbausteine bei Ammoniakmolekülen durch

Atombindung bewirkt. Feste Ammoniakkristalle besitzen kubisch-flächenzentriertes Gitter. Der Zusammenhalt der Ammoniakmoleküle im Kristall beruht auf Van-der-Waalsscher Bindung.

● *Erläutern Sie in einem Vortrag die Bindungsverhältnisse in Diamant-, Graphit- und Kohlendioxidkristallen! Verwenden Sie zur Vorbereitung das Buch „Aus der Festkörperphysik", I. I. Podgornowa und W. A. Kondakow, Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin, 1976!*

Im folgenden sollen einige Eigenschaften der Festkörper in Verbindung mit dem Kristallaufbau näher betrachtet werden.

Ausdehnung von Festkörpern beim Erwärmen

● *Berichten Sie in einem Vortrag über die Ausdehnung von Festkörpern beim Erwärmen! (Lehrbuch Physik, Klasse 11, S. 74 ff.)*

▼ Bestimmen Sie den linearen Ausdehnungskoeffizienten α für einen Metallkörper (z. B. Aluminiumrohr oder -draht)!

a) Entwickeln Sie das Meßprinzip sowie die Meßanordnung!

b) Informieren Sie sich über Realisierungsmöglichkeiten für die Experimentieranordnung!

c) Bauen Sie eine entsprechende Experimentieranordnung auf! Ermitteln Sie die notwendigen Werte!

d) Berechnen Sie den linearen Ausdehnungskoeffizienten! Führen Sie eine Fehlerabschätzung durch (Lehrbuch Physik, Klasse 11, S. 156 ff.), und vergleichen Sie den errechneten Wert mit dem tabellierten Wert!

Die meisten Festkörper dehnen sich beim Erwärmen aus. Dabei nehmen die Teilchenabstände im Festkörper zu. Man kann diesen Vorgang mikrophysikalisch genauer erklären, wenn man von der Kurve für die potentielle Energie W_{pot} zweier atomarer Gitterbausteine im Kristall ausgeht (Bild 71/1).

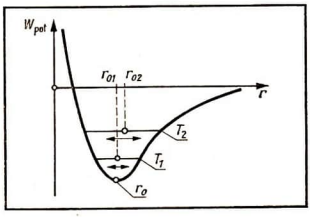


Bild 71/1 Potentielle Energie W_{pot} zwischen zwei atomaren Gitterbausteinen im Kristall in Abhängigkeit vom Abstand r zwischen den Bausteinen

● *Geben Sie eine Begründung für den asymmetrischen Verlauf dieser Energiekurve beim Zusammenlagern zweier Gitterbausteine!*

Zunächst schwingt bei einer Temperatur $T_1 > T_0$ jeder Gitterbaustein im Kristall um einen Ruhepunkt im Abstand r_0 (Gleichgewichtsabstand zweier Bausteine). Wird einem Kristall Wärmeenergie zugeführt, so erhöht sich die Schwingungsenergie jedes Gitterbausteins.
Die Schwingungsweite eines Gitterbausteins wird also innerhalb der „Mulde" der Kurve für W_{pot} bei der Temperatur T_2 größer sein als bei T_1 ($T_2 > T_1$).
Infolge der Asymmetrie der Kurve verschiebt sich damit der Ruhepunkt des Bausteins in Richtung wachsenden Abstandes r; somit ist der Gleichgewichtsabstand r_0 zweier Bausteine jeweils größer geworden.
Da nun die Bausteine im Kristall durch Bindungskräfte gekoppelt sind, überträgt sich dieser Zustand von Baustein zu Baustein, d. h., alle Gleichgewichtsabstände werden in Abhängigkeit von der zugeführten Wärmeenergie im allgemeinen vergrößert. Eine ständige Zufuhr von Wärmeenergie würde schließlich zum Schmelzen des Kristalls führen.
Sind nun in einem Kristall die Gitterbausteine in *a*-, *b*- und *c*-Richtung **nicht** durch gleichstarke Kräfte miteinander gebunden, so ist die Bindung richtungsabhängig. Das führt zu einer **Richtungsabhängigkeit des linearen Ausdehnungskoeffizienten in Festkörpern.**

● *Welche Bindungskräfte treten in Graphitkristallen in unterschiedlichen Richtungen auf?*

Richtungsabhängigkeit des linearen Ausdehnungskoeffizienten einiger Stoffe

Stoff	Gitter	Linearer Ausdehnungskoeffizient α in grd^{-1}	
		parallel *c*-Achse	senkrecht *c*-Achse
Graphit	Schichtengitter	$26 \cdot 10^{-6}$	$-1{,}2 \cdot 10^{-6}$
Natriumnitrat	schichtenartiges Gitter	$112 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$
Magnesium	Metallgitter	$27 \cdot 10^{-6}$	$24 \cdot 10^{-6}$

● *Überlegen Sie, wie man in einem Experiment die Richtungsabhängigkeit des linearen Ausdehnungskoeffizienten von Festkörpern bestimmen könnte!*

Zwischen Festkörpern mit verschiedenen Bindungstypen bestehen allerdings bezüglich der Größenordnung keine wesentlichen Unterschiede im linearen Ausdehnungskoeffizienten!

● *Versuchen Sie, die obige Aussage durch Aufsuchen von entsprechenden Werten in Nachschlagewerken zu belegen!*

⑱ Zwei Aluminiumschienen besitzen die ursprüngliche Gesamtlänge $l_0 = 2$ m. Sie werden gemeinsam um 70 grd erwärmt. Danach ist die Längenänderung der einen Schiene 2 mm größer als die der anderen. Ermitteln Sie die ursprüngliche Länge (l_{01}, l_{02}) jeder Schiene!

Schmelztemperatur von Festkörpern

Die Schmelztemperatur eines Festkörpers ist ebenfalls weitgehend abhängig vom Bindungstyp, der in ihm vorliegt (↗ Chemische Bindung, S. 59).

Einfluß des Bindungstyps auf die Schmelztemperatur eines Festkörpers sowie auf die Bindungsenergie

Bindungstyp	Beispiel	Schmelztemperatur ϑ in °C	Bindungsenergie in cal/Teilchen
Ionenbeziehung	NaCl ZiF	+800 +870	$-15 \cdot 10^{-20}$ $-20 \cdot 10^{-20}$
Atombindung	Diamant SiC	+3600 +2700	$-28 \cdot 10^{-20}$ $-24 \cdot 10^{-20}$
Metallische Bindung	Mg Al Cu	+658 +660 +1083	
Van-der-Waalssche Bindung	Ar CH_4	−122 −183	$-1{,}8 \cdot 10^{-20}$ $-2{,}4 \cdot 10^{-20}$

Bei Metallkristallen liegt insbesondere eine Abhängigkeit der Schmelztemperatur von der Gitterkonstante und der Anzahl der Bindungselektronen vor.

Dichte von Festkörpern

Sie wird im wesentlichen durch zwei Größen beeinflußt:
von der Atom- oder Molekülmasse und von der Packungsdichte P (↗ S. 38).

● *Vergleichen Sie die Packungsdichten der Elementarzellen unterschiedlicher Gittertypen (↗ S. 38)!*

Bei Kristallen mit gleichem Gittertyp, beispielsweise bei Metallkristallen mit kubisch-flächenzentriertem Gitter, erkennt man eine Abhängigkeit der Dichte von der relativen Atommasse.

Dichten einiger Metallkristalle in Abhängigkeit von der relativen Atommasse

Metallkristall	Al	Fe	Cu	Pb
relative Atommasse	26,98	55,85	63,54	207,19
Dichte in g · cm^{-3}	2,72	7,86	8,43	11,43

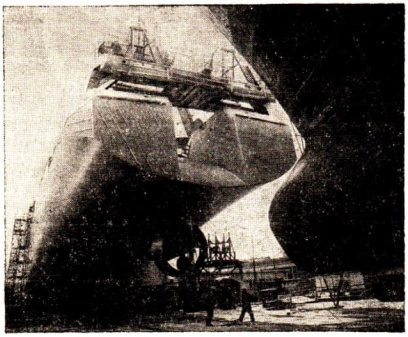
Die Dichte von Festkörpern liegt zwischen 0,50 g · cm^{-3} und 22,50 g · cm^{-3}. Für die verschiedenen Grenztypen von Kristallen ergeben sich folgende *Dichteintervalle.*

Grenztyp	Dichteintervall (Dichte in g · cm^{-3})	Beispiel (Dichte in g · cm^{-3})
Ionenkristall	$2{,}00 < \varrho < 4{,}00$	Na: 2,16
Atomkristall	$1{,}50 < \varrho < 5{,}00$	Diamant: 3,51
Metallkristall	$0{,}50 < \varrho < 22{,}50$	K: 0,86
Molekülkristall	$0{,}10 < \varrho < 2{,}00$	Butadien: 0,65

● *Vergleichen Sie das Dichteintervall der Molekülkristalle mit dem der anderen Kristalle! Versuchen Sie, Ihre Erkenntnis zu begründen!*

Zusammenfassung der Bindungstypen und einiger Eigenschaften von Festkörpern

Bindungstyp	Grenztyp des Festkörpers	Strukturbaustein	Einige Eigenschaften	Beispiel
Ionenbeziehung	Ionenkristall	Kationen und Anionen	Hart, spröde, hohe Schmelztemperatur	Natriumchlorid
Atombindung	Atomkristall	Atome	Hart, spröde, hohe Schmelztemperatur, nahezu unlöslich	Diamant
Metallische Bindung	Metallkristall	Metall-Atomrümpfe und Elektronengas	Hart, hohe Schmelztemperatur, verformbar, gute elektrische Leitfähigkeit	Aluminium
Van-der-Waalssche Bindung	Molekülkristall	Atome oder Moleküle	Weich, niedrige Schmelztemperatur, löslich	festes Kohlendioxid („Trockeneis")



6. Realkristalle

Bild 75/1 Helling im VEB Volkswerft Stralsund.
In den Montagehallen erfolgt der Zusammenbau von Stahlplatten und Stahlformteilen zu Baugruppen und Schiffssektionen. Diese werden dann auf der Helling zum Schiffskörper zusammengesetzt.

Die Werkstoffe für den Bau von Schiffskörpern müssen mechanisch hoch belastbar sein, denn im Fahrbetrieb wirken erhebliche Kräfte auf den Schiffskörper. Noch höheren Belastungen sind Turbinen, Hochdruckkessel, Schneidwerkzeuge ausgesetzt. Eigenschaften wie Festigkeit, Härte, Korrosionsbeständigkeit und Verformbarkeit sind unter anderen für den Einsatz von Werkstoffen entscheidend.
Solange die Wissenschaftler versuchten, als einzige Ursache der Festigkeit die Kräfte zwischen den Bausteinen der Idealkristalle zu sehen, wurden bei der Erklärung und Berechnung der Festigkeit keine zufriedenstellenden Ergebnisse erreicht: Zwischen den theoretisch errechneten Festigkeitswerten und den in der Praxis auftretenden gab es größere Abweichungen. Diese führten zu dem Schluß, daß nicht allein die Regelmäßigkeit im inneren Aufbau, sondern gerade „Unregelmäßigkeiten" für die Festigkeit verantwortlich sein könnten.
Welcher Art diese Unregelmäßigkeiten sind — sie werden Kristallfehler genannt — und wie sie zu beeinflussen und auszunutzen sind, das wird in den folgenden Abschnitten dargestellt.

Nulldimensionale Kristallfehler

In der Praxis entstehen bei der Kristallisation meist nicht die im Kapitel 3 behandelten idealen Kristallgitter. Es können sich Abweichungen vom regelmäßigen Gitterbau bilden, die man als Kristallfehler bezeichnet. Treten diese Fehler im Bereich einzelner „Gitterpunkte" (↗ S. 35) auf, so werden sie *nulldimensionale Fehler* oder *Punktfehler* genannt.

Man unterscheidet folgende Punktfehler (Bild 76/1):

1. Auf einem Gitterplatz fehlt ein Baustein (*Leerstelle*).
2. Auf einem Gitterplatz ist ein „fremder" Baustein angeordnet (*Fremdatom*).
3. Zwischen den Gitterpunkten ist ein Baustein angeordnet (*Zwischengitteratom*).

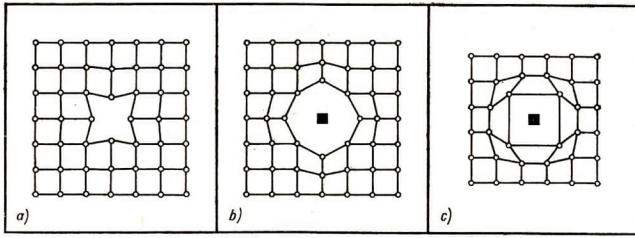


Bild 76/1 Schematische Darstellung verschiedener Punktfehler im Kristallgitter
a) Leerstelle, b) Fremdatom auf Gitterplatz (Substitutionsmischkristall), c) Fremdatom auf Zwischengitterplatz (Einlagerungsmischkristall)
In der Umgebung von Punktfehlern im Kristall treten Verzerrungen der Gitterstruktur auf. Die dabei entstehenden inneren Spannungen können die Eigenschaften der Festkörper beeinflussen.

Leerstellen können während des Kristallisationsprozesses durch äußere Einwirkungen wie folgt entstehen: Infolge der Wärmeenergie führen die Kristallbausteine Schwingungen um ihre Ruhelage aus (vgl. Podgornowa/Kondakow, Aus der Festkörperphysik. Volk und Wissen Berlin 1975, S. 82 und 105).
Durch Energiezufuhr, zum Beispiel durch Erwärmen, durch Bestrahlung mit Licht oder durch Beschuß mit Teilchen, kann die Schwingungsamplitude der Gitterbausteine so groß werden, daß die Kraft einzelner benachbarter Teilchen wegen der zu großen Entfernung nicht mehr wirksam ist. Dabei verläßt dann zumeist ein Atom oder Ion seinen Gitterplatz (Leerstelle) und lagert sich entweder zwischen den Gitterplätzen an (Zwischengitteratom), oder es wandert über mehrere andere Leerstellen an die Oberfläche des Kristalls. Im ersten Fall ist ein Paar von Gitterfehlern entstanden (Leerstelle und Zwischengitteratom), im zweiten Fall ist nur eine Leerstelle entstanden, und es ist dann an der Oberfläche ein zusätzliches Teilchen eingebaut. Fehler der ersten Art werden **Frenkel-Defekte**, die der zweiten Art **Schottky-Defekte** genannt (Bild 77/1).
In Festkörpern werden thermische und mechanische Eigenschaften durch Leerstellen beeinflußt. Die Anzahl der in einem Kristall entstehenden Leerstellen hängt von der Temperatur (Schwingungsamplitude) und von der Energie, die zum Herauslösen aus dem Gitterverband erforderlich ist, ab.
Durch Temperaturerhöhung vergrößert sich die Anzahl der Leerstellen. Wird zum Beispiel eine Metallegierung nach einer Temperaturerhöhung schnell abgekühlt (Abschrecken), so werden die Leerstellen im Kristallgefüge nicht wieder besetzt, sondern „eingefroren".
Auch bei der Kaltverformung von Metallen (Walzen, Ziehen) entstehen derartige Gitterfehler.
Solche Fehler können das Verschieben einzelner Kristallbereiche gegeneinander erschweren. Die Festigkeit des Metalls gegenüber Verformungskräften

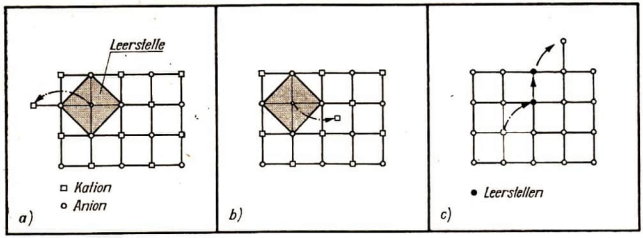


Bild 77/1 Die Ionen in einem Ionenkristall oder Metall sind — wie die Teilchen in allen Kristallen — regelmäßig auf Gitterplätzen angeordnet. Fehler entstehen: a) durch das Auftreten von Leerstellen (Schottkysche Fehlordnungen); b) durch Zwischengitterlonen (Frenkelsche Fehlordnungen); c) Übergang eines Gitterteilchens an die Oberfläche eines Kristalls. Das Teilchen bewegt sich über mehrere bereits ausgebildete Leerstellen zur Oberfläche

nimmt also zu. Auch die Bewegung von Elektronen innerhalb eines Metallgitters wird durch Leerstellen oder Zwischengitteratome behindert. Der elektrische Widerstand wird durch Leerstellen erhöht.

Fremdatome. Fremdatome in einem Kristallgitter (↗ S. 48) können zum Beispiel folgende Eigenschaften verändern:

— elektrische Leitfähigkeit von Halbleitern,
— mechanische Festigkeit von Werkstoffen,
— Schmelztemperatur von Werkstoffen.

Fremdatome gelangen in einen Halbleiterkristall in der Regel über Leerstellen oder Zwischengitterplätze. Dieser langsame Vorgang des Eindringens eines Stoffes in einen anderen Stoff wird als **Diffusion** bezeichnet. Er kann durch folgende Modellvorstellungen veranschaulicht werden:

1. Zwischengitteratome bewegen sich von Zwischengitterplatz zu Zwischengitterplatz. Die Energie, die sie auf Grund der Wärmeschwingungen besitzen, ermöglicht ihnen den Platzwechsel.
2. Einzelne Atome oder Ionen bewegen sich von einer Leerstelle zu einer anderen Leerstelle innerhalb des Kristalls, da die Einordnung auf Zwischengitterplätzen wegen des dafür erforderlichen höheren Energieaufwandes unwahrscheinlicher ist.

Die Aktivierungsenergie für eine Bewegung von Gitterbausteinen beträgt beispielsweise für Natrium-Ionen im Natriumchloridgitter 2 eV. Für Kupfer-Ionen im Kupfergitter hat sie bei Leerstellendiffusion den Wert von 2,5 eV und bei Zwischengitterdiffusion 5,5 eV.

● *Erklären Sie, warum die Aktivierungsenergie bei einer Zwischengitterdiffusion größer ist als bei einer Leerstellendiffusion!*

● *Bereiten Sie einen Vortrag zum Thema: „Die Diffusion in Festkörpern und ihre Anwendung" vor!*
Literatur:
A. A. Smirnow, Metallphysik. Akademie-Verlag Berlin 1974, S. 61; Podgornowa/Kondakow, Aus der Festkörperphysik.
Volkseigener Verlag Volk und Wissen Berlin 1975, S. 21; Löffler/Krogel, Diffusion in Festkörpern. In „Physik in der Schule" 12 (1974) 3, S. 106.

Durch den Einbau von Fremdatomen in einen Halbleiter (↗ Kapitel 8 und 9), das Dotieren, lassen sich dessen elektrische Parameter verändern.
Um metallische Werkstoffe mit ganz bestimmten thermischen oder mechanischen Eigenschaften herzustellen, wird die Eigenschaftsänderung beim Einbau von Fremdatomen in das Gitter ausgenutzt.
Es entstehen Verzerrungen mit inneren Spannungen, die das mechanische Verhalten beeinflussen (Bild 76/1).
Eine Mischkristallbildung kann dann eintreten, wenn sich die in einer Legierung zusammengefügten Metalle vollständig mischen lassen. Lagern sich die Atome zulegierter Stoffe auf Gitterplätzen des Metalls an, so entstehen Substitutionsmischkristalle. Bei einer Einlagerung der fremden Atome auf Zwischengitterplätzen heißen die Kristalle Einlagerungsmischkristalle (↗ S. 49 und Bild 76/1).
Bereits Zusätze geringer Mengen von Fremdatomen führen zu Eigenschaftsänderungen.

Einsatzhärten. Durch das Aufnehmen von Kohlenstoffatomen in das Kristallgitter des Eisens bei hohen Temperaturen läßt sich eine Härtung von Eisen beim Abschrecken erreichen; denn bei Abkühlung ändert sich die Gitterstruktur des Eisens (Übergang von γ-Eisen in α-Eisen), und Kohlenstoffatome werden aus dem Gitter ausgeschieden.
Beim Abschrecken können die Kohlenstoffatome aber infolge des schnellen Abkühlens nicht ausgeschieden werden, so daß im Kristallgitter Spannungen durch die eingebauten Fremdatome entstehen.

Vergüten. Für die Mischkristallbildung bei Legierungen (Vergüten) ist entscheidend, wie gut die Fremdatome sich bestimmten Gitterstrukturen anpassen.
So lösen sich im kubisch-flächenzentrierten Gitter (γ-Eisen) gut die Metalle Mangan, Nickel, Kobalt. Im kubisch-raumzentrierten Gitter (α-Eisen) lösen sich gut Chrom, Molybdän, Silizium, Vanadium.
Je nach der Menge der zulegierten Metalle werden Festigkeit, Temperaturbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit der Stähle verbessert.

● *Orientieren Sie sich über Vorgänge bei Phasenumwandlungen! Vergleichen Sie diese mit dem Auftreten der Polymorphie oder der Allotropie (↗ S. 34)! Benutzen Sie für die Anfertigung eines Exzerptes über Phasenumwandlungen: A. A. Smirnow, Metallphysik. Akademie-Verlag Berlin 1974, S. 64 bis 73.*

Anfertigen eines Exzerptes. In ihm wird eine möglichst wortgetreue Wiedergabe von Teilen eines Artikels oder Lehrbuchabschnittes vorgenommen. Sie erfolgt unter einem bestimmten Gesichtspunkt (hier Phasenumwandlung und Eigenschaft der Festkörper). Es kommt bei der wortgetreuen Wiedergabe darauf an, die Quelle genau anzugeben (Autor, Titel, Verlag, Erscheinungsjahr, Seite).

Beispiel:
A. A. Smirnow, Metallphysik. Akademie-Verlag Berlin 1974.

Phasenumwandlungen
Teilbereiche, die gleiche Eigenschaft besitzen, bilden Phasen S. 64
Durch Temperatur- und Druckänderung geht ein Festkörper aus einem Zustand in einen anderen über. S. 65 oben
Bei Temperatur T_0 können zwei Phasen im Gleichgewicht stehen. Bei ihr vollzieht sich der Phasenübergang → Phasenumwandlung S. 65
Phasenumwandlungen → Änderungen im Kristall:
Umwandlung von Kristallstruktur, der Konzentration von Legierungsbestandteilen, des Elektronensystems S. 65 mitte

Eindimensionale Gitterfehler

Wird ein Festkörper durch eine Kraft belastet, dann tritt eine Verformung ein. Diese kann so beschaffen sein, daß nach Beendigung der Krafteinwirkung die Gitterteilchen in ihre ursprüngliche Lage zurückkehren. Man bezeichnet diesen Vorgang als **elastische Verformung.**
Werden bei einer Verformung einzelne Bereiche oder Gitterteilchen so weit gegeneinander verschoben, daß nach Beendigung der Einwirkung keine Rückkehr in die ursprüngliche Lage möglich ist, so handelt es sich um eine **plastische Verformung** (↗ S. 17).

● *Informieren Sie sich über das Hookessche Gesetz in: W. Wolkenstein, Aufgaben zur Physik. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1975, S. 113!*
Lösen Sie die Aufgaben 2.5.21 bis 2.5.27!

Gleitebene. Typische Beispiele für plastische Verformungen sind das Walzen von Blechen und das Ziehen von Drähten. Für die Erklärung der plastischen Verformung kann von der Vorstellung ausgegangen werden, daß die Kristalle aus übereinandergelegten Netzebenen bestehen (↗ S. 80). Bei einer Krafteinwirkung können einzelne Kristallteile entlang dieser Netzebenen gegeneinander verschoben werden. Es tritt ein Gleitvorgang ein. Jene Netzebenen, auf denen der Gleitvorgang erfolgt, heißen Gleitebenen. Es sind häufig jene Netzebenen, die am dichtesten mit Kristallbausteinen besetzt sind. Damit ein Gleitvorgang möglich wird, müssen die Bindungen zwischen den Kristallbausteinen entlang der Gleitebene gelöst werden.

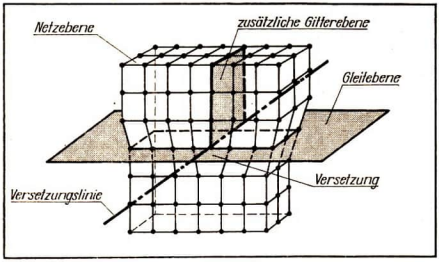


Bild 80/1 Versetzung innerhalb eines kubischen Gitters
Diese Versetzungen entstehen beim Kristallwachstum, wenn sich Netzebenen nicht vollständig ausbilden. Die Kante einer solchen Ebene im Kristall heißt Versetzungslinie.

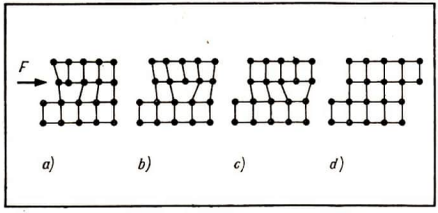


Bild 80/2 Gleitung durch Bewegung einer Versetzungslinie
a) Entstehung der Versetzung bei Krafteinwirkung
b), c) Wanderung der Versetzungslinie
d) Austritt der Versetzungslinie an der Oberfläche des Kristalls

Damit zum Beispiel ein Gleitvorgang im Metall Kadmium erfolgen kann, muß nach theoretischen Erwägungen eine äußere Kraft je Quadratmillimeter der Berührungsfläche von $1{,}9 \cdot 10^5$ p aufgewendet werden. Im Experiment zeigt sich aber, daß bereits $8 \cdot 10^1$ p ausreichen, um eine plastische Verformung einzuleiten. Dieser Unterschied zwischen dem berechneten und dem experimentellen Wert läßt sich **nicht** mit dem Modell der gleichzeitigen Verschiebung aller Kristallbausteine entlang der Gleitebene erklären. Bei einer plastischen Verformung sind lineare Kristallfehler beteiligt, sie heißen Versetzungen.
In unverformten Einkristallen können 10^6 bis 10^8 Versetzungslinien je Quadratzentimeter auftreten. Senkrecht zu diesen erfolgt dann bei Krafteinwirkung der Gleitvorgang. Dabei werden nicht alle Bindungen zwischen den Bausteinen der Gleitebene gleichzeitig gelöst. Es verschiebt sich die Versetzungslinie (Bild 80/2), so daß zu einem Zeitpunkt nur jeweils die Bindungen entlang dieser gelöst werden.
Versetzungen können nicht nur beim Kristallwachstum auftreten. Wird ein Metall verformt, so nimmt die Versetzungsdichte stark zu. Es bildet sich ein Netz von Versetzungen. Die Versetzungen behindern sich dann gegenseitig, so daß Gleitvorgänge stark erschwert werden. Diese Erscheinung wird als Verfestigung durch Kaltverformung bezeichnet. Sie wird in großem Umfang technisch genutzt.
Auch Punktdefekte (Leerstellen oder Zwischengitteratome) behindern die Wanderung von Versetzungen. An ihnen bleiben die Versetzungen „hängen".

● *Stellen Sie sich mit Hilfe von Seifenblasen ein Modell dichtester Kugelpackung her! Durch Einbau einiger größerer Seifenblasen entstehen in der sonst regelmäßigen Anordnung Versetzungen. Benutzen Sie die Hinweise von Thiele in „Physik in der Schule" 11 (1973) 1, S. 21.*

Um die Festigkeit von Werkstoffen zu erhöhen, sind neben anderen Verfahren die folgenden möglich:

1. Herstellung idealer Kristallgitter, die völlig frei von Versetzungen sind. Dieser Weg wird bei der Erzeugung von **Whiskern** eingeschlagen. Whisker sind fadenförmige Kristalle, die in ihrer Festigkeit dem Verhalten idealer Kristalle gleichkommen. Die obere Grenze für ihren Durchmesser wird häufig mit 0,025 nm angegeben.
Auffällig ist die hohe mechanische Festigkeit der Whisker.

Stoff	Streckgrenze in p/mm²	
	Whisker	Metallkristall
Silber	$1{,}8 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^2$
Eisen	$1{,}3 \cdot 10^6$	$4{,}5 \cdot 10^4$
Kupfer	$3{,}1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^3$
Zink	$3{,}9 \cdot 10^4$	40

Als Ursache für die große Festigkeit der Whiskerkristalle wird ihr versetzungsfreier Aufbau angesehen. Die Oberflächen von Whiskerkristallen sind außerordentlich glatt. Daher kann man auf ihnen die Bewegung magnetischer Elementarbereiche in Ferromagnetika gut sichtbar machen (↗ Kapitel 11).

2. Einbau möglichst vieler Störungen in Form von Versetzungslinien oder Leerstellen. Davon wird bei der **Kaltverfestigung** von Metallen Gebrauch gemacht. Während die Festigkeit von Kohlenstoffstahl bei 140 kp · mm^{-2} liegt, erhöht sich diese auf 370 kp · mm^{-2}, wenn sich die Anzahl der Versetzungen beim Bandziehen vergrößert.

● *Fertigen Sie eine Übersicht über Möglichkeiten zur Erhöhung von Festigkeit und Härte von Metallen an!*

Zweidimensionale Kristallfehler

Metalle und Legierungen bestehen aus vielen einzelnen Kristalliten, sind also polykristallin aufgebaut (↗ S. 9). Zwischen den Kristalliten bestehen Grenzflächen. Liegen zwischen den Netzebenen Versetzungen, so führt dies bei benachbarten Netzebenen zur Drehung um einen Winkel α (Bild 82/1). Ist dieser

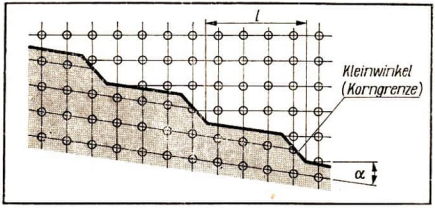


Bild 82/1 Aufbau einer Kleinwinkelkorngrenze aus Versetzungen
0: Drehwinkel *n*
l: Abstand der Versetzungen

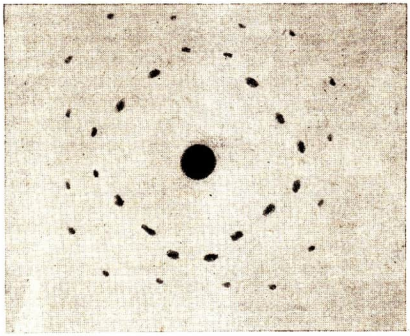
Winkel klein ($\alpha < 4°$), so entstehen aus den Versetzungen sogenannte Kleinwinkelkorngrenzen. Bei großem Winkel werden diese Großwinkelkorngrenzen genannt. Korngrenzen sind zweidimensionale Kristallfehler.
Die Großwinkelkorngrenzen können als Gleitebenen für die Kristallite dienen. Sie liegen aber bei Polykristallen nicht alle in Gleitrichtung. Zwischen den Korngrenzen und Versetzungen kommt es zu Behinderungen. Bei grobkörnigen Polykristallen ist ein derartiger Gleitprozeß eher zu erwarten, als bei feinkörnigen Substanzen. Viele Korngrenzen führen zu einer Verfestigung des Werkstoffes.
Die Korngröße beeinflußt den Widerstand von Metallen gegenüber Verformungen. Je kleiner die Kristallite, desto größer sind Festigkeit und Härte einer Metallegierung.
Korngrenzen lassen sich durch Ätzen einer geschliffenen Metalloberfläche sichtbar machen. An den Korngrenzen ist das Gitter bereits gestört. Bei der Einwirkung des Ätzmittels erfolgt hier eine schnellere Auflösung des Werkstoffes als an anderen Stellen der Metalloberfläche.

▼ Führen Sie eine Korngrenzenätzung an einem Kupferblech durch! Für die Vorbereitung des Bleches gelten die Hinweise auf S. 24. Zur Ätzung wird eine Lösung von 100 g Ammoniumpersulfat in 1000 cm^3 Wasser verwendet. Dieser Lösung werden 50 cm^3 einer dreiprozentigen Wasserstoffperoxidlösung zugesetzt. Die Einwirkzeit sollte 15 bis 30 s betragen. Danach wird das Blech mit Wasser abgespült und unter dem Mikroskop betrachtet.

Zusammenfassung

Die folgende Übersicht gibt eine Zusammenstellung von Kristallfehlern und deren wesentliche Einflüsse auf die Eigenschaften der Werkstoffe. In vielen Fällen wirken mehrere Fehler gleichzeitig (Festigkeit).

Kristallfehler	Einfluß auf folgende Eigenschaft	Anwendung
Nulldimensionale Fehler		
Leerstellen Fremdatome	elektrischer Widerstand el. Leitfähigkeit Festigkeit, Härte	} Halbleiter Oberflächenvergütung; Legierungen
Eindimensionale Fehler		
Versetzungen	Festigkeit plastische Verformbarkeit	{ Kaltwalzen { Drahtziehen
Zweidimensionale Fehler		
Kleinwinkelkorngrenze	Gleitvorgänge (Plastizität)	} Warmwalzen { Gießen
Großwinkelkorngrenze	Diffusionsvorgänge Anlagerung von Fremdatomen	



7. Röntgenfeinstrukturuntersuchungen

Bild 84/1 Laue-Diagramm. Max von Laue entdeckte 1912 die Interferenz von Röntgenstrahlen durch Beugung an Kristallgittern. Damit war der Wellencharakter von Röntgenstrahlung nachgewiesen worden. Aus dem Beugungsbild können Schlußfolgerungen auf Kristallstrukturen gezogen werden.

Treffen Wellen auf eine periodische Anordnung von Hindernissen, dann entstehen charakteristische Beugungserscheinungen, aus denen auf die Struktur der Anordnung geschlossen werden kann. Beispielsweise kann man aus dem Auftreten von schillernden Interferenzfarben bei Vogelfedern schließen, daß hier Strukturen mit typischen Abständen von tausendstel Millimetern vorliegen, die als optische Beugungsgitter wirken.
Da Röntgenstrahlung einen Wellenlängenbereich umfaßt, der in der Größenordnung der Gitterkonstanten von Kristallgittern liegt, müßten mit dieser Strahlung lichtähnliche Interferenzerscheinungen durch Beugung an Kristallen erzeugt werden können. Damit würden sich Möglichkeiten für das Ermitteln von Kristallstrukturen und -eigenschaften (z. B. Netzebenenabstand d, Gitterkonstante a) ergeben.

Röntgenstrahlen

● *Informieren Sie sich über die Erzeugung von Röntgenstrahlen im Lehrbuch Physik, Klasse 10, S. 145 ff.!*

Röntgenröhren dienen zum Erzeugen von Röntgenstrahlen (Bild 85/1).

Eine Röntgenröhre ist ein hochevakuierter Glaskolben, in dem sich eine Glühkatode und dieser gegenüber eine Anode (auch Antikatode genannt) befindet. Die Katode wird elektrisch bis zum Glühen erwärmt. Durch eine zylindrische Form der Glühkatode werden die austretenden Elektronen gebündelt. Beim Anlegen einer hohen Beschleunigungsspannung U ($10\ \text{kV} < U < 400\ \text{kV}$) zwischen Glühkatode und Anode werden die von der Glühkatode emittierten

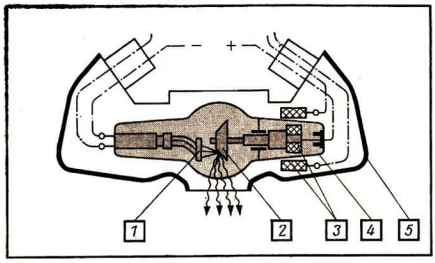


Bild 85/1 Aufbau einer Drehanoden-Röntgenröhre
1 — Hohlspiegelkatode
2 — scheibenförmige Drehanode
3 — Kurzschlußläufermotor
4 — Vakuumröhre
5 — strahlensicheres Gehäuse

Elektronen im elektrischen Feld stark beschleunigt. Sie erhalten eine kinetische Energie, die der Beschleunigungsspannung proportional ist:

$$W_{kin} \sim U .$$

Für ein Elektron erhält man:

$$W_{kin} = e \cdot U ,$$

$$W_{kin} = \frac{m_e}{2} \cdot v_e^2 , \qquad \boxed{\frac{m_e}{2} \cdot v_e^2 = e \cdot U}$$

● *Leiten Sie die obenstehende Gleichung her, indem Sie die Arbeit betrachten, die das elektrische Feld am Elektron verrichtet!*

Beim Auftreffen der Elektronen auf die abgeschrägte Anode entstehen Röntgenstrahlen, die durch den Glaskolben hindurchgehen können. Da die Anode dabei i. a. sehr stark erwärmt wird (↗ Röntgenbremsstrahlung, S. 86), kühlt man sie (z. B. Wasser, Öl).

Eigenschaften. Wie jede Erscheinung der Mikrowelt zeigen auch Röntgenstrahlen sowohl Welleneigenschaften als auch Eigenschaften mikrophysikalischer Teilchen. Im Vergleich mit Licht sind Röntgenstrahlen insbesondere durch eine kürzere Wellenlänge charakterisiert: $10\ nm > \lambda > 0{,}01\ nm$. Wegen $c = f \cdot \lambda$ haben sie damit eine höhere Frequenz f. Röntgenquanten (↗ S. 86) sind folglich auch energiereicher als Lichtquanten ($W = h \cdot f$).

● *Vergleichen Sie Wellenlängen von Röntgenstrahlen mit Gitterkonstanten von Kristallen!*

Beugung und *Interferenz* von Röntgenstrahlen sind ein Nachweis für Welleneigenschaften dieser elektromagnetischen Strahlung.

● *Erarbeiten Sie einen Kurzvortrag über die Eigenschaften von Röntgenstrahlen an Hand des Lehrbuches Physik, Klasse 10, S. 145 f.! Gehen Sie dabei auch auf die Notwendigkeit des Schutzes vor Röntgenstrahlen ein!*

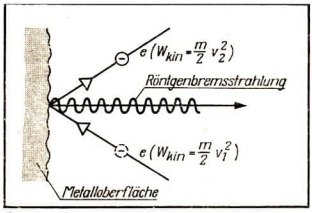


Bild 86/1 Emission von Röntgenbremsstrahlung beim Auftreffen eines Elektrons auf ein Schwermetall

Röntgenbremsstrahlung. Treffen Elektronen mit hoher kinetischer Energie ($W_{kin} > 10^4$ eV) auf Schwermetalle (z. B. Wolfram), so werden sie beim Eindringen in das Metall durch das elektrische Feld im Innern der Atome stark gebremst. Der größte Teil der durch den Elektronenstrom übertragenen Energie wird dabei in Wärmeenergie umgewandelt; ein geringer Teil der übertragenen Energie (weniger als 1 %) wird in Form elektromagnetischer Wellen abgestrahlt — *Röntgenbremsstrahlung*. Nach dieser Energieumwandlung an der Metalloberfläche bewegen sich die Elektronen mit verminderter Geschwindigkeit weiter (Bild 86/1).

Falls ein Elektron mit genügend hoher Geschwindigkeit $v_1 \left(W_{kin_1} = \frac{m_e}{2} \cdot v_1^2\right)$ in das Metall eindringt und dieses mit der Geschwindigkeit v_2 verläßt ($v_1 > v_2$), erhält man für die Energie eines Röntgenquants (↗ Quanteneigenschaften, S. 55): $W_R = \frac{m_e}{2} \cdot v_1^2 - \frac{m_e}{2} \cdot v_2^2$; mit $W_R = h \cdot f$ für ein Röntgenquant ergibt sich

$$h \cdot f = \frac{m_e}{2} \cdot (v_1^2 - v_2^2)$$

Dabei muß beachtet werden, daß die kinetische Energie bei dem betrachteten Elektron nur in Energie des Röntgenquants umgewandelt wird!

- *Informieren Sie sich über den Welle-Teilchen-Dualismus des Lichtes (insbesondere über seine Quanteneigenschaften), und übertragen Sie Ihre Kenntnisse auf Röntgenstrahlen (↗ Lehrbuch Physik, Klasse 11)!*

Die unterschiedlich starke Bremsung der Elektronen führt zu einem entsprechenden Energiebereich der Röntgenquanten. Man erhält ein *Röntgenbremsspektrum* (Bild 87/1). Dieses Spektrum ähnelt dem kontinuierlichen Spektrum des weißen Lichtes. Entsprechend dem Energiebereich dieser Röntgenstrahlung ergibt sich nach $W_R = h \cdot f$ und $c = f \cdot \lambda$ ein Frequenz- und Wellenlängenbereich für jeweils eine bestimmte Beschleunigungsspannung.

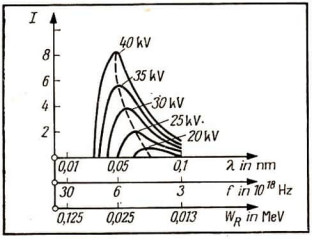


Bild 87/1 Intensitätsverteilung der Röntgenbremsstrahlung bei unterschiedlichen Beschleunigungsspannungen und bei Verwendung einer Wolfram-Anode; *I*: Intensität

Die Intensität in Abhängigkeit von der Wellenlänge der Strahlung bei einer bestimmten Spannung kann man mit Ionisationskammern ermitteln (↗ Zählrohr zum Nachweis von Elementarteilchen, Wissensspeicher Physik, S. 312). Die Stärke des Ionisationsstromes, der dann in der Kammer beim Einwirken der Röntgenquanten entsteht, ist ein Maß für die Intensität der Strahlung. Dabei kann die Kammer so eingerichtet werden, daß sie nur die Intensität I einer Strahlung genau bestimmter Wellenlänge registriert ($I = f(U)$, $\lambda = \text{konst.}$). Andererseits kann im Laue-Verfahren anstelle des Röntgenfilmes die Ionisationskammer eingesetzt werden ($I = f(\lambda)$ $U = \text{konst.}$). Der Kurvenverlauf zeigt für jeweils eine bestimmte Spannung an der Röntgenröhre ein Maximum der Intensität.

Bei wachsender Wellenlänge verlaufen die Intensitätskurven asymptotisch gegen Null, dagegen fallen sie bei abnehmender Wellenlänge steil ab und erreichen jeweils eine kritische Wellenlänge λ_{min}, die kurzwellige Grenze des jeweiligen kontinuierlichen Spektrums. Diese entspricht einer maximalen Energie der Röntgenquanten ($f \sim 1/\lambda$); bei der Abbremsung wird die kinetische Energie von Elektronen vollständig in Energie der Röntgenquanten umgewandelt. (Die langwelligeren Strahlen stammen von Elektronen, die nur einen Teil ihrer kinetischen Energie beim Abbremsen verloren haben.)
Man erhält für ein Elektron:

$$W_{kin} = W_R; \qquad \frac{m_e}{2} \cdot v_e^2 = h \cdot f;$$

mit $c = \lambda_{min} \cdot f$ ist $f = \frac{c}{\lambda_{min}}$ und damit $\frac{m_e}{2} \cdot v_e^2 = h \cdot \frac{c}{\lambda_{min}}$.

Andererseits ist die Abhängigkeit der kinetischen Energie eines Elektrons von der Spannung bekannt:

$$\frac{m_e}{2} \cdot v_e^2 = e \cdot U,$$

so daß man erhält:

$$e \cdot U = h \cdot \frac{c}{\lambda_{min}} \text{ und damit } \lambda_{min} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U}.$$

Mit dem Planckschen Wirkungsquantum h, der Lichtgeschwindigkeit c und der Elementarladung e als Naturkonstanten erhält man die Konstante

$$\frac{h \cdot c}{e} = 12{,}37 \cdot 10^{-7}\ \text{Vm}$$

und den allgemeinen Zusammenhang als

Duane-Huntsches Gesetz	$\lambda_{min} \cdot U = \text{konstant}$

Man erkennt daraus, daß die kleinste Wellenlänge der Röntgenbremsstrahlung nur von der Beschleunigungsspannung abhängt. Diese bestimmt die Energie der Röntgenquanten, die „Härte" der Röntgenstrahlung. Das Antikatodenmaterial hat darauf keinen Einfluß.

- *Begründen Sie die Verschiebung der Maxima der Intensitätskurven (Bild 87/1) beim Vergrößern der Spannung an der Röntgenröhre nach den kürzeren Wellenlängen hin!*
  Gehen Sie dabei von der Energie der Elektronen, der Röntgenquanten sowie von deren Häufigkeit aus!

⑲ Eine Röntgenröhre arbeitet bei einer Gleichspannung $U = 400$ kV. Wie groß ist die kritische Wellenlänge λ_{min} der erzeugten Röntgenstrahlung?

Mit Hilfe des Duane-Huntschen Gesetzes lassen sich Naturkonstanten (z. B. die elektrische Elementarladung e) sehr genau bestimmen.

- *Entwickeln Sie eine Variante, wie man prinzipiell das Plancksche Wirkungsquantum h auf der Grundlage des Röntgenbremsspektrums ermitteln könnte!*

Charakteristische Röntgenstrahlung. Die kinetische Energie der Elektronen ist der Beschleunigungsspannung U proportional (↗ S. 85). Übersteigt die Beschleunigungsspannung für die Elektronen einen bestimmten Grenzwert, der vom jeweiligen Metall abhängt (z. B. Rhodium: $U > 30$ kV; Wolfram: $U > > 70$ kV), so kann es zur Wechselwirkung dieser Elektronen mit kernnahen Elektronen der Metallatome kommen. Dabei werden kernnahe Elektronen auf höhere Energieniveaus gehoben. Das kernnahe Niveau wird sofort wieder durch Elektronen aus höheren Niveaus aufgefüllt. Die Energiedifferenz zwischen den entsprechenden Niveaus wird bei diesem Prozeß wieder als Röntgenstrahlung abgestrahlt.
Auf Grund ihrer Entstehung weist diese Strahlung ganz bestimmte Energien und damit Frequenzen bzw. Wellenlängen auf, die für das verwendete Metall charakteristisch sind. Man bezeichnet diese Strahlung daher im Unterschied zur Röntgenbremsstrahlung als *charakteristische Röntgenstrahlung*. Es ergibt sich das im Bild 89/1 dargestellte *charakteristische Röntgenstrahlungsspektrum* (einschließlich dem Röntgenbremsspektrum). Dieses Spektrum ähnelt einem optischen Linienspektrum (einschließlich dem kontinuierlichen Spektrum des weißen Lichtes).

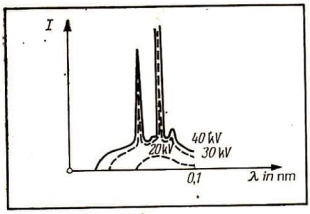


Bild 89/1 Übergang vom Röntgenbremsstrahlungsspektrum (gestrichelte Linie) zum charakteristischen Röntgenstrahlungsspektrum; K-Serie, Anodenmaterial: Rhodium

- *Überlegen Sie, wie man die Energie von Lichtquanten, die im Inneren der Atome entstehen, ermitteln kann (↗ Wissensspeicher Physik, S. 280 ff.)! Gehen Sie dabei vom Energieniveauschema eines bestimmten Elements aus!*

Der Grenzwert der Beschleunigungsspannung und damit die Grenzenergie der Elektronen hängen ab von der jeweiligen Bindungsenergie der Elektronen in den kernnahen Energieniveaus der Atome (↗ S. 62).

- *Vergleichen Sie die Entstehung des Lichtes mit der Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung! Arbeiten Sie Gemeinsamkeiten und Unterschiede heraus! (Lehrbuch Physik, Klasse 10, S. 116 ff.)*

Die Röntgenlinien, die dem Übergang von Elektronen auf ein und dasselbe Energieniveau zuzuordnen sind, faßt man wie bei optischen Linienspektren zu einer *Serie* zusammen (K-Serie, L-Serie usw.).

- *Informieren Sie sich über die Darstellung der Terme und Energieniveaus eines Wasserstoffatoms im Lehrbuch Physik, Klasse 11, S. 53 ff.!*
- *Erklären Sie die Entstehung von kontinuierlichen Spektren und Linienspektren beim Licht!*
- *Wodurch unterscheiden sich die Röntgenlinien- von optischen Linienspektren?*

Braggsches Gesetz

1912 konnten M. von Laue, W. Friedrich und P. Knipping Welleneigenschaften von Röntgenstrahlen durch Beugung und Interferenz an Kristallen nachweisen. Damit war zugleich eine grundlegende Methode für Strukturuntersuchungen an Festkörpern gefunden worden.
W. Bragg gelang 1913 eine mathematische Darstellung der Röntgenbeugung am räumlichen Gitter der Kristalle, indem er die Beugung von Röntgenstrahlen am Kristallgitter als Reflexion dieser Strahlen an Netzebenen des Gitters (↗ S. 31) auffaßte.

● *Erläutern Sie in einem Kurzvortrag die Beugung des Lichtes am Gitter! (Lehrbuch Physik, Klasse 11, S. 14 ff.)*

Treffen Röntgenstrahlen auf einen Kristall, so werden sie an den Gitterbausteinen gebeugt. Durch geeignete Wahl von Netzebenen läßt sich diese Beugung einfacher als Reflexion der Röntgenstrahlen an den Netzebenen des Gitters darstellen. An Hand des Bildes 91/1 soll die gesetzmäßige Beziehung für das Auftreten von Interferenzmaxima hergeleitet werden.
Ein paralleles Röntgenstrahlbündel einheitlicher Wellenlänge λ (modellhaft vereinfacht zu zwei Strahlen S_1 und S_2) trifft unter einem Winkel $\vartheta < 45°$ auf Netzebenen auf. Dabei wird S_1 an E_1 (in A_1) und S_2 an E_2 (in B) reflektiert. (Die Reflexion von S_2 an E_1 bleibt hier unberücksichtigt.) Der Gangunterschied $\Delta\lambda$ zwischen beiden Strahlen beträgt

$$\Delta\lambda = \overline{BA_1} - \overline{BN}\,.$$

Da

$$\Delta BA_2A_1 = \Delta BA_3A_2\,,$$

gilt

$$\overline{BA_1} = \overline{BA_3}\,,$$

also

$$\Delta\lambda = \overline{BA_3} - \overline{BN} \text{ oder}$$
$$\Delta\lambda = \overline{NA_3}\,.$$

Im Dreieck NA_3A_1 erhält man $\cos(90° - \vartheta) = \dfrac{\overline{NA_3}}{\overline{A_1A_3}}$

und damit durch Einsetzen von $\overline{NA_3}$

$$\Delta\lambda = \overline{A_1A_3} \cdot \cos(90° - \vartheta) \text{ oder}$$
$$\Delta\lambda = \overline{A_1A_3} \cdot \sin\vartheta\,.$$

Es ist aber

$$\overline{A_1A_3} = 2d$$

und damit

$$\Delta\lambda = 2d \cdot \sin\vartheta\,.$$

Interferenzmaxima treten aber nur auf, wenn der Gangunterschied $\Delta\lambda$ ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge ist:

$$\Delta\lambda = n \cdot \lambda\,.$$

Damit ergibt sich das

Braggsche Gesetz:

Bedingung für Interferenzmaxima bei der Beugung von Röntgenstrahlen an Kristallen	$\boldsymbol{n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin\vartheta}$

ϑ nennt man Reflexions- oder Glanzwinkel.

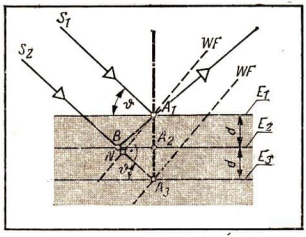


Bild 91/1 Reflexion von Röntgenstrahlen an Netzebenen eines Kristallgitters;
E_1, E_2, E_3: Netzebenen
d: Netzebenenabstand
WF: Wellenfronten

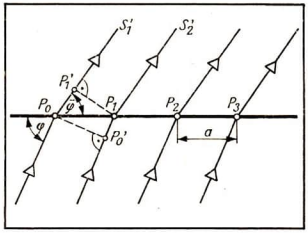


Bild 91/2 Beugung von Röntgenstrahlen am Strichgitter;
a: Gitterkonstante

● *Erörtern Sie die beiden Varianten, nach denen bei vorgegebenem Kristall mit dem Netzebenenabstand d diese Bedingung für Interferenzmaxima erfüllt werden kann!*

Man beachte, daß diese Betrachtung der Reflexion von Röntgenstrahlen nicht der Betrachtung der Reflexion von Licht gleichzusetzen ist. Das sieht man schon daran, daß bei der „Reflexion" von Röntgenstrahlen nur für eine bestimmte Wellenlänge und dem dazugehörigen Glanzwinkel ein gebeugter Strahl zu beobachten ist.

⑳ Wie groß muß der Glanzwinkel ϑ sein, falls bei Beugung von Röntgenstrahlen mit der Wellenlänge $\lambda = 0{,}179$ nm an einem Kristall mit der Gitterkonstanten $a = 0{,}587$ nm Interferenzmaxima 1. und 2. Ordnung beobachtet werden sollen?
(Es soll für diesen Kristall $a = d$ gelten!)

Laue-Gleichungen

Eine gleichwertige, andere Deutung der Beugung von Röntgenstrahlen gelang M. von Laue. Er betrachtete die Beugung von Röntgenstrahlen am Kristallgitter analog der Beugung des Lichtes am optischen Raumgitter. Im Experiment wird ein feststehender Einkristall mit Röntgenstrahlen eines bestimmten Wellenlängenbereiches bestrahlt (↗ Röntgenbremsstrahlung, S. 86).
Die an Kristallgitterpunkten gebeugten Strahlen interferieren und ergeben entsprechende Beugungsbilder (↗ Laue-Verfahren, S. 93).
Eine gedankliche Zerlegung des Raumgitters von Kristallen führt dabei über Flächengitter zum (eindimensionalen) Strichgitter (Bild 91/2), in dem die Kristallgitterpunkte P_1, P_2, ... P_n längs einer Geraden angeordnet sind.

Mit Hilfe dieses Strichgitters kann man nun die Bedingungen für Interferenzmaxima bei Beugung von Röntgenstrahlen wiederum herleiten und auf das Raumgitter erweitern.

Zum Ermitteln des Gangunterschiedes zweier benachbarter, gebeugter Strahlen S_1' und S_2' muß zunächst beachtet werden, daß $\overline{P_0P_0'} \perp \overline{P_0'P_1}$ und ebenso $\overline{P_1P_1'} \perp \overline{P_0P_1'}$ gilt.

Der Gangunterschied $\Delta\lambda$ beträgt nun:

$$\Delta\lambda = \overline{P_0P_1'} - \overline{P_0'P_1}\,.$$

Weiterhin gilt im Dreieck $P_0P_0'P_1$:

$$\cos\varphi = \frac{\overline{P_0'P_1}}{a}\,.$$

also

$$\overline{P_0'P_1} = a \cdot \cos\varphi\,.$$

Entsprechend im Dreieck

$$P_0P_1P_1' : \overline{P_0P_1'} = a \cdot \cos\bar{\varphi}\,.$$

Somit erhält man

$$\overline{P_0P_1'} - \overline{P_0'P_1} = a \cdot (\cos\bar{\varphi} - \cos\varphi)$$

und schließlich

$$\Delta\lambda = a \cdot (\cos\bar{\varphi} - \cos\varphi)\,.$$

Wiederum gilt für die Interferenzmaxima

$$\Delta\lambda = n \cdot \lambda\,,$$

also

$$n \cdot \lambda = a \cdot (\cos\bar{\varphi} - \cos\varphi)\,.$$

Beim Übergang zum Raumgitter erhält man die **Laue-Gleichungen:**

$$\begin{aligned} h \cdot \lambda &= a \cdot (\cos\bar{\varphi}_a - \cos\varphi_a) \\ k \cdot \lambda &= b \cdot (\cos\bar{\varphi}_b - \cos\varphi_b) \\ l \cdot \lambda &= c \cdot (\cos\bar{\varphi}_c - \cos\varphi_c) \end{aligned}$$

Sie stellen drei analoge Gleichungen dar, wobei n in a-, b- und c-Richtung des Kristalls durch die ganzen Zahlen h, k und l ausgedrückt wird.

φ_a, φ_b, φ_c: Winkel, die das einfallende Strahlenbündel jeweils mit den Gittervektoren $\vec{a}$, $\vec{b}$, und $\vec{c}$ bildet.
$\bar{\varphi}_a$, $\bar{\varphi}_b$, $\bar{\varphi}_c$: entsprechende Winkel für die gebeugten Strahlenbündel

Röntgenstrahlen mit Wellenlängen, für die die Laue-Gleichungen erfüllt sind, interferieren und ergeben im Laue-Diagramm (↗ S. 84) „Interferenzflecken". Es kann mathematisch nachgewiesen werden, daß jeder „Fleck" im Laue-Diagramm ein Interferenzmaximum derjenigen Röntgenstrahlen darstellt, die

an einer bestimmten Schar von Netzebenen im Kristallgitter „reflektiert" worden sind (↗ Braggsches Gesetz, S. 90). Diesbezüglich ist das Laue-Verfahren dem Bragg-Verfahren (↗ S. 94) äquivalent. Beide Verfahren unterscheiden sich jedoch im experimentellen Vorgehen zum Erfüllen der Bedingungen für Interferenzmaxima und der damit verbundenen Deutung.

Experimentelle Verfahren

Mit der Entdeckung der Röntgenstrahlen und ihrer Eigenschaften waren zwei grundlegende, experimentelle Methoden erschlossen worden, mit denen die Struktur von Festkörpern (aber auch von Flüssigkeiten und Gasen) untersucht werden kann.

Röntgenstrukturanalyse	Röntgenfeinstrukturuntersuchung
Aus dem charakteristischen Röntgenstrahlungsspektrum (↗ S. 88) werden Rückschlüsse auf die qualitative oder/und quantitative Zusammensetzung von Stoffen gezogen.	Aus Beugungsbildern werden Rückschlüsse auf die Struktur der verwendeten Kristalle gezogen (↗ Kristallstrukturen, S. 40).
Analyse der chemischen Struktur von Penizillin	Ermitteln des Netzebenenabstandes bei Natriumchloridkristallen

Die in der Übersicht verwendeten Begriffe für Untersuchungsmethoden werden in der Literatur in unterschiedlicher Weise verwendet.

Darüber hinaus sind durch das Braggsche Gesetz Möglichkeiten gegeben, Röntgenstrahlung genau bestimmter Wellenlänge zu erzeugen.
Für Röntgenfeinstrukturuntersuchungen wurden im wesentlichen folgende Verfahren entwickelt:

- Laue-Verfahren;
- Bragg-Verfahren oder Drehkristallverfahren;
- Debye-Scherrer-Verfahren oder Pulververfahren.

Laue-Verfahren. Ein feststehender Einkristall (φ = konst.) wird mit Röntgenbremsstrahlung (Primärstrahl) bestrahlt (Bild 94/1).
Beim Durchgang der Röntgenstrahlen durch den Einkristall werden sie an den Gitterpunkten gebeugt.
Der Einkristall „sucht" sich aus der Bremsstrahlung Strahlen derjenigen Wellenlänge heraus, für die die Laue-Gleichungen (↗ S. 92) erfüllt sind.
Die gebeugten Strahlen interferieren und ergeben auf einem Röntgenfilm ein flächenhaftes Beugungsbild — es wird als *Laue-Diagramm* (Bild 94/1 b) bezeichnet.

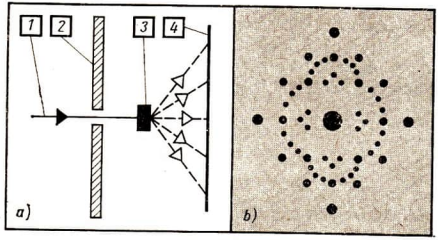


Bild 94/1
a) Prinzipieller Aufbau einer Laue-Apparatur:
1 — Primärstrahl
2 — Blende
3 — Einkristall
4 — Röntgenfilm
b) Laue-Diagramm

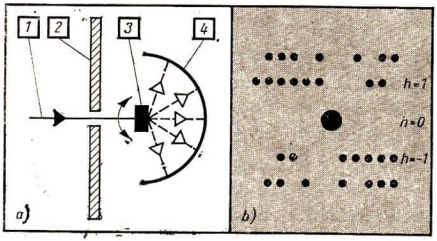


Bild 94/2 a) Prinzipieller Aufbau einer Drehkristallapparatur:
1 — Primärstrahl
2 — Blende
3 — Drehkristall
4 — Röntgenfilm
b) Beugungsbild nach dem Drehkristallverfahren

Das Laue-Diagramm ist eine Widerspiegelung der im Gitter des Einkristalls vorhandenen Symmetrieeigenschaften. Die Interferenzmaxima entsprechen bestimmten Wellenlängen (↗ Laue-Gleichungen, S. 92).

Der Fleck in der Mitte des Laue-Diagramms — ebenso in den folgenden Diagrammen — entsteht durch den ungebeugt hindurchgehenden Teil der Primärstrahlung.

Die Lage der „Interferenzflecken" im Laue-Diagramm hängt von der Form der Elementarzelle (↗ S. 36), von der Symmetrie des Einkristalls und seiner „Orientierung" zum Primärstrahl ab.
Aus dem Laue-Diagramm kann man hauptsächlich auf Kristallsymmetrien sowie auf Kristallstrukturfehler (↗ S. 75 ff.) schließen.

Bragg-Verfahren (Drehkristallverfahren). Bei diesem Verfahren wird im Unterschied zum Laue-Verfahren der Einkristall gedreht (Änderung des Glanzwinkels ϑ, ↗ Braggsches Gesetz, S. 90) und mit einer genau bestimmten Wellenlänge der Röntgenstrahlung gearbeitet (Bild 94/2a).
Bei bestimmten Glanzwinkeln wird die Bedingung für Interferenzmaxima erfüllt. Auf einem kreisförmig angeordneten Röntgenfilm erhält man das Beugungsbild (Bild 94/2b). Alle „Reflexe", die zu einem bestimmten Glanzwinkel gehören, liegen auf einer Linie — *Schichtlinie*. Die Schichtlinie für $h = 0$ geht durch den Primärstrahlfleck auf dem Film.

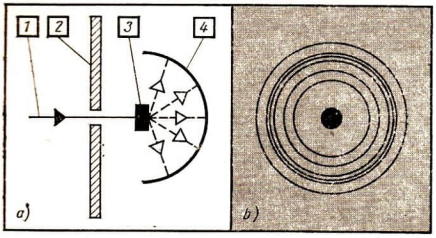


Bild 95/1 a) Prinzipieller Aufbau einer Debye-Scherrer-Apparatur:
1 — Primärstrahl
2 — Blende
3 — Kristallpulver
4 — Röntgenfilm
b) Beugung nach dem Debye-Scherrer-Verfahren

Weitere Schichtlinien liegen jeweils symmetrisch zur nullten „Schichtlinie" ($h = 1$ und $h = -1$ usw.).
Aus dem Schichtlinienabstand und dem Abstand Kristall—Film kann mit Hilfe der Laue-Gleichungen die Gitterkonstante a berechnet werden. Umgekehrt ist es möglich, bei bekannter Gitterkonstante a die entsprechende Wellenlänge der Röntgenstrahlung zu berechnen.

Debye-Scherrer-Verfahren. Bei diesem Verfahren wird — wie beim Drehkristallverfahren — Röntgenstrahlung genau bestimmter Wellenlänge verwendet. Die Änderung des Glanzwinkels erreicht man durch Einsatz von Kristallpulver (Bild 95/1 a).
Die Kristalle sind im Pulver regellos verteilt. Dabei sind einige stets so angeordnet, daß bei ihnen — bezüglich der einfallenden Röntgenstrahlen — gerade der Glanzwinkel auftritt, also die Interferenzbedingung erfüllt ist. Da viele Kristallite vorhanden sind, die unter dem Glanzwinkel zum Strahl liegen, nur um den Strahl als Achse gedreht, entstehen im Beugungsbild (Bild 95/1 b) als Interferenzmaxima Kreise.

Bedeutung der Röntgenstrahlen für die Bestimmung von Naturkonstanten

● *Informieren Sie sich im Tafelwerk über physikalische Naturkonstanten!*

Eine genaue Bestimmung von Naturkonstanten ist für das quantitative Erfassen der Gesetzmäßigkeiten in der Natur von großer Bedeutung. Bei der Widerspiegelung allgemeingültiger, notwendiger und wesentlicher Zusammenhänge in der Natur treten diese Konstanten in physikalischen Gesetzen auf.

● *Stellen Sie einige wesentliche physikalische Gesetze zusammen, in denen folgende Naturkonstanten vorkommen: Planckssches Wirkungsquantum h, Lichtgeschwindigkeit c, Gravitationskonstante γ!*

Mit Röntgenstrahlen, deren Beugung und Interferenz, ist eine sehr genaue Bestimmung von Naturkonstanten über Größen des atomaren Bereiches möglich. Die Genauigkeit, mit der die Naturkonstanten bestimmt werden können, hängt dann nur noch von der Qualität der Meßgeräte und der Auswertung der gemessenen Werte ab.

Am Beispiel soll ein prinzipieller Weg zum Bestimmen der Loschmidtschen Konstante N_L und der Faradayschen Konstante F aufgezeigt werden.

Durch das Braggsche Gesetz (↗ S. 90) ist beispielsweise eine grundlegende Möglichkeit gegeben, bei genau bestimmter Wellenlänge λ und dem dazugehörigen Glanzwinkel ϑ für „Reflexe" erster Ordnung ($n = 1$) den Netzebenenabstand d eines Kristalls zu ermitteln.

Man erhält für einen NaCl-Kristall $d = 0{,}2814$ nm. Ein Mol Natriumchlorid mit der molaren Masse M besitzt N_L Moleküle Na^+Cl^-. Die Anzahl der Ionen im Mol beträgt daher $2N_L$. Die Elementarzelle (↗ S. 36) des NaCl-Kristalls hat das Volumen

$$V_E = d^3 ,$$

wobei die Ecken der Elementarzelle mit Natrium- und Chlorid-Ionen besetzt sind. Somit erhält man für das Volumen eines Mols mit $2N_L$ Ionen:

$$V_m = 2N_L \cdot d^3 .$$

Bekanntlich gilt:

$$\varrho = \frac{M}{V_m}$$

also ist

$$V_m = \frac{M}{\varrho}$$

oder mit $V_m = 2N_L \cdot d^3$

$$2N_L \cdot d^3 = \frac{M}{\varrho}$$

und schließlich

$$N_L = \frac{M}{2d^3 \cdot \varrho} .$$

Zwischen der Elementarladung e, der Faradayschen Konstante F und der Loschmidtschen Konstante N_L besteht der Zusammenhang:

$$F = e \cdot N_L .$$

Ist e beispielsweise im Millikan-Versuch (↗ Lehrbuch Physik, Klasse 12, S. 54) hinreichend genau bestimmt worden, so erhält man mit der Loschmidtschen Konstante N_L die Faradaysche Konstante F.

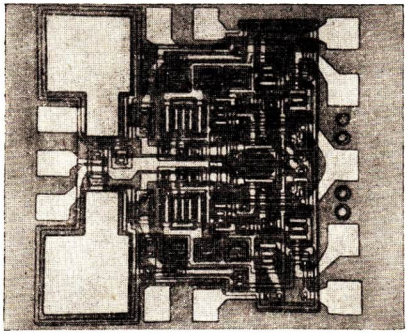
● *Berechnen Sie die Loschmidtsche Konstante N_L und die Faradaysche Konstante F mit dem angegebenen Wert für d_{NaCl} und den übrigen Werten aus Nachschlagewerken! Vergleichen Sie die Ergebnisse mit den Werten, die im Tafelwerk für diese Konstanten angegeben sind!*

Zusammenfassung

Röntgenstrahlung ist elektromagnetische Strahlung mit einem Bereich von Wellenlängen, der dem Bereich der Gitterkonstanten von Kristallen entspricht. Daher werden Röntgenstrahlen am Kristallgitter gebeugt und interferieren. Aus den Beugungsbildern kann man auf Struktur und Eigenschaften von Kristallen schließen bzw. bestimmte Kristallparameter berechnen.
Die grundlegende Bedingung für das Auftreten von Interferenzmaxima ist im Braggschen Gesetz erfaßt. Damit sind auch Möglichkeiten zum Bestimmen von Naturkonstanten im atomaren Bereich gegeben.

Überblick über experimentelle Verfahren zur Röntgenfeinstrukturuntersuchung

Verfahren	Laue-Verfahren	Bragg-Verfahren (Drehkristall-verfahren)	Debye-Scherrer-Verfahren
Untersuchungs-objekt	Einkristalle	Einkristalle	Polykristalle (Kristallite)
Prinzip	Objekt steht fest; Röntgenbrems-strahlung	Objekt wird gedreht; Röntgenstrahlung genau bestimmter Wellenlänge	Objekt steht fest; Röntgenstrahlung genau bestimmter Wellenlänge
Auswertungs-möglichkeit	Symmetrie-bestimmung	Bestimmung von Gitterkonstanten oder von Wellen-längen bei bekannter Gitterkonstante	Bestimmung von Gitterkonstanten



8. Elektronenleitung in Festkörpern

Bild 98/1 Für die vielfältigen Aufgaben der Steuerung, Regelung und Informationsverarbeitung, wie sie z. B. in Flugzeugen, Raketen und automatischen Produktionsanlagen auftreten, werden integrierte Schaltungen wegen ihrer geringen Masse und ihres kleinen Volumens eingesetzt.

Welche physikalischen Erscheinungen werden in integrierten Schaltungen genutzt? Durch das Dotieren von Halbleitern kann man die elektrischen Eigenschaften winziger Kristallbereiche so verändern, daß sich Bauelemente mit bestimmten, geforderten Eigenschaften ergeben. Eine besondere Bedeutung kommt bei Halbleiterdioden und Transistoren den Grenzschichten zwischen diesen winzigen Bereichen (pn- und pnp-Übergänge) zu.
Es sind deshalb vor allem die elektrischen Leitungsvorgänge in Grenzschichten zu untersuchen, um Erkenntnisse über die Eigenschaften von Halbleiterdioden und Transistoren zu gewinnen.

Leiter, Halbleiter und Isolator

Es ist eine auffällige Tatsache, daß die Eigenschaft, den elektrischen Strom zu leiten, in der Natur sehr ungleichmäßig verteilt ist. So unterscheidet sich z. B. die elektrische Leitfähigkeit $\varkappa$ von Bernstein und Kupfer um den Faktor 10^{20}. Zwischen der elektrischen Leitfähigkeit $\varkappa$ und dem spezifischen elektrischen Widerstand ϱ besteht folgende Beziehung:

$$\varkappa = \frac{1}{\varrho}.$$

Der Widerstand R eines Drahtstückes hängt bekanntlich von der Länge und dem Querschnitt des Drahtes ab:

$$R = \varrho \frac{l}{A}.$$

Dabei ist zu beachten, daß ϱ eine temperaturabhängige Stoffeigenschaft ist.

- *Leiten Sie die Einheit des spezifischen elektrischen Widerstandes aus der Gleichung für R ab! Nennen Sie weitere gebräuchliche Einheiten für ϱ!*
- *Erarbeiten Sie eine Schrittfolge, wie das Widerstandsgesetz experimentell gewonnen werden kann!*

Sind die Abmessungen eines Leiters (Länge und Querschnitt) und der Stoff, aus dem er besteht, bekannt, dann kann sein Widerstand aus diesen geometrischen Größen berechnet werden, ohne daß die elektrischen Größen Spannung und Stromstärke zuvor gemessen werden müssen.

㉑ Zur Herstellung einer Leitung wurden 400 m Kupferdraht von 6 mm² Querschnitt verwendet. Welchen Widerstand hat diese Leitung?

Umgekehrt kann über Spannungs- und Stromstärkemessung und bei Kenntnis der Abmessungen des Leiters sein spezifischer elektrischer Widerstand ermittelt werden.

㉒ Wie groß ist der spezifische elektrische Widerstand eines Leiters von 6 mm² Querschnitt, wenn bei einer Leiterlänge $l = 500$ m und einer angelegten Spannung von 14 V eine Stromstärke von 6 A gemessen wird?

㉓ Eine Leitung aus Kupferdraht hat bei einem Querschnitt von 0,1 mm² eine Masse von 0,3 kg. Berechnen Sie den elektrischen Widerstand dieses Leiters!

Je nach dem Betrag des spezifischen elektrischen Widerstandes unterteilt man die Stoffe in Leiter, Halbleiter und Isolatoren.

- *Wie groß sind die Beträge der spezifischen elektrischen Widerstände von metallischen Leitern, Halbleitern und Isolatoren? Schlagen Sie im Tafelwerk nach!*
- *Ordnen Sie die nachfolgend aufgezählten Stoffe ohne Benutzung von Tabellen in der Reihenfolge ihrer Leitfähigkeit:*
  Eisen, Erdboden, Marmor, Wasser, Aluminium, PVC, Wolfram, Glas, Bernstein und Kupfer.
  Überprüfen Sie Ihre Vermutungen anhand eines Nachschlagewerkes! Entwerfen Sie eine Versuchsanordnung, die zu entscheiden gestattet, ob ein Stoff ein guter Leiter ist oder nicht!

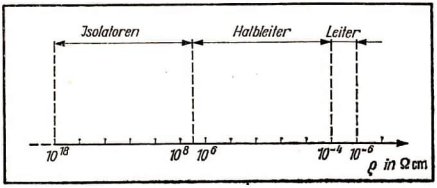


Bild 99/1 Spezifische elektrische Widerstände von metallischen Leitern, Halbleitern und Isolatoren bei Normaltemperatur

Wesentliche Merkmale der Leitungsvorgänge in metallischen Leitern und Halbleitern können mit Hilfe des allgemeinen Modells des elektrischen Leitungsvorganges erklärt werden.

● *Geben Sie mit eigenen Worten den Inhalt des allgemeinen Modells des elektrischen Leitungsvorgangs wieder (↗ Wissensspeicher Physik S. 222)!*

Leitungsvorgang in metallischen Leitern

Bild 100/1 stellt den Aufbau eines metallischen Leiters im Modell dar. Beim Anlegen eines elektrischen Feldes bewegen sich die im Metallgitter vorhandenen frei beweglichen Elektronen zum positiven Pol. Bei Energiezufuhr (Wärme) wird das Gitter zu stärkeren Schwingungen angeregt, die die Bewegung der Elektronen behindern. Folglich wird der elektrische Widerstand in der Regel größer (Bild 100/2).

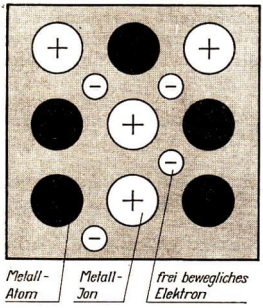


Bild 100/1 Modell eines metallischen Leiters

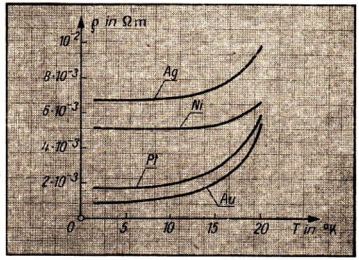


Bild 100/2 Abhängigkeit des Widerstandes metallischer Leiter von der Temperatur

Leitungsvorgang in Halbleitern

Reine Halbleiter verhalten sich bei $T = 0°$ K wie Isolatoren. Alle Elektronen sind an Atome gebunden. Durch Energiezufuhr können Elektronen innerhalb des Kristalls in einen Zustand freier Beweglichkeit überführt werden. Sie hinterlassen dabei an dem Atom, von dem sie sich gelöst haben, einen Raumbereich positiver Ladung. Dieser verhält sich so wie ein positiv geladenes Elektron und wird deshalb als Defektelektron bezeichnet. Dieses ist frei beweglich.

Beim Anlegen eines Feldes übernehmen Elektronen und Defektelektronen die elektrische Leitung. Bei Energiezufuhr (Wärme) nimmt die Anzahl der frei beweglichen Elektronen zu; der elektrische Widerstand wird kleiner (Bild 101/2). Diese Art der Leitung in Halbleitern wird als Eigenleitung bezeichnet. Auf eine zweite Art der Leitung in Halbleitern, die Störstellenleitung wird auf S. 106 ff. eingegangen.

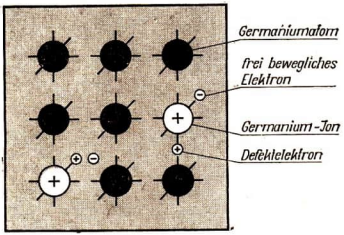


Bild 101/1 Modell der Eigenleitung beim Halbleiter

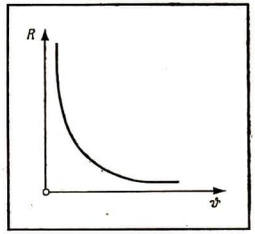


Bild 101/2 Abhängigkeit des Widerstandes eines Halbleiters von der Temperatur

- *Wenden Sie die Merkmale des allgemeinen Modells des elektrischen Leitungsvorgangs auf die Leitungsvorgänge in metallischen Leitern und Halbleitern an!*
- *Beschreiben Sie Experimente, durch die die Eigenleitung in Halbleitern durch Energiezufuhr (Wärme, Licht) demonstriert werden kann!*

▼ Überprüfen Sie experimentell, wie der Widerstand einer Bleistiftmine von der Temperatur abhängt!

Temperaturkoeffizient des Widerstandes

In einem Temperaturbereich von etwa 20 °C bis 100 °C gilt mit hinreichender Genauigkeit, daß die Widerstandsänderung ΔR eines Stoffes proportional der Temperaturänderung $\Delta\vartheta$ ist:

$$\Delta R \sim \Delta\vartheta .$$

Außerdem ist ΔR dem ursprünglichen Widerstand R_0 proportional:

$$\Delta R \sim R_0 .$$

Daraus ergibt sich:

$$\Delta R \sim R_0 \, \Delta\vartheta$$

und mit Einführung eines Proportionalitätsfaktors α:

$$\Delta R = \alpha \cdot R_0 \cdot \Delta\vartheta .$$

Der Proportionalitätsfaktor α wird als **Temperaturkoeffizient** des Widerstandes bezeichnet. Er bezieht sich auf die Temperatur, bei der R_0 gemessen wurde.

● *Leiten Sie die Einheit für den Temperaturkoeffizienten aus der Gleichung für ΔR her!*

Nach der Erwärmung ist der Widerstand R_ϑ aus der Beziehung

$$R_\vartheta = R_0 + \Delta R$$

zu ermitteln.
Ersetzt man ΔR durch $\alpha \cdot R_0 \cdot \Delta\vartheta$, so ergibt sich nach einigen Umformungen eine Gleichung zur Berechnung des Widerstandes R_ϑ:

$$R_\vartheta = R_0 \, (1 + \alpha \, \Delta\vartheta) .$$

Für Metalle und viele Metallegierungen ist α positiv. Es gibt aber auch Legierungen (z. B. aus Kupfer, Nickel und Mangan), die innerhalb eines großen Temperaturbereiches einen nahezu konstanten Widerstand besitzen ($\alpha \approx 0$).
Halbleiter weisen einen negativen Temperaturkoeffizienten auf.
Beispiel: Der Widerstand eines Glühfadens in einer Glühlampe beträgt bei Betriebsspannung 144 Ω und ist zehnmal so groß wie bei einer Temperatur von 0 °C. Wie groß ist der Temperaturkoeffizient des Widerstandes, wenn die Betriebstemperatur des Glühfadens bei $\vartheta = 2000$ °C liegt und eine lineare Temperaturabhängigkeit angenommen wird?

Gegeben:

$R_\vartheta = 144\ \Omega$
$R_\vartheta = 10\ R_0$
$\vartheta_0 = 0$ °C
$\vartheta = 2000$ °C

Gesucht: α

Lösung:

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R_0 \cdot \Delta\vartheta}$$

$$\alpha = \frac{R_\vartheta - R_0}{R_0(\vartheta - \vartheta_0)}$$

$$\alpha = \frac{9R_0}{R_0(\vartheta - \vartheta_0)}$$

$$\alpha = \frac{9}{2000\,\text{grd}}$$

$$\alpha = 4{,}5 \cdot 10^{-3}\,\text{grad}^{-1}$$

㉔ Die Wicklung des Elektromagneten einer Dynamomaschine ist aus Kupferdraht hergestellt, der bei einer Temperatur $\vartheta_0 = 10$ °C einen Widerstand von 14,2 Ω hat. Beim Betriebszustand vergrößert sich der Widerstand der Wicklung auf 16,5 Ω. Wie groß ist die Betriebstemperatur?

Der Widerstand von Halbleitern hängt in völlig anderer Weise von der Temperatur ab als der von metallischen Leitern. Er sinkt mit steigender Temperatur gemäß der Beziehung:

$$R = a \cdot e^{\frac{b}{T}}$$

In der Gleichung bedeuten T die absolute Temperatur, b eine Materialkonstante und a ein Faktor mit der Einheit eines Widerstandes.
Geht man von der Definition des Temperaturkoeffizienten des Widerstandes (s. 102) aus, dann ergibt sich durch Differentiation der Gleichung für R der Temperaturkoeffizient α.

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT}; \quad \alpha = -\frac{b}{T^2}$$

6
▼ Die Widerstandswerte eines Thermistors und eines metallischen Widerstandsthermometers sollen im Temperaturbereich von 20 °C bis 100° C aufgenommen werden.
Es ist zu prüfen, ob die Gleichung für R den Zusammenhang zwischen Widerstand und Temperatur im Falle des Thermistors besser wiedergibt als die Gleichung für R_ϑ. Die Temperaturkoeffizienten sowie a und b sind zu ermitteln!

$$R = a \cdot e^{\frac{b}{T}}; \qquad \frac{b}{T} = \ln \frac{R}{a}; \qquad \frac{b}{T} = \ln R - \ln a$$

$$\ln R = \ln a + \frac{b}{T}; \qquad \underline{\lg R = \lg a + \frac{b}{2{,}3} \cdot \frac{1}{T}}$$

Berechnung von b

$$\lg R_1 = \lg a + \frac{1}{2{,}3 \cdot T_1} \cdot b$$

$$\lg R_2 = \lg a + \frac{1}{2{,}3 \cdot T_2} \cdot b$$

$$\lg R_1 - \lg R_2 = \left(\frac{1}{2{,}3 \cdot T_1} - \frac{1}{2{,}3 \cdot T_2}\right) \cdot b$$

$$\underline{b = \frac{(\lg R_1 - \lg R_2) \cdot 2{,}3 \cdot T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1}}$$

Berechnung von a

$$\lg R_1 = \lg a + \frac{1}{2{,}3 \cdot T_1} \cdot b$$

$$\lg a = \lg R_1 - \frac{1}{2{,}3 \cdot T_1} \cdot b$$

$$\underline{a = 10^{\lg R_1 - \frac{1}{2{,}3 \cdot T_1} \cdot b}}$$

Supraleitung

Bei sehr niedriger Temperatur tritt bei einigen Stoffen eine überaus große Leitfähigkeit auf. Dieses Leitfähigkeitsphänomen wird als **Supraleitung** bezeichnet. Sie wurde 1911 von Kammerlingh-Onnes an Quecksilber entdeckt. Er kühlte Quecksilber ab und beobachtete ein normales Absinken des spezifischen elektrischen Widerstandes. Als er die Temperatur unter 4,2 °K senkte, fiel der Widerstand auf einen so kleinen Wert, daß eine Messung mit der ihm zur Verfügung stehenden Apparatur unmöglich wurde.

Tatsächlich existiert für viele Stoffe eine kritische Temperatur T_k, auch Übergangs- oder Sprungtemperatur genannt, bei der der Widerstand fast sprungartig auf einen äußerst geringen Wert abfällt (Bild 104/1).
Wird in einem supraleitenden Ring durch kurzzeitige Induktion ein Strom erzeugt, so fließt dieser über sehr lange Zeit, ohne merklich an Stärke abzunehmen.
Neben Quecksilber wurde bei einer Reihe von Elementen (metallische Elemente der Gruppen II bis VIII des Periodensystems) sowie bei rund 1000 Legierungen und Verbindungen Supraleitung festgestellt. Für einige supraleitende Elemente und Verbindungen sind ihre kritischen Temperaturen in Tabellen zusammengestellt.

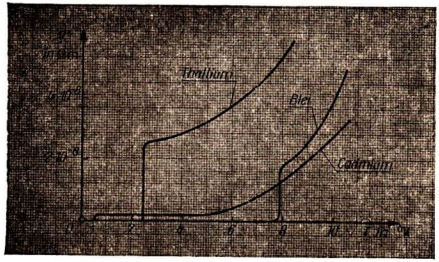


Bild 104/1 Temperaturabhängigkeit des Widerstandes in der Nähe der kritischen Temperatur

Element	Sprungtemperatur T_k in °K
Al	1,19
Cd	0,55
Hg	4,15
Ir	0,14
Nb	9,2
Pb	7,20
Th	1,37
Tl	2,39
U	0,7

Verbindung	Sprungtemperatur T_k in °K
Pb_2Au	7,0
TaSi	4,4
MoC	9,26
NbN	16,0
$CoSi_2$	1,45
$LaAl_2$	3,2
Nb_3Sn	17,95
V_3Si	17,1
V_3Ge	6,01

Wegen ihrer besonderen Eigenschaft sind schon heute bedeutende Anwendungsmöglichkeiten der Supraleiter in der Elektronik, Elektrotechnik und Datenverarbeitungstechnik sowie auf zahlreichen Gebieten des wissenschaftlichen Gerätebaus erkennbar. Einer breiten technischen Anwendung stehen noch Schwierigkeiten entgegen, an deren Beseitigung intensiv gearbeitet wird.
Das Verständnis der Supraleitung ist im Rahmen der klassischen Physik nicht möglich. Erst um 1960 konnte auf der Grundlage der Quantenmechanik eine befriedigende Erklärung gefunden werden.

Zur **Zusammenfassung** vervollständigen Sie folgende Übersicht:

ϑ in °C	ϱ in Ω cm	$\varkappa$ in Ω^{-1} cm^{-1}
metallischer $\geqq$ 20 (normalleitend) Leiter $\rightarrow$ —273 (supraleitend)		
Halbleiter $\gtrless$ 20		
Isolator		

Bevor auf Vorgänge in der Grenzschicht eingegangen wird, auf denen die Wirkungsweise der Halbleiterbauelemente beruht, ist es zweckmäßig, die Eigenschaften der Halbleiter selbst zu betrachten, zwischen denen sich die Grenzschicht ausbildet.

Eigenleitung

Sie tritt bei elementaren oder stöchiometrisch genau zusammengesetzten Kristallen mit kovalenter Bindung (↗ S. 59; 64) ohne Störstellen im perfekten Kristall, z. B. bei Germanium, auf. Die Ladungsträger, die die Leitfähigkeit verursachen, entstammen dem Grundgitter. Reine Eigenleitung wird ausschließlich durch Anregung von Elektronen aus dem Valenzband in das Leitfähigkeitsband verursacht (Bild 105/1). Die Anzahl der Elektronen stimmt mit der der Defektelektronen überein. Die Anregungsenergie zum Überwinden der verbotenen Zone kann durch Absorption von Lichtquanten oder die Zufuhr von Wärmeenergie erreicht werden.
Die Breite der verbotenen Zone beträgt bei Germanium 1,1 eV, bei Silizium 0,7 eV.
In einem Germaniumkristall bei Zimmertemperatur reicht zum Beispiel eine Energie von 0,026 eV aus, um Elektronen ins Leitfähigkeitsband zu heben. Die so erzeugten freien Elektronen können bei Anlegen eines elektrischen Feldes einen elektrischen Strom bewirken.

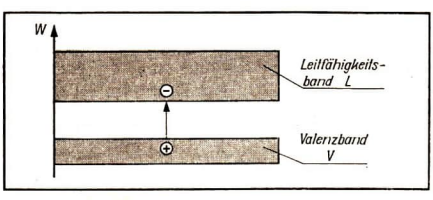


Bild 105/1 Eigenleitung im Energiebändermodell

Störstellenleitung

Der spezifische elektrische Widerstand der Eigenleitung eines Halbleiters liegt bei einer Temperatur von 20 °C in einer Größenordnung von 10^6 Ωcm. Durch gezielte Fremdstoffzusätze kann die Ladungsträgerkonzentration und damit die elektrische Leitfähigkeit eines halbleitenden Stoffes um mehrere Größenordnungen verändert werden (Bild 99/1).

Betrachtung des Kristalls. Im Kristall des Halbleiters treten Fremdatome als Substitutionsstörstellen (↗ S. 76 ff.) an die Stelle einiger Germanium- bzw. Siliziumatome. Solche Störstellen lassen sich leicht herstellen, wenn sich die Wertigkeiten der Fremdatome und die der Atome des Grundgitters ähneln. Bei ungleichen Wertigkeiten wird die elektrische Neutralität des Kristallverbandes durch Abgeben bzw. Aufnehmen eines frei beweglichen Elektrons gewahrt. Damit ruft die jeweilige Störstelle eine Bewegung der Ladungsträger hervor, man sagt auch, die Störstelle ist elektrisch aktiv. Die durch die Substitutionsstörstellen bewirkte *Störstellenleitung* kann die Eigenleitung vollständig überlagern. Wenn jedes Fremdatom ein frei bewegliches Elektron liefert, so reicht die Konzentration von einem Fremdatom auf 10^8 Germanium- oder 10^{11} Siliziumatome aus, um die Elektronenkonzentration gegenüber der der Eigenleitung um eine Größenordnung zu erhöhen.
In der Praxis werden anstelle von Germanium- bzw. Siliziumatomen (jeweils IV-wertig) Atome substituiert, die sich um ein Valenzelektron unterscheiden, d. h. den Elementen der 3. oder 5. Hauptgruppe des Periodensystems der Elemente angehören. Die Auswahl der Elemente dieser Hauptgruppen hängt von den technologischen Anforderungen (↗ S. 131 ff.) ab. Beim Dotieren von Germanium verwendet man hauptsächlich Arsen (V-wertig) und Indium (III-wertig), während beim Dotieren von Silizium häufig Antimon (V-wertig) und Bor (III-wertig) eingesetzt werden.

Energetische Betrachtung. Die Elektronen der Fremdatome gehören nach dem Dotieren zum System der Halbleiterkristalle. Jedoch stimmt der Energiezustand der Elektronen der Fremdatome nicht mit dem der Elektronen des Kristallgitters überein. Die Elektronenterme der Fremdatome passen nicht in die Energiebänder des Gitters. Die Energieterme liegen in der verbotenen Zone (↗ S. 68).

Elektronenleitung

In einem reinen Germaniumkristall stellt jedes Atom 4 Elektronen für die Bindung zur Verfügung. Jeweils zwei Elektronen werden von den benachbarten Atomen als Elektronenpaare genutzt. Somit ist jedes Atom an 4 Elektronenpaaren beteiligt. Wird auf einem Gitterplatz ein vierwertiges Germaniumatom gegen ein fünfwertiges Arsenatom ersetzt, bildet dieses mit den Germaniumatomen der Umgebung ebenfalls 4 Elektronenpaare. Da für das fünfte Valenz-

elektron des Arsenatoms kein Germanium-Elektron zur Elektronenpaarbildung zur Verfügung steht, verbleibt es locker gebunden am Arsen-Atom (Bild 107/1). Dadurch kann das „fünfte" Elektron bei sehr geringer thermischer Anregung — Ionisierungsenergie (↗ S. 59) — vom Arsenatom abgetrennt werden. Es wird zu einem frei beweglichen Elektron im Kristall und steht somit als **Leitungselektron** zur Verfügung. Der einfach positive Atomrumpf bleibt fest im Gitter (Bild 107/2). Es ist üblich, den Vorgang auch wie folgt darzustellen:

$D^{\times}$ Zufuhr von Energie ⟷ Abgabe von Energie	D^{+}	$+$	$\ominus$
Donator-Atom (ortsfest) neutral	Donator-Ion (ortsfest) ionisiert		Elektron (frei beweglich)

Die Atome der fünften Hauptgruppe wirken also als Elektronenspender. Fremdatome, die Elektronen abgeben können, heißen **Donatoren.** Die Leitfähigkeit des Kristalls wächst proportional zu der Anzahl der freien Elektronen. Da hierbei die Stromleitung durch überschüssige Elektronen ermöglicht wird, heißt dieser Wirkungsmechanismus Elektronenleitung oder **n-Leitung.**[1])

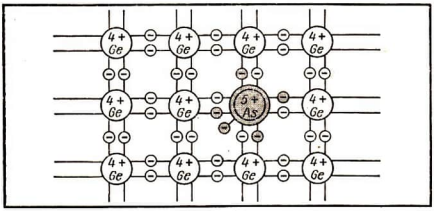


Bild 107/1 Ebenes Modell eines Germaniumgitters mit eingelagertem Arsenatom

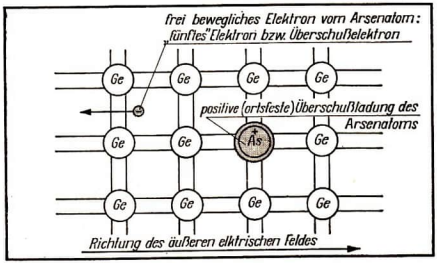


Bild 107/2 Elektronenleitung oder n-Leitung in arsenhaltigem Germanium

[1]) n-Leitung: Die Leitung wird vorrangig durch negative Ladungsträger verursacht.

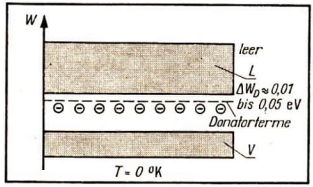


Bild 108/1 Überschußelektronenleitung oder n-Leitung im Energiebändermodell; bei $T = 0$ °K ist der Kristall ein Isolator
ΔW_D: Ionisierungsenergie der Donatoren

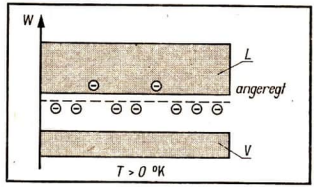


Bild 108/2 Elektronenleitung oder n-Leitung im Energiebändermodell; bei $T > 0$ °K treten Elektronen der Donatorterme ins Leitfähigkeitsband über, wo sie frei beweglich sind

Im *Energiebändermodell* wird der Vorgang folgendermaßen beschrieben. Der Einbau fünfwertiger Fremdatome in das Germanium- bzw. Siliziumgitter bewirkt die Ausbildung neuer Energieterme in der verbotenen Zone. Diese Energieterme liegen eng unter dem Leitfähigkeitsband, etwa 0,01 eV bis 0,05 eV (Störstellenaktivierungsenergie) entfernt. Die Terme, die sich dabei infolge der Dotierung mit Donatoren ausbilden, heißen **Donatorterme.** Diese Energieterme sind mit Elektronen besetzt. Sie bilden sich nur am Ort der Störstellen aus.
Solche kleinen Energiebeträge (0,01 eV bis 0,05 eV) können die Elektronen von den thermischen Gitterschwingungen erhalten. Dadurch gelangen Elektronen aus den Donatortermen leicht in das Leitfähigkeitsband und tragen zur Erhöhung der Leitfähigkeit bei (Bild 108/2).

(25) Bestimmen Sie die Temperatur zur thermischen Anregung der Eigenleitung und der Elektronenleitung unter Verwendung von $e \cdot U = \frac{3}{2} k \cdot T$ für Germanium und Silizium!

● *Welches sind die Bedingungen für einen elektrischen Strom?*

Defektelektronenleitung

Baut man in einen Germaniumkristall Atome von Elementen der dritten Hauptgruppe des Periodensystems (z. B. Indium) ein, so fehlt ein Elektron zur Bildung der 4 Elektronenpaare mit den benachbarten Ge-Atomen. Das fehlende Elektron wird als Defektelektron oder positives Loch bezeichnet (Bild 109/1).
Das Defektelektron kann leicht ein Elektron eines Nachbaratoms aufnehmen. Der Energieaufwand dafür ist gering. Bei diesem Vorgang wird aus dem ursprünglich neutralen Indiumatom ein negatives Ion gebildet (Bild 109/2).

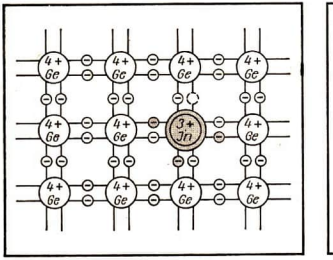


Bild 109/1 Ebenes Modell eines Germaniumgitters; ein Germaniumatom wurde durch ein Indiumatom ersetzt

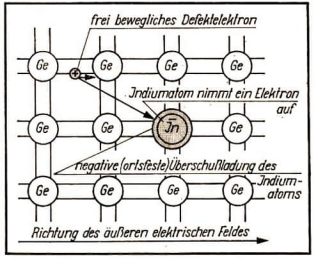


Bild 109/2 Defektelektronenleitung oder p-Leitung im indiumhaltigen Germanium

Die Atome der dritten Hauptgruppe wirken als Defektelektronen- oder Löcherspender. Störstellen, die Elektronen aufnehmen können, heißen **Akzeptoren.** Die Defektelektronen scheinen eine unregelmäßige Bewegung auszuführen. In Wirklichkeit sind es natürlich die Elektronen, die sich bewegen. Jedoch kann die ganze Erscheinung so beschrieben werden, als bewege sich das Defektelektron entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung der Elektronen. Infolge der elektrostatischen Anziehung zwischen positiv geladenem Defektelektron und negativ geladener Indium-Störstelle hält sich das Defektelektron vorwiegend in deren Nähe auf. Bei thermischer Anregung des Gitters kann es das Kraftfeld des Indium-Ions verlassen, es wird frei beweglich und kann so zur elektrischen Leitung beitragen. Die Ionisierungsenergie ist von gleicher Größenordnung wie bei Donatoren, einige hundertstel Elektronenvolt.

Analog der n-Leitung kann dieser Vorgang wie folgt beschrieben werden: Bei thermischer Anregung fängt der neutrale Akzeptor A^x, im dargestellten Falle das neutrale Indiumatom, ein Elektron auf und wird damit zum negativen unbeweglichen A^--Ion. Außerdem entsteht ein Defektelektron.

A^x <u>Zufuhr von Energie</u> <u>Abgabe von Energie</u>	A^-	$+$	$\oplus$
Akzeptor-Atom (ortsfest) neutral	Akzeptor-Ion (ortsfest) ionisiert		Defektelektron (beweglich)

Da bei diesem Wirkungsmechanismus die Leitfähigkeit vorrangig durch die Defektelektronen verursacht wird, nennt man ihn **Defektelektronenleitung, Löcherleitung oder p-Leitung.**[1])

[1]) **p-Leitung:** Die Leitung wird vorrangig durch fehlende Elektronen, d. h. positive Löcher (Defektelektronen) verursacht.

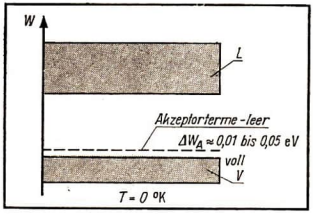


Bild 110/1 Defektelektronenleitung oder p-Leitung im Energiebändermodell; bei $T = 0$ °K ist der Kristall ein Isolator ΔW_A: Ionisierungsenergie der Akzeptoren

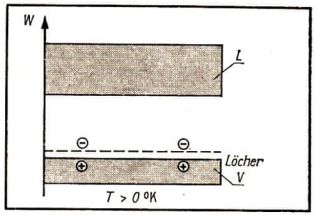


Bild 110/2 Defektelektronenleitung oder p-Leitung im Energiebändermodell; bei $T > 0$ flK lagern sich Elektronen aus dem Valenzband an Akzeptorterme an, im Valenzband entstehen frei bewegliche Löcher.

Auch diese Art der Störstellen (Defektstörstellen) bewirken im *Energiebändermodell* die Ausbildung von Energietermen in der verbotenen Zone. Sie befinden sich unmittelbar über dem Valenzband etwa 0,01 eV bis 0,05 eV (Störstellenaktivierungsenergie) entfernt. Die Terme, die sich dabei infolge des Dotierens mit Akzeptoren ausbilden, heißen **Akzeptorterme**. Diese Energieterme sind mit Defektelektronen besetzt. Sie bilden sich nur am Ort der Störstellen aus und werden deshalb gestrichelt dargestellt (Bild 110/1).
Derartige kleine Energiebeträge (0,01 eV bis 0,05 eV) können die Elektronen leicht von den Wärmeschwingungen des Gitters erhalten, wie bereits bei der n-Leitung dargestellt. Dadurch werden Elektronen aus dem Valenzband auf die unbesetzten Akzeptor-Terme gehoben. Als Ergebnis erhält man ein Valenzband, das wegen seiner unvollständigen Besetzung eine gewisse Ähnlichkeit mit einem Leitungsband aufweist (Bild 110/1). Tatsächlich verhält sich ein Valenzband mit einigen „Löchern" sehr ähnlich wie ein Leitungsband mit einigen Elektronen.
Die genannten Beträge der Anregungsenergien, die einen solchen Leitungsmechanismus (n- oder p-Leitung) auslösen können, sind viel geringer als jene, die zur Auslösung der Eigenleitung von Germanium und Silizium erforderlich sind.

(26) Bestimmen Sie die nötige Temperatur zur thermischen Anregung der Defektelektronenleitung, wenn die Ionisierungsenergie 0,02 eV beträgt!

● *Bereiten Sie einen Schülervortrag vor, in dem Elektronenleitung und Defektelektronenleitung gegenübergestellt werden!*

Bei tiefen Temperaturen sind nur wenige Störstellen ionisiert (Bild 110/2). Mit höherer Temperatur nimmt ihre Anzahl zu (Teil a). Bei größerer thermischer Anregung (technisch nutzbarer Bereich – Teil b) wird die Zunahme ionisierter Fremdatome geringer. Sind alle Fremdatome ionisiert, kann ein weiterer Temperatur anstieg die Eigenleitung so groß werden lassen, daß eine Zerstörung des Kristallgefüges auftreten kann (Teil c).

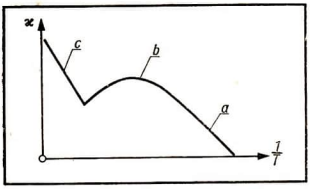


Bild 111/1 Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Temperatur

Die Konzentration der im Überschuß vorhandenen Störstellenart (Akzeptoren oder Donatoren) bestimmt, ob im Halbleiter Elektronenleitung (n-Leitung) oder Defektelektronenleitung (p-Leitung) entsteht. Im Gegensatz zur Eigenleitung sind damit die Konzentrationen der Löcher und der Elektronen unterschiedlich. Die Ladungsträger, die jeweils überwiegend vorhanden sind, heißen **Majoritätsträger**. Die Minoritätsträger spielen für die Wirkungsweise der Dioden und Transistoren die ausschlaggebende Rolle.

- *Welches sind im p-leitenden bzw. im n-leitenden Material die Minoritätsträger?*
- *Erklären Sie die Begriffe: Dotieren, Donator, Akzeptor, Donatorterme, Akzeptorterme, Minoritätsträger und Majoritätsträger.*
- *Welche Möglichkeiten gibt es neben der thermischen Anregung zur Ladungsträgererzeugung in Halbleitern?*
- *Welcher Unterschied besteht, wenn anstelle eines Germaniumgitters ein Siliziumgitter verwendet und ein Arsen- bzw. Galliumatom eingelagert wird?*

Die Halbleiterdiode

Halbleiterdioden verdrängen in vielen Bereichen Elektronenröhren, weil sie kleiner, leichter und widerstandsfähiger sind und eine größere Lebensdauer besitzen.

- *Skizzieren Sie den schematischen Aufbau einer Halbleiterdiode und vergleichen Sie diesen mit dem einer Röhrendiode (Wissensspeicher Physik)!*
- *Stellen Sie Vor- und Nachteile von Halbleiter- und Röhrendioden gegenüber!*

Für die Funktion aller Halbleiter-Bauelemente sind die Vorgänge von Bedeutung, die sich in einem schmalen Übergangsbereich zwischen n-leitendem und p-leitendem Stoff abspielen. Ein derartiger Bereich wird pn-Übergang genannt. Die technische Herstellung solcher Übergänge kann so erfolgen, daß man in einen Halbleiterkristall in geeigneter Weise Fremdatome diffundieren läßt.

- *Wiederholen Sie das Zustandekommen der n- und p-Leitung durch Dotieren von Halbleitern (↗ S. 106)!*
- *Welche Elemente eignen sich als Donatoren bzw. Akzeptoren?*

Es ist zweckmäßig, die Vorgänge im pn-Übergang zunächst im stromlosen Zustand zu betrachten und erst danach im stromführenden Zustand.

Stromloser Zustand eines pn-Übergangs. Bild 112/1 a stellt eine Halbleiterdiode dar, deren eine Schicht aus positiven Arsen-Ionen und frei beweglichen Elektronen besteht, d. h., n-leitend ist. Die p-leitende Schicht ist durch negative Indium-Ionen und frei bewegliche Löcher gekennzeichnet. An der Berührungsfläche beider Schichten bildet sich eine **Grenzschicht** *G* aus. Diese kommt dadurch zustande, daß die beiden Ladungsträgerarten (frei bewegliche Elektronen und Löcher) wie zwei verschiedene Gase ineinander diffundieren. Infolge der Diffusion vereinen sich (rekombinieren) die frei beweglichen Elektronen und Löcher und gehen damit als Ladungsträger verloren. Das bedeutet: Die Grenzschicht ist an frei beweglichen Ladungsträgern verarmt (Bild 112/1 b). Des weiteren führt die Diffusion der Ladungsträger zu einer Ladungstrennung, die mit der Bildung eines elektrischen Feldes zwischen den positiven Arsen-Ionen und den negativen Indium-Ionen verbunden ist (**Diffusionsfeld** E_{Diff}). Es ist so gerichtet, daß es einer weiteren Diffusion und damit Rekombination von Ladungsträgern entgegenwirkt (Bild 112/1 b).
Wie bereits bekannt, existiert zwischen zwei Punkten A und B eines elektrischen Feldes und damit auch des Diffusionsfeldes eine elektrische Spannung U_{AB}.

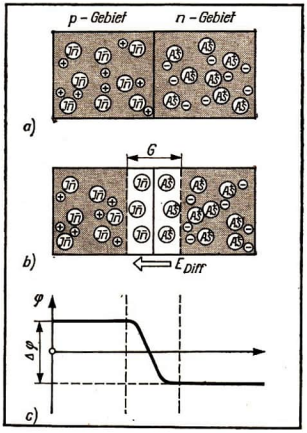


Bild 112/1 pn-Übergang im stromlosen Zustand
a) Germaniumkristall, dotiert mit Arsen und Indium
b) Grenzschicht *G* und Diffusionsfeld E_{Diff}
c) Potentialverlauf

● *Wiederholen Sie, wie die elektrische Spannung definiert ist (Wissensspeicher Physik S. 179)!*

Man sagt auch: Der Spannung zwischen zwei Punkten entspricht eine **Potentialdifferenz $\Delta\varphi$** zwischen diesen Punkten, d. h., $U_{AB} = \Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_B$. Dabei werden φ_A bzw. φ_B als **elektrisches Potential** in den Punkten A bzw. B bezeichnet. Ein elektrisches Potential ist die Spannung, die ein Punkt A des elektrischen Feldes gegen die Erde besitzt.

Das Potential der Erde wird also willkürlich gleich Null gesetzt, ähnlich, wie man beispielsweise für Höhenmessungen den Meeresspiegel als Höhe Null festlegt. Der Wert dieser Festlegung besteht darin, daß man die Spannung zwischen zwei Punkten A und B ermitteln kann, wenn man ihre Potentiale kennt. Es gilt

$$U_{AB} = U_{AE} + U_{EB} = \varphi_A - \varphi_B.$$

Stellt man den Potentialverlauf einer Halbleiterdiode grafisch dar, dann ergibt sich Bild 112/1 c. Um die Potentialdifferenz $\Delta\varphi$ zu überwinden, benötigen die frei beweglichen Ladungsträger eine Energie, die von außen zugeführt werden muß. Die Potentialdifferenz über der Grenzschicht wird damit zu einem Kriterium für die Leitfähigkeit eines pn-Übergangs.

● *Wann besitzt ein pn-Übergang eine besonders große Leitfähigkeit?*

Stromführender Zustand eines pn-Übergangs. Durch Anlegen einer äußeren Spannung kann man je nach der Polung entweder die Grenzschicht verbreitern (Schaltung in Sperrichtung) oder sie mit Ladungsträgern überschwemmen (Schaltung in Durchlaßrichtung).

● *Skizzieren Sie die Schaltung eines pn-Übergangs in Sperr- und in Durchlaßrichtung (↗ Lehrbuch Physik Klasse 9 S. 130 f)!*

Schaltung eines pn-Übergangs in Sperrichtung. Legt man an das p-Gebiet den negativen und an das n-Gebiet den positiven Pol einer Spannungsquelle, dann stimmt die Richtung des äußeren Feldes mit der des Diffusionsfeldes überein. Die Löcher werden zum Minuspol und die frei beweglichen Elektronen zum Pluspol des anliegenden Feldes abgesaugt (Bild 114/1 b). Die Potentialdifferenz vergrößert sich (Bild 114/1 b) und kann von den Ladungsträgern nicht überwunden werden. Der pn-Übergang verhält sich wie ein Isolator. Er sperrt den Strom in dieser Richtung.

● *Wie kommt es zu einer Verbreiterung der Grenzschicht? Begründen Sie, warum die Potentialdifferenz größer wird!*

Schaltung eines pn-Übergangs in Durchlaßrichtung. Legt man an das p-Gebiet den positiven Pol und an das n-Gebiet den negativen Pol einer Spannungsquelle, dann ist das anliegende äußere Feld dem Diffusionsfeld entgegengerichtet. Vom p-Gebiet werden Löcher und vom n-Gebiet frei bewegliche Elektronen in die

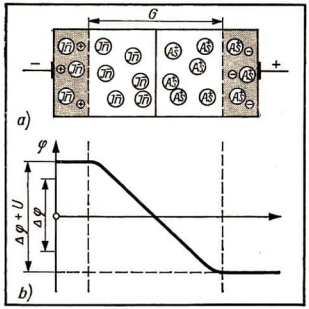


Bild 114/1 pn-Übergang in Sperrichtung
a) Grenzschicht G verbreitert sich
b) Potentialdifferenz wird größer

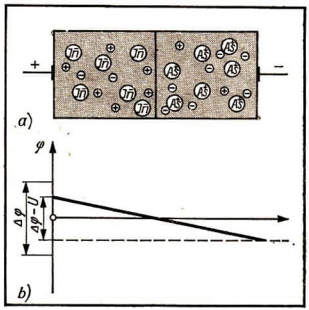


Bild 114/2 pn-Übergang in Durchlaßrichtung
a) Grenzschicht G wird durch Überflutung von Ladungsträgern aufgehoben.
b) Potentialdifferenz wird geringer.

Grenzschicht getrieben und überfluten diese, so daß kein an Ladungsträgern verarmtes Gebiet mehr existiert (Bild 114/2a). Infolgedessen verringert sich die Potentialdifferenz (Bild 114/2b), so daß der ursprünglich große Widerstand in der Grenzschicht zusammenbricht. Es fließt ein Strom, der im n-Gebiet von Elektronen und im p-Gebiet von Löchern getragen wird. Der pn-Übergang ist in Durchlaßrichtung geschaltet.

- *Wie kommt es zu einer Überflutung der Grenzschicht mit Ladungsträgern?*
- *Begründen Sie, warum die Potentialdifferenz geringer wird!*
- *Erläutern Sie die Entstehung des Diffusionsfeldes!*

Unabhängig von der Richtung des anliegenden Feldes existiert neben der Störstellenleitung eine geringe Eigenhalbleitung. Diese verursacht einen geringen Reststrom, wenn die Halbleiterdiode in Sperrichtung geschaltet ist.

- *Wiederholen Sie das Wesen der Eigenhalbleitung und der Störstellenleitung!*
- *Wie wirkt sich die Eigenhalbleitung auf den Strom bei in Durchlaßrichtung geschalteter Diode aus?*
  Vervollständigen Sie die Tabelle auf S. 115 oben!

Ein derartiger pn-Übergang kann also ähnlich wie eine Röhrendiode zur Gleichrichtung von Wechselströmen benutzt werden.

- *Entwickeln Sie eine Schaltskizze, mit deren Hilfe man die Gleichrichterwirkung einer Halbleiterdiode nachweisen kann! Vergleichen Sie die Schaltung mit der einer Röhrendiode!*

	pn-Übergang		
	stromloser Zustand	stromführender Zustand	
		Sperrrichtung	Durchlaßrichtung
Polung			
Richtung des anliegenden Feldes			
Verhalten der Ladungsträger in der Grenzschicht			
Richtung des Diffusionsfeldes			
Potentialdifferenz			
Leitfähigkeit			

pn-Übergang im Bändermodell

Stromloser Zustand. Ohne angelegte Spannung bildet sich infolge der Diffusion der Ladungsträger eine Potentialdifferenz $\Delta\varphi$ aus. Sie vermindert das Eindringen von Majoritätsträgern in das n- bzw. p-Gebiet (↗ S. 111). Bild 115/1 stellt diesen Zustand schematisch dar.

Sperrichtung. Legt man eine Spannung an, so daß sich der positive Pol am n-Gebiet befindet, dann erhöht sich die Potentialdifferenz um U, d. h., sie vergrößert sich gegenüber dem stromlosen Zustand. Demzufolge müssen die

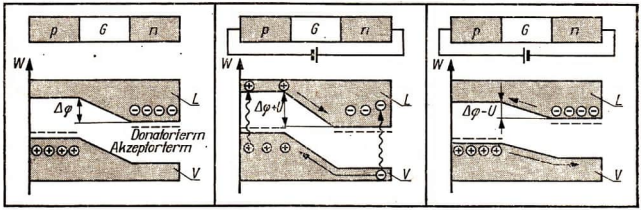


Bild 115/1 links: Bändermodell eines pn-Übergangs im stromlosen Zustand
Mitte: Bändermodell eines pn-Übergangs in Sperrichtung
rechts: Bändermodell eines pn-Übergangs in Durchlaßrichtung

Löcher des p-Gebietes eine um den Betrag U größere Gegenspannung überwinden, um in das n-Gebiet zu gelangen. Analoges gilt für die frei beweglichen Elektronen (Bild 115/1).

Durchlaßrichtung. Wird eine äußere Spannung U so angelegt, daß sich der positive Pol am p-Gebiet befindet, dann verringert sich die Potentialdifferenz zwischen den Bändern um U. Die Ladungsträger können die Potentialschwelle überwinden (Bild 115/1).

Stromstärke-Spannung-Charakteristik einer Halbleiterdiode

Das physikalische Verhalten einer Halbleiterdiode wird aus ihrer Stromstärke-Spannung-Charakteristik ersichtlich. Eine solche Charakteristik, auch **Kennlinie** genannt, läßt sich mit der in Bild 116/1 angegebenen Schaltung aufnehmen. Ist die Diode in Durchlaßrichtung geschaltet, dann wächst die Stromstärke schon bei einigen Hundertstel Volt schnell an. Die Spannung, bei der die Stromstärke sprungartig ansteigt, wird als **Schwellspannung U_S** bezeichnet. Sie beträgt für Germaniumdioden etwa 0,3 V bis 0,4 V und für Siliziumdioden etwa 0,7 V bis 0,8 V (Bild 116/3).
Die Majoritätsträger benötigen nur eine geringe Energie, um die Potentialdifferenz zu überwinden. Bei einer weiteren Erhöhung der Spannung wächst die Stromstärke etwa linear an. In Sperrichtung nimmt die Stromstärke mit abnehmender Spannung minimal zu. Es fließt ein durch Minoritätsträger verursachter Reststrom (↗ S. 111). Die Sperrwirkung bleibt jedoch nur bis zu einem gewissen Betrag der Spannung bestehen. Wird dieser Betrag überschritten, dann kommt es zu Durchbruchserscheinungen. Der Sperrstrom steigt sprungartig an; der Widerstand des pn-Übergangs nimmt in gleichem Maße ab. Infolge der großen Feldstärke liefern die beschleunigten Minoritäts-

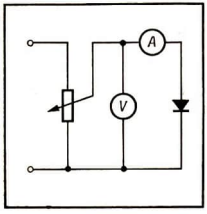


Bild 116/1 Schaltplan zur Aufnahme der Kennlinie einer Halbleiterdiode

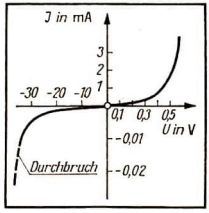


Bild 116/2 Kennlinie einer Halbleiterdiode

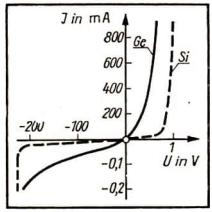


Bild 116/3 Kennlinien eines Germanium- und Silizium-Gleichrichters

träger die Energie zur Freisetzung zusätzlicher Ladungsträger. Damit steigt die Konzentration in der Grenzschicht lawinenartig an.

● *Diskutieren Sie die Kennlinien in Bild 116/3!*

▼ Demonstrieren Sie den Gleichrichtungseffekt einer Halbleiterdiode! Machen Sie den pulsierenden Gleichstrom über einen Oszillografen sichtbar!

▼ Nehmen Sie die Kennlinie eines Selengleichrichters auf! Ändern Sie die Spannung von -15 V bis $+15$ V in Stufen von je 2 V. Beachten Sie, daß in Durchlaßrichtung die Spannung nur bis zur zulässigen Höchststromstärke erhöht werden darf!

Technische Daten von Halbleiterdioden. Wichtige technische Daten von Halbleiterdioden sind in Katalogen und Röhrentaschenbüchern festgehalten. Die Kenndaten Durchlaßgleichspannung U_F, die Durchlaßstromstärke I_F. die Sperrgleichspannung U_R, die Sperrgleichstromstärke I_R, die maximal zulässige Sperrgleichspannung $U_{R_{max}}$, die maximal zulässige Durchlaßgleichstromstärke $I_{F_{max}}$, sowie die Sperrschichttemperatur ϑ_{max} sind in einer Tabelle für Germaniumdioden bei einer Temperatur von 250 °C zusammengestellt.

Type	U_F in V	I_F in mA	U_R in V	I_R in µA	$U_{R_{max}}$ in V	$I_{F_{max}}$ in A	ϑ_{max} in °C
OA 625	1	5	10	100	20	20	80
GA 100			20	500			

Der erste Buchstabe der Typenbezeichnung kennzeichnet das Ausgangsmaterial, z. B. G: Germanium. Der zweite Buchstabe gibt die Art des Bauelements an, z. B. A: Diode; C: Niederfrequenztransistor. Die Ziffern dienen zur Kennzeichnung der verschiedenen Typen für den gleichen Verwendungszweck.

● *Schlagen Sie in einem Röhrentaschenbuch die Bedeutung der Typen OA 625 und GA 100 nach!*

Der Transistor

Mit Hilfe von pn-Übergängen (↗ S. 111) kann man neben Gleichrichtern (↗ S. 114) auch Verstärkerbauelemente, Transistoren, herstellen. Oft wird der Transistor auch als Kristalltriode bezeichnet.

● *Nennen Sie Vorteile und Nachteile des Einsatzes von Transistoren im Vergleich zu Röhrentrioden!*

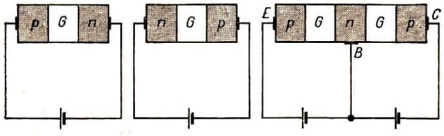


Bild 118/1 Entstehung eines pnp-Übergangs
a) pn-Übergang in Duchlaßrichtung
b) np-Übergang in Sperrichtung
c) Zusammenführen von a) und b) zum pnp-Übergang

Transistor und Röhrentriode ähneln sich in ihrer Verstärkerwirkung. Jedoch erfolgt die Steuerung des Transistors im Gegensatz zur Röhrentriode nicht leistungslos (↗ Wissensspeicher Physik, S. 225).

● *Wiederholen Sie den Aufbau und die Wirkungsweise der Röhrentriode!*

Der Transistor ist ein Bauelement mit zwei pn-Übergängen. Je nach Anordnung der p- und n-Schichten unterscheidet man Transistoren vom pnp- und vom npn-Typ. Im folgenden werden die Verhältnisse am pnp-Transistor erklärt. Damit lassen sich auch die Vorgänge für den npn-Transistor analog beschreiben.

Der Aufbau eines Transistors kann als Kombination von zwei Halbleitergleichrichtern, von denen der eine in Sperrichtung, der andere in Durchlaßrichtung geschaltet ist, verstanden werden (Bild 118/1). Die Steuerung des Transistors erfolgt durch Beeinflussung der Sperrwirkung des in Sperrichtung geschalteten pn-Übergangs.

Die Sperrwirkung dieses pn-Übergangs kann leicht durch die Zuführung von Minoritätsträgern (↗ S. 111) verändert werden. Diese Minoritätsträger werden von dem zweiten, in Durchlaßrichtung geschalteten pn-Übergang zugeführt. Die drei Anschlüsse des Transistors (Bild 118/1 c) werden als

E — Emitter, ihm entspricht die Katode der Triode,
B — Basis, ihr entspricht das Gitter der Triode,
C — Kollektor, ihm entspricht die Anode der Triode,

bezeichnet. Die beiden mit Akzeptoren dotierten äußeren Gebiete sind Emitter und Kollektor. Die Mittelschicht, die Basis, stellt ein mit Donatoren dotiertes Gebiet dar. In der praktischen Ausführung ist diese sehr dünn. Sie beträgt nur einige µm. Für die Wirkungsweise dieser Anordnung muß gewährleistet sein, daß die Störstellenkonzentration in der Basiszone sehr viel kleiner als in der Emitter- und Kollektorzone ist.

Transistorschaltungen kann man ebenso wie Schaltungen mit Röhrentrioden in drei **Grundschaltungen** konzipieren. Je nachdem, welche Elektrode dem Eingangs- und Ausgangskreis gemeinsam ist, unterscheidet man zwischen Emitter-, Basis- und Kollektorschaltung.

● *Stellen Sie die möglichen Transistorschaltungen den formal vergleichbaren Röhrentriodenschaltungen gegenüber!*
● *Vergleichen Sie die Wirkungsweise von Transistor und Röhrentriode miteinander!*

Zunächst seien die Vorgänge am pnp-Übergang mit Hilfe des *Energiebändermodells* dargestellt. Dabei muß berücksichtigt werden, daß der Transistor ein Halbleiterbauelement mit zwei pn-Übergängen ist. Bei der Betrachtung mit dem Energiebändermodell werden folgende Einschränkungen vorgenommen:

- Die Vorgänge werden eindimensional betrachtet;
- Sie spielen sich im Innern des Kristalls ab, so daß die Erscheinungen an der Oberfläche nicht beachtet werden brauchen;
- Der Abstand zwischen den beiden pn-Übergängen ist wesentlich größer, als die Diffusionslänge der Minoritätsträger im n-Gebiet.

Damit kann jeder pn-Übergang für sich betrachtet werden, ohne die Wechselwirkung zwischen beiden pn-Übergängen zu beachten.

Stromloser Zustand. Ohne angelegte Spannungen bilden sich infolge der Diffusion der Ladungsträger an jedem der beiden pn-Übergänge gleich große Potentialdifferenzen $\Delta\varphi$ aus (Bild 119/1). Die Potentialdifferenzen verhindern, ebenso wie im Fall des einzelnen pn-Übergangs, das Eindringen von Majoritätsträgern in das Nachbargebiet.

Stromführender Zustand. Beim Anlegen von Spannungen an den Transistor ändern sich die in Bild 119/1 dargestellten Verhältnisse grundlegend. Man legt eine kleine Spannung zwischen Emitter und Basis und eine größere zwischen Basis und Kollektor. Dabei wird der Übergang Emitter—Basis in Durchlaßrichtung und der Übergang Basis—Kollektor in Sperrichtung geschaltet.
Durch die angelegten Spannungen verschieben sich die Energieniveaus wie in Bild 119/2.
Die Konzentration der Akzeptoren im p-Gebiet ist höher als die Konzentration der Donatoren im n-Gebiet. Deshalb werden die Ströme fast ausschließlich durch Defektelektronen gebildet.
Die *Potentialmulde* $\Delta\varphi - U$ zwischen Emitter und Basis stellt für die Defektelektronen einen geringen Widerstand dar. Sie können fast ungehindert in den n-Bereich der Basis übertreten. Die Größe des Defektelektronenstroms ist ab-

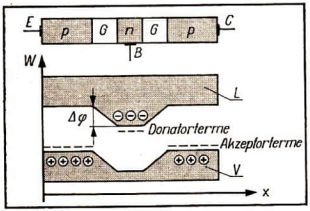


Bild 119/1 Darstellung der Vorgänge im pnp-Übergang mit dem Energiebändermodell — stromloser Zustand

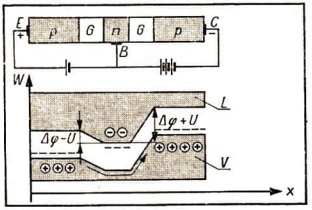


Bild 119/2 Darstellung der Vorgänge im pnp-Übergang mit dem Energiebändermodell — stromführender Zustand

hängig von der Tiefe der Potentialmulde zwischen Emitter und Basis. Durch Variation der Potentialmulde läßt sich der Defektelektronenstrom über die Durchlaßspannung beeinflussen.
Nur ein geringer Teil der in die Basis übertretenden Defektelektronen rekombiniert mit Elektronen der Basis, da die Konzentration von Donatoren im n-Gebiet gering ist. Aus dem Bereich des Kollektors gelangt ebenfalls nur ein geringer Teil von Elektronen (Kollektorsperrstrom) in die Basis, weil der Übergang Basis—Kollektor gesperrt ist. Für die Defektelektronen bildet der Übergang Basis—Kollektor keinen Widerstand, sie können den *Potentialberg* $\Delta\varphi + U$ ungehindert überwinden. Die in den n-Bereich gelangenden Defektelektronen erreichen sofort den Kollektor. Der ursprünglich gesperrte pn-Übergang wird also mit Hilfe der Defektelektronen leitend (Bild 119/2).

● *Beschreiben Sie die Vorgänge am pnp-Übergang mit Hilfe des Energiebändermodells!*

Eine **Emitterschaltung** liegt dann vor, wenn der Emitter des Transistors gleichzeitig zum Eingangs- und zum Ausgangskreis gehört. Mit Transistoren läßt sich eine *Spannungs-*, *Stromstärke-* und *Leistungsverstärkung* bewirken. Diese sollen im folgenden anhand der Emitterschaltung beschrieben werden. Analoge Betrachtungen lassen sich für Basis- und Kollektorschaltung anstellen.
Am Transistor sind folgende Stromstärken und Spannungen zu unterscheiden (Bild 120/1).

Diese werden oft auch als *Betriebsgrößen* bezeichnet:

I_E: Basisstromstärke

I_C: Kollektorstromstärke

U_{CE}: Spannung zwischen Kollektor und Emitter

U_{BE}: Spannung zwischen Basis und Emitter

Es gilt: $I_E = I_C + I_B$ und

$I_C \gg I_B \qquad I_E \approx I_C$.

Da in der Basis ein Teil der vom Emitter ausgesandten Ladungsträger rekombiniert, muß der Kollektorstrom kleiner sein als der Emitterstrom. Dies wird durch eine Zahl $\alpha < 1$ ausgedrückt. Bei heute gebräuchlichen Transistoren

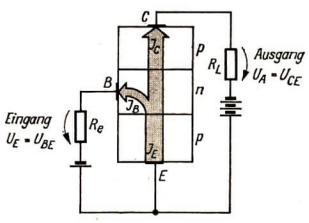


Bild 120/1 Ströme und Spannungen am Transistor in Emitter-Schaltung
R_e: Eingangswiderstand
R_L: Lastwiderstand

gelangen durch eine geschickte Konstruktion der Basis 95% bis 99,5% der Ladungsträger des Emitterstroms zum Kollektor ($\alpha = 0{,}95$ bis 0,995). Die Ströme am Transistor lassen sich über die Zahl α ausdrücken als

$$I_C = \alpha \cdot I_E \quad \text{und} \quad I_B = (1 - \alpha) \cdot I_E .$$

Die Gleichung für I_B ergibt sich aus nachstehender Umformung:

$$I_E = I_C + I_B , \qquad I_C = \alpha \cdot I_E ,$$

$$I_E = \alpha \cdot I_E + I_B \qquad I_B = I_E - \alpha \cdot I_E \qquad I_B = (1 - \alpha) \cdot I_E .$$

Bei der Emitterschaltung wird die Eingangsspannung zwischen Emitter und Basis angelegt, die Ausgangsspannung zwischen Emitter und Kollektor abgegriffen. Die Emitterschaltung ist die Grundschaltung des Transistors, bei der sich Eingangs- und Ausgangswiderstand am wenigsten unterscheiden. In der Praxis wird sie am häufigsten angewendet.

Verstärkung. Zur Herleitung der Leistungsverstärkung sei zunächst die allgemeine Definition der Verstärkung angeführt: Die Verstärkung V ist gleich dem Quotienten aus der Änderung der Ausgangsgröße und der Änderung der Eingangsgröße.

Stromverstärkung. Aus dieser allgemeinen Definition der Verstärkung läßt sich die Definition für die Stromverstärkung der Emitterschaltung ableiten (Bild 120/1).

Die Stromverstärkung V_i ist gleich dem Quotienten aus der Änderung der Kollektorstromstärke ΔI_C und der Änderung der Basisstromstärke ΔI_B.	$V_i = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$

Um nachzuweisen, daß in der Emitterschaltung eine Stromverstärkung auftritt, werden die Gleichungen für I_C und I_B nach I_E umgestellt, gleichgesetzt und nach I_C aufgelöst.

$I_C = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot I_B$. Daraus ergibt sich

$$\Delta I_C = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot \Delta I_B .$$

Aus den Gleichungen ist ersichtlich, daß I_C von I_B abhängt. Für $\alpha = 0{,}9$ ergibt sich wegen $V_i = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ und $\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$ eine Stromverstärkung $V_i = 9$. Für $\alpha = 0{,}995$ beträgt V_i bereits 199. Dieses heißt also, daß bereits eine geringe Änderung des Basisstromes eine große Änderung des Kollektorstromes zur Folge hat.

Die Spannungsverstärkung V_u ist gleich dem Quotienten aus der Änderung der Ausgangsspannung ΔU_{CE} und der Änderung der Eingangsspannung ΔU_{BE}.	$$V_u = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta U_{BE}}$$

Die beiden pn-Übergänge im Transistor stellen für den Strom Widerstände dar; der gesperrte Basis–Kollektor-Übergang einen sehr großen, der in Durchlaßrichtung geschaltete Übergang zwischen Basis und Emitter einen kleinen. Es gilt:

$$R_{BE} \ll R_{BC} .$$

Bei der Emitterschaltung liegt die Eingangsspannung zwischen Basis und Emitter, die Ausgangsspannung zwischen Emitter und Kollektor. Da $I_E \approx I_C$ (↗ S. 120) ist, sind auch die Spannungsabfälle über den Widerständen R_{BE} und $R_{BE} + R_{BC}$ unterschiedlich groß. Eine Änderung des Stromes im Transistor hat wegen $R_{BE} \ll R_{BE} + R_{BC}$ auch eine unterschiedliche Änderung der Spannungsabfälle zur Folge.

$$\Delta U_{BE} \ll \Delta U_{CE}$$

Dieses bedeutet eine Spannungsverstärkung, da die Spannung am Eingang U_{BE} kleiner ist, als die Spannung, die am Ausgang abgegriffen wird (Bild 122/1).

Leistungsverstärkung. Eine Strom- und Spannungsverstärkung wurde nachgewiesen. Entsprechend der Definition der Leistung als Produkt aus Spannung und Stromstärke folgt, daß auch eine Leistungsverstärkung auftritt.

Die Leistungsverstärkung ist gleich dem Produkt aus Strom- und Spannungsverstärkung	$$V_P = V_I \cdot V_U$$ oder für die Emitterschaltung $$V_P = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \cdot \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta U_{BE}}$$

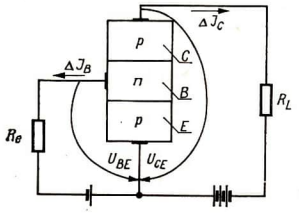


Bild 122/1 Entstehung der Spannungsverstärkung am Transistor in Emitterschaltung

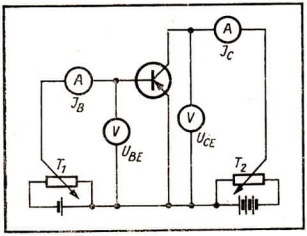


Bild 123/1 Emittermeßschaltung

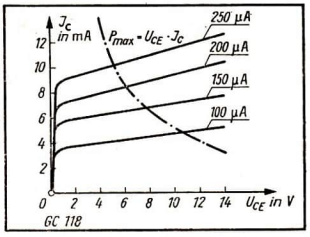


Bild 123/2 I_C-U_{CE}-Kennlinienfeld

Beim Transistor handelt es sich um ein nichtlineares Bauelement. Das bedeutet, daß zwischen Strömen und Spannungen am Transistor (↗ Betriebsgrößen S. 120) keine direkte Proportionalität besteht.
Ähnlich wie bei der Röhrentriode macht sich auch beim Arbeiten mit Transistoren das **Einstellen eines Arbeitspunktes** erforderlich.
Das bedeutet, ein linearer Bereich ist zu suchen, damit bei der Verstärkung keine oder möglichst geringe Verzerrungen auftreten. Transistoren sind zwar nichtlineare Bauelemente, jedoch gibt es Parameter-Bereiche, wo sie sich in guter Näherung linear verhalten. Diese sind im Kennlinienfeld leicht daran zu erkennen, daß die Kennlinien dort nahezu Geraden sind.
Zur Bestimmung des Arbeitspunktes bedient man sich eines Teiles des Kennlinienfeldes des Transistors. Das vollständige Verhalten eines Transistors wird durch vier Diagramme beschrieben. Zur Festlegung des Arbeitspunktes reicht die Kenntnis der $I_C - U_{CE}$-Kennlinien. Die Kennlinien werden über eine Meßschaltung gewonnen (Bild 123/1). Die Meßschaltung ermöglicht es, am Transistor verschiedene Stromstärken und Spannungen einzustellen und zu messen. Sie läßt sich für alle drei Grundschaltungen konzipieren. Die Kennlinie ist dabei die graphische Darstellung eines Zusammenhanges zwischen zwei Betriebsgrößen. Alle anderen Parameter müssen bei der Aufnahme der Kennlinie konstant gehalten werden. Bei der Aufnahme der $I_C - U_{CE}$-Kennlinie wird die Basisstromstärke als Parameter konstant gehalten. Es gilt: $I_C = f(U_{CE})$ für I_B = konstant. Eine einzelne Kennlinie reicht nicht für das Festlegen des Arbeitspunktes aus. Aus diesem Grunde ändert man den Parameter I_B von Kennlinie zu Kennlinie um einen bestimmten Wert und hält ihn für die einzelne Kennlinie konstant. Dadurch erhält man ein Kennlinienfeld (Bild 123/2). Um eine Überlastung des Transistors bei der Aufnahme der Kennlinie und beim späteren Betrieb zu vermeiden, zeichnet man zunächst die Verlusthyperbel $P_{max} = U_{CEmax} \cdot I_{Cmax}$ in das Kennlinienfeld ein.
P_{max} entnimmt man dem Kennlinienblatt des Transistors. In Tabelle 124/1 sind einige maximale Verlustleistungen von Transistoren zusammengestellt.
Die Werte für die Verlusthyperbel erhält man z. B. aus $I_{Cmax} = \frac{P_{max}}{U_{CEmax}}$. Der

Tabelle 124/1

Transistortyp	maximale Verlustleistung bei $\vartheta = 20\ °C$
Germanium pnp-Nieder-frequenz-Transistor GC 116	190 mW
Germanium-pnp-Leistungs-transistor GD 110	800 mW

Transistortyp	maximale Verlustleistung bei $\vartheta = 20\ °C$
Silizium pnp-Nieder-frequenz-transistor SC 103	250 mW
Germanium-pnp-Legierungs-transistor P 210B	45 W

Transistor darf nur so betrieben werden, daß $U_{CE} \cdot I_C < P_{max}$ ist, da es anderenfalls zur Zerstörung des Transistors kommen kann. Der Arbeitspunkt des Transistors wird so gewählt, daß

1. er im linearen Bereich der Kennlinie liegt;
2. der Bereich der Verlusthyperbel P_{max} beim Betrieb nicht berührt wird.

Dadurch, daß der Arbeitspunkt in den linearen Bereich der Kennlinie gelegt wird, erreicht man, daß am verstärkten Signal nur geringfügige Verzerrungen auftreten. Durch den Betrieb des Transistors unterhalb der Maximalleistung wird eine thermische Zerstörung des Transistors vermieden.
Der Arbeitspunkt eines Transistors wird beim Einsatz als Verstärkerbauelement durch den Lastwiderstand des Transistors bestimmt. Dieser wird häufig auch als Außenwiderstand bezeichnet. Der Lastwiderstand R_L ergibt sich aus

$$R_L = \frac{U_b - U_{CE}}{I_C}$$

und stellt eine Gerade im $I_C - U_{CE}$-Kennlinienfeld dar.
U_b bedeutet die Batterie- oder Betriebsspannung der Verstärkerschaltung. Die Gerade wird häufig als Arbeitsgerade oder Außenwiderstandsgerade bezeichnet. Die Arbeitsgerade ist bekannt, sofern zwei Punkte von ihr bekannt sind. Den ersten Punkt der Geraden erhält man für $I_C = 0$ aus der Gleichung für R_L. Die Gleichung nimmt die Form $U_b = U_{CE}$ an. Da die Betriebsspannung bekannt ist, kann diese auf der U_{CE}-Achse des Kennlinienfeldes abgetragen werden. Der zweite Punkt der Arbeitsgeraden wird willkürlich so festgelegt, daß die Arbeitsgerade folgende Bedingungen erfüllt (Bild 125/1):

1. Sie muß unterhalb der Verlusthyperbel verlaufen.
2. Sie soll eine möglichst lineare Verstärkung gestatten, d. h., die Schnittpunkte mit den einzelnen Kennlinien müssen immer den gleichen Abstand haben.
3. Sie muß genügend hohe Ausgangswechselspannungen ermöglichen, d. h., der Abstand des Arbeitspunktes von der U_{CE}-Achse muß groß genug sein.

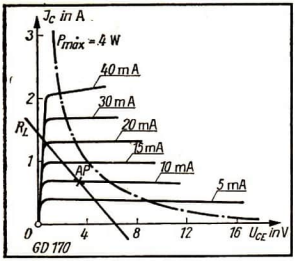


Bild 125/1 *I-U*-Kennlinien mit Arbeitsgerade
AP: gewählter Arbeitspunkt

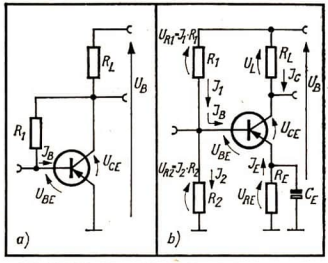


Bild 125/2 Einstellung des Arbeitspunktes eines Transistors
a) durch einen Vorwiderstand
b) durch einen Spannungsteiler

Der Arbeitspunkt des Transistors ist der Schnittpunkt der Arbeitsgeraden mit der $U_{CE} - I_C$-Kennlinie für einen bestimmten Basisstrom. Aus der Arbeitsgeraden läßt sich der für die Einstellung des Arbeitspunktes erforderliche Lastwiderstand errechnen.

- *Erklären Sie die Leistungsverstärkung eines Transistors!*
- *Welche Bedeutung hat der Arbeitspunkt des Transistors?*

Die Einstellung des Arbeitspunktes am Transistor kann durch einen Vorwiderstand (Bild 125/2a) oder einen Basisspannungsteiler (Bild 125/2b) erfolgen.

7
▼ Bestimmen Sie die $I_C - U_{CE}$-Kennlinien eines Transistors und seine Leistungsverstärkung in Emitterschaltung!

Zusammenfassung

Um Erkenntnisse über die Eigenschaften von Halbleiterdioden und Transistoren zu gewinnen, gilt es, die elektrischen Leitungsvorgänge in pn- und pnp-Übergängen zu untersuchen.
Die Darstellungsweise im vorangegangenen Kapitel zeichnet sich dadurch aus, daß der Betrachtung der Vorgänge im Kristall mit dem Teilchenmodell jeweils die energetische Betrachtung mit dem Energiebändermodell gegenübergestellt wird:

Aufgabe	Vorgänge im Kristall — Teilchenmodell	energetische Betrachtung — Energiebändermodell
Herstellung von n-Gebieten	Einbau von Donatoren	Herausbildung von Donatortermen dicht unter dem Leitfähigkeitsband
Herstellung von p-Gebieten	Einbau von Akzeptoren	Herausbildung von Akzeptortermen dicht über dem Valenzband
Herstellung von Halbleiterdioden — Zusammenlagern von n- und p-Gebieten	Diffusion der Ladungsträger, Ausbildung einer Grenzschicht	Verschiebung der Energiebänder, Herausbildung der Potentialdifferenz $\Delta\varphi$
pn-Übergang in Sperrrichtung	Absaugen der Ladungsträger an beide Pole, Verbreiterung der Grenzschicht	Potentialdifferenz $\Delta\varphi$ erhöht sich um U
pn-Übergang in Durchlaßrichtung	Überflutung der Grenzschicht mit Ladungsträgern	Potentialdifferenz $\Delta\varphi$ verringert sich um U
Herstellung von Transistoren — Zusammenlagern von 2 pn-Übergängen	Diffusion der Ladungsträger, Ausbildung von 2 Grenzschichten	Herausbildung von 2 Potentialdifferenzen $\Delta\varphi$
einer in Sperrichtung, der andere in Durchlaßrichtung geschaltet	Sperrwirkung des einen pn-Übergangs wird durch Zuführung von Minoritätsträgern des in Durchlaßrichtung geschalteten pn-Übergangs beeinflußt. Der Kollektorstrom wird über den Basisstrom gesteuert.	Variation der Potentialmulde $\Delta\varphi$ — U beeinflußt den Defektelektronenstroms des Emitters über die Durchlaßspannung



9. Herstellung von Transistoren

Bild 127/1 Transistorfertigung im VEB Halbleiterwerk Frankfurt/Oder. Dünne Platten aus Germanium-Einkristallen werden auf Läppmaschinen feinstbearbeitet. Das Ausgangsmaß der Platten vor diesem Arbeitsgang beträgt mitunter nur 0,01 mm.

Die Herstellung von Transistoren erfordert Verfahren, durch die größte Reinheit der zu verarbeitenden Stoffe und der Arbeitsstellen und größtmögliche Genauigkeit der Bearbeitungsverfahren gewährleistet werden. Außerdem muß die notwendige Dotierung mit Sicherheit im zulässigen Genauigkeitsbereich herbeiführbar sein. Solchen Verfahren liegen verschiedene physikalische und chemische Eigenschaften der Halbleiterwerkstoffe zugrunde.

Verarbeitungsbedingungen für Halbleiterwerkstoffe

Elemente und Verbindungen eignen sich als Halbleiterwerkstoffe, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

1. Sie müssen in ausreichender Menge vorhanden sein und sich in höchster Reinheit herstellen lassen.
2. Die Herstellung genügend großer Einkristalle muß ökonomisch effektiv sein.
3. Die chemische Beständigkeit und die Festigkeit müssen unter normalen klimatischen Bedingungen gewährleistet sein.
4. Der Einbau von Dotierungselementen muß einfach und reproduzierbar möglich sein, damit wahlweise n- und p-Leitung erzielt werden kann. Dabei muß ein spezifischer elektrischer Widerstand im Bereich von $\varrho = 10^{-3}\ \Omega\text{cm}$ bis $10^{3}\ \Omega\text{cm}$ erreicht werden.
5. Die Störstellenaktivierungsenergie (↗ S. 108) muß zwischen 0,01 eV und 0,05 eV liegen.
6. Die Diffusionskoeffizienten der Dotierungselemente müssen für Temperaturen unter 200 °C so klein sein, daß sich die Störstellenverteilungen beim Betrieb nicht ändern.

7. Der Bandabstand muß zwischen 0,5 eV und 2 eV betragen.
8. Die Lebensdauer der Minoritätsträger muß ausreichend groß (10 μs bis 10^3 μs) sein.

Bei der industriellen Fertigung von Bauelementen bzw. vollständiger Schaltungen werden überwiegend Germanium und Silizium im einkristallinen Zustand verwendet.
Welche Eigenschaften weisen nun Germanium und Silizium auf?

● *Begründen Sie, warum Germanium und Silizium zur Transistorherstellung verwendet werden!*

Wichtige Eigenschaften, die für die Verwendung von Silizium (Si) und Germanium (Ge) zur Herstellung von Transistoren entscheidend sind

Eigenschaft	Si	Ge
Bandabstand W in eV	1,1	0,66
Spezifischer elektrischer Widerstand bei Eigenleitung bei 300 °K in $\Omega \cdot$ cm	$2 \cdot 10^5$	47
Beweglichkeit der Elektronen in $cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$	$15 \cdot 10^2$	$18 \cdot 10^2$
Diffusionskonstante für Elektronen in $cm^2 \cdot s^{-1}$	38	98
Diffusionskonstante für Löcher in $cm^2 \cdot s^{-1}$	12	47
Härte (Mohssche Härteskala)	7 (ritzt Glas)	6,25 (mit Glas ritzbar)
maximale Betriebstemperatur in °C (Bauelemente)	150 bis 200	70 bis 90
Sperrströme	um mehrere Größenordnungen geringer als bei Bauelementen aus Ge	

Bereits im Kapitel Elektronenleitung in Festkörpern wurde festgestellt, daß für die Wirkungsweise und damit auch für die Herstellung von Halbleiterbauelementen als Ausgangsmaterial Halbleiterkristalle von höchster Reinheit notwendig sind.
Während Silizium eines der häufigsten Elemente ist (jeder Ackerboden und fast jeder Feldstein bestehen zu einem großen Teil aus Silizium), tritt Germanium nirgends in größerer Menge auf.

Germanium wird aus dem Mineral Germanit gewonnen, das man aus der Asche einiger Kohlesorten oder aus Rückständen bei der Zinkherstellung erhält. Silizium wird durch Reduktion von Quarzsand mit Kohle im elektrischen Lichtbogen gewonnen. Der Reinheitsgrad der Mineralien ist sehr niedrig, so daß zunächst eine Vorreinigung erfolgen muß.

Herstellung vorgereinigter Germanium- und Siliziumkristalle

Der erste Verfahrensschritt der chemischen Vorreinigung besteht oft in der Anwendung eines **Destillationsverfahrens**. Zu diesem Zwecke werden die Stoffe in leicht destillierbare Verbindungen überführt, z. B. $GeCl_4$, $SiCl_4$, $SiHCl_3$. Man nutzt dabei die Erscheinung aus, daß beim Verdampfen eines Stoffgemisches, z. B. $SiCl_4$ und Verunreinigungen, die Konzentrationsverhältnisse im Dampf anders sind als in der Flüssigkeit. So gelangen einige Arten von Verunreinigungen nur in sehr geringer Menge in den Dampf. Sie können deshalb durch wiederholtes Destillieren weitgehend beseitigt werden.

● *Wiederholen Sie die Verfahren der Stofftrennung (Wissensspeicher Chemie VWV 1972 S. 210)!*

Stoffe, die später bei der physikalischen Hochreinigung (↗ S. 130) nicht mehr entfernt werden können, müssen in einer chemischen Vorreinigung abgetrennt werden.
Der zweite Verfahrensschritt der Vorreinigung besteht in der Anwendung von **Zersetzungsverfahren**. Die Halbleiterverbindungen werden in die Rohstoffe für die physikalische Hochreinigung überführt. Das geschieht über chemische Reaktionen, thermische Zersetzung oder durch Kombination beider Methoden. Ein wichtiges Zersetzungsverfahren ist die **Reduktion**.

● *Wiederholen Sie den Vorgang der Reduktion! (Wissensspeicher Chemie VWV 1972 S. 73 f.)*

Um eigenleitendes Germanium mit einer Störstellenkonzentration von 1 Fremdatom auf 10^{13} Kristallatome zu erhalten, geht man von der Verbindung Germaniumtetrachlorid ($GeCl_4$) aus, das durch Destillation weitgehend gereinigt wurde. Durch Reaktion mit entionisiertem Wasser wird daraus Germaniumdioxid; dieses wird bei 110 °C und 300 °C in einem Stickstoffstrom getrocknet. Die Reduktion des Germaniumdioxids dauert mehrere Stunden. Sie findet bei Temperaturen von 675 °C statt. Als Reduktionsmittel wird Wasserstoff verwendet. Die Reduktion erfolgt in Stufen:

1. Stufe $GeO_2 + H_2 \rightarrow GeO + H_2O$,
2. Stufe $GeO + H_2 \rightarrow Ge + H_2O$.

Als Tiegel werden Quarz- oder Graphitboote verwendet. Das Reduktionsprodukt wird zu Barren verschmolzen und anschließend hochgereinigt.
Bei der Herstellung von eigenleitendem Silizium geht man entsprechend vor. Ausgangsstoffe sind die Verbindungen $SiCl_4$ oder $SiHCl_3$. Sie werden bei etwa 1100 °C mit Wasserstoff an Reinstsiliziumstäben reduziert.

$$SiCl_4 + 2\,H_2 \rightarrow Si + 4\,HCl \quad \text{oder}$$

$$SiHCl_3 + H_2 \rightarrow Si + 3\,HCl$$

- *Erklären Sie den Begriff Vorreinigung!*
- *Beschreiben Sie die wichtigsten Verfahrensschritte der Vorreinigung (Destillation und Reduktion)!*

Verfahren zur physikalischen Hochreinigung

Zonenschmelzverfahren. Die Aufgabe der Hochreinigung besteht darin, den noch zu hohen Fremdstoffgehalt der durch chemische Reinigung gewonnenen polykristallinen Halbleitermaterialien auf das erforderliche Maß zu senken. Das Verfahren beruht auf der unterschiedlichen Löslichkeit (↗ S. 43) der Fremdstoffe in der flüssigen und in der festen Phase eines Lösungsmittels bei gleicher Temperatur.
Läßt man eine Schmelze, die mit Fremdstoffen verunreinigt ist, teilweise erstarren, dann enthält z. B. der erstarrte Teil weniger Verunreinigungen als der noch in der Schmelze verbleibende. Das erklärt sich daraus, daß die Löslichkeit der Fremdstoffe in der flüssigen Phase (Schmelzzone) größer ist als in der festen.
Beim Zonenschmelzverfahren befindet sich ein Tiegel in einem mit Edelgas gefüllten Quarzglaszylinder (Bild 130/1). Das Edelgas hat die Aufgabe, eine Oxydation zu verhindern, es wird deshalb als Schutzgas bezeichnet. Tiegel und Induktionsspulen können relativ zueinander bewegt werden. Bei dem im Bild 130/1 dargestellten Verfahren werden die Induktionsspulen bewegt. Durch die Be-

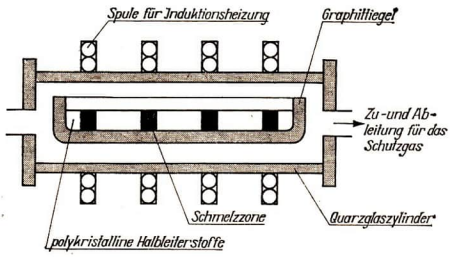


Bild 130/1 Horizontales Zonenschmelzverfahren

wegung der Induktionsspulen von links nach rechts wandern die Schmelzzonen entlang des Barrens. Die Fremdstoffkonzentration hat im zuerst erstarrten Teil abgenommen. Im zuletzt erstarrten Teil ist sie stark angewachsen.
Der beim Erstarren einer Lösung auftretende Trenneffekt (Reinigungseffekt) drückt sich in Gleichgewichtskoeffizienten k_0 aus.

$$k_0 = \frac{c_s}{c_L}$$

c_s: Löslichkeit in der festen Phase
c_L: Löslichkeit in der flüssigen Phase

Der Trenneffekt ist um so größer, je mehr sich die Koeffizienten k_0 der störenden Beimengungen von 1 unterscheiden.

Gleichgewichtskoeffizienten k_0 verschiedener Elemente in Germanium (Ge) und Silizium (Si)

Element		k_0 in Ge	k_0 in Si
Lithium	Li	0,002	0,01
Bor	B	17	0,80
Aluminium	Al	0,073	0,002
Gallium	Ga	0,087	0,008
Indium	In	0,001	$4 \cdot 10^{-4}$
Silizium	Si	5,5	1
Germanium	Ge	1	0,33
Zinn	Sn	0,02	0,016
Phosphor	P	0,08	0,35
Arsen	As	0,02	0,3
Antimon	Sb	0,003	0,023
Sauerstoff	O	—	0,5
übrige Elemente		$< 10^{-3}$	$< 10^{-3}$

● *Was können Sie über die Elemente Bor, Phosphor und Arsen hinsichtlich ihrer Entfernung aus Silizium durch das Zonenschmelzverfahren aussagen?*

In der Schmelze werden alle Verunreinigungen mit $k_0 < 1$ zu dem einen Stabende verschoben, die mit $k_0 > 1$ zum anderen Stabende. Ein Zyklus ist beendet, wenn sich das Spulensystem bzw. der Graphittiegel wieder im Ausgangspunkt befindet. Nach 10 bis 20 Zyklen ist der Mittelteil des Barrens so gereinigt, daß auf 10^{13} Germaniumatome ein Fremdatom kommt. Die beiden äußeren Teile des Barrens mit hohen Anteilen an Fremdstoffatomen werden anschließend entfernt.

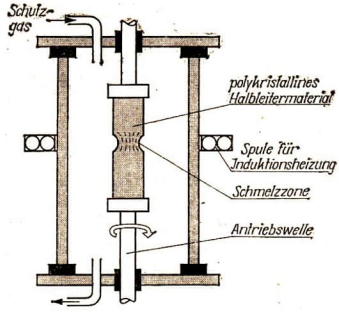


Bild 132/1 Ein Siliziumstab wird mit Hilfe einer Hochfrequenz-Induktionsspule in einem engen Bereich aufgeschmolzen. Die flüssige Zone wird durch die Oberflächenspannung gehalten. Durch eine gegenläufige Rotation der Stabteile wird die Schmelze gut durchgemischt. Der Reinigungsprozeß ist langwierig, da stets nur eine Schmelzzone längs des Stabes bewegt werden kann. Man erreicht eine Störstellenkonzentration von etwa einem Fremdatom auf 10^{12} Siliziumatome.

Das **Schwebezonenverfahren** ist die tiegelfreie Form des Zonenschmelzens. Wegen der chemischen Aggressivität des Siliziums bei seiner Schmelztemperatur von 1420 °C läßt sich kein geeignetes Tiegelmaterial finden. So würde sich z. B. bei der Verwendung von Graphittiegeln Siliziumkohlenstoff bilden

$$Si + C \rightarrow SiC\,.$$

- *Erläutern Sie das Prinzip des Zonenschmelzverfahrens!*
- *Worin bestehen die Besonderheiten des Schwebezonenverfahrens?*
- *Wiederholen Sie die Züchtungsverfahren von Kristallen (Kapitel 4)!*

Mechanische Bearbeitung von Halbleiterkristallen

Die für die Bauelementeherstellung benötigten Einkristallscheiben bzw. quaderförmigen Kristallplättchen werden aus den gezüchteten Einkristallen durch mechanisches Trennen gewonnen. Die Rohlinge müssen eine Stärke von 0,01 mm bis 0,7 mm und einen Durchmesser von 1,2 mm bis 30 mm haben. Die mechanische Bearbeitung erfolgt durch Sägen, Schleifen und Polieren. Anschließend wird meistens eine chemische oder elektrochemische Oberflächenbearbeitung vorgenommen.

Sägen. Zum Sägen der Einkristalle verwendet man überwiegend kreisrunde Sägeblätter (Trennschleifscheiben). Sie bestehen aus Kupfer-, Nickel- oder Bronzeblech. An der Peripherie der Sägeblätter befindet sich feinkörniges Diamantpulver. Als Kühlmittel wird Petroleum, Öl oder Wasser benutzt. Für den Sägevorgang werden die Einkristalle mit Siegellack o. a. auf eine aus Aluminium bestehende Trägerplatte aufgeklebt. Der Kristallstab wird senkrecht zur kristallographischen 111-Richtung (Längsachse) zerschnitten.

Schleifen. Das Schleifen erfolgt industriell mit Schleifautomaten. Als Schleifmittel werden Aufschwemmungen fein verteilten Siliziumkarbids, Borkarbids oder Aluminiumoxids in Wasser verwendet. Die Korngröße des Schleifmittels wird langsam verringert. Die immer feiner werdende Bearbeitung ist notwendig, um die geforderte Dicke der Plättchen zu erreichen und um die durch Sägen gestörte Oberflächenschicht bis zu dem unbeschädigten Kristallgitter abzutragen.

Ätzen. Die Schlußbearbeitung besteht im Abätzen der letzten störenden Schicht. Für die chemische Ätzung von Germanium wird ein Ätzmittel verwendet, das ein Oxydationsmittel, etwa HNO_3, H_2O_2 oder NaOH, ein komplexbildendes Mittel, z. B. HF und ein Lösungsmittel, etwa H_2O oder CH_3-COOH in sich vereinigt.

Die mechanische Bearbeitung von Halbleiterwerkstoffen ist mit einem Verlust an hochwertigem Material verbunden. Im fertigen Bauelement sind nur etwa 50% des Ausgangsmaterials zu finden.

Unterscheidung von Transistoren. Nach ihrem Aufbau werden zwei Arten von Transistoren, die Flächen- und Spitzentransistoren, unterschieden. Nach dem Herstellungsverfahren unterscheidet man zwischen Legierungstransistoren, Diffusionstransistoren, diffundiert-legierten Transistoren, Mesatransistoren, Planartransistoren, Epitaxialtransistoren und Transistoren, bei denen mehrere Herstellungstechniken kombiniert werden.
Eine weitere Unterscheidung der Transistoren erfolgt mit Hilfe des Typenschlüssels von Transistoren.

Typenschlüssel von Transistoren

der erste Buchstabe kennzeichnet den Halbleiterwerkstoff	S: Silizium G: Germanium
der zweite Buchstabe weist auf das Hauptanwendungsgebiet des Transistors hin	C: Niederfrequenztransistor D: NF-Leistungstransistor F: Hochfrequenztransistor L: HF-Leistungstransistor P: strahlungsempfindliches Bauelement (Fototransistor) S: Schalttransistor U: Leistungsschalttransistor
die Ziffern dienen zur Kennzeichnung der verschiedenen Typen für den gleichen Verwendungszweck	

- *Erläutern Sie die Bezeichnung folgender Transistoren:* GC 100, GD 120, GF 105, SG 207, SF 121.
- *Beschreiben Sie den Aufbau eines Spitzen- und eines Flächentransistors (↗ Brockhaus abc Physik)!*

Legierungs- und Diffusionstechnik

Mit Hilfe der Legierungs- und Diffusionstechnik lassen sich pn- und pnp-Übergänge herstellen. Transistoren, die durch diese Verfahren hergestellt wurden, heißen Legierungs- bzw. Diffusionstransistoren.

Das Legierungsverfahren. Es ist die älteste und einfachste Methode zur Erzeugung von pn-Übergängen. Bei Germanium geht man meistens von n-leitenden Germaniumeinkristallplättchen aus. Sie werden in einer zweiteiligen Graphitform beiderseitig von Pillen oder Scheiben des Dotierungsmaterials, z. B. Indium, berührt (Bild 134/1). Wegen der nötigen unterschiedlichen Störstellenkonzentration von Emitter und Kollektor wird zwischen Emitter- und Kollektordotierungsscheiben unterschieden. Sie werden an die Halbleiterkristallplättchen angedrückt. Das Verfahren läuft in zwei Etappen ab:

1. Erwärmung. Die Temperatur im Legierungsofen wird auf 550 °C erhöht. Die Indiumpillen schmelzen und lösen das Germanium auf bis zur Sättigungskonzentration an den Benetzungsstellen. Die Eindringtiefe des Indiums hängt von seiner Menge und von der Temperatur ab.

2. Abkühlung. Die Löslichkeit des Germaniums vermindert sich allmählich. Die Lösung wird übersättigt. Das überschüssige Germanium kristallisiert wieder aus, und es kommt zur Rekristallisation. Das ausgeschiedene Germanium setzt sich in gleicher Orientierung wieder im Einkristall ab. Das durch die Lösung gebildete Loch wird wieder aufgefüllt. Das in den Rekristallisationszonen wieder aufgewachsene Germanium enthält eine große Anzahl von Indiumatomen und ist damit p-leitend geworden. Bild 134/2 zeigt die Etappen bei der Bildung von pn-Übergängen in Momentbildern.

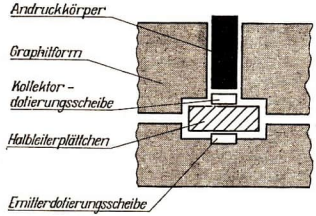


Bild 134/1 Herstellung von Legierungstransistoren in einer Graphitform

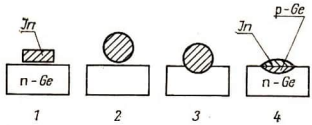


Bild 134/2 Vorgang bei der Bildung eines pn-Übergangs nach dem Legierungsverfahren
1 — Anfangsstadium, ehe die Schmelztemperatur des Indiums erreicht ist
2 — Augenblick des Schmelzens der Indiumperle
3 — Benetzung der Germaniumoberfläche und Beginn der Legierungsbildung Indium/Germanium
4 — Rekristallisierung beim Abkühlen und Bildung des pn-Übergangs

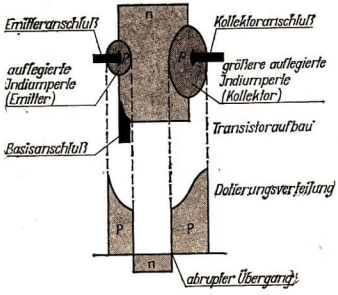


Bild 135/1 Aufbau eines Legierungstransistors und Verteilung der Dotierung — abrupte pn-Übergänge

An der Grenze zwischen dem stehengebliebenen Germaniumkristall und den Rekristallisationszonen bilden sich abrupte pn-Übergänge (Bild 135/1).
Mit dem Fortschreiten der Rekristallisation verarmt die Schmelze an Germanium, es bilden sich Germanium—Indium-Mischkristalle und schließlich reines Indium. Das Indium wird später als Kontaktstoff verwendet.

Das Diffusionsverfahren. Die pn-Übergänge werden durch Diffusion von Dotierungselementen (B, Ga, P, Sb) in das Kristallinnere zustande gebracht. Der Diffusionsprozeß erfolgt innerhalb eines Quarzrohres in einem elektrisch geheizten Ofen (Bild 135/2).
Die Arbeitstemperatur in der Diffusionsapparatur beträgt bei Germanium 700 °C bis 850 °C, bei Silizium 1000 °C bis 1300 °C. Dabei streicht ein Gas mit einer bestimmten Geschwindigkeit über den Tiegel mit den Dotierungsstoffen Oxide von Bor oder Gallium: Akzeptoren; Oxide von Phosphor oder Antimon: Donatoren (↗ S. 107). Auf der Siliziumoberfläche befindet sich eine Siliziumoxidschicht. Sie wirkt z. B. für Phosphor abschirmend, läßt Gallium jedoch leicht hindurchdiffundieren. Man erhält so pnp- oder npn-Übergänge.
Diffundieren z. B. in eine n-leitende Kristallscheibe Boratome (Akzeptoren), so entsteht eine dünne p-leitende Schicht. Der pn-Übergang liegt etwa 2 µm bis 10 µm unter der Kristalloberfläche, je nach Dauer des Diffusionsvorganges.

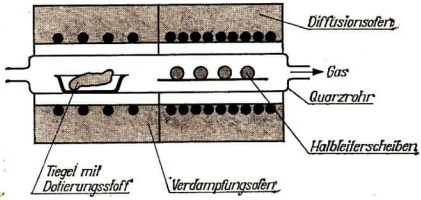


Bild 135/2
Diffusionsapparatur

Danach wird ein zweiter Diffusionsprozeß mit Phosphor (Donatoren) durchgeführt; es entsteht eine zweite dünnere Oberflächenschicht, die n-leitend ist. So ergibt sich letztlich eine npn-Schichtstruktur.
Durch die Anwendung des Diffusionsverfahrens erhält man ebene Sperrschichten mit vorbestimmbarer Eindringtiefe. Die erzeugten pn-Übergänge erfolgen allmählich. Diese Eigenschaften werden besonders bei großflächigen Bauelementen, wie Leistungstransistoren gefordert. Die Basisdicke kann sehr genau durch die Dauer des Diffusionsvorganges festgelegt werden.

Vergleich von Legierungs- und Diffusionsverfahren

Legierungsverfahren	— geringe Fertigungskosten — Kristallplättchen werden in der Größe verarbeitet, die sie als Bauelemente haben müssen — vorherbestimmte Abmessungen und Eindringtiefen sowie ebene Rekristallisationsfronten sind schwer zu erzielen steiler pn-Übergang
Diffusionsverfahren	— ebene Sperrschichten mit vorher bestimmbarer Eindringtiefe allmählicher Anstieg des pn-Übergangs

Entsprechend der unterschiedlichen Ausprägung der pn-Übergänge durch die Herstellung nach dem Legierungs- bzw. Diffusionsverfahren unterscheiden sich die Eigenschaften von Legierungs- und Diffusionstransistoren.

Eigenschaften von Legierungs- und Diffusionstransistoren

Legierungstransistor	Diffusionstransistor
— große Emitterergiebigkeit — sehr geringer Widerstand am Emitter bzw. Kollektorkontakt — große Stromdichte	— Großflächige, ebene pn-Übergänge ohne Abweichungen — geringe, gleichmäßige Basisdicke — hohe Sperrspannung mit idealen Sperrkennlinien — Miniaturabmessungen für die Hochfrequenz

Optimale Transistoreigenschaften erhält man, indem beide Verfahren miteinander verknüpft werden. Der Emitter wird z. B. durch Legierung, die Basis durch Diffusion hergestellt (Bild 137/1).

- *Welche Eigenschaften kennzeichnen den Emitter-Basis-Übergang und welche den Basis-Kollektor-Übergang, wenn der Emitter durch Legierung und der Kollektor durch Diffusion erzeugt wurde?*
- *Vergleichen Sie das Diffusions- und Legierungsverfahren*
  a) hinsichtlich der ablaufenden Prozesse,
  b) hinsichtlich der erzielbaren Resultate miteinander!

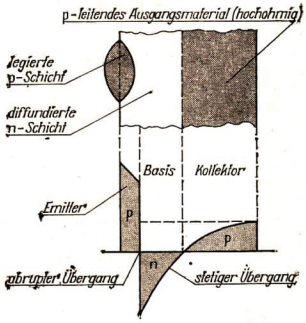


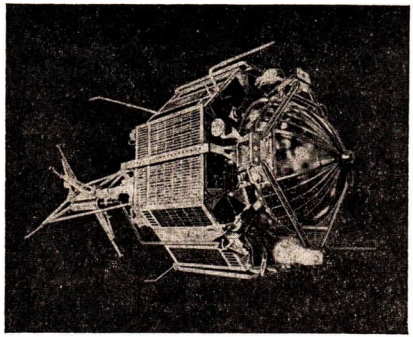
Bild 137/1 Aufbau des diffundiert-legierten Transistors und Verteilung der Dotierung

Montage von Transistoren

Im letzten Schritt der Produktion eines Transistors werden die dotierten Kristallplättchen auf Sockeln befestigt, mit Anschlußdrähten versehen und in Gehäuse eingebaut, damit sie vor äußeren Einwirkungen so weit wie möglich geschützt sind. Die Gehäuse können aus Plast, Metall oder Glas sein.
Bei Transistoren mit geringer Verlustleistung wird der Kristall auf ein kleines Montageblech gelötet. Dieses Montageblech wird durch Punktschweißen an einem der isoliert durch die Sockelplatte geführten Zuleitungsdrähte befestigt.
Im Gegensatz dazu werden bei Leistungstransistoren die Anschlußdrähte direkt an die Legierungspillen gelötet.
Bei Bauelementen mit kleinen Kontaktflächen, wie Mesa- und Planartransistoren, werden die Kontakte durch Gold- oder Aluminiumdrähte gebildet, die durch Thermokompression und Ultraschallschweißen befestigt werden. Ihre Dicke beträgt 10 µm bis 15 µm. Bei der Thermokompression werden die Drahtenden mit heißem Stempel unter großem Druck auf die aufgedampfte Metallschicht gepreßt.

- *Entwickeln Sie eine schematische Darstellung des Produktionsprozesses für die Herstellung von Transistoren!*
- *Nennen Sie Standorte der Herstellung von Transistor-Bauelementen in der DDR!*
- *In welchen Phasen des Produktionsprozesses sollte die Regelungstechnik Anwendung finden?*

Schülervortrag: Sprechen Sie über die Herstellung von Halbleiterbauelementen in der DDR! Gehen Sie dabei auf Entwicklungstendenzen und Probleme ein! Nutzen Sie die in dem Fünfjahrplan zur Entwicklung der Volkswirtschaft der DDR getroffenen Festlegungen!



10. Optische Eigenschaften von Festkörpern

Bild 138/1 Zur Untersuchung der kosmischen Strahlung, der Oberflächenbeschaffenheit von fremden Planeten und zur eigenen Energieversorgung enthalten Satelliten fotoelektrische Bauelemente. Dazu gehören z. B. Fotovervielfacher, Szintillationszähler, Solarzellen und Lasergeräte.

Wie ist die Wirkungsweise fotoelektrischer Bauelemente zu erklären?
Die Wirkungsweise fotoelektrischer Bauelemente beruht darauf, daß mit jeder elektromagnetischen Strahlung Energie auf Elektronen eines Festkörpers übertragen werden kann.
Die Vorgänge in fotoelektrischen Bauelementen lassen sich über die Betrachtung der Energieverhältnisse der Elektronen mit Hilfe des Energiebändermodells und des Energietermschemas erklären.

Absorption elektromagnetischer Strahlung durch Festkörper

Für das Verständnis fotoelektrischer Bauelemente sind Kenntnisse über die Grundlagen der Energieübertragung durch elektromagnetische Strahlung auf Elektronen erforderlich.
Trifft elektromagnetische Strahlung auf einen Festkörper, so wird ein Teil derselben an der Oberfläche reflektiert, ein Teil im Innern absorbiert und in vielen Fällen ein Teil hindurchgelassen.
Die optische Absorption ist ein physikalischer Vorgang, durch den die Intensität I_0 der einfallenden elektromagnetischen Strahlung verringert wird.

Die in der Zeit t durch die Fläche A geförderte Strahlungsenergie W wird als Intensität I bezeichnet.	$I = \frac{W}{A \cdot t}$

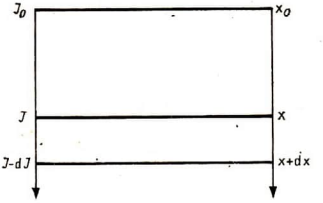


Bild 139/1 Zur Herleitung des Absorptionsgesetzes

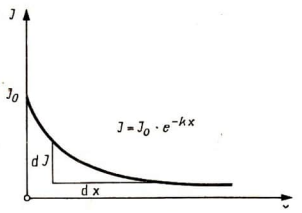


Bild 139/2 Graphische Darstellung des Absorptionsgesetzes

Die Absorption von Strahlung beruht darauf, daß die Energie der einen Körper treffenden Strahlung im Körper meist in Wärmeenergie umgewandelt wird. Dadurch erhöht sich die Temperatur des absorbierenden Körpers. Die Temperaturerhöhung des Körpers ist damit ein Maß für die absorbierte Energie.
Eine elektromagnetische Strahlung mit der Wellenlänge λ dringt in Festkörper aus verschiedenen Stoffen unterschiedlich tief ein. Bei einem Festkörper hat die Intensität der Strahlung je nach betrachteter Eindringtiefe unterschiedliche Werte. Wovon hängt die Intensität nach dem Durchdringen einer bestimmten Dicke x des Festkörpers ab? Zur Beantwortung dieser Frage soll folgendes Experiment beschrieben werden:

Wird monochromatische elektromagnetische Strahlung der Wellenlänge λ senkrecht auf die Oberfläche eines Festkörpers mit der Dicke x gerichtet, so wird ein Teil der Strahlung an ihr reflektiert. Der Rest mit der Strahlungsintensität I_0 soll in den Festkörpern eindringen. Dabei nimmt die Intensität I mit größer werdender Eindringtiefe dx ab. An der Stelle x besitzt die Intensität noch den Wert I (Bild 139/1).
Die experimentellen Ergebnisse können mathematisch dargestellt werden: Je größer die Intensität I ist, um so größer ist auch deren Änderung dI.

$$dI \sim I\,.$$

Mit wachsender Eindringtiefe stehen immer mehr Atome zur Verfügung, die angeregt werden und damit Strahlung absorbieren können. Die Intensitätsänderung, d. h. die Intensitätsabnahme dI wird mit größer werdendem dx immer größer:

$$dI \sim dx\,.$$

Daraus folgt:

$$\frac{dI}{I} \sim dx$$

Der Proportionalitätsfaktor k zwischen diesen Größen heißt Absorptionskonstante oder **linearer Absorptionskoeffizient** (↗ S. 140).

Bei den durchgeführten Überlegungen handelt es sich um die Abnahme der Intensität $-dI$. Somit ist

$$\frac{dI}{I} = -k\,dx\,.$$

Diese Gleichung, eine Differentialgleichung, kann wie folgt gelöst werden:

$$\frac{dI}{I} = (-k)\,dx$$

$$\ln I + C_1 = -kx + C_2$$

$$\ln I = -kx + C \quad \text{wobei} \quad C = C_2 - C_1$$

$$I = e^{-kx} \cdot e^{C}\,.$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung stellt das Absorptionsgesetz dar. Die Integrationskonstante C wird für die Randbedingung Intensität bei der Eindringtiefe $x = 0$ bestimmt. Für $x = 0$ ergibt sich:

$$I(0) = I_0 = e^{C}\,.$$

Setzt man diesen Ausdruck in die Gleichung für I ein, so ergibt sich die endgültige Form als **Absorptionsgesetz.**

Das Absorptionsgesetz beschreibt die Abnahme der Intensität der Strahlung längs ihres Weges im absorbierenden Material.	$I_x = I_0 \cdot e^{-kx}$

Linearer Absorptionskoeffizient. Eine Berechnungsvorschrift für die Größe k erhält man, indem man die Gleichung für das Absorptionsgesetz nach k auflöst.

Linearer Absorptionskoeffizient

Der Absorptionskoeffizient k ist gleich dem Produkt aus dem reziproken Wert des Weges, auf dem die Strahlungsintensität I_0 auf I_x abnimmt und dem natürlichen Logarithmus des Quotienten aus der Intensität I_0 vor dem Absorber und der Intensität I_x nach dem Absorber.	$k = \frac{1}{x} \cdot \ln \frac{I_0}{I_x}$

● *Leiten Sie die Einheit des linearen Absorptionskoeffizienten her!*

Der Vorgang der Lichtabsorption und damit die Abnahme der Intensität der elektromagnetischen Strahlung findet im Innern der Festkörper statt; dem-

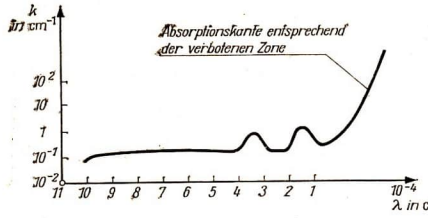


Bild 141/1 Optische Absorption in Germanium bei Zimmertemperatur

zufolge muß die Ursache dieses Vorganges mikrophysikalisch erklärbar sein.
Die einfallende elektromagnetische Strahlung gibt ihre Energie an die Atome des Festkörpers ab.

- *Was kann man mit Hilfe des Absorptionsgesetzes über eine Strahlung bei größer werdender Eindringtiefe in einen Körper aussagen?*

Grundgitterabsorption. Abweichend von elektrisch leitenden Festkörpern wird bei Halbleitern und Isolatoren im optischen Spektralbereich bei Veränderung der Wellenlänge ein starkes Anwachsen des Absorptionskoeffizienten beobachtet (Bild 141/1). Diese Stoffe weisen im Energiebändermodell eine verbotene Zone auf (↗ S. 68). Erst für Energien der Lichtquanten $h \cdot f > \Delta W$ der verbotenen Zone sind Übergänge vom Valenzband in das Leitfähigkeitsband und damit eine starke Absorption möglich. Die Messung der Absorption in Abhängigkeit von der Wellenlänge weist daher eine Grenzfrequenz f_G auf, bei der $h \cdot f$ gleich dem Bandabstand ist: $f_G = \Delta W/h$. Diese Stelle, an der eine sehr starke Änderung des Absorptionskoeffizienten auftritt, heißt Absorptionskante (Bild 141/1). Die Grundgitterabsorption besteht in der direkten Anregung der Elektronen vom Valenzband in das Leitfähigkeitsband, bei der $h \cdot f$ größer ist als der Bandabstand.

- *Stellen Sie die Grundgitterabsorption im Energiebändermodell dar!*

Ausläuferabsorption. In dem zwischen Infrarot- und Röntgen- bzw. UV-Bereich gelegenen Gebiet, auch Ausläufergebiet genannt, tritt keine wesentliche Absorption auf. Im Ausläufergebiet nimmt sie gegenüber dem Grundgitterabsorptionsgebiet um viele Größenordnungen ab. Diese Ausläuferabsorption beruht auf Elektronenübergängen an Gitterstörungen (↗ S. 76). Sie ist um so geringer, je geringer die Anzahl von Baufehlern oder fehlgeordneten Gitteratomen bzw. von Fremdatomen ist.

- *Erklären Sie die Absorptionscharakteristiken in Bild 142/1 und 142/2 mit Hilfe des Energiebändermodells!*
- *Ordnen Sie die in Bild 142/2 absorbierte Strahlung in das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung ein!*

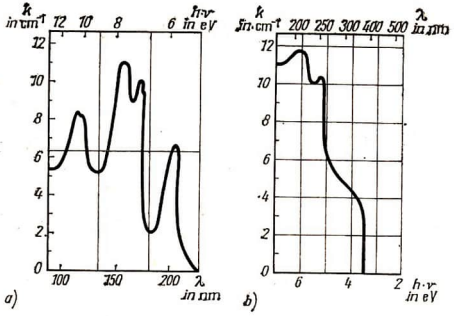


Bild 142/1 Grundgitterabsorption von
a) Kaliumjodid und
b) Zinksulfid

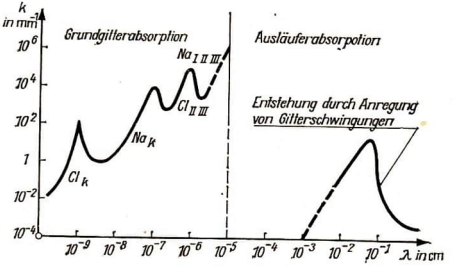


Bild 142/2 Absorption des Lichtes durch ein NaCl-Kristall

- *Leiten Sie aus $h \cdot f = W_2 - W_1$ ($W_2 - W_1$: Bandbreite) und $c = \lambda \cdot f$ den Zusammenhang zwischen Bandbreite bzw. Energietermabstand und der Wellenlänge der absorbierten elektromagnetischen Strahlung her!*
- *Vergleichen Sie die Lichtabsorption des Festkörpers mit der Lichtabsorption des freien Atoms (↗ S. 66)!*
- *Wie ist die starke Lichtabsorption von Metallen zu erklären?*

(27) Wieviel Lichtquanten der Wellenlänge $\lambda = 589{,}3$ nm sendet eine Natriumdampflampe bei einem Lichtstrom von 3 W je Sekunde aus?

(28) Aus der Oberfläche eines Silberbleches, die durch monochromatisches Licht einer Wellenlänge von 150 nm beleuchtet wird, werden Photoelektronen ausgelöst. Wie groß ist ihre Geschwindigkeit, wenn man voraussetzt, daß bei Silber der lichtelektrische Effekt erst unterhalb einer Wellenlänge von 260 nm einsetzt?

(29) Welche Wellenlänge muß ein Photon haben, das ein Zäsiumatom ionisieren soll, wenn die Ionisierungsenergie des Cs-Atoms mit 3,88 eV angegeben ist?

(30) Aus der Oberfläche eines Platinbleches, die mit Licht der Wellenlänge $\lambda = 1500 \cdot 10^{-10}$ m bestrahlt wird, treten Fotoelektronen mit einer Geschwindigkeit von 827 km s^{-1} aus. Berechnen Sie die Austrittsarbeit des Platins!

(31) Wie groß ist die Ionisierungsenergie von Natriumatomen, wenn die Ionisation von Na-Dampf durch Beleuchtung mit monochromatischem Licht bei der Wellenlänge $\lambda = 0{,}242$ µm einsetzt? Geben Sie das Ergebnis in eV an!

- *Welche charakteristischen Unterschiede zeigen linearer Absorptionskoeffizient und Intensitätsabnahme, wenn ein Lichtstrahl*
  a) auf ein lichtdurchlässiges,
  b) auf ein schwarzes, d. h. nahezu vollständig absorbierendes, ausreichend dickes Material fällt?
- *Warum ist in der Nähe der Absorptionskante die Fotoelektronenausbeute, d. h. die Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie am größten?*

Lumineszenz

Bei den *optischen Strahlungsquellen* unterscheidet man zwischen Temperaturstrahlern und selektiven Strahlern. *Temperaturstrahler* sind erwärmte feste Körper (Metalle, Oxide, Kohle), die eine kontinuierliche Verteilung eines breiten Wellenlängengemisches aufweisen, wie z. B. die Glühlampe. *Selektive Strahler* sind Atom- oder Molekülstrahler, die elektrisch oder in Flammen angeregt werden. Sie emittieren nur Strahlung bestimmter Wellenlänge (Linienspektrum), wie z. B. die Gasentladungslampe.
Neben diesen Strahlern gewinnen zunehmend „kalte Lichtquellen", die Lumineszenzleuchten an Bedeutung. Als **Lumineszenz** bezeichnet man die Emission von Licht nach vorangegangener Anregung durch Energieabsorption.
Die Lumineszenz erfolgt bei niedrigen Temperaturen. Es findet also keine thermische Lichtemission wie bei der Glühlampe statt. Deshalb wird dieser Vorgang auch als kaltes Leuchten bezeichnet. Im Energiebändermodell betrachtet, gelangen während eines Lumineszenzvorganges Elektronen aus dem Leitfähigkeitsband in energetisch tiefergelegene Energieniveaus. Bei der Lumineszenz unterscheidet man die Erscheinung der **Fluoreszenz** und der **Phosphoreszenz.** Feste, flüssige und gasförmige organische oder anorganische Stoffe leuchten nach der Anregung mit sichtbarem oder ultraviolettem Licht, Röntgen- oder Elektronenstrahlen.
Die Zeit des Nachleuchtens bei der Phosphoreszenz ist im allgemeinen größer als bei der Fluoreszenz. Sie kann bis zu mehreren Monaten dauern, aber auch so kurz sein, daß dieses Kriterium der Nachleuchtdauer für die Unterscheidung von Fluoreszenz und Phosphoreszenz versagt. Genauer kann man die beiden Erscheinungen nach dem physikalischen Vorgang und dessen Erklärung mit

dem Energiebändermodell unterscheiden. Bevor die Darstellung im Energiebändermodell erfolgen kann, müssen noch die Begriffe *Aktivatorterm* und *Haftterm* erläutert werden: Ein *Aktivator* ist eine Störstelle im Ionen- oder Halbleiterkristall, die diese zur Lumineszenz befähigt. Es können Fremdstörstellen (↗ S. 106) oder Eigenfehlstellen (↗ S. 76) sein. Nicht in allen Fällen sind Aktivatoren am strahlenden Elektronenübergang, der zur Lumineszenz führt, beteiligt. Unter Umständen absorbieren sie nur die Anregungsenergie und übertragen sie auf andere an der Lumineszenz beteiligte Bereiche. Aktivatoren beeinflussen die Wellenlänge des emittierten Lichts. Terme, die den energetischen Zustand der Aktivatorstörstellen im Energiebändermodell ausdrücken, heißen *Aktivatorterme* (↗ Akzeptor- und Donatorterme S. 110 u. 108). *Haftstellen* sind Störstellen in Halbleitern mit hoher Einfangwahrscheinlichkeit für frei bewegliche Ladungsträger einer Art. Zum Beispiel besitzt eine Elektronenhaftstelle eine hohe Einfangwahrscheinlichkeit für Elektronen aus dem Leitfähigkeitsband und eine verschwindend kleine Einfangwahrscheinlichkeit für Defektelektronen aus dem Valenzband. In den Haftstellen werden die Ladungsträger einige Zeit festgehalten. Durch thermische oder optische Anregung kann ein eingefangenes Elektron wieder ins Leitfähigkeitsband gelangen. Haftstellen können Störatome, Gitterflächen und verschiedene Oberflächenzustände sein. Im Energiebändermodell werden sie infolge ihres energetischen Zustandes als *Haftterme* dargestellt.

Fluoreszenzvorgang. Wird ein Kristall beleuchtet, (Bild 144/1) dann wird durch die Energiezufuhr des Lichtes ein Elektron vom Valenzband (V) des Kristalls in das Leitfähigkeitsband (L) gehoben (1). Dadurch entsteht im Valenzband ein Loch. Dieses wird durch ein sich im Aktivatorterm befindendes Elektron aufgefüllt (2). Das in das Leitungsband gelangte Elektron tritt mit dem Gitter des Kristalls in Wechselwirkung und gibt soviel Energie ab, daß es an den unteren Rand des Bandes sinkt (3). In das Valenzband kann es nicht fallen, da dort kein Platz ist. Bei der Fluoreszenz erfolgt nun die Rekombination von freien Elektronen mit einem unbesetzten Aktivatorterm **ohne** Zwischenschaltung eines Haftterms (4). Dabei wird Licht emittiert.

● *Weshalb ist die emittierte Strahlung (im allgemeinen) langwelliger als die anregende Strahlung?*

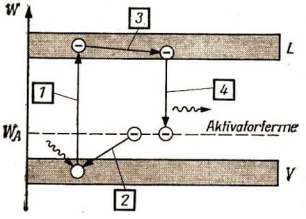


Bild 144/1 Fluoreszenzmechanismus im Energiebändermodell

An der Fluoreszenz ist jeweils 1 Atom oder Molekül (Aktivator) beteiligt. Der Fluoreszenzvorgang wird ohne Aktivierungsenergie ausgelöst. Erfolgt jedoch eine zusätzliche Energiezufuhr durch Temperaturerhöhung, so kann die Energie der durch Fluoreszenz abgegebenen Lichtquanten größer sein, als die der einfallenden. Das schnelle Abklingen der Lumineszenz heißt Auslöschung. Bei der Fluoreszenz wird sie durch eigene oder fremde Gitterbestandteile (Aktivatoren) herbeigeführt. Man unterscheidet deshalb Selbst- oder Fremdauslöschung. Die Selbstauslöschung wird durch Erhöhung der Konzentration des Aktivators oder des Lumineszenzstoffes hervorgerufen. Die Fremdauslöschung wird durch Zugabe eines zusätzlichen Fremdstoffes erzeugt. Die Wirkung der Auslöschung beruht auf der Übernahme der im Körper absorbierten Energie durch die zugeführten Stoffe.

Phosphoreszenzvorgang. Absorption (Bild 145/1), Rekombination eines Elektrons aus einem Aktivatorterm mit einem Defektelektron im Valenzband (2) und die Wechselwirkung eines Elektrons mit dem Kristallgitter (3), erfolgen ebenso wie bei der Fluoreszenz. Lumineszenzstoffe, bei denen ein Phosphoreszenzmechanismus auftritt, besitzen jedoch Haftterme. Wenn das sich im Leitfähigkeitsband befindende Elektron diffundiert, sinkt es an den Rand des Bandes und wird von einem Haftterm aufgenommen (4). Das Elektron kann ebenso wie bei der Fluoreszenz nicht ins Valenzband aufgenommen werden, da dort kein Platz frei ist. Der freie Platz im Aktivatorterm ist zu weit entfernt, so daß das Elektron nicht dorthin gelangen kann.
Beim Fehlen einer äußeren Einwirkung können Elektronen lange Zeit, je nach Art des Lumineszenzstoffes, in den Haftermen „eingefroren" bleiben. Unter Zufuhr von Energie, z. B. durch thermische Anregung, wird das Elektron in das Leitungsband gehoben (5). Dort diffundiert es zu einem unbesetzten Aktivatorterm (6). Das Elektron rekombiniert unter Emission eines Lichtquantes (7).
An der Phosphoreszenz sind jeweils 2 Atome oder Moleküle (Aktivator und Haftstelle) beteiligt. Die Auslösung des Phosphoreszenzvorganges erfordert im Gegensatz zum Fluoreszenzvorgang stets eine Aktivierungsenergie, z. B. Wärme. Hierdurch werden die in den Haftermen festgehaltenen Elektronen wieder frei gemacht. Bei vielen Lumineszenzstoffen genügt dafür bereits Zimmertemperatur. Bei Kalkspat, Rubin und Saphir erfolgt die Ausstrahlung der

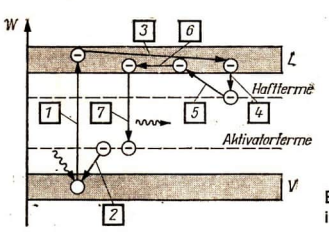


Bild 145/1 Phosphoreszenzmechanismus im Energiebändermodell

in den Haftermen gespeicherten Energie bei wesentlich höheren Temperaturen. Diese Erscheinung wird als **Thermolumineszenz** bezeichnet.

- ▼ Regen Sie einen Leuchtstoff
  a) mit ultraviolettem Licht
  b) mit radioaktiver Strahlung zur Fluoreszenz im sichtbaren Bereich an!
- ▼ Zeigen Sie experimentell die Thermolumineszenz durch Bestrahlung eines phosphoreszierenden Körpers mit ultraviolettem Licht und anschließender Erwärmung!
- ▼ Weisen Sie experimentell das ultraviolette Licht im Spektrum einer Bogenlampe bzw. UV-Lampe durch einen Phosphoreszenzstreifen nach! (Hinweise in Physikalische Schulversuche Teil VII, S. 136).
- ▼ Weisen Sie experimentell das ultrarote Licht im Spektrum einer Bogenlampe durch Schwächung der Phosphoreszenzwirkung nach (Hinweise in Physikalische Schulversuche Teil VII, S. 137).

Anwendung der Lumineszenz

Die Bedeutung der Lumineszenz in der Technik nimmt ständig zu. Zunächst wurde mit Hilfe der Lumineszenz die Struktur freier Atome und Moleküle erklärt. Seit einigen Jahren wird diese Erscheinung benutzt, um die Struktur von Festkörpern zu untersuchen. Der Lumineszenzmechanismus ist in verschiedenen lumineszierenden Festkörpern unterschiedlich und bis heute noch nicht restlos geklärt.
Die industrielle Anwendung der Lumineszenz reicht von den radioaktiven Leuchtfarben über Bildröhren, Leuchtstofflampen, Leuchtplatten (Leuchtkon-

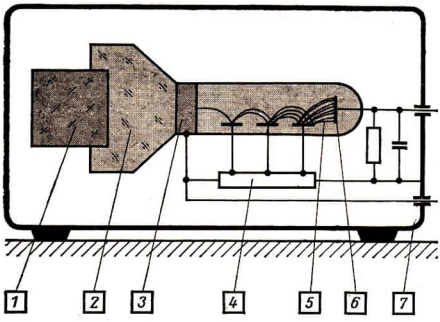


Bild 146/1 Prinzipieller Aufbau eines Szintillationszählers
1 — Szintillator (z. B. NaJ-Kristall)
2 — Lichtleiter
3 — Fotokatode
4 — Spannungsteiler
5 — Vervielfachersystem
6 — Anode
7 — lichtdichtes Gehäuse

densatoren), Bildwandlern, Bildverstärkern, Leuchtfarben der Textil- und Waschmittelindustrie, Straßenverkehrszeichen, Lumineszenz- und Laserdioden bis zu verschiedenen Kernstrahlungsdetektoren.

Leuchtstofflampe. Sie besteht aus einer Glasröhre, die evakuiert ist und mit etwas Argon und Quecksilber versehen wurde. An ihren Enden befinden sich Glühelektroden für die Zündung der Gasentladung. Die intensive ultraviolette Strahlung der Entladung wird ausgenutzt, um die Leuchtstoffe zur Aussendung von Licht im gewünschten Spektralbereich anzuregen.

Szintillationszähler. Mit diesen Geräten werden Teilchen oder Quanten der Kernstrahlung nachgewiesen (Bild 146/1). Sie bestehen aus einem Szintillator und einem Fotovervielfacher (↗ S. 159). Der Szintillator besteht aus einem Stoff, der infolge der in das Gerät eindringenden Strahlung, die eine ionisierende Wirkung aufweist, eine sichtbare Lumineszenzstrahlung aussendet. Die Intensität der Lichtblitze, die im Szintillator entstehen, ist der absorbierten Strahlungsenergie proportional. Die im Szintillator erzeugten Lichtquanten werden über einen Lichtleiter (Optisches System zur Fortleitung des Lichtes auf geraden oder gekrümmten Wegen, beispielsweise verspiegelte Rohre, bei denen die Totalreflexion ausgenutzt wird oder Glas- bzw. Plastfasern) auf die Fotokatode des Vervielfachers gebracht. Infolge des äußeren lichtelektrischen Effekts und der Sekundärelektronenemission (↗ S. 157) werden Fotoelektronen aus der Fotokatode und dem Vervielfachersystem ausgelöst. An der Anode entstehen elektrische Impulse, die eine Aussage über die Energie oder die Anzahl der Teilchen gestatten.

Bildwandler. Geräte, die mit Hilfe einer Bildwandlerröhre elektromagnetische Strahlung, z. B. infrarote Strahlen oder Röntgenstrahlen in sichtbares Licht umwandeln (Infrarotwandler, Röntgenbildwandler) heißen Bildwandler.

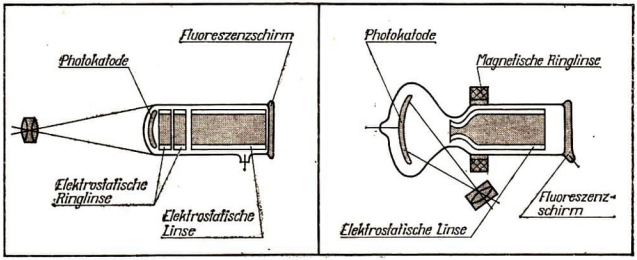


Bild 147/1 links: Bildwandler nach Zworykin mit von hinten beleuchteter Fotokatode
rechts: Bildwandler nach Schaffernicht mit von vorn beleuchteter Fotokatode

Röntgenbildwandler werden in der Medizin zur Verstärkung des Leuchtschirmbildes eingesetzt. Infrarotwandler werden u. a. in der Luftfahrt und im Militärwesen zur Verbesserung der Sichtverhältnisse bei schlechtem Wetter angewendet. Die Bildwandlerröhre setzt die optischen Bilder in Elektronenbilder um. Diese werden auf einem Leuchtschirm abgebildet. Das zu beobachtende Bild wird durch ein lichtstarkes Objektiv auf einer ebenen Fotokatode dargestellt.
Dabei kann die Katode lichtdurchlässig sein, dann fällt das Bild auf ihrer Rückseite auf (Bild 147/1 links) oder das Bild wird schräg von oben auf die Katode projiziert.
Das Bild löst entsprechend seiner Intensität die Emission von Elektronen aus. Nachdem die Elektronen ein elektrisches Linsensystem passiert haben (↗ Elektronenstrahlröhre, Lehrbuch Physik Kl. 9, S. 127), lösen sie auf einem parallel zur Katode liegenden Leuchtschirm des Elektronenbild aus, indem sie den Leuchtstoff anregen Licht auszusenden.
Wenn die Fotokatode für infrarote Strahlen empfindlich ist, kann mit der Bildwandlerröhre eine visuelle Infrarotbeobachtung vorgenommen werden. Das ist z. B. bei Nachtsichtgeräten der Fall.

Innerer Fotoeffekt

Bei Anregung eines Elektrons durch Absorption eines Photons kann es sich im Festkörper frei bewegen oder sogar aus dem Festkörper austreten.
Beim *äußeren Fotoeffekt* verlassen die angeregten Elektronen den Festkörper. Er tritt in Metallen und Metalloxiden auf (↗ Lehrbuch Physik Kl. 11, S. 41 f.; Wissensspeicher Physik S. 278 f.). Verbleiben die Elektronen nach der Anregung im Kristall und tragen dort zur Leitfähigkeit bei, so bezeichnet man den Vorgang als *inneren Fotoeffekt*. Der innere Fotoeffekt ist in Halbleitern und Isolatoren zu beobachten.
Wird ein Halbleiter mit Licht beleuchtet, dessen Photonen eine größere Energie besitzen, als die Breite der verbotenen Zone, so gelangen Elektronen aus dem Valenzband in das Leitfähigkeitsband (Bild 149/1) (↗ Grundgitterabsorption S. 141). Die Leitfähigkeit des Halbleiters nimmt zu.
Beim Übergang eines Elektrons ins Leitfähigkeitsband wird immer das Paar „Leitungselektron – Defektelektron" gebildet. Beide Partner nehmen an der Fotoleitung teil. Das bedeutet, wenn jedes absorbierte Photon 1 Elektron anregt, daß x Lichtquanten $2x$ Ladungsträger ergeben.

● *Was gilt es in diesem Zusammenhang bei dotierten Halbleitern zu beachten?*

Warum zeigen nicht alle Kristalle eine Fotoleitung?
Oft führt die Grundgitterabsorption dazu, daß zueinander gebundene Elektron-Defektelektron-Paare gebildet werden. Die Ursache für die Bindung sind elektrostatische Kräfte. Das im Valenzband entstandene Defektelektron entspricht

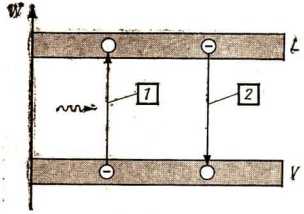


Bild 149/1 Innerer Fotoeffekt
1 — direkte Anregung von *V* nach *L*
2 — Rekombination

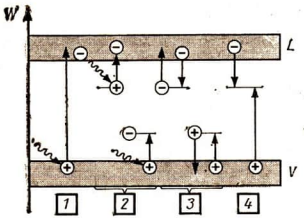


Bild 149/2 Elementarprozesse bei der Fotoleitung
1 — Grundgitterabsorption
2 — Befreiung von Ladungsträgern aus Störstellen
3 — Einfangen und Freisetzen von Ladungsträgern an Haftstellen
4 — Rekombination

dem Proton. Dieses nach außen neutrale Ladungsträgerpaar wird als **Exciton** bezeichnet. Es ist im Gitter relativ frei beweglich. Wegen seiner elektrischen Neutralität leistet das Exciton keinen Beitrag zum elektrischen Strom. Bei weiterer Energiezufuhr kann das Exciton in ein Leitfähigkeitselektron und ein Defektelektron „zerfallen".

Eine weitere Ursache dafür, daß nicht alle Kristalle Fotoleitung zeigen ist, daß die in tieferen Schichten ($> 10^{-7}$ cm) abgelösten Fotoelektronen auf dem Weg zur Oberfläche wieder absorbiert werden. Defekt- und Leitungselektronen haben oft sehr unterschiedliche Lebensdauer. Meistens wird ein großer Teil von Defekt- bzw. Leitungselektronen durch Haftstellen (↗ S. 144) eingefangen, so daß entweder n- oder p-Leitung entsteht. Die so eingefangenen Ladungsträger können nicht am Strom teilnehmen. Sie werden nach kurzer Zeit durch thermische oder optische Anregung (↗ S. 144) wieder freigemacht.

Werden Lichtquanten an Störstellen absorbiert, dann können sie aus diesen Elektronen oder Defektelektronen befreien. So werden neutrale Donatoren oder Akzeptoren durch Photonen ionisiert. Die nötige Energie ist kleiner als die zur Bildung von Elektronen-Defektelektronen-Paaren erforderliche.

Diese Energie entspricht dem Abstand der Bandkanten vom Störstellenniveau. Wenn die Bestrahlung des Kristalls mit Licht eingestellt wird, ist die Fotoleitung innerhalb 10^{-6} bis 10^{-2} s beendet. Die im Vergleich zum Zustand vor der Belichtung (entsprechend der thermischen Gleichgewichtskonzentration) überschüssigen Ladungsträger rekombinieren. Dabei erfolgt die Rekombination weniger durch direkte Übergänge vom Leitfähigkeitsband zum Valenzband, als vielmehr über Störstellenniveaus (↗ S. 106, 108 u. 110) (Bild 149/2). Vom Zusammenwirken der beschriebenen Prozesse hängt der Photonenstrom in fotoelektrischen Bauelementen ab.

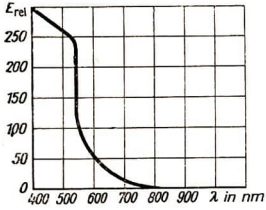


Bild 150/1 Spektrale Empfindlichkeitsverteilung einer Antimon-Cäsium-Fotokatode

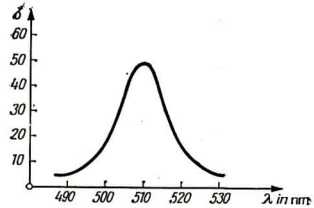


Bild 150/2 Fotoleitfähigkeit σ als Funktion der Wellenlänge

Wird ein Halbleiter, der mit einer Spannungsquelle verbunden ist (↗ Wissensspeicher Physik: allgemeines Modell des elektrischen Leitungsvorganges) mit Licht bestrahlt, so ist der Fotostrom, der aus Elektronen besteht, die wiederum von Photonen angeregt wurden, der Lichtintensität proportional.
Die graphische Darstellung des Fotostromes als Funktion der Wellenlänge heißt **spektrale Empfindlichkeitsverteilung**.
Auf der Abszissenachse kann auch die Frequenz oder die Photonenenergie abgetragen werden (Bild 150/1).
Die spektrale Empfindlichkeitskurve mündet bei der langwelligen Grenze in die Abszissenachse ein. Am wirksamsten für den inneren Fotoeffekt ist Licht, dessen Wellenlänge etwa gleich der Wellenlänge der Absorptionskante ist.
Die Fotoleitfähigkeit nimmt in Richtung der kürzeren und längeren Wellenlängen schnell ab (Bild 150/2).
Wenn bei einer angelegten Spannung nur die unmittelbar durch die Bestrahlung eines Kristalls mit Licht erzeugten Ladungsträger über die Kontakte abfließen, liegt die *primäre Fotoleitfähigkeit* vor. Bei Halbleitern werden die an der einen Elektrode abgeflossenen Ladungsträger von der anderen durch Injektion nachgesandt — *sekundäre Fotoleitfähigkeit*. Dadurch kann der primäre Fotostrom 10^4-fach verstärkt werden. Bei fotoelektrischen Bauelementen überwiegt die Elektronenleitung. Die Defektelektronen werden in hohem Maße durch Haftstellen eingefangen. Damit wird die Rekombination der Elektronen herabgesetzt und eine Verstärkung der primären Fotoleitfähigkeit ist möglich.

- *Erläutern Sie den inneren Fotoeffekt mit dem Energiebändermodell!*
- *Welche Aussagen können aus einer spektralen Empfindlichkeitsverteilung abgeleitet werden?*

Fotowiderstände sind fotoelektrische Halbleiterbauelemente, deren Wirkungsweise auf dem inneren Fotoeffekt beruht. Die Leitfähigkeit des im Fotowiderstand verwendeten Halbleiterwerkstoffes steigt bei Lichteinfall um mehrere Zehnerpotenzen. Damit wird eine dem Lichteinfall entsprechende Stromstärke meßbar.
Um einen elektrischen Strom zu erhalten, ist eine äußere Spannungsquelle nötig.

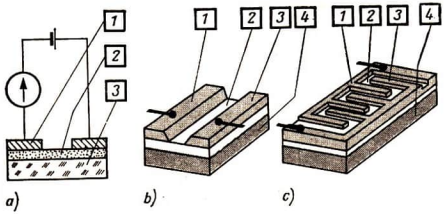


Bild 151/1 Aufbau eines Fotowiderstandes
a) Einfachste Schaltmöglichkeit
b) Spaltform
c) Mäanderform
1 — Elektrode
2 — lichtempfindliche Halbleiterschicht
3 — Elektrode
4 — Glasplatte

● *Welche Voraussetzungen müssen für einen elektrischen Strom erfüllt sein?*

Den schematischen Aufbau eines Fotowiderstandes zeigt Bild 151/1. Eine Glasplatte (4) ist mit einem lichtempfindlichen Halbleitermaterial (2), z. B. Kadmiumsulfid, Kadmiumselenid, Bleisulfid, beschichtet, auf das Metallelektroden (1, 3) aufgedampft sind.
Der Fotowiderstand wirkt unabhängig von der Stromrichtung. Das Bauelement kann deshalb auch mit Wechselspannung betrieben werden. Jedoch folgen Fotowiderstände den Lichtänderungen nicht trägheitslos. Das ist damit zu erklären, daß durch Beleuchtung des Fotowiderstandes beweglich gewordene Elektronen zu einem Teil von Störstellen eingefangen und nach Wegfall der Beleuchtung nicht sofort wieder freigegeben werden.
Die Kennwerte von Fotowiderständen sind vom verwendeten Halbleitermaterial abhängig.
Bleisulfidfotowiderstände können zum Nachweis von infrarotem Licht verwendet werden. Der Bandabstand mancher Halbleiter ist so gering, daß Photonen,

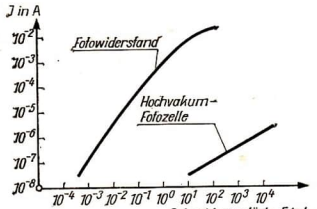


Bild 151/2 Richtwerte für den Fotostrom in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke für Hochvakuumfotozelle und für Fotowiderstand

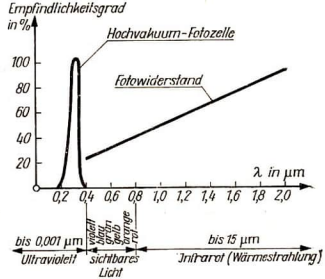


Bild 151/3 Das Lichtspektrum und die spektrale Empfindlichkeit einer Hochvakuum-Fotozelle und eines Fotowiderstandes

deren Energie im infraroten Bereich liegt, ausreichen, um Fotoleitfähigkeit hervorzurufen. Bei einem Kadmiumsulfidfotowiderstand kann man bei einer Beleuchtungsstärke von 10 Lux[1] (fotometrische Einheit: $1\ lx = 1\ lm \cdot m^{-2}$) mit einem Hellstrom von 1 µA rechnen.

- *Informieren Sie sich über die fotometrischen Größen Lichtstrom, Lichtstärke und Beleuchtungsstärke!*
- *Erklären Sie die Wirkungsweise einer Hochvakuumfotozelle (↗ Lehrbuch Physik, Kl. 9, S. 87)!*
- *Stellen Sie Vor- und Nachteile der Verwendung eines Fotowiderstandes im Vergleich zur Verwendung einer Hochvakuumfotozelle zum Lichtnachweis mit Hilfe der Bilder 151/2 und 151/3 sowie der Tabelle 152/1 zusammen!*

Tabelle 152/1 Kennwerte

Bauelement	Lichtempfindliche Fläche	Betriebsspannung	Belastbarkeit	Grenzfrequenz
Hochvakuumfotozelle	1 bis 5 cm^2	100 V	0,25 mW	10^9 Hz
Fotowiderstand	0,3 bis 3 cm^2	10 bis 100 V	50 bis 500 mW	5 Hz

Fotowiderstände werden vornehmlich zur Messung der Beleuchtungsstärke und in Lichtschrankenschaltungen angewendet.

- *Beschreiben Sie Aufbau und Wirkungsweise eines Fotowiderstandes!*

8 ▼ Stellen Sie die spektrale Empfindlichkeit eines Fotowiderstandes fest und tragen Sie die Werte in ein Diagramm ein!

9 ▼ Nehmen Sie die Fotostromstärke eines Fotowiderstandes bei konstanter Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit von der Spannung auf!

Fotodioden (Bild 153/1) sind fotoelektrische Bauelemente mit einem pn-Übergang. Der pn-Übergang befindet sich in der Nähe der Oberfläche des Stoffes, damit das nachzuweisende Licht möglichst in der Umgebung des pn-Übergangs absorbiert wird.

- *Warum muß zum Betrieb einer Fotodiode eine äußere Spannung in Sperrichtung angelegt werden (↗S. 116)?*

Bei Lichteinfall erhöht sich die Anzahl der Ladungsträger. Die so erzeugten Minoritätsträger (↗ S. 111) gelangen durch den pn-Übergang und erhöhen

[1]) Die zum Lesen günstigste Beleuchtungsstärke ist 50 lx. Für Hauptstraßen werden 10 lx als mittlere Horizontalbeleuchtung gefordert.

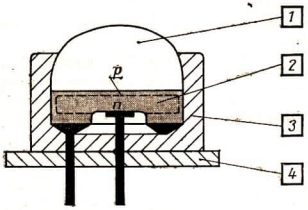


Bild 153/1 Schematischer Aufbau einer Fotodiode

1 — Fenster
2 — lichtempfindliche pn-Schicht
3 — Gehäuse
4 — Grundplatte

den Sperrstrom. Diese Erscheinung tritt besonders stark in der Grenzschicht auf. Noch empfindlicher als Fotodioden arbeiten Fototransistoren.

● *Wiederholen Sie Aufbau und Wirkungsweise eines Transistors (↗ S. 117)!*

Fototransistoren ähneln Flächentransistoren. Anstelle einer Zuleitung zur Basis befindet sich ein Fenster. Im unbelichteten Zustand fließt ein geringer Reststrom I_{0B}. Bei Belichtung wächst er rasch an.
In der Basis werden Ladungsträgerpaare gebildet. Am Kollektorübergang werden sie getrennt. Beim pnp-Fototransistor treten die optisch erzeugten Defektelektronen in den Kollektor über. Die zusätzlich frei gemachten Elektronen bleiben zurück. Somit entsteht in der Basis eine negative Raumladung. Sie bewirkt eine verstärkte Emission von Elektronen aus dem Emitter. Die Signale des nachzuweisenden Lichtes werden verstärkt (↗ S. 118).

● *Beschreiben Sie Aufbau und Wirkungsweise einer Fotodiode und eines Fototransistors!*
● *Stellen Sie Vor- und Nachteile der Verwendung eines Fototransistors im Vergleich zur Verwendung einer Fotodiode zum Lichtnachweis mit Hilfe der Bilder 153/2 und 153/3 sowie der Tabelle 154/1 zusammen!*

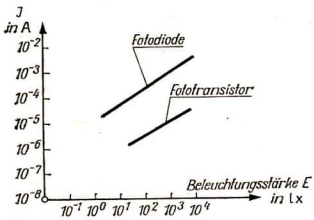


Bild 153/2 Richtwerte für den Fotostrom in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke für Fotodiode und für Fototransistor

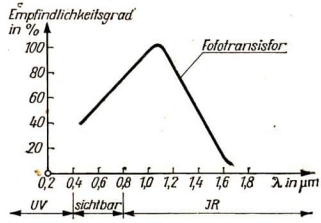


Bild 153/3 Das Lichtspektrum und die spektrale Empfindlichkeit eines Fototransistors

Tabelle 154/1 Kennwerte von Fotodiode und Fototransistor

Bauelement	lichtempfindliche Fläche	Betriebsspannung	Belastbarkeit	Grenzfrequenz
Fotodiode	0,01 cm²	10 V	50 mW	10^6 Hz
Fototransistor	0,01 cm²	5 V	50 mW	10^5 Hz

Die systematische Darstellung des Aufbaus und der Wirkungsweise fotoelektrischer Bauelemente wird mit dem *Fotoelement* fortgesetzt. Fotoelemente besitzen mindestens eine Grenzschicht (↗ S. 112). Die Wirkungsweise von Fotoelementen beruht auf dem Sperrschichtfotoeffekt.

Sperrschichtfotoeffekt

Während beim inneren Fotoeffekt (↗ S. 148) die infolge Lichtabsorption entstandenen Leitungselektronen im gleichen Medium bleiben, treten beim **Sperrschichtfotoeffekt** freigesetzte Elektronen in ein anderes Medium über. Dieses Medium ist kein evakuierter oder gasgefüllter Raum wie beim äußeren Fotoeffekt (↗ Lehrbuch Physik Kl. 11, S. 41 f.). Beim Sperrschichtfotoeffekt wirkt ein fester Körper, der mit einer lichtelektrischen Schicht in Berührung steht, als Medium.
Dieser Fotoeffekt wird an pn-Übergängen von Halbleitern und an Halbleiter-Metall-Übergängen beobachtet.
Im folgenden wird der Sperrschichtfotoeffekt am pn-Übergang eines Halbleiters betrachtet.

● *Wiederholen Sie die Erklärung der Vorgänge am pn-Übergang im stromlosen Zustand mit dem Energiebändermodell (↗ S. 112).*

Im unbelichteten Zustand fließt am pn-Übergang ohne angelegte Spannung kein Strom, da die Potentialdifferenz sich mit der Diffusionsspannung kompensiert. Wird der pn-Übergang mit Photonen bestrahlt, deren Energie ΔW größer ist als der Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband des Halbleiterkristalls, so werden fotoelektrisch Leitungs- und Defektelektronen freigesetzt. Das Feld der elektrischen Doppelschicht im pn-Übergang bewirkt eine Ladungstrennung der erzeugten freibeweglichen Elektronen und Defektelektronen. Die Elektronen werden ins n-Gebiet, die Defektelektronen ins p-Gebiet bewegt. Neben den im pn-Übergang erzeugten Elektron-Defektelektron-Paaren werden auch die im p-Gebiet erzeugten Fotoelektronen und die im n-Gebiet erzeugten Defektelektronen, wenn sie durch Diffusion in den pn-Übergang gelangen, über ihn hinwegbeschleunigt. Gegenüber dem unbeleuchteten Zustand tragen sie zur positiven Aufladung des p-Gebietes, bzw. negativen Aufladung des n-Gebietes

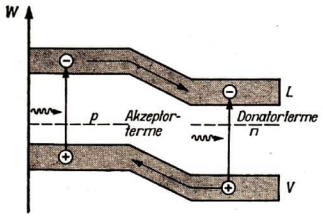


Bild 155/1 Sperrschichtfotoeffekt

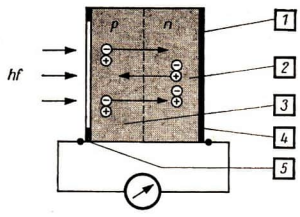


Bild 155/2 Schematischer Aufbau eines Fotoelements mit angedeuteter Bewegungsrichtung der durch den Sperrschichtfotoeffekt gebildeten Elektronen und Defektelektronen

1 — Metallkontakt
2 — einkristalline n-dotierte Siliziumscheibe
3 — p-leitende Oberflächenschicht
4 — Metallkontakt
5 — Fenster

(Bild 155/1) bei. Die dabei entstehende *Fotospannung* hebt die Energiebänder des n-Gebietes gegenüber denen des p-Gebietes bis maximal zum Ausgleich. Deshalb muß die erzeugte Fotospannung kleiner sein als die Potentialdifferenz $\Delta\varphi$ im unbelichteten Zustand.

Die fotoelektrische Erzeugung freier Elektronen und beweglicher Defektelektronen im Halbleiter ist nur bei Absorptionsvorgängen vom Valenz- ins Leitfähigkeitsband möglich. Damit ist die Entstehung einer Fotospannung an die Grundgitterabsorption (↗ S. 141) gebunden. Die langwellige Absorption (Ausläuferabsorption ↗ S. 141) durch Störstellen erzeugt nur Ladungsträger eines Vorzeichens und damit Fotoleitfähigkeit, jedoch keine Fotospannung.

Fotoelement. Der Sperrschichtfotoeffekt wird beim Fotoelement direkt zur Erzeugung eines der absorbierten Strahlungsintensität proportionalen Fotostroms ausgenutzt.

Fotoelemente bestehen z. B. aus einer einkristallinen n-dotierten Siliziumscheibe mit einer p-leitenden Oberflächenschicht (Bild 155/2). Diese wird durch einseitige Diffusion von Akzeptoren, meist Boratomen erzeugt. Die beiden Zonen erhalten Metallkontakte (Elektroden). Diese müssen so ausgewählt sein, daß es nicht zu einem Halbleiter-Metall-Sperrschichteffekt kommen kann.

Die Lichtstrahlen dringen in das freiliegende p-Gebiet ein und erzeugen Elektronen-Defektelektronen-Paare.

Wird das Fotoelement, welches dicht unter seiner Oberfläche einen pn-Übergang besitzt, mit den Elektroden der p- und n-Schicht über ein Strommeßgerät verbunden und einer Strahlung ausgesetzt, so zeigt dieses einen der Beleuchtungsstärke proportionalen Fotostrom an. Ist der Stromkreis geöffnet,

so entwickelt sich bei der Beleuchtung eine Potentialdifferenz zwischen den beiden Elektroden. Mit zunehmender Beleuchtungsstärke nähert sich diese Fotospannung einem Grenzwert. Beim Silizium- und Selen-Fotoelement beträgt er 0,6 V und beim Galliumarsenid-Fotoelement sogar 0,9 V.

● *Wie ist das Auftreten eines Grenzwertes der Fotospannung bei zunehmender Beleuchtungsstärke zu erklären?*

Eine Proportionalität zwischen Fotostrom und Beleuchtungsstärke ist nur gewährleistet, wenn ein Außenwiderstand $R_a = 0$ vorliegt. Der Wirkungsgrad von Fotoelementen hängt von ihrer spektralen Empfindlichkeitsverteilung ab. Bei einem Silizium-Fotoelement besteht eine Übereinstimmung des Maximums der spektralen Empfindlichkeit mit der Emissionskurve der Sonnenstrahlung.

Für die Energieversorgung kleiner Transistorempfänger werden mitunter Solarbatterien verwendet, die aus etwa 14 bis 40 Silizium-Fotoelementen bestehen. Ihre Fläche beträgt einige Quadratzentimeter. Sie liefern bei einer Spannung von 5 bis 15 V Ströme bis 20 mA. In der Literatur werden Fotoelemente aus Kadmiumsulfid mit einer Fotospannung von etwa 2,5 V und einem Wirkungsgrad von 18% beschrieben, d. h. sie geben etwa 18 W/dm² beleuchteter Oberfläche ab.

Für Fotoelemente auf Siliziumbasis beträgt der Wirkungsgrad der Energieumwandlung von auffallender Lichtenergie in elektrische Energie etwa 11%.

● *Worin besteht die Besonderheit eines Fotoelementes gegenüber einem Fotowiderstand, einer Fotodiode und einem Fototransistor?*
● *Beschreiben Sie die Wirkungsweise eines Fotoelements mit Hilfe Bild 155/1!*

Mit Fotoelementen werden nur sehr kleine Fotospannungen erzeugt. Ohne eine Hilfsspannung werden Fotoelemente als Spannungsquelle benutzt, mit Hilfsspannungen können sie als Fotodiode verwendet werden.

▼ Weisen Sie experimentell die Abhängigkeit des Fotostromes bei einem Selenfotoelement SeH 13 × 26 von der Beleuchtungsstärke nach!
▼ Zeigen Sie mit Hilfe von Filtern aus dem Schülerexperimentiergerät „Optik" die Abhängigkeit des Sperrschichtfotoeffektes von der Wellenlänge!
▼ Zwischen ein Selenfotoelement SeH 13 × 26 und eine Lichtquelle wird eine in der Drehzahl steuerbare Lochblende gesetzt und das Selenfotoelement mit einem Drehspulmeßgerät verbunden.
Untersuchen Sie die Abhängigkeit der angezeigten Fotospannung von der Frequenz der Lichtunterbrechungen!
▼ Leiten Sie experimentell das Lambertsche Entfernungsgesetz über die Stärke des Fotostromes her. (Verwenden Sie die Hinweise in Physikalische Schulversuche Teil VII, S. 150 f.)!
▼ Vergleichen Sie die Lichtstärken zweier Glühlampen (Verwenden Sie die Hinweise in Physikalische Schulversuche Teil VII, S. 156 f.)!

Halbleiterfotoelemente haben für Belichtungsmesser und Solarzellen eine große Bedeutung.

- *Beschreiben Sie Aufbau und Wirkungsweise von Belichtungsmesser und Solarzellen! Verwenden Sie Brockhaus abc Physik oder ein anderes Lexikon!*
- *Vergleichen Sie äußeren, inneren und Sperrschichtfotoeffekt mit Hilfe des Energiebändermodells! Welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede hinsichtlich Ursache und Wirkung treten bei den Fotoeffekten auf?*

Messung von Lichtquanten

Fotovervielfacher sind Elektronenröhren mit Verstärkereigenschaften. Sie gehören zu den empfindlichsten Wandlern von Lichtenergie in elektrische Energie. Sie erreichen eine etwa 10^8fache Verstärkung des ursprünglichen Fotostromes und sind empfindlich genug, um einzelne Photonen nachzuweisen.
Die Wirkungsweise des Fotovervielfachers beruht auf dem Zusammenwirken des äußeren Fotoeffekts und der Sekundärelektronenemission.

Sekundärelektronenemission. Wird ein Festkörper, ein Metall, Halbleiter oder Isolator, mit einem Elektronenstrahl bestrahlt, so können Sekundärelektronen entstehen. Wie das zu erklären ist, soll am Beispiel eines Halbleiters dargestellt werden. Die Elektronen des Elektronenstrahls dringen je nach ihrem Energiezustand bis zu einer bestimmten Tiefe in einen Kristall ein. Dabei stoßen sie mit Gitteratomen zusammen und ionisieren diese unter Abgabe von Energie. Je größer die Energie des eingeschossenen Elektrons ist, desto tiefer kann es in den Kristall eindringen und desto häufiger kann es Atome ionisieren. Jeder ionisierende Stoß bewirkt, daß ein Elektron vom Valenz- ins Leitungsband gehoben wird. Damit kann jedes primär in den Kristall eindringende energiereiche Elektron (Primärelektron) einen ganzen Schwall von Elektronen im Leitfähigkeitsband (Sekundärelektronen) erzeugen. Diese freigesetzten Elektronen erhöhen die Leitfähigkeit.
Jedoch besitzen einige dieser Elektronen Energien, die größer sind als die Austrittsarbeit (↗ Wissensspeicher Physik, S. 279). Wenn ihr Geschwindigkeitsvektor auf die Kristalloberfläche zeigt, können die Elektronen aus dem Material austreten. Das können sowohl Sekundärelektronen aus dem Leitfähigkeitsband sein, als auch Primärelektronen, die durch eine starke Ablenkung am Gitter von ihrer Einstrahlungsrichtung abgekommen sind (Bild 158/1). Außerdem gibt es noch Elektronen, die nicht in die Oberfläche eindringen, sondern an ihr reflektiert werden.
Damit kann ein einzelnes einfallendes Elektron bewirken, daß mehrere Elektronen den Festkörper verlassen.
Der Vorgang, bei welchem je einfallendem Elektron mehr als ein Elektron aus der Kristalloberfläche austritt, heißt **Sekundärelektronenemission.**

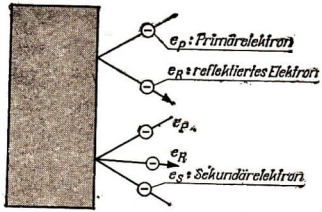


Bild 158/1 Sekundärelektronenemission

- *Stellen Sie die Sekundärelektronenemission mit Hilfe des Energiebändermodells dar!*

Zur Charakterisierung der Sekundärelektronenemission dient die Ausbeute oder der

Sekundäremissionskoeffizient η.

Der Sekundäremissionskoeffizient η ist gleich dem Verhältnis der Anzahl der Sekundärelektronen n_s zur Anzahl der anregenden Primärelektronen n_p.	$\eta = \frac{n_s}{n_p}$

Messungen zeigen, daß η von der anregenden Energie der Primärelektronen, vom Einfallwinkel, vom Stoff und vom physikalischen Zustand der Oberfläche abhängt, jedoch von der Intensität des Primärelektronenstrahls unabhängig ist. Metalle haben einen geringen Sekundäremissionskoeffizienten. Das rührt daher, daß Metalle viele Leitungselektronen besitzen. Die Sekundärelektronen stoßen oft mit den Leitungselektronen zusammen und geben ihre Energie an diese ab. Somit reicht die Energie der Sekundärelektronen kaum aus, um die Metalloberfläche zu verlassen. Bei Halbleitern und Isolatoren sind wenig Leitungselektronen vorhanden. Die Wahrscheinlichkeit, daß die Sekundärelektronen die Kristalloberfläche verlassen, ist größer als bei Metallen.

Verhältnisse bei der Sekundärelektronenemission in Metall und Halbleiter

Eigenschaft	Metall	Halbleiter
Dichte der Leitungselektronen	groß	klein
Anzahl der Zusammenstöße der Sekundärelektronen mit Leitungselektronen	groß	klein
η	klein	groß

● *Welche Verhältnisse liegen bei einem Isolator hinsichtlich der Sekundärelektronenemission vor?*

In fast allen elektronischen Apparaturen, in denen sich frei bewegende, geladene Teilchen mit Festkörpern zusammenstoßen, tritt Sekundäremission auf. Dadurch werden Meßergebnisse oftmals verfälscht, und man versucht diese Erscheinung auszuschalten, indem die Sekundärelektronen durch ein schwaches Gegenfeld zur Umkehr gezwungen werden.
Im Vergleich zu anderen Arten der Elektronenemission (thermische Emission, Fotoeffekt usw.) ist die Sekundärelektronenemission wegen ihrer relativen Unabhängigkeit vom zu untersuchenden Stoff von besonderer Bedeutung. Die Werte von η_{max} betragen etwa 0,5 bis 20. Die geringe Abhängigkeit der Sekundärelektronenemission von der Austrittsarbeit des Stoffes hat seine Ursache in der relativ hohen Energie der Primärelektronen und der im Vergleich zur Austrittsarbeit großen mittleren Energie der Sekundärelektronen (≈ 10 eV).

Fotovervielfacher. Die Sekundärelektronenemission wird im Fotovervielfacher angewendet (Bild 159/1).
Fällt Licht auf die Fotokatode, so werden dort Primärelektronen infolge des äußeren Fotoeffekts herausgelöst. Bei einer Spannung von 100 bis 150 V werden sie zur ersten Dynode gelenkt. Die auf die erste Dynode aufprallenden Elektronen schlagen aus dieser ein Vielfaches an Sekundärelektronen heraus. (Sekundärelektronenemission). Die Elektronen werden von Dynode zu Dynode durch das elektrische Feld bewegt. Als Folge der Sekundärelektronenemission wird am Ende ein großer Elektronenstrom von der Auffanganode aufgenommen. Durch diese Vorrichtung kann auch bei nur einem einzigen Primärteilchen eine so große Ladung zur Auffanganode gelangen, daß ein gut meßbarer Impuls erhalten wird. Damit ist der Fotovervielfacher zur Teilchenzählung geeignet. Die Anodenstromstärke I_A ist der Fotostromstärke I_F proportional.

Wird der Fotovervielfacher zum Messen sehr schwacher Lichtströme verwendet, dann muß der Strom, der ohne Beleuchtung der Fotokatode auftritt, der **Dunkelstrom**, beachtet werden. Er setzt sich beim Fotovervielfacher aus folgenden Komponenten zusammen:
– Isolationsströme
– Ströme kalter Elektronenemission infolge des starken elektrischen Feldes

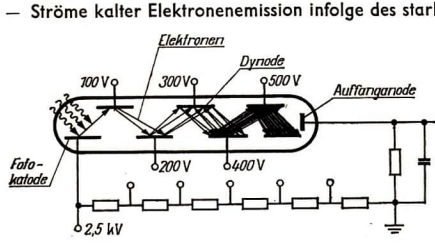


Bild 159/1 Schematische Darstellung des prinzipiellen Aufbaus eines Fotovervielfachers

- Ströme infolge der Ionisierung des Restgases im Glaskolben
- Fotoströme von Katoden und Dynoden infolge von Streulicht
- Ströme infolge der thermischen Emission von Elektronen aus den Dynoden und der Fotokatode.

In hochwertigen Fotovervielfachern werden die ersten vier Komponenten durch entsprechende Konstruktion vermieden. Die thermische Emission von Elektronen bei Zimmertemperatur aus der Fotokatode und unter Umständen aus den Dynoden als Quelle des Dunkelstroms kann durch den Einsatz solcher Stoffe verringert werden, deren spektrale Empfindlichkeit nicht über große Wellenlängen reicht. Andere Möglichkeiten der Verringerung sind die Verkleinerung der Katodenfläche oder deren Kühlung. Bei der Verwendung von Fotovervielfachern in Szintillationszählern (↗ S. 146) werden jedoch große Fotokatoden bis zu 5 cm^2 benötigt, um das im Phosphor entstehende diffuse Licht auszunutzen. Es wird deutlich, daß die thermische Emission von Elektronen verringert, jedoch nicht völlig beseitigt werden kann.
Die Elektronen treten infolge der thermischen Emission unregelmäßig aus der Katode aus. Das äußert sich in Schwankungen der Spannung bzw. der Stromstärke. Die auftretenden Schwankungen haben ihre Ursache in der Quantennatur der Ladungen, die durch thermische Emission aus der Fotokatode austreten. Es werden elektromagnetische Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen und Amplituden erzeugt. Die Schwankungen wirken wie das unregelmäßige Auftreten einer Wechselspannung; sie können über einen Lautsprecher als **Rauschen** hörbar gemacht werden. Rauschen ist eine Folge von akustischen oder wie im betrachteten Fall elektromagnetischen Wellen mit unterschiedlicher Amplitude und Frequenz. Das Rauschen des Fotovervielfachers wird noch durch den lichtelektrischen Emissionsstrom bei Beleuchtung erhöht. Der Rauschstrom ist dem Fotostrom proportional. Das Rauschen bestimmt die Grenzempfindlichkeit eines Fotovervielfachers. Es können nur Fotospannungen angezeigt werden, die über der Rauschwechselspannung liegen. Im Gegensatz zu den Verstärkerröhren mit Glühkatoden zeichnen sich die Fotovervielfacher mit kalter Fotokatode durch geringes Rauschen aus. Deshalb können mit ihnen bereits Fotoströme, die von einigen Photonen ausgelöst werden, nachgewiesen werden.

- *Informieren Sie sich über weitere Anwendungen des Fotovervielfachers!*
- *Welche Schlußfolgerungen lassen sich aus den Charakteristika eines Fotovervielfachers (Bild 161/1 und Tabelle 160/1) für seinen Einsatz ziehen?*

Tabelle 160/1 Kennwerte eines Fotovervielfachers

Bauelement	lichtempfindliche Fläche	Betriebsspannung	Belastbarkeit	Grenzfrequenz
Fotovervielfacher	10 cm^2	10^3 bis $2 \cdot 10^3$ V	500 mW	10^8 Hz

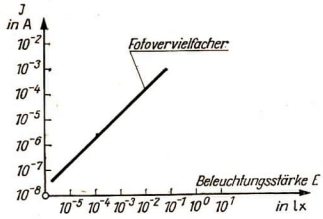


Bild 161/1 Richtwerte für den Fotostrom in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke

Zusammenfassung

Die Wirkungsweise fotoelektrischer Bauelemente wie Hochvakuum-Fotozelle, Fotodiode und Fototransistor beruht darauf, daß elektromagnetische Strahlung Energie an Elektronen abgibt. Dadurch kann die Energie einzelner Elektronen so groß werden, daß sie sich im Kristall frei bewegen (Fotowiderstand) oder ihn verlassen können (Fotovervielfacher).

- *Wiederholen Sie Aufbau und Wirkungsweise dieser Bauelemente!*
- *Entscheiden Sie, auf welchen der Fotoeffekte die Wirkungsweise der einzelnen fotoelektrischen Bauelemente beruht!*
- *Erläutern Sie die verschiedenen Fotoeffekte mit dem Energiebändermodell!*

Laser

Angeregte Teilchen (Atome, Moleküle, Ionen) können auf verschiedene Weise in einen energetisch niederen Zustand überführt werden. Zwei wesentliche Möglichkeiten seien dargestellt:

1. Der Übergang von Teilchen in einen energetisch niederen Zustand erfolgt ohne äußere Einflüsse: **spontane Emission** (Bild 162/1).
2. Der Übergang von Teilchen in einen energetisch niederen Zustand erfolgt unter Zufuhr äußerer elektromagnetischer Strahlung: **induzierte** (erzwungene oder stimulierte) **Emission** (Bild 162/1).

Spontane Lichtemission. Bei der spontanen Emission werden von den Atomen im angeregten Zustand u. a. Photonen ausgesandt. Dieser Vorgang verläuft völlig unregelmäßig. Die Zeit, nach der sich ein bestimmtes angeregtes Atom wieder im Grundzustand befindet, kann nicht angegeben werden, obwohl die Zeit des angeregten Zustandes bestimmbar ist. Es handelt sich also um einen Vorgang, der nur statistisch erfaßbar und bestimmbar ist. Betrachtet

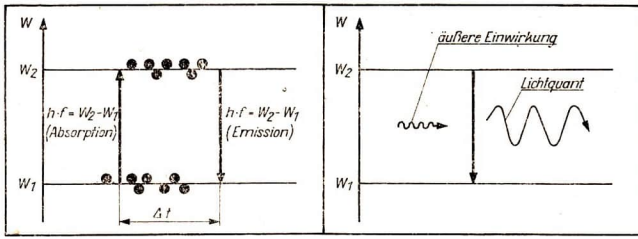


Bild 162/1 links: Spontane Emission rechts: Induzierte Emission

man einen Festkörper, so emittieren die Atome unabhängig voneinander Photonen. Die Folge ist, daß sich das ausgesandte Licht aus zahllosen kurzen Wellenstücken zusammensetzt, die zueinander keine bestimmte Phasenlage besitzen, d. h. die Photonen gleicher Energie befinden sich nicht in derselben Phase. Die durch spontane Emission ausgesandte Strahlung ist **inkohärent** (Bild 162/2). Da diese Strahlung sich aus einem breiten Frequenzgemisch zusammensetzt, besitzt sie ein breites Spektrum.

Induzierte Lichtemission. Bei der induzierten Emission treten Photonen der äußeren elektromagnetischen Strahlung mit den angeregten Atomen in Wechselwirkung. Dadurch wird die Emission weiterer Photonen erzwungen. Das geschieht in jedem Einzelfall, bevor die angeregten Teilchen ihre Photonen durch spontane Emission ausstrahlen. Die durch solche Vorgänge entstandenen Photonen sind nicht von denen, die diesen Vorgang auslösten, unterscheidbar. Sie haben gleiche Wellenlänge und Phase.
Die durch induzierte Emission erzeugte Strahlung ist **kohärent** (Bild 162/2) und besitzt demzufolge ein schmales Spektrum. Eine Anlage, in der eine induzierte Strahlung kohärenten Lichtes erzeugt werden kann, bezeichnet man als **Laser**. Die Intensität der induzierten Emission hängt von der Besetzung des an der Emission beteiligten oberen Energieniveaus ab. Absorption und induzierte

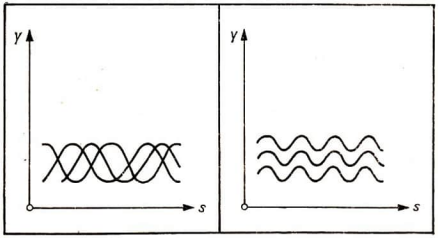


Bild 162/2 Inkohärente Wellen und kohärente Wellen

Emission treten gleichzeitig auf. Bei größerer Besetzung des unteren Energieniveaus überwiegt die Absorption. Bei größerer Besetzung des oberen Niveaus herrscht induzierte Emission vor, und die eingestrahlte elektromagnetische Welle wird mit der Energie, die gleich der Differenz der beteiligten Energieniveaus ist, *verstärkt*.

Unter normalen Bedingungen ist die Besetzung des oberen Energieniveaus geringer, als die des unteren. Für eine Lichtverstärkung muß die Besetzung des oberen Niveaus größer sein, als die des unteren (induzierte Emission herrscht vor). Man bezeichnet diesen Zustand als **Besetzungsumkehr.**

Das Erzeugen einer solchen Besetzungsumkehr ist die Hauptaufgabe eines jeden Lasers. Das Zuführen der nötigen Energie zum Erreichen der Besetzungsumkehr nennt man das Pumpen des Lasers. Das ist z. B. mit Hilfe einer leistungsstarken Lichtquelle (z. B. Xenonblitzlampe) möglich. Dabei werden Atome aus dem Grundzustand in den angeregten Zustand gepumpt.

Erzeugung einer Besetzungsumkehr. Durch Pumpen wird in einem Stoff ein oberer energetischer Zustand (W_3) erzeugt. Dazu wird Licht der Energie $h \cdot f = W_3 - W_1$ eingestrahlt. W_3 ist der angeregte Zustand der betrachteten Atome. Der Übergang von W_3 nach W_2 ist strahlungslos (Bild 163/1). Die angeregten Teilchen geben einen Teil ihrer Energie an das Kristallgitter in Form von Wärme ab. Das Pumpen muß solange dauern, bis mehr als die Hälfte der Atome den Zustand W_2 angenommen haben. Zwischen W_2 und W_1 kann eine Strahlung induziert werden. Diese Strahlung, das erzeugte Laserlicht, besitzt eine scharfe Spektrallinie (Bild 163/1).

Erzeugung kohärenter Strahlung. Zur Spektralanalyse und für viele andere Zwecke wird kohärentes Licht benötigt. Sollen Atome im angeregten Zustand (W_2) kohärentes Licht abgeben, dann müssen sie zuvor in einem Strahlungsfeld genau bestimmter Frequenz angeregt werden. Diese Bedingung wird durch einen Resonator realisiert. Er kann z. B. aus 2 planparallelen Spiegeln bestehen.

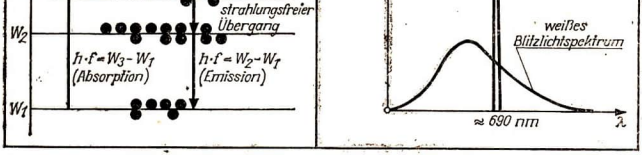


Bild 163/1 links: Optisches Pumpen in einem System mit 3 Energieniveaus
W_1—W_3: Pumpstrahlung (Absorption von Licht)
W_2—W_1: Laserstrahlung (Emission von Licht)
rechts: Spektrum der Xenonblitzlampe und des erzeugten Laserlichts

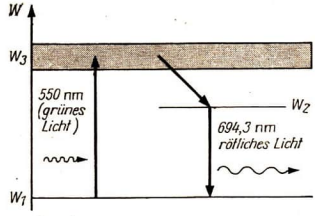


Bild 164/1 Energieniveauschema und Übergang der Chrom-Ionen in Rubin

Der Abstand der Spiegel beträgt ein Vielfaches von $\lambda/2$, darum bilden sich zwischen ihnen stehende Wellen aus. Dadurch kann das Strahlungsfeld über längere Zeit mit den angeregten Atomen in Wechselwirkung treten.

Festkörperlaser. Erzielt man die Besetzungsumkehr in den Energieniveaus von Atomen eines Festkörpers, dann bezeichnet man die Anlage als Festkörperlaser. Der Rubinlaser ist der technisch bedeutungsvollste und zugleich der am längsten (seit 1960) bekannte Festkörperlaser.
Rubin ist ein Aluminiumoxid (Al_2O_3), in dessen Kristallgitter etwa 0,5% der Aluminiumatome durch Chrom-Ionen (Cr^{3+}) ersetzt sind. Das Energieniveau der Chrom-Ionen (Bild 164/1) zeigt die Eignung dieses Stoffes zum Erzeugen der angestrebten Besetzungsumkehr.

● *Beschreiben Sie an Hand von Bild 164/1 und Ihrer bereits erworbenen Kenntnisse, was mit den Chrom-Ionen geschieht, wenn grünes Licht der Wellenlänge 550 nm eingestrahlt wird!*

Die günstigsten Lichtquellen zum optischen Pumpen sind solche, bei denen das Emissionsmaximum der Lichtquelle mit der Energie der Pumpniveaus bzw. -bänder übereinstimmt. Für den Rubinlaser wird grünes Licht $\lambda = 550$ nm benötigt. Als Lichtquellen werden Xenon- und Quecksilberhochdrucklampen bzw. Wolframlampen verwendet. Damit die Energie der Lichtquelle maximal ausgenutzt wird, auf den Kristall fällt und nach innen dringt, ist die Lichtquelle mit einem **Reflektor** gekoppelt (Bild 164/2).

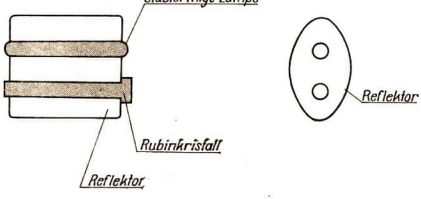


Bild 164/2 Reflektorsystem mit elliptischem Zylinder
Das Reflektorsystem besteht aus einem elliptischen Zylinder, in dessen beiden Brennpunktlinien sich ein Rubinstab und eine stabförmige Lichtquelle befinden. Der Zylinder wird durch spiegelnde Deckel verschlossen.

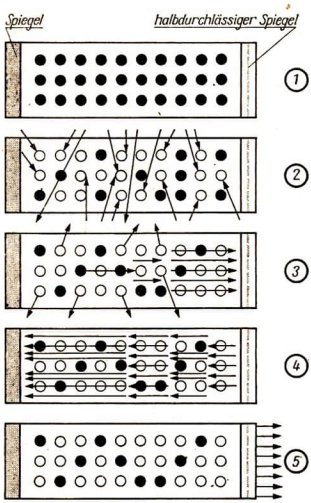


Bild 165/1 Vorgänge im optischen Resonator
Die Chrom-Ionen des Rubins befinden sich zunächst im Grundzustand (1). Das inkohärente Pumplicht bringt die meisten Ionen in den angeregten Zustand (2). Nach einer bestimmten Zeit erfolgt für einige Ionen spontane Emission. Alle die entstandenen Photonen, die sich nicht entlang der Stabachse bewegen, verlassen den Rubinstab (3). Infolge induzierter Emission löst jedes Photon, das sich entlang der Stabachse bewegt, aus jeweils einem angeregten Nachbarchrom-Ion ein weiteres Photon aus usw. Dieser Prozeß wächst lawinenartig an. Nach Reflexion am Resonatorspiegel durchläuft die Photonenlawine wiederum den Rubinstab. Weitere Photonen werden herausgelöst. Die Photonenlawine wird weiter verstärkt (4). Nach mehrmaligem Hin- und Herlaufen, d. h. beim Erreichen einer bestimmten Photonendichte, tritt entlang der Rubinstabachse ein Lichtbündel aus dem halbdurchlässigen Spiegel (5) aus.

Je nach Einstrahlungsart des Lichtes unterscheidet man Laser für Impulsbetrieb und Dauerbetrieb. Die meisten Rubinlaser arbeiten im Impulsbetrieb. Der anregende und der emittierte Impuls sind etwa um 300 μs verzögert. Das ist die Zeit, die notwendig ist, um die Niveaus unterschiedlich zu besetzen. Die emittierte Impulsenergie kann 10 bis 100 Ws betragen. Laser dieser Art verbrauchen eine Energie von 150 Ws und besitzen eine Leistungsdichte von $10^3\,W\,cm^{-2}$ bei einer Impulsdauer von 10^{-3} s. Die Ausgangsleistungen im Impulsbetrieb sind wesentlich größer als im Dauerbetrieb.

● *Schätzen Sie den Wirkungsgrad eines Rubinlasers ab!*

Die intensive Wechselwirkung zwischen den Atomen erreicht man im optischen Resonator, der aus zwei Spiegeln besteht und von denen einer halbdurchlässig ist. Sie sind an den beiden Stirnflächen des Rubinkristallstabes angebracht. Innerhalb des optischen Resonators laufen mehrere Prozesse ab (Bild 165/1).

● *Erklären Sie mit dem Energieniveauschema von Rubin (Bild 164/1) das Arbeitsprinzip des Rubinlasers!*

Anwendung des Lasers — Mikro-Emissionsspektralanalyse

● *Verschaffen Sie sich Klarheit über das Wesen und die Bedeutung der Spektralanalyse (↗ Lehrbuch Physik Kl. 10)!*

Wegen seiner hohen Kohärenz und Monochromasie kann man Laserlicht mit Hilfe eines Linsensystems auf eine sehr kleine Fläche konzentrieren. Die kleinste erreichbare Lichtfläche für Rubinlaser weist einen Durchmesser von 0,7 μm auf. Dabei werden so hohe Energiedichten erzielt (10^6 bis 10^8 W cm^{-2}), daß jeder Stoff sofort verdampft. Infolge der nahezu punktförmigen Lichtfläche wird dabei nur eine ganz geringe Stoffmenge zum Verdampfen gebracht. Damit ist der Laser als Energiequelle zur Materialverdampfung bei der Mikroanalyse geeignet.

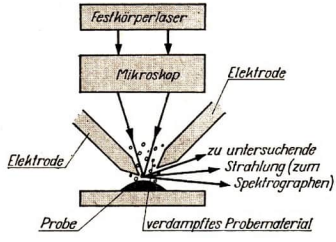


Bild 166/1 Prinzip des Laser-Mikrospektral-Analysators

Mikroanalyse. Über ein mikroskopisches System (Bild 166/1) wird ein Laserblitz auf eine ausgewählte Stelle der zu untersuchenden Oberfläche konzentriert. An dieser Stelle entsteht eine Dampfwolke. Der Dampf ist teilweise ionisiert. Er bewirkt die Zündung einer Funkenentladung zwischen den Elektroden. Der Funke regt die Atome des verdampften Materials zur Emission von Strahlung an. Diese emittierte Strahlung wird mit Gitter- oder Prismenspektrographen untersucht.
Der Laser-Mikrospektralanalysator wird in der Metallographie, Chemie, Silikattechnik, Mineralogie, Archäologie und Kriminaltechnik angewendet.

Der Einsatz des Laser-Mikroanalysators bringt folgende Vorteile:

1. Der Bezirk, dem die Probe entnommen wird, kann mikroskopisch eingestellt und überprüft werden. Es erfolgt kein Eingriff in das Stoffgefüge.
2. Durch den sehr geringen Stoffverbrauch (etwa 1 μg) bleibt das Probestück optimal erhalten.
3. Die Nachweisgrenze liegt für rund 60 chemische Elemente unterhalb 10^{-6} g.
4. Da die Probe keiner besonderen Vorbereitung bedarf, ergibt sich eine Zeiteinsparung.
5. Der Anwendungsbereich erstreckt sich auf Leiter, Nichtleiter, kristalline und amorphe Festkörper.

- *Wie groß ist etwa die Energie, die zum Verdampfen von festen Körpern notwendig ist (Geben Sie sich eine bestimmte Masse vor)?*
- *Erläutern Sie Anwendungsbeispiele des Lasers, geben Sie dabei entsprechende Blockschaltbilder an (↗ Lehrbuch Physik Kl. 11, S. 58 f.)!*
- *Geben Sie in einem Vortrag einen Überblick über die derzeitige Anwendung der Laser und ihren möglichen Einsatz in der Zukunft!*
  Literatur: Kleine naturwissenschaftliche Bibliothek, Reihe Physik, Band 16 N. Sobolew, Die Laser und ihre Zukunft. BSB BG. Teubner Verlagsgesellschaft 1972, S. 85 bis 185).
- *Wann braucht die zur induzierten Emission notwendige Strahlung nicht von außen eingestrahlt zu werden?*
- *Welche Teile gehören zu einer Laserstrahlungsquelle?*

(32) Die Emissionsleistung eines Lasers betrage 10^6 W. Wie groß ist die Energiedichte, die auf einer Lichtfläche mit einem Durchmesser von 5 μm bis zu einer Tiefe von 2 μm konzentriert wird, wenn die Impulsdauer 10^{-3} s beträgt?

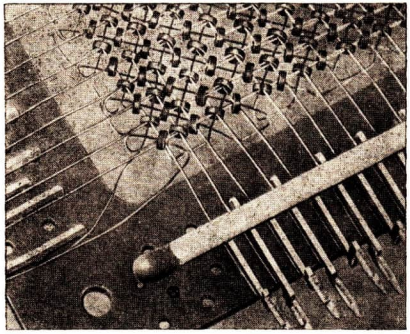
(33) Es werden Lichtimpulse mit einer Dauer von 10^{-8} s und einer Energie von 40 Ws erreicht. Wie groß ist die Leistung des Lasers?

Erkenntnisweg

1. Fragestellung: Sie wird aus bereits vorliegenden Erkenntnissen abgeleitet.
Elektromagnetische Strahlung kann Energie an Elektronen abgeben. Welche Vorgänge finden in Festkörpern statt, wenn ihnen Energie in Form elektromagnetischer Strahlung zugeführt wird?

2. Folgerung durch deduktiven Schluß: Allgemeines → Besonderes → Einzelnes.
Wenn Elektronen in einem Festkörper Energie zugeführt wird, dann gelangen sie vom Valenzband ins Leitfähigkeitsband.

3. Deutung der Ergebnisse und ihre Anwendung:
Die Energie einzelner Elektronen kann so groß werden, daß sie sich im Kristall frei bewegen (Fotowiderstände) oder ihn verlassen können (Fotovervielfacher).
In Festkörpern können sich auch Elektronen sammeln, die durch äußere Einwirkung dazu angeregt werden können, Licht auszusenden (Laser, Lumineszenz). Diese Festkörper weisen im Energiebändermodell besondere Terme bzw. Energieniveaus auf.



11. Magnetische Eigenschaften von Festkörpern

Bild 168/1 Magnetkernspeicher in Flachbauweise mit vier Drähten je Kern
In elektronischen Datenverarbeitungsanlagen werden Speicher mit großer Kapazität benötigt. Informationen, die auf diese Speicher gegeben werden, können in sehr kurzer Zeit gefunden und abgerufen werden.

Worauf beruht die Funktionsweise derartiger Magnetkernspeicher?
Welche Eigenschaften haben magnetische Werkstoffe, die eine Speicherung der Ziffern L und 0 im binären Zahlensystem ermöglichen?
Zur Beantwortung dieser und anderer im Kapitel aufgeworfener Fragen sind die magnetischen Eigenschaften von Festkörpern zu untersuchen. Dabei wird erkenntnistheoretisch der Weg beschritten, beobachtete makrophysikalische Erscheinungen mikrophysikalisch zu deuten.

Magnetisierung und magnetisches Moment, Permeabilität und magnetische Suszeptibilität

Um das Verhalten von Festkörpern im Magnetfeld zu erläutern, ist zunächst die Definition einiger physikalischer Begriffe voranzustellen. Diese Definitionen gelten allgemein für homogene magnetische Felder.
Im Unterschied zu elektrischen Ladungen existieren magnetische Pole nicht unabhängig voneinander; sie treten nur als **Dipole** auf.

Ein Beweis für die Existenz magnetischer Dipole ist auch die Tatsache, daß das magnetische Feld jeden Stoff derart durchdringt, daß die magnetischen Feldlinien geschlossen sind.

- *Wie kann man experimentell beweisen, daß ein Dauermagnet keine magnetischen Ladungen an seinen Enden trägt?*
- *Skizzieren Sie eine Versuchsanordnung, mit deren Hilfe man geschlossene magnetische Feldlinien demonstrieren kann!*

● *Vergleichen Sie Entstehung, Nachweismöglichkeiten und Anwendungen konstanter elektrischer und magnetischer Felder!*
Kennzeichnen Sie den Verlauf der Feldlinien für einige homogene und inhomogene Felder!

Die Charakterisierung des magnetischen Feldes im leeren Raum erfolgt bekanntlich durch die **magnetische Feldstärke $\vec{H}$** und die **magnetische Induktion im Vakuum $\vec{B}_0$**: $\vec{B}_0 = \mu_0 \cdot \vec{H}$. Die **magnetische Feldkonstante** (Induktionskonstante) $\mu_0 = 1{,}257 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{Vs \cdot A^{-1} \cdot m^{-1}}$ ist eine Naturkonstante. Die Gleichung bringt zum Ausdruck, daß die magnetische Induktion im Vakuum der magnetischen Feldstärke proportional ist.
Dabei kann das lufterfüllte Innere einer Spule dem Vakuum gleichgesetzt werden, weil der Einfluß der Luftmoleküle auf die magnetische Induktion vernachlässigt werden kann.
Würde man sich auf die Vorgänge im Vakuum beschränken, käme man mit einer einzigen Größe, der magnetischen Feldstärke, zur Beschreibung des Magnetfeldes aus. Erst bei Vorhandensein von Stoffen im Magnetfeld ergibt sich die Notwendigkeit, eine zweite Größe, die magnetische Induktion, einzuführen, weil in diesen Fällen bei konstanter Feldstärke die magnetische Induktion stoffabhängig um ein Vielfaches größer ist.
Der Einfluß von Festkörpern auf magnetische Erscheinungen, d. h., die Existenz magnetischer Eigenschaften von Festkörpern, läßt sich mit nachfolgend beschriebener Anordnung demonstrieren (Bild 169/1):

▼ Eine Induktionsschleife, verbunden mit einem Galvanometer, wird um eine stromdurchflossene Spule gelegt. Letztere soll möglichst lang und dünn sein, damit sich der wesentliche Teil des Magnetfeldes im Innern der Spule befindet und das Streufeld im Außenraum für unsere Zwecke vernachlässigt werden kann.

Bei Änderung des Spulenstromes im beschriebenen Experiment wird am Galvanometer ein Spannungsstoß angezeigt, der der Änderung der Stromstärke proportional ist. Bringt man Stoffe in das Innere der Spule, ist der Spannungsstoß anders als bei leerer oder luftgefüllter Spule. Ungewöhnlich stark wird der Spannungsstoß bei Verwendung eines Eisenkörpers vergrößert.

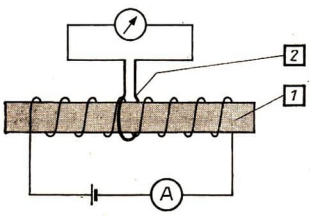


Bild 169/1 Einfluß von Stoffen in einer stromdurchflossenen Spule auf die induzierte Spannung
1 stromdurchflossene Spule mit stofferfülltem Spuleninnenraum
2 Induktionsschleife mit Galvanometer

Da die magnetische Induktion $\vec{B}$ zweckmäßig so definiert worden ist, daß ihre Änderung die Größe des Spannungsstoßes bestimmt, muß in $\vec{B}$ eine materialabhängige Größe enthalten sein. Diese wird als **relative Permeabilität** μ_r bezeichnet. Demzufolge gilt:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}, \quad \text{wobei}$$

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \text{ ist.}$$

- *Erläutern Sie das Zustandekommen eines Spannungsstoßes in einer Induktionsschleife!*
- *Erläutern Sie, wie der Einfluß des Streufeldes der Spule sehr klein gemacht werden kann!*

Hieraus ergibt sich eine Meßvorschrift für μ_r:
μ_r ist gleich dem Verhältnis der Spannungsstöße von stoffgefüllter und leerer Spule:

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 \cdot H}.$$

Es liegt nahe, die Vergrößerung des Spannungsstoßes in Bild 169/1 durch das Vorhandensein eines „scheinbaren Stromes" zu erläutern, der in der Oberfläche des Eisens zu fließen beginnt, wenn der wahre Strom eingeschaltet wird. Dieser „scheinbare Strom" liefert einen Anteil zur magnetischen Induktion. der als **Magnetisierung** $\vec{M}$ bezeichnet wird. Es gilt demnach

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M} \quad \text{bzw.}$$

$$\vec{M} = (\mu_r - 1)\, \mu_0 \vec{H}.$$

Damit wird die Magnetisierung $\vec{M}$ als zusätzliche, vom Stoff herrührende, magnetische Induktion definiert. Gleichwertig zu dieser Definition ist eine weitere: Jeder Körper erhält in einem Magnetfeld ein magnetisches Moment; man sagt auch: er wird polarisiert. Dabei wird jedes Volumenelement gleichmäßig polarisiert. Es ist daher sinnvoll, den magnetisierten Zustand, der als Magnetisierung $\vec{M}$ bezeichnet wird, durch das **magnetische Moment** $\vec{m}$ je Volumeneinheit zu beschreiben.

Die Magnetisierung $\vec{M}$ ist gleich dem auf eine Volumeneinheit bezogenen magnetischen Moment $\vec{m}$.	$\vec{M} = \frac{\vec{m}}{V}$

Dabei wird das magnetische Moment $\vec{m}$ über ein Drehmoment eingeführt, das auf eine Spule im Magnetfeld wirkt. Es gilt

$$m = \mu_0 \cdot I \cdot n \cdot A,$$

wenn I die elektrische Stromstärke, n die Windungszahl und A der Querschnitt der Spule darstellen.

- *Leiten Sie die Einheit des magnetischen Moments aus der angegebenen Gleichung her!*
- *Weisen Sie nach, daß die Magnetisierung dieselbe Einheit besitzt wie die magnetische Induktion!*

Für die meisten Stoffe ist die Magnetisierung der magnetischen Induktion im Vakuum proportional. Als Proportionalitätsfaktor wird die **magnetische Suszeptibilität** χ_m definiert:

$$\chi_m = \frac{M}{B_0}.$$

Die magnetische Suszeptibilität ist ebenso wie die relative Permeabilität eine Materialeigenschaft. Für beide gilt die Beziehung:

$$\mu_r = 1 + \chi_m,$$

so daß für die Charakterisierung eines Stoffes die Angabe einer der beiden Größen ausreicht.

㉞ Leiten Sie den Zusammenhang zwischen der relativen Permeabilität und der magnetischen Suszeptibilität her!

Die atomaren magnetischen Momente

Bei der mikrophysikalischen Erklärung der magnetischen Materialeigenschaften muß man von der Tatsache ausgehen, daß die Atome ein magnetisches Moment besitzen.
Das magnetische Moment eines Atoms setzt sich aus zwei Anteilen der Elektronenbewegung und einem Anteil des Kerns zusammen.

Das Bahnmoment. Nach dem Bohrschen Atommodell bewegen sich die Elektronen auf bestimmten Bahnen um den Atomkern.

- *Erläutern Sie das Bohrsche Atommodell! Geben Sie die Grenzen der Anwendbarkeit dieses Modells an!*

Da diese Bahnbewegung geladener Teilchen einen elektrischen Strom darstellt, hat sie ein magnetisches Moment zur Folge, ähnlich wie eine stromdurchflossene Leiterschleife ein magnetisches Moment besitzt. Es wird als **Bahnmoment** bezeichnet. Zum Bahnmoment der Atomhülle tragen nur die Elektronen unvollständig besetzter Schalen bei, weil sich für voll besetzte Elektronenschalen bzw. für Unterschalen die Beiträge der einzelnen Elektronen zum Bahnmoment kompensieren.

Das Spinmoment. Jedes Elektron besitzt noch ein magnetisches Moment von festem, unveränderlichen Betrag, das nichts mit der Bahnbewegung zu tun hat. Es wird als **Spinmoment** bezeichnet, da es mit dem Eigendrehimpuls des Elektrons, dem Spin, in Zusammenhang steht.
Als Einheit für Bahnmoment und Spinmoment bietet sich eine Kombination von atomaren Größen an, die als **Bohrsches Magneton** m_B bezeichnet wird:

$$m_B = \frac{h}{4\pi} \cdot \frac{e \cdot \mu_0}{m_e},$$

wobei e die Ladung des Elektrons, μ_0 die magnetische Feldkonstante, m_e die Masse des Elektrons und h das Plancksche Wirkungsquantum bedeuten.
Befinden sich bei kovalenten chemischen Bindungen zwei Elektronen mit entgegengesetztem Spin im gleichen Molekülzustand, dann kompensieren sich die Spinmomente. So haben z. B. Wasserstoffmoleküle kein Spinmoment, weil sich die Spins der beiden Bindungselektronen kompensieren.

Das Kernmoment. Der Atomkern besitzt ein eigenes magnetisches Moment, das Kernmoment. Es ist bedeutend kleiner als das der Atomhülle. Als Einheit empfiehlt sich analog zum Bohrschen Magneton das sogenannte **Kernmagneton** m_K:

$$m_K = \frac{h}{4\pi} \cdot \frac{e \cdot \mu_0}{m_p},$$

wobei m_p die Masse des Protons bedeutet.

Diamagnetismus und Paramagnetismus

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt grundlegende Begriffe erläutert wurden, kann jetzt das Verhalten unterschiedlicher Stoffe im Magnetfeld näher untersucht werden.
Die meisten Stoffe lassen im Induktionsversuch praktisch keinen Einfluß erkennen (↗ S. 160), d. h., ihr magnetisches Verhalten unterscheidet sich kaum von dem des Vakuums. Daß diese Stoffe dennoch magnetische Eigenschaften besitzen und darin auch qualitative Unterschiede aufweisen, läßt sich z. B. mittels eines sehr starken Magnetfeldes experimentell zeigen. Sehr große magnetische Feldstärken kann man beispielsweise durch inhomogene Magnetfelder erzeugen (Bild 173/1).

Auswertung des Experiments. Der Aluminiumkörper (Bild 173/1) wird vom Nordpol des Elektromagneten angezogen. Das bedeutet: An der Seite des Körpers, der dem Nordpol zugewandt ist, muß sich ein Südpol herausgebildet haben; die Magnetisierung zeigt demzufolge in Richtung des magnetischen Feldes (Bild 173/2a). Der Körper aus Wismut wird vom Nordpol abgestoßen (Bild 173/2b), die Magnetisierung ist dem Magnetfeld entgegengerichtet.

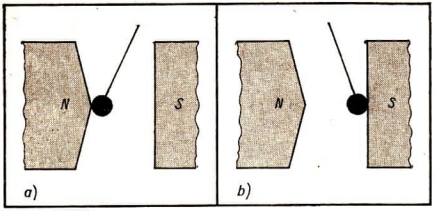


Bild 173/1 Verhalten unterschiedlicher Stoffe im inhomogenen Magnetfeld
a) Aluminium,
b) Wismut

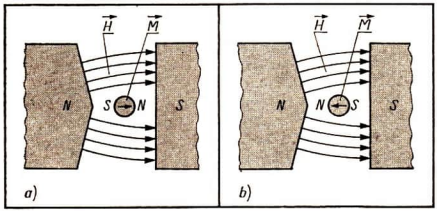


Bild 173/2 Richtung der magnetischen Feldstärke und der Magnetisierung
a) Aluminium,
b) Wismut

Für Stoffe, die sich im Magnetfeld wie Aluminium verhalten, gilt

$$\mu_r - 1 > 0, \quad \mu_r > 1 \quad \text{bzw.} \quad \chi_m > 0.$$

Derartige Stoffe werden **Paramagnetika** genannt.
Dagegen bezeichnet man Stoffe, die sich im Magnetfeld wie Wismut verhalten, als **Diamagnetika**. Für sie gilt:

$$\mu_r - 1 < 0, \quad \mu_r < 1 \quad \text{bzw.} \quad \chi_m < 0.$$

Das bedeutet:

Sowohl bei Paramagnetika als auch bei Diamagnetika ist die Magnetisierung der Feldstärke proportional. Sie stimmt bei paramagnetischen Stoffen mit der Richtung der Feldstärke überein; χ_m ist demzufolge positiv. Bei diamagnetischen Stoffen dagegen ist die Magnetisierung der Feldstärke entgegengerichtet; χ_m ist demzufolge negativ.
Ein Unterschied zeigt sich auch im Temperaturverhalten beider Arten des Magnetismus: Während bei Diamagneten die magnetische Suszeptibilität nicht von der Temperatur abhängt, ist sie bei paramagnetischen Substanzen der absoluten Temperatur umgekehrt proportional. Die Magnetisierbarkeit muß also um so größer sein, je tiefer die Temperatur ist. Diese Beziehung wird als das **Curiesche Gesetz** bezeichnet.

$$\chi_m = \frac{C}{T},$$

wobei der Proportionalitätsfaktor C Curiesche Konstante genannt wird.

● *Diskutieren Sie den Inhalt des Curieschen Gesetzes!*

Stoffe, die dieses einfache Temperaturverhalten zeigen, werden als normale **Paramagnetika** bezeichnet. Häufig ist die Temperaturabhängigkeit der Paramagnetika viel komplizierter bzw. hängt, wie beispielsweise bei den Alkalimetallen, nicht von der Temperatur ab.

Magnetische Suszeptibilität der Diamagnetika und Paramagnetika bei Zimmertemperatur

Diagamnetismus		Paramagnetismus	
Stoff	magnetische Suszeptibilität χ_m	Stoff	magnetische Suszeptibilität χ_m
Wismut	$-152{,}0 \cdot 10^{-6}$	Sauerstoff	$1{,}9 \cdot 10^{-6}$
Kupfer	$-10{,}0 \cdot 10^{-6}$	Natrium	$15{,}6 \cdot 10^{-6}$
Wasser	$-9{,}1 \cdot 10^{-6}$	Aluminium	$20{,}0 \cdot 10^{-6}$
Helium	$-1{,}90 \cdot 10^{-6}$	Lithium	$25{,}2 \cdot 10^{-6}$
Neon	$-7{,}20 \cdot 10^{-6}$	Lanthan	$140{,}0 \cdot 10^{-6}$
Argon	$-19{,}40 \cdot 10^{-6}$	Chrom	$160{,}0 \cdot 10^{-6}$
Krypton	$-28{,}00 \cdot 10^{-6}$	Platin	$264{,}0 \cdot 10^{-6}$
Xenon	$-43{,}00 \cdot 10^{-6}$	Uran	$620{,}0 \cdot 10^{-6}$

Aus der Tabelle wird ersichtlich, daß der Diamagnetismus bei allen Aggregatzuständen auftritt. Dasselbe trifft für den Paramagnetismus (bei Zimmertemperatur) zu.

Mikrophysikalische Deutung des Diamagnetismus. Nachdem zunächst die makrophysikalischen Eigenschaften der Diamagnetika zusammengestellt wurden, sollen diese nun gedeutet werden.
Bringt man einen Diamagneten in ein Magnetfeld, dann entstehen innerhalb der einzelnen Atome magnetische Dipole, die der Richtung des magnetischen Feldes entgegengerichtet sind (↗ S. 173).
Dieser Sachverhalt kann nach einer Hypothese von Ampere erklärt werden, wonach jeder Magnetismus seinen Ursprung in der Bewegung elektrischer Ladungen hat. Magnetische Momente entstehen durch Ströme, die innerhalb der Atome fließen, durch die sogenannten **Molekularströme**. Wird nun ein Diamagnet in ein Magnetfeld gebracht, dann ändert sich der magnetische Fluß, der diese Strombahnen durchsetzt. Infolgedessen fließt ein Induktionsstrom, der mit einem magnetischen Moment gekoppelt ist. Dieser Strom wirkt auf Grund der Lenzschen Regel seiner Ursache entgegen. Demzufolge ist die Magnetisierung dem äußeren Feld entgegengerichtet. Gerade das war aber das Ergebnis des Experiments nach Bild 173/2b. Diese Erscheinung tritt bei allen Stoffen auf, d. h., der Diamagnetismus ist eine allgemeine Stoffeigenschaft, die jedoch bei vielen Stoffen durch andere Arten des Magnetismus überlagert wird.

● *Warum kann man den Diamagnetismus als eine allgemeine Stoffeigenschaft bezeichnen?*

Daß der Diamagnetismus auch bei Paramagnetika auftritt, zeigt folgendes: Wird eine Kugel aus Aluminium in ein inhomogenes Magnetfeld gebracht (Bild 173/1 a), so wird sie zunächst aus dem Gebiet großer Feldstärke hinausgedrängt und erst danach angezogen. In der Kugel entstehen nämlich Wirbelströme, die zu einer Abstoßung führen. Das geschieht so lange, bis die Wirbelströme durch den Ohmschen Widerstand des Aluminiums aufgehoben sind. Erst dann wird die Kugel angezogen.
Eine Wismutkugel wird dagegen ständig abgestoßen. Daraus ist zu schließen, daß im Diamagneten widerstandslose Strombahnen existieren, in denen ein einmal induzierter Strom so lange bestehen bleibt, bis eine Feldänderung vorgenommen wird. Schaltet man das Magnetfeld ab, dann gehen die induzierten Ströme auf den Wert Null zurück. Das magnetische Moment der Diamagnetika hängt nur von der Größe der Feldstärke ab und ist dieser entgegengerichtet.
Soweit die Deutung des Diamagnetismus mit der Ampereschen Hypothese von den inneratomaren Strömen.
Tatsächlich entstehen diese inneratomaren Ströme dadurch, daß ganze Elektronenbahnen infolge ihres immer vorhandenen magnetischen Moments eine Präzessionsbewegung um die Richtung des angelegten Feldes ausführen. Das kann aber an dieser Stelle nicht näher erläutert werden.

● *Unter welchen physikalischen Bedingungen kann eine Spannung induziert werden? Was beinhaltet die Lenzsche Regel?*

Mikrophysikalische Deutung des Paramagnetismus. Das Verhalten der Paramagnetika im Magnetfeld ist durch die Annahme permanenter atomarer magnetischer Momente zu deuten. Diese Momente entstehen wie bei Diamagnetika durch die Ampereschen Molekularströme; sie sind jedoch im Gegensatz zu diamagnetischen Stoffen auch bei Abwesenheit magnetischer Felder vorhanden. Bei diamagnetischen Stoffen kompensieren sich ohne äußeres Feld die magnetischen Momente der Elektronen eines Atoms; bei paramagnetischen

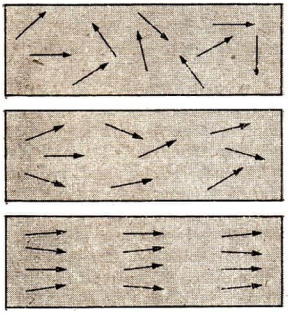


Bild 175/1 Atomare magnetische Momente eines Paramagneten
a) Verteilung der magnetischen Momente in alle Richtungen bei $\vec{H} = 0$
b) Vorzugsrichtung der magnetischen Momente in Richtung des Feldes bei $\vec{H} > 0$
c) vollständige Ausrichtung der magnetischen Momente in Richtung des Feldes bei sehr großen Feldstärken bis zur Sättigungsmagnetisierung $\vec{M}_S$

bleibt das magnetische Moment von mindestens einem Elektron erhalten. Die magnetischen Momente der Atome zeigen jedoch regellos in alle Richtungen (Bild 175/1 a). Die Richtungen der atomaren magnetischen Momente ändern sich dabei ständig durch die thermische Bewegung der Atome, so daß ein paramagnetischer Stoff unmagnetisch erscheint. Bringt man ihn in ein Magnetfeld, dann bildet sich eine Vorzugsrichtung der atomaren magnetischen Momente in Richtung des Feldes aus (Bild 175/1 b). Wird das Feld bis zu einem bestimmten Wert verstärkt, dann sind alle magnetischen Momente in Richtung des Feldes polarisiert (Bild 175/1 c) und es wird die **Sättigungsmagnetisierung** $\vec{M}_S$ beobachtet.
Die ungeordnete Wärmebewegung der Atome wirkt dem ordnenden Einfluß des äußeren Magnetfeldes entgegen. So ist es zu erklären, daß die magnetische Suszeptibilität bei Paramagnetika von der Temperatur abhängt (↗ S. 173).

Ferromagnetismus

Ferromagnetische Stoffe sind durch eine außerordentlich große Magnetisierung gekennzeichnet. Sie ist etwa 10^6 bis 10^9 mal so groß wie bei diamagnetischen und paramagnetischen Stoffen.

Mikrophysikalische Deutung des Ferromagnetismus. Wie bereits bekannt, ist der Ferromagnetismus keine Eigenschaft einzelner Atome, sondern an Kollektive zahlreicher Atome gebunden. Aus der Quantenmechanik des Atombaus läßt sich ableiten, daß Ferromagnetika aus vielen mikrokristallinen Bereichen bestehen, in denen die atomaren magnetischen Momente bereits ohne äußeres Feld bis zur Sättigung einheitlich ausgerichtet sind. Diese Bereiche werden nach dem Physiker Pierre-Ernest Weiss als **Weißsche Bezirke** oder **Domänen** bezeichnet. Die Durchmesser dieser Bezirke betragen etwa 10^{-4} bis 10^{-3} cm. Ein Weißscher Bezirk umfaßt daher viele Milliarden Atome.

(38) Skizzieren Sie die magnetischen Momente innerhalb eines Weißschen Bezirkes! Vergleichen Sie diese mit denen eines Paramagneten ohne äußeres Feld!

In einer makroskopischen Probe eines Ferromagneten befinden sich sehr viele Weißsche Bezirke. Ihre magnetischen Momente weisen in bevorzugte Richtungen, beim Eisen z. B. in eine der Würfelkanten, wobei keine der Würfelkanten besonders ausgezeichnet ist (Bild 177/1). Demzufolge kompensieren sich die magnetischen Momente der Bezirke. Der Ferromagnet ist nach außen unmagnetisch.
Zwischen zwei benachbarten Weißschen Bezirken befinden sich Übergangsschichten, die nach dem Physiker Felix Bloch als **Blochwände** bezeichnet werden. Der Übergang von einem Bezirk zum anderen vollzieht sich allmählich. Die Dicke einer Blochwand beträgt einige Zehntausendstel Millimeter.

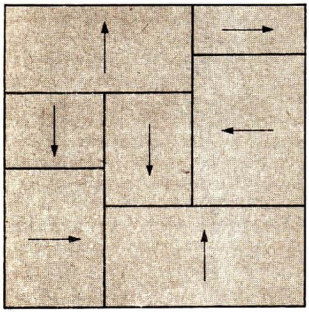


Bild 177/1 Weißsche Bezirke in nichtmagnetisiertem Eisen

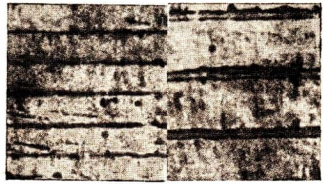


Bild 177/2 Wandverschiebung mit zunehmender magnetischer Feldstärke

㊱ Wieviele Atomlagen umfaßt eine Blochwand?

Beim Anlegen eines äußeren Feldes treten in Ferromagneten zwei Prozesse auf:

1. Wandverschiebungsprozesse

Es wachsen diejenigen Bezirke an, deren magnetischen Momente am wenigsten von der Richtung des äußeren Feldes abweichen (Bild 177/2). Die Wandverschiebungsprozesse erfolgen in schwachen äußeren Feldern am Anfang der Magnetisierungskurve **reversibel**, d. h., bei Vergrößerung des Feldes wandern die Blochwände nach einer Seite, bei Verkleinerung wandern sie wieder zurück. Die Wandverschiebung verläuft langsam und gleichmäßig.
In stärkeren Feldern werden die Blochwände nicht mehr stetig verschoben. Einzelne Teile der Blochwände ändern ihre Lage sprungartig; die Magnetisierung geht steil nach oben (Bild 177/3). Die Wandverschiebung ist **irreversibel**. Die sprunghafte Änderung der Magnetisierung wird nach E. Barkhausen als **Barkhausen-Effekt** bezeichnet. Dieser Effekt kann bei geeigneter Experimentieranordnung hörbar gemacht werden.

▼ Weisen Sie die Barkhausensprünge akustisch nach!

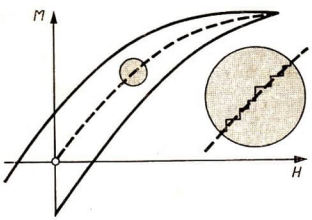


Bild 177/3 Sprunghafte Änderung der Magnetisierung bei irreversiblen Wandverschiebungsprozessen

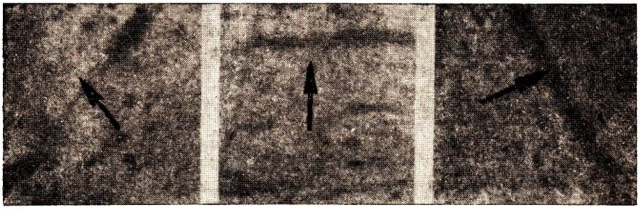


Bild 178/1 Drehung der Magnetisierung in einem Kristall mit zunehmender magnetischer Feldstärke

2. Drehprozesse

Die Weißschen Bezirke werden aus ihrer ursprünglichen Lage in Richtung des äußeren Feldes gedreht (Bild 178/1).
Das bedeutet: Bringt man einen ferromagnetischen Stoff in ein Magnetfeld, so vergrößern sich solche Bezirke, deren Magnetisierungsrichtung mit der Richtung des äußeren Feldes bereits ungefähr übereinstimmt. Bei weiterer Erhöhung der magnetischen Feldstärke klappen die magnetischen Momente anderer Weißscher Bezirke in die von außen aufgeprägte Richtung um und vergrößern um ein weiteres die Magnetisierung.
Der Zusammenhang zwischen der Magnetisierung und der magnetischen Feldstärke soll in einem Experiment veranschaulicht werden (Bild 178/2):

▼ Die Braunsche Röhre wird entsprechend der Anleitung angeschlossen. Über und unter der Röhre werden im Abstand von 15 cm die Spulen mit 125 Windungen und rechts und links der Röhre im Abstand von 60 cm die Spulen mit 1500 Windungen angebracht. Diese 4 Spulen werden mit einem veränderlichen Widerstand in Reihe an das Wechselspannungsnetz angeschlossen. Dabei ist zu beachten, daß bei jeder Spule der gleiche Pol rechts bzw. oben vorliegt.

Bringt man in das Feld der Spulen mit 1500 Windungen beispielsweise ein Transformatorblech, dann erscheint auf dem Schirm eine sehr flache Magneti-

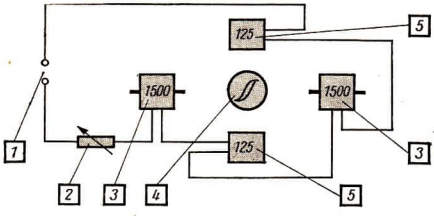


Bild 178/2 Versuchsaufbau zur Aufnahme der Magnetisierungskurve eines Ferromagneten mit Hilfe einer Braunschen Röhre
1 Spannungsquelle (220 V ~),
2 Widerstand 50 Ω
3 Spule (1500 Wdg.),
4 Braunsche Röhre,
5 Spule (125 Wdg.).

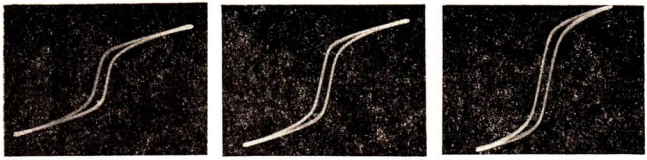


Bild 179/1 Magnetisierungskurven von Transformatorblechen bei zunehmender Masse des ferromagnetischen Materials

sierungskurve (Bild 179/1 links). Vergrößert man die Menge des eingebrachten Materials, dann verschieben sich die Abknickstellen immer mehr nach oben und unten. Die entstandenen Magnetisierungskurven werden als **Hystereseschleife** bezeichnet.

(37) Begründen Sie, warum die Spulen zur Aufnahme von Magnetisierungskurven in Bild 178/2 in der angegebenen Weise angeordnet sein müssen!

Bei anderem experimentellen Aufbau kann man die Magnetisierung punktweise in Abhängigkeit von der Feldstärke aufnehmen. Die grafische Darstellung der Meßwerte gibt das Bild 179/2 wieder.

● *Entwerfen Sie eine Prinzipschaltskizze, mit deren Hilfe man die Magnetisierung punktweise in Abhängigkeit von der Feldstärke aufnehmen kann! Orientieren Sie sich an dem in Bild 169/1 dargestellten Experiment!*

Diskussion der Hystereseschleife eines Ferromagneten. Die Magnetisierung eines Ferromagneten nimmt mit wachsender Feldstärke zu, bis die Sättigungsmagnetisierung M_S erreicht ist (Bild 179/2 von 0 bis M_S). Diese Teilkurve der Hysterese nennnt man **Neukurve**, weil sie nur bei einem unma-

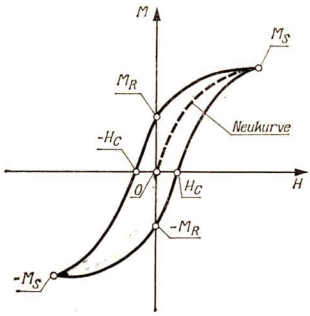


Bild 179/2 Hystereseschleife eines Ferromagneten

gnetischen Ferromagneten entsteht, wenn dieser in ein Magnetfeld gebracht wird. Verringert man die Feldstärke, dann nimmt die Magnetisierung ab. Dabei bleibt die Abnahme der Magnetisierung hinter der der Feldstärke zurück, so daß bei der Feldstärke $H = 0$ eine Restmagnetisierung bleibt, die als **Remanenz** M_R bezeichnet wird (Bild 179/2 von M_S bis M_R).

Legt man ein entgegengesetzt gerichtetes Magnetfeld an, dann nimmt die Magnetisierung bis zur negativen Sättigungsmagnetisierung $-M_S$ ab (Bild 179/2 von M_R bis $-M_S$). Die Remanenz wird dabei von einer negativen Feldstärke, der **Koerzitivfeldstärke** $-H_C$, beseitigt. Nimmt die negative Feldstärke weiter bis Null zu, so bleibt eine negative Magnetisierung (Bild 179/2 von $-M_S$ bis $-M_R$). Wird das magnetische Feld erneut positiv, dann wächst die Magnetisierung wiederum bis zur Sättigungsmagnetisierung M_S an. Dabei verschwindet die Magnetisierung bei der Koerzitivfeldstärke H_C (Bild 179/2 von $-M_R$ bis M_S).

- *Diskutieren Sie die in Bild 179/2 dargestellte Hystereseschleife eines Ferromagneten mit Hilfe der Wandverschiebungs- und Drehprozesse!*
- *Was sagen Remanenz und Koerzitivfeldstärke aus?*
- *Diskutieren Sie die in Bild 179/1 abgebildeten Hystereseschleifen unter Verwendung der Begriffe Remanenz und Koerzitivfeldstärke!*

Je nach der Größe des Zahlenwerts der Koerzitivfeldstärke unterscheidet man zwischen **weich- und hartmagnetischen** Stoffen. In Bild 180/1 sind die Hystereseschleifen von magnetisch hartem Stahl (a) und magnetisch weichem Eisen (b) dargestellt.

- *Vergleichen Sie anhand des Bildes 180/1 die Koerzitivfeldstärke für hart- bzw. weichmagnetische Stoffe!*

Gute Dauermagnete haben eine große Remanenz, sie können große magnetische Kräfte ausüben. Außerdem wirkt eine große Koerzitivfeldstärke dem entgegen, daß die Remanenz nicht schon durch ein schwaches äußeres Magnetfeld vernichtet wird.
Man kann theoretisch herleiten, daß der Flächeninhalt der Hystereseschleife den *Verlust an magnetischer Energie je Volumen* angibt, der bei einem vollstän-

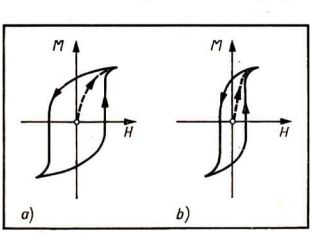


Bild 180/1 Hystereseschleifen von
a) magnetisch hartem Stahl,
b) magnetisch weichem Eisen

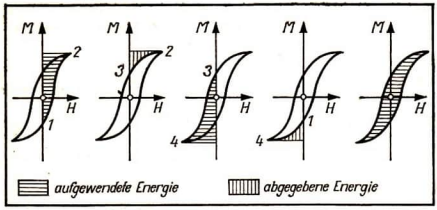


Bild 181/1 Verlust an magnetischer Energie bei einer Hystereseschleife

digen Durchlauf der Kurve entsteht, so daß Magnetisierung und magnetische Feldstärke wieder bei den Anfangswerten angelangt sind. Bild 181/1 zeigt die den einzelnen Schritten der Magnetisierung ($1 \rightarrow 2, 2 \rightarrow 3, 3 \rightarrow 4, 4 \rightarrow 1$) entsprechende aufgewendete bzw. abgegebene Energie. Der Teil der aufgewendeten Energie, der dem Flächeninhalt der Hystereseschleife entspricht, kann nicht zurückgewonnen werden, sondern hat sich im Material in Wärme umgewandelt.

- *Begründen Sie, warum man für Transformatorenkerne Stoffe mit schmaler Hystereseschleife verwendet!*
- *Vergleichen Sie den Energieverlust weich- und hartmagnetischer Stoffe!*

Abhängigkeit der magnetischen Suszeptibilität von der magnetischen Feldstärke. Die Anfangssuszeptibilität χ_0 (χ_m bei $H = 0$) ist aus dem Anstieg der Neukurve zu ermitteln (Bild 179/2). Sie ist vom Stoff und von der Vorbehandlung (z. B. Walzen, Tempern) des Materials abhängig. In Bild 181/2 ist die magnetische Suszeptibilität für eine Dynamostahlsorte als Funktion der magnetischen Feldstärke dargestellt. Mit zunehmender Feldstärke wird die Suszeptibilität größer, fällt nach Überschreitung eines Maximums wieder ab und erreicht im Gebiet der Sättigung den Wert Null.

Temperaturabhängigkeit der magnetischen Suszeptibilität. Ferromagnete besitzen ihre Eigenschaften nur unterhalb einer bestimmten Temperatur, der **Curie-Temperatur T_C**. Bei höheren Temperaturen als T_C verhalten sie sich wie Paramagnete. Es gilt das

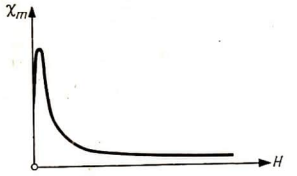


Bild 181/2 Magnetische Suszeptibilität in Abhängigkeit von der Feldstärke

Curie-Weißsche Gesetz:

Die magnetische Suszeptibilität χ_m ist gleich dem Quotienten aus der Curieschen Konstanten C und der Differenz aus der Temperatur T und der Curie-Temperatur T_C.	$\chi_m = \frac{C}{T - T_C}$ für $T > T_C$.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Curie-Temperaturen bei 80 °K und die Sättigungsmagnetisierungen bei Zimmertemperatur einiger Ferromagnetika zusammengestellt.

Element	M_S in Vs · m^{-2} bei 20 °C	T_C in °K für 80 °K
Eisen	2,15	1043
Kobalt	1,76	1400
Nickel	0,609	631
Gadolinium	1,37	289

▼ Weisen Sie das Verschwinden des Ferromagnetismus nach, indem Sie einen Nagel, der sich zwischen den Schenkeln eines Hufeisenmagneten befindet, mit einem Bunsenbrenner erwärmen! Achten Sie darauf, daß der Magnet nicht mit der Flamme in Berührung kommt!

● *Erläutern Sie die Temperaturabhängigkeit der magnetischen Suszeptibilität von Ferromagnetika mikrophysikalisch!*

Antiferromagnetismus

Antiferromagnetische Stoffe erscheinen ohne äußeres Magnetfeld unmagnetisch. Werden sie in ein Magnetfeld gebracht, dann hängt ihre Magnetisierung linear von der Feldstärke ab, d. h., ihre magnetische Suszeptibilität ist wie bei Dia- und Paramagneten konstant. Sie hat relativ kleine positive Werte. Wie bereits bei Para- und Ferromagneten hängt die magnetische Suszeptibilität antiferromagnetischer Stoffe von der Temperatur ab (Bild 183/1).
Bei Erwärmung steigt die magnetische Suszeptibilität zunächst an. Bei einer kritischen Temperatur, der **Neel-Temperatur T_N** erreicht sie ein Maximum und nimmt dann wieder ab. Oberhalb der Neel-Temperatur verhalten sich antiferromagnetische Stoffe wie Paramagnetika. Es gilt das Curie-Weißsche Gesetz, die Temperatur Θ ist meist nicht identisch mit der Neel-Temperatur:

$$\chi_m = \frac{C}{T - \Theta}, \qquad T > \Theta.$$

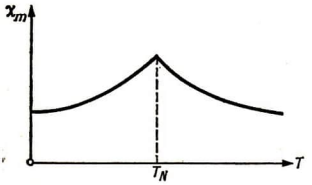


Bild 183/1 Temperaturabhängigkeit der magnetischen Suszeptibilität bei Antiferromagnetika

Verbindung	Neel-Temperatur in °C
Cr_2O_2	+ 47
NiO	+247
Fe_2O_3	+677
CoO	− 2
FeO	− 75
$FeCO_3$	−216

● *Stellen Sie die Temperaturabhängigkeit der magnetischen Suszeptibilität von Ferro- und Antiferromagneten gegenüber!*

Mikrophysikalische Deutung des Antiferromagnetismus. Die Kristalle antiferromagnetischer Stoffe kann man sich in zwei Teilgitter zerlegt denken. Das Kristallgitter von z. B. Eisensulfid besteht, ganz grob beschrieben, aus abwechselnd angeordneten Schichten von Fe^{2+}- und S^{2-}-Ionen. Die magnetischen Momente sind innerhalb jeder Schicht parallel zueinander ausgerichtet, die Momente aufeinanderfolgender Schichten sind entgegengesetzt zueinander orientiert (Bild 183/2). Diese Ordnung wird mit steigender Temperatur gelockert und bricht bei $T = T_N$ völlig zusammen.

Ferrimagnetismus

Die bekanntesten ferrimagnetischen Stoffe werden als **Ferrite** bezeichnet. Einfache Ferrite werden nach der Formel $MO \cdot Fe_2O_3$ zusammengesetzt. Dabei ist M ein zweiwertiges Element der Reihe Mn, Fe, Ni, Mg, Zn. Setzt man z. B. für M das Element Eisen ein, so erhält man Eisenferrit. Eisenferrit kommt in der Natur vor und wird als **Magnetit** bezeichnet.

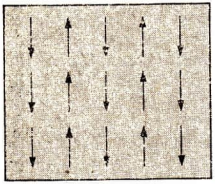


Bild 183/2 Antiparallele Ausrichtung der magnetischen Momente eines Antiferromagneten

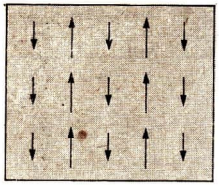


Bild 184/1 Antiparallele Ausrichtung der magnetischen Momente eines Ferrimagneten

Man kann den Ferrimagnetismus als einen Spezialfall des Antiferromagnetismus betrachten, denn es handelt sich um Stoffe, bei denen die magnetischen Momente der Untergitter nicht gleichwertig sind (Bild 184/2). Dadurch kompensieren sich die magnetischen Momente der Untergitter nicht. Der Stoff zeigt ähnliche Eigenschaften wie ein Ferromagnet, hat aber eine viel kleinere Sättigungsmagnetisierung als der Ferromagnet.

10
▼ Demonstrieren Sie über einen Oszillografen die Hystereseschleife eines Ferrimagneten! Vergleichen Sie dieses Oszillografenbild mit dem eines Ferromagneten!

Ähnlich wie Ferromagnete werden ferrimagnetische Stoffe oberhalb der Curie-Temperatur zu Paramagneten. Die Temperaturabhängigkeit der magnetischen Suszeptibilität ist jedoch komplizierter als die der Ferromagneten. Das ist damit zu erklären, daß die magnetischen Momente der Untergitter nicht in gleichem Maße von der Temperatur abhängen.
In der nachfolgenden Tabelle sind die Sättigungsmagnetisierung und die Curie-Temperatur einiger Ferrimagnete zusammengestellt.

Ferrit	M_S in $Vs \cdot m^{-2}$	T_C in °C
$FeOFe_2O_3$	0,049	578
$MnOFe_2O_3$	0,032	510
$NiOFe_2O_3$	0,024	590
$CuOFe_2O_3$	0,020	455
$MgOFe_2O_3$	0,014	310

Ferrite werden durch Pressen und anschließendes Sintern von Ferritpulver bei Temperaturen von 1000 °C bis 1400 °C hergestellt. Sie werden z. B. als magnetische Werkstoffe in der Hochfrequenztechnik in Transformatoren, Spulen und Magnetverstärkern eingesetzt. Weiterhin finden sie in Bauteilen für elektrische Meßgeräte und in Rechenautomaten Anwendung.

● *Stellen Sie in einem Schülervortrag Eigenschaften und Anwendungen weich- und hartmagnetischer Stoffe gegenüber!*

Je nach dem Einsatzzweck können Ferrite mit einer großen Anfangspermeabilität, einer kleinen bzw. großen Koerzitivfeldstärke und einer entsprechenden Sättigungsmagnetisierung hergestellt werden. So benutzt man beispielsweise Ferrite mit großer Anfangspermeabilität ($\mu_0 > 2000\ \mathrm{Vs \cdot A^{-1} \cdot m^{-1}}$) für Übertrager, mit rechteckförmiger Hystereseschleife für Ringkernspeicher und mit schmaler Hystereseschleife als UKW-Ferrite, um Ummagnetisierungsverluste im Frequenzgebiet von 100 MHz zu vermeiden.

- *Warum kann man bei Ferriten mit schmaler Hystereseschleife Ummagnetisierungsverluste vermeiden?*

Des weiteren sind Ferrite fast nichtleitend und bewirken daher als Transformatorkerne fast keine Wirbelstromverluste. Alle diese Eigenschaften haben den Ferriten eine große technische Bedeutung verliehen.

- *Warum benötigt man in der Hochfrequenztechnik Bauelemente, in denen nur geringe Wirbelströme auftreten?*
- *Stellen Sie den Ferro- und Antiferromagnetismus als zwei Grenzfälle dar, die in der Natur nur in Näherung erreicht werden können!*
- *Systematisieren Sie die fünf Arten des Magnetismus! Stellen Sie die Eigenschaften in einer Tabelle zusammen!*

Die magnetischen Eigenschaften sollen nach folgenden Gesichtspunkten in einer Tabelle systematisch erfaßt werden:

- Verhalten der Probekörper in einem starken Magnetfeld,
- Anordnung der magnetischen Momente a) ohne äußeres Feld,
  b) mit äußerem Feld,
- Zahlenwert der magnetischen Suszeptibilität,
- Temperatur- und Feldstärkeabhängigkeit der magnetischen Suszeptibilität,
- Beispiele.

Einige ausgewählte Anwendungsbeispiele ferro- und ferrimagnetischer Stoffe

In der Technik verwendet man z. B. solche hartmagnetischen ferro- und ferrimagnetischen Stoffe, die bei einmaliger Magnetisierung zu Permanentmagneten werden. Dabei macht man sich ihre Eigenschaft zunutze, daß sie zwei Zustände mit entgegengesetzter Magnetisierungsrichtung annehmen können. Derartige Bauelemente bezeichnet man als **bistabile Elemente.** Des weiteren werden Ferro- und Ferrimagnete je nach ihrer Zusammensetzung, den Herstellungsverfahren und ihren spezifischen Eigenschaften in der Schwachstrom- und Hochfrequenztechnik eingesetzt, so z. B. als

- Abgleichelemente in Hochfrequenzspulen,
- Antennenübertrager in Fernsehgeräten,

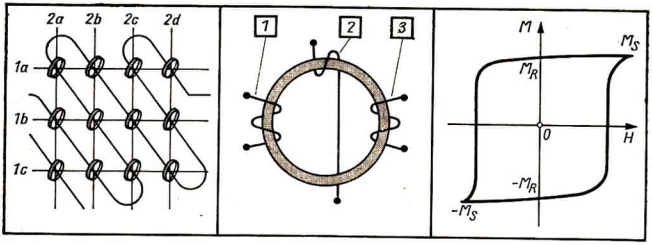


Bild 186/1 links: Teil einer Speichermatrix eines Ferritkernspeichers
Mitte: Ferritring 1 — Eingangswicklung, 2 — Treiberwicklung, 3 — Ausgangswicklung
rechts: Hystereseschleife eines Ferritringes

- streufreie Drosseln und Impulsübertrager in elektrischen Geräten und in Geräten der Nachrichten-, Meß- und Regeltechnik,
- elektronische Schalter in Regelkreisen zur Lösung logischer Schaltaufgaben,
- wartungsfreie Speicher in elektronischen Rechenmaschinen

Weitere Anwendungsbeispiele ferro- und ferrimagnetischer Stoffe sind das Magnettonverfahren und Verfahren der magnetischen Werkstoffprüfung.

Magnetkernspeicher in Rechenmaschinen. Bistabile Elemente werden auf Grund ihrer Eigenschaft zur Speicherung der Ziffern 0 und L des binären Zahlensystems verwendet. Von den verschiedenen Speichertypen wie Flächenspeicher, magnetische Dünnschichtspeicher und Ferritkernspeicher soll der letztere näher besprochen werden.

Ferritkernspeicher. Man verwendet ringförmige Ferritringe von 0,2 mm bis 0,8 mm Durchmesser, die auf ein System sich kreuzender Drähte aufgefädelt sind. Ein derartiges System wird als **Speichermatrix** bezeichnet (Bild 186/1). Am Beispiel eines Ferritringes soll die Speicherung und Wiedergabe von Informationen demonstriert werden (Bild 186/1).
Durch einen Stromimpuls, den man auf die Eingangswicklung gibt, wird der Ferritring bis zur Sättigungsmagnetisierung magnetisiert (Bild 186/1). Sein Zustand ist durch die Remanenz charakterisiert. Das eingespeiste Signal wird gespeichert. Gelangt jetzt auf die Treiberwicklung ein Stromimpuls, dessen Magnetfeld dem des Ringes entgegengesetzt gerichtet ist und ausreicht, den Ring umzumagnetisieren, dann wird durch die Änderung der Magnetisierung in der Ausgangswicklung ein beträchtlicher Spannungsstoß hervorgerufen. Dieser Spannungsstoß entspricht der Antwort „ja".
Wenn jetzt auf die Treiberwicklung ein Stromimpuls gelangt, der ein Feld in Richtung des Magnetfeldes des Ringes aufbaut, dann bleibt ein solcher Spannungsstoß aus, da die Änderung der Magnetisierung Null ist. Dieses entspricht der Antwort „nein".

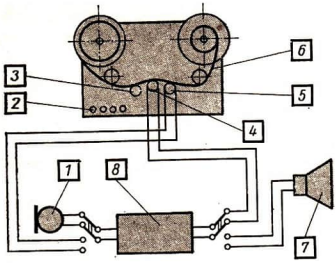


Bild 187/1 Tonbandgerät (schematisch)
1 Mikrofon, 2 Schalter, 3 Löschkopf, 4 Sprechkopf, 5 Hörkopf, 6 Magnetband, 7 Lautsprecher, 8 Verstärker

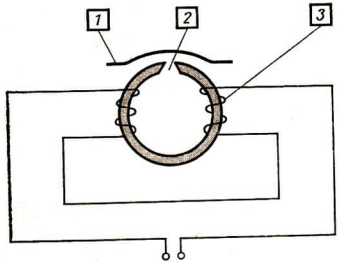


Bild 187/2 Tonkopf (schematisch)
1 — Magnetband
2 — Kopfspalt
3 — Kopfwicklung

● *Erläutern Sie in einem Schülervortrag die Funktionsweise einer Speichermatrix, die im Bild 186/1 dargestellt ist! Benutzen Sie dazu außerdem die Literatur Enzyklopädie Struktur der Materie / Atom, VEB Bibliographisches Institut, Leipzig 1970!*

Magnettonverfahren. Kunststoffbänder mit eingelagertem feinkörnigen Ferritpulver haben sich als Informationsträger bewährt. In großem Umfang werden sie in Tonbandgeräten (Bild 187/1), zur Aufzeichnung von Fernsehbildern und als Magnetbandspeicher in der Datenverarbeitung eingesetzt.
Die Tonaufnahme, Tonwiedergabe und das Löschen des Tons wird über Tonköpfe erreicht (Bild 187/2). Diese bestehen aus einem ringförmigen Elektromagneten.

Tonaufnahme. Der aufzuzeichnende Schall wird über das Mikrofon in Stromschwankungen umgewandelt. Diese werden über den Verstärker zum Sprechkopf geleitet. Im Kopfspalt des Sprechkopfes entsteht durch die Stromschwankungen zwischen den Polen ein starkes magnetisches Wechselfeld. Führt man das Magnetband am Sprechkopf vorbei, dann wird seine ferromagnetische Schicht verschieden stark magnetisiert.

Tonwiedergabe. In der Kopfwicklung des Hörkopfes wird durch das magnetische Wechselfeld, das beim Vorbeiführen des magnetisierten Bandes entsteht, eine Spannung induziert, die über einem Verstärker dem Lautsprecher zugeführt wird. Im Lautsprecher erfolgt die Umwandlung der elektrischen Impulse in akustische.

Löschen des Tons. Das Löschen des Tons erfolgt im Löschkopf. Entweder wird das Band durch einen Gleichstrom gleichmäßig vormagnetisiert oder durch einen hochfrequenten Wechselstrom entmagnetisiert.

- *Warum benötigt man zum Löschen des Tons einen Hochfrequenzwechselstrom?*
- *Erläutern Sie in einem Schülervortrag den Aufbau und die Funktionsweise eines Magnettonbandgerätes am Gerät selbst!*

Magnetische Werkstoffprüfung. Bevor Fertigteile z. B. der Schwerindustrie das Werk verlassen, werden sie einer Gütekontrolle unterzogen. Zur Gütekontrolle werden die verschiedensten Methoden eingesetzt, z. B. die Prüfung mit Röntgenstrahlen und magnetischen Verfahren. Letztere zeichnen sich besonders durch einen geringen Kostenaufwand und hohe Zuverlässigkeit aus.

Induktionsverfahren. Es ist am geeignetsten für Werkstoffe mit einer durchgehend einheitlichen geometrischen Gestalt wie z. B. Eisenbahnschienen, weil dann das magnetische Feld, das an der Oberfläche der Werkstoffe zur Überprüfung dient, homogen ist. Das Gerät besteht aus einem Elektromagneten, in dem sich eine mit einem empfindlichen Meßgerät verbundene Induktionsspule befindet (Bild 188/1).
Der Elektromagnet und die Induktionsspule werden entlang der Oberfläche der zu prüfenden Schiene verschoben, wobei ein Teil der Schiene zwischen den

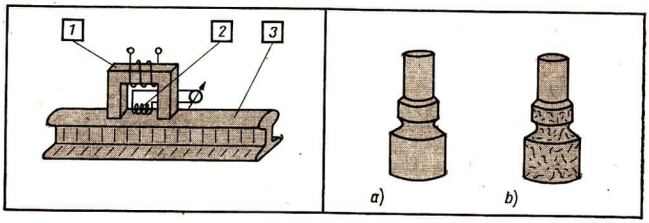


Bild 188/1 links Schematische Darstellung der Werkstoffprüfung mit Hilfe des Induktionsverfahrens
1 — Elektromagnet, 2 — Induktionsspule, 3 — Eisenbahnschiene
rechts Schematische Darstellung der Werkstoffprüfung mit Hilfe des Magnetpulververfahrens
a) Stahlwelle vor der Gütekontrolle
b) Stahlwelle nach der Gütekontrolle

beiden Polen des Elektromagneten magnetisiert wird. Solange das Feld homogen ist, zeigt das Meßinstrument keinen Ausschlag an. Durch eine Unebenheit auf der Schiene, einen Riß o. ä., entsteht beim Überfahren des Fehlers ein inhomogenes Magnetfeld, durch das in der Spule eine Spannung induziert wird. Das Meßinstrument zeigt dies durch einen Spannungsstoß an.

Magnetpulververfahren. Mit ihm werden Härtungsrisse in Werkstücken sichtbargemacht, indem das magnetisierte Werkstück in eine Wanne aus unmagnetischem Material getaucht wird, in der sich eine Flüssigkeit mit aufgeschwemmtem ferromagnetischem Pulver befindet. Sofern durch einen Riß an der Oberfläche des Werkstücks ein inhomogenes Feld besteht, werden die ferromagnetischen Teilchen von diesem angezogen. Der Fehler wird damit erkennbar (Bild 188/1).

Zusammenfassung

Die atomaren magnetischen Momente (Bahn-, Spin- und Kernmoment) sind die Ursache für das Zustandekommen des Magnetismus bei Festkörpern mit Ausnahme der diamagnetischen Stoffe. Je nach Richtung, dem Betrag sowie der Art und Stärke der Wechselwirkung der atomaren magnetischen Momente unterscheidet man zwischen Para-, Ferro-, Antiferro- und Ferrimagnetismus.

Diamagnetismus. Durch das Anlegen eines äußeren Feldes werden magnetische Momente induziert, die dem Feld entgegengerichtet sind.

Paramagnetismus. Vorhandene atomare magnetische Momente stellen sich in Richtung des äußeren Feldes ein.

Ferromagnetismus. Innerhalb eines Weißschen Bezirkes existieren atomare magnetische Momente gleicher Richtung. Beim Anlegen eines äußeren Feldes treten Wandverschiebungs- und Drehprozesse auf, durch die die Momente der Weißschen Bezirke in Richtung des Feldes geordnet werden.

Antiferromagnetismus. Die magnetischen Momente innerhalb eines Bezirkes sind antiparallel ausgerichtet und vom gleichen Betrag. Das resultierende Moment ohne äußeres Feld ist Null.

Ferrimagnetismus. Die atomaren magnetischen Momente eines Bezirkes sind antiparallel ausgerichtet, aber von unterschiedlichem Betrag.

Nur die magnetische Suszeptibilität diamagnetischer Stoffe ist temperaturunabhängig.

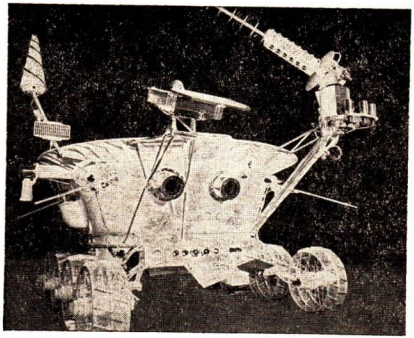


Bild 190/1 Das fahrbare sowjetische Mondlaboratorium „Lunochod" besitzt als Energiequelle einen thermoelektrischen Generator. Dieser Generator besteht aus vielen Thermoelementen, in denen Wärmeenergie direkt in elektrische Energie umgewandelt wird.

12. Thermoelektrische Eigenschaften von Festkörpern

Wie ist es zu erklären, daß in einem Thermoelement (↗ Lehrbuch Physik 12, S. 107), Wärmeenergie direkt in elektrische Energie umgewandelt wird? Erfolgt diese Energieumwandlung auch, wenn sich die Kontaktstellen auf gleicher Temperatur befinden? Was geschieht, wenn die Temperatur der beiden Kontaktstellen vertauscht wird? Gilt auch die Umkehrung dieser Energieumwandlung, daß also bei einem Strom durch ein Thermoelement sich die eine Kontaktstelle erwärmt und die andere sich abkühlt?
Solche und andere Fragen werden in diesem Kapitel behandelt, indem von der physikalischen Erscheinung zu ihrem Wesen vorgedrungen wird.

Der Seebeck-Effekt

Die Umwandlung von Wärme in elektrische Energie kann mit der in Bild 191/1 gezeigten Versuchseinrichtung durch die Auslenkung einer Magnetnadel nachgewiesen werden. Diese Auslenkung setzt das Vorhandensein eines elektrischen Stroms voraus, dessen Ursache eine elektrische Spannung sein muß.

● *Wie ist es zu erklären, daß stromführende Leiter und Magnete Kräfte aufeinander ausüben? Benutzen Sie dazu das Lehrbuch Physik, Klasse 9, S. 84/85!*

Die Erscheinung, daß in einer geschlossenen Ringleitung aus verschiedenen Stoffen eine elektrische Spannung U_{Th} (Thermospannung) und ein elektrischer Strom I_{Th} (Thermostrom) auftreten, wenn die Temperatur längs des Ringes unterschiedliche Werte annimmt, wurde bereits im Jahre 1822 von dem Physiker Th. J. Seebeck entdeckt. Sie wird als **Seebeck-Effekt** bezeichnet.

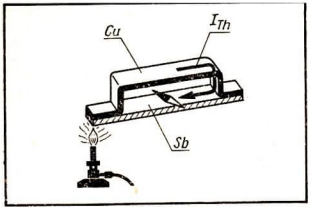


Bild 191/1 Nachweis eines Stromes in einem Thermoelement mit einer Magnetnadel

Eine derartige Kombination aus zwei verschiedenen Stoffen nennt man **Thermoelement**; es setzt die Wärme unmittelbar in elektrische Energie um.

● *Stellen Sie das Prinzip der Energieumwandlung im MHD-Generator und im thermionischen Konverter dem Prinzip der Energieumwandlung im Thermoelement gegenüber! Benutzen Sie dazu den Wissensspeicher Physik, S. 63, bzw. das Lehrbuch Physik, Klasse 12, S. 107 ff.!*

Deutung des Seebeck-Effekts. Das Entstehen einer thermoelektrischen Spannung soll zunächst an den Eigenschaften der Leitungselektronen eines unterschiedlich erwärmten metallischen Leiters erläutert werden.
Beim Erwärmen des einen Endes des Leiters gibt es hier mehr Elektronen, deren Energie größer als ihre Ionisierungsenergie ist, als am kälteren Ende. Infolge der Wärmebewegung der Elektronen setzt ein Diffusionsvorgang ein, den man anschaulich mit der Diffusion zweier verschiedener Gase ineinander vergleichen kann. Die Elektronen mit der größeren Energie als die Ionisierungsenergie wandern bevorzugt zum kälteren Ende, also dorthin, wo ihre Konzentration gering ist. Die Elektronen mit der Energie, die geringer als die Ionisierungsenergie ist, bewegen sich in der umgekehrten Richtung. Die Bewegung beider Elektronen„arten" erfolgt nicht gleichmäßig, so daß sich die beiden Diffusionsströme nicht kompensieren. Die Asymmetrie ist Ursache für eine ungleichmäßige Ladungsträgerverteilung im Leiter, die mit einem elektrischen Feld verbunden ist. Dieses Feld begrenzt das Anwachsen der Ungleichmäßigkeit, so daß sich im Endzustand beide Diffusionsströme kompensieren. Es bildet sich also längs eines metallischen Leiters, an dessen Enden eine Temperaturdifferenz besteht, eine Spannung aus, weil die Enden unterschiedliche Potentiale φ_1 und φ_2 haben.

● *Benutzen Sie diese Deutung, um zu erläutern, was in Bild 191/1 bei Erwärmung der bisher kalten Kontaktstelle geschieht!*
Skizzieren Sie die Auslenkung der Magnetnadel!

Biegt man den metallischen Leiter zu einem Ring entsprechend Bild 192/1, dann entsteht zwischen der warmen (ϑ_2) und den beiden kalten (ϑ_1) Stellen eine Spannung. Schaltet man ein Galvanometer zwischen die beiden Enden gleicher Temperatur, dann fließt kein Strom.

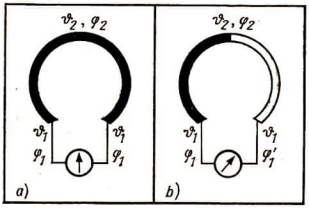


Bild 192/1 Entstehung einer Thermospannung in einem Ring aus
a) einem Metall
b) zwei verschiedenen Metallen

● *Begründen Sie, warum in Bild 192/1a kein Strom fließt!*

Besteht der Ring dagegen aus zwei verschiedenen Metallen (Bild 192/1 b), dann besitzen die beiden Enden trotz gleicher Temperatur verschiedene Potentiale φ_1 und φ_1'; es fließt ein Strom, der Thermostrom.

● *Erklären Sie, warum zwei verschiedene Metalle trotz gleicher Temperatur unterschiedliche Potentiale haben!*

Eine andere Erscheinung tritt auf, wenn sich zwei verschiedene Metalle, die die gleiche Temperatur haben, berühren: An ihren Enden tritt eine Spannung auf, die als Berührungsspannung bezeichnet wird. Verbindet man aber die Enden der Metalle durch ein Galvanometer, dann fließt kein Strom, weil in einem geschlossenen metallischen Kreis die Summe aller Berührungsspannungen Null ist.

Damit lassen sich die gewonnenen Erkenntnisse zusammenfassen in dem folgenden Merksatz über den

Thermostrom:

Wenn die Kontaktstellen zweier verschiedener Stoffe unterschiedlich erwärmt werden, fließt infolge einer Thermospannung ein Strom	$I_{Th} = f(\Delta\vartheta)$

Bei Thermoelementen aus Metallpaaren liegt diese Thermospannung zwischen 10^{-4} V und 10^{-5} V je 1 Grad Temperaturdifferenz. Bei Kombinationen aus Legierungen liegt sie um etwa eine Zehnerpotenz höher (↗ Tabelle 193/1). Aus der Tabelle ist ersichtlich, daß die Thermospannung mit wachsendem Temperaturunterschied der beiden Kontaktstellen nicht einfach linear anwächst, sondern sich in komplizierterer Weise ändert. Bild 193/2 veranschaulicht diesen Sachverhalt grafisch für drei der angeführten Beispiele. Diese Kurven werden auch Kennlinie des Thermoelements genannt.

Tabelle 193/1 Thermospannungen

Materialkombination	Höchsttemperatur ϑ_{max} in °C	U_{Th} in mV bezogen auf $\vartheta_0 = 0$ °C (ϑ in °C)						
		−200	0	+200	+600	+800	+1100	+1600
Kupfer/Konstantan	500	−5,70	0	9,0	34,3			
Eisen/Konstantan	800	−8,15	0	10,55	33,66	46,23		
Nickel/Nikkel-Chrom	1100		0	8,14	24,94	33,27	45,22	
Platin/Platin-Rhodium	1600		0	1,44	5,23	7,34	10,77	16,76

● *Stellen Sie die Kennlinie für die Kombination Kupfer/Konstantan grafisch dar, und diskutieren Sie deren Verlauf!*

Die Thermospannung kann auch bei steigender Temperaturdifferenz wieder abnehmen. So zum Beispiel bei der Kombination Kupfer/Eisen, wo die Thermospannung auf Null absinkt, wenn man die eine Lötstelle auf 0 °C hält und die andere auf 540 °C bringt. Bei dieser Temperaturdifferenz ändert die Thermospannung ihr Vorzeichen.
Thermoelemente aus Metallen zeigen im Vergleich zu anderen Kombinationen noch ein weiteres eigentümliches Verhalten: Ist die Thermospannung jedes der Metalle A und B eines Thermoelements gegen ein beliebiges Bezugsmetall C bekannt, dann kann man die Thermospannung des Thermoelements der Kombination AB nach der folgenden Gleichung berechnen:

$$U_{AC} = U_{AB} + U_{BC} .$$

Diese Tatsache kann man nutzen, um die Metalle nach dem Betrag ihrer Thermospannung, bezogen auf ein Element, zu ordnen, so daß eine **thermoelektrische Spannungsreihe** entsteht.

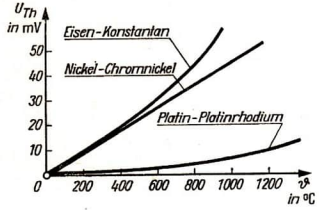


Bild 193/2 Kennlinien verschiedener Thermoelemente

Thermoelektrische Spannungsreihe (bezogen auf Blei)

Element	Sb	Fe	Zn	Cu	Pb	Al	Pt	N	Bi
U_{Th} in $\frac{10^{-6}\,V}{grd}$	+35	+15	+3	+2,8	0	−0,5	−3,1	−19	−70

Aus dieser Reihe kann man den Betrag und die Richtung der Thermospannung für 1 Grad Temperaturdifferenz der beiden Kontaktstellen ablesen. Wählt man zwei Metalle der Reihe aus und stellt aus ihnen ein Thermoelement her, dann entsteht bei *dem* Metall der positive Pol der Spannungsquelle, das in der Reihe vorangeht; am anderen Metall liegt dann der negative Pol.

● *Skizzieren Sie ein Thermoelement (Elemente: Aluminium und Wismut), und kennzeichnen Sie den positiven Pol!*

(38) Die Lötstellen eines Thermoelements aus Antimon und Wismut werden in siedendes Wasser bzw. schmelzendes Eis getaucht. Welche Thermospannung entsteht?

Eichung des Thermoelements. Man verwendet zwei verschiedene Stoffe und verschweißt bzw. verlötet sie. Die eine Lötstelle (Bild 194/1) wird erwärmt, die andere hält man auf Normaltemperatur (etwa 20 °C).
Bei entsprechenden Temperaturen liest man die zugehörigen Spannungen ab und erhält so eine Meßreihe. Stellt man die zusammengehörenden Meßwerte grafisch dar, dann entsteht die **Eichkurve** oder die **Kennlinie** des Thermoelements (↗ S. 193). Das Thermoelement ist geeicht.

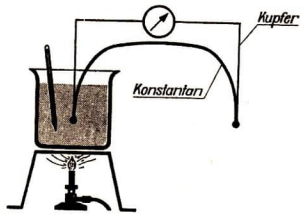


Bild 194/1 Versuchsanordnung zur Eichung eines Thermoelements

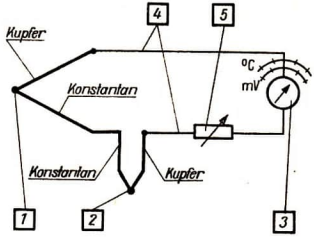


Bild 194/2 Prinzipschaltbild für eine thermoelektrische Meßanordnung
1 — Meßlötstelle, 2 — Vergleichslötstelle, 3 — Galvanometer, 4 — Verbindungsleitungen, 5 — Abgleichwiderstand

Temperaturmessung mit dem Thermoelement. Benutzt man dieselbe Kombination zur Temperaturmessung, dann wird die eine Lötstelle an die Temperaturmeßstelle gebracht, die andere bleibt auf Normaltemperatur. Ein empfindlicher Spannungsmesser, dessen Skale als Ergebnis der Eichung in Temperaturgrade eingeteilt wurde, zeigt nun unmittelbar die festzustellende Temperatur an (Bild 194/2).

● *Erklären Sie das Prinzipschaltbild in Bild 194/2!*

11

▼ Stellen Sie ein Thermoelement aus Kupfer- und Konstantandraht her und nehmen Sie die Eichkurve auf! Bestimmen Sie mit diesem Thermoelement die Temperatur von siedendem Wasser und geschmolzenem Blei!

▼ Weisen Sie mit einem Thermoelement und zwei Hohlspiegeln die Wärmestrahlung einer Kerze in einer Entfernung von 3 m nach!

Deutung der Thermoelektrizität mit Hilfe des Energiebändermodells

● *Skizzieren Sie das Energiebändermodell für zwei Metalle mit unterschiedlichen Ionisierungsenergien!*

Bringt man zwei verschiedene Metalle in innigen Kontakt, dann ergeben sich in der Umgebung der Kontaktstelle andere Wechselwirkungen als im Innern der Metalle (Bild 195/1).
Die Metalle 1 und 2 unterscheiden sich durch die unterschiedlichen Ionisierungsenergien, die für den Austritt der Elektronen aus dem Metallverband erforderlich sind ($W_{i1} < W_{i2}$). Infolge des engen Kontaktes fließen die Elektronen des Metalls 1 in das Metall 2 ab, bis das entstehende elektrische Feld ein weiteres Abfließen verhindert. In Bild 195/1 ist dieser Zustand durch eine gestrichelte Linie dargestellt. Bringt man die beiden anderen Enden der Metalle ebenfalls in innigen Kontakt, so ergeben sich an dieser Kontaktfläche dieselben Verhältnisse wie an der anderen, aber mit dem Unterschied, daß die sich ausbildenden

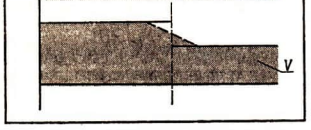


Bild 195/1 Energiebändermodell für einen Metall-Metall-Übergang

elektrischen Felder einander entgegengerichtet und gleich sind. Erst bei unterschiedlicher Temperatur ergeben sich an den Kontaktstellen unterschiedliche Spannungen, weil sich die Energieverhältnisse in den beiden Kontaktstellen unterschiedlich ausbilden. Innerhalb des geschlossenen Leiterkreises fließt ein Thermostrom (↗ S. 192).

Thermoelektrischer Generator. Zur Vergrößerung der Thermospannung schaltet man mehrere Thermoelemente hintereinander. Thermoelektrische Generatoren, auch **Thermobatterien** genannt, können Leistungen zwischen 100 Watt und einigen Kilowatt aufbringen. Allerdings liegt der Wirkungsgrad dieser Generatoren erst bei etwa 2%. Eine Verbesserung des Wirkungsgrades ist zu erreichen, wenn es den Wissenschaftlern gelingt, solche Werkstoffe herzustellen, die wärmebeständig sind und eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen.

● *Begründen Sie mit dem 1. und dem 2. Hauptsatz der Wärmelehre, warum der Wirkungsgrad 1 nicht erreichbar ist!*

Unter der Leitung des sowjetischen Physikers Joffe gelang es, einen Generator mit einem Wirkungsgrad von etwa 3% herzustellen.
Besonders zuverlässig und fast wartungsfrei arbeiten Thermobatterien in Verbindung mit Reaktoren. In der sowjetischen Versuchsanlage „Romaschka" ist der Kern eines Uranspaltungsreaktors mit Thermoelementen umgeben. Diese bestehen aus n- bzw. p-dotierten Germanium-Silizium-Legierungen. Eine der Kontaktstellen wird durch Strahlenabsorption stark erwärmt. Bei einer Temperaturdifferenz von mehr als 500 grd konnte ein Wirkungsgrad von etwa 2% erzielt werden.
Die ebenfalls in der Sowjetunion entwickelte Isotopenenergiequelle Beta-2 wird dort eingesetzt, wo keine besonderen Strahlenschutzmaßnahmen erforderlich sind, so zum Beispiel in abgelegenen Bojen, in Leuchtfeuern und Satelliten (↗ S. 190).

Thermoelemente als Meßfühler. Das Thermoelement gehört zu den **aktiven Meßfühlern**, weil es die zu messende nichtelektrische Größe direkt (ohne Hilfsenergie) in eine elektrische, die Thermospannung, umwandelt.
In der Medizin benutzt man die Meßfühler zu Körper- und Hauttemperaturmessungen und zieht sie zu vergleichenden Beobachtungen zwischen verschiedenen Meßstellen des Körpers heran (z. B. Blutverteilung, Störung der Wärmeproduktion, Durchblutungsstörungen, Testung blutgefäßwirksamer Medikamente).

Gegenüber Temperaturmessungen mit Quecksilberthermometern haben Thermoelemente (Bild 197/1) eine Reihe von Vorteilen:

1. Der Meßbereich ist nur durch die Wärmebeständigkeit (Schmelztemperatur, Korrosionsverhalten) der verwendeten Stoffe und ihr Temperaturverhalten bestimmt.
2. Meßinstrument und Meßstelle können räumlich getrennt sein.

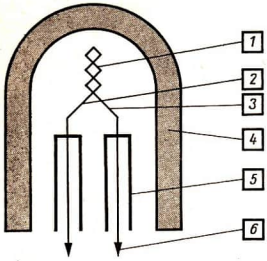


Bild 197/1 Meßkopf eines geschützten Meßfühlers
1 — Meßstelle
2 — Kupferdraht
3 — Konstantandraht
4 — Quarzschutzrohr
5 — Isolierröhrchen
6 — zum Galvanometer

3. Da eine Umwandlung einer nichtelektrischen Größe in eine elektrische Größe vorliegt, ist ein direkter Einsatz in Steuerungs-, Regelungs- und Überwachungsanlagen möglich (elektrischer Temperaturschreiber).
4. Der Meßfehler kann sehr klein gehalten werden.
5. Die Thermoelemente besitzen eine geringe Anzeigeträgheit, so daß die Messung schnellen Temperaturschwankungen folgen kann.

- *Welche Energieumwandlung vollzieht sich bei der Temperaturmessung mit einem Thermoelement?*
- *Worin besteht die Meßgrößenwandlung bei der Temperaturmessung mit einem Thermoelement?*
- *Nennen Sie weitere Beispiele für Meßgrößenwandlungen!*

Thermosäule. Thermoelemente können auch dann eingesetzt werden, wenn nur sehr geringe Wärmemengen zur Verfügung stehen, beispielsweise bei der Bestimmung der Intensität von Licht- und Wärmestrahlen. Für diesen Zweck werden die Lötstellen eines Thermoelements geschwärzt, damit sie die Strahlen absorbieren. So wird über den Umweg der Erwärmung die Intensität durch die Thermospannung gemessen.

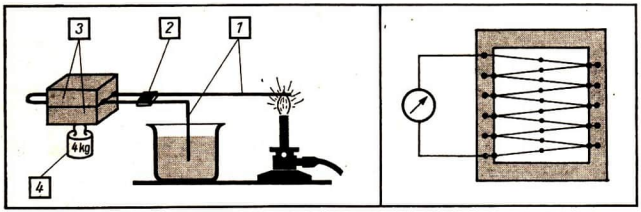


Bild 197/2 rechts: Schematischer Aufbau einer Thermosäule
links: Thermoelektrischer Magnet
1 — Kupferbügel, 2 — Konstantanblock, 3 — Stahlformstücke, 4 — Wägestück

Zur Erhöhung der Wirkung schaltet man auch hier eine Anzahl von Thermoelementen hintereinander (↗ S. 190), so daß eine Thermosäule entsteht (Bild 197/2 rechts).
Die Lötstellen werden so angeordnet, daß abwechselnd die eine bestrahlt wird und die nächste von der Strahlung abgeschirmt ist.

12
▼ Weisen Sie die Wärmestrahlung einer Flamme und die Abstrahlung der Körperwärme eines Menschen mit einer Thermosäule nach!

Thermoelektrischer Magnet. Trotz geringer Thermospannungen kann man eine hohe Stromstärke erreichen, wenn man das Thermoelement aus Stäben mit großem Querschnitt herstellt. Infolge des geringen Widerstandes ist dann die Stromstärke sehr hoch. Bild 197/2 links zeigt eine Anordnung, die aus einem Kupferbügel von etwa 1 cm^2 Querschnitt und einem Konstantanblock besteht. Das eine Ende des Kupferbügels wird mit einer Flamme erwärmt, das andere mit Eiswasser kalt gehalten. Zwei geschliffene Stahlformstücke ergänzen die Anordnung zu einem Elektromagneten mit einer einzigen Windung, der jedoch einen Körper mit der Masse von einigen Kilogramm tragen kann.

● *Wodurch wird die große Kraftwirkung eines thermoelektrischen Magneten erreicht?*

▼ Demonstrieren Sie die Wirkungsweise eines thermoelektrischen Magneten! Bauen Sie das Experiment nach Bild 197/2 auf!
Achten Sie darauf, daß eine sehr enge Berührung der beiden Stahlformstücke gewährleistet ist!

● *Vergleichen Sie einen thermoelektrischen Magneten mit einem Lastenhebemagnet (↗ Lehrbuch Physik, Klasse 9, S. 91)!*

㊴ Welcher Strom fließt durch einen Thermokreis, der aus Eisen- und Konstantanstäben von je 8 cm Länge und 2 cm^2 Querschnitt besteht? Die Temperaturdifferenz der Lötstellen betrage 50 grd. (Die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Widerstände kann vernachlässigt werden.)

Zusammenfassend zum Seebeck-Effekt ergibt sich die Frage, warum nicht eine kleine Ursache (einmaliges Erzeugen einer Temperaturdifferenz) große Wirkungen (ständiges Fließen eines elektrischen Stromes) auslösen kann, sondern nur dann ein konstanter elektrischer Strom fließt, wenn ständig dieselbe Temperaturdifferenz besteht.
Das ist darin begründet, daß auch die Umkehrung des Seebeck-Effektes gilt, die im folgenden Abschnitt näher behandelt wird.

Der Peltier-Effekt

Fließt durch ein Thermoelement ein elektrischer Strom, dann erwärmt sich die eine Kontaktstelle und die andere kühlt sich ab (Bild 199/1). Das beschriebene Experiment zeigt, daß die Umkehrung des Seebeck-Effektes gilt (Peltier, 1834).

(40) Analysieren Sie beide Effekte hinsichtlich ihrer Ursache und Wirkung, und vervollständigen Sie die folgende Tabelle!

	Seebeck-Effekt	Peltier-Effekt
Ursache		
Wirkung		

Analog zum Seebeck-Effekt gilt auch hier, daß sich die Temperaturen der Kontaktstellen vertauschen, wenn die Stromrichtung geändert wird. Die Temperaturänderung erfolgt also stets so, daß der durch sie hervorgerufene Thermostrom dem hineingeleiteten Strom entgegengerichtet ist.

● *Begründen Sie diese Aussage!*

Bei Metallkombinationen sind nur geringfügige Temperaturänderungen zu erreichen. Mit Halbleitermaterialien erhält man dagegen wegen ihrer großen Thermospannung, ihres großen spezifischen elektrischen Widerstandes und ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit bessere Ergebnisse. Günstige Resultate wurden bei Verbindungen von Wismut bzw. Antimon mit Tellur oder Selen erreicht.
Die Wirkung des Peltier-Effektes kann durch ein Experiment verdeutlicht werden. Das Bild 199/2 zeigt eine Glaskugel, in der sich ein Thermoelement aus

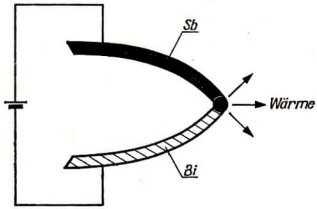


Bild 199/1 Prinzipieller Aufbau zum Nachweis des Peltier-Effekts

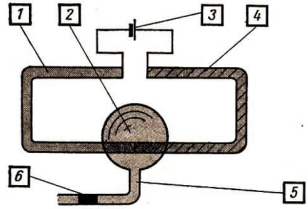


Bild 199/2 Experiment zum Peltier-Effekt
1 — Wismutstab, 2 — Glaskugel,
3 — Spannungsquelle, 4 — Antimonstab,
5 — Glasrohr, 6 — Wassertropfen

Wismut und Antimon befindet. An dieser Kugel ist ein Glasrohr angebracht, das durch einen Wassertropfen verschlossen wird. Da mit wachsender Temperatur auch der Luftdruck in der Kugel steigt, bzw. mit abnehmender Temperatur sinkt, wandert der Tropfen im Rohr, wenn ein Strom durch das Element geschickt wird. Kehrt man die Stromrichtung um, dann wandert der Tropfen in die entgegengesetzte Richtung. Daran ist zu erkennen, daß der Strom bei der einen Polung das Thermoelement erwärmt und bei umgekehrter Polung das Thermoelement abkühlt.

Anwendung des Peltier-Effekts. Den Peltier-Effekt nutzt man zum Bau von **Kühlelementen**. Weil ihre Herstellung jedoch noch sehr teuer ist, werden sie in nur geringem Umfang eingesetzt. Besonders gut eignet sich der Effekt zur **Kühlung kleinster Flächen**, beispielsweise an Hochleistungsdioden und Hochleistungstransistoren zur Abführung der erzeugten Verlustwärme. Des weiteren werden sie zur Kühlung oder zum Konstanthalten der Temperatur von Objektträgern beim Mikroskopieren, von Antibiotika, von Blutplasma usw. eingesetzt. Eine zunehmende Bedeutung gewinnt die Anwendung des Effekts in **Klimaanlagen**.
In der Sowjetunion wurden kleine **Kühlgeräte auf Halbleiterbasis** konstruiert. Herzstück dieser Kühlanlagen sind sogenannte **Peltier-Elemente**, kleine Halbleiterkombinationen, die sich innerhalb eines geschlossenen Schaltkreises bei Stromfluß an einer Kontaktstelle stark abkühlen. Der Betriebsstrom wird durch Thermoelemente gewonnen; durch sie entsteht bei Erwärmung ein elektrischer Strom. Infolge der mehrfachen Energieumwandlung liegt der Wirkungsgrad nur bei 5%. Das reicht jedoch aus, um innerhalb einer halben Stunde mit einem gebräuchlichen Camping-Kocher einen Eiswürfel von etwa 4 cm Kantenlänge herzustellen.

Der Thomson-Effekt

Als eine weitere Umkehrung des Seebeck-Effekts erweist sich der im Jahre 1856 von W. Thomson entdeckte Effekt: Wird ein elektrischer Strom durch einen homogenen Draht geschickt, in dem ein Temperaturgefälle besteht, dann verändert sich die Temperaturdifferenz in Abhängigkeit von der Richtung des

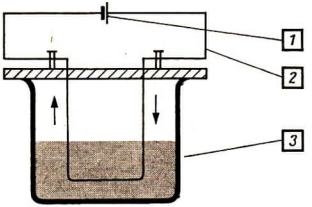


Bild 200/1 Nachweis des Thomson-Effekts
1 — Spannungsquelle, 2 — Platindraht,
3 — Gefäß mit kaltem Wasser

Stromes. Dieser Effekt wird nach seinem Entdecker **Thomson-Effekt** genannt. Durch ein Experiment kann dieser Effekt anschaulich nachgewiesen werden (Bild 200/1).

▼ Schickt man einen Strom durch einen U-förmig gebogenen Platindraht, der teilweise in kaltes Wasser taucht, dann glühen die herausragenden Teile. Oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche herrscht ein starkes Temperaturgefälle. Der Schenkel des Drahtes, in dem der Strom von der höheren zur niederen Temperatur fließt, glüht dicht über der Wasseroberfläche merklich heller als der andere. Bei Umkehrung der Stromrichtung glüht der vorher dunklere Draht heller.

● *Diskutieren Sie, welche Wirkungen die Änderung der Stromrichtung in Bild 200/1 hervorruft!*

Erkenntnisweg

1. Fragestellung. Sie wird aus bereits vorliegenden Erkenntnissen hergeleitet.

Bei Temperaturgleichheit der Verbindungsstellen zweier verschiedener zusammengelöteter Materialien (Metalle, Halbleiter, Legierungen) ist keine Veränderung ihrer elektrischen Eigenschaften feststellbar.
Es ergibt sich die Frage, ob eine Temperaturdifferenz zwischen den Kontaktstellen zu einer Änderung der elektrischen Eigenschaften führt.

2. Folgerung durch deduktives Schließen vom Allgemeinen über das Besondere zum Einzelnen.

Wenn sich die Kontaktstellen auf unterschiedlicher Temperatur befinden, dann diffundieren die Ladungsträger an der wärmeren Kontaktstelle infolge ihrer größeren kinetischen Energie zur kälteren Kontaktstelle. Demzufolge bildet sich eine unterschiedliche Ladungsträgerkonzentration aus; zwischen den Kontaktstellen entsteht eine Spannung, und es fließt ein Strom.

3. Experimentelle Prüfung

Die Spannung und das Fließen eines Stroms können experimentell nachgewiesen werden, wenn die Kontaktstellen eines Thermoelements auf unterschiedliche Temperatur gebracht werden.

4. Deutung der Ergebnisse

Wärmeenergie kann direkt in elektrische Energie umgewandelt werden.

Experiment 1

Herstellen einer übersättigten Lösung und Erzeugung von Kristallkeimen

Für die Herstellung übersättigter Lösungen gibt es zwei Wege:

1. Die bei vorgegebener Temperatur gesättigte Lösung wird langsam abgekühlt.
2. Einer bei vorgegebener Temperatur gesättigten Lösung wird durch Verdunstung ein Teil des Lösungsmittels entzogen.

Aufgabe: Es sind nach beiden Verfahren übersättigte Lösungen von Natriumchlorid, Kaliumbromid bzw. Natriumthiosulfat (Fixiersalz) herzustellen! Beobachtungen an den übersättigten Lösungen sind zu protokollieren!
Die Löslichkeiten der genannten Stoffe betragen für eine Temperatur von 40 °C in je 100 g Wasser:

NaCl: 36,6 g
KBr: 75,5 g
$Na_2SO_3 \cdot 5\,H_2O$: 102,6 g .

Es kann mit geringen Lösungsmittelmengen gearbeitet werden. Die Abkühlung einer gesättigten Lösung erfolgte in einem Eimer mit kaltem Wasser oder in einem großen Becherglas. Gesättigte Lösungen erhält man, indem man übersättigte Lösungen bei konstanter Temperatur solange stehen läßt, bis nichts mehr auskristallisiert. Die Lösung wird vom Bodenkörper abfiltriert.
Beim Verdunstungsverfahren ist das Gefäß mit der gesättigten Lösung durch ein sauberes Tuch abzudecken.

Experiment 2

Züchtung eines Einkristalls aus Kaliumalaun

Es werden 20 g Kaliumalaun in 100 g destilliertem Wasser bei einer Temperatur von 60 °C gelöst.
Die Lösung wird abgekühlt, bis der Bodenkörper nicht mehr zunimmt. Von diesem wird die Lösung abfiltriert. In dieser gesättigten Lösung von etwa 20 °C werden weitere 4 g Kaliumalaun gelöst. Dazu wird die Temperatur um einige Grade erhöht. Danach läßt man die Temperatur auf die Arbeitstemperatur absinken und hält sie in einem Wasserbad auf einer elektrischen Wärmeplatte unter Verwendung eines Kontaktthermometers konstant. Die Lösung befindet sich in schwach übersättigtem Zustand (Bild 203/1).

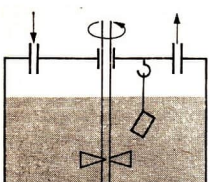


Bild 203/1 Einfacher Versuchsaufbau für das Züchten von Kristallen aus Lösungen nach dem Verdunstungsverfahren. An einem Dederonfaden wird ein zuvor gewonnener Impfkristall von mindestens 3 mm Länge befestigt und in die Lösung gehängt.[1] Das Lösungsgefäß wird abgedeckt. Ein besonders gutes Wachstum ist zu erreichen, wenn der Impfkristall in der Lösung gedreht wird

- *Skizzieren Sie verschiedene Möglichkeiten für einen Versuchsaufbau, bei dem der Keimkristall gegenüber der Lösung gedreht wird! Bauen Sie die Apparatur auf!*

Experiment 3

Beobachtung der Ausbildung verschiedener Kristallstrukturen unter einem Mikroskop

In jeweils 10 ml Wasser werden gelöst: 5,5 g Eisensulfat; 3,6 g Kupfersulfat; 6,0 g Kaliumchromat; 11 g Natriumazetat; 13 g Kaliumnatriumtartrat (Seignettesalz); 2 Spalttabletten. Lösungstemperatur etwa 30 °C.
Ein bis zwei Tropfen dieser Lösungen werden auf Mikroskopdeckgläschen gegeben. Die Bildung der Kristalle läßt sich unter dem Mikroskop beobachten. Von den Kristallformen sind Skizzen anzufertigen! Der Vorgang kann auch mit einem Diaskop projiziert werden.

Experiment 4

Ausbildung unterschiedlicher Kristallformen durch Fremdstoffbeimischungen

Eine bei 20 °C gesättigte wäßrige Lösung von Kaliumbromid wird hergestellt und auf fünf Reagenzgläser verteilt.
Ein Glas wird zum Vergleich zurückgestellt. In die restlichen vier Gläser gibt man Bleichlorid- oder Bleinitratlösungen in unterschiedlicher Konzentration. Das Auskristallisieren auf einem Deckgläschen oder auf einem Diapositivglas ist zu beobachten. Von den entstandenen Kristallformen werden Skizzen angefertigt.

[1]) Impfkristalle werden aus übersättigten Lösungen durch Verdunsten des Lösungsmittels gewonnen. Zu diesem Zweck gießt man die übersättigten Lösungen in Petrischalen und überdeckt diese mit Verbandsgaze.
Nach etwa zwei Tagen sind genügend große Kristalle entstanden. Nach vorsichtigem Abgießen der Restlösung werden die größten Impfkristalle mit einer Pinzette herausgenommen, mit destilliertem Wasser kurz abgespült und auf Filterpapier getrocknet.

Experiment 5

Ausbildung von Polykristallen aus einer Schmelze

a) 25 g Phenylsalizylat (Salol) werden in einem gut verschlossenen kleinen Erlenmeyerkolben (50 ml) in ein Wasserbad von 55 °C gehängt. Das Salol schmilzt bei 43 °C. Nachdem die Substanz geschmolzen ist, wird der Erlenmeyerkolben aus dem Wasserbad genommen und von der Seite mit Licht durchstrahlt. Beim Abkühlen entstehen in der Schmelze einzelne Salolkristalle, die am kurzen Aufblitzen im Lichtstrahl erkennbar sind. Nach einiger Zeit ist die gesamte Schmelze zu einer polykristallinen Masse erstarrt.

b) Es ist ein Temperatur—Zeit-Diagramm für den Erstarrungsvorgang nach erneutem Schmelzen des Salzes aufzunehmen!

Experiment 6

Temperaturabhängigkeit von Widerständen

Aufgabe. Die Widerstände eines Thermistors und eines metallischen Widerstandsthermometers sollen im Temperaturbereich von 20 °C bis 100 °C ermittelt werden. Es ist zu prüfen, ob die Gleichung für R den Zusammenhang zwischen Widerstand und Temperatur im Falle des Thermistors besser wiedergibt als die Gleichung für R_δ. Die Temperaturkoeffizienten sowie a und b sind zu ermitteln!

Vorbetrachtungen

1. Wie werden die Temperaturkoeffizienten α_{Therm} und α_{Metall} berechnet?
2. Leiten Sie die Gleichung her, nach der lg R als Funktion von $1/T$ bei Anwendung der Gleichung für R dargestellt werden kann!
3. Wie können die Konstante a und die Größe b rechnerisch ermittelt werden?

Geräte und Hilfsmittel

V-Fuß	Widerstandsmeßbrücke	Öl
Stativheizplatte (220 V/150 W)	Stromversorgungsgerät	Wasser
Kalorimeter	Widerstandsthermometer	Verbindungsleiter
Thermometer	Thermistor	

Versuchsdurchführung

Das Ölbad wird erwärmt. Dabei ist laufend ein Temperaturgleichgewicht zwischen dem zu messenden Widerstand und dem Temperierbad anzustreben. Mit einer Wheatstonschen Brücke wird der Widerstand zu Beginn des Versuches sowie nach jeweils 10 grd Temperaturänderung gemessen.

Auswertung

1. Stellen Sie den Widerstand des Thermistors und des Widerstandsthermometers als Funktion der Temperatur dar und diskutieren Sie die Kurven! (Verwenden Sie im Falle des Thermistors logarithmisches Papier!)
2. Berechnen Sie die Temperaturkoeffizienten sowie a und b!
3. Berechnen Sie den relativen Fehler des Temperaturkoeffizienten!

Experiment 7

Kennlinien eines Transistors

Aufgabe: Bestimmen Sie die $I_C - U_{CE}$-Kennlinien eines Transistors und seine Leistungsverstärkung in Emitterschaltung,

Vorbetrachtungen

1. Welche Eigenschaften hat der Transistor in Emitterschaltung?
2. Wie erfolgt die Steuerung am Transistor?
3. Wie ist die Leistungsverstärkung am Transistor zu ermitteln?

Geräte und Hilfsmittel

1 Grundplatte „Flächentransistor"
1 Transistor GC 811 auf Steckbrett
2 Schiebewiderstände 100 Ω, 3,5 W
2 Strommeßgeräte (1 mA; 10 mA)
1 Spannungsmeßgerät (1 V; 10 V
Stromversorgungsgerät
Schnellklemmen
Verbindungskabel

Versuchsdurchführung

Der Aufbau des Versuches erfolgt nach dem Schaltbild (Bild 123/1). Es wird $I_C = f(U_{CE})$ in Sperrichtung zwischen Emitter und Kollektor bei verschiedenen Basisströmen I_B untersucht.

Vor der Durchführung des Versuches müssen nach $P_{max} = U_{CE} \cdot I_C$ die zulässigen Ströme I_C für alle Spannungen U_{CE} von 0 V bis 10 V bei $P_{max} = 25$ mW berechnet werden (Tabelle). In der graphischen Darstellung ergeben diese Werte die Verlusthyperbel. Mit Hilfe des Spannungsteilers T_1 stellt man einen bestimmten Strom I_B ein und verändert mit dem Spannungsteiler T_2 die Kollektorspannung U_{CE} um je 1 V. Wegen der Rückwirkung des Ausgangs auf den Eingang muß bei jeder Kollektorspannung U_{CE} der Basisstrom I_B mit T_1 nachgestellt werden. Dann wird der jeweils anliegende Kollektorstrom I_C abgelesen. Die Meßwerte werden tabelliert. Ihre graphische Darstellung ergibt die $I_C - U_{CE}$-Kennlinien des Transistors.

Da auch die Leistungsverstärkung zu bestimmen ist, sollte wegen $V_P = V_I \cdot V_U$ und $V_P = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ und $V_U = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta U_{BE}}$ jeweils gleich U_{BE} gemessen werden. Für zugeordnete Wertepaare läßt sich dann die Leistungsverstärkung bestimmen. Folgende Meßbereiche sind zu wählen:

zu messende Größe	Meßbereich	zu messende Größe	Meßbereich
U_{CE} I_B	10 V 1 mA	I_C U_{BE}	10 mA 1 V

Ergebnisse

$P_{max} = 25$ mW
$I_B = 50\ \mu A$
$I_B = 100\ \mu A$
$I_B = 150\ \mu A$
$I_B = 200\ \mu A$

U_{CE} in V	I_C in mA	U_{BE} in V	U_{CE} in V	I_C in mA	U_{BE} in V
1 · · · 10			1 · · · 5		

Auswertung

1. Übertragen Sie die Meßwerte in ein entsprechendes Koordinatensystem!
2. Diskutieren Sie die Kennlinien!
3. Ermitteln Sie die Leistungsverstärkung

Experiment 8

Spektrale Empfindlichkeit eines Fotowiderstandes

Durchführung

Ein Fotowiderstand wird in Reihe mit einem Milliamperemeter geschaltet. Es wird eine Spannung $U < 42$ V angelegt. Der Lichtstrahl einer Experimentierlampe wird in Spektralfarben zerlegt und der Fotowiderstand wird in gleichbleibendem Abstand vom Prisma (Interferenzfilter, Farbfilter) durch die einzelnen Spektralbereiche bewegt. Die jeweiligen Ausschläge des Milliamperemeters sind ein Maß für das Produkt aus spektraler Energieverteilung der Lichtquelle und Empfindlichkeit des Fotowiderstandes.

Experiment 9

Fotostrom eines Fotowiderstandes

Durchführung

Ein Fotowiderstand wird in Reihe mit einem Miliamperemeter und parallel zu einem Voltmeter geschaltet. Die Spannung ist über ein Potentiometer regelbar. Sie darf nicht über 42 V betragen. Der Fotowiderstand wird mit gleichbleibender Lichtstärke bestrahlt und die Spannung stufenweise erhöht.

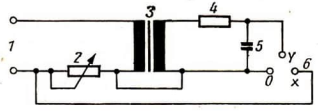
Experiment 10

Demonstration von Hystereseschleifen

Geräte und Hilfsmittel

1 Spannungsquelle (12 V ~)
2 Potentiometer (50 Ω)
3 Transformator
(250 Wdg : 3000 Wdg)
4 Widerstand (62 kΩ)
5 Kondensator (4 μF)
6 Katodenstrahloszillograf

Versuchsaufbau



Versuchsunterweisung

1. Bauen Sie den Versuch nach der vorgegebenen Schaltung mit Geräten des SEG „Elektrik" auf!
2. Nehmen Sie zunächst einen geblätterten Kern für den Transformator 3. Skizzieren Sie das Oszillogramm!
3. Wechseln Sie den geblätterten Kern gegen einen massiven aus! Skizzieren Sie das Oszillogramm!

Versuchsauswertung

1. Diskutieren Sie die erhaltenen Oszillogramme!
2. Vergleichen Sie die Hystereseschleifen eines Ferro- und eines Ferrimagneten!

Experiment 11

Eichung eines Thermoelementes

Aufgabe. Stellen Sie ein Thermoelement aus Kupfer- und Konstantandraht her, und nehmen Sie die Eichkurve auf! Bestimmen Sie mit diesem Thermoelement die Temperatur von siedendem Wasser und geschmolzenem Blei!

Versuchsunterweisung

1. Herstellung eines Thermoelements

Zwei Kupferdrähte und ein Konstantandraht von je 30 cm Länge werden auf einer Länge von 2 cm verdrillt und verlötet. Um die Drähte gut zu isolieren, werden auf sie Porzellanperlen aufgezogen. An die freien Enden bringt man zwei Ausgleichsdrähte aus Kupfer von etwa 0,5 m Länge an, an deren Enden Lüsterklemmen befestigt werden.

2. Eichung des Thermoelements

Bauen Sie den Versuch nach Bild 194/1 auf!
Bringen Sie vor Beginn der Messung die eine Lötstelle kurz in siedendes Wasser, um den Meßbereich des Spiegelgalvanometers durch einen geeigneten Vorwiderstand festlegen zu können! Erwärmen Sie die eine Lötstelle allmählich und vermeiden Sie durch ständiges Umrühren mit dem Rührer eine örtliche Erwärmung der Flüssigkeit!
Stellen Sie die Meßwerte grafisch dar ($U_{Th} = f(\Delta\vartheta)$)!

3. Temperaturmessung mit dem geeichten Thermoelement

Bringen Sie die Meßlötstelle in das siedende Wasser bzw. in das flüssige Blei und lesen Sie die entsprechende Spannung ab!
Entnehmen Sie aus der Eichkurve des Thermoelements die dazugehörenden Temperaturen!

Experiment 12

Messungen mit der Thermosäule

Aufgabe. Weisen Sie die Wärmestrahlung einer Flamme und die Abstrahlung der Körperwärme mit einer Thermosäule nach!

Geräte und Hilfsmittel

Thermosäule auf Stativ
Spiegelgalvanometer
Verbindungsleiter
Kerze

Versuchsunterweisung

Bauen Sie das Experiment nach Bild 197/2 auf!
Bringen Sie die Flamme einer Kerze in die Nähe der Thermosäule! Beobachten Sie den Ausschlag des Galvanometers bei geringer werdender Entfernung!
Nähern Sie eine Hand der Thermosäule! Stellen Sie fest, in welcher Entfernung die Wärmestrahlung noch nachgewiesen werden kann.

Lösungen

1 $Q = 14000$ kcal
$m = 176{,}4$ kg

2 $m = 74{,}6$ kg

3 $Q = 1091{,}2$ kg $\quad t_m = 40{,}41$ °C

4 $P_1(2, 4, 4)$ $\quad P_2(0, 6, 3)$ $\quad P_3(4, 7, 0)$
$P_4(6, 5, 2)$ $\quad P_5(7, 8, 6)$

5 1(100) 2(110) 3(111) 4(112)

6 $CuSO_4$ nur Inversionszentrum
$CaCO_3$ (1) 3 Symmetrieebenen, 3 zweizählige Achsen
$CaCO_3$ (2) 1 dreizählige Achse, drei Spiegelebenen

7 Polymorphie liegt dann vor, wenn der gleiche chemische Stoff verschiedene Kristallarten bildet. Bei den vorliegenden Quarzkristallen handelt es sich um eine Polymorphie.

8 Zur Elementarzelle des Natrium- und des Chlor-Untergitters gehört jeweils 1 Ion. Es handelt sich bei den Untergittern um einfache kubische Gitter. Die Elementarzelle enthält von den acht Eckatomen nur 1/8, die übrigen Teile gehören zu den benachbarten Elementarzellen.

9 Bei einem kubisch raumzentrierten Gitter kommt zu den Gitterbausteinen der kubischen Elementarzelle noch das Atom im Würfelmittelpunkt hinzu. Die Anzahl der Cu-Ionen beträgt damit in der Elementarzelle 2.

10 Wenn die Molmasse M g beim Kupfer und der Abstand der Kupferatome a cm betragen, so gilt

$$\varrho \cdot a^3 = \frac{M}{6 \cdot 10^{23}}$$

Damit wird $a = 2{,}28 \cdot 10^{-8}$ cm.

11 Geht man von kugelförmigen Magnesiumatomen aus, so läßt sich mit der röntgenografisch festgestellten Gitterkonstanten $a = 3{,}2 \cdot 10^{-8}$ cm das Atomvolumen näherungsweise berechnen. Dabei wird von der in der Praxis bewährten Annahme ausgegangen, daß $r = a/2$. Damit wird $V = 17{,}2 \cdot 10^{-24}$ cm³.
Exakt kann ein Atomvolumen nicht angegeben werden, weil die Elektronenhülle in ihrem Radius nicht genau lokalisiert werden kann.

12 Aus Tabellen können die Atom- und Ionenradien entnommen werden.

Cl	$0{,}99 \cdot 10^{-8}$ cm	Cl^-	$1{,}81 \cdot 10^{-8}$ cm
Mn	$1{,}3 \cdot 10^{-8}$ cm	Mn^{++}	$0{,}91 \cdot 10^{-8}$ cm
Br	$1{,}14 \cdot 10^{-8}$ cm	Br^-	$1{,}96 \cdot 10^{-8}$ cm

Die unterschiedlichen Radien für Atome und Ionen desselben Elements sind die Folge der Vergrößerung der „Elektronenwolke" bei negativen Ionen. Im Fall der positiven Ionen fehlen Elektronen der äußeren „Schale". Außerdem kann die Anziehungskraft des Atomkerns häufig stärker wirken, er zieht die Elektronen stärker an sich heran.

13 Cäsiumchlorid kristallisiert im kubisch raumzentrierten Gitter. Ein Atom des einen Elements ist jeweils von 8 Atomen des anderen Elements umgeben. Koordinationszahl: 8.

14 Wird der Koordinatenursprung in einen Eckpunkt des Gitters gelegt, so hat dieses Cl-Ion die Koordinaten (000). Das nächst benachbarte Cl-Ion hat dann folgende Koordinaten (1, 0, 0) (oder 0, 1, 0) oder (0, 0, 1). Das Cäsiumion hat dann die Koordinaten (1/2, 1/2, 1/2).

15 Die Zinkblende kristallisiert genauso wie der Diamant. Die Zinkatome besetzen ein kubisch flächenzentriertes Gitter. Die Schwefelatome besetzen die Mitte der Achtelwürfel des Zinkgitters. Jedes Zinkatom und jedes Schwefelatom ist jeweils von 4 Schwefel- oder Zinkatomen umgeben. Koordinationszahl: 4.

16 Die Kristallstruktur des Indiumarsenids ist in Abb. 210/1 dargestellt. Die schwarz dargestellten Indiumatome sind von vier Arsenatomen umgeben. (Koordination: 4). Wird der Koordinatenursprung in das Indiumatom 4 gelegt, dann haben die Atome 1, 2 und 3 folgende Koordinaten

1(0; 0; 0,604) 2(−0,302; 0; 0,302)

3(−0,453; −0,151; 0,151)

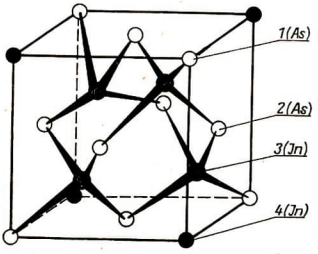


Bild 210/1

17 $\Delta W \approx -3{,}80\ \text{eV}$

18 $l_{01} \approx 0{,}38\ \text{m}$
$l_{02} \approx 1{,}62\ \text{m}$

19 $\lambda_{\min} = 0{,}0031\ \text{nm}$

20 $\vartheta_1 = 8{,}8°$
$\vartheta_2 = 17{,}8°$

21 $\underline{R = 1{,}1\ \Omega}$

22 $\underline{\varrho = 0{,}028\ \Omega\text{mm}^2\,\text{m}^{-1}}$

23 $R = \varrho_1 \cdot \frac{l}{A} \qquad \varrho = \frac{m}{V} \qquad l = \frac{m}{\varrho \cdot A}$

$R = \varrho_1 \cdot \frac{m}{\varrho \cdot A^2}$

$\underline{R = 57{,}3\ \Omega}$

24 $R_\vartheta = R_0\,(1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_0))$

$\vartheta = \left(\frac{R_\vartheta}{R_0} - 1\right) \cdot \alpha^{-1} + \vartheta_0$

$\underline{\vartheta = 51{,}91\ °\text{C}}$

25 Eigenleitung
Si: $W = 1{,}1\ \text{eV}$; $\delta = 8287\ °\text{C}$
Ge: $W = 0{,}66\ \text{eV}$; $\delta = 4867\ °\text{C}$
n-Leitung
Si: $W = 0{,}05\ \text{eV}$; $\delta = 116\ °\text{C}$
Ge: $W = 0{,}01\ \text{eV}$; $\delta = 195{,}3\ °\text{C}$
Die errechneten Werte liegen über den Tabellenwerten. Eigenleitung und n-Leitung setzen auf Grund der Wechselwirkung der Eletronen untereinander bereits viel früher ein. Die errechneten Werte geben die obere Grenze der thermischen Anregung an, bei der alle Elektronen ins Leitungsband übergehen.

26 $\delta = -117\ °\text{C}$

27 $n = 8{,}93 \cdot 10^{18}$

28 $v = 1{,}1 \cdot 10^6\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

29 $\lambda = 3{,}2 \cdot 10^{-7}\ \text{m}$

30 $W_A = 6{,}323\ \text{eV}$

31 $U_i = 5{,}12\ \text{V}$

32 $W_D = 2{,}6 \cdot 10^{19}\ \text{Ws} \cdot \text{m}^{-3}$

33 $P = 4 \cdot 10^9\ \text{W}; \quad P = 4\ \text{GW}$

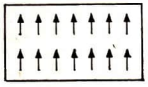
34 $\vec{M} = (\mu_r - 1)\,\mu_0 \vec{H} \qquad \chi_m = \frac{M}{B_0} \qquad M = \chi_m B_0$

$B_0 = \mu_0 H \qquad M = \chi_m \mu_0 H$

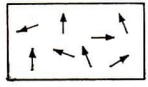
$\chi_m \mu_0 H = (\mu_r - 1)\,\mu_0 H$

$\chi_m = \mu_r - 1$

35 a) magnetische Momente eines Weißschen Bezirkes eines Ferromagneten



b) magnetische Momente eines Paramagneten ohne äußeres Feld



36 Die Dicke einer Blochwand umfaßt etwa 10^3 Atomlagen.

37 — vertikal übereinanderstehende Spulen: Ablenkung des Elektronenstrahls in der Horizontalen (Lorentzkraft steht senkrecht auf der Geschwindigkeit der Elektronen und der magnetischen Induktion) Auslenkung ist proportional der Feldstärke (Luftspulen).
— nebeneinanderstehende Spulen: Ablenkung des Elektronenstrahls in der Vertikalen.
Auslenkung ist proportional der magnetischen Induktion (eisengefüllte Spulen).

38 $U_{AB} = U_{AC} - U_{BC}$ $\qquad U_{AC} = 35 \cdot 10^{-6}\ V \cdot grd^{-1}$

$U_{BC} = -70 \cdot 10^{-6}\ V \cdot grd^{-1}$

$\underline{U_{Ab} = 105 \cdot 10^{-6}\ V \cdot grd^{-1}}$

Für eine Temperaturdifferenz von 100 °C ergibt sich eine Thermospannung von 105 mV.

39 $I_{Th} = \frac{U_{Th}}{R}$ $\qquad U_{Th} = 2{,}7\ mV,$ $\qquad R = R_1 + R_2$

$I_{Th} = \frac{U_{Th} \cdot A}{(\varrho_1 + \varrho_2) \cdot 1}$ $\qquad R = (\varrho_1 + \varrho_2) \cdot \frac{1}{A}$

$\underline{I_{Th} = 11\ A}$

40

	Seebeck-Effekt	Peltier-Effekt
Ursache	Temperaturdifferenz zwischen zwei Kontaktstellen verschiedener Materialien	Stromfluß durch zwei Kontaktstellen verschiedener Materialien
Wirkung	Stromfluß infolge Thermospannung	Temperaturdifferenz an den Kontaktstellen

Quellennachweis

Fabry, F.: 21/1; VWV-Archiv: 13/1 · 15/1 · 19/1 · 33/1 · 61/1 · 84/1 · 98/1 · 168/1; Wendt, J.: 18/1; Wilke, H.: 179/1; Wörstenfeld, W.: 26/1 · 42/1; Zentralbild: 7/1 · 75/1 · 127/1 · 138/1 · 190/1;

Reproduktionen aus:
Agricola-Büchlein. Sachsenverlag Dresden 1955: 8/1;

Kirenski, Magnetismus. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1969: 177/2; 178/1; Schumann, Metallographie. VEB Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1969: 15/1 · 23/1 · 47/2;

Werkstoffprüfung von Metallen. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1968: 54/1.

Kurzwort: 02 17 04 Festk-Physik Lehrb
DDR 6,10 M