

# Supraleitung – Strom ohne Widerstand

## Teil 4

*Im vierten Teil dieser mehrteiligen Artikelserie zum Phänomen Supraleitung werden die grundlegenden Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten für die Normalleitung in festen Stoffen besprochen.*

*In weiteren Beiträgen werden Denkansätze zur Erklärung der Supraleitung und Anwendungsbeispiele beschrieben.*

### 5. Leitungsmechanismus

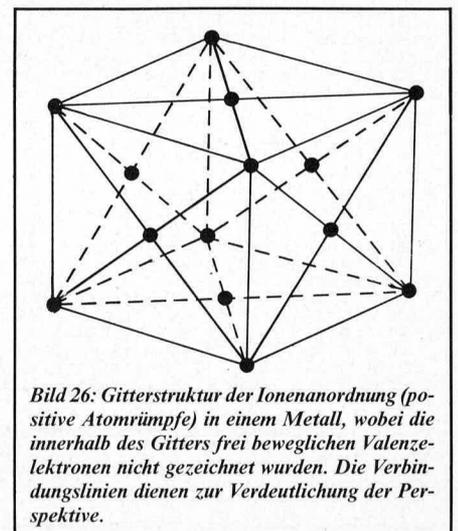
In den vorangegangenen Beiträgen wurden die wichtigsten Eigenschaften des supraleitenden Zustandes beschrieben. Als Einstieg für das Verständnis der Supraleitung wird nachfolgend die elektrische Leitfähigkeit von Stoffen mit Hilfe der zugehörigen Modellansätze erläutert.

#### 5.1 Normalleitung

Die elektrische Leitfähigkeit einer Substanz ist vorwiegend von der Anzahl der freien Ladungsträger abhängig. Im Gegensatz zu flüssigen und gasförmigen Substanzen findet bei Festkörpern keine Ionenleitung statt. Ionen sind Atomrümpfe, denen ein oder mehrere Elektronen der Hülle fehlen. Da

auch gasförmige und flüssige Substanzen bei hinreichender Abkühlung in den festen Zustand übergehen, werden im folgenden nur noch Festkörper behandelt. Unter dem Mikroskop zeigen die meisten Elemente und Verbindungen im festen Zustand eine kristalline Struktur. Bei Stromleitung verbleiben die Atomrümpfe des Kristalls fest an ihren Gitterplätze gebunden. Der elektrische Strom entsteht durch den Transport von frei beweglichen Elektronen, die sich unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes durch die fest an ihre Gitterplätze gebundenen Atomrümpfe bewegen. Dabei wird die Struktur des leitenden Stoffes nicht beeinflusst. In Abbildung 26 ist ein typisches Beispiel für die Ionenanordnung in einem Metall gezeigt. Gezeichnet sind nur die Atomrümpfe

Von  
Professor Dr. rer. nat. Siegfried Fellmann  
Fachbereich Naturwissenschaftliche Technik  
Fachhochschule Ostfriesland  
2970 Emden



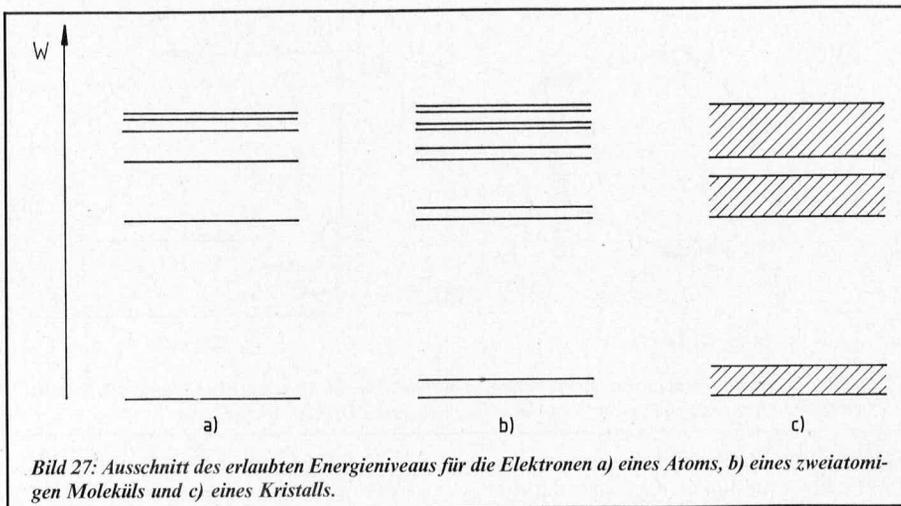


Bild 27: Ausschnitt des erlaubten Energieniveaus für die Elektronen a) eines Atoms, b) eines zweiatomigen Moleküls und c) eines Kristalls.

der Metallatome, während die frei beweglichen Elektronen zeichnerisch nicht dargestellt sind. Unter dieser Ordnungsstruktur versteht man das Metallgitter.

Jedes Atom besitzt gemäß seiner im Kern enthaltenen Protonenzahl eine positive Ladung, die im neutralen Zustand durch die um den Kern kreisenden negativen Ladungen der Elektronen kompensiert werden. Im neutralen Zustand stimmen daher Protonenzahl und Elektronenzahl überein. Das chemische Verhalten von Elementen wird durch die sogenannten Valenzelektronen charakterisiert. Die Valenzelektronen sind diejenigen, die die jeweiligen Kerne in den größten Abständen umkreisen. Gleichzeitig sind diese Valenzelektronen für die Bindung zu den benachbarten Atomen in einem Kristall verantwortlich (Valenzbindung). Diese Valenzelektronen können am leichtesten durch äußere Störungen wie z. B. mechanische Einwirkungen oder elektrische Felder beeinflusst werden.

Je nach Abstand vom Kern besitzt jedes Elektron eine ganz bestimmte Energie. Nach Bohr können die Elektronen eines Einzelatoms nur ganz bestimmte, diskrete Energien einnehmen. Dabei kann nach dem Pauli-Prinzip jeder energetische Zustand eines Atoms nur von einem einzigen Elektron besetzt werden. Diese möglichen Energiezustände eines Elektrons sind in Abbildung 27 a für ein Einzelatom dargestellt. Wenn dagegen ein zweiatomiges Molekül vorliegt, ergeben sich im Gegensatz zu einem Einzelatom für die erlaubten Energiezustände jeweils zwei eng beieinanderliegende Energieniveaus, so daß das Verhalten gemäß Abbildung 27 b resultiert. Bei einem kristallinen Verbund liegt schließlich eine äquidistante Kette von Atomen vor, wobei derart viele Einzelenergieniveaus existieren, daß diese nicht mehr voneinander zu unterscheiden sind. Diese extrem eng beieinanderliegenden Energien faßt man daher zu Energiebändern zusammen. Dieser Sachverhalt ist schließlich in Abbildung 27 c gezeigt. Danach bildet die Gesamtheit aller Energieniveaus eines Kristalls, die aus einer bestimmten Energiestufe eines Einzelatoms entstanden sind, ein Energieband. Dazwischen liegen nicht erlaubte Energiebereiche, die als verbotene Zonen anzusehen sind.

Für das Verständnis des Leitungsmechanismus sowie das unterschiedliche Verhalten

von Leitern, Isolatoren und Halbleitern genügt es, nur zwei Energiebänder mit der dazwischenliegenden verbotenen Zone gemäß Abbildung 28 zu berücksichtigen. Das untere Energieband heißt Valenzband und ist das höchste mit Elektronen vollbesetzte Energieband. Das höchste zulässige Energieniveau innerhalb des Valenzbandes wird mit  $W_V$  bezeichnet. Entsprechend gilt für das Leitungsband, daß es entweder keine Elektronen enthält oder daß nur ein Teil der möglichen Energiezustände innerhalb dieses Energiebandes besetzt sind. Dementsprechend ist das Leitungsband ein leeres oder nicht vollbesetztes Energieband. Dessen tiefstes zulässige Energieniveau wird mit  $W_L$  bezeichnet. Die Energiewerte zwischen diesen erlaubten Bändern sind für Elektronen verboten und bilden daher eine verbotene Zone, die man auch als Energielücke  $\Delta W = W_L - W_V$  bezeichnet.

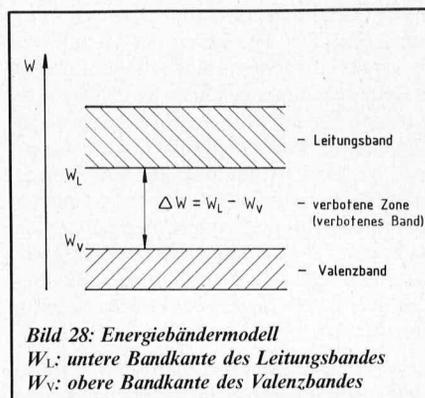


Bild 28: Energiebändermodell  
 $W_L$ : untere Bandkante des Leitungsbandes  
 $W_V$ : obere Bandkante des Valenzbandes

Mit dieser Vorstellung kann man eine Einteilung der Festkörper hinsichtlich ihrer Fähigkeit, den elektrischen Strom zu leiten, vornehmen. Hier sind die Besetzungsverhältnisse mit Elektronen in den beiden Energiebändern (Valenz- und Leitungsband) von Bedeutung. So kann ein vollständig besetztes Band zur Stromleitung nicht beitragen, da jede Beschleunigung eines Elektrons in einem elektrischen Feld zu einer Zunahme seiner Bewegungsenergie und damit zu einer Hebung des Elektrons auf ein höheres Energieniveau führen würde. Da alle Energieniveaus in einem Valenzband und somit auch die höher gelegenen innerhalb dieses Bandes bereits besetzt sind, würde eine solche Hebung zu einer Doppelbesetzung eines Energieniveaus führen. Dies ist nach dem Pauli-Prinzip verboten, da jedes

Energieniveau nur von einem einzigen Elektron besetzt sein darf. Bei der Untersuchung von Leitungsvorgängen in Festkörpern brauchen daher vollständig besetzte Energiebänder (Valenzbänder) nicht berücksichtigt zu werden. Man kann auch sagen, daß Elektronen, deren Energieniveaus in einem vollbesetzten Energieband liegen, nicht frei beweglich sind, so daß sie auch keine Leitfähigkeit verursachen können.

Anders liegen dagegen die Verhältnisse bei extrem hohen elektrischen Feldern. Dann besteht die Möglichkeit, daß Elektronen aus einem Valenzband in ein darüberliegendes leeres Band (Leitungsband) angehoben werden, womit sie frei beweglich werden und somit zum Stromfluß beitragen. Dieser Vorgang tritt jedoch nur bei extrem hohen Feldstärken im Inneren eines Festkörpers auf. Das Freisetzen von Elektronen im Inneren eines Festkörpers mit Hilfe sehr großer elektrischer Feldstärken heißt Zener-Effekt. Im allgemeinen reichen die Feldstärken für diesen Vorgang jedoch nicht aus.

Ein Leitungsband ist nie mit Elektronen voll besetzt, so daß Elektronen in diesem Energieband beim Beschleunigen durch ein elektrisches Feld immer freie Energiezustände vorfinden, die sie einnehmen können, ohne daß das Pauli-Prinzip verletzt wird. Die Elektronen des Leitungsbandes sind daher die Träger des elektrischen Stroms. Frei bewegliche Elektronen im Leitungsband stehen nur dann zur Verfügung, wenn dieses Band entweder nicht voll besetzt ist (einwertiges Metall; vgl. Abbildung 29 a) oder aber sich Valenz- und Leitungsband teilweise überlappen (zweiwertiges Metall; vgl. Abbildung 29 b). Für diese Fälle liegen metallische Leiter vor. In der Abbildung 29 a und b ist durch die doppelte Schraffur jeweils der Bereich des Leitungsbandes markiert, der durch freibewegliche Elektronen besetzt ist.

Bei einem Halbleiter sind Valenzband und Leitungsband durch einen bestimmten Energieabstand voneinander getrennt (vgl. Abbildung 29 c). Leitungselektronen erhält man nur dann, wenn den Valenzelektronen ein ausreichender Energiebetrag zugeführt wird, um den verbotenen Bereich zwischen beiden Bändern zu überspringen. Die Energiezufuhr kann dabei z. B., wie bereits erwähnt, mit Hilfe großer elektrischer Felder, durch thermische Anregung oder auch durch optische Anregung erfolgen. Bei den wichtigsten Halbleitermaterialien Germanium und Silizium liegen diese zu überwindenden Mindestenergieabstände bei 0,72 eV bzw. bei 1,1 eV. Da der Mittelwert der statistisch verteilten thermischen Energie der Elektronen bei Zimmertemperatur nur etwa 0,04 eV beträgt, ist die Wahrscheinlichkeit sehr gering, daß Elektronen ausreichend Energie aufnehmen können, um durch thermische Energiezufuhr diesen Energieabstand zu überwinden. Daher ist die Zahl der leitfähigen Elektronen in einem Halbleiter sehr viel geringer als in einem metallischen Leiter. Die Leitfähigkeit eines Halbleiters wächst mit zunehmender Temperatur, da dann immer mehr Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband gelangen können. Umgekehrt nimmt die Leitfähigkeit von Halbleitern mit sinkender Temperatur ab, da dann immer weniger Elektronen aus

der thermischen Bewegung genügend Energie aufnehmen können, um das verbotene Band zu überspringen und damit ins Leitungsband zu gelangen.

In einem Isolator (vgl. Abbildung 29 d) ist schließlich der Abstand zwischen Valenzband und Leitungsband noch merkbar größer als in einem Halbleiter. Bei Diamant beträgt dieser Energieabstand z. B. etwa 7 eV. Substanzen, deren verbotenes Energieband  $\Delta W > 3$  eV ist, zählt man zu den Isolatoren. Bei diesen sind daher im Leitungsband überhaupt keine Elektronen vorhanden, da unter Normalbedingungen der erforderliche Energiebetrag von  $\Delta W > 3$  eV zur Überwindung der verbotenen Zone nicht zur Verfügung steht. So entspricht der Energie von 1 eV eine mittlere thermische Energie von 11 000 Grad. Dieses unterschiedliche Verhalten für Metalle, Halbleiter und Isolatoren mit den zugehörigen Energiebändermodellen ist in Abbildung 29 zusammengefaßt und vergleichend dargestellt.

Man kann diesen Sachverhalt auch wie folgt beschreiben: Alle festen Körper sind aus Atomen aufgebaut. Je nach dem Verhalten der Valenzelektronen dieser Atome kann man dementsprechend die festen Körper in verschiedene Typen einteilen. So gibt es Festkörper, bei denen die Valenzelektronen fest an ihre Atome gebunden sind. Solche festen Körper bestehen daher einfach aus neutralen Atomen. Beispielfhaft dafür können die Edelgase im kristallisierten Zustand stehen. Diese Art der Bindung heißt Van-Der-Waals-Bindung.

Dagegen teilen benachbarte Atome ihre Valenzelektronen in kovalenten Kristallgittern miteinander (z. B. Silizium oder Germanium). In diesem Falle spricht man dann von der kovalenten oder homöopolaren Bindung oder auch von Atombindung bzw. Elektronenpaarbindung. Die kovalente Bindung kommt durch Elektronen zustande, die den das Molekül aufbauenden Atomen gemeinsam gehören.

Außerdem gibt es noch die heteropolare Bindung oder aber auch die Ionenbindung. Diese kommt dadurch zustande, daß sich zwei unterschiedlich geladene Ionen anziehen wie etwa das positive Na-Ion und das negative Cl-Ion im NaCl-Kristall (Kochsalz). Die primär neutralen Na- und Cl-Atome tauschen Elektronen aus, wobei sie besonders stabile Edelgaskonfigurationen ihrer Atomhüllen erreichen (abgeschlossene Schalen!). Da dabei das Na-Atom ein Elek-

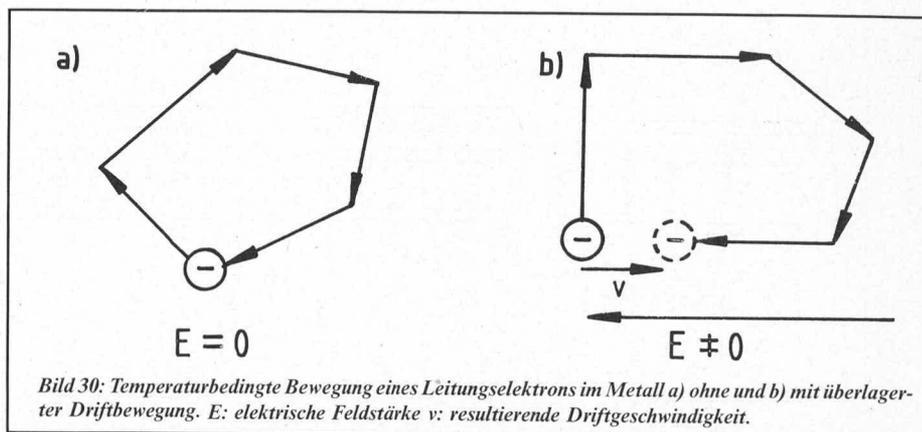


Bild 30: Temperaturbedingte Bewegung eines Leitungselektrons im Metall a) ohne und b) mit überlagerter Driftbewegung. E: elektrische Feldstärke v: resultierende Driftgeschwindigkeit.

tron abgibt und das Cl-Atom ein zusätzliches Elektron aufnimmt, ergibt sich die oben beschriebene unterschiedliche Ladung der beteiligten Ionen. Daraus resultiert eine anziehende Coulombkraft für die beiden Ionen (Ionenbindung).

Schließlich sind in Metallen die Valenzelektronen nicht mehr an irgendein bestimmtes Atom gebunden, sondern sie gehören zu dem Kristallgitter als Ganzes und können sich somit völlig frei in diesem bewegen. Dabei spalten die Metallatome je nach ihrer Wertigkeit ein oder mehrere Elektronen ab, die sich dann wie die Teilchen eines Gases zwischen den fixierten positiven Atomrümpfen bewegen. Daher spricht man in diesem Fall auch von einem Elektronengas, wobei die frei beweglichen Elektronen auch als Leitungselektronen bezeichnet werden. Die Leitungselektronen gehören daher den resultierenden positiven Metallionen gemeinsam an und schirmen die abstoßende Coulombkraft der Ionen ab, woraus sich der Zusammenhalt des Metallgitters ergibt (metallische Bindung). Man kann auch sagen, daß die Gesamtheit der Metallionen in das Elektronengas eingebettet ist und von diesem zusammengehalten wird. Dabei ergibt sich für die positiven Metallionen eine regelmäßige Raumstruktur – das Kristallgitter (vgl. auch Abbildung 26). Die Beweglichkeit der Leitungselektronen ist außergewöhnlich groß und zudem energiereich, so daß sie in der Lage sind, sich überall im Metall zu bewegen. Ihre mittlere Geschwindigkeit in Metallen liegt in der Größenordnung von  $10^6$  m/s.

Bei dieser schnellen Bewegung der Leitungselektronen innerhalb der Gitterstruktur der Atomrümpfe gibt es Zusammenstöße der Elektronen untereinander und mit den Gitter-

tionen. Nach jedem Stoß fliegen die Elektronen mit veränderter Geschwindigkeit und Richtung weiter. Diese temperaturbedingte Bewegung der Elektronen führt jedoch noch zu keinem Strom, da diese Elektronenbewegung statistisch über eine bestimmte Zeit betrachtet als Kreisprozeß anzusehen ist. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 30 angedeutet. Wenn dagegen ein elektrisches Feld E angelegt wird, dann tritt zusätzlich zu der temperaturbedingten statistischen Bewegung eine gerichtete Bewegung der Elektronen auf. Daraus resultiert eine Driftbewegung des gesamten Elektronengases innerhalb der Metallgitterrümpfe. Der elektrische Strom in einem Leiter ist daher auf die Driftbewegung von freien Elektronen, die unter der Wirkung eines elektrischen Feldes erfolgt, zurückzuführen. Die typische Driftgeschwindigkeit v der Leitungselektronen in Metallen beträgt etwa 0,1 mm/s.

Da auch die Atomrümpfe des Gitters temperaturbedingt Bewegungen (Schwingungen) um ihre Ruhelage ausführen, werden die Elektronen bei ihrer Driftbewegung mit diesen schwingenden Atomrümpfen zusammenstoßen, so daß der gerichtete Elektronenfluß behindert wird. Dadurch kommt der elektrische Widerstand  $R \neq 0$  von metallischen Normleitern zustande. Da mit zunehmender Temperatur einmal die Gitterbausteine Schwingungen ausführen, deren Frequenz und Amplitude größer wird, und zum anderen die temperaturbedingte ungeordnete Bewegung der Elektronen zur Erhöhung ihrer mittleren Geschwindigkeit führt, nimmt die Wahrscheinlichkeit für Zusammenstöße der Leitungselektronen untereinander und mit den Gitterbausteinen mit wachsender Temperatur ebenfalls zu. Daraus resultiert eine Zunahme des elektrischen Widerstandes mit wachsender Temperatur. Umgekehrtes Verhalten zeigt sich bei sinkender Temperatur. Da oberhalb von  $T = 0$  K immer temperaturbedingte Bewegungen der Elektronen und Gitterbausteine vorliegen, wird verständlich, daß aufgrund dieser Deutung der elektrische Widerstand von metallischen Leitern bestenfalls erst bei  $T = 0$  K verschwinden kann. Aufgrund dieses Bildes wird allerdings nur eine stetige Abnahme des elektrischen Widerstandes mit sinkender Temperatur verständlich, keinesfalls aber das abrupte Verschwinden des elektrischen Widerstandes oberhalb von  $T = 0$  K, wie es nämlich bei Supraleitern vorliegt. Daher muß zur Deutung der Supraleitung ein anderes Bild herangezogen werden.

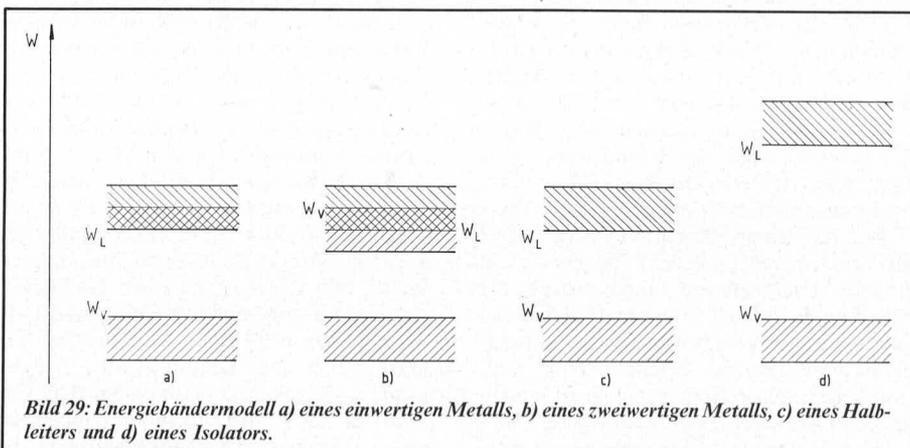


Bild 29: Energiebändermodell a) eines einwertigen Metalls, b) eines zweiwertigen Metalls, c) eines Halbleiters und d) eines Isolators.