

Supraleitung – Strom ohne Widerstand

Teil 6

In diesem Beitrag der mehrteiligen Artikelserie zum Thema Supraleitung werden zunächst die Josephson-Effekte besprochen, wobei auch einige Hinweise für die Anwendung dieser Effekte gegeben werden. Der vorliegende Beitrag wird abgeschlossen mit einigen Erklärungsansätzen zum Verständnis der neuen keramischen Hochtemperatur-Supraleiter.

von
Prof. Dr. rer. nat. Siegfried Fellmann
Fachbereich Naturwissenschaftliche Technik
Fachhochschule Ostfriesland
2970 Emden

Als Konsequenz der BCS-Theorie leitete Josephson im Jahre 1962 Überlegungen zum Verhalten eines Tunnelkontaktes aus zwei Supraleitern her. Die nach ihm benannten Effekte treten in zwei Arten auf, und zwar als Gleichstrom-Josephson-Effekt und als Wechselstrom-Josephson-Effekt. Diese Vorhersagen stießen zunächst auf Skepsis, wurden aber schon wenige Jahre später experimentell bestätigt. Bereits im Jahre 1973 erhielten D. Josephson, I. Giaever und L. Esaki für diese Arbeiten den Nobelpreis für Physik.

Bevor die Josephson-Effekte genauer erklärt werden, soll zunächst einiges zum Tunneleffekt allgemein gesagt werden. Der prinzipielle Aufbau für ein solches Tunnelexperiment ist in Abbildung 34 dargestellt. Dort sind zwei metallische Leiter, zwischen denen sich eine Isolatorschicht befindet, mit einer Spannungsquelle verbunden. Das ebenfalls angeschlossene Amperemeter zeigt einen Tunnelstrom an, wenn die Isolatorschicht ausreichend dünn ist (ungefähr 10^{-8} m). Auch ohne äußere Spannung durchdringen die Elektronen der beiden Leiterkomponenten die dazwischen liegende Isolatorschicht. Im Mittel gelangen dabei jedoch gleich viel Elektronen vom linken Leiter auf die rechte Seite wie vom rechten Leiter auf die linke Seite, so daß sich im Gleichgewichtszustand die Tunnelströme kompensieren. Erst durch die Vorgabe einer Vorzugsrichtung, wie sie durch die angelegte Spannung gegeben ist, fließt ein von Null verschiedener und damit meßbarer Tunnelstrom. Dabei durchdringen die Elektronen eine Barriere, als ob sie durch einen Tunnel laufen. Unter dieser Barriere hat man sich eine Energiebarriere vorzustellen, die mit Hilfe des Energiebändermodells verständlich wird. Grundvoraussetzung für die Stromleitung ist die Existenz frei beweglicher Elektronen, die in einem nur teilweise besetzten Energieband – dem Leitungsband – vorhanden sind. Dagegen ist ein Isolator dadurch charakterisiert, daß außerhalb des voll besetzten Valenzbandes im darüberliegenden Energieband kein einziges Elektron vorhanden ist. Dazu

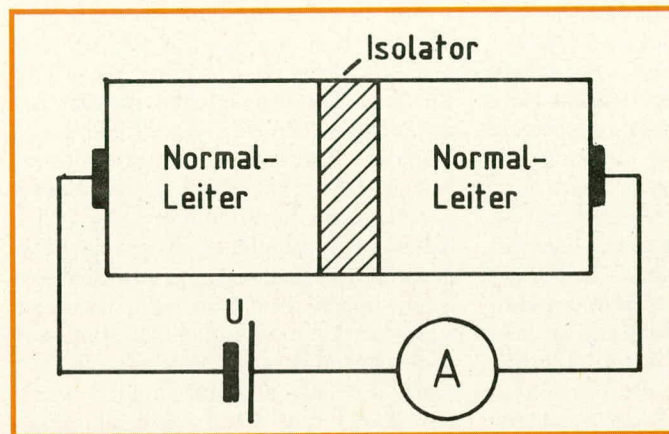


Bild 34: Prinzipieller Aufbau zur Messung von Tunnelströmen

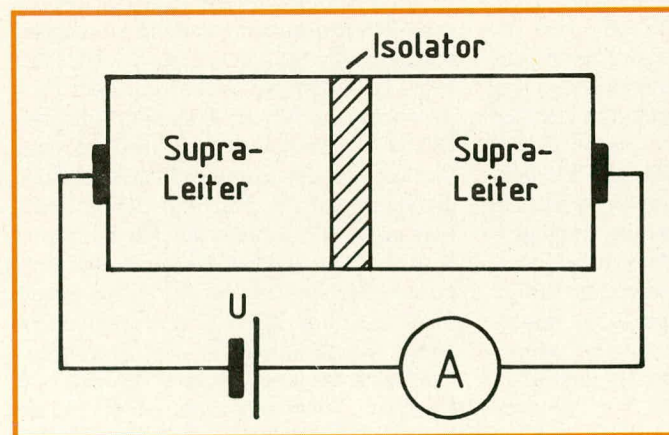


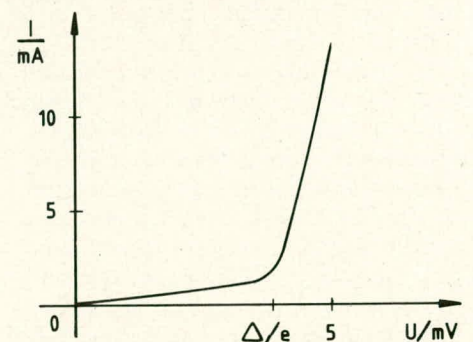
Bild 35: Supraleiter-Supraleiter Tunnelkontakt

links: Prinzipieller Aufbau

unten: Strom-Spannungscharakteristik
 $U = \Delta/e$ ist die zum Aufbrechen eines Cooper-Paares notwendige Spannung

kommt noch, daß der Energieabstand zwischen Valenzband und Leitungsband extrem groß ist. Daraus resultiert eine Energiebarriere für Elektronen, die von einer Seite des Isolators auf die andere Seite gelangen wollen. Da die entsprechende Energie nicht zur Verfügung steht, können die Elektronen diese Barriere nur überwinden, indem sie sie durchtunneln.

Ähnlich liegen die Verhältnisse, wenn zwei supraleitende Proben durch eine dünne Schicht aus isolierender Substanz mit einer Dicke von ca. 10^{-8} m getrennt sind. Der prinzipielle Aufbau für ein entsprechendes Tunnelexperiment ist in Abbildung 35a gezeigt und stimmt in den wesentlichen Komponenten mit der Abbildung 34 überein; allerdings mit dem Unterschied, daß die Substanzen auf Temperaturen in die Nähe des absoluten Null-



punkts gebracht sein müssen. In Abbildung 35b ist die zugehörige Strom-Spannungscharakteristik gezeigt. Während bei extrem niedrigen Spannungen nahezu kein Tunnelstrom fließt, nimmt er bei $U = \Delta/e$ stark zu (e : Ladung eines Elektrons, U : an-

liegende Spannung). Dieser Tunnelstrom besteht völlig aus ungepaarten Elektronen.

Dagegen ist ein Tunnelstrom, der von Cooper-Paaren unter Beibehaltung der Paarkorrelation getragen wird, nur dann möglich, wenn die isolierende Schicht zwischen den beiden Supraleitern noch deutlich kleiner ist als der o. g. Wert. Dieser Fall wird weiter unten bei der näheren Erläuterung der Josephson-Effekte nochmals aufgegriffen.

Zunächst soll noch dargelegt werden, wie die Strom-Spannungscharakteristik der Abbildung 35b zu deuten ist. Die anliegende Spannung U sorgt dafür, daß die Energie der Elektronen auf einer Seite in Bezug zur Energie der Elektronen auf der anderen Seite um den Wert $e \cdot U$ erhöht wird. Solange $e \cdot U < \Delta$ ist, steht nicht genügend Energie zur Verfügung, um ein Cooper-Paar aufzubrechen, da Δ die Bindungsenergie eines Cooper-Paares ist. Sobald die Bedingung $e \cdot U = \Delta$ erfüllt ist, werden die Cooper-Paare in frei bewegliche Elektronen aufgebrochen. Die beweglichen Elektronen können dann das Hindernis einzeln durchtunneln und so zum Strom beitragen. Wegen der zusätzlichen ungepaarten Elektronen, die zum Strom beitragen, wird daher bei der Spannung $U = \Delta/e$ der Tunnelstrom stark ansteigen. Aus dem Spannungswert, bei dem die plötzliche Zunahme der Tunnelstromstärke vorliegt, kann die Energielücke – bedingt durch die Paarkorrelation bei den Cooper-Paaren – bestimmt werden. Da das Produkt aus $e \cdot U$ eine Energie darstellt, kann aus der Messung dieser kritischen Spannung $U = \Delta/e$ direkt die Bindungsenergie eines Cooper-Paares bestimmt werden. Die plötzliche Zunahme der Stromstärke ist bei tiefen Temperaturen besonders stark ausgeprägt, da mit wachsender Temperatur die Anzahl der Cooper-Paare abnimmt, so daß dann bei $U = \Delta/e$ auch weniger ungepaarte Elektronen erzeugt werden können. Der plötzliche Anstieg der Tunnelstromstärke verwischt sich daher mit zunehmender Temperatur.

Wenn die isolierende Schicht zwischen zwei Supraleitern noch weiter verringert wird – auf ungefähr 10^{-9} m und kleiner –, können nicht nur die eben besprochenen Übergänge von Einzelelektronen erfolgen, sondern es können auch Cooper-Paare tunneln. Dieser von Cooper-Paaren getragene Tunnelstrom wäre dann widerstandsfrei wie in einem einzelnen Supraleiter. Somit würde er ohne von außen angelegte Spannung durch das isolierende Hindernis fließen. Dies ist der Gleichstrom-Josephson-Effekt.

Das Entscheidende hierbei ist, daß zwei Supraleiter durch eine Oxidschicht nur schwach gekoppelt sind. Diese schwache Kopplung läßt sich auch durch einen

Punktkontakt oder – wie schon erwähnt – durch einen dünnen normalleitenden Film realisieren. Die tatsächlich auftretende Stärke des Josephson-Gleichstroms ist begrenzt, da bei entsprechender Stromstärke die Cooper-Paare, die das Hindernis durchtunneln, eine ausreichende Energie besitzen, um in ungepaarte Elektronen zu zerfallen. Diese ungepaarten Elektronen können sich aber nicht widerstandsfrei bewegen, da sie durch Stöße mit den Gitterionen Energie verlieren, was zu einem endlichen Widerstand führt. Daher existiert eine obere Grenze für die Größe des Josephson-Gleichstroms.

Von besonderer Bedeutung ist die Wirkung eines äußeren Magnetfeldes auf den Josephson-Gleichstrom. Wenn die Richtung des Magnetfeldes parallel zur isolierenden Schicht verläuft, wird der maximale Josephson-Gleichstrom so verändert, daß er mit steigender Feldstärke periodisch ab- und zunimmt. Dieses Verhalten ist in Abbildung 36 gezeigt. Genauere Untersuchungen zeigen, daß der Strom immer dann Null wird, wenn der Kraftfluß durch das isolierende Hindernis gerade mit einem ganzzahligen Vielfachen von $h/2e$ (Flußquant) überstimmt, wobei h das Planck'sche Wirkungsquantum ist. Besonders empfindlich reagiert der Josephson-Gleichstrom auf Magnetfelder, deren magnetischer Fluß bei $h/2e = 2 \cdot 10^{-15}$ Wb liegt. Dabei ist das Weber mit dem Einheitenzeichen Wb die Einheit des magnetischen Flusses, der identisch ist mit dem Produkt aus der magnetischen Kraftflußdichte B und der von ihm durchsetzten Fläche A . Die Einheit der magnetischen Kraftflußdichte B ist das Tesla mit dem Formelzeichen T, wobei die Beziehungen $T = \text{Vs}/\text{m}^2$ und $\text{Wb} = \text{Vs} = T \cdot \text{m}^2$ gelten. Diese Empfindlichkeit des Josephson-Effektes auf äußere Magnetfelder wird zum Nachweis sehr schwacher Magnetfelder ausgenutzt. Unter Ausnutzung dieses Effektes können Änderungen der magneti-

schen Kraftflußdichte von kleiner als 10^{-11} T innerhalb einer Kraftflußdichte von 0,25 T nachgewiesen werden. Damit läßt sich ein Auflösungsvermögen von größer als 10^{10} realisieren.

Daher wird dieser Effekt in empfindlichen Magnetfeldmessern – sogenannte SQUID's (Superconducting Quantum Interference Device) – ausgenutzt. Mit solchen Magnetfeldsonden können Magnetfelder berührungslos ausgemessen werden, die kleiner als der 10^6 te Teil des magnetischen Erdfeldes sind. Unter dem Abschnitt „Anwendungen“ wird dieser Punkt erneut aufgegriffen.

Beim Wechselstrom-Josephson-Effekt wird eine konstante Spannung U an dem isolierenden Hindernis aufrechterhalten. Dann tritt am Tunnelkontakt auch eine Normalstromkomponente auf. Die außerdem noch vorhandene Suprastromkomponente oszilliert mit einer Frequenz, die zur anliegenden Spannung proportional ist. Man erhält dabei einen Wechselstrom mit der Frequenz $2eU/h$. Da $2e/h = 483,6 \text{ MHz}/\mu\text{V}$ gilt, ergeben sich sehr große Frequenzen. So ergibt sich bereits bei einer Spannung von etwas mehr als $2 \mu\text{V}$ eine Frequenz von $1 \text{ GHz} = 1000 \text{ MHz}$. Auch diese Vorhersage von Josephson ist längst experimentell bestätigt und wird inzwischen etwa zur Festlegung eines Spannungsnormals ausgenutzt.

Zum Abschluß dieses Kapitels sollen noch einige Bemerkungen zum Leitungsmechanismus in den neuen keramischen Hochtemperatur-Supraleitern gemacht werden. Auch bei diesen beruht die Supraleitung auf Paarbildung. Durch eine Reihe von Experimenten kann diese Aussage als belegt gelten. Allerdings sind Details noch strittig und unklar.

G. Bednorz und K. A. Müller gingen bei ihrer Suche nach Supraleitern mit höherer Sprungtemperatur von folgender Idee aus. Die Elektronen-Phononen-Kopplung spielt für die Supraleitung eine we-

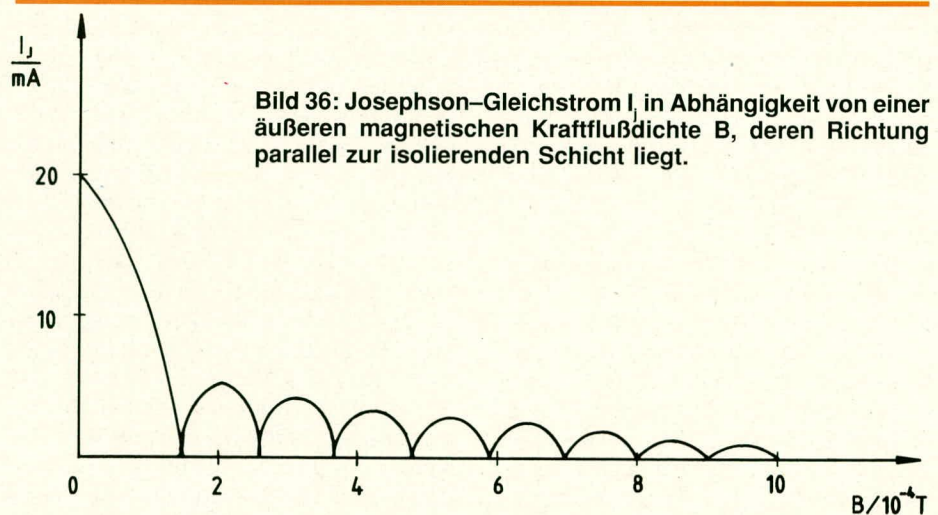


Bild 36: Josephson-Gleichstrom I_c in Abhängigkeit von einer äußeren magnetischen Kraftflußdichte B , deren Richtung parallel zur isolierenden Schicht liegt.

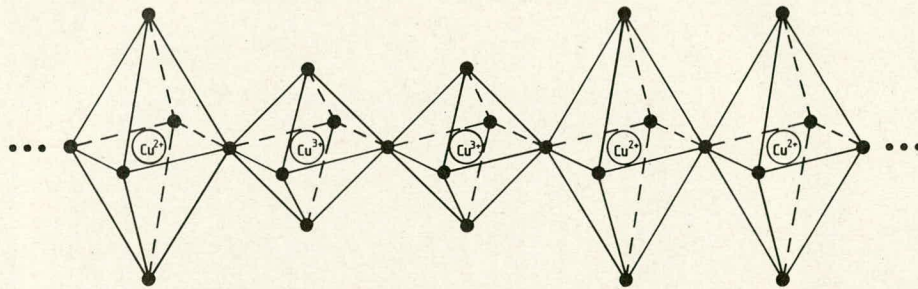
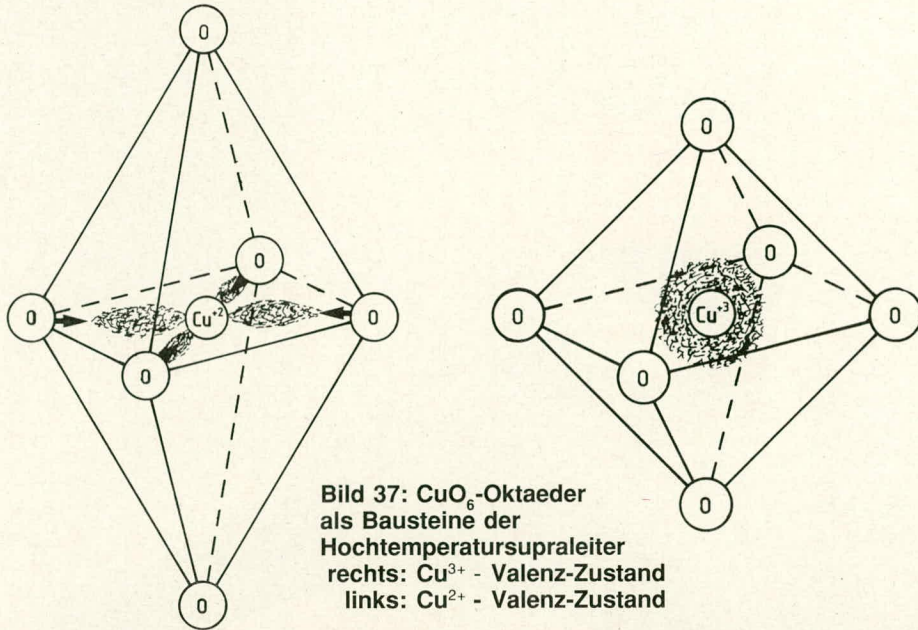


Bild 38: Ausschnitt eines Keramik-Gitters La_{1,85}Sr_{0,15}CuO₄. Durch die Zugabe von Sr wird die Valenzänderung der Cu-Ionen von Cu²⁺ nach Cu³⁺ erreicht.

sentliche Rolle. Diese Kopplung ist bei Kupferoxiden relativ stark ausgeprägt. Dementsprechend enthalten die neuen Hochtemperatur-Supraleiter als Bausteine CuO₆-Oktaeder. Dabei tritt Kupfer in den beiden Valenzzuständen Cu²⁺ und Cu³⁺ auf. Im Valenzzustand Cu³⁺ liegen nur abgeschlossene Elektronenschalen vor. In der Atomhülle sind die Elektronen in Schalen angeordnet, wobei gemäß Pauli-Prinzip in den einzelnen Schalen jeweils nur eine ganz bestimmte Anzahl von Elektronen unterzubringen ist. Eine abgeschlossene Schale bedeutet, daß die Elektronen insgesamt kugelsymmetrisch verteilt sind. Im zweiten Valenzzustand Cu²⁺ liegt zusätzlich ein ungepaartes Elektron vor. Dieses ungepaarte Elektron hält sich bevorzugt in einer Ebene auf. Dies führt dazu, daß die sechs Sauerstoffnachbarn darauf durch eine tetragonale Verzerrung reagieren (Jahn-Teller-Effekt). Die Konsequenz ist daher eine extrem starke Gitterpolarisation, die wiederum Vorausset-

zung für die Bildung von Cooper-Paaren ist. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 37 dargestellt. Während Abbildung 37a die kugelsymmetrische Elektronenverteilung des Cu³⁺-Valenzzustandes zeigt, vermittelt Abbildung 37b einen Eindruck der tetragonalen Verzerrung im Cu²⁺-Valenzzustand durch das zusätzliche ungepaarte Elektron.

Die Zusammenfügung dieser Bausteine mit unterschiedlichen Valenzzuständen der Kupferionen ist ausschnittsweise noch einmal in Abbildung 38 gezeigt. Dargestellt ist dort ein Hochtemperatur-Supraleiter mit der Struktur La_{1,85}Sr_{0,15}CuO₄. Die Dotierung (Zugabe) mit Strontium (Sr) erzwingt eine Valenzänderung der Kupferionen von Cu²⁺ nach Cu³⁺. Die ursprünglich gestreckten Oktaeder mit den zentralen Cu²⁺-Ionen werden durch diese Maßnahme deformiert und führen zu CuO₆-Oktaedern mit zentralen Cu³⁺-Ionen in gestauchter Form.

Es soll an dieser Stelle nicht verschwiegen werden, daß die skizzierte Erklärung für die Paarbildung in den neuen keramischen Hochtemperatur-Supraleitern nur eine Möglichkeit von einer ganzen Reihe von Vorschlägen ist. Auf die Beschreibung anderer Modellansätze wird im Rahmen dieser Ausführungen verzichtet, da hier nur ein Überblick vermittelt werden kann. Die Vertreter für die breit gefächerten Erklärungsansätze sind sich weitgehend darin einig, daß die Ursachen für die ungewöhnlichen Eigenschaften der Hochtemperatur-Supraleiter wohl in den extrem starken elektronischen Korrelationen zu suchen sind.

Zusammenfassend darf mit Sicherheit festgestellt werden, daß die Entdeckung der neuen Hochtemperatur-Supraleiter für die moderne Festkörper-Forschung eine wichtige Weichenstellung repräsentiert. Dies gilt auch für die Möglichkeit einer breiten Anwendung der Supraleitung in der Technik. Schwerpunktmäßig wird dabei im Forschungsbereich vor allem die Optimierung der kritischen Parameter T_c, B_{c2} und j_c stehen. Voraussetzung dafür ist ein besseres Verständnis der Vorgänge, die für die besonderen Daten der keramischen Hochtemperatur-Supraleiter von Bedeutung sind. Dementsprechend werden auch vom Bundesministerium für Forschung und Technologie erhebliche Mittel für die Förderung von Forschungsschwerpunkten der Supraleitungs- und Tieftemperaturtechnik zur Verfügung gestellt. Dabei werden sowohl Projekte an Hochschulen, Großforschungseinrichtungen und Max-Planck-Instituten als auch sogenannte Verbundprojekte gefördert. Die Verbundprojekte laufen dabei unter Beteiligung von Forschungsinstituten und industriellen Unternehmen. Gerade für die letztgenannten Projekte sind die Förderungsmittel in den Haushaltsjahren 1987 und 1988 erheblich aufgestockt worden. Es bleibt die Frage, inwieweit dieses Engagement im Bereich der Hochtemperatur-Supraleitungsforschung im Vergleich zur internationalen Konkurrenz ausreichend ist. Vor allem in den USA und in Japan werden für dieses Arbeitsgebiet sowohl im sächlichen als auch im personellen Bereich erheblich mehr Mittel bereitgestellt als in der Bundesrepublik Deutschland. Das derzeitige „Know-How“ auf diesem Gebiet entspricht im Moment in der BRD dem internationalen Standard und sollte nicht durch mangelnde Unterstützung aufs Spiel gesetzt werden.

In der folgenden Ausgabe wird diese Artikelserie zum Thema Supraleitung abgeschlossen. Dort werden einige der vielen möglichen Anwendungsaspekte der Supraleitung besprochen. **ELV**