

# Supraleitung

## Ein kurzer Überblick

Autor: Dr. Werner Prusseit

Die folgende Zusammenstellung soll mit möglichst einfachen Worten ohne tieferen theoretischen Bezug einen kurzen Überblick über das Phänomen der Supraleitung und der damit verbundenen Effekte geben.

Der Text erhebt damit keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Analogien oder vereinfachende Bilder dienen lediglich der Veranschaulichung und sind deshalb nicht bis ins letzte Detail hin belastbar.

Als weiterführende Literatur empfehlen wir:

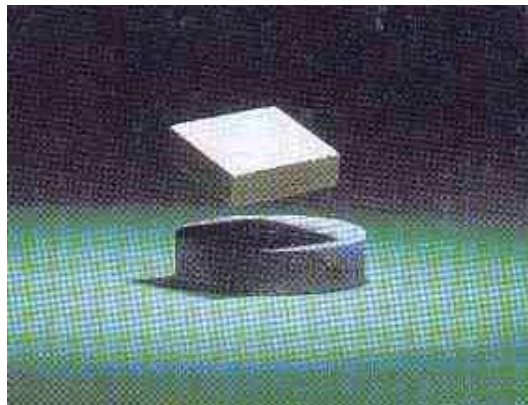
W. Buckel, R. Kleiner

**Supraleitung:** Grundlagen und Anwendungen,  
Wiley-VCH, 6. Auflage (2004)

### Inhaltsverzeichnis

Was ist Supraleitung?.....	2
Mechanismus.....	3
Hochtemperatur – Supraleiter (HTS) .....	4
Meissner Effekt.....	5
Typ I Supraleiter.....	6
Typ II Supraleiter.....	6
Gleichstromwiderstand.....	7
Hochfrequenzwiderstand .....	7
Josephson - Effekte.....	8
Gleichstrom – Josephson - Effekt .....	8
SQUID.....	9
Wechselstrom - Josephson - Effekt .....	9
Intrinsischer Josephson - Effekt.....	10

## Was ist Supraleitung?



Supraleitung, d.h. das vollständige Verschwinden des elektrischen Widerstandes, ist ein quantenmechanisches Tieftemperaturphänomen.

Supraleitung tritt in vielen gewöhnlichen Metallen (Hg, Pb, Nb, Al, ...), Legierungen ( $\text{Nb}_3\text{Sn}$  ...), Oxiden, und anderen anorganischen und organischen Verbindungen in der Nähe des absoluten Temperatur - Nullpunkts ( $0 \text{ K} = -273.15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) auf.

Beim Übergang Normal- / Supraleitung handelt es sich um einen Phasenübergang – ähnlich dem von flüssig zu fest, oder magnetisch zu unmagnetisch. Das Material ändert dabei seinen Zustand. Oberhalb der sog. Übergangstemperatur ist das Material normal- oder halbleitend, unterhalb verschwindet der elektrische Gleichstromwiderstand und es wird supraleitend.

Bei den in den späten 80-er Jahren entdeckten Hochtemperatur - Supraleitern (HTS) handelt es sich um komplexe Metalloxidverbindungen (Cuprate), die schon oberhalb der Siedetemperatur des flüssigen Stickstoff ( $\approx 77 \text{ K}$ ) supraleitend werden. Den Rekord für die höchste Übergangstemperatur hält eine Quecksilberverbindung mit  $134 \text{ K}$ .

## Mechanismus

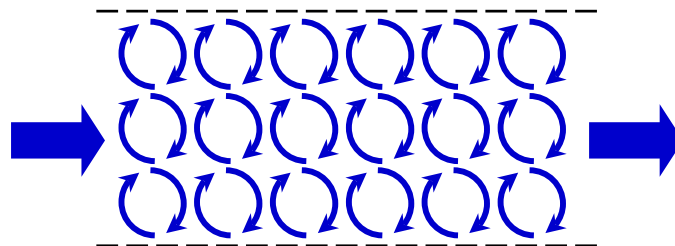
In gewöhnlichen Leitern (Metallen) wird der elektrische Strom von Leitungselektronen getragen, die sich unabhängig voneinander bewegen. Da im Festkörper jedoch eine Vielzahl von Streumechanismen existieren (z.B. Kristalldefekte, Gitterschwingungen) würde der Stromtransport (gerichtete Elektronenbewegung) ohne äußeres elektrisches Feld (angelegte Spannung), aus dem Energie gewonnen werden kann, sofort zum Stillstand kommen.

In Supraleitern sind die Leitungselektronen zu "Cooper -Paaren" korreliert (benannt nach L.N.Cooper, der dieses Konzept 1956 erstmalig vorschlug). Dies klingt überraschend, tragen doch Elektronen die gleiche negative Ladung und würden sich im Vakuum abstoßen. Innerhalb eines Festkörpers bewegen sich die Elektronen jedoch zwischen positiv geladenen Ionen, die die Elektronenladungen abschirmen und sogar Anziehungskraft vermitteln können, so dass sich Elektronen wirksam aneinander binden können.

Obwohl der Mechanismus in Hochtemperatur – Supraleitern (HTS) noch nicht endgültig geklärt ist, glaubt man, dass hier magnetische Kräfte sogar eine wichtigere Rolle spielen als die elektrische Anziehung.

Cooper – Paare können nicht existieren, wenn sie sich nicht alle im Gleichschritt bewegen. Im Jargon der Quantenmechanik sagt man auch, dass alle Paare eine kohärente Welle bilden, analog zu einer klassischen Schall- oder Radiowelle.

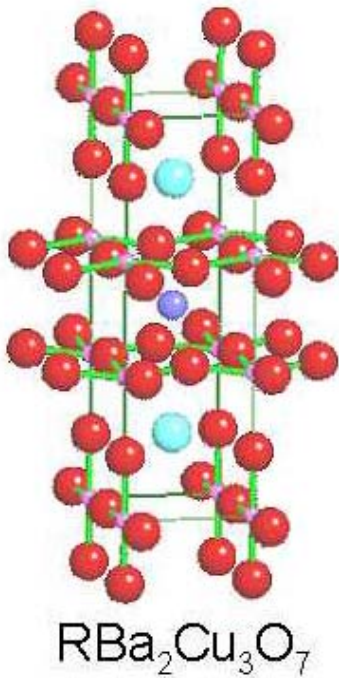
Wird ein Paar aus dieser Welle gestreut, verschwinden die Bindungskräfte und das Paar zerbricht in zwei Einzelelektronen. Diese können kurzzeitig zum Stillstand kommen, sind aber nicht verloren. Nach einiger Zeit finden sie nämlich neue Partner mit denen sie eine Bindung eingehen. Dies erfordert jedoch, dass das neue Paar sich wieder im Gleichschritt mit den anderen bewegt. So trägt das neue Paar wieder zum Strom bei, so als wäre es nie gestreut worden.



Etwas vereinfacht kann man die Cooper - Paare mit einer Marschkolonne vergleichen, deren Mitglieder sich an den Armen untergehakt im Gleichschritt bewegen. Stolpert einer, wird er von den anderen mitgezogen.

In diesem Sinne kann der Strom der Paare niemals zum Stillstand kommen – es handelt sich um einen wirklichen Suprastrom. Man braucht keine Spannung, um ihn am Laufen zu halten.

## Hochtemperatur – Supraleiter (HTS)



Die in den späten 80-ern entdeckten Hochtemperatur - Supraleiter sind sehr komplexe Metalloxidverbindungen, deren Struktur sich vom sog. Perowskitgitter ableitet. Die Kristallstruktur von  $\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  (sog. 123-Struktur), wobei R für Yttrium oder ein Element aus der Reihe der Seltenen Erden steht, ist nebenstehend abgebildet.

In diesen Verbindungen ist die Supraleitung im wesentlichen auf die waagrecht  $\text{CuO}_2$  – Doppelsebenen (Im Bild: Cu rosa, Sauerstoff rot) im Zentrum der Einheitszelle beschränkt. Die dazwischen liegenden Bausteine dienen als Ladungsträgerreservoir für die  $\text{CuO}_2$  – Ebenen. Es ist einleuchtend, dass dies abhängig vom Abstand der  $\text{CuO}_2$  - Ebenen zu einer starken Anisotropie des Materials führen kann. Die Stromtragfähigkeit senkrecht zu den Ebenen kann dabei um Größenordnungen kleiner sein als in den Ebenen.

Ein anderes wichtiges Charakteristikum ist die geringe Ausdehnung der supraleitenden Ladungsträger, der sog. Cooper - Paare. Sie liegt üblicherweise in der Größenordnung einiger Atomabstände. Aus diesem Grund stellen selbst Korngrenzen zwischen fehlorientierten Kristallen, an denen der durchgängige Strompfad in den  $\text{CuO}_2$  – Ebenen unterbrochen ist, große Hindernisse für den Suprastrom dar. Obwohl die ersten HTS in Form polykristalliner Keramik hergestellt wurden, sind sie in dieser Form nicht sehr leistungsfähig.

Um möglichst hohe Stromtragfähigkeiten zu erzielen, müssen daher alle Kristallite auf makroskopischer Skala exakt zueinander ausgerichtet sein. Dies erreicht man z.B. durch Schmelztexturierung oder durch Abscheidung als epitaktische Schicht. Im Gegensatz zu gewöhnlichen, hochgradig ungeordneten Metallen, stellt dies allerdings erhebliche Anforderungen an die Herstellungstechnik.

Um langgestreckte Drähte aus der an sich spröden Keramik herzustellen, werden zwei Verfahren angewandt:

Unter Bandleitern der ersten Generation versteht man Leiter, die dadurch hergestellt werden, dass man das HTS Material (BSCCO) als Pulver in Silberrohre füllt (PIT-Technik) und dann in einer Vielzahl von Walz- und Temperschritten zu einem Multifilament- Bandleiter auszieht.

Bandleiter der zweiten Generation, sog. „Coated conductors“, entstehen hingegen durch Beschichtung eines flexiblen Metallbandes mit einer HTS – Schicht (RBCO). Da die HTS – Schicht sehr gut orientiert sein muss, sind dazu allerdings eine ganze Reihe weiterer Hilfsschichten vonnöten, die Diffusion verhindern, Orientierung erzeugen oder weitergeben und den Supraleiter schützen.

## Meissner Effekt

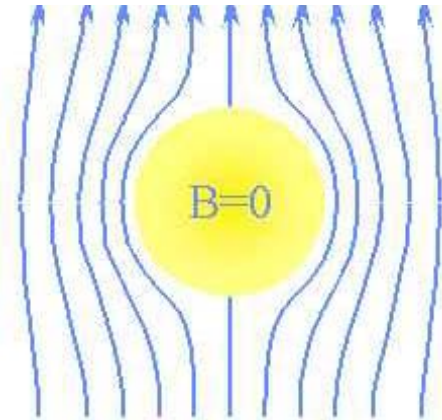


Der Meissner – Ochsenfeld Effekt ist eine sehr grundlegende Erscheinung der Supraleitung. Er äußert sich dadurch, dass ein Magnetfeld aus dem Inneren des Supraleiters verdrängt wird. Am eindrucksvollsten lässt sich diese Eigenschaft demonstrieren, wenn man einen Supraleiter auf einem Magneten schweben lässt. Er sitzt dabei sozusagen auf einem Kissen von Magnetfeldlinien. Dieser Effekt kann direkt für supraleitende Magnetlager genutzt werden.

Der Meissner Effekt basiert auf der Quantennatur der kohärenten Welle. Die Welle hat eine gewisse „Steifigkeit“ und kann sich nur ausbilden, wenn die Wellenlänge groß genug ist. Ein Magnetfeld würde die Welle verwinden, aber die Paare können dies verhindern, indem sie sich in Bewegung setzen. Der Paarzustand kann sich also im Magnetfeld nur bilden, wenn er einen Stromfluss darstellt. Dieser Stromfluss erzeugt ein eigenes, dem äußeren entgegengesetztes Magnetfeld, so dass dieses vom Inneren der Probe abgeschirmt wird.

Durch ihr Verhalten im Magnetfeld lassen sich allerdings zwei unterschiedliche Typen von Supraleitern unterscheiden:

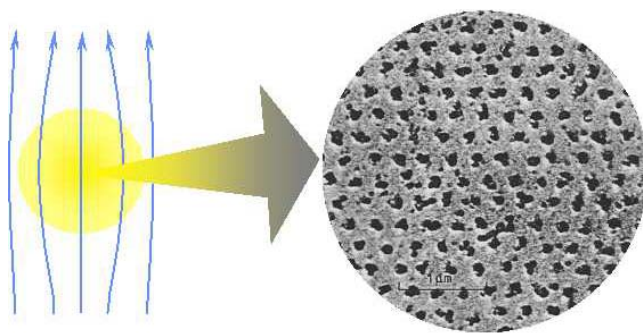
## Typ I Supraleiter



Die zuerst entdeckten Supraleiter zeigten den M - O - Effekt in der oben beschriebenen einfachen Form. Die meisten Supraleiter aus reinen Elementen fallen in diese Kategorie, die auch Typ I Supraleitung genannt wird. Sie sind leider nur von beschränktem Nutzen, da sie kaum äußere Magnetfelder aushalten und schnell in den Normalzustand übergehen.

Der Grund ist, dass das Verdrängen des Magnetfelds (wie im Bild gezeigt) sehr viel Energie kostet – je höher das Feld desto mehr. Bei einer bestimmten, relativ niedrigen kritischen Feldstärke  $H_c$  übersteigen die Kosten (Feldenergie) den Energiegewinn durch die Supraleitung und der SL-Zustand bricht zusammen.

## Typ II Supraleiter



Ein erster Durchbruch der Supraleitung wurde erreicht, als man einen zweiten Typ Supraleiter fand, der das Magnetfeld nicht total verdrängt. Da man weniger Feldenergie zahlen muss, können diese Supraleiter sehr viel höheren Magnetfeldern widerstehen. Die meisten Metalllegierungen und alle HTS gehören zu diesem Typ II.

In diesen Materialien ist die Paarwelle nicht so steif wie in Typ I Supraleitern, so dass Magnetfeld in Form von Flusslinien, die ein kleinstes Flussquantum tragen, in das Material eindringen kann. Jede Flusslinie besteht aus einem normalleitenden Kern und einem umlaufenden Suprastromwirbel.

Durch einen Trick wurden die Flusslinien in der mikroskopischen Aufnahme sichtbar gemacht. Sie bilden ein regelmäßiges Dreiecksgitter. Dies wird als gemischter Zustand der Typ II Supraleiter bezeichnet.

Der Kern der Flusslinien kann durch normalleitende Defekte im Material oder durch Bereiche mit unterdrückter Supraleitung festgeheftet - "gepinnt" werden. Solche Haftzentren sind wesentlich für die technische Anwendung von Typ II Supraleitern, da sie die verlustbehaftete Bewegung der Flusslinien verhindern.

## Gleichstromwiderstand

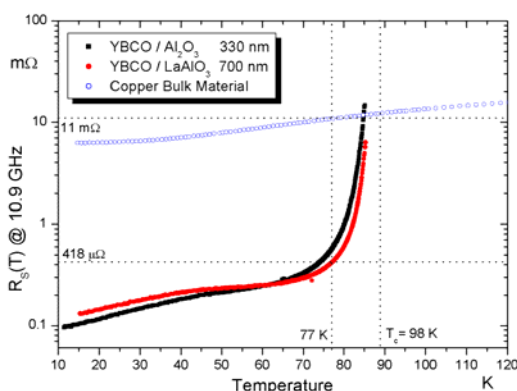
Typ I Supraleiter können verlustlose Ströme bis zu der Stärke tragen, bei der das vom Strom produzierte Magnetfeld das kritische Feld überschreitet. Dann bricht die Supraleitung zusammen.

In Typ II Supraleitern ist die Situation besser, da die kritischen Felder so viel höher sind. Es gibt jedoch eine weitere Problemquelle. Die Flusslinien, die den Supraleiter durchdringen können sich unter dem Einfluss der Lorentzkraft bewegen. Diese Bewegung verursacht einen endlichen Widerstand im Material, so dass es nicht mehr supraleitend ist. Glücklicherweise kann man die Flusslinien durch Defekte und Inhomogenitäten effektiv festhalten (festpinnen).

Besonders wirksam ist das Pinning durch Wachstumsdefekte, Ausscheidungen und Oberflächenrauigkeit in dünnen  $\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  - Schichten. Selbst am Siedepunkt des flüssigen Stickstoffs (77K) können kritische Stromdichten von mehreren Millionen  $\text{A}/\text{cm}^2$  erreicht werden. So trägt z.B. ein 10 mm breiter und nur 1  $\mu\text{m}$  (1/100 Haaresbreite) dünner REBCO Film einen Strom von 250 - 300 A. Üblicherweise würde man dafür ein 10 mm dickes Kupferkabel verwenden.

Die hohe Stromtragfähigkeit macht HTS - Drähte sehr interessant für energietechnische Anwendungen, um elektrische Energie verlustlos über lange Strecken zu transportieren, oder um Dauerelektromagnete mit geringem Kühlaufwand betreiben zu können. Dünne Filme lassen sich auch als Leistungsschalter einsetzen.

## Hochfrequenzwiderstand

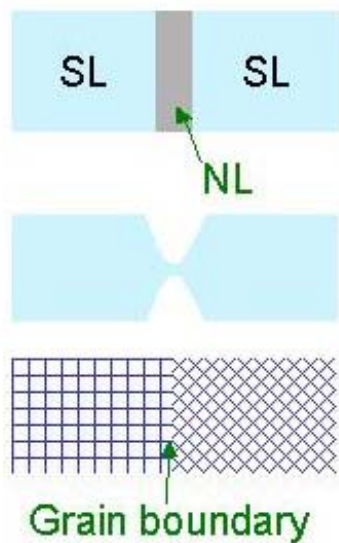


Streng genommen sind Supraleiter nur verlustfrei für Gleichströme. Bei Wechselströmen treten Verluste auf, die mit dem Quadrat der Frequenz ansteigen. Selbst im GHz - Bereich sind diese Verluste jedoch immer noch um Größenordnungen niedriger als in Kupfer.

Das Diagramm zeigt einen Vergleich des temperaturabhängigen Oberflächenwiderstands bei 10 GHz von zwei YBCO - Filmen verschiedener Dicke mit Kupfer. Bei 77 K ist der Supraleiter ca. 20 mal besser.

Mikrowellen – Resonatoren aus  $\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  weisen deshalb erheblich höhere Güten auf, als solche aus normalen Metallen. Eingesetzt als Empfangsantennen (MRI oder NMR) oder als Filter in der drahtlosen Kommunikationstechnik zeigen solche Resonatoren auch schon bei mäßigem Kühlaufwand (ca. 77 K) ein erheblich reduziertes Eigenrauschen, höhere Empfindlichkeit und deutlich bessere Trennschärfe.

## Josephson - Effekte



Josephson - Effekte sind die augenfälligsten Konsequenzen der Paarwelle. Sie treten immer dann auf, wenn zwei supraleitende Bereiche z.B. über eine Einkerbung oder eine isolierende oder normaleleitende Barriere schwach miteinander gekoppelt sind. Im Falle der HTS reicht selbst eine Korngrenze als Kontakt aus (vgl. Abbildung) und es treten **intrinsische Josephson - Effekte** (IJE) auf, wenn Strom senkrecht zu den  $\text{CuO}_2$ -Ebenen fließt.

Man unterscheidet zwei Ausprägungen:

Der **Gleichstrom - Josephson** Effekt tritt auf, wenn keine Spannung über den Kontakt abfällt. Dieser Effekt wird zum Bau von sogenannten **SQUIDs** verwendet.

Der **Wechselstrom Josephson** Effekt wird beobachtet, wenn eine Spannung am Kontakt anliegt.

### Gleichstrom – Josephson - Effekt

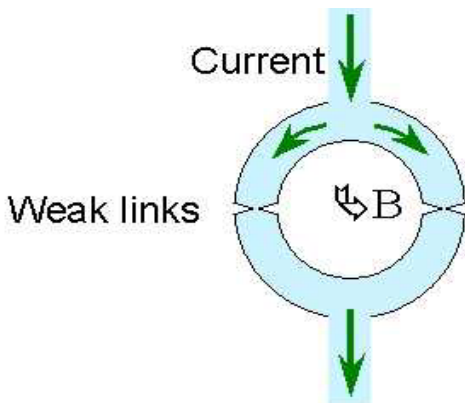
Während die Paarwelle im allgemeinen in dem Sinne steif ist, dass die Wellenlänge sehr groß sein muss, kann sie an einem Josephson - Kontakt leicht verdreht werden, da der Kontakt nur sehr schwach ist. Die Welle wird verdreht, sobald ein Strom über den Kontakt fließt. Die Verdrehung impliziert, dass eine Phasendifferenz zwischen beiden Supraleitern auftritt. Je größer der Suprastrom, desto größer die Phasendifferenz. Die genaue Beziehung wurde zuerst durch B. Josephson entdeckt:

$$I = I_0 \sin \varphi$$

wobei  $I$  den Suprastrom und  $\varphi$  die Phasendifferenz bezeichnet.  $I_0$  ist der Maximalstrom, der bei einer Phasenverschiebung von  $\varphi = 90^\circ$  fließen kann. An diesem Punkt geht der Kontakt in den resistiven Zustand über und zeigt den **Wechselstrom - Josephson - Effekt**.

Interessante Interferenzen treten auf, wenn man zwei Josephson - Kontakte parallel schaltet. Diese Anordnung heißt auch **SQUID** und kann als hochempfindlicher Magnetfeldsensor verwendet werden.

## SQUID



Ein Superconducting Quantum Interference Device (SQUID) ist der empfindlichste Sensor, den man in der Wissenschaft kennt. Es gibt mehrere Ausführungsformen, wir wollen uns hier aber auf den sogenannten DC-SQUID beschränken, der wie in der Abbildung skizziert, aus zwei gleichen, parallelen Josephson -Kontakten besteht.

Wie schon erwähnt, trägt jeder der Kontakte einen Strom der von der auftretenden Phasendifferenz abhängt. Sind die Phasendifferenzen gleich, addieren sich die Ströme maximal (konstruktive

Interferenz). Sind die Phasendifferenzen jedoch gegensätzlich so löschen sich die Ströme aus (destruktive Interferenz).

Die Interferenz kann gesteuert werden durch die Drehung der Paarwelle zwischen den Kontakten. Dies kann durch ein kleines Magnetfeld innerhalb des Rings geschehen. Selbst kleinste Magnetflüsse können die Interferenz von konstruktiv nach destruktiv verändern, was sehr einfach über den Stromfluß beobachtet werden kann. Dies macht den SQUID zum empfindlichsten bekannten Meßgerät. So können mit dem SQUID Magnetfelder nachgewiesen werden, die von Gehirnströmen verursacht werden und weniger als einem Milliardstel des Erdmagnetfeldes entsprechen.

SQUID Sensoren werden überall dort eingesetzt, wo winzige Signale gemessen werden müssen, z.B. in der Medizintechnik, der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung und in den Grundlagenwissenschaften.

### Wechselstrom - Josephson - Effekt

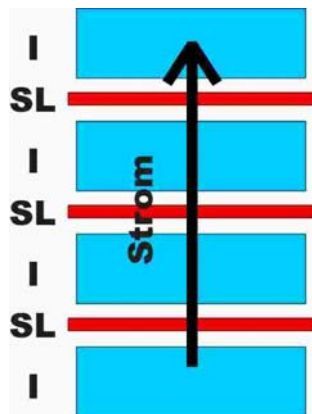
Bei schwachen Strömen verhält sich ein Josephson - Kontakt wie ein normaler Supraleiter. Er trägt einen verlustlosen Strom, während die Phasendifferenz zeitlich konstant bleibt. Wird jedoch der maximal mögliche kritische Strom  $I_0$  überschritten, tritt ein resistiver Zustand auf. Dann ist die Phasendifferenz nicht länger konstant, sondern wächst mit der Zeit:  $\varphi = \omega t$ . Da der Suprastrom proportional zu  $\sin \varphi$  ist (vgl. [Gleichstrom - Josephson - Effekt](#)), erwarten wir einen Wechselstrom, der mit  $\sin \omega t$  variiert. Das ist der berühmte Wechselstrom - Josephson - Effekt.

In der Sprache der Quantenphysik entspricht das Auftreten eines Wechselstroms der Emission eines Photons, und die Winkelfrequenz des Stroms entspricht der Photonenenergie gemäß der Planck'schen Formel  $E = \hbar\omega$ . Diese Energie muss von dem Cooper Paar, das den Kontakt passiert zur Verfügung gestellt werden. Mit anderen Worten, der Wechselstrom – Josephson – Effekt benötigt eine Energiedifferenz oder einen Spannungsabfall  $U$  zwischen den beiden Supraleitern, so dass die gewonnene Energie in Form eines Photons ausgesandt werden kann:

$$2eU = \hbar\omega.$$

Dies ist die zweite Josephson Gleichung, wobei  $2e$  für die Ladung eines Paares steht. Wird eine Gleichspannung an den Kontakt angelegt, so resultiert eine Wechselstromkomponente und elektromagnetische Strahlung wird erzeugt. Für typische Spannungen in der Größenordnung einiger mV liegt die Strahlung im Bereich des Mikrowellenspektrums.

## Intrinsischer Josephson - Effekt



HTS bestehen aus einer periodischen Abfolge supraleitender Ebenen, die durch nicht - oder nur schwach supraleitende Bausteine getrennt sind. Auf Grund dieser Schichtstruktur sind HTS anisotrop und können als Stapel intrinsischer Josephson - Kontakte betrachtet werden. Wird ein Strom senkrecht zu den supraleitenden Ebenen gezogen, so verhält sich das Material selbst wie eine Reihenschaltung von Josephson - Kontakten und man beobachtet die bekannten Josephson - Effekte. Das beeindruckende an diesen Josephson - Kontakten ist, dass es sich nicht um künstliche sondern um natürliche Strukturen handelt, die auf der Skala einiger Atomabstände auftreten.