

Supraleitung

Jonas Leggewie

25. März 2025

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Stromleitung auf der Atomarer Ebene	3
3	BCS-Theorie	4
3.1	Cooper-Paar	4
4	Meißner-Ochsenfeld-Effekt	5
5	Anwendungen der Supraleitung	6

1 Einleitung

Supraleitung beschreibt das Phänomen, bei dem elektrischer Strom, bei sehr niedrigen Temperaturen ohne Widerstand fließt, wodurch eine verlustfreie Energieübertragung möglich wird. Was die Übertragungsverluste auf langen Stromtrassen deutlich reduzieren würde und eine effizientere Energieversorgung ermöglichen könnte. Außerdem haben Supraleiter noch andere spannende Eigenschaften, welche noch nicht vollständig verstanden wurden.

2 Stromleitung auf der Atomarer Ebene

Strom fließt in einem Leiter, z.B. ein Kupferdraht, indem sich Elektronen durch das Leitermaterial bewegen. Elektrische Leiter bestehen aus positiv geladenen Ionenrümpfen¹, die in einem Kristallgitter angeordnet sind. Um die Ionenrümpfe befinden sich die Elektronen, welche wie in einem Gas frei um die Ionenrümpfe herum fliegen.

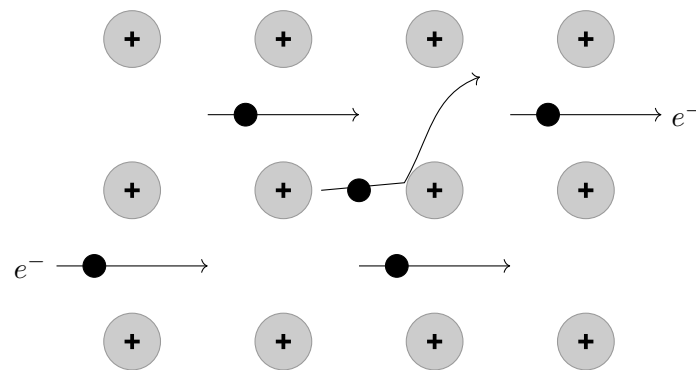


Abbildung 1: Elektronengas in einem Leiter

Legt man eine Spannung an, bewegen sich die Elektronen von minus Pol zum plus Pol, wobei sie mit den Ionenrümpfen zusammenstoßen, wie in Abbildung 1 dargestellt. Durch diese Stöße werden die Elektronen gestreut, was den Stromfluss behindert und so zu einem Widerstand führt. Die Gitter-Schwingungen hängen von der Temperatur ab, desto höher die Temperatur, desto stärker die Schwingungen und desto mehr Stöße gibt es, was zu einem höheren Widerstand führt. Umgekehrt ist das natürlich auch der Fall.

Bei bestimmten Metallen, wie z.B. Quecksilber oder Blei, kann man aber beobachten, dass der Widerstand ab einer bestimmten Temperatur plötzlich ganz verschwindet. Dieses Phänomen kann durch die BCS-Theorie erklärt werden.

¹Ionenrümpfe sind die Atome des Kristallgitters, die eines oder mehrere ihrer äußeren Elektronen abgegeben haben und deswegen positiv geladen sind.

3 BCS-Theorie

Die BCS-Theorie basiert auf der Annahme, dass Elektronen sich zu sogenannten Cooper-Paaren verbinden. Durch die starke Abkühlung des Superleiters sind die Gitterschwingungen im Metallgitter durch die Temperatur vernachlässigbar klein. Wenn jetzt ein Elektron durch das Metallgitter fliegt, zieht es die positiv geladenen Ionenrümpfe an, wodurch um dem Bereich um des Elektrons eine lokale Polarisation des Gitters entsteht. Diese Gitterpolarisation kann ein weiteres Elektron anziehen².

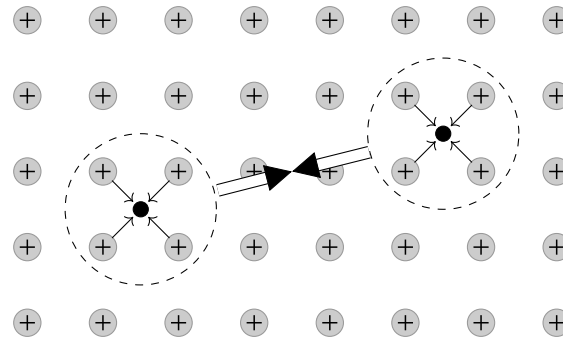


Abbildung 2: Cooper-Paar Bildung

Wenn der Spin \vec{s}^3 und der Impuls \vec{P} der beiden Elektronen entgegengesetzt sind, und der Abstand zwischen den Elektronen klein genug ist, kann die Coulombabstoßung⁴ übertroffen werden. So ein Elektronenpaar nennt man Cooper-Paar.

3.1 Cooper-Paar

Woher kommt aber nun die Superleitung?

Dadurch das Cooper-Paare aus zwei Elektronen bestehen, deren Spin antiparallel ist ist der Gesamtspin des Cooper-Paares $S = 0$. Somit gehört das Cooper-Paar zu den *Bosonen* und nicht mehr zu den *Fermionen*, wozu die Elektronen ursprünglich gehörten. Bosonen unterliegen nicht dem *Pauli-Prinzip*, welches besagt, dass zwei Fermionen nicht den gleichen Quantenzustand haben können. Die Cooper-Paare können sich also im gleichen Quantenzustand aufhalten, wodurch sie nicht mehr mit dem Metallgitter wechselwirken. Dazu kommt, dass die Cooper-Paare bei ihrer Kopplung einen Teil ihrer kinetischen Energie in Bindungsenergie umwandeln, wodurch sie gemeinsam in ein tieferes Energieniveau fallen. Da Bosonen, anders wie Fermionen, alle das gleiche Energieniveau besetzen können, fallen alle Cooper-Paare in das niedrigste Energieniveau. So entsteht ein *Bose-Einstein-Kondensat*, also ein Zustand, in dem alle die Cooper-Paare sich wie ein Boson verhalten. Diese Gruppe von Cooper-Paaren ist negativ geladen, da sie aus Elektronen besteht, und

²Diese Anziehung kann zwischen Elektronen stattfinden, die im Kristallgitter von bis zu 100 Atomen entfernt sind.

³Bei Elektronen ist der Spin entweder $+1/2$ oder $-1/2$ (UP oder DOWN)

⁴Die Coulombabstoßung ist die Abstoßung zweier Teilchen mit gleicher Ladung, hier die Elektronen.

kann somit Strom leiten. So kann keine Energie durch Stoßprozesse verloren gehen, da die Bosonen schon im niedrigsten Energieniveau sind, wodurch es keinen Widerstand gibt und der Stromfluß verlustfrei ist.

Wichtig zu wissen ist das die BCS-Theorie nur auf metallische Supraleiter bis zu einer Sprungtemperatur von ca. 40 Kelvin anwendbar ist. Da die thermische Energie der Gitterschwingungen überhalb 40 Kelvin die Bildung von Cooper-Paaren verhindern würde. Es wurden jedoch auch sogenannte Hochtemperatursupraleiter entdeckt, die bei Temperaturen bis zu 138 Kelvin supraleitend sind. Diese Supraleiter sind jedoch noch nicht vollständig verstanden und können nicht mit der BCS-Theorie erklärt werden. Hochtemperatursupraleiter werden auch Supraleiter der 2. Art genannt und haben andere Eigenschaften als die Supraleiter der 1. Art, die mit der BCS-Theorie erklärt werden können. Meistens handelt es sich bei Supraleitern der 2. Art um Keramiken.

4 Meißner-Ochsenfeld-Effekt

Ein weiteres Phänomen der Supraleitung ist der Meißner-Ochsenfeld-Effekt. FRITZ WALTER MEIßNER und ROBERT OCHSENFELD entdeckten 1933, dass Magnetfelder aus dem Inneren eines Supraleiters verdrängt werden. Dieser Effekt tritt auf, wenn ein Supraleiter unter seine kritische Temperatur abgekühlt wird. Somit sind Supraleiter nicht nur ideale Leiter, sondern auch perfekte Diamagneten.

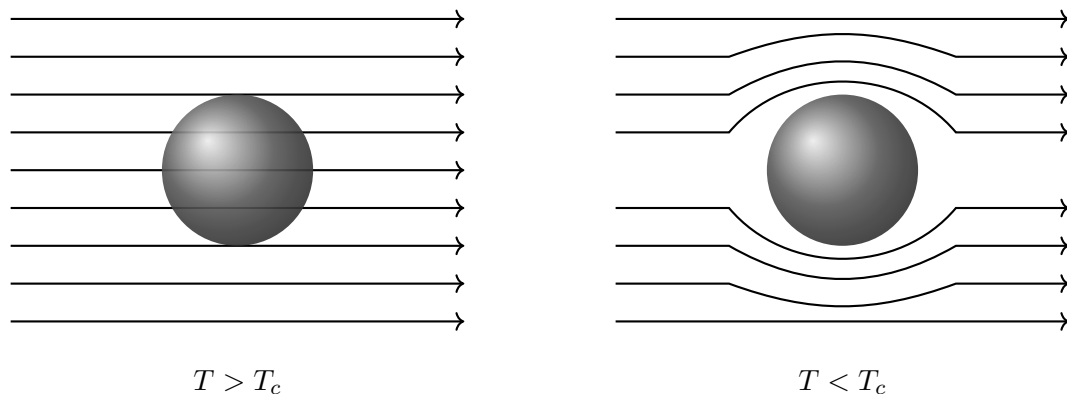


Abbildung 3: Meißner-Ochsenfeld-Effekt

Nimmt man ein Superleitendes Material mit einer Temperatur höher als die kritische Temperatur T_c und setzt es einem Magnetfeld aus, so dringt das Magnetfeld nahezu ungehindert durch das Material (wie links in Abbildung 3 zusehen ist). Wenn man den Supraleiter jetzt unter die kritische Temperatur abkühlt, wird das Magnetfeld aus dem Inneren des Supraleiters verdrängt (Abbildung 3 rechts). Doch eigentlich müßte doch das Magnetfeld weiterhin ungehindert das Material durchdringen können, da der Widerstand gleich null ist, kann keine Spannung abfallen oder induziert werden, wodurch sich das Magnetfeld eigentlich nicht verändern dürfte.

Die Erklärung für dieses Phänomen ist die Londonsche Eindringtiefe. FRITZ und HANS LONDON versuchten 1935 die charakteristischen Eigenschaften der Supraleitung durch ihre London-Gleichungen zu beschreiben. Daraus folgte dann das ein äusseres Magnetfeld doch etwas in den Supraleiter eindringt (Eindringtiefe λ_L).

5 Anwendungen der Supraleitung

Supraleitung ist ein faszinierendes physikalisches Phänomen mit zahlreichen praktischen Anwendungen in Wissenschaft, Technik und Medizin. Besonders spannend ist, dass supraleitende Materialien keinen elektrischen Widerstand aufweisen, wodurch sie extrem effiziente Stromleitungen ermöglichen. Dies macht sie besonders interessant für den Energiebereich, etwa für supraleitende Kabel, die elektrische Energie nahezu verlustfrei übertragen können. Auch supraleitende Transformatoren und Energiespeicher (SMES) bieten eine Möglichkeit, Energie effizienter zu nutzen und Engpässe im Stromnetz zu überbrücken. Ein weiteres wichtiges Einsatzgebiet der Supraleitung ist die Medizintechnik. Die Magnetresonanztomographie (MRT), eines der wichtigsten bildgebenden Verfahren in der modernen Medizin, verwendet starke Magnetfelder, die durch supraleitende Spulen erzeugt werden. Ohne diese Technologie wären viele hochauflösende Einblicke in den menschlichen Körper nicht möglich. Ebenso nutzen empfindliche Sensoren wie die Supraleitenden Quanteninterferenzdetektoren (SQUIDS) die besonderen Eigenschaften von Supraleitern, um beispielsweise winzige magnetische Signale im Gehirn zu messen. Auch im Bereich der Transporttechnologie spielt Supraleitung eine bedeutende Rolle. Magnetschwebebahnen (Maglev-Züge) nutzen supraleitende Magneten, um über den Schienen zu schweben und so nahezu reibungsfrei hohe Geschwindigkeiten zu erreichen. Diese Technologie könnte in Zukunft den Bahnverkehr revolutionieren und eine umweltfreundliche Alternative zu Flugreisen bieten. In der Grundlagenforschung sind supraleitende Magnete unverzichtbar, etwa in Teilchenbeschleunigern wie dem Large Hadron Collider (LHC) am CERN. Dort helfen sie, Protonen auf extreme Geschwindigkeiten zu beschleunigen und die fundamentalen Bausteine des Universums zu erforschen. Auch in der Quanteninformatik werden supraleitende Materialien genutzt, um leistungsstarke Quantencomputer zu entwickeln, die in der Zukunft komplexe Probleme lösen könnten, an denen klassische Computer scheitern. Die Vielseitigkeit der Supraleitung zeigt, wie ein physikalisches Prinzip zahlreiche Bereiche unseres Lebens beeinflussen kann. Auch wenn viele dieser Technologien noch Weiterentwicklungen benötigen, ist klar, dass die Supraleitung eine Schlüsselrolle in der Zukunft der Technik spielen wird.