

Supraleiter

Jan Erhard

15. März 2024

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	2
1.1 Was ist ein Supraleiter?	2
1.2 Implikationen dieser Eigenschaften	2
2 Erklärung	3
2.1 Warum entsteht überhaupt ein elektrischer Widerstand?	3
2.2 Pauli-Prinzip	3
2.3 Cooper-Paare	4
2.4 Meißner-Effekt	5
2.5 Levitation	5
3 Anwendungen	6
3.1 CERN	6
3.2 MRT	6
3.3 Maglev	6
Quellenverzeichnis	7

1 Einführung

1.1 Was ist ein Supraleiter?

Ein Supraleiter ist ein Material, welches unter bestimmten Umständen, meist unterhalb einer kritischen Temperatur T_C und/oder oberhalb eines kritischen Drucks P_C seinen elektrischen Widerstand auf null reduziert. Außerdem verdrängt ein Supraleiter, wie vom Meißner-Effekt beschrieben, in diesem Zustand alle bzw. teilweise Magnetfelder aus seinem Inneren. Hier ein Beispiel dafür, wie ein ρ - T -Diagramm eines Supraleiters (nicht) aussieht:

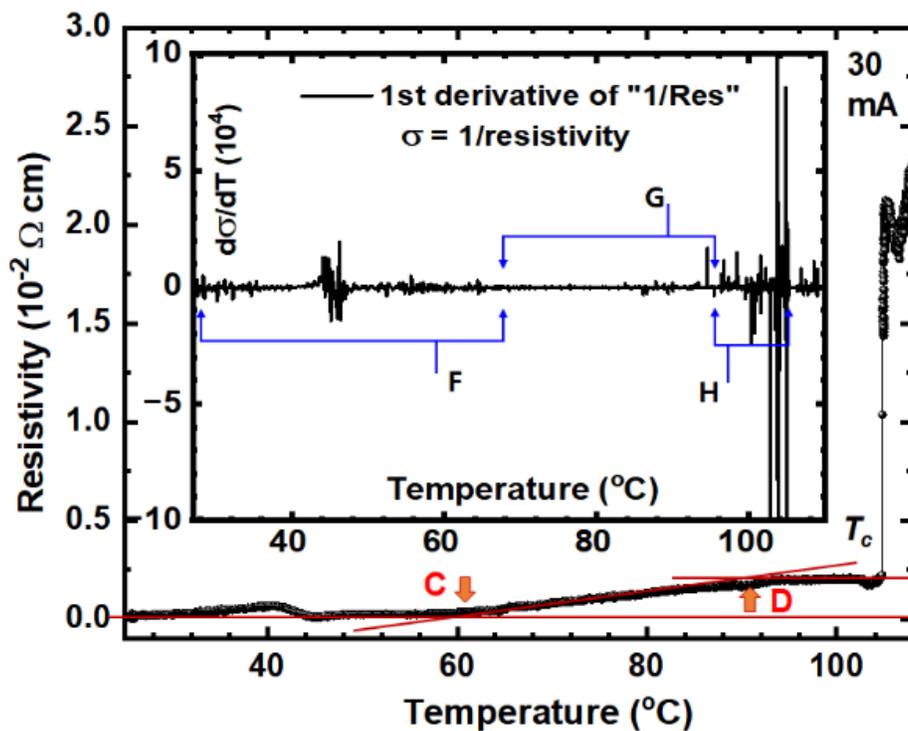


Figure 1: ρ - T -Diagramm von LK99 [1]

Als Tipp: Kupfer hat einen Widerstand von $\rho = 1.72 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ cm}$

1.2 Implikationen dieser Eigenschaften

Ohne elektrischen Widerstand verhält sich der Supraleiter wie ein perfekter Leiter. Das bedeutet, dass ein elektrischer Strom unendlich lange fließen kann, ohne an Energie zu verlieren. Der Meißner-Effekt bewirkt auch, dass, wenn ein Supraleiter auf einen Permanentmagneten gelegt wird (oder andersherum) dieser schwebt.

2 Erklärung

2.1 Warum entsteht überhaupt ein elektrischer Widerstand?

Ein elektrischer Widerstand entsteht dadurch, dass Elektronen innerhalb des aus positiv geladenen Ionen bestehenden Metallgitters bei der Bewegung durch dieses Gitter immer wieder mit den Metallionen "zusammenstoßen". Dabei geht ein Teil der Bewegungsenergie der Elektronen verloren und wird an die Ionen weitergegeben. Diese sind nun in Bewegung, was als Wärme wahrgenommen werden kann.

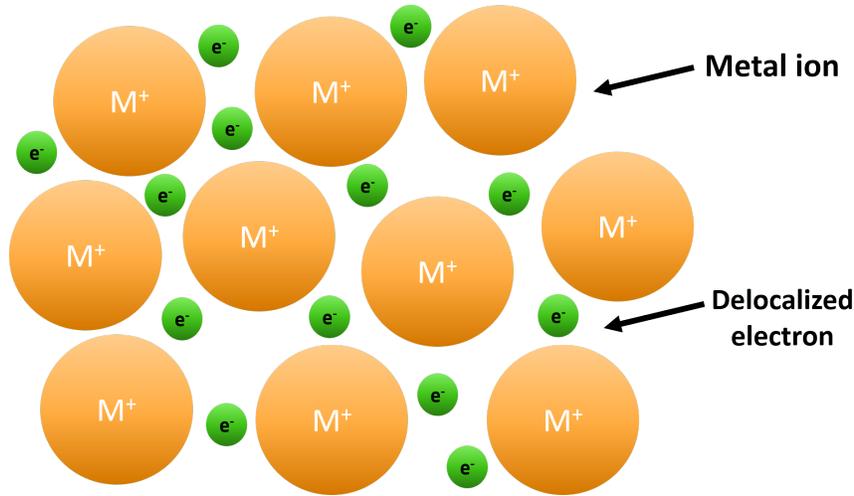


Figure 2: Schematische Darstellung eines Metallgitters¹

2.2 Pauli-Prinzip

Das Pauli-Prinzip besagt, dass zwei Elektronen in einem Quantensystem nicht denselben Quantenzustand besitzen können. Das heißt, dass zwei Elektronen nicht die gleichen Werte für die Quantenzahlen n , l , m und s besitzen können. Diese Quantenzahlen sind abhängig von der Energie des Elektrons bzw. von dessen Spins. Das bedeutet, dass in einem Atom zum Beispiel maximal zwei Elektronen die gleiche Energie (Orbital) besitzen können, da die einzige Quantenzahl, die unabhängig von der Energie ist, die Spinquantenzahl s ist. Diese kann nur die Werte $+\frac{1}{2}$ oder $-\frac{1}{2}$ annehmen, was dazu führt, dass maximal zwei Elektronen die gleiche Energie besitzen können. Dieses Prinzip gilt auch für alle anderen Fermionen.

¹<https://www.expil.com/t/metallic-bond-formation-compounds-8645>

Standard Model of Elementary Particles

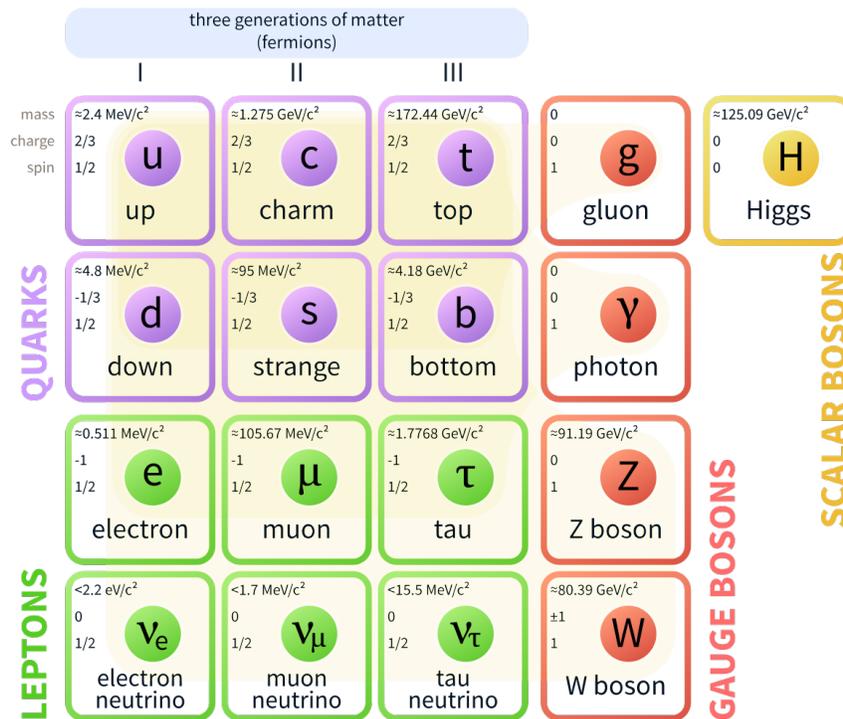


Figure 3: Das Standardmodell der Teilchen²

2.3 Cooper-Paare

Cooper-Paare sind Elektronenpaare, welche durch die Wechselwirkung der Elektronen mit den Ionen des Metallgitters entstehen. Bei dieser Wechselwirkung entsteht ein virtuelles Phonon, das von einem anderen Elektron absorbiert wird. Durch diese Elektron-Phonon Interaktion entsteht eine Anziehungskraft, welche stark genug ist, um die Abstoßungskraft zwischen den Elektronen zu überwinden. Dadurch entsteht ein Elektronenpaar, welches Cooper-Paar genannt wird, das sich gemeinsam durch das Metallgitter bewegt. Ein solches Cooper-Paar kann als zusammengesetztes Boson betrachtet werden, welches nicht vom Pauli-Prinzip beeinflusst wird. Somit dürfen alle Cooper-Paare denselben Quantenzustand besetzen. Das Ziel der Cooper-Paare den energetisch niedrigsten Zustand zu erreichen kann somit auch von allen Paaren realisiert werden. In diesem Zustand kann nun auch keine Energie mehr an das Metallgitter abgegeben werden. Somit kann auch kein elektrischer Widerstand entstehen. Diese Paarung der Elektronen ist jedoch extrem instabil, weswegen sie bei bereits geringer Wärmeenergie zerbricht. Bei welcher Temperatur T_C die Supraleitung tatsächlich zusammenbricht, kommt auf die Beschaffenheit des Materials an. [2]

²https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model

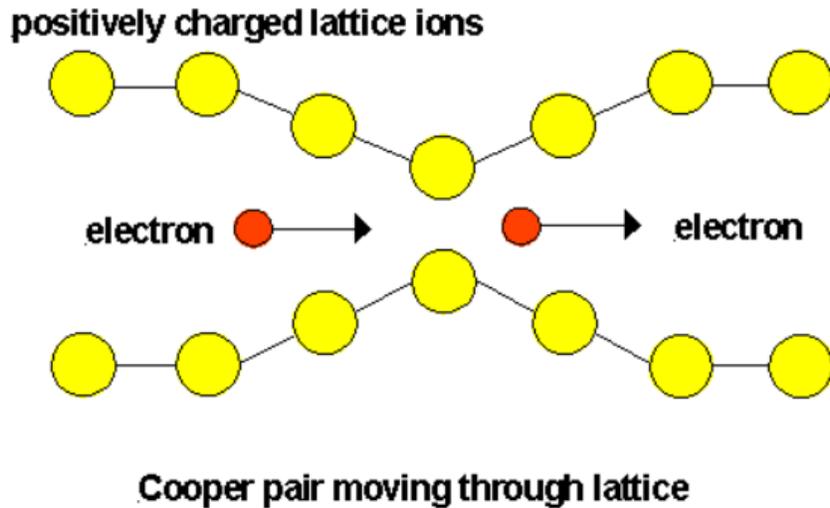


Figure 4: Ein Cooper-Paar, welches sich durch das Metallgitter bewegt³

2.4 Meißner-Effekt

Der Meißner-Effekt besagt, dass ein Supraleiter das Magnetfeld aus seinem Inneren verdrängt. Dies geschieht, indem während des Übergangs in den Supraleitenden Zustand Ströme an der Oberfläche des Supraleiters entstehen, welche das Innere des Supraleiters von den äußeren Magnetfeldern abschirmen. Trotzdem kann es auf der Oberfläche des Supraleiters, bis zu einer bestimmten Tiefe λ , der sogenannten London penetration depth zur Bildung von Magnetfeldern kommen. [3] Der Meißner-Effekt darf jedoch nicht mit den Wirbelströmen verwechselt werden, welche in einem normalen Leiter entstehen, wenn der magnetische Fluss sich ändert. Bei diesem Effekt kann man auch zum ersten Mal einen Unterschied zwischen einem Typ I und Typ II Supraleiter erkennen. Ein Typ I Supraleiter verdrängt das Magnetfeld einer bestimmten Stärke B , $B < B_C$ vollkommen aus seinem Inneren, während ein Typ II Supraleiter das Magnetfeld einer Stärke B , $B_{C1} < B < B_{C2}$ nur teilweise aus seinem Inneren verdrängt, was, verbunden mit Unreinheiten im Metallgitter, zu Flux Pinning führen kann. Bei einer Stärke B , $B < B_{C1}$ verdrängt jedoch auch der Typ II Supraleiter das Magnetfeld vollständig aus seinem Inneren. In beiden Fällen gibt es eine maximale Magnetfeldstärke $B_{C(2)}$, bei der der Meißner-Effekt zusammenbricht und somit alle Magnetfelder durch den Supraleiter fließen können. [4]

2.5 Levitation

Die Levitation beginnt dadurch, dass ein Supraleiter, der auf einem Magneten liegt aufgrund des Meißner-Effekts angehoben wird. Da der Supraleiter einen Widerstand von null besitzt, darf er keine Änderung des magnetischen Flusses erfahren, da sonst die Stromstärke $I = -\frac{\Phi}{R}$ unendlich groß wäre. Somit kann der Supraleiter nur entlang einer Achse schweben, auf welcher sich der magnetische Fluss nicht ändert.

³<https://www.electricalibrary.com/en/2019/11/27/the-superconductivity-phenomenon/>

3 Anwendungen

3.1 CERN

Das CERN verwendet zum Beispiel Supraleiter in den Magneten des LHCs, um extrem große Magnetfelder zu erzeugen, ohne dabei riesige Kabel zu benötigen, welche die extrem hohen Stromstärken aushalten. [5]



Figure 5: Kabel des LHCs⁴

3.2 MRT

Beim MRT werden genau wie im CERN Supraleiter verwendet, um Magnetfelder aufzubauen, welche die Spins der Wasserstoffatome im Körper des Patienten ausrichten und dann wieder zurück in den Grundzustand fallen lassen. Die dabei entstehende Energie wird gemessen und daraus ein Bild des Körpers erstellt. [6]

3.3 Maglev

Auch bei Magnetschwebbahnen, wie zum Beispiel einer neuen Bahn in Japan, werden Supraleiter verwendet, um den Maglev-Zug schweben zu lassen. [7]

⁴<https://en.wikipedia.org/wiki/Superconductivity#/media/File:CERN-cables-p1030764.jpg>

Quellenverzeichnis

- [1] Sukhae Lee et al. “Superconductor $Pb_{10-x}Cu_x(PO_4)_6O$ showing levitation at room temperature and atmospheric pressure and mechanism”. In: *arxiv preprint arXiv:2307.12037* (2023). DOI: 10.48550/arXiv.2307.12037.
- [2] J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer. “Theory of Superconductivity”. In: *Physical Review* 108 (1957). DOI: 10.1103/PhysRev.108.1175.
- [3] Emory Cook. “The Phenomenological Theory of Superconductors”. In: *Phys. Rev.* 58 (1940). DOI: 10.1103/PhysRev.58.357.
- [4] A. A. Abrikosov. “Type II Superconductors and the Vortex Lattice”. In: *Nobel Lecture 1* (2003). URL: <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/abrikosov-lecture.pdf>.
- [5] CERN. *The Large Hadron Collider*. URL: <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>.
- [6] Real Engineering. *The Insane Engineering of MRI Machines*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=N1YXqRG71us>.
- [7] Real Engineering. *How Japan’s Maglev Train Works*. URL: https://www.youtube.com/watch?v=S4L_OCDsd1I.