

Der Begriff *Supraleitung* geht auf die Beobachtung zurück, dass unterhalb einer kritischen Temperatur manche Materialien ihren elektrischen Widerstand sprunghaft verlieren. Dies wurde erstmals 1911 von Heike Kamerlingh Onnes beobachtet.¹ Abbildung 2 zeigt eine Reproduktion der ersten Messkurve aus seiner Originalarbeit, die in Leiden veröffentlicht wurde. Kamerlingh Onnes erhielt 1913 den Nobelpreis für Physik *for his investigations on the properties of matter at low temperatures which led, inter alia, to the production of liquid helium*.² Das charakteristische Merkmal der Supraleitung ist jedoch der Meißner-Ochsenfeld-Effekt.

MEISSNER-OCHSENFELD-EFFEKT

Stellen wir uns folgendes vor: Ein hypothetisches Material $\bigcirc$ sei ein Metall, welches oberhalb einer bestimmten Temperatur einen endlichen elektrischen Widerstand besitzt. Nun kühlen wir das Material $\bullet$ ab und es verliert seinen elektrischen Widerstand. Schließlich wird ein magnetisches Feld $\equiv\bullet$ eingeschaltet. Die Änderung des Magnetfelds führt zu Induktionsströmen im Material. Diese wirken nach der Lenzschen Regel ihrer Ursache entgegen und führen zum Verschwinden des Magnetfelds $\equiv\bigcirc$ im Inneren des Materials. Da kein elektrischer Widerstand vorhanden ist, können die Induktionsströme ewig weiter fließen. Jetzt ändern wir die zeitliche Abfolge von Abkühlung und Anlegen des Magnetfelds. Zunächst wird das Magnetfeld $\equiv\bigcirc$ eingeschaltet und nach dem Abklingen der Induktionsströme ist das Material vom Magnetfeld $\equiv\bigcirc$ komplett durchdrungen. Dies ändert sich auch nicht, wenn es abgekühlt wird, da es keine Flussänderung gibt. Der Leiter bleibt in einem felddurchdrungenen $\equiv\bullet$ Zustand.

Nun werden diese beiden Experimente mit dem Supraleiter wiederholt. Auch dieser hat oberhalb einer Temperatur, die in diesem Fall kritische Temperatur genannt wird, einen endlichen elektrischen Widerstand $\bigcirc$. Unterhalb der kritischen Temperatur ist er im supraleitenden Zustand $\bullet$ ohne elektrischen Widerstand. Wird im supraleitenden Zustand ein Magnetfeld $\equiv\bullet$ eingeschaltet, haben wir den gleichen Fall $\equiv\bullet$ wie vorher. Nun wird in einem neuen Experiment der Supraleiter zunächst einem



Abbildung 1: Heike Kamerlingh Onnes. © Museum Boerhaave.

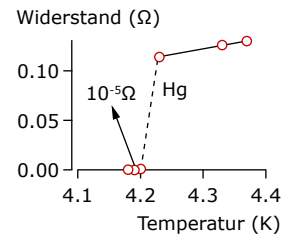


Abbildung 2: Erste Messkurve des supraleitenden Zustands, replot nach Kamerlingh Onnes.

¹

KamerlinghOnnes:1911p1320

² nobel:onnes

Magnetfeld ausgesetzt $\equiv \equiv \equiv$ und danach abgekühlt. Der Supraleiter $\equiv \bullet \equiv$ verdrängt immer das Magnetfeld. Er kann nicht je nach Vorgeschichte in verschiedene Zustände gebracht werden. Der supraleitende Zustand ist also eine thermodynamische Phase und der Übergang vom normalleitenden in den supraleitenden Zustand ist demnach ein Phasenübergang.³

³ nolting4

Insgesamt wird das Verhalten $\equiv \bullet \equiv$ nach den beiden Physikern Walther Meißner und Robert Ochsenfeld als Meißner-Ochsenfeld-Effekt bezeichnet.⁴ Es kann nicht allein aus $R = 0$ abgeleitet werden. Es sollte als charakteristisches Kennzeichen der Supraleitung angesehen werden, da ein Material ohne elektrischen Widerstand nicht alle Eigenschaften eines Supraleiters zeigt. Angemessener wäre der Begriff *Superdiamagnet*, historisch hat sich aber der Begriff *Supraleiter* durchgesetzt.

⁴ Meissner:1933p7229

FLUSSQUANTISIERUNG

⁵ Doll:1961p3784

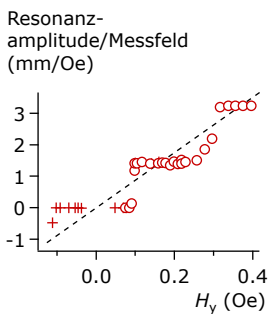


Abbildung 3: Magnetische Flussquantisierung in einem supraleitenden Ring.

⁶ Careri:2000p12789

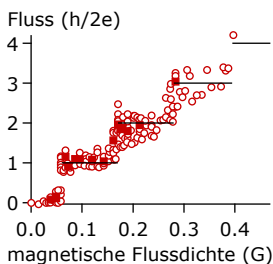


Abbildung 4: Magnetischer Fluss in einem supraleitenden Zylinder

⁷ Deaver:1961p3782

Betrachten wir eine Minispule in der ein Kreisstrom fließt. Der Strom I und der magnetische Fluss Φ können über die Induktivität $L = \Phi/I$ verknüpft werden. Die kleinste Einheit von sich bewegenden Ladungen ist die Elementarladung e des Elektrons. Es sollte also auch der magnetische Fluss Φ quantisiert sein, denn der Kreisstrom kann nicht stufenlos eingestellt werden, sondern es müssen Vielfache der Elementarladung in die Runde fließen. In einem supraleitenden Ring sollte dies besonders einfach untersucht werden können, da ein einmal induzierter Kreisstrom ewig weiter fließt. Doll und Nähbauer haben 1961 solche Messungen veröffentlicht,⁵ eine Wiedergabe dieser Messungen ist in Abbildung 3 gezeigt. Deutlich sind die Stufen zu sehen, welche die beschriebene Quantisierung zeigen.

Wie im Abschnitt zuvor, wollen wir uns an dieser Stelle überlegen, was zu erwarten wäre. London sagte 1950 als erster die Flussquantisierung voraus. Laut neuerer bcs-Theorie erwarten wir Cooper-Paare, die die Träger des Suprastroms sind. Die kleinste Einheit des Flusses, das Flussquant Φ_0 , sollte somit in Vielfachen der doppelten Elektronenladung auftreten. Lars Onsager hatte dies bereits 1959 realisiert und W.M. Fairbanks mitgeteilt.⁶

Experimentell kann also aus dem Wert des Flussquants verifiziert werden, dass der Nenner tatsächlich $2e$ beträgt. Deaver und Fairbanks haben dies zeitgleich mit Doll und Nähbauer 1961 gezeigt.⁷ In Abbildung 4 sehen wir einen Neuplot der Daten, der Fluss ist dabei, genau wie in der Originalarbeit, schon normiert in Einheiten von $h/2e$ aufgetragen. Dies ist ein sehr starkes Indiz

für Cooper-*Paare* als supraleitende Ladungsträger.