

In der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in Berlin hatte man sich damals ebenfalls für die Materialeigenschaften bei tiefen Temperaturen interessiert. Im Jahr 1913 wurde Walther Meissner von Emil Warburg, dem Präsident der Reichsanstalt, beauftragt, eine Wasserstoffverflüssigungsanlage aufzubauen. Vor seinem Physikstudium hatte Meissner schon ein Studium als Maschinenbau-Ingenieur absolviert, sodass er für diese Aufgabe gut geeignet war. Zu Beginn des Jahres 1913 konnte er einen verbesserten, auf einer Konstruktion von Walther Nernst basierenden Verflüssiger in Betrieb nehmen. Meissner befasste sich damals vorwiegend mit elektrischen Widerstandsmessungen bei tiefen Temperaturen.

Der Ausbruch des Ersten Weltkriegs im Jahr 1914 führte zu einer deutlichen Unterbrechung der physikalischen Grundlagenforschung in vielen Ländern, und so auch in der Berliner Reichsanstalt. Anschließend, in den Jahren 1918–1922, beschäftigte sich Meissner besonders mit der Vergrößerung der Wasserstoffverflüssigungsanlage und schon ab 1920 zunehmend mit der Möglichkeit für die Einrichtung einer Anlage zur Verflüssigung von Helium. Seine Pläne und Entwürfe konnten in der Zeit 1922–1924 realisiert werden. Am 7. März 1925 wurde in der Reichsanstalt zum ersten Mal Helium verflüssigt. Dabei wurden etwa 200 cm^3 flüssiges Helium erhalten. Weltweit war die Reichsanstalt der dritte Platz, an dem mit flüssigem Helium experimentiert werden konnte, nach Leiden als erstem und ab 1923 Toronto in Kanada als zweitem Platz. Als Mitglieder des Kuratoriums der Reichsanstalt hatten sich damals Carl von Linde und Wilhelm Conrad Röntgen nachdrücklich für die Einrichtung eines Tieftemperatur-Laboratoriums eingesetzt.

Man hört, dass Walther Meissner 10 Jahre lang seine Messungen mit nur 0.3 L an flüssigem Helium durchgeführt hat. Bevor er auftrat, waren fünf supraleitende Elemente bekannt: Blei, Quecksilber, Zinn, Thallium und Indium. 1928 entdeckte Meissner ein weiteres supraleitendes Element: Tantal mit einer kritischen Temperatur von

4,4 K. Während der anschließenden beiden Jahre entdeckte er Supraleitung noch in Thorium, Titan und Niob sowie in einer Reihe von Verbindungen und Legierungen.

Während seiner Amtszeit 1922–1924 als Präsident der Reichsanstalt hatte der für seinen Weitblick bekannte Walther Nernst erkannt, dass die experimentellen Physiker der Reichsanstalt Unterstützung durch einen Theoretiker gut gebrauchen konnten. So gelang es Nernst, hierfür Max von Laue zu gewinnen, der am 24. März 1925 sein Amt als theoretischer Physiker in der Reichsanstalt antrat (einen Tag in der Woche neben seiner Lehrtätigkeit an der Universität Berlin). Von Laue interessierte sich damals für die Supraleitung und besonders für ihre magnetischen Eigenschaften. Zu Walther Meissner hielt er engen Kontakt und überredete ihn im Jahr 1933, ein angelegtes Magnetfeld in der Nähe der Oberfläche eines Supraleiters beim Übergang von der Normalleitung zur Supraleitung genau zu vermessen. Bei der Finanzierung eines zusätzlichen Mitarbeiters für diese Experimente aus einem damaligen Förderprogramm für arbeitslose junge Wissenschaftler konnte von Laue als Gutachter ebenfalls helfen.

So kam es, dass Walther Meissner und sein Mitarbeiter Robert Ochsenfeld im Jahr 1933 eine höchst folgenschwere Entdeckung machten: Im supraleitenden Zustand verschwindet ein Magnetfeld im Innern des Supraleiters, indem es von dort herausgedrängt wird. Seither wird dieses Phänomen als Meissner-Ochsenfeld-Effekt (oft auch kurz als Meissner-Effekt) bezeichnet (Abb. 2.1). Somit verhält sich ein Supraleiter (unterhalb des kritischen Magnetfelds $H_C(T)$) wie ein perfekter Diamagnet.

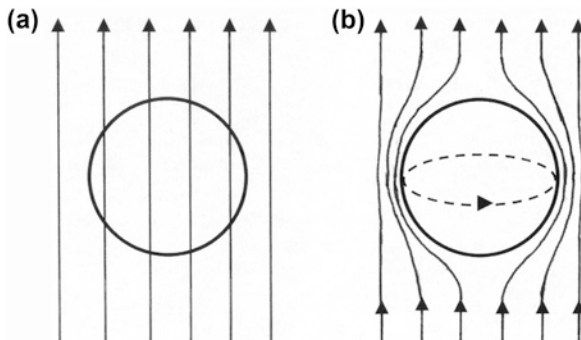


Abb. 2.1 Meissner-Ochsenfeld-Effekt. **a** Der kugelförmige Supraleiter wird im Normalzustand oberhalb seiner kritischen Temperatur von dem äußeren Magnetfeld durchsetzt. **b** Unterhalb der kritischen Temperatur verdrängt der Supraleiter das Magnetfeld vollständig aus seinem Innern, solange das kritische Magnetfeld nicht überschritten wird. Die Feldverdrängung erfolgt durch elektrische Ströme, die an der Oberfläche um den Supraleiter verlustfrei herumfließen und das Innere des Supraleiters gegen das Magnetfeld abschirmen

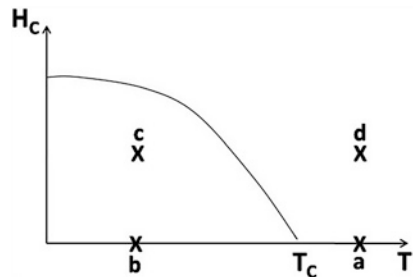
Die Existenz des Meissner-Ochsenfeld-Effekts erlaubt eine wichtige Schlussfolgerung: Der supraleitende Zustand ist ein thermodynamischer Gleichgewichtszustand. Somit ist der Zustand unabhängig von dem Weg, der zu ihm geführt hat. Bei der Änderung des Magnetfelds und/oder der Temperatur muss am Ende nur gelten: $T < T_C$ und $H < H_C(T)$.

Als Erste haben Cornelis Jacobus Gorter und Hendrik Brugt Gerhard Casimir 1934 diese grundlegende Bedeutung des Meissner-Ochsenfeld-Effekts erkannt. In Abb. 2.2 wird ihre Schlussfolgerung erläutert. Der Punkt c markiert den supraleitenden Zustand unterhalb der kritischen Temperatur T_C und des kritischen Magnetfelds $H_C(T)$. Unendliche elektrische Leitfähigkeit ohne Existenz des Meissner-Ochsenfeld-Effekts würde auf dem Weg $a \rightarrow b \rightarrow c$ den Zustand mit $B = 0$ ergeben, während der Weg $a \rightarrow d \rightarrow c$ den Zustand mit $B \neq 0$ von Punkt d liefert. Nur die Existenz des Meissner-Ochsenfeld-Effekts stellt sicher, dass immer der Zustand mit $B = 0$ (perfekter Diamagnetismus) erreicht wird (unabhängig von dem zurückgelegten Weg). Hierbei wird allerdings angenommen, dass der Supraleiter perfekte Reversibilität zeigt und dass keine Haftkräfte den magnetischen Fluss im Innern des Supraleiters festhalten. Max von Laue hat später die Entdeckung des Meissner-Ochsenfeld-Effekts als einen Wendepunkt in der Geschichte der Supraleitung bezeichnet.

Auf der Grundlage des Meissner-Ochsenfeld-Effekts lässt sich ferner der Energieunterschied zwischen dem normalen (nicht supraleitenden) und dem supraleitenden Zustand genau berechnen, wie Gorter und Casimir auch als Erste erkannt haben. Wir wollen ihren Gedankengang kurz erläutern. In Anwesenheit eines Magnetfelds H beträgt die Dichte G_s der freien Gibbs-Energie im supraleitenden Zustand

$$G_s(T, H) = G_s(T, 0) - \int_0^H M(H) dH. \quad (2.1)$$

Abb. 2.2 Unabhängigkeit des supraleitenden Zustands vom Weg. Aufgrund des Meissner-Ochsenfeld-Effekts wird auf den beiden Wegen $a \rightarrow d \rightarrow c$ und $a \rightarrow b \rightarrow c$ am Punkt c der Endzustand mit $B = 0$ erreicht



Hier ist $M(H)$ die Magnetisierung. Im Fall des perfekten Diamagnetismus aufgrund des Meissner-Ochsenfeld-Effekts gilt

$$M(H) = -\frac{1}{4\pi}H. \quad (2.2)$$

$\int_0^H M(H) dH$ in (2.1) enthält die bei der Verdrängung des Magnetfelds geleistete Arbeit. Zusammen mit (2.2) ergibt sich

$$G_s(T, H) = G_s(T, 0) + \frac{1}{8\pi}H^2. \quad (2.3)$$

Im Gleichgewicht gilt aber bei $H = H_C(T)$: $G_n(T, H_C) = G_s(T, H_C)$ sowie $G_n(T, H_C) = G_n(T, 0)$. Der Unterschied zwischen der Energiedichte im normalen (G_n) und im supraleitenden Zustand beträgt daher im Fall $H = H_C$

$$G_n(T, 0) - G_s(T, 0) = \frac{1}{8\pi}H_C^2(T). \quad (2.4)$$

Für einen typischen Wert der kritischen magnetischen Flussdichte $B_C = 10^{-2}$ Tesla ergibt sich der Unterschied der Energiedichte von $398 \text{ erg/cm}^3 = 2,49 \cdot 10^{14} \text{ eV/cm}^3$. Es ist dieser sehr kleine Wert des Energieunterschieds im Bereich von nur wenigen meV pro Elektron, der die theoretische Erklärung der Supraleitung lange Zeit verzögert hat.

Die Verdrängung des Magnetfelds beim Meissner-Ochsenfeld-Effekt erfolgt durch elektrische Abschirmströme, die entlang der Oberfläche des Supraleiters fließen. Sie erzeugen ein Magnetfeld, das dem ursprünglich vorhandenen Magnetfeld genau entgegengerichtet ist und es exakt kompensiert. Damit dieser Zustand beliebig lange bestehen kann, müssen diese „Abschirmströme“ ohne elektrischen Widerstand fließen. Supraleitung ist somit erforderlich. (In normalen, nicht supraleitenden Metallen bleibt nur noch der sog. elektromagnetische Skin-Effekt).

Die besondere Bedeutung des Meissner-Ochsenfeld-Effekts erkennen wir daraus, dass die verlustfrei fließenden Abschirmströme als notwendige Folge das Phänomen der Supraleitung erfordern. Der umgekehrte Schluss, dass aus dem Verschwinden des elektrischen Widerstands die Existenz des Meissner-Ochsenfeld-Effekts folgt, ist aber nicht zulässig. Daher ist der Meissner-Ochsenfeld-Effekt für die Supraleitung der entscheidende „Fingerabdruck“.



<http://www.springer.com/978-3-658-19382-9>

Geschichte und Theorie der Supraleiter

Eine kompakte Einführung

Huebener, R.P.

2017, XI, 67 S. 32 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-19382-9