

## Hundert Jahre Supraleitung

# Harte Nuss für Theoretiker

RUDOLF P. HUEBENER

*Vor hundert Jahren entdeckte Heike Kamerlingh Onnes die Supraleitung. Seitdem fasziniert sie Forscher und Laien. Bis heute sorgt sie für große wissenschaftliche Überraschungen, theoretisch wie technisch bleibt sie eine Herausforderung.*

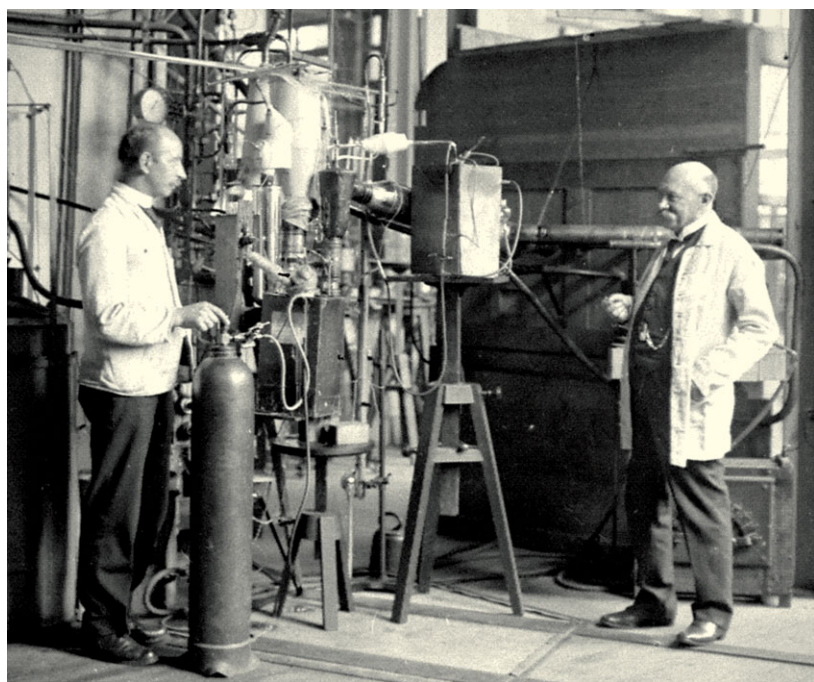
Im November 1882 übernahm Heike Kamerlingh Onnes (1853–1926) den Lehrstuhl für Experimentalphysik und Meteorologie an der Universität von Leiden. Zu diesem Zeitpunkt hatte sich der junge Professor schon intensiv mit den Ideen seines Amsterdamer Kollegen Johannes Diderik van der Waals (1837–1923) und der Thermodynamik von Gasen beschäftigt. Konsequenterweise widmete er nun einen großen Teil seiner Arbeitskraft der Konstruktion von Apparaten zur Verflüssigung von Gasen. Nacheinander verflüssigte er Sauerstoff, Stickstoff und Luft. Aber in allen Fällen war Kamerlingh Onnes nicht der Erste gewesen. Dies galt auch für Wasserstoff, den 1898 James Dewar (1842–1923) als Erster

verflüssigt hatte. Nachdem 1895 das Edelgas Helium entdeckt worden war, bot sich nun die Gelegenheit für Kamerlingh Onnes. In einem Wettrennen mit Dewar gelang es ihm 1908, erstmals flüssiges Helium zu erzeugen.

Fast 15 Jahre lang sollte Kamerlingh Onnes' Labor das weltweit einzige bleiben, das das letzte Element in der Reihe der Edelgase verflüssigen konnte. Damit bot sich dem Leidener als Einzigem die Möglichkeit, den Bereich für Experimente zu noch deutlich niedrigeren Temperaturen auszuweiten als es bis dahin möglich gewesen war. Unter Normaldruck liegt der Siedepunkt von flüssigem Helium-4 bei 4,2 K, durch Reduktion des Drucks lässt er sich unter 2 K absenken. So konnte Kamerlingh Onnes in diesem zum ersten Mal zugänglichen Tieftemperaturbereich experimentelle Untersuchungen durchführen. Unter anderem interessierte er sich für das Verhalten des elektrischen Widerstands in Metallen, denn dazu gab es damals widersprüchliche Vorhersagen.

Im Sommer 1911 kühlten Kamerlingh Onnes und seine Mitarbeiter Gilles Holst, Gerrit Jan Flim und Cornelius Dorsmann eine hochreine Quecksilberprobe ab, die sich in einer u-förmigen Glaskapillare befand. Dabei machten sie eine überraschende Entdeckung: Bei 4,2 K fiel der elektrische Widerstand der Probe abrupt auf einen unmessbar kleinen Wert. Zunächst zweifelte Kamerlingh Onnes an dem Messergebnis. Bald jedoch war allen Beteiligten klar, dass sie ein neues Phänomen entdeckt hatten: die Supraleitung. Das Metall Quecksilber hatte man für die ersten Experimente mit besonderer Sorgfalt ausgewählt, da es sich relativ leicht durch mehrfache Destillation in hochreiner Form gewinnen lässt [1, 2]. Bereits im Jahr 1913 erhielt Kamerlingh Onnes für die Heliumverflüssigung und die Tieftemperaturexperimente den Nobelpreis in Physik. Gilles Holst wurde später der erste Direktor der Forschungslaboratorien von Philips.

Nachdem die Leidener die Erscheinung der Supraleitung zuerst in Quecksilber entdeckt hatten, fanden sie diese anschließend in weiteren Elementen, in Blei, Zinn, Indium und Thallium. Schon bald entwickelte Kamerlingh Onnes Pläne, die Supraleitung in Kabeln für den Transport von elektrischer Energie zu nutzen. Er musste aber zu seiner großen Enttäuschung feststellen, dass für das Auftreten der Supraleitung nicht nur das Unterschreiten einer kritischen Temperatur  $T_C$  erforderlich ist, die vom Material abhängt. Vor allem reduziert ein Magnetfeld die supraleitende Eigenschaft; oberhalb eines wiederum materialspezifischen,



**Abb. 1** Heike Kamerlingh Onnes (rechts) zusammen mit seinem Techniker Gerrit J. Flim neben dem zweiten in Leiden gebauten Heliumverflüssiger (Foto: Collection Kamerlingh Onnes Laboratorium).

kritischen Magnetfelds  $H_C$  verschwindet sie sogar völlig. Seinen Maximalwert erreicht  $H_C(T)$  in jedem Material bei 0 K. Es nimmt mit wachsender Temperatur ab und verschwindet bei der kritischen Temperatur  $T_C$ .

Zum Problem für den Stromtransport in einer Leitung wurde die Tatsache, dass das Eigenfeld des Stromes im Fall eines stromdurchflossenen Supraleiters die gleiche Wirkung hat wie ein äußeres Magnetfeld. In den heute als klassisch bezeichneten Supraleitern beträgt der Maximalwert von  $H_C$  bei  $T = 0$  K das 100- bis 5000-fache des Erdmagnetfeldes (knapp 50  $\mu\text{T}$  in unseren Breiten). Zur Enttäuschung von Kamerlingh Onnes erwiesen sich die kritischen Feldstärken als zu gering für einen technischen Einsatz im Stromtransport.

### Ein Wendepunkt

Der Grund, warum das Leidener Labor einige Jahre als einziges weltweit Experimente mit flüssigem Helium machen konnte, war vor allem, dass die erforderliche Menge an Heliumgas nur äußerst schwer zu beschaffen war. Das wertvolle Gas wurde vor allem im Krieg für die Luftschiffahrt benötigt [3]. Nur Kamerlingh Onnes' Organisationstalent verdankten die Leidener ihren Vorrat. Erst 1923 gelang die Heliumverflüssigung auch John C. McLennan in Toronto.

In Deutschland bahnte sich jedoch eine wichtige Entwicklung an der 1887 gegründeten Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (PTR) in Berlin an [4]. Vor allem Carl von Linde hatte als Mitglied des Beirats (1895–1921) nachdrücklich auf die Einrichtung eines Tieftemperatur-Laboratoriums an der PTR gedrängt. Nach einigen Jahren als Professor an der Ingenieurschule und anschließend an der Technischen Hochschule in München hatte er 1879 in Wiesbaden die Gesellschaft für Linde's Eismaschinen AG (heute Linde AG) gegründet, die schnell wirtschaftlichen Erfolg hatte. Emil Warburg unterstützte während seiner Präsidentschaft (1905–1922) an der PTR den Plan eines Tieftemperatur-Laboratoriums.

Die entscheidende Rolle hierbei sollte Walther Meißner (1882–1974) spielen. Im Anschluss an sein Studium des Fachs Maschinenbau an der Technischen Hochschule Charlottenburg hatte Meißner noch drei Jahre Physik und Mathematik an der Friedrich-Wilhelms Universität in Berlin studiert. Nachdem er 1907 seine Doktorarbeit unter Max Planck abgeschlossen hatte, trat er 1908 als Mitarbeiter in die Reichsanstalt ein. Dort beauftragte ihn Präsident Warburg im Jahr 1913 mit dem Aufbau einer Anlage zur Verflüssigung von Wasserstoff. Ab 1920 machte sich Meißner ernsthaft Gedanken über eine Anlage zur Verflüssigung von Helium. Dies gelang ihm zum ersten Mal im März 1925. Die PTR war damit weltweit der dritte Platz, an dem mit flüssigem Helium experimentiert werden konnte.

Für seine Experimente musste Meißner zunächst in mühevoller Arbeit zehn Monate lang Helium aus der Luft gewinnen. Schließlich hatte er etwa 700 Liter Gas zur Verfügung. Seine Experimente bei tiefen Temperaturen konzentrierten sich anfangs auf die Temperaturabhängigkeit des



**Abb. 2** Alexei Abrikossow (Physik-Nobelpreis 2003) im Jahr 2005 in Tübingen.

Widerstands von elektrischen Leitern und die Suche nach neuen Supraleitern. Ihm gelang dann die Entdeckung der Supraleitung in Tantal, Thorium, Titan, Niob und (als Hinweis) Vanadium.

Meißner interessierte sich besonders für grundsätzliche Fragen zur Supraleitung. Walther Nernst hatte während seiner Präsidentschaft an der PTR von 1922–1924 Max von Laue als beratenden Mitarbeiter gewonnen. Dieser stand ab März 1925 einen Tag pro Woche für theoretische Fragen zur Verfügung. Er überzeugte Meißner davon, dass für ein besseres Verständnis der Supraleitung genaue Messungen des Magnetfelds nahe der Oberfläche von Supraleitern hilfreich sein sollten. Sie sollten während der Abkühlung in den Supraleitungszustand erfolgen.

Für diese Experimente wurde mit Max von Laues Unterstützung Robert Ochsenfeld (1901–1993) angeheuert. Finanziert wurde er durch ein spezielles Förderprogramm, das während der damaligen Weltwirtschaftskrise jungen Akademikern eine wissenschaftliche Weiterbildung ermöglichen sollte. 1932/33 führte das zur Entdeckung der grundlegendsten Eigenschaft eines Supraleiters: die magnetische Feldverdrängung aus seinem Inneren, die als Meißner-Ochsenfeld-Effekt bekannt wurde. Der perfekte Diamagnetismus von Supraleitern wird durch supraleitende Abschirmströme bewirkt. Diese fließen verlustfrei entlang der Oberfläche und kompensieren das Magnetfeld im Inneren vollständig.

Für Max von Laue bedeutete die Entdeckung des Meißner-Ochsenfeld-Effekts einen Wendepunkt in der Geschichte der Supraleitung. Der Effekt zeigte, dass Supraleitung ein thermodynamischer Gleichgewichtszustand ist. Hierauf wiesen auch die beiden Leidener Physiker Cornelius Gorter und Hendrik Casimir 1934 hin und berechneten erstmals den Energiegewinn beim Phasenübergang in den supraleitenden Zustand. 1935 schlugen die Brüder Fritz und Heinz London eine phänomenologische Theorie der Su-

praleitung vor. Diese erklärte insbesondere den Meißner-Ochsenfeld-Effekt und führte die magnetische Eindringtiefe als wichtige materialspezifische Länge in einem Supraleiter ein.

Der Zweite Weltkrieg erzwang eine Pause in der Erforschung der Supraleitung. Ende der 1960er-Jahre waren dann schon rund 350 verschiedene supraleitende Materialien bekannt, darunter viele Elemente sowie Legierungen und metallische Verbindungen. Der überwiegende Teil waren sogenannte Typ-II-Supraleiter. Um deren Eigenschaften zu verstehen, müssen wir aber zuerst die Fortschritte der Theorie skizzieren.

### Entwicklung der Theorie

1950 schlugen Vitaly Ginzburg (1916–2009) und Lev Landau (1908–1968) eine Theorie vor, in der sie die supraleitende Eigenschaft – genauer gesagt, die Dichte der supraleitenden Elektronen – durch eine makroskopische komplexe Wellenfunktion beschrieben [5]. Die Ginzburg-Landau-Theorie eignet sich besonders, um räumliche Änderungen in einem Supraleiter zu behandeln. Sie hat ihre Wurzeln in Landaus Theorie der Phasenübergänge zweiter Ordnung, in der Landau das Konzept des Ordnungsparameters entwickelt hat.

Die Theorie lieferte auch eine genaue Beschreibung der sogenannten Kohärenzlänge  $\xi$ . Diese ist die zweite wichtige Länge in Supraleitern, die erste ist die schon erwähnte Eindringtiefe  $\lambda$  eines äußeren Magnetfelds in den Supraleiter. Sie kennzeichnet die minimale Entfernung, innerhalb derer sich die supraleitende Eigenschaft deutlich ändern kann – sozusagen die Steifigkeit der Wellenfunktion. Die Idee einer endlichen Ausdehnung von im Kristallgitter gebundenen Quasiteilchen (die Cooper-Paarbildung war noch nicht entdeckt), die für die Supraleitung verantwortlich sind, in Form der Kohärenzlänge hatte Brian Pippard ebenfalls 1950 formuliert.

1952 analysierte Alexei Alexejewitsch Abrikosow (\*1908) am Institut für Physikalische Probleme in Moskau, dem heutigen Kapitza-Institut, mit der Ginzburg-Landau-Theorie Experimente, die sein Institutskollege Nikolai

Zavaritzki damals an supraleitenden dünnen Schichten durchgeführt hatte. Hierbei diskutierten beide auch zum ersten Mal die Möglichkeit, dass die Energie der Grenzfläche zwischen einer normalleitenden und einer supraleitenden Domäne im Supraleiter negativ werden kann. Dies bedeutet, dass der sogenannte Ginzburg-Landau-Parameter,  $\kappa = \lambda/\xi$ , größer werden kann als ein kritischer Wert von  $1/\sqrt{2}$ . Während dieser Fall bis dahin als unphysikalisch ignoriert wurde, nahmen ihn Abrikosow und Zavaritzki ernst und nannten die entsprechenden Materialien die „zweite Gruppe“ [6]. Bei seinen weiteren Untersuchungen machte Abrikosow 1953 die überraschende Entdeckung des magnetischen Flussliniengitters (Abrikosow-Gitter) und des supraleitenden Mischzustands (s. Physik in unserer Zeit 2003, 34(6), 250).

Heute unterscheidet man zwischen Supraleitern vom Typ I mit  $\kappa < 1/\sqrt{2}$  und Typ II mit  $\kappa > 1/\sqrt{2}$ . Typ-II-Supraleiter werden im Mischzustand von quantisierten magnetischen Flusslinien in gitterartiger Anordnung durchsetzt, die jeweils ein magnetisches Flussquant tragen. Der Mischzustand setzt ein bei einem unteren kritischen Magnetfeld  $H_{C1}$  und erstreckt sich bis zu einem oberen kritischen Magnetfeld  $H_{C2}$ . Unterhalb  $H_{C1}$  befindet sich ein Typ-II-Supraleiter genau wie Typ-I-Supraleiter im Meißner-Zustand, in dem er Magnetfelder vollständig aus seinem Inneren verdrängt, dort also  $B = 0$  gilt.

Diese Ergebnisse von Abrikosow waren so neuartig, dass Landau als sein Lehrer und Vorgesetzter nicht einverstanden war. Erst als zwei Jahre später Richard Feynman in den USA ähnliche Gedanken bei seiner Diskussion von quantisierten Wirbellinien in rotierendem, supraflüssigem Helium formulierte, gab Landau sein Einverständnis. So kam es, dass Abrikosows Ergebnisse erst 1957 publiziert wurden.

Im Abrikosow-Gitter manifestiert sich die magnetische Flussquantisierung in Supraleitern. Weshalb die Einheit eines solchen Flussquants  $\varphi_0 = h/2e$  ist ( $h$ : Plancksche Konstante,  $e$ : Elementarladung), lässt sich anhand der makroskopischen Wellenfunktion für die supraleitenden Elektronen verstehen. Die Quantenbedingung folgt aus der



Tatsache, dass sich die Wellenfunktion bei einem Umlauf der räumlichen Koordinate um das Gebiet des eingeschlossenen magnetischen Flusses exakt reproduzieren muss. Im Jahr 1961 gelang Robert Doll und Martin Näbauer und unabhängig Bascom Deaver und William Fairbank der direkte experimentelle Beweis der magnetischen Flussquantisierung in Supraleitern.

Trotz dieser bedeutenden Fortschritte in der Theorie war noch völlig offen, wie die Supraleitung entsteht, wie sich also die beteiligten Ladungsträger verhalten. Eine solche mikroskopische Theorie der Supraleitung schlugen John Bardeen, Leon Cooper und J. Robert Schrieffer 1957 vor. Sie ist heute als BCS-Theorie bekannt und konnte erstmals fast alle komplizierten Eigenschaften der damals bekannten Supraleiter erklären. So wurde sie schnell akzeptiert. Schon seit 1941 hatte sich Bardeen Gedanken über eine Theorie der Supraleitung gemacht. 1950 hatten er und unabhängig Herbert Fröhlich die Erkenntnis gewonnen, dass die Schwingungen des Kristallgitters eine zentrale Rolle spielen. Die kritische Temperatur  $T_C$  sollte demnach umgekehrt proportional zur Wurzel aus der Masse  $M$  der Kristallatome sein:  $T_C \sim 1/\sqrt{M}$ .

Anfang der 1950er Jahre zeigten Experimente, dass das Ersetzen von Gitteratomen durch schwerere Isotope im Kristallgitter, was die Frequenz seiner thermisch angeregten Schwingungen (Phononen) verschiebt, tatsächlich Einfluss auf die kritische Temperatur hat. Das unterstützte die BCS-Theorie entscheidend. Für diese Theorie war das Konzept der Cooper-Paare eine zentrale Voraussetzung. Leon Cooper hatte 1956 gefunden, dass zwei Elektronen mit der Fermi-Energie im Kristall schon bei infinitesimaler anziehender Wechselwirkung einen gebundenen Zustand annehmen. Genau dies geschieht, wenn je zwei Elektronen im Zusammenspiel mit dem Gitter durch Paarbildung ein neues Teilchen formen, das die Supraleitung trägt. Ihr gebundener Zustand sinkt unter die Fermi-Energie ab, durch den Übergang in die Supraleitung spart also das System Energie ein.

Die Paarbildung erfolgt generell zwischen zwei Elektronen mit entgegengesetztem Spin und Impuls. Folglich verschwindet der Gesamtspin für Cooper-Paare, aus den

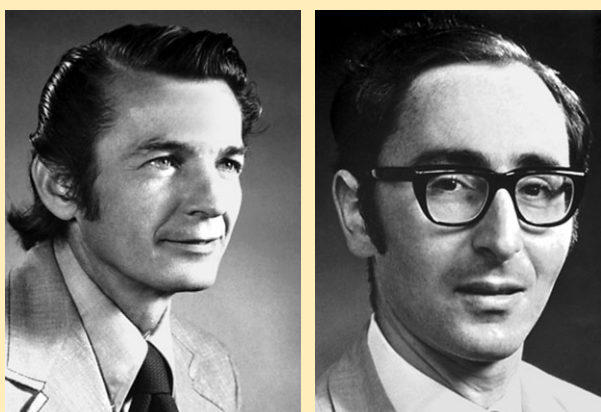


**Abb. 4** Georg Bednorz und Alex Müller im Labor, Physik-Nobelpreis 1987 (Foto: IBM).

beiden Fermionen mit halbzahligem Spin werden Bosonen mit ganzzahligem Spin 0. Damit gilt das Pauli-Prinzip nicht mehr, nach dem jedes Fermion einen Quantenzustand im Kristallgitter für sich alleine beansprucht. Als Bosonen können alle Cooper-Paare hingegen den gleichen – supraleitenden – Quantenzustand besetzen, der sich durch eine makroskopische Wellenfunktion beschreiben lässt.

Die BCS-Theorie basiert also auf der Annahme, dass die anziehende Wechselwirkung für die Paarbildung durch die Verzerrung des Kristallgitters in der Nähe der einzelnen Elektronen entsteht, also durch die Gitterschwingungen. Dies steht im Einklang mit dem Isotopen-Effekt. Ein Hauptergebnis der BCS-Theorie war die Aussage, dass im supraleitenden Zustand im Energiespektrum der Elektronen an der Fermi-Energie eine Energielücke auftritt. In dieser existieren keine besetzbaren Zustände. Diese Energielücke verschwindet oberhalb der kritischen Temperatur. Unterhalb  $T_C$  nimmt die Energielücke mit abnehmender Temperatur in charakteristischer Weise zu und erreicht bei 0 K ihren Maximalwert.

Experimentelle Hinweise auf eine derartige Energielücke hatten bereits Messungen der spezifischen Wärmekapazität gezeigt.



**Abb. 3** Von links nach rechts: Walther Meißner; John Bardeen, Physik-Nobelpreis 1972; Leon Cooper, Physik-Nobelpreis 1972; Robert Schrieffer, Physik-Nobelpreis 1972; Ivar Giaever, Physik-Nobelpreis 1973; Brian Josephson, Physik-Nobelpreis 1973 (Fotos: PTB, Institut Berlin; nobelprize.org).



**Abb. 5** Prototyp eines Schiffsmotors von American Superconductor mit 36,5 MW elektrischer Leistung. Seine Spulen bestehen aus einem Hochtemperatursupraleiter und verkräften eine 150-mal höhere Stromdichte als konventionelle Supraleiter. Der Wirkungsgrad solcher Motoren übersteigt denjenigen konventioneller Elektromotoren zwar kaum. Sie sind aber wesentlich kompakter, was in Schiffen wertvollen Platz spart. Zudem ist ihr Drehmoment wesentlich höher (Foto: American Superconductor).

me, der Mikrowellenabsorption und der Infrarot-Transmission dünner Schichten gegeben. Den vielleicht eindrucksvollsten Beweis lieferte 1960 Ivar Giaever durch sein berühmtes Tunnelexperiment. 1929 in Norwegen geboren, emigrierte er als junger Ingenieur für Maschinenbau zunächst nach Kanada und wurde 1958 von General Electric in Schenectady im Bundesstaat New York in den USA angestellt.

Am Rensselaer Polytechnic Institute im benachbarten Troy (New York) hörte er in einer Vorlesung von der neuen BCS-Theorie und der Lücke im Energiespektrum der Elektronen. Auf der Heimfahrt danach hatte er die Idee, dass man die Energielücke direkt anhand des elektrischen Stromflusses zwischen einer supraleitenden und einer normalen Elektrode beobachten könnte. Dazu musste man beide Elektroden durch eine dünne, elektrisch isolierende Barriere voneinander trennen. Bei dem resultierenden quantenmechanischen Tunnelprozess sollte der Stromfluss erst richtig einsetzen, wenn die Potentialdifferenz zwischen beiden Elektroden den Wert der Energielücke erreicht hat. Giaever konnte seine Erwartung mit solchen Experimenten eindrucksvoll bestätigen. Tunnelexperimente wurden anschließend zu einer wichtigen Quelle für Informationen über die Physik von Supraleitern.

Schon bald, nachdem Giaever das Ergebnis seines Tunnelexperiments publiziert hatte, interessierte sich ein Student an der englischen Universität in Cambridge für den Tunnelprozess in Supraleitern. Brian Josephson (\*1940) wurde damals von Brian Pippard betreut. 1961/62 hörte er Vorlesungen des Amerikaners Philip Warren Anderson

(\*1923) über die neuen Entwicklungen in der Theorie der Supraleitung. Das Konzept der Supraleitung als makroskopisches Quantenphänomen hatte ihn stark beeindruckt. Bei der theoretischen Analyse des elektrischen Stromflusses durch die Barriere eines Tunnelkontakts zwischen zwei Supraleitern leitete er je eine Gleichung für den elektrischen Strom und die elektrische Spannung ab. Diese sind heute als Josephson-Gleichungen bekannt.

Die erste Gleichung behandelt den verlustlosen Stromfluss der Cooper-Paare. Die zweite Gleichung besagt, dass eine elektrische Spannung zwischen beiden Seiten des Tunnelkontakts stets von einer hochfrequenten Oszillation des Suprastroms zwischen den beiden Supraleitern begleitet ist. Die Frequenz dieser Josephson-Oszillation wächst proportional zur elektrischen Spannung. Josephson machte diese Vorhersagen 1962 und traf zunächst sehr oft auf Unverständnis. Aber schon 1963 wurde seine Theorie experimentell bestätigt. Seitdem hat sich der Josephson-Effekt fest etabliert, und die Josephson-Elektronik entwickelte sich zu einem wichtigen Zweig in der Supraleitungsforschung.

Seit der Entdeckung der Supraleitung hatte es fast ein halbes Jahrhundert gedauert, bis eine gültige Theorie dieses Phänomens formuliert wurde. Dies lag unter anderem daran, dass der Energiegewinn der Elektronen beim Übergang in den supraleitenden Zustand deutlich kleiner ist als die Unsicherheit sämtlicher einzelnen Energiebeiträge. Es kam darauf an, eine kleine Energiedifferenz genau zu berechnen.

Im Laufe der Jahre hatten sich zahlreiche namhafte Köpfe vergeblich an einer Theorie der Supraleitung versucht. Dazu zählten Albert Einstein, Werner Heisenberg, Niels Bohr, Felix Bloch, Lev Landau und Wolfgang Pauli. Zeitweilig zirkulierte unter Theoretikern als „Blochs zweites Theorem“ dessen Bemerkung, dass jede Theorie der Supraleitung widerlegt werden könne. Auch Richard Feynman arbeitete in den 1950er-Jahren lange an einer Theorie der Supraleitung, aber vergebens. Später sprach er von dem „großen Vakuum“, das dadurch bei ihm entstanden sei. Feynman kam jedoch dem richtigen Ergebnis schon recht nahe. Er erkannte, dass das Modell von Bardeen und Fröhlich im Wesentlichen richtig war. Außerdem fand er, dass eine rein störungstheoretische Behandlung, wie sie versucht wurde, nicht ausreicht.

### Flusslinien und Haftzentren

In Supraleitern verursachen magnetische Flussquanten neben ihrem Einfluss auf die magnetischen Eigenschaften einen weiteren Effekt. Falls eine Kraft auf die Flussquanten wirkt, bewegen sie sich im Supraleiter und erzeugen dabei ein elektrisches Feld. Ein elektrischer Strom im Supraleiter übt eine Lorentz-Kraft auf die Flussquanten aus. Das durch die resultierende Bewegung erzeugte elektrische Feld führt zu elektrischen Verlusten und dem sogenannten Fluss-Wanderungs-Widerstand. Genau dieser Mechanismus begrenzt den verlustlosen Transport von elektrischem Strom in Typ-II-Supraleitern, die sich im Mischzustand befinden.

Dieser Zustand ist technisch interessant, weil das kritische Magnetfeld  $H_{C2}$  der Typ-II-Supraleiter in der Regel wesentlich höher ist als das  $H_C$  der Typ-I-Supraleiter, die erheblich weniger robust gegenüber Magnetfeldern sind. Es ist aber eine zentrale Voraussetzung für viele technische Anwendungen, die Bewegung der magnetischen Flussquanten zu vermeiden. Beim Einsetzen des Verlustprozesses ist der Fluss-Wanderungs-Widerstand zunächst immer um viele Größenordnungen kleiner als der Normalwiderstand des Materials bei gleicher Temperatur. Die Bewegung einzelner Flussquanten durch einen Supraleiter hat eine gewisse Ähnlichkeit mit der Bewegung von Versetzungen in einem Kristall. Letztere führt zu Verformungen des Kristalls schon bei extrem niedrigen Werten der mechanischen Spannung. In beiden Fällen verursacht die Bewegung eines lokalen Defekts eine makroskopische Wirkung.

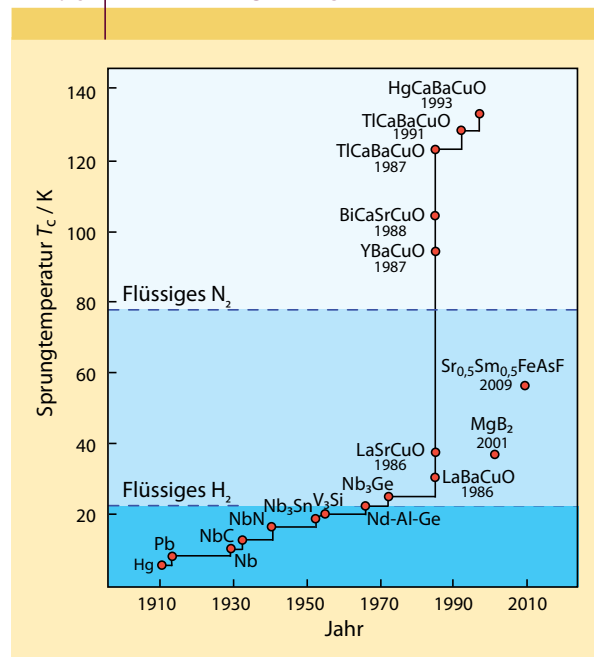
Die unerwünschte Bewegung der magnetischen Flussquanten kann man durch Einbau von sogenannten Haftzentren in den Supraleiter verhindern. Dies ist inzwischen zu einem wichtigen Feld der Materialwissenschaft und Metallurgie geworden. Ziel ist es, den verlustlosen Stromfluss bis zu möglichst hohen Werten der kritischen Stromstärke aufrecht zu erhalten. Dies führt uns zu den technischen Anwendungen.

### Medizintechnik und Großforschung

Viele Jahre war die Möglichkeit einer technischen Anwendung der Supraleitung, beispielsweise als Magnetwicklungen, stark eingeschränkt. Das lag an den relativ niedrigen Werten des kritischen Magnetfelds und der kritischen Stromstärke. Erst Anfang der 1960er-Jahre änderte sich dies, als neue Materialien wie NbTi, Nb<sub>3</sub>Sn und NbZr entdeckt wurden [7]. Bei den kritischen Werten brachten diese Materialien einen großen Fortschritt. Zudem spielte auch ihre gute Herstellbarkeit und die zuverlässige metallurgische Verarbeitungsmöglichkeit eine wichtige Rolle. Schon bald begann die industrielle Entwicklung von supraleitenden Magnetspulen, beispielsweise bei Westinghouse in den USA und bei Oxford Instruments in England. 1974 wurde die Verbindung Nb<sub>3</sub>Ge entdeckt. Diese hält mit 23,2 K den Rekordwert der kritischen Temperatur unter den klassischen Supraleitern.

Der größte kommerzielle Anwendungsbereich der Supraleitung sind zurzeit die supraleitenden Magnetspulen für die Magnet-Resonanz-Tomographie oder Kernspintomographie in der Medizin (siehe Physik in unserer Zeit **2010**, *41*(5), 228). Der Jahresumsatz liegt hier bei 2–3 Milliarden Euro. Die Supraleitung spielt auch in der Großforschung eine wichtige Rolle. Dazu zählt der Large Hadron Collider (LHC) am CERN in Genf [8]. Die Führungsmagnete für die Teilchenbahn in seinem ringförmigen Tunnel von 27 km Länge sind aus NbTi angefertigt. Damit sie supraleitend werden, müssen insgesamt 31 000 Tonnen Material auf 1,9 K gekühlt werden. Wie groß diese technische Herausforderung ist, zeigte sich, als schon wenige Tage nach der Inbetriebnahme im September 2008 die Supraleitung in einer

ABB. 6 TEMPERATURREKORDE



*Historischer Verlauf der Sprünge in der supraleitenden Übergangstemperatur  $T_c$  nach oben seit der Entdeckung der Supraleitung. Rechts sind MgB<sub>2</sub> und zudem das Sr<sub>0,5</sub>Sm<sub>0,5</sub>FeAsF als Rekordhalter unter den neu entdeckten Pniktiden eingezeichnet.*

elektrischen Verbindung zwischen zwei Abschnitten zusammenbrach und es zu einer Explosion kam. Die Reparatur der entstandenen Schäden erforderte mehr als ein Jahr. Inzwischen ist der Betrieb des LHC wieder angelaufen.

Auch die Fusionsforschung benötigt riesige supraleitende Magnetspulen [9]. Das gilt besonders für das internationale Projekt des Fusionstestreaktors ITER in Cadarache in Südfrankreich, das 2005 die entscheidende Startphase erlebte. Neben den Anwendungen in der Starkstromtechnik hat die Supraleitung auch Bereiche in der Messtechnik und Mikroelektronik erobert [10].

### Hochtemperatur-Supraleitung

1986 brachte mit der Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleiter in den Kupraten eine große Überraschung für alle Experten. Georg Bednorz und Alex Müller hatten sie am IBM Forschungslaboratorium in Rüschlikon bei Zürich gefunden [1] (siehe Physik in unserer Zeit **2006**, *37*(4), 154). Ihre Entdeckung löste weltweit eine enorme Forschungsaktivität aus, so dass schon bald Kuprat-Supraleiter mit Werten der kritischen Temperatur oberhalb 130 K bekannt wurden.

Technisch bedeutsam ist besonders die Tatsache, dass bei einer Reihe von Kupraten die kritische Temperatur  $T_C$  deutlich oberhalb der Siedetemperatur des flüssigen Stickstoffs von 77 K liegt. Damit kann man das teure flüssige Helium für die Kühlung durch viel billigeren flüssigen Stickstoff ersetzen. Wenn es auch erwiesen ist, dass die Supra-

## Zum Thema



### Supraleitung. Grundlagen und Anwendung.

W. Buckel, R. Kleiner,  
Wiley-VCH, Wein-  
heim 2004, 6. Aufl.,  
XIV, 479 Seiten,  
Broschur, 72,90 €  
ISBN: 3-527-40348-5

leitung bei diesen Materialien auf der Bildung von Cooper-Paaren beruht, so ist der mikroskopische Paarungsmechanismus noch nicht endgültig geklärt. Von den klassischen Supraleitern unterscheidet sich die Hochtemperatur-Supraleitung in den Kupraten zudem, weil sie stark anisotrop ist. Die Cooper-Paare bewegen sich nahezu zwei-dimensional entlang bestimmter Schichten in den komplexen Kristallen. Technisch werden Hochtemperatur-Supraleiter bereits in Kabeln zur Energieübertragung, Mobilfunk-Frequenzfiltern, Strombegrenzern, Elektromotoren für Schiffe, Magnetlagern und SQUIDS eingesetzt [11–13]. Kommerziell etablieren konnten sich bislang allerdings nur wenige dieser technischen Lösungen.

Die Entdeckung der Kuprat-Supraleiter war nicht die letzte Überraschung auf diesem Forschungsgebiet. 2001 entdeckte der Japaner Jun Akimitsu, dass Magnesiumdiborid unterhalb einer kritischen Temperatur von etwa 39 K supraleitend wird [14].  $MgB_2$  ist schon seit über fünfzig Jahren bekannt und einfach herzustellen, allerdings nicht in der für Supraleitung benötigten reinen Form. Bemerkenswert war vor allem der Befund, dass sein Verhalten demjenigen der klassischen Typ-I-Supraleiter ähnelt. Allerdings steht  $MgB_2$  bislang als chemische Verbindung alleine da. Die Hoffnung auf die Entdeckung einer neuen Klasse von Supraleitern wurde enttäuscht.

Für die jüngste Aufregung sorgte die Entdeckung von Hochtemperatur-Supraleitung in sogenannten Pniktiden, etwa  $LaOFeP$  [15] oder  $LaO_{1-x}F_xFeAs$  [16]. Hierbei handelt es sich tatsächlich um eine neue Klasse von Eisenhaltigen Supraleitern, in der die Verbindung  $Sr_{0,5}Sm_{0,5}FeAsF$  mit einem  $T_C$  von 56 K derzeit den Rekord hält. Das ist zwar im Vergleich zu den Kuprat-Supraleitern unspektakulär, aber die Eigenschaften der Pniktide sind hochinteressant. Obwohl sie wie die Kuprate aus schichtartigen Kristallen bestehen, zeigen sie nämlich eine nahezu isotrope, also richtungsunabhängige Supraleitung.

Bis heute zeigt das Gebiet der Supraleitung eine große Lebendigkeit und ein wachsendes Potenzial für technische Anwendungen. Zehn Nobelpreisträger stehen bislang für seine größten Fortschritte: 1913 Kamerlingh Onnes, 1972 Bardeen, Cooper und Schrieffer, 1973 Giaever und Josephson, 1987 Bednorz und Müller, 2003 Abrikossow und Ginzburg.

### Zusammenfassung

1911 entdeckte der niederländische Physiker Heike Kamerlingh Onnes das Phänomen der Supraleitung. Er hatte auch früh die Vision, diese technisch einzusetzen. In den 1930er Jahren fanden Walther Meißner und Robert Ochsenfeld mit dem nach ihnen benannten Effekt die zweite grundlegende Eigenschaft der Supraleitung. Eine Theorie zur klassischen Supraleitung gelang John Bardeen, Leon Cooper und Robert Schrieffer im Jahr 1957. Zuvor hatte Alexei Abrikossow mit den Flusslinien eine wichtige Eigenschaft von Typ-II-Supraleitern entdeckt. Diese bahnten den Weg zu den ersten technischen Anwendungen. 1986 entdeckten dann Georg Bednorz

und Alex Müller die Hochtemperatur-Supraleitung. Inzwischen sind zu diesen Kupraten weitere neue Hochtemperatur-Supraleiter hinzu gekommen.

### Stichworte

Supraleitung, Geschichte, kritische Temperatur, kritisches Feld, Meißner-Ochsenfeld-Effekt, Flusslinien-Gitter, Typ-I-Supraleiter, Typ-II-Supraleiter, BCS-Theorie, Cooper-Paar, Hochtemperatur-Supraleiter, Kuprate, Pniktide, technische Anwendungen.

### Literatur

- [1] R. P. Huebener, *Electrons in Action*, Wiley-VCH, Weinheim 2005.
- [2] E. A. Lynton, *Superconductivity*, John Wiley & Sons, New York 1962.
- [3] S. Jorda, *Physik Journal* 2008, 7(7), 27.
- [4] R. P. Huebener, H. Luebbig, *A Focus of Discoveries*, World Scientific, Singapur 2008.
- [5] V. Ginzburg, *On Superconductivity and Superfluidity*, Springer, Berlin 2009.
- [6] A. A. Abrikossow, in: *Vortices in Unconventional Superconductors and Superfluids* (Hrsg.: R. P. Huebener, N. Schopohl, G. E. Volovik), Springer, Berlin 2002.
- [7] P. Komarek, *Hochstromanwendung der Supraleitung*, B. G. Teubner, Stuttgart 1995.
- [8] G. Flügge, P. Jenni, *Physik Journal* 2006, 5(2), 29.
- [9] I. Milch, *Phys. Unserer Zeit* 2006, 37(4), 170.
- [10] W. Buckel, R. Kleiner, *Supraleitung*, Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2004.
- [11] A. Malozemoff, J. Mannhart, D. Scalapino, *Phys. Unserer Zeit* 2006, 37(4), 162.
- [12] G. Ries, F. Werfel, *Phys. Unserer Zeit* 2004, 35(3), 134.
- [13] P. F. Dahl, *Superconductivity*, American Institute of Physics, New York 1992.
- [14] J. Nagamatsu et al., *Nature* 2001, 410, 63.
- [15] Y. Kamihara et al., *J. Am. Chem. Soc.* 2006, 128(31), 10012.
- [16] H. Takahashi et al. *Nature* 2008, 453, 376.

### Der Autor



Rudolf P. Huebener, Promotion in Physik 1958 an der Universität Marburg, Forschungstätigkeit in Karlsruhe und 15 Jahre in den USA, 1974 bis 1999 Inhaber eines Lehrstuhls für Experimentalphysik an der Universität Tübingen, 1992 Max Planck Forschungspreis, 2001 Cryogenics Prize.

#### Anschrift

Prof. Dr. Rudolf P. Huebener, Eberhard Karls Universität Tübingen, Physikalisches Institut, Experimentalphysik II, Auf der Morgenstelle 14, D-72076 Tübingen.  
Prof.Huebener@uni-tuebingen.de