

## SUPRALEITUNG

# Von Leitungsketten zur Paarhypothese

Die Entdeckung der Supraleitung und die wechselvolle Geschichte ihrer Erklärung

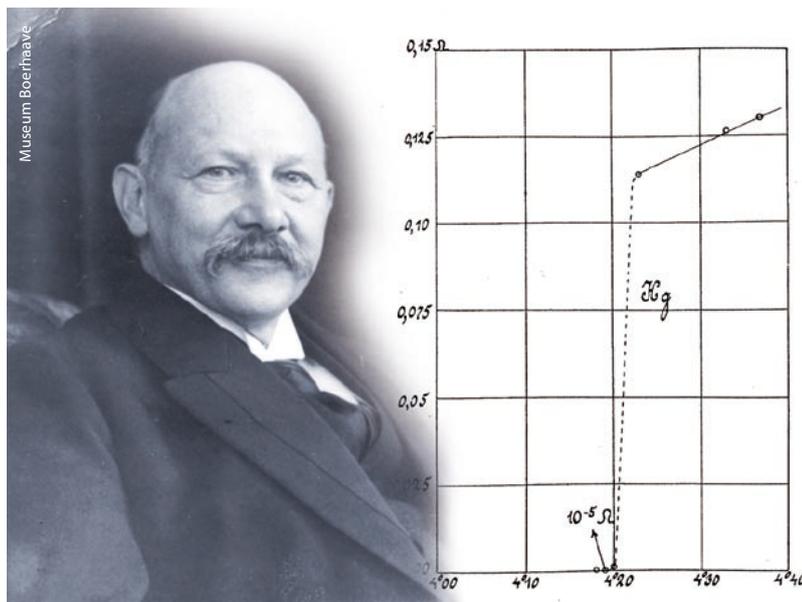
Christian Joas und Georges Waysand

Mit der Entdeckung der Supraleitung 1911 setzte ein jahrzehntelanges Rätselraten um ihren Ursprung ein. Viele berühmte Physiker versuchten sich lange Zeit erfolglos an einer theoretischen Erklärung. Dennoch trugen die vielfältigen Ansätze dazu oft Früchte in anderen Gebieten der Physik. Schließlich gelang es Bardeen, Cooper und Schrieffer im Jahr 1957, eine mikroskopische Theorie der Supraleitung zu liefern.

Die Entdeckung der Supraleitung durch Heike Kamerlingh Onnes im Jahre 1911 entsprang einem ambitionierten Forschungsprogramm, dem sich Onnes Zeit seines Lebens widmete und in dem er auf einzigartige Weise industrielle Standards in der Grundlagenforschung umsetzte [1]. Der erste große Erfolg dieser frühen Großforschung war die Verflüssigung von Helium im Jahre 1908 [2]. Sie machte der im 19. Jahrhundert entwickelten Vorstellung der Existenz nicht-verflüssigbarer Permanentgase den endgültigen Garaus. Noch bis 1923 war das Leidener Tieftemperaturlabor weltweit der einzige Ort, an dem Helium verflüssigt werden konnte [3, 4].

Onnes erkannte, dass viele der damals neuen Erkenntnisse der Physik „Messungen bei niedrigen Temperaturen zu einem Gegenstand höchsten Interesses bei Physikern“ machten ([5], S. 308). Dazu zählten nicht zuletzt Walther Nernsts Wärmesatz von 1905, der später leicht abgeändert zum dritten Hauptsatz der Thermodynamik wurde, Max Plancks Quantentheorie von 1900 und Plancks „zweite Quantentheorie“, die das Konzept der Nullpunktsenergie umfasste ([6], S. 246). Onnes hoffte, die damit verbundenen lebhaften Debatten durch Tieftemperaturexperimente mitzuentcheiden. Sein Forschungsprogramm wurzelte zwar tief in der Chemie und Thermodynamik des 19. Jahrhunderts, wandte sich jedoch bewusst den drängenden Fragen der modernen Physik zu.

Beim Bemühen, zuverlässige Temperaturstandards in der Nähe des absoluten Nullpunkts aufzustellen, rückte die Messung elektrischer Widerstände in metallischen Leitern ins Blickfeld der Leidener Forscher. Im April 1911 vermaß Gilles Holst auf Veranlassung von Onnes hin den Widerstand von Quecksilber und beobachtete bei etwa 4,2 Kelvin einen Sprung um mehrere Größenordnungen ([1], S. 24; siehe auch [7]). Abrupt verlor Quecksilber unterhalb dieser Temperatur fast vollständig jeglichen elektrischen Widerstand. Gewis-



Heike Kamerlingh Onnes entdeckte 1911 die Supraleitung, als er bei 4,2 Kelvin einen Sprung im elektrischen Widerstand von Quecksilber beobachtete.

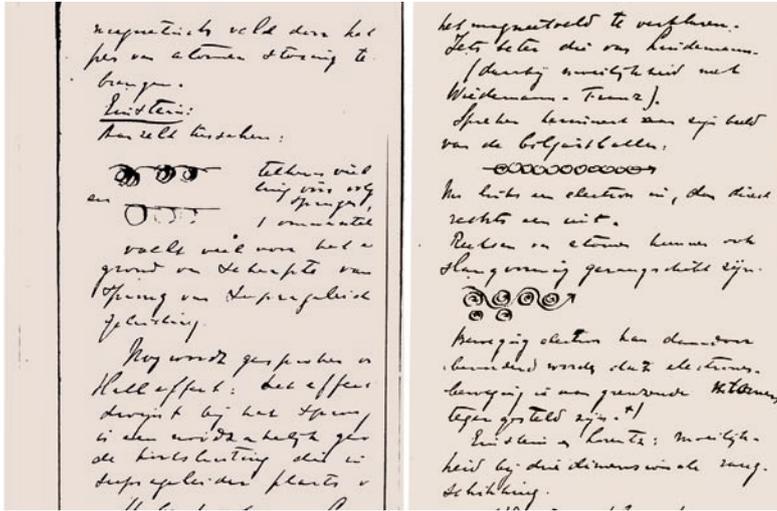
senhaft überprüften Onnes und seine Mitarbeiter das Resultat. In seiner Nobelvorlesung schloss Onnes 1913: „Daher geht Quecksilber bei 4,2 Kelvin in einen neuen Zustand über, der aufgrund seiner eigentümlichen elektrischen Eigenschaften als Zustand der Supraleitung bezeichnet werden kann“ ([5], S. 333). Zu diesem Zeitpunkt hatte er bereits entdeckt, dass auch Zinn und Blei dieses Phänomen zeigen.

Die unerwartete Entdeckung der Supraleitung löste vielfältige Spekulationen über ihren Ursprung aus. Binnen kurzem zog sie Scharen von Physikern in ihren

## KOMPAKT

- Heike Kamerlingh Onnes gelang es 1908 erstmals, Helium zu verflüssigen. Damit legte er nicht nur die Grundlage für die moderne Tieftemperaturphysik, sondern auch für die Entdeckung der Supraleitung im Jahr 1911.
- In der Folgezeit gab es viele interessante, letztlich jedoch erfolglose Versuche, das Phänomen zu erklären.
- Thermodynamische Theorien der Supraleitung kamen mit dem Meißner-Ochsenfeld-Effekt (1933) ins Blickfeld.
- Auf die Ansätze der Gebrüder London (ab 1935) und Landau und Ginzburg (1950) folgte schließlich die bahnbrechende BCS-Theorie (1957), die jedoch bei den 1986 entdeckten Hochtemperatur-Supraleitern nicht ausreicht.

Dr. Christian Joas, Fritz-Haber-Institut und Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte, Boltzmannstraße 22, 14195 Berlin;  
Dr. Georges Waysand, Laboratoire Souterrain à Bas Bruit de Rustrel-Pays d'Apt (LSBB), Observatoire de la Côte d'Azur, Université de Nice Sophia-Antipolis, La Grande Combe, 84400 Rustrel, Frankreich

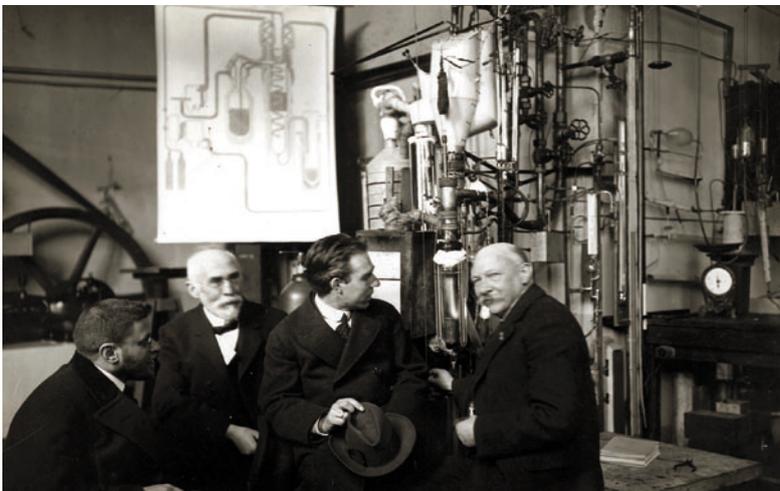


Diese Notizen des niederländischen Physikers Willem Keesom aus dem Jahr 1920 dokumentieren frühe Versuche, die

Supraleitung anhand der Bewegung der Elektronen auf Bohrschen Bahnen von Ion zu Ion zu erklären.

Bann [8, 9]. Von einer anfänglichen Kuriosität wandelte sie sich im Laufe des 20. Jahrhunderts zu einer Triebkraft für die Entwicklung neuer physikalischer Ideen. Selbst die Frage, was das Wesen der Supraleitung ausmacht, unterlief dabei folgenreichen Transformationen. Die Versuche, sie zu erklären, haben zu neuen physikalischen Konzepten geführt, von denen manche weit über die Supraleitung hinaus Einfluss auf die Entwicklung der Physik nahmen: makroskopische Quantenzustände, Beobachtbarkeit der Phase der Wellenfunktion und spontane Symmetriebrechung.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts war das Problem der elektrischen und thermischen Leitfähigkeit von Metallen eine weithin offene Frage. Eduard Riecke und Paul Drude hatten erste Lösungsversuche angestellt. Letzterer nahm an, dass Metalle ein Gas von Elektronen enthalten, die Joseph John Thomson 1897 experimentell nachgewiesen hatte. 1905 erweiterte Hendrik Lorentz das atomistische Modell von Drude um die konsequente Anwendung der Methoden der statistischen Mechanik. Diese Drude-Lorentz-Theorie



Paul Ehrenfest, Hendrik Lorentz, Niels Bohr und Heike Kamerlingh Onnes (von links nach rechts) im Jahre 1919 vor dem

Heliumverflüssiger im Tieftemperaturlabor von Onnes in Leiden.

konnte den plötzlichen Widerstandsverlust im Supraleiter jedoch nicht schlüssig erklären. Anfänglich sahen Physiker die Supraleitung als einen Grenzfall normaler metallischer Leitung bei tiefen Temperaturen an, und frühe Erklärungsversuche kamen gänzlich ohne Quantentheorie aus. 1915 schlug Frederick Lindemann vor, sich von der Drudeschen Vorstellung freier Elektronen im Metall zu lösen. In seinem Modell bilden die Elektronen ein starres Raumgitter, das ohne Energieverlust durch das ionische Kristallgitter driftet.

Eine der ersten Theorien der metallischen Leitung, die explizit Elemente der Quantentheorie verwendet, legte Fritz Haber 1919 vor. Er stützte sich auf Bohrs Atommodell von 1913 und nahm an, Metalle bestünden aus einem Gitter metallischer Ionen, und Valenzelektronen umliefen sie. In einer Nachschrift widmete sich Haber der Supraleitung: „Der Gesichtspunkt, der sich von selbst in den Vordergrund drängt, ist die Auffassung der Supraleitfähigkeit als eines Zustandes, bei dem die Valenzelektronen des Metalles auf Bahnen umlaufen, die gemeinsame Tangenten in Punkten gleicher Geschwindigkeit haben“ ([10], S. 1003). Elektronen auf einer Bohrschen Bahn strahlen nicht ab, daher dissipiert ein Elektron, das von einer Bohrschen Bahn eines Ions auf die entsprechende Bahn eines benachbarten Ions gleitet, keine Energie, was zu verlustfreiem Transport in ideal leitenden Kanälen führen kann [11].

1922 formulierte Albert Einstein in einem Beitrag zur Festschrift für Kamerlingh Onnes eigene Vorstellungen zur Supraleitung [11]. Wie Haber nahm auch Einstein an, dass Metalle keinerlei freie Elektronen enthalten. Er sah die Drude-Lorentz-Theorie als gescheitert an. Während Haber den Valenzursprung seiner ideal leitenden Transportkanäle betont hatte, nahm Einstein allgemeiner an, „dass die Supraleitungsströme von geschlossenen Molekülketten (Leitungsketten) getragen werden, deren Elektronen unablässig cyclische Vertauschungen erleiden“ ([12], S. 434). Für Einstein war Supraleitung daher aufs Engste mit der räumlichen Struktur des Leiters verknüpft. Elektrische Leitung bei gewöhnlichen Temperaturen beruhe auf „durch thermische Bewegung unablässig gestörter Supraleitung“. Das Konzept einer eigenen supraleitenden Phase war unbekannt – thermische Messungen erreichten nicht die nötige Empfindlichkeit, um den Sprung in der spezifischen Wärme am Übergangspunkt zu messen. Einstein erwartete aufgrund seiner Überlegungen, dass Leitungsketten „niemals Atome verschiedener Art“ enthalten können. Experimente von Kamerlingh Onnes widerlegten dies jedoch umgehend und rückten den Begriff der Leitungsketten und ähnliche Modelle, die auf strukturellen oder chemischen Überlegungen basierten, in eher zweifelhaftes Licht.

### Von der alten Quantentheorie zur Quantenmechanik

Die frühen 1920er-Jahre zeigten immer deutlicher, dass die Methoden der alten Quantentheorie nicht ausreichten, um Vielteilchenprobleme zu behandeln. Ein-



Fritz London (links) und Walter Heitler (in der Mitte Linus Paulings Frau Ava) behandelten erstmals die chemische Bindung quantenmechanisch und legten damit die Grundlage für die Arbeiten von Bloch, Heisenberg und anderen zur modernen Quantentheorie fester Körper.

stein äußerte sich zu seinen eigenen Überlegungen zur Supraleitung: „Bei unserer weitgehenden Unkenntnis über die Quanten-Mechanik zusammengesetzter Systeme sind wir weit davon entfernt, diese vage Idee in eine Theorie verdichten zu können“ ([12], S. 434).

Mit der ab 1925 aufkommenden Quantenmechanik erlebten frühere Versuche zur Behandlung von Vielteilchensystemen eine Renaissance. Neue Konzepte entstanden, nicht selten im Kontext der Untersuchung fester Körper. Ende 1926 erklärte Wolfgang Pauli den Paramagnetismus von Metallen mithilfe der neuen Fermi-Statistik. Ein Jahr später gelang Arnold Sommerfeld durch Berücksichtigung des Pauli-Verbots der Ausbau der Drude-Lorentz-Theorie und die Ableitung des Wiedemann-Franz-Gesetzes. Für Werner Heisenberg blieb auch danach die vollständig quantenmechanische Behandlung der Elektronen im Festkörper ein wichtiges Desideratum. 1928 schlug er das Problem Felix Bloch als Dissertationsthema vor. Dieser sah bald ein, dass im Rahmen der Wellenmechanik „eine periodische Anordnung nicht wirklich ein Hindernis für Wellen darstellt, sondern nur die thermischen Schwingungen“ ([13], S. 596). Nach dem Vorbild der ersten quantenmechanischen Behandlung der chemischen Bindung für das Wasserstoffmolekül durch Walter Heitler und Fritz London 1927 konstruierte Bloch Wellenfunktionen auf der Basis ungestörter Einzelelektronenzustände und vernachlässigte die Elektron-Elektron-Wechselwirkung. Dies gestattete ihm unter anderem, den Ursprung der bis dahin unverständlichen langen freien Weglänge von Elektronen im Metall aufzuklären. Blochs Theorie bildet die Grundlage der modernen Quantentheorie fester Körper [14].

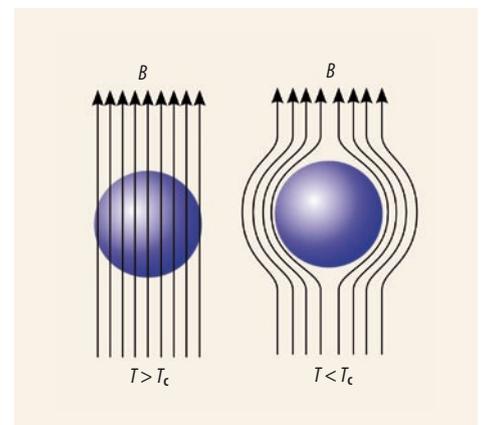
Heisenberg gelang, ebenfalls stark von der Arbeit Heitlers und Londons beeinflusst, mit der quantenmechanischen Behandlung des Ferromagnetismus 1928 eine weitere wichtige Entwicklung. Schon zwei Jahre zuvor hatte er gegenüber Pauli die Vermutung geäußert, dass eine Parallelstellung der Spins zur

energetisch günstigsten Konfiguration führen könne. Während die Theorie von Weiss aus dem Jahr 1907 die Existenz eines Molekularfeldes postulieren musste, konnte Heisenberg den Ursprung dieses Feldes in quantenmechanischen Austauschkräften aufdecken. Dies veranlasste Bloch 1928/29 zu dem Versuch, Supraleitung durch eine Analogie zum Ferromagnetismus zu erklären. So wie Ferromagnetika unterhalb der Curie-Temperatur eine permanente Magnetisierung ausbilden – welche seit den Tagen Ampères durch Dauerströme erklärt wurde –, könnten doch Supraleiter unterhalb der kritischen Temperatur einen Zustand einnehmen, der Dauerströme erlaubt. Seine Versuche, einen solchen Zustand zu finden, schlugen jedoch fehl. Bloch sah von der Publikation seiner Ideen ab. Der Fehlschlag trieb ihn zu der oft zitierten Aussage: „Das einzige beweisbare Theorem zur Supraleitung lautet, dass jede Theorie der Supraleitung widerlegbar ist“ ([8], S. 151). Dennoch bildete die Idee einer Analogie zum Ferromagnetismus die Grundlage für viele weitere Versuche zur Erklärung der Supraleitung, wie etwa 1933 für Lev Landau, dessen Arbeit bereits Elemente seiner späteren Arbeit mit Vitaly Ginzburg vorwegnahm [15].

Nach der Entdeckung eines ungewöhnlichen Phasenübergangs in flüssigem Helium durch Willem Keesom führte Paul Ehrenfest 1933 eine neue Klassifikation der Phasenübergänge ein [16]. Ehrenfest sah im  $\lambda$ -Übergang, benannt nach der Form des Graphen der spezifischen Wärmekapazität, einen Phasenübergang zweiter Ordnung. Im Jahr darauf wandte A. J. Rutgers das neue Schema auf die Supraleitung an, wo Keesom und J. A. Kok ähnliche Sprünge in der spezifischen Wärme beobachtet hatten. Er leitete einen Ausdruck für den Sprung in der spezifischen Wärme beim Übergang in den supraleitenden Zustand ab, der gut mit dem Experiment übereinstimmte. Dies legte die Existenz einer eigenen supraleitenden Phase nahe. Cornelius Gorter gelang es, Rutgers Resultat aus dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik abzuleiten, was ihn zu der Annahme führte, dass normal- und supraleitende Phasen räumlich koexistieren können.



Walther Meißner entdeckte mit Robert Ochsenfeld, dass ein äußeres Magnetfeld



aus dem Volumen eines langen supraleitenden Zylinders verdrängt wird.

## Verdrängte Felder

Die Entwicklung thermodynamischer Theorien der Supraleitung ist eng mit einer weiteren erstaunlichen Entdeckung verwoben: 1933 beobachteten Walther Meißner und Robert Ochsenfeld die vollständige Verdrängung eines äußeren Magnetfelds aus dem Volumen eines langen supraleitenden Zylinders [17]. Der Meißner-Ochsenfeld-Effekt belegte, dass Supraleiter nicht nur perfekte Leiter, sondern auch perfekte Diamagneten sind. Gorter entwickelte 1934 gemeinsam mit Hendrik Casimir eine „konsistente thermodynamische Behandlung der Übergänge vom supraleitenden in den normalleitenden Zustand unter der Annahme, dass  $B$  im supraleitenden Zustand verschwindet“ ([18], S. 318). Sie postulierten, dass perfekter Diamagnetismus eine allgemeine Eigenschaft der supraleitenden Phase ist, und entwickelten das so genannte Zwei-Flüssigkeiten-Modell, dessen Einfluss mindestens bis in die 1950er Jahre reicht.

Eine Wiederholung des Meißner-Ochsenfeld-Versuchs gestaltete sich schwierig, was zu intensiven Debatten über die Allgemeingültigkeit des Effekts führte. Meißner beharrte auf einer Erklärung im Rahmen der Analogie zum Ferromagnetismus in der Tradition Blochs und Landaus. Ihr lag die Vorstellung zugrunde, dass der niedrigste Energiezustand im Supraleiter stromführend sei. Die im Exil in Oxford forschenden Brüder Fritz und Heinz London vertraten ab 1935 einen völlig neuen Standpunkt: Anstatt mikroskopische Dauerströme anzunehmen, führten sie den Begriff eines makroskopischen Quantenzustands ein und postulierten eine endliche Eindringtiefe für das Magnetfeld. Für sie verhielt sich ein Supraleiter elektromagnetisch wie „ein einziges, großes, diamagnetisches Atom“ ([19], S. 348). In diesem Bild ist der niedrigste Energiezustand im Supraleiter ohne angelegtes Feld stromlos. Dies stand im Widerspruch zu Meißners Erklärung, entsprach jedoch der Elektronentheorie der Metalle. Fritz London präsentierte den neuen Gesichtspunkt im April 1935 in Paris: „Wir werden zeigen, dass das Problem, das man auf so unglückliche Weise angegangen ist, gar nicht aus der Natur der Sache entspringt, dass die Interpretation der Experimente die beobachteten Tatsachen überstieg; und dass man dadurch der Elek-

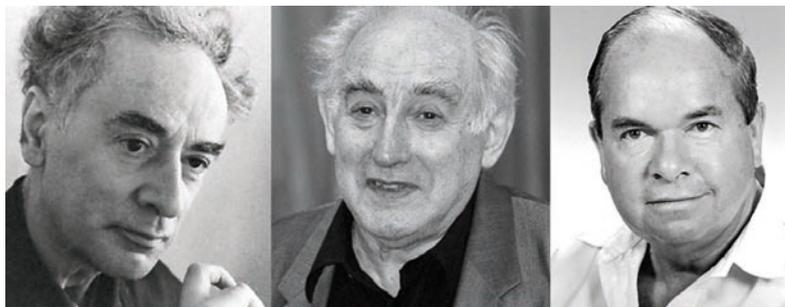
tronentheorie ein gänzlich unlösbares Problem gestellt hat“ ([20], S. 7).

Im Oktober 1935 traf London seinen Kontrahenten Meißner und fügte hinzu: „Die Begründung unserer makroskopischen Gleichungen durch die Elektronentheorie wurde noch nicht vorgenommen [...] Aber man nehme an, die Elektronen seien durch irgendeine Form von Wechselwirkung so gekoppelt, dass der niedrigste Zustand durch ein endliches Intervall von den angeregten Zuständen getrennt sei. Dann kann der störende Einfluss des Feldes auf die Eigenfunktionen nur ins Gewicht fallen, wenn es von gleicher Größenordnung ist wie die koppelnden Kräfte“ ([21], S. 31). Diese Einsichten Londons bildeten später für John Bardeen eine wichtige Quelle der Inspiration auf der Suche nach einer mikroskopischen Theorie der Supraleitung [22].

Auch flüssiges Helium rückte nun verstärkt ins Blickfeld der Physiker, zuvorderst aufgrund des rätselhaften  $\lambda$ -Übergangs, der die Existenz einer völlig neuartigen flüssigen Phase nahelegte [23]. Ende 1937 entdeckten Peter Kapitza in Moskau sowie Jack Allen und Don Misener in Cambridge das Verschwinden der Viskosität von Helium in der neuen Phase [24]. In Analogie zur Supraleitung prägte Kapitza daraufhin den Begriff der Supraflüssigkeit. London meinte, es könne sich um ein Bose-Einstein-Kondensat handeln, das Einstein 1925 als möglichen Zustand eines Bose-Gases identifiziert hatte. Laszlo Tisza führte ein an Gorter und Casimir angelehntes Zwei-Flüssigkeiten-Modell für Helium ein, auf das Landaus bahnbrechende Arbeit aus dem Jahr 1941 aufbaut [25].

## Tiefe Temperaturen, kalter Krieg

Der Zweite Weltkrieg verlangsamte die Entwicklung in vielen Bereichen der Tieftemperaturphysik merklich. Sowohl die Forschung an Helium als auch die Untersuchung von Supraleitern traten auf der Stelle. Die rüstungsorientierten Forschungsprogramme des Krieges hatten dennoch großen Einfluss auf die Nachkriegsentwicklung des gesamten Feldes. Zum einen führte die Entwicklung des Radars dazu, dass Mikrowellenresonatoren zur Spektroskopie und für präzise Messungen der Oberflächenimpedanz zur Verfügung standen. Auf Grundlage solcher Messungen formulierte Brian Pippard eine nichtlokale Verallgemeinerung der London-Gleichungen und führte die Kohärenzlänge als zweite charakteristische Größe von Supraleitern neben der Londonschen Eindringtiefe ein. Zum anderen produzierten die Laboratorien in Oak Ridge und Los Alamos Isotope supraleitender Elemente. Damit entdeckten Serin und Maxwell 1950, dass die Übergangstemperatur eines Supraleiters von der Quadratwurzel der Masse des verwendeten Isotops abhängt. Für Herbert Fröhlich, der schon zuvor auf die Bedeutung der Elektron-Phonon-Wechselwirkung für die Supraleitung hingewiesen hatte, und für Bardeen, dessen Interesse an der Supraleitung durch Diskussionen mit John Slater schon in den 1930er-Jahren geweckt worden war, bedeutete



Lev Landau (links) und Vitaly Ginzburg (Mitte) entwickelten 1950 eine phänomenologische Theorie der Supraleitung, mit deren Hilfe Alexei Abrikosov (rechts) die Existenz von Vortextgittern in Typ-II-

Supraleitern herleitete. Landau erhielt 1962 den Nobelpreis für Physik, Ginzburg und Abrikosov 2003 zusammen mit Anthony Leggett.

der Isotopeneffekt den Beweis für die zentrale Rolle der Wechselwirkung zwischen Elektronen und Gitter.

In der Sowjetunion durchlebte die Physik bis zur Mitte der 1950er-Jahre eine Phase der Isolation [26]. Jahrelang wurde die 1950 von Ginzburg und Landau veröffentlichte phänomenologische Theorie der Supraleitung im Westen nahezu komplett ignoriert, nicht zuletzt deshalb, weil die wenigen für die USA bestimmten Exemplare der sie enthaltenden Zeitschrift einem Boykott der Longshoremen Union zum Opfer fielen und im Hudson River landeten ([27]; [1], S. 129). Anders als die Gebrüder London gaben Ginzburg und Landau die Rigidität des makroskopischen Quantenzustands auf und ließen die räumliche Variation des Ordnungsparameters zu, einer abstrakten Größe, die den Phasenübergang im Rahmen des Zwei-Flüssigkeiten-Modells beschreibt und nur im supraleitenden Zustand von Null verschieden ist. 1957 leitete Alexei Abrikosov mithilfe der Ginzburg-Landau-Theorie die Existenz von Vortextgittern in Typ-II-Supraleitern her. Sie spielt heute weit über die phänomenologische Beschreibung der Supraleitung hinaus eine wichtige Rolle in der Physik.

## Paarlauf im Gitter

Im Westen richteten Bardeen und andere zu Beginn der 1950er-Jahre ihr Augenmerk auf die mikroskopische Theorie fester Körper im Allgemeinen und auf die Elektron-Phonon-Wechselwirkung im Speziellen. Wie Fröhlich beobachtete Bardeen: Die Energiedifferenz zwischen normal- und supraleitendem Zustand ist so gering, dass nur die Elektronen in unmittelbarer Nähe der Fermi-Kante an der Supraleitung teilhaben können. 1955 warb Bardeen den jungen Quantenfeldtheoretiker Leon Cooper an, um mit ihm gemeinsam eine feldtheoretische Beschreibung des Fermi-Gases in Metallen zu entwickeln. Zusammen mit dem damaligen Doktoranden Bob Schrieffer hielten sie informelle Treffen ab und verknüpften neue Methoden der Quantenfeldtheorie mit Bardeens Wissen über Metalle und Supraleiter.

1956 wies Cooper nach, dass eine beliebig kleine anziehende Wechselwirkung zwischen den Elektronen zu einer Instabilität des Fermi-Gases und zur Ausbildung von Elektronenpaaren führt, die seither als Cooper-Paare firmieren. Dies konnte prinzipiell die schon von London vorausgesagte Energielücke in Supraleitern hervorrufen. Schafroth und Blatt hatten bereits ein Jahr zuvor eine ähnliche Idee im Rahmen einer quasi-chemischen Theorie der Supraleitung verfolgt, welche die Existenz resonanter Zwei-Elektronen-Zustände annahm, die sich effektiv wie lokalisierte bosonische Moleküle verhielten. Ihr Versuch, Supraleitung als Bose-Einstein-Kondensation solcher Moleküle zu erklären, stieß jedoch auf Schwierigkeiten. Auch Richard Feynman versuchte sich an einer mikroskopischen Theorie der Supraleitung. Ohne Unterlass arbeitete Bardeens Gruppe daher daran, die kurz zuvor von Landau veröffentlichte Fermi-Flüssigkeits-Theorie um Elektron-Phonon-Wechselwirkungen zu erweitern und



AIP, Emilio Segre Visual Archives, Physics Today Collection, Gift of Sir Brian Pippard

1957 publizierten John Bardeen, Leon Cooper und John Schrieffer (von links nach rechts) ihre mikroskopische Theorie der Supraleitung, die unter Theoretikern lange umstritten war.

den Anschluss an Coopers Idee herzustellen. Schrieffer gelang es schließlich, eine variationelle Wellenfunktion aufzustellen, welche die Cooper-Paarung berücksichtigt. Die Berechnung der Energielücke im Anregungsspektrum ergab das gleiche Resultat wie die Variation des Parameters in der Wellenfunktion. Dies überzeugte Bardeen, dessen Gruppe daraufhin zahlreiche Eigenschaften von Supraleitern im Rahmen der neuen Theorie berechnete. Die Ergebnisse stimmten gut mit bekannten Experimenten überein, beispielsweise mit dem Hebel-Slichter-Peak aus Kernresonanzexperimenten.

1957 publizierten Bardeen, Cooper und Schrieffer ihre heute als „BCS“-Theorie der Supraleitung bekannte mikroskopische Theorie [28, 29]. Nach ihr entsteht Supraleitung aus der durch die Gitterschwingungen vermittelten Anziehung der Elektronen. Der supraleitende Zustand ist ein makroskopischer, kohärenter Vielteilchen-Quantenzustand, in dem die Elektronen nahe der Fermi-Kante als gekoppelte Paare mit entgegengesetztem Spin und Wellenvektor auftreten, und der das Auftreten von supraleitenden Strömen erlaubt.

Während Experimentalphysiker recht schnell von der Gültigkeit der neuen Theorie überzeugt waren, blieben namhafte Theoretiker lange skeptisch ([3], S. 558 ff.). Dies mag erklären, warum Bardeen, Cooper und Schrieffer erst 1972 den Nobelpreis erhielten. Fragen einer Verletzung der allgemeinen Eichinvarianz wurden diskutiert und erst im Rahmen der konsistenten quantenfeldtheoretischen Neuableitung der Theorie durch Anderson, Nambu, Gorkov, Bogoliubov und andere aufgelöst. Dies führte zum Begriff der spontanen Symmetriebrechung, der schon bald weite Kreise ziehen sollte und heute beispielsweise dem Anderson-Higgs-Mechanismus zugrunde liegt, der im Rahmen des Standardmodells der Elementarteilchenphysik eine tragende Rolle einnimmt. Schwerer wog die Kritik an der BCS-Theorie, die deren empirische Voraussagekraft infrage stellte: Sie konnte keine Prognosen abgeben, welche Materialien supraleitend sind oder wie hoch die jeweilige Sprungtemperatur ist. Physiker verlangten nach einer quantitativen Theorie der Supraleitung, die solche Vorhersagen aus „first principles“ erlaubte und Retardierungseffekte in die

feldtheoretische Behandlung der Elektron-Phonon-Wechselwirkung einschloss.

Auf der Grundlage von Gorkovs Formulierung des Fröhlich-Hamilton-Operators und der Methode der Bogoliubov-Transformationen gelang Gerasim Eliashberg 1959 die Erweiterung von Arkadi Migdals Behandlung der Elektron-Phonon-Wechselwirkung in Normalleitern auf den supraleitenden Fall. Seine „strong coupling“-Theorie markiert den Beginn einer wahrhaft quantitativen Theorie der Supraleitung, die unter anderem Swihart, Morel und Anderson, sowie Schrieffer, Scalapino und Wilkins nachfolgend entwickelten. Hierbei spielten Tunnelexperimente von Ivar Giaever aus den frühen 1960er-Jahren eine entscheidende Rolle, denn sie erlaubten die präzise Vermessung der Energielücke in Supraleitern. Abweichungen vom einfachen BCS-Verhalten ergaben sich aus Details der Elektron-Phonon-Wechselwirkung. 1965 gelang es McMillan und Rowell, durch numerische Umkehrung der Eliashberg-Gleichungen aus experimentellen Tunneldaten im Supraleiter Rückschlüsse auf das Phononenspektrum im Normalzustand supraleitender Materialien zu ziehen. Giaevers Tunnelexperimente inspirierten Brian Josephson 1962 zudem zur Voraussage des nach ihm benannten Effekts, der den Begriff der Phase eines makroskopischen Quantenzustands als messbare Größe in der Physik etablierte und zu zahlreichen technischen Anwendungen führte.

## Die heiße Phase der Forschung

Die Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung durch Georg Bednorz und Alex Müller vor einem Vierteljahrhundert war eine weitere überraschende Wendung in der Geschichte der Supraleitung. Fortschritte in der Materialwissenschaft führten zur Entdeckung und Herstellung völlig neuartiger Klassen von Supraleitern. Ähnlich wie zur Zeit Kamerlingh Onnes kamen in den Jahren nach der Entdeckung der „high- $T_c$ “-Materialien zahlreiche neue Mechanismen und Modelle auf [30]. Das einzige, worauf sich die Physiker einigen konnten, war, dass sie über die Natur der Supraleitung in diesen „unkonventionellen“ Supraleitern vorerst keine Einigung erzielen konnten. Auch heute ist noch kein Konsens erreicht, weder für die Cuprate, noch für die erst kürzlich entdeckten eisenbasierten Supraleiter [31]. Die wendungsreiche Geschichte der Supraleitung in den letzten hundert Jahren nährt jedenfalls die Hoffnung, dass die Beschäftigung mit diesem Phänomen in neuartigen Materialien frische Ideen und Konzepte hervorbringt, die, wenn sie auch vielleicht nicht zur Lösung des Problems selbst beitragen, in anderen Gebieten der Physik Früchte tragen können.

\*

Die Autoren danken Jean Matricon und Johannes Knolle für hilfreiche Diskussionen und Hinweise.

## Literatur

- [1] J. Matricon und G. Waysand, *The Cold Wars. A History of Superconductivity*, Rutgers University Press, New Brunswick (2003)
- [2] S. Jorda, *Physik Journal*, Juli 2008, S. 27
- [3] L. Hoddeson et al. (Hrsg.), *Out of the Crystal Maze*, Oxford University Press, Oxford (1992)
- [4] D. Van Delft, *Freezing Physics*, Edita, Amsterdam (2007)
- [5] H. Kamerlingh Onnes, Nobel-Vorlesung (1913), [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1913/annes-lecture.pdf](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1913/annes-lecture.pdf)
- [6] T. Kuhn, *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894–1912*, Oxford University Press, Oxford (1978)
- [7] D. Van Delft und P. Kes, *Physics Today* **9**, 38 (2010)
- [8] P. F. Dahl, *Superconductivity*, AIP, New York (1992)
- [9] J. Schmalian, in: L. N. Cooper und D. Feldman (Hrsg.), *BCS: 50 Years*, World Scientific, Singapur (2011), S. 41
- [10] F. Haber, *Sitzber. Preuss. Akad. Wiss.*, S. 990 (1919)
- [11] T. Sauer, *Arch. Hist. Exact Sci.* **61**, 159 (2007)
- [12] A. Einstein, *Gedenkboek Kamerlingh Onnes, Leiden* (1922), S. 429
- [13] Interview mit Felix Bloch von Thomas S. Kuhn, 14.5.1964, <http://www.aip.org/history/ohilist/4509.html>
- [14] L. Hoddeson, G. Baym und M. Eckert, *Rev. Mod. Phys.* **59**, 287 (1987)
- [15] L. Landau, *Physikal. Zeitschrift der Sowjetunion* **4**, 43 (1933)
- [16] G. Jaeger, *Arch. Hist. Exact Sci.* **53**, 51 (1998)
- [17] D. Hoffmann, *Physikal. Blätter* **49**, 10, 899 (1993)
- [18] C. Gorter und H. Casimir, *Physica* **1**, 306 (1934)
- [19] F. London und H. London, *Physica* **2**, 341 (1935)
- [20] F. London, *Une conception nouvelle de la supra-conductibilité*, Hermann (Paris, 1939); komment. Ausg.: J. Matricon und J. Waysand, Hermann, Paris (2005)
- [21] F. London, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical* **152**, 24 (1935)
- [22] J. Bardeen, *Physics Today* **16**, 1, 19 (1963)
- [23] K. Gavroglu und Y. Goudaroulis, *Methodological Aspects of the Development of Low Temperature Physics 1881–1956*, Kluwer, Dordrecht (1989)
- [24] A. Griffin, *Physics World*, August 2008, S. 27
- [25] L. D. Landau, *Journal of Physics (Moskau)* **5**, 71 (1941)
- [26] L. P. Gorkov, in: L. N. Cooper und D. Feldman (Hrsg.) *BCS: 50 Years*. S. 107-126, World Scientific, Singapur (2011)
- [27] V. L. Ginzburg und L. D. Landau, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **20**, 1064 (1950)
- [28] J. Bardeen, L. N. Cooper und J. R. Schrieffer, *Phys. Rev.* **108**, 1175 (1957)
- [29] D. Vollhardt und P. Wölfle, *Physik Journal*, Januar 2008, S. 43
- [30] K.-H. Bennemann und J. B. Ketterson, in: *dies.* (Hrsg.) *Superconductivity. Conventional and Unconventional Superconductors 1*, S. 3, Springer, Berlin (2008)
- [31] D. N. Basov und A. V. Chubukov, *Nature Physics* **7**, 272 (2011)

## DIE AUTOREN

**Christian Joas** (FV Geschichte der Physik) promovierte 2007 an der FU Berlin mit einer theoretischen Arbeit über Quanten-Hall-Systeme. Anschließend wechselte er ans MPI für Wissenschaftsgeschichte. Seit 2009 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fritz-Haber-Institut im Rahmen eines großen interdisziplinären Projekts zur Geschichte der Quantenphysik ([www.quantumhistory.org](http://www.quantumhistory.org)).



**Georges Waysand** ist Gründer und Ehrendirektor des Laboratoire Souterrain à Bas Bruit in Rustrel-Pays d'Apt nahe Avignon (Frankreich), wo er magnetische Wechselwirkungen zwischen Erde und Ionosphäre untersucht. Den Großteil seiner Laufbahn beschäftigte er sich experimentell mit supraleitenden Materialien und der Konstruktion supraleitender Teilchendetektoren in Orsay und Paris. Gemeinsam mit Jean Matricon veröffentlichte er 1994 ein Buch zur Geschichte der Supraleitung (engl. 2003 [1]).

