Phänomen Supraleitung endlich verstanden?

Autor(en): **Weber, R.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **83 (1992)**

Heft 24

PDF erstellt am: **31.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-902908

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Phänomen Supraleitung endlich verstanden?

R. Weber

Ein echter Durchbruch im Verständnis der Supraleitung scheint geglückt: Das Modell des in der Schweiz lebenden holländischen Wissenschafters Laurens Jansen und seiner Mitarbeiter erklärt alle vier Arten von Supraleitern mit ein und demselben Ansatz. Die Übereinstimmung mit den Experimenten ist überzeugend. Allerdings: Supraleiter bei Zimmertemperatur, Voraussetzung für die breite, energiesparende Anwendung in der Elektrotechnik, kann es gemäss der neuen Theorie nicht geben.

Il semble qu'on ait vraiment réussi à comprendre le fonctionnement de la supraconductibilité. Le modèle de Laurens Jansen, scientifique hollandais résidant en Suisse, et de ses collaborateurs explique les quatre types de supraconductibilité avec la même formule mathématique. La concordance existant avec les expériences est convaincante. Selon la nouvelle théorie, il n'est cependant pas possible d'utiliser un supraconducteur à la température ambiante, ce qui serait pourtant la condition indispensable pour une large utilisation économisant de l'énergie.

Adresse des Autors
Dr. *Rudolf Weber*, Wissenschaftspublizist, Mayburger Kai, 122, A-5020 Salzburg.

Supraleitung ist zweifellos eines der faszinierendsten Phänomene in der Physik: Bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt von –273,10 °C bzw. 0 Kelvin (K) verschwindet bei vielen elektrisch leitenden Materialien der Widerstand sprunghaft, sie leiten den Strom verlustlos.

So attraktiv diese Erscheinung für die Elektrotechnik auch sein mag, die aufwendige Kühlung mit flüssigem Helium macht ihre breite Anwendung illusorisch. Seit allerdings 1986 die «Hochtemperatur-Supraleiter» entdeckt wurden, erlebt die Forschung in aller Welt einen ungeheuren Schub, denn Sprungtemperaturen bis 125 K – gegenüber höchstens 23 K zuvor – erlauben zum einen die ungleich weniger aufwendige Kühlung mit flüssigem Stickstoff, zum andern nähren sie die Hoffnung, Materialien mit Sprungtemperaturen bei Zimmertemperatur zu finden, die eine Kühlung gänzlich überflüssig machen würden.

Die Publizität, welche die Hochtemperatur-Supraleiter insbesondere durch die Verleihung des Physik-Nobelpreis 1986 an die beiden Entdecker, den Schweizer Alex Müller und den Deutschen Georg Bednorz, erfahren haben, hat das Phänomen auch zu einem öffentlichen Begriff gemacht.

Erfolglose Modelle

Die Supraleitung ist aber auch eine der rätselhaftesten Erscheinungen. Obzwar schon 1911 durch den Holländer Kamlingh-Onnes an Quecksilber bzw. Metallen entdeckt, haben Generationen von Physik-Theoretikern bis heute keine wirklich zufriedenstellende Modellvorstellung anbieten können. Von einer solchen muss man zumindest

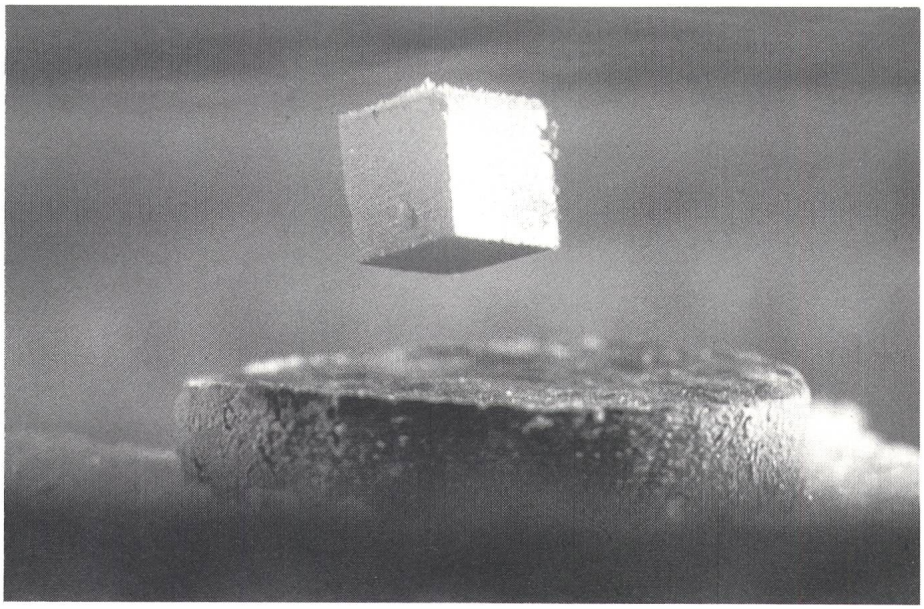


Bild 1 Das Phänomen Supraleitung, eindrucksvoll demonstriert mit dem Meissner-Effekt: Der kleine Magnetwürfel schwebt über dem supraleitenden Plättchen, weil er in diesem ein Magnetfeld induziert, das dem seinen entgegengesetzt ist. Photo IBM

eine Aussage darüber verlangen, ob ein bestimmtes Metall supraleitend ist und unterhalb welcher Temperatur.

Auch die anerkannt beste, 1957 geschaffene Theorie, nach ihren amerikanischen Vätern Bardeen, Cooper und Schrieffer als BCS-Theorie bekannt und 1972 mit dem Physik-Nobelpreis ausgezeichnet, ergibt allenfalls halbquantitative Aussagen. Ihr Kernstück ist die Vorstellung, dass die Elektronen, die ja in Metallen den Strom leiten, unterhalb der Sprungtemperatur Paare bilden, und dass diese Cooper-Paare sich ungestört von Schwingungen seines Gitters bzw. widerstandslos durch den Metallkristall bewegen.

Warum zwei elektrisch gleich (nämlich negativ) geladene und daher einander abstossende Elektronen sich paaren, also gegenseitig anziehen, erklärt die BCS-Theorie mit einer indirekten Wechselwirkung über die Gitterschwingungen.

Rein qualitativ macht das BCS-Modell verständlich, weshalb Supraleitung nur bei sehr tiefen Temperaturen auftritt: Die Kopplung durch die indirekte Wechselwirkung ist so schwach, dass die Gitterschwingungen, die ja mit der Temperatur bzw. dem Wärmeinhalt zunehmen und diesem gleichbedeutend sind, sie bereits bei geringer Erwärmung wieder aufheben.

Das Rätsel wurde noch rätselhafter, als man 1980 organische Supraleiter entdeckte, höchst komplexe chemische Verbindungen mit Schwefel oder Selen, deren Sprungtemperatur aber allenfalls 12 K beträgt. Für diese Supraleiter-Klasse vermochte die BCS-Theorie keinerlei quantitative Aussagen zu liefern, und statt Modellen gibt es allenfalls Vermutungen. Das gilt in noch stärkerem Masse für die Hochtemperatur-Supraleiter, über deren Erklärung sich seit 1986 ein Heer von Theoretikern den Kopf zerbricht.

Und vollends ratlos stehen die Theoretiker vor der 1991 gemachten Entdekkung, dass auch die als C-60, Buckminsterfullerene oder «Buckyballs» berühmt gewordenen «Fussballmoleküle» aus je 60 Kohlenstoffatomen supraleitend sind (mit Sprungtemperaturen bis zu 33 K), wenn man sie mit Alkalimetallen wie Kalium, Rubidium oder Cäsium dotiert.

Das Fehlen quantitativ brauchbarer Modelle wird nicht nur von vielen Wissenschaftlern, sondern auch schon von Forschungsmanagern und Experimentatoren als unerträglich bezeichnet, weil ohne ein gutes Modell eine gezielte Suche nach besseren Supraleitern nicht möglich ist.

Gemeinsamer Mechanismus?

Die vier bisher bekannten Arten von Supraleitern unterscheiden sich, was chemische Elemente und kristallinen bzw. molekularen Aufbau betrifft, grundlegend voneinander:

- erstens Metalle, in denen Metallatome Elektronen an das «Elektronengas» abgeben und dadurch zu Kationen werden, elektrisch positiv geladenen Atomen;
- zweitens schichtweise gestapelte, durch Metallkomplex-Anionen getrennte organische Kationen;
- drittens Hochtemperatur-Supraleiter in Gestalt von Keramiken, in deren Aufbau Schichten zum Beispiel von Kupfer-, Thallium- und Bariumatomen aufeinanderfolgen, zwischen die Sauerstoffatome eingelagert sind;
- und viertens die in einem dreidimensionalen Gitter angeordneten Kohlenstoff-Fussbälle.

Ist es da verwunderlich, dass viele Forscher einen jeweils anderen Supraleitungsmechanismus vermuten und entsprechend unterschiedliche (aber bisher eben erfolglose) Ansätze zur Erklärung verwenden?

Zu jenen Forschern, die trotz der Unterschiede zwischen den Supraleiterarten an einen weitgehend gemeinsamen Mechanismus glauben (schliesslich ist das Phänomen in allen vier Arten das selbe!), gehört Laurens Jansen. Der 1923 geborene Holländer erscheint von seiner Ausbildung und seinen Arbeitsgebieten her prädestiniert für den Versuch, Licht in das dunkle Gewirr aus physikalischen und chemischen Aspekten der Supraleiter zu bringen: Er studierte (in Utrecht und Leiden, wo 1911 die Supraleitung entdeckt worden war) sowohl Chemie wie Physik, bildete sich in Zürich bei Wolfgang Pauli in theoretischer Physik weiter und war zuletzt als Professor für theoretische Chemie an der Universität Amsterdam über die Wechselwirkung von Elektronen und Ionen in Festkörpern tätig.

Der Formalismus

Eine physikalische Theorie beschreibt eine Modellvorstellung in mathematischen Formeln. Formal setzt die «Theorie der diamagnetischen Einheiten» mit der Schrödingergleichung einerseits für zwei Leitungselektronen an, welche das Cooper-Paar bilden sollen, andererseits für die Elektronen des Systems der diamagnetischen Einheiten (eine Schrödingergleichung beschreibt die Quantennatur bzw. «Wellenfunktion» von Elektronen). Dann koppelt man die beiden Systeme unter Berücksichtigung von Überlappungen ihrer Wellenfunktionen. Nach mathematischen Umformungen ist das Ergebnis eine Gleichung, deren erster Term die direkte Wechselwirkung zwischen den beiden Elektronen des Cooper-Paares beschreibt, der zweite die indirekte über die diamagnetischen Einheiten. Ist die Summe der beiden Terme, die «Austauschkopplung», für ein bestimmtes Material positiv, kann Supraleitung nicht auftreten; ist sie negativ, ist Supraleitung möglich und die Austauschkopplung geht in den allgemeinen BCS-Formalismus ein, anstelle der üblichen Kopplung über Gitterschwingungen bzw. Phononen.

RBW

Konzept des «indirekten Austausches»

Auf diesem letzteren Gebiet formulierte er mit seinen Mitarbeitern Dr. Ruud Block aus Amsterdam und Prof. Erminio Lombardi aus Mailand in den 70er Jahren den «indirekten Austausch», um verschiedene Eigenschaften von Isolatoren besser erklären zu können. Indirekter Austausch bedeutet, dass Elektronen indirekt miteinander wechselwirken können, wenn sie sich in der Umgebung bestimmter Atome, Ionen oder Komplexe aufhalten.

1982 wandte Jansen zusammen mit Block und dem Deutschen Dr. Werner Schmidt das Modell auch auf metallische Supraleiter an. Sie behielten das BCS-Konzept der Cooper-Paare bei, ersetzten die indirekte BCS-Wechselwirkung zwischen den Leitungselektronen über Gitterschwingungen («Phononen») jedoch durch den indirekten Austausch. Trotz Übereinstimmung mit dem Experiment und Publikation in einer renommierten wissenschaftlichen Zeitschrift blieb dieser Ansatz ohne Beachtung in der Fachwelt.

Nachdem 1986 die Hochtemperatur-Supraleiter entdeckt worden waren, versuchte Jansen, zusammen mit Block, seinen Ansatz auch hier. Als Ionen, die den indirekten Austausch vermitteln, wählten sie den Sauerstoff, der in all diesen – mittlerweile über 100 – Keramiken enthalten ist. Es ergab sich, dass die indirekte Paarung zwischen Leitungselektronen nur unter gewissen, sehr scharf begrenzten Bedingungen stattfinden kann. Und wieder erwies sich die Übereinstimmung mit dem Experiment als erstaunlich, wieder erschien die Arbeit in einer bekannten Zeitschrift, wieder ohne grösseres Echo.

Inzwischen war Jansen aus Altersgründen emeritiert worden und hatte sich nach Küsnacht bei Zürich zurückgezogen. Als «aktiver Pensionist» setzte er seine Arbeiten am Institut für Theoretische Physik der ETH Zürich

Bild 2 Prof. Laurens Jansen zeigt anhand von Kurvenblättern, wie gut seine Theorie der Supraleitung in alkalidotierten C-60-Festkörper bzw. «Kohlenstoff-Fussballmolekülen» mit den Messbefunden übereinstimmt Photo Jansen

fort, wo er Gastrecht geniesst. Wenn er in den organischen Supraleitern die Schwefel- oder Selenatome für den indirekten Austausch verantwortlich machte, erhielt er wiederum Übereinstimmung.

Derart ermutigt wagte er sich 1991, kurz nach ihrer Entdeckung, auch an die dotierten Kohlenstoff-Fussbälle. Da er für Zusammenarbeit und Computer-Berechnungen Assistenz benötigte, gewährte ihm der Nationale Energie-Forschungs-Fonds (NEFF) der schweizerischen Energiewirtschaft finanzielle Beihilfe, um die junge indische Physikerin Dr. Leena Chandran beiziehen zu können. Im Sommer 1991 erwies sich Jansens Ansatz mit Cooper-Paaren und indirektem Austausch auch hier als zielführend, wobei anstelle von Ionen die 30 Kohlenstoff-Doppelbindungen im C-60-Molekül gewählt werden.

Übereinstimmung mit Experimenten

Das wesentliche Ergebnis der Arbeiten Jansens und seiner Mitarbeiter ist, dass sich die grundverschiedenen Arten von Supraleitern mit ein und demselben Modell beschreiben lassen. Cooper-Paare und indirekter Austausch über «diamagnetische Einheiten» sind bei allen Arten gleich, gleich auch im mathematischen Formalismus (siehe Kasten). «Diamagnetische Einheiten» nennen Jansen und seine Mitarbeiter, die den Austausch vermittelnden Ionen, Atome oder Kohlenstoff-Doppelbindungen, weil es sich in jedem der Fälle um eine Einheit mit abgeschlossener Elektronenhülle handelt – und solche Einheiten verhalten sich diamagnetisch, das heisst sie verstärken ein angelegtes Magnetfeld nicht. In metallischen Supraleitern sind es die Metall-Ionen, in organischen die chemisch gesättigten Schwefel- oder Selen-Ionen, in Hochtemperatur-Supraleitern die Sauerstoff-Anionen, und in den C-60-Strukturen die Kohlenstoff-Doppelbindungen.

Jede Theorie ist nur so gut wie ihre Übereinstimmung mit dem Experiment (und die Natur ist, wie Einstein einmal bemerkte, eine unerbittliche Richterin). Beispielsweise sagt ein experimenteller Befund, dass in alkalidotierten C-60-Festkörpern die Sprungtemperatur mit der Grösse des Alkaliatoms – gleichbedeutend mit wachsendem Abstand zwischen den C-60-Molekülen – zunimmt, und zwar von 19,3 K bei kaliumdotiertem C-60 (chemische Formel K_3C_{60}) bis 33 K bei C-60 mit Rubidium und Cäsium ($RbCs_2C_{60}$). Diesen Anstieg gibt das Modell präzise wieder.

Dass 33 K offenbar eine obere Grenze sind, hat nichts mit dem Kopplungsmechanismus zu tun, denn gemäss Modell würden noch grössere Atome zu noch höheren Sprungtemperaturen führen, und theoretisch wären sogar etwa 75 K erreichbar – aber so grosse, einfache Dotierungs-Ionen gibt es nicht. Doch Supraleiter bei Zimmertemperatur, davon gibt sich Jansen aufgrund seiner Theorie überzeugt, bleiben nach dem heutigen Stand der Erkenntnisse ausgeschlossen.

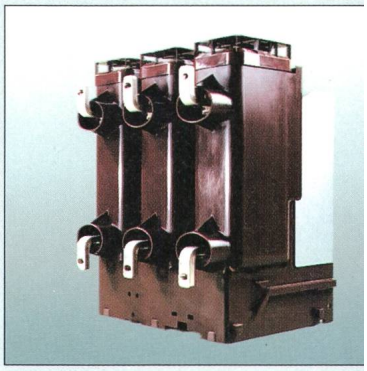
Im Herbst 1991 stellte Prof. Jansen das Modell auf einer Vortragsreihe durch die USA vor, und im Juli 1992 harrte ein zahlreiches Fachpublikum an der Universität Zürich eineinhalb Stunden bis zur letzten Folie aus – offenbar fasziniert von dem Modell und dem Bewusstwerden, dass im «Ringen um die richtige Theorie der Supraleitung», wie Jansen es ausdrückte, mit diesem Modell ein wesentlicher Fortschritt erzielt worden ist. Eines der grössten Rätsel der Physik erscheint dem Verständnis weitestgehend nahegebracht.

Leisten Sie sich Mittelspannungsanlagen mit der neuen Leistungsschalter-Generation HVTW 400

Jetzt ist die neue Vakuum-Leistungsschalter-Generation HVTW 400, ausgerüstet mit Primär-Relais MU/MT/MUT oder für Sekundär-Schutzrelais RN1, in der technisch ausgereiften Mittelspannungs-Anlagenreihe vom Typ PA und PN erhältlich.

Die Leistungsschalter HVTW 400, für 12 bis 24 kV, verkörpern in den metallgekapselten, typengeprüften Anlagen modernste Stromverteilungstechnik.

Verlangen Sie unverbindlich Unterlagen.



SPRECHER ENERGIE AG
Mittelspannungsanlagen
CH-5034 Suhr
Telefon: 064/33 77 33
Fax: 064/33 77 35

SPRECHER ENERGIE