



Im Sommer 1911 wurde ein kleines Metallröhrchen mit einer Füllung aus hochreinem Quecksilber auf eine unglaubliche Reise geschickt: in die Region tiefster Temperaturen. Eigentlich bedeutet Reisen ja Bewegung, doch das Röhrchen befand sich in einem Isoliergefäß, und dort auf dem Weg zum Kältepol würden sogar die allgegenwärtigen Wärmebewegungen von Atomen allmählich einfrieren.

Als das Quecksilber im Röhrchen auf 4,19 Kelvin abgekühlt war, passierte etwas völlig Unerwartetes: Plötzlich verschwand sein elektrischer Widerstand. Anfangs trauten die Physiker diesem Messergebnis nicht so recht. Doch weitere sorgfältige Experimente räumten ihre Zweifel aus: Sie hatten tatsächlich ein neues physikalisches Phänomen entdeckt. Heike Kamerlingh Onnes taufte es „Supraleitung“. Die Leidener entdeckten

Widerstand zwecklos – Supraleiter auf dem Sprung zu höheren Temperaturen

Die Reise fand in einem Labor im niederländischen Leiden statt – damals das Mekka der noch jungen Tieftemperaturphysik. Sein Leiter Heike Kamerlingh Onnes hatte kurz zuvor ein internationales Wettrennen spektakulär gewonnen: Dem Leidener gelang 1908 die erste Verflüssigung des Edelgases Helium. Dazu mussten er und seine Mitarbeiter mit ihrer Apparatur eine Temperatur von 4,2 Kelvin erreichen! Noch nie zuvor waren Menschen dem absoluten Nullpunkt (Null Kelvin oder -273,16 Grad Celsius) so nahe gekommen. Das machte Kamerlingh Onnes weltberühmt.

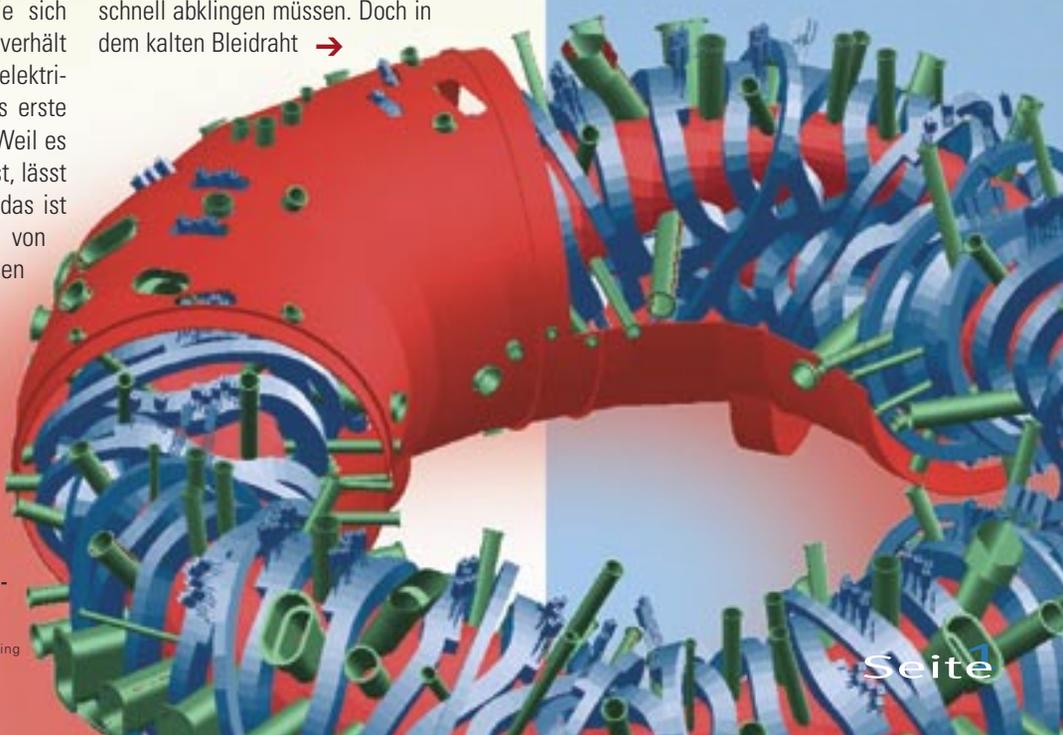
Drei Jahre später war die Reise zum Kältepol für die Leidener „Frigonauten“ zur Routine geworden. Nun erforschten sie, wie sich Materie bei sinkender Temperatur verhält – zum Beispiel, wie Metalle ihren elektrischen Widerstand verändern. Für das erste Experiment wählten sie Quecksilber. Weil es schon bei Zimmertemperatur flüssig ist, lässt es sich relativ leicht reinigen – und das ist wichtig, denn selbst geringe Spuren von Fremdmaterial hätten die Messungen verfälschen können.

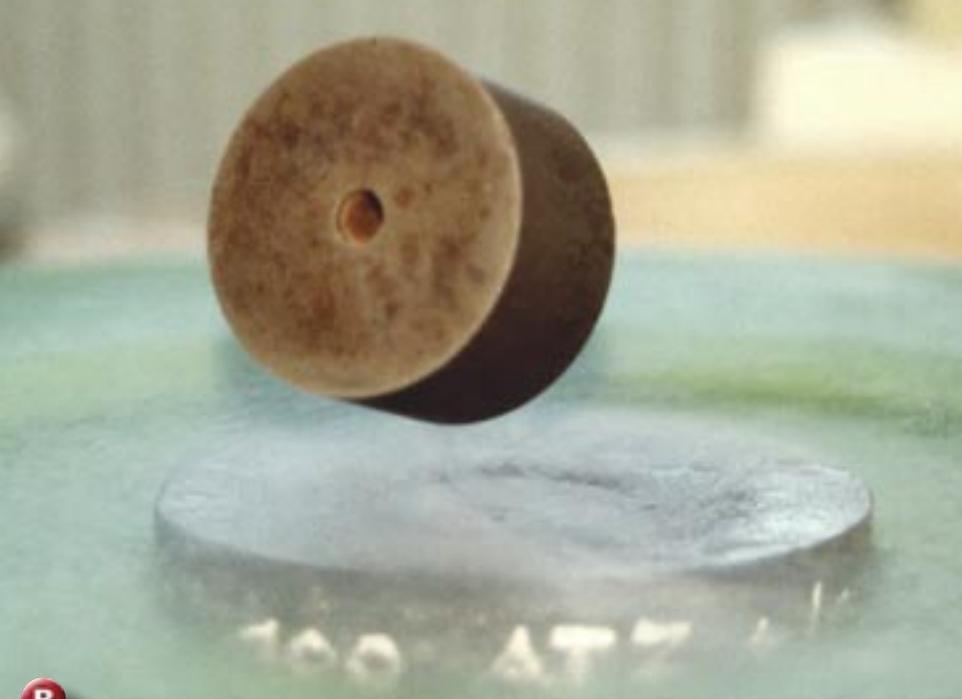
weitere Supraleiter wie das Blei. Andere Metalle blieben dagegen auch bei tiefsten Temperaturen elektrisch normal leitend.

Nur langsam dämmerte es der Physiker-Gemeinde, wie bedeutend diese Entdeckung war. 1913 erhielt Kamerlingh Onnes für seine „kalten“ Pionierarbeiten den Nobelpreis für Physik – nicht aber für die Entdeckung der Supraleitung. Ein Jahr später gelang ihm ein Experiment, das tiefere Einblicke in das Phänomen der Supraleitung gewährte. In einer Spule aus supraleitendem Blei startete Kamerlingh Onnes einen Ringstrom und schaltete die Batterie ab. Nun hätte der Strom selbst in einem sehr guten elektrischen Leiter schnell abklingen müssen. Doch in dem kalten Bleidraht →

A

► Im Vakuumgefäß einer Fusionsanlage (innere rote Kontur) muss ein starkes Magnetfeld das 100 Millionen Grad heiße Plasma zusammenhalten. Das Experiment Wendelstein 7-X, das gerade in Greifswald am MPI für Plasmaphysik entsteht, benutzt dazu siebzig supraleitende Spulen (blau).





© Foto: Siemens

B

▲ Dieses Stück Hochtemperatur-Supraleiter wurde mit flüssigem Stickstoff gekühlt: Jetzt schwebt es „eigenstabil“ über einem Permanentmagneten.

→ kreiste er unbeirrt weiter, ohne messbar schwächer zu werden.

22 Jahre später hatten Fritz Walther Meißner und sein Mitarbeiter Robert Ochsenfeld endlich ihren Traum verwirklicht. Ihr Tieftemperaturlabor an der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in Berlin war nun weltweit das dritte, das nennenswerte Mengen an flüssigem Helium herstellen konnte. Damit konnten die beiden Physiker etwas völlig Neues ausprobieren. Sie kühlten ihre Supraleiter in einem Magnetfeld ab – und erhielten ein verblüffendes Ergebnis: Sobald ihre Probe supraleitend wurde, drängte sie das Magnetfeld geradezu aus ihrem Inneren heraus.

Dieser **Meißner-Effekt** ist so charakteristisch für die Supraleitung wie der verschwindende elektrische Widerstand. Er kann einen kalten Supraleiter über einem Permanentmagneten schweben lassen wie auf einem unsichtbaren Kissen (**Abb. B**). Dieses „eigenstabile“ Schweben ist einzigartig und nur mit Supraleitern möglich. Ein Transrapid zum Beispiel schwebt instabil über seiner Schiene. Er setzt nur deshalb nicht auf, weil ihn eine ausgefeilte Regelungstechnik permanent ausbalanciert (in Japan gibt es allerdings schon einen Prototypen, der Supraleitung zum Schweben nutzt). Die Physiker fanden auch schnell heraus, wie sie den Meißner-Effekt erklären konnten: Wenn ein Magnetfeld in einen Supraleiter eindringen will, wirft es nach dem **Faraday-Effekt** an seiner Oberfläche elektrische Ströme an. Diese Ströme laufen um den Supraleiter herum und klingen ohne Störung nicht mehr ab – wie Kamerlingh Onnes' permanenter Ringstrom. So schirmen sie wie ein Schutzschild das Innere des Supraleiters gegen das Magnetfeld ab.

WETTKAMPF UM KÄLTEREKORDE

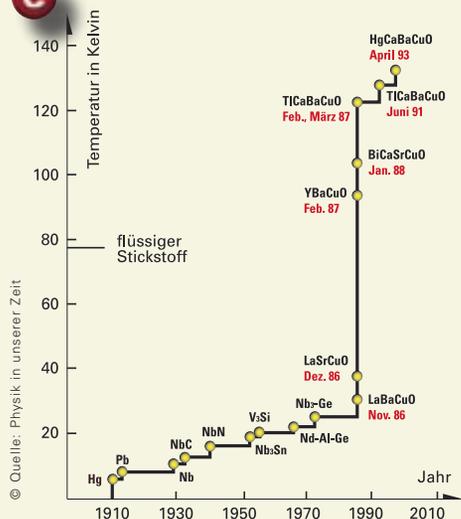
Bei diesem faszinierenden Phänomen drängt sich der Gedanke an eine technische Nutzung geradezu auf. Schon Kamerlingh Onnes hatte die Vision, dass supraleitende Kabel elektrischen Strom ohne Verluste über Hunderte von Kilometern transportieren könnten. Doch der Pionier wurde schnell enttäuscht. Alle damals bekannten Supraleiter verloren ihre wunderbare Fähigkeit schon in desillu-

sionierend schwachen Magnetfeldern; von den Magnetfeldern, die die Starkströme der Energietechnik durch ihr Fließen erzeugen, ganz zu schweigen. Zu diesem grundlegenden Problem kam noch ein weiteres: Flüssiges Helium erfordert eine extrem teure und aufwändige Kältetechnik. Trotz intensiver Suche konnten die Forscher lange kein Material finden, das bei nennenswert höheren Temperaturen supraleitend wird. Bis 1986 hielt die Niob-Germanium-Verbindung Nb₃Ge den Rekord – mit mickrigen 23 Kelvin. In den 1950er-Jahren entdeckten Forscher Metalllegierungen, die auch in starken Magnetfeldern supraleitend blieben. Diese „Typ-II-Supraleiter“ öffneten das Fenster zur technischen Anwendung. Drähte und Spulen aus ihnen wurden zum Laborstandard. Doch der Weg aus dem Labor heraus in eine breitere technische Anwendung scheiterte an der immer noch nötigen Ultrakälte.

Die nächste Revolution bahnte sich im Stillen an. Im Züricher IBM-Forschungslaboratorium starteten Alex Müller und Johann Georg Bednorz Anfang der 1980er-Jahre ein ungewöhnliches Forschungsprogramm. Sie untersuchten die Oxide verschiedener Metalle auf mögliche Supraleitung. Das war ziemlich unkonventionell, weil solche keramischen Oxide bei Zimmertemperatur allenfalls nur sehr schwach elektrisch leiten – wenn überhaupt. Doch die beiden hatten den richtigen Riecher. 1986 wurde ein Oxid aus Barium, Lanthan und Kupfer bei sensationellen 35 Kelvin supraleitend. Sehr schnell zeichnete sich ab, dass Müller und Bednorz eine völlig neue Klasse von **Hochtemperatur-Supraleitern** entdeckt hatten. Bereits im Jahr darauf erhielten sie dafür den Nobelpreis in Physik.

Dieser unerwartete Fund löste weltweit eine fieberhafte Suche nach neuen Supraleitern aus. Die Temperaturrekorde purzelten nur so; Zeitungen und TV-Nachrichten meldeten sie schon wie Sportergebnisse (**Abb. C**). Am 16. März 1987 trafen sich die führenden Tieftemperaturphysiker in New York zu einer Konferenz, die später als „Woodstock der Physik“ legendär wurde. „Physik-Olympiade“ wäre allerdings zutreffender, denn Paul Chu bestieg dort mit einer fantastischen Leistung das Siegertreppchen: sagenhafte 92 Kelvin hatte seine Gruppe von der Universität Houston mit einer Verbindung aus Yttrium, Barium und Kupferoxid erreicht. Heute hat HgBa₂Ca₂Cu₃O₈ den Rekord auf 132 Kelvin hoch geschraubt. Diese Verbindung wird

C



▲ Ab 1986 ließen die neuen Hochtemperatur-Supraleiter die Rekorde purzeln.

unter hohem Druck sogar schon bei 164 Kelvin supraleitend. Die Hochtemperatur-Supraleiter hatten also endlich eine entscheidende Hürde für technische Anwendungen überschritten. Sie benötigten zur Kühlung nur noch Stickstoff, der bei 77 Kelvin flüssig wird. Er ist um den Faktor 100 billiger und viel besser zu handhaben als flüssiges Helium. Zudem erwiesen sich die keramischen Supraleiter als unempfindlich gegen starke Magnetfelder.

Doch der Euphorie folgte abermals Ernüchterung. Die neuen Hochtemperatur-Supraleiter waren ein sprödes Material, und die üblichen Herstellungsverfahren produzierten ein Konglomerat aus vielen feinen Körnchen. Das ließ sich nur schwer zu flexiblen Kabeln verarbeiten. Außerdem offenbarten die neuen Supraleiter eine weitere Eigenheit: Die Körnchen leiten hohe elektrische Ströme nur in zwei Dimensionen verlustfrei, in der dritten jedoch nicht. Also muss der Strom in einem Kabel nicht nur von Körnchen zu Körnchen „springen“, sondern in jedem auch noch eine andere Richtung einschlagen. Dieser Hindernislauf drohte die Vorteile der Supraleitung wieder aufzufressen. Rund zwei Jahrzehnte nach der Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleiter hat die Industrie die wesentlichen Materialprobleme jedoch überwunden. Heute steht die Chance sehr gut, dass die Supraleitung zur Alltagstechnik wird. In Kopenhagen beweist das schon ein Pilotprojekt der Europäischen Union: Dort versorgt ein Stromnetz, das streckenweise supraleitende Kabel verwendet, bereits 50.000 Haushalte. Nächstes Jahr soll ein ähnliches Netz auf Long Island 300.000 New Yorker Haushalte bedienen.

ELEKTRONENPÄRCHEN AUF WEICHER MATRATZE

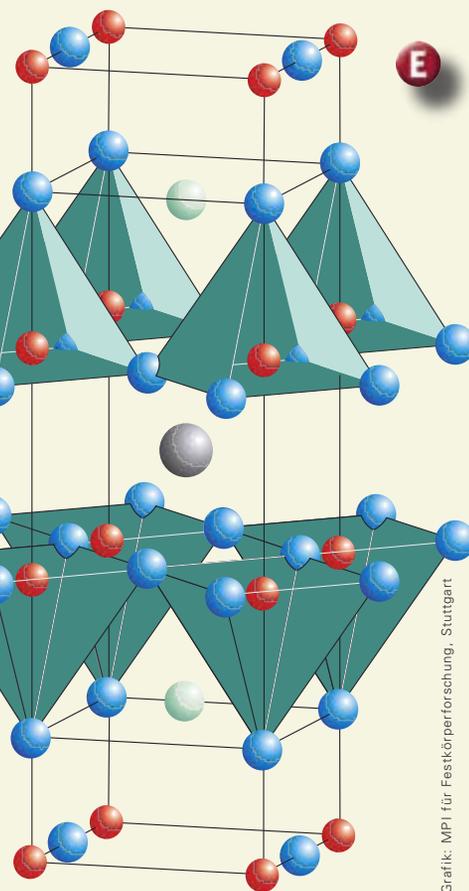
Das Phänomen der klassischen oder konventionellen Supraleiter lässt sich mit der von John Bardeen, Leon Cooper und Robert Schrieffer 1957 aufgestellten **BCS-Theorie** schlüssig erklären. Dafür erhielten die drei US-Amerikaner von der University of Illinois in Urbana 1972 den Nobelpreis in Physik. Es handelt sich dabei um ein raffiniertes, kollektives Zusammenspiel zwischen Elektronen und Atomen.

Jede Form von elektrischer Leitung beruht auf einer Eigenschaft von Metallen, die man ihnen gar nicht ansieht: Sie bestehen aus winzigen Kristallen. In den Kristallen haben sich die Atome zu einem regelmäßigen

► **Aufbau des Kristallgitters des wichtigen Hochtemperatur-Supraleiters $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. Die Kupfer-Atome sind rot dargestellt, Sauerstoff blau, Yttrium schwarz, Barium grün. Auf den CuO_2 -Ebenen fließen die Supraströme.**

räumlichen Gitter zusammengeschlossen. Wie bei den Molekülen sorgen die Elektronen für den Kitt zwischen den Atomen. Bei Metallen bleiben dabei allerdings einige Elektronen übrig. Diese können sich von den Atomen lösen, relativ frei durch das **Kristallgitter** flitzen und so elektrische Ströme transportieren. In einem normal leitenden Metall stoßen sie allerdings unterwegs auf verschiedene Hindernisse, die den elektrischen Widerstand verursachen. Eines davon sind die anderen Elektronen, denn als elektrisch gleich geladene Teilchen stoßen sie sich stark voneinander ab. Für weitere Hindernisse sorgen alle Abweichungen von der idealen Ordnung im Kristallgitter. Dazu zählen Kristallfehler, aber auch die permanente Wärmebewegung der Atome, die ständig um ihre Ruheposition im Gitter herumwackeln.

Dieses thermische Schwingen der Atome wird allerdings bei klassischen Supraleitern vom Störfaktor zur entscheidenden Zutat. Bei tiefen Temperaturen schwingen die Atome immer langsamer. Das Kristallgitter nimmt die Elektronen nun auf wie ein weiches französisches Bett zwei Menschen: Die beiden rollen unweigerlich in einer gemeinsamen Kuhle zusammen (**Abb. D**). Auf ähnliche Weise binden die weichen Gitterschwingungen immer zwei Elektronen



© Grafik: MPI für Festkörperforschung, Stuttgart

zu einem Paar zusammen, obwohl sich die beiden eigentlich stark abstoßen. Dass diese Elektronen-Paare charakteristisch für die Supraleitung sind, haben die Physiker jahrzehntelang nicht erkannt. Auch Bardeen, Cooper und Schrieffer verzweifelten Mitte der 1950er-Jahre zunächst daran. Bis Leon Cooper eines Tages in eine überfüllte U-Bahn geriet. Als er die Menschen um sich herum beobachtete, kam ihm die zündende Idee von →

D WAS PASSIERT BEIM ÜBERGANG ZUR SUPRALEITUNG?

▲ Nach der „BCS-Theorie“ bilden je zwei freie Elektronen ein „Cooper-Paar“. Diese Cooper-Paare sorgen zusammen für den verlustfreien Stromtransport. Allerdings muss die Paarbindung zuerst die starke Gegenkraft überwinden, mit der sich die beiden Elektronen mit ihrer negativen elektrischen Ladung voneinander abstoßen. Bei klassischen Supraleitern sorgt dafür das räumliche Kristallgitter aus den positiv geladenen Atomen, die nach Abgabe der freien Elektronen übrig sind. Es schwingt bei den tiefen Temperaturen sehr langsam. Dabei wirkt es wie eine

weiche Matratze, auf der das Paar in einer Kuhle zusammenrollt. Auch die Hochtemperatur-Supraleitung basiert auf Cooper-Paaren, doch wegen der hohen Temperaturen scheidet der klassische „Matratzenmechanismus“ der BCS-Theorie aus. Wie die Cooper-Paare dort entstehen, ist bis heute nicht geklärt. Ein Hauptverdächtiger sind die „Spin-Anregungen“ der Elektronen, über die sie sich wie winzige Magnetnadeln gegenseitig beeinflussen können. Im komplexen Zusammenspiel mit dem Kristallgitter könnten so die Paare entstehen.

© www.haekelmarkt.de

→ den Elektronenpärchen. Deswegen heißen sie „Cooper-Paare“. Aber warum sind sie so wichtig?

In der merkwürdigen Welt der Quantentheorie gibt es zwei Sorten von Teilchen, die sich gegensätzlich verhalten: **Fermionen** und **Bosonen**. Ein Fermion ist gewissermaßen ein extremer Individualist, denn es duldet kein zweites Fermion im gleichen Quantenzustand. Bosonen sind dagegen besonders gesellig. Haben sich schon viele in einem Quantenzustand versammelt, dann drängen noch mehr dazu. In einem normal leitenden Metall sind alle Elektronen Fermionen. Sie verhalten sich wie Autofahrer, die alle unbedingt allein im eigenen Auto einkaufen fahren wollen. Das Kristallgitter ähnelt einem Parkplatz vor dem Supermarkt, der nur eine begrenzte Anzahl von Stellplätzen bietet. Diese Zahl entspricht zwar – anders als im wahren Leben – exakt der Anzahl der Elektronen. Aber jeder neu eintreffende Kunde muss ziemlich suchen, bis er endlich einen freien Platz für sein Auto findet. Das sorgt für Reibung im Ablauf.

Die Cooper-Paare verhalten sich dagegen wie Bosonen: Sie sind extrem sozial. Sie tun sich zu einer Fahrgemeinschaft zusammen und steigen alle in ein einziges Auto ein (weil sie punktförmig sind, passen sie locker alle hinein). So brauchen sie zusammen nur noch einen einzigen Parkplatz. Mehr noch: In ihrer Fahrgemeinschaft reagieren sie auf alle Einflüsse als Einheit. Das hat zur Folge, dass die Cooper-Paare wie eine zusammenhängende Wolke völlig reibungslos durch das Kristallgitter flutschen können.

FLIPFLOP VON MINIMAGNETEN

„In einem Supraleiter reagieren also alle Leitungselektronen in einem Kollektiv“, erklärt Bernhard Keimer. Er ist Direktor am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart und forscht mit seinem Team an Hochtemperatur-Supraleitern. Gerade diese fantastischen neuen Supraleiter bescherten Kamerlingh Onnes' Erben ein neues Problem: Die bewährte BCS-Theorie versagt bei ihnen. Wegen der hohen Temperaturen scheidet die weich werdende Kristallgitter-Matratze als Kupplerin für die Cooper-Paare aus. Dafür wäre die thermische Bewegung der Atome zu heftig. Die Physiker haben aber beobachtet, dass die Elektronen auch in den Hochtemperatur-Supraleitern Cooper-Paare bilden. Es muss also einen anderen Mechanismus geben, der sie zusammenbringt.

HOCHTEMPERATUR-SUPRALEITER SELBST GEMACHT

In einem gut ausgerüsteten Schullabor kann man eine „Tablette“ aus $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ selbst herstellen. Das folgende Rezept beruht auf einer Arbeit für „jugend forscht“, die Schüler des Erasmus-Reinhold-Gymnasiums in Gornsdorf 1997 gemacht haben.

Die Ausgangsstoffe 0,565g Y_2O_3 , 1,97g BaCO_3 und 1,19g CuO werden im trockenen Zustand 30 Minuten mit einem Spatel gemischt. Dabei bitte beachten, dass BaCO_3 giftig ist (Handschuhe, Schutzbrille und Mundschutz tragen!). Das Gemisch wird in einen Hohlzylinder mit der Länge und dem Innendurchmesser von 2,5 cm gefüllt. Ein passgenaues Metallstück wird in den Hohlraum des Zylinders gedrückt und dann das Pulver in einem Schraubstock zur Tablette gepresst. Die Tablette wird mit dieser Technik nicht sehr fest. Um ein Auseinanderfallen der Tablette zu vermeiden, kann man daher das Pulver vorher mit einem Leim versetzen, der allerdings im nachfolgenden Brennvorgang abbrennen muss, ohne die chemische Zusammensetzung des Supraleiters zu verändern. Al-

ternativ lässt sich die Tablette ganz am Schluss mit einem Lacküberzug stabilisieren.

In einem Keramikofen wird sie dann innerhalb von 45 Minuten auf 930°C erhitzt und in den folgenden 12 Stunden konstant auf dieser Temperatur gehalten. Der Brennofen sollte nicht luftdicht abschließen, ansonsten wird eine zusätzliche Sauerstoffzufuhr benötigt. Nach dem Sintern wird die Probe weitere 12 Stunden lang schrittweise wieder auf Zimmertemperatur abgekühlt. Das Abkühlen darf nicht zu schnell erfolgen, da sonst kein supraleitendes Material entsteht. Wenn alles geklappt hat, wird die Tablette unterhalb etwa 92 Kelvin supraleitend. Das reicht, um mit flüssigem Stickstoff und einem Dauermagneten den Meißner-Effekt zu demonstrieren.

Weitere Beschreibungen zur Herstellung von Hochtemperatur-Supraleitern für Schulzwecke finden sich zum Beispiel auf: venus.physik.uni-wuppertal.de/biophys/levi.html (Kurzanleitung) oder www.futurescience.com/scpart1.html (in Englisch, sehr detailliert)

Hochtemperatur-Supraleiter haben ein viel komplexeres Kristallgitter als Metalle. Sie bestehen aus mindestens vier Elementen, zum Beispiel Yttrium, Barium, Kupfer und Sauerstoff. Ihre Kristallgitter sind wie ein Sandwich aus verschiedenen Schichten aufgebaut, und diese Sandwiches sind wiederum aufeinander gestapelt. In jedem Sandwich steckt mindestens eine Ebene aus Kupferoxid (**Abb. E**). Die Forscher entdeckten schon bald, dass der Suprastrom entlang dieser praktisch zweidimensionalen Schicht fließt. Aber was erzeugt ausgerechnet in ihr die Cooper-Paare?

Die Stuttgarter Physiker haben einen Hauptverdächtigen im Visier: den **Magnetismus**. Elektronen haben einen so genannten Spin, der sie zu winzigen Magneten macht. In magnetischen Materialien drehen sich viele Spins in dieselbe Richtung. So bilden sie zusammen ein kräftiges „magnetisches Moment“. Diesen „Ferromagnetismus“ kennt jeder von eisernen Magneten. In manchen Materialien ordnen sich die Spins auch so, dass sich ihre magnetischen Momente in der Summe gerade aufheben: Zeigt ein **Elektronenspin** in eine Richtung, dann klappt sein nächster Nachbar in die exakt entgegengesetzte Richtung und so weiter. Diesen „Antiferromagnetismus“ hat Keimers Team in den Kupferoxid-Ebenen von Hochtemperatur-Supraleitern beobachten können. Allerdings existiert er dort nicht als feste Ordnung – er fluktuiert, weil die Elektronenspins ständig in

Bewegung sind. Die Spinfluktuationen schaffen die richtige Umgebung für die Entstehung der Cooper-Paare, vermutet Keimer. Der Max-Planck-Forscher ist optimistisch, dass die Physiker bald genauer verstehen, wie die Hochtemperatur-Supraleitung funktioniert. Das Knacken dieser Nuss wäre sicher einen Nobelpreis wert.

Fast unbemerkt dringt das faszinierende Phänomen Supraleitung mittlerweile in die Alltagstechnik ein: High-Tech-Firmen entwickeln schon Kabel, Magnete, Transformatoren, Elektromotoren, Generatoren oder Magnetlager aus Hochtemperatur-Supraleitern. Die Chancen stehen nicht schlecht, dass Heike Kamerlingh Onnes' coole Vision im 21. Jahrhundert wahr wird.

Schlagwörter: Meißner-Effekt, Elektronenspin, Faraday-Effekt, Hochtemperatur-Supraleiter, BCS-Theorie, Kristallgitter, Cooper-Paare, Fermionen, Bosonen, Magnetismus, Supraleitung

Lesetipp: Tom Shachtman, Minusgrade – Auf der Suche nach dem absoluten Nullpunkt, Rowohlt Tb., 2001

Internet: <http://www.weltderphysik.de/themen/stoffe/phaenomene/supraleitung/>

DIE „MAX“-REIHE

auch unter www.max-wissen.de – der Link zur Forschung für Schüler und Lehrer

Hier finden Sie Hintergrundinformationen und didaktisches Material zu den jeweils zweimal im Jahr erscheinenden Ausgaben von BIOMAX, GEOMAX und TECHMAX. Weitere Exemplare können Sie kostenlos bestellen bei: