

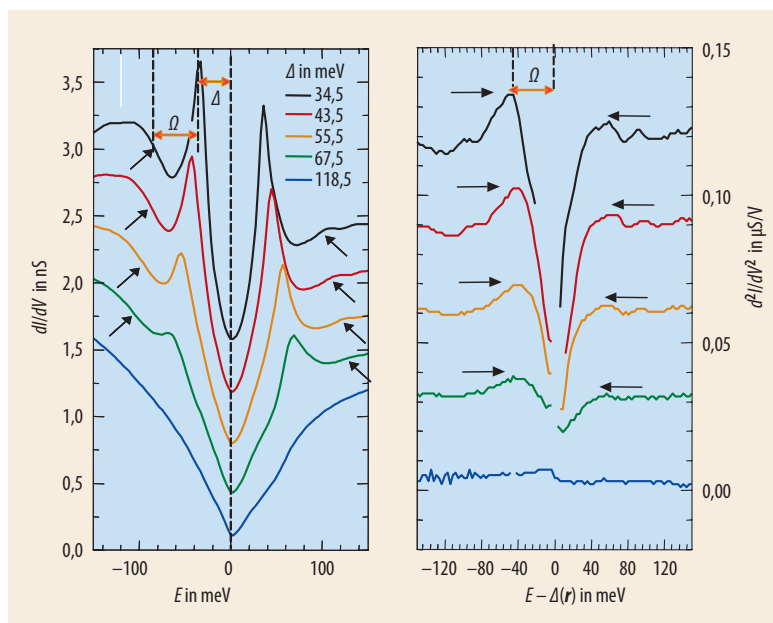
„Klebstoff“ für die Supraleitung

Sind Gitterschwingungen für die Paarbildung in Hochtemperatur-Supraleitern verantwortlich? Ob neue Ergebnisse zu dieser Frage als universell oder als materialspezifisch einzuordnen sind, wird kontrovers diskutiert.

In konventionellen Supraleitern, z. B. Blei, bilden Leitungselektronen unterhalb einer gewissen Temperatur Paare, die in einen Zustand kondensieren, in dem sie sich ohne Widerstand durch den Supraleiter bewegen können. Wie J. Bardeen, L. N. Cooper und J. R. Schrieffer 1957 in der später nach ihnen benannten BCS-Theorie beschrieben, kommt diese Paarung über Anregungen von Gitterschwingungen (Phononen) zustande. Für die von J. G. Bednorz und K. A. Müller entdeckten Hochtemperatur-Supraleiter (HTSL) existiert dagegen trotz 20-jähriger intensiver Forschung und großer Fortschritte noch immer keine allgemein akzeptierte Theorie. Diskutiert wird, ob hier ein völlig neuer Zustand der Materie auftritt oder, da auch hier eine Paarbildung beobachtet wurde, ein BCS-artiger Zustand. In diesem Fall wäre die entscheidende Frage, welcher „Klebstoff“ die Paarung verursacht, oder anders ausgedrückt, welche bosonischen Anregungen zur Paarung im supraleitenden Zustand führen [1].

Eine Schulter als Indiz

In einer bahnbrechenden Arbeit zu den konventionellen Supraleitern gelang es McMillan und Rowell, die charakteristischen Strukturen in Tunnelspektren an Blei durch Phononen-Anregungen zu erklären und damit den Beweis zu erbringen, dass die Paarung in diesen Supraleitern wirklich durch Phononen zustande kommt [2]. Kürzlich erzielte Ergebnisse von amerikanischen und japanischen Physikern deuten nun darauf hin, dass auch in HTSL ein Wechselspiel zwischen der Supraleitung und den Gitterschwingungen vorliegt [3]. Seamus Davies von der Cornell University und seine Kollegen haben dazu $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mithilfe der Rastertunnelspektroskopie (Scanning Tunneling Spectroscopy,



Typische, an verschiedenen Orten der Oberfläche gemessene Tunnelspektren von $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ weisen scharfe Maxima in der ersten Ableitung des Tunnelstroms (dI/dV , links) für positive und negative Spannungen auf, die mit der ortsabhängigen Energielücke Δ der Supraleitung zu erklären sind. Diese hängt

von der lokalen Dotierungskonzentration ab und bewegt sich zwischen 35 und 118 meV. Darüber hinaus existiert bei einer Energie $\Omega + \Delta$ eine Schulter (Pfeile), die dem Wendepunkt in dI/dV bzw. den Maxima in der zweiten Ableitung (d^2I/dV^2 , rechts) entspricht und von einer bosonischen Anregung herrührt. Diese hängt

STs) untersucht. Dabei zeigte sich eine Schulter im Spektrum, die auf eine bosonische Anregung zurückzuführen ist (Abb.). Die Energie $\Omega(r)$ dieser Anregung hängt nur wenig von der lokalen Dotierung ab und beträgt im Mittel 52 meV. Wird in dem Supraleiter das Sauerstoffisotop ^{16}O durch das Isotop ^{18}O ersetzt, so verschiebt sich diese Schulter zu kleineren Energien hin. Dieser Isotopeneffekt legt die Zuordnung dieser Schulter zu einer Gitterschwingungsmode nahe, da deren Frequenz von der Masse des schwingenden Sauerstoffatoms abhängt. Darüber hinaus haben die Autoren eine deutliche örtliche Korrelation zwischen der ortsabhängigen Energielücke der Supraleitung $\Delta(r)$ und $\Omega(r)$ beobachtet. Eine solche Korrelation würde unmittelbar folgen, wenn die Gitterschwingung direkt an die Elektronen in den die Supraleitung

tragenden CuO_2 -Ebenen ankoppelt und falls diese Kopplung für die Paarung verantwortlich ist. In diesem Fall wäre das STS-Experiment als „universell“ und nicht „materialspezifisch“ zu betrachten.

Teilweise unterstützt werden diese Ergebnisse durch Untersuchungen von HTSL mittels winkelaufgelöster Photoemissionsspektroskopie (ARPES). Auch diese Methode erlaubt es, die Kopplung von Ladungsträgern an bosonische Anregungen zu vermessen, aber nicht orts-, sondern impuls aufgelöst. Eine solche Kopplung an eine bosonische Mode, allerdings bei einer Energie von 40 meV, wurde interpretiert als eine Kopplung an eine Schwingung der Sauerstoffatome der CuO_2 -Ebene senkrecht zur Ebene (B_{1g} -Phononen-Mode) [4]. Ein ebenfalls mit ARPES beobachteter Isotopeneffekt, allerdings bei höheren Energien, wurde mithilfe einer

1) δ steht hier für einen gegenüber dem stöchiometrischen Verhältnis geringen Sauerstoffüberschuss. Diese Dotierung ist räumlich variabel.

ungewöhnliche Elektron-Phonon-Kopplung gedeutet [5].

Alles dies könnte darauf hinweisen, dass die Hochtemperatur-Supraleitung durch eine Kopplung an Gitterschwingungen zustande kommt. Somit wäre deren Mechanismus geklärt. Dem ist aber keineswegs so, denn die STS-Messungen lassen sich auch „materialspezifisch“ erklären. Dazu wird der Tatsache Rechnung getragen, dass der Pfad, den das Elektron im Tunnelprozess von der supraleitenden CuO_2 -Ebene zur Tunnelspitze zurücklegt, durch eine materialabhängige Barriere verläuft, d. h. durch eine weitere Oxid-Schicht des HTSL. Dabei tritt, induziert durch die schwingenden O-Atome der Barriere, ein zusätzlicher unelastischer Tunnelprozess auf. Entsprechende Rechnungen zeigen Strukturen (sog. Phononen-Satelliten) ähnlich zu den gemessenen [6]. Trifft diese Erklärung zu, dann spiegelt das vieldiskutierte Experiment „materialspezifische“ Aspekte wider, und der „universelle“ Supraleitungs-Mechanismus könnte elektronischer oder magnetischer Natur sein [7]. Auch für die mit ARPES beobachtete Kopplung an eine 40-meV-Mode gibt es eine alternative Deutung: Der Charakter der Mode und ihre Energie entsprechen demnach einer magnetischen Anregung in einem stark korrelierten System mit Spin-Fluktuationen [8].

Kontroverse Diskussionen

Während der „8th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High-Temperature Superconductors“, die im Juli in Dresden stattfand, wurden die Ergebnisse von Seamus Davis kontrovers diskutiert. Die Arbeitsgruppe von Ali Yadzdani in Princeton präsentierte ähnliche temperaturabhängige STS-Messungen, die erstaunlicherweise zeigen, dass die Schulter auf der positiven Spannungsseite bei höheren Temperaturen verschwindet. Dan Dessau, Boulder, berichtete, dass es ihm nicht gelungen ist, den oben geschilderten Isotopen-Effekt in ARPES-Mes-

sungen bei höheren Energien zu reproduzieren. Schließlich wurde in zahlreichen theoretischen und experimentellen Beiträgen eine magnetische Erklärung für die beobachtete starke Renormierung der elektronischen Struktur in der Nähe des Fermi-Niveaus favorisiert. Insbesondere zeigen erste Ergebnisse einer Zusammenarbeit von Gruppen aus Tübingen, Stuttgart, Dresden, Würzburg und Santa Barbara, die Sergey Borisenko (Dresden) vorgestellt hat, dass sich die durch ARPES gemessenen charakteristischen Strukturen („kinks“) durch Ankopplung der Elektronen an Spin-Anregungen erklären lassen. Letztere wurden ebenfalls direkt aus dem Experiment, nämlich unelastischer Neutronenstreuung, entnommen.

Auch diese Konferenz machte deutlich, dass der Mechanismus für die Hochtemperatur-Supraleitung eine der spannendsten Fragen der aktuellen Festkörperphysik bleibt und nicht abgeschlossen ist. Die Tagung zeigte aber auch, dass Jahr für Jahr neue Mosaik-Steinchen zum Verständnis dieser komplizierten Materialien hinzukommen und dass die berechtigte Hoffnung auf ein klares, d. h. universelles Bild für den Mechanismus in nicht zu ferner Zukunft besteht.

Jörg Fink und Werner Hanke

- [1] H. Eschrig, J. Fink und L. Schultz, *Physik Journal*, Januar 2002, S. 45
- [2] A. B. McMillan und J. M. Rowell, *Phys. Rev. Lett.* **14**, 108 (1965)
- [3] Jinho Lee et al., *Nature* **442**, 546 (2006)
- [4] T. Cuk et al., *Phys. Rev. Lett.* **93**, 117003 (2004)
- [5] G.-H. Gweon et al., *Nature* **430**, 187 (2004)
- [6] S. Pilgram, T. M. Rice und M. Sgrist, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 117003 (2006)
- [7] siehe z. B. W. Hanke, *Physik Journal*, Juni 2002, S. 18
- [8] M. R. Norman et al. *Phys. Rev. Lett.* **79**, 3506 (1997)

Prof. Dr. Jörg Fink,
Leibniz Institut für
Festkörper- und
Werkstoffforschung
Dresden, Postfach
270116, 01171 Dresden;

Prof. Dr. Werner
Hanke, Institut für
Theoretische Physik
1, Universität Würz-
burg, Am Hubland,
97074 Würzburg