

Supraleitung bei Raumtemperatur?

Die nichtlineare optische Anregung von Gitterschwingungen erlaubt es, die Sprungtemperatur von Hochtemperatur-Supraleitern kurzzeitig zu erhöhen.

Prof. Dr. Jörg Fink,
Leibniz Institut für
Festkörper- und
Werkstoffforschung,
Dresden

Vor bald 30 Jahren haben Georg Bednorz und Karl Alexander Müller die Hochtemperatur-Supraleitung in Kupraten entdeckt [1]. Nur wenige Jahre danach wurde in dem Kuprat $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ der bisherige Rekord für die Sprungtemperatur von 134 Kelvin aufgestellt [2]. Unter Druck gelang es sogar, die Übergangstemperatur auf 160 Kelvin zu erhöhen. Mit den Eisenpniktiden ist seit 2006 auch eine zweite Materialklasse bekannt, in der Hochtemperatur-Supraleitung auftritt [3]. Während viele Wissenschaftler davon träumen, die Übergangstemperatur zu erhöhen, vielleicht sogar bis auf Raumtemperatur, ist eine allgemein akzeptierte Theorie für die Hochtemperatur-Supraleitung noch nicht in Sicht.

Die meisten Hochtemperatur-Supraleiter entstehen aus einer antiferromagnetischen Muttersubstanz, in der die magnetische Ordnung durch Ändern eines Kontrollparameters unterdrückt wird. Dazu zählen zum Beispiel Dotierung, normaler Druck oder die isovalente Substitution von bestimmten Atomen durch Atome anderer Größe (chemischer Druck). Im Phasendiagramm, das Temperatur und Kontrollparameter aufspannen, entsteht dadurch „am Ende“ des antiferromagnetischen Bereichs ein supraleitender. In unzähligen Versuchen ist es bisher nicht gelungen, die Sprungtemperatur T_c durch Variation dieser Kontrollparameter über 160 Kelvin zu erhöhen.

Völlig neuartige Kontrollmöglichkeiten eröffnet das optische Pumpen: So können Photonen im infraroten oder sichtbaren Frequenzbereich Teilchen-Loch-Anregungen erzeugen, die zu einer vorübergehenden „optischen Dotierung“ führen. Photonen im mittleren Infrarot (MIR) können auch gezielt Gitterschwingungen anregen, die völlig neue Nichtgleichgewichtszustände verursachen. Damit sind kurzzeitig Strukturen möglich, die sich durch Ändern der normalen

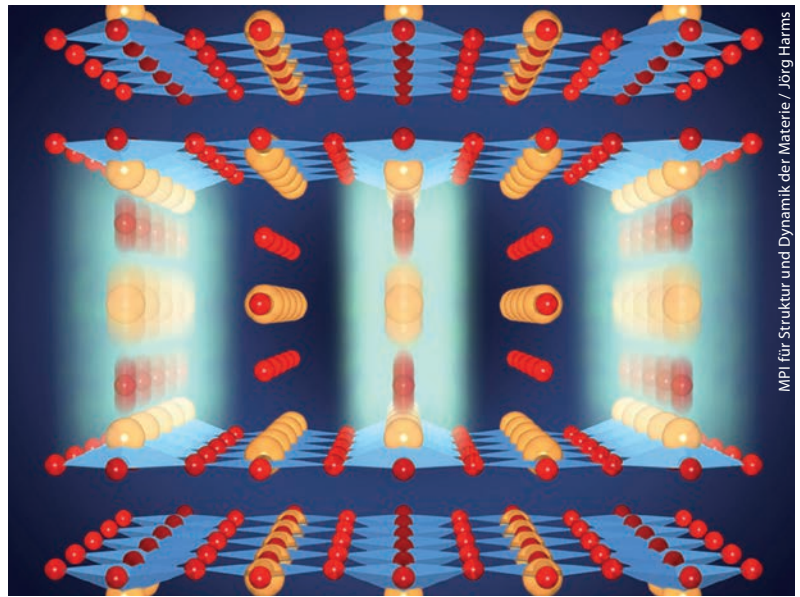


Abb. 1: Die Struktur des Supraleiters $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ ist charakterisiert durch CuO_2 -Doppelschichten (hellblau) und CuO -Ketten, die senkrecht zum Bild verlaufen (Cu: gelborange, O: rot). Die resonante Anregung von Schwingungen der Sauerstoff-Apex-Atome (unscharf), die sich zwischen den Doppelschichten und

den Ketten befinden, verschiebt die Atome kurzzeitig aus ihren Gleichgewichtspositionen. Damit einher geht, dass sich die mittleren Abstände zwischen den Apex-O-Atomen und den CuO_2 -Ebenen verringern und sich die Abstände zwischen den CuO_2 -Ebenen in den Doppelschichten vergrößern.

Kontrollparameter nicht erreichen lassen. Methoden wie optische Spektroskopie, winkelaufgelöste Photoemissionsspektroskopie, Elektronenbeugung, Röntgenbeugung oder Röntgenspektroskopie erlauben es im Anschluss, den Nicht-Gleichgewichtszustand zu untersuchen. Solche Anregungs-Abfrageexperimente (pump-probe) haben eine völlig neue Dimension in der Festkörperforschung eröffnet.

In den vergangenen Jahren hat ein internationales Team um Andrea Cavalleri vom MPI für Struktur und Dynamik der Materie in Hamburg in mehreren Arbeiten versucht, mit MIR-Photonen spezielle Phononen in supraleitenden Kupraten anzuregen, um damit eine im Gleichgewicht nicht existierende Struktur zu erzielen und so möglicherweise kurzzeitig die Sprungtemperatur zu erhöhen. Zum Nachweis der Supraleitung wird die optische Reflektivität mit Polarisation senkrecht zu den CuO_2 -Ebenen gemessen. In dem Signal treten

Josephson-Plasmon-Resonanzen auf, d. h. kollektive Schwingungen von Cooper-Paaren, die durch die isolierenden Schichten zwischen den CuO_2 -Ebenen tunneln, und eine starke Erhöhung der optischen Leitfähigkeit bei niedrigen Energien. Beides weist auf die Existenz eines Supraleiters hin und erlaubt es, die Größe der suprafluiden Dichte abzuleiten.

In einer ersten Arbeit gelang es mithilfe eines 300 fs kurzen MIR-Pulses, dessen Frequenz auf die in der Ebene liegende Cu-O-Schwingung abgestimmt war, das Kuprat $\text{La}_{1,675}\text{Eu}_{0,2}\text{Sr}_{0,125}\text{CuO}_4$ länger als 100 ps in einen supraleitenden Zustand zu transformieren [4]. Diese Substanz isoliert normalerweise, weil isolierende magnetische Streifen und leitende Streifen nebeneinander existieren. Erklärt wurde das Phänomen dadurch, dass die mit der Supraleitung konkurrierende Streifenordnung schmilzt und dadurch die supraleitende Phase entstehen kann.

In jüngeren Arbeiten wurden mit einem IR-Puls der Energie 83 meV in den Supraleitern $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+\delta}$ ($0,45 < \delta < 0,6$) mit Sprungtemperaturen zwischen 35 und 62 K nichtlineare optische Gitterschwingungen angeregt, und zwar Schwingungen der Apex-Sauerstoffatome senkrecht zu den CuO_2 -Ebenen (**Abb. 1**) [5, 6]. Die erzielten Abweichungen von dem Gleichgewichtsabstand zwischen der CuO_2 -Ebene und dem Apex-Atom lagen in der Größenordnung von einigen Prozent. Aufgrund der komplizierteren Struktur dieser Verbindung mit einer CuO_2 -Doppelschicht wurden zwei longitudinale und ein transversales Josephson-Plasmon beobachtet. Die frequenz- und zeitabhängigen optischen Eigenschaften bei Energien zwischen 2 und 10 meV zeigten, dass nach der gepulsten Gitteranregung die Dichte der Cooper-Paare und somit die Sprungtemperatur zunimmt. Überraschenderweise deuten die zeitabhängigen optischen Eigenschaften auch oberhalb der Sprungtemperatur auf einen kohärenten Transport zwischen den CuO_2 -Ebenen hin und damit auf eine transiente supraleitende inhomogene Phase. Temperaturabhängige Messungen ergaben, dass dies für $\delta = 0,45$ bis zu einer Temperatur von 370 K gilt, also oberhalb der Raumtemperatur.

Kürzlich hat diese Gruppe die nach der gepulsten Anregung entstandene transiente Gitterstruktur durch Femtosekunden-Röntgenbeugung am Freie-Elektronen-Laser in Stanford (LCLS) untersucht und mit Rechnungen der Dichtefunktionaltheorie (DFT) verglichen [7]. Die transiente Gitterstruktur ist geprägt durch einen geringeren Abstand der Apex-O-Atome von den CuO_2 -Ebenen, durch größere Abstände zwischen den CuO_2 -Ebenen in den Doppelschichten und durch eine größere Verkippung der CuO_2 -Ebenen (**Abb. 1**). In den Rechnungen nehmen dadurch der $\text{Cu-}3d_{x^2-y^2}$ -Charakter der Elektronen an der Fermi-Oberfläche ebenso zu wie die Dotierung der CuO_2 -Ebenen. Bei erster Betrachtung widerspricht dies einer älteren Arbeit, wonach

in vielen Kupraten die Sprungtemperatur mit dem Abstand der Apex-O-Atome anwächst [8]. Andererseits wurde bei Experimenten mit $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+\delta}$ ($\delta < 0,6$) bei hydrostatischem Druck eine höhere Sprungtemperatur bei gleichzeitig geringerem Abstand zwischen Kupfer- und Apex-Atomen beobachtet [9].

Die neue Methode erlaubt es mithilfe der nichtlinearen Photonik, einen Kontrollparameter zu ändern und dadurch neue Gitterstrukturen und neue elektronische Strukturen zu erzeugen. Die möglicherweise beobachtete transiente Supraleitung bei Raumtemperatur wird wohl kaum zu Anwendungen führen, da die Phase nur für Piko-sekunden existiert und eine Stabilisierung des Nichtgleichgewichtszustandes durch optische Anregungen wohl kaum möglich sein wird. Die Resultate können aber bei der Suche von chemisch modifizierten Gleichgewichtsstrukturen helfen, mit denen man höhere supraleitende Sprungtemperaturen erreichen kann.

Jörg Fink

- [1] J. G. Bednorz und K. A. Müller, *Z. Phys. B* **64**, 189 (1986)
- [2] A. Schilling, M. Cantoni, J. D. Guo und H. R. Ott, *Nature* **363**, 56 (1993)
- [3] Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano und H. Hosono, *J. Am. Chem. Soc.* **130**, 3296 (2008)
- [4] D. Fausti et al., *Science*, **331**, 189 (2011)
- [5] W. Hu et al., *Nature Materials* **13**, 705 (2014)
- [6] S. Kaiser et al., *Phys. Rev. B* **89**, 184516 (2014)
- [7] R. Mankowsky et al., *Nature* **516**, 71 (2014)
- [8] E. Pavarini et al., *Phys. Rev. Lett.* **87**, 047003 (2001)
- [9] S. Sadewasser et al., *Phys. Rev. B* **61**, 741 (2000)