

# Kristalle unter Kontrolle

Materialeigenschaften mit Licht wie mit einem Zauberstab schalten: Das ist das Ziel von **Andrea Cavalleri**. Der Direktor am **Max-Planck-Institut für Struktur und Dynamik der Materie** in Hamburg verändert mit Lasern das Verhalten von Kristallen und erzeugt so etwa für kurze Zeit Supraleiter, die Strom bei Zimmertemperatur verlustfrei leiten.

TEXT **ROLAND WENGENMAYR**

Ich benutze Licht, um Wasser zu gefrieren“, so gibt Andrea Cavalleri seiner sechsjährigen Tochter eine, wenn auch nicht ganz wörtlich zu nehmende, Vorstellung, worum es in seiner Forschung geht. Das Mädchen kennt die Prinzessin Elsa aus dem Animationsfilm „Die Eiskönigin“, die mit Zauberkraft Wasser in Eis verwandeln kann. So bekommt es eine Vorstellung davon, was Papa als Wissenschaftler macht, wenn er Materie mit Licht manipuliert.

Ohnehin kann man sich vorstellen, wie der Direktor am Max-Planck-Institut für Struktur und Dynamik der Materie in Hamburg, umringt von Kindern, seine Arbeit schildert, so lebendig spricht er davon. Etwas ältere Zuhörer dürften eher an Harry Potter denken, der durch einen Wink mit dem Zauberstab Dinge verwandeln kann. Wie in Potters Zauberwelt behalten auch die von den Hamburger Physikern manipulierten Materialien die neue Eigenschaft nur für eine gewisse Zeit – die ist allerdings noch extrem kurz.

Cavalleris Zauberstab ist speziell präpariertes Laserlicht. Es kann Atome für

kurze Zeit so verschieben, dass sich die physikalischen Eigenschaften eines Materials für einen Moment vollkommen verändern. Wasser steht allerdings bisher nicht auf der Liste der Forschungsobjekte, es geht um andere Stoffe. Im Jahr 2014 gelang Cavalleris Team in einer Kooperation mit weiteren Gruppen ein großer Erfolg: Für wenige Pikosekunden konnten die Forscher Supraleitung, also Stromtransport ohne Widerstand, bei Zimmertemperatur erzeugen. Eine Pikosekunde ist der billionste Teil einer Sekunde; der exotische Zustand dauerte also nur ultrakurz.

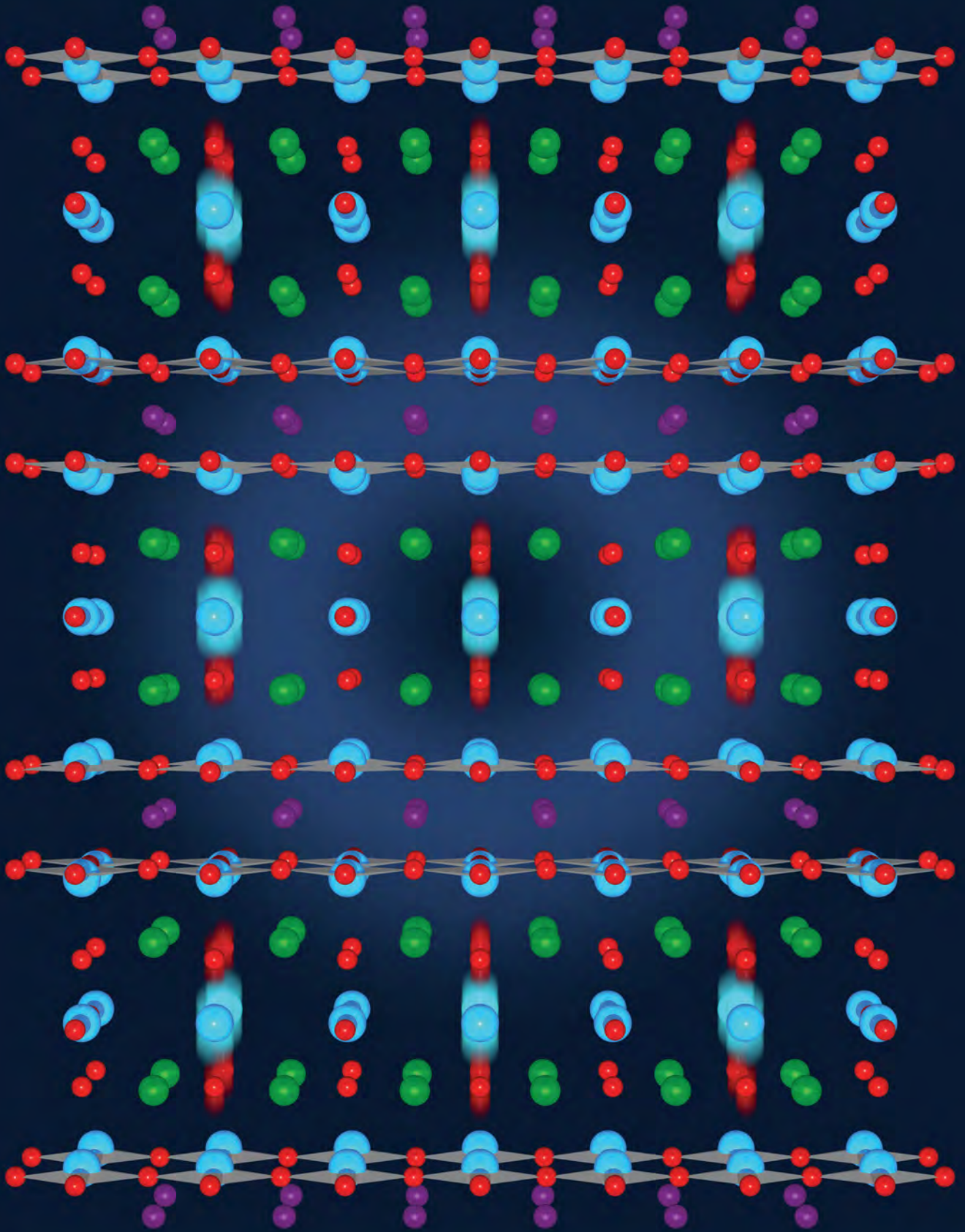
## DAS ZIEL: SUPRALEITUNG BEI ZIMMERTEMPERATUR

Trotzdem sorgte diese Entdeckung für Wirbel. Denn Supraleitung bei Zimmertemperatur ist ein großes Ziel der Materialforschung. Supraleiter, die weit unter null Grad Celsius ihren elektrischen Widerstand verlieren, werden heute schon zu Spulen gewickelt, die sehr starke Magnetfelder erzeugen, zum Beispiel in Magnetresonanztomografen für die Medizin. Mit widerstandslosen elek-

trischen Leitungen, die keine Kühlung brauchen, ließe sich Strom in Zukunft vielleicht ohne Verluste beispielsweise von großen Windparks auf See in weit entfernte Gegenden des Festlands transportieren. Die Entdeckungen und Erkenntnisse der Physiker um Andrea Cavalleri können vielleicht die Grundlagen für solche praktischen Anwendungen schaffen.

Bevor wir uns den Projekten der Hamburger Forscher zuwenden, tauchen wir in Cavalleris kleinem Besprechungszimmer jedoch in die Geschichte des jungen Instituts ein. Offiziell wurde es zum 1. Januar 2014 gegründet, seit Anfang 2008 hat Cavalleri es als junger, international bereits angesehener Physiker aufgebaut. Zuvor hatte der Italiener in den USA geforscht. 2004 wechselte er nach England an die Universität von Oxford, wo er 2006 einen unbefristeten Lehrstuhl als Professor erhielt. „Ich war glücklich und dachte, ich werde Oxford nicht mehr verlassen“, erzählt er. Aber dann war das Angebot der Max-Planck-Gesellschaft, in Hamburg ein brandneues Institut zu gründen, doch zu verlockend. „Ich war

Lichtschalter für einen Supraleiter: In einem Kuprat aus Yttrium (violett), Barium (grün), Kupfer (blau) und Sauerstoff (rot) transportieren Cooperpaare Strom in den dicht beieinanderliegenden Doppelschichten sogar bei relativ hohen Temperaturen ohne Verluste. Wenn ein Laser die Kupferatome zwischen den Doppelschichten zum Schwingen bringt, rücken diese näher zusammen – die Cooperpaare fließen dann auch senkrecht dazu.





Rennstrecke für Elektronen: Im Freie-Elektronen-Laser XFEL flitzen die Teilchen durch eine 3,4 Kilometer lange Anlage zwischen dem Forschungszentrum DESY in Hamburg-Bahrenfeld und Schenefeld (oben) und erzeugen dabei Röntgenblitze. Mitarbeiter bewegen sich mit dem Fahrrad durch den Tunnel des Röntgenlasers (unten).

der erste Angestellte“, erzählt Cavalleri: „Mein Telefon habe ich damals eigenhändig angeschlossen.“

Seitdem ist das Max-Planck-Institut für Struktur und Dynamik der Materie schnell gewachsen und zwischenzeitlich in Räume des CFEL, des Centre for Free-Electron Laser Science, umgezogen. Der markante, dreistöckige Flachzylinder steht auf dem Betriebsgelände des Deutschen Elektronen-Synchrotrons DESY, ein Forschungszentrum, das ursprünglich rein der Teilchenphysik gewidmet war.

Doch die Beschleunigertechnologie hat auch brillante Lichtquellen für die Materialforschung hervorgebracht, und gleich nebenan ging im September 2017 eine ganz besondere in Betrieb:

Der European XFEL ist der stärkste Röntgenlaser der Welt und wird in Zukunft auch für Andrea Cavalleri große Bedeutung haben. Röntgenlicht ist notwendig, weil seine extrem kurzen Wellen zu den Abständen der Atome in Materialien passen. Nur damit kann man deren Struktur bis auf Atome genau ablichten.

In diesem Umfeld ist das neue Max-Planck-Institut perfekt angesiedelt. Derzeit forschen in drei Abteilungen 110 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, Cavalleris Team umfasst rund 30 Leute. Während wir miteinander sprechen, dringt gedämpfter Baulärm ins Zimmer. In der Nachbarschaft entsteht gerade der Neubau des Instituts, im Sommer 2019 soll er fertig sein.

„Ich musste mich mit einer Menge neuer Fragen auseinandersetzen, zum Beispiel, was ein Max-Planck-Institut genau ist“, erzählt Cavalleri über die Gründungszeit. „Die Max-Planck-Gesellschaft ist eine sehr gute, flexible Organisation“, lobt er, setzt aber auch hinzu: „Hier bist du nur durch deine Fähigkeiten limitiert, es ist dein eigener Fehler, wenn du versagst.“

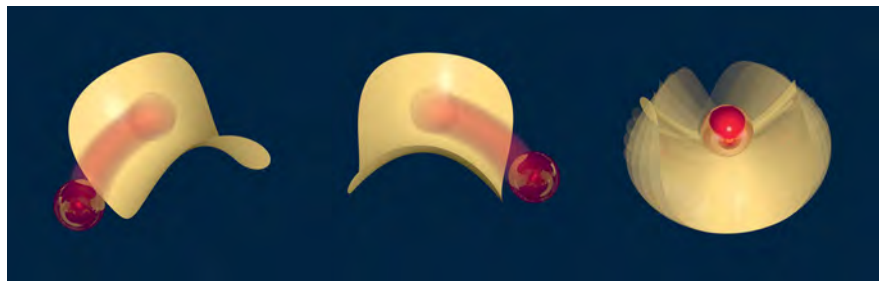
**DAS KRISTALLGITTER ALS RENNBahn FÜR ELEKTRONEN**

Nun kommt unser Gespräch auf Cavalleris Lieblingsthema, seine Forschung. Als Laie muss man dazu wissen, dass ein Großteil der Materie um uns herum aus Kristallen besteht. Mit Kristal-

len verbinden wir Salz oder kostbare Brillanten. Doch vielen Materialien sieht man gar nicht an, dass sie aus winzigen Kristallen bestehen, Metallen zum Beispiel. In der Welt der Atome zeichnen sich Kristalle durch eine regelmäßige räumliche Ordnung aus. Kochsalz etwa besteht aus einem Gitter vieler winziger Würfel, an deren acht Ecken wechselweise Natrium- und Chloratome sitzen.

Für die Quantensteckverbindungen zwischen den Atomen in den Kristallen sorgen immer Elektronen. Bei einem elektrisch leitfähigen Metall kommt hinzu, dass das Kristallgitter der Atome zu einer dreidimensionalen Rennbahn für bestimmte Elektronen wird. Diese können nahezu frei durch den Kristall flitzen und dabei elektrischen Strom sowie Wärmeenergie transportieren. Einzelne Elektronen in Kristallen anderer Materialien können auch wie winzige drehbare Magnetnadeln wirken, in der Regel sind sie dann an bestimmte Atome im Gitter gebunden. Drehen sich diese Spins kollektiv in eine Richtung, wird der Kristall zum Magneten. Es gibt auch sehr komplex aufgebaute Kristalle. Dazu zählen die sogenannten Kuprate. Diese Kupferoxide wurden als Hochtemperatursupraleiter bekannt und zählen zu Cavalleris Forschungsobjekten.

Der Wissenschaftler beschäftigt sich mit den physikalischen Eigenschaften von Kristallen und wie sich diese mit Licht manipulieren lassen. Der Knackpunkt dabei ist: In jedem Kristallgitter bestimmt die exakte Anordnung der Atome ganz direkt die Eigenschaften des Materials. „Stellen Sie sich die Atome im Kristallgitter als Kugeln vor, die über Spiralfedern verbunden sind“, er-



Balanceakt mit Atomen: Wie die Hamburger Max-Planck-Forscher etwa einen supraleitenden Nichtgleichgewichtszustand von Kristallen stabilisieren wollen, lässt sich mit dem Versuch vergleichen, eine Kugel auf einem Sattel zu halten. Im Normalfall würde sie davon herunterrollen. Dreht sich der Sattel aber sehr schnell, erscheint er der Kugel wie eine Schüssel, in der sie liegen bleibt.

klärt Andrea Cavalleri: „Sie können nun an einer Stelle die Kugeln auseinanderziehen, aber sobald Sie loslassen, federn diese wieder in ihre Ausgangslage zurück.“

### ATOME AUSSERHALB DER GLEICHGEWICHTSLAGE

In dieser Gleichgewichtslage der Kugeln heben sich alle Federkräfte auf. Auch in einem echten Kristall streben die Atome in solche Gleichgewichtspositionen – so, wie Murmeln in eine Mulde hineinrollen. Das Gleichgewicht bestimmt also die dauerhaften physikalischen Eigenschaften der Kristalle.

Cavalleris Team arbeitet an Techniken, die ausgewählte Atome in Kristallen künstlich aus der bequemen Gleichgewichtslage herauschieben können. „Wir wollen selektiv an den Federn zwischen den Kugeln ziehen“, sagt Cavalleri, „also die Bindungen zwischen den Atomen deformieren und dann sehen, was dabei passiert.“ Es geht darum, die Atome zumindest kurzzeitig in Positionen im Kristall zu manövrieren, in de-

nen sie von sich aus nicht bleiben würden. Das gleicht einem Balanceakt. Cavalleri illustriert das am Computer mit einer Animation von einer Kugel auf einem Sattel. Ruht der Sattel, dann rollt die Kugel sofort seitlich herunter – rotiert er aber schnell genug, dann formt er eine virtuelle Mulde, in der die Kugel gefangen bleibt.

Genau dies soll eines Tages speziell präpariertes Laserlicht bewirken: Wie der rotierende Sattel soll es die Atome in einem Kristall auf einer Nichtgleichgewichtsposition gefangen halten und auf diese Weise deren Eigenschaften dauerhaft verändern. Das ist Cavalleris Traum, denn dann ließen sich Materialeigenschaften umschalten, solange sie beleuchtet sind.

Der Trick besteht darin, dass geeignetes Laserlicht in Kristallgittern Schwingungen anstößt, die in der Physik Phononen heißen. Die Methode lässt sich veranschaulichen, wenn man überlegt, was geschieht, wenn Kinder auf Matratzen herumhüpfen. Die Metallfedern in der Matratze entsprechen in diesem Bild dem Kristallgitter. Das

**Diese Seite** Wenn Michael Först und der Doktorand Biaolong Liu in Kristallen Eigenschaften mit Licht induzieren, arbeiten sie an einem Tisch, auf dem ein Gewirr optischer Instrumente installiert ist. Zunächst regen sie mit einem Laserpuls die Schwingung an, die das Materialverhalten verändert. Mit einem zweiten Puls fragen sie ab, in welchem Zustand sich der Kristall danach befindet.

**Rechte Seite** Mit einem Anrege-Abfrage-Experiment haben die Hamburger Forscher einen Kristall aus fußballähnlichen Fulleren-Molekülen supraleitend gemacht.



Hüpfen könnte zum Beispiel die Eigenschaft erzeugen, dass die Federn immer in einem ganz bestimmten Moment des Ein- und Ausfederns quietschen. Dieses Quietschen verrät dann den gesuchten Nichtgleichgewichtszustand.

In diesem Bild gesprochen, wollen die Forscher wissen, wie gerade in diesem Zustand die Federn der Matratze deformiert sind. Diese Information kann eine Blitzaufnahme liefern, die im richtigen Moment die Matratze so durchleuchtet, dass sie ein scharfes räumliches Abbild des Quietschzustands ergibt.

Genau das machen die Forscher im Prinzip mit Kristallen. Das Hüpfen heißt wissenschaftlich korrekt „Anregen“, dem Quietschen entspricht das „Abfragen“. Beides besorgen starke Laseranlagen, die Andrea Cavalleri und seine Mitarbeiter in den Institutslabors entwickeln. Dort nehmen sie auch die Abfragemessungen vor, die ihnen wie das Quietschen auf indirekte Weise verraten, ob sie dem gesuchten Zustand auf der Spur sind. Sind sie sich dessen sicher, kommt die aufwendige Blitzaufnahme dran.

Dazu benötigen die Hamburger einen Freie-Elektronen-Laser, der Rönt-

genlicht erzeugt. Bisher mussten sie dazu mit ihren Experimenten bis zu dreimal im Jahr zur Linac Coherent Light Source ins kalifornische Stanford reisen, die bis vor Kurzem stärkste Quelle für Röntgenlicht. Nun steht der noch stärkere European XFEL direkt vor der Haustüre des Instituts. Gewissermaßen als Kamera kann er extrem scharfe Bilder der Atompositionen im richtigen Moment machen.

### EIN EXPERIMENT AUS ANREGEN UND ABFRAGEN

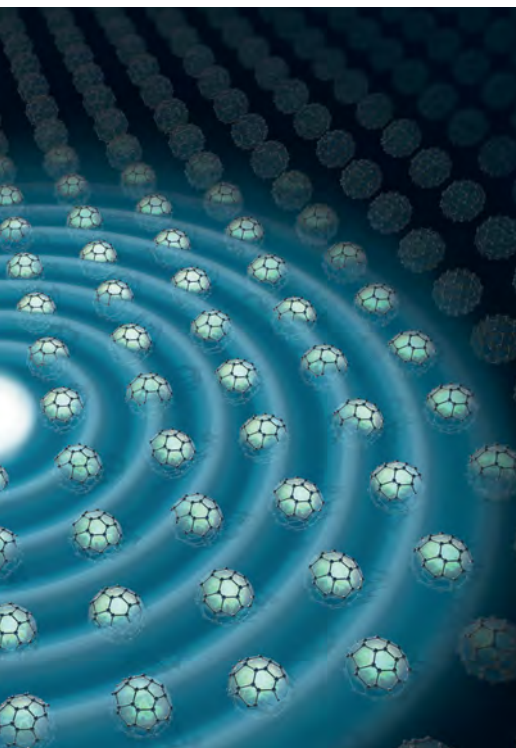
„Wir wollen die Suche nach neuen Materialien und neuen Materialeigenschaften auf den optischen Tisch bringen“, betont Andrea Cavalleri. Allerdings ist es ziemlich anspruchsvoll, Laserpulse (also die Lichtblitze) zu erzeugen, die in einem Kristall die gewünschten Schwingungen (Phononen) anregen können.

Das demonstriert Michael Först, leitender Wissenschaftler, im Erdgeschoss in einem von Cavalleris vier Laboren. Vor dem Betreten müssen wir Reinraumkleidung und Laserschutzbrillen anlegen. „Schmutz auf den Spiegeln

plus intensiver Laserstrahl gleich Spiegel kaputt“, scherzt der Physiker. Viele der Spiegel und Linsen, die sich als ein durchdachtes Labyrinth für Laserlicht über schwere optische Tische verteilen, sind teure Spezialanfertigungen.

Der Aufbau vor uns bedeckt immerhin die Fläche eines mittleren Apartments. In ihm findet ein komplettes Anrege-Abfrage-Experiment statt. Der Laserblitz zum Abfragen des Zustands – die Physiker sprechen vom Abfragepuls – muss auf jeden Fall sehr kurz sein, damit er eine Momentaufnahme der gesuchten Kristallgitterstruktur liefert. Mangels Röntgenlaserlicht kann er hier allerdings die Positionen der Atome nicht abbilden. Überdies muss es sich beim Abfragepuls um eine abgezweigte Kopie des Anregepulses handeln. Denn nur wenn beide Pulse synchronisiert sind, kann der Abfragepuls sinnvolle Informationen über das angeregte Kristallgitter liefern.

Ein Titan-Saphir-Laser versorgt das Experiment mit starken Laserblitzen. Jeder dieser Laserpulse dauert nur wenige Femtosekunden lang, das ist der milliardste Bruchteil einer millionstel Sekunde. Ein teilweise lichtdurchlässi-



ger Spiegel teilt ihn auf. Der stärkere Teilpuls regt dann die Probe an, entspricht also den auf der Matratze hüpfenden Kindern. Der zweite, schwächere Teilpuls wird über eine optische Verzögerungsstrecke zeitversetzt hinterhergeschickt. Er trifft nach dem Anregepuls auf die Probe und erfasst ihren momentanen Zustand. Indem die Forscher die Verzögerungszeit variieren, finden sie den Moment heraus, in dem der Kristall den interessanten Zustand annimmt – die Matratze also quietscht.

Allerdings ist das Experiment vor uns noch komplexer. Wie ein optisches Untersetzungsgetriebe muss es nämlich das Infrarotlicht des Femtosekundenlasers in eine Wellenlänge übersetzen, die bis zu 25-mal länger ist. Diese sogenannte Terahertzstrahlung liegt zwischen Infrarotlicht und Mikrowellen. Sie kann die gewünschten Schwingungen im Kristallgitter anstoßen. Die Atome in Kristallen sind nämlich durch Abgabe oder Aufnahme von Elektronen elektrisch geladen. Damit zieht das schwingende elektrische Feld der Terahertzwellen die Atome mit – wie Bojen, die auf einer durchlaufenden Wasserwelle auf und ab reiten.

Vor Kurzem gelang es Cavalleris Gruppe, mit der Terahertzlaserstrahlung eine Art künstlichen Magnetismus in einem Material namens Erbium-Eisenoxid zu erzeugen. Sehr einfach gesagt, versetzte der Laser das Kristallgitter in einen genau choreografierten Mix verschiedener Schwingungen. Zusammen erzeugten diese Phononen ein Magnetfeld, in dem sich die Eisenatome im Kristall kurzzeitig wie kleine Magneten in eine Richtung drehten. Das Ergebnis war also ein per Laser schaltbarer Magnetismus. Dieser Effekt könnte für zukünftige Materialien und elektronische Bauteile interessant sein.

### COOPERPAARE BILDEN EINE QUANTENFLÜSSIGKEIT

Vom Laserlabor in Cavalleris Zimmer zurückgekehrt, sprechen wir über die Entdeckung der Kurzzeit-Supraleitung bei Zimmertemperatur in Kupraten, den bekanntesten Hochtemperatursupraleitern. „Das ist eigentlich Rost von Kupfer“, sagt Cavalleri über diese Kupferoxide. Supraleitung beruht darauf, dass bestimmte Quanteneffekte in Kristallgittern je zwei Elektronen zu einem Cooperpaar verheiraten. Diese Cooperpaare verhalten sich ganz anders als individuelle Elektronen. Sie sammeln sich in einem kollektiven Quantenzustand und bilden eine Art Quantenflüssigkeit, die völlig ohne Widerstand durch das Kristallgitter fließen kann.

Bei den Kupraten und anderen Hochtemperatursupraleitern ist noch nicht ganz geklärt, welcher Mechanismus die Cooperpaare zusammenbindet. Aber er wirkt vergleichsweise gut: Sogar bei Zimmertemperatur existieren die durch ihn verkuppelten Cooperpaare, die in andersartigen Supraleitern

schon durch die geringe Wärmebewegung bei weit unter minus 200 Grad Celsius auseinanderfliegen. Indirekte Hinweise für die relativ temperaturbeständigen Cooperpaare hatte Cavalleri bereits in Experimenten gefunden, bevor er nach Hamburg kam.

Offensichtlich reicht der Zusammenhalt der Cooperpaare aber auch in den Kupraten noch nicht aus, damit sie bei Raumtemperatur supraleitend werden, Strom also widerstandslos transportieren. Das Haupthindernis dafür ist die sandwichartige Schichtstruktur der komplexen Kupratkristalle. In bestimmten Ebenen, die man sich wie die buttrigen Lagen eines Sandwichs vorstellen kann, können die Cooperpaare sich auch bei hohen Temperaturen wie geschmiert bewegen.

Doch senkrecht dazu gibt es Schichten aus Kupferoxid, die bei Zimmertemperatur ein unüberwindliches Hindernis darstellen. Das wäre in einem mehrlagigen Sandwich sozusagen eine zu dicke Brotschicht. Erst wenn man diese Schicht zusammendrückt und die gebutterten Schichten im Gegenzug etwas ausdehnt, kommen diese einander so nahe, dass die Cooperpaare auch senkrecht durch die Schichten flutschen können. Genau dann setzt die dreidimensionale Supraleitung ein. Diesen Zustand hat Cavalleris Team für ultrakurze Zeit in einem Kuprat erzeugt. Am Röntgenlaser in Stanford haben die Forscher zudem die exakten Positionen der Atome in einem solchen supraleitenden Kristall ermittelt.

Inzwischen haben die Max-Planck-Forscher die Hochtemperatursupraleitung an einem völlig anderen Material untersucht. „Das ist eigentlich supraleitendes Plastik“, erklärt Cavalleri halb im Scherz. Dieser Supraleiter be-



Zaubert mit Licht: Andrea Cavalleri erforscht, wie sich Materialeigenschaften mit Laserpulsen schalten lassen. Seine Erkenntnisse könnten etwa in Sensoren oder in optoelektronischen Bauteilen Anwendung finden.

sitzt kein Kristallgitter aus Atomen, sondern ein würfelförmiges Gitter aus molekularen Kugeln. Bei den fußballartigen Molekülen handelt es sich um Buckminster-Fullerene aus jeweils 60 Kohlenstoffatomen.

Der Fulleridkristall wird unterhalb von minus 253 Grad Celsius supraleitend, was schon lange bekannt ist. Cavalleris Team hat in ihm mit Terahertz-laserstrahlung jetzt aber kurzzeitig Supraleitung bei vergleichsweise warmen minus 170 Grad Celsius erzeugt. Die Entdeckung, dass Supraleitung bei relativ hohen Temperaturen in ganz verschiedenen Materialien möglich ist, könnte einen Einblick in universale Eigenschaften dieses Quantenphänomens geben.

Andrea Cavalleris Idee, Eigenschaften von Materialien mit Laserlicht zu schalten, könnte die Erfindung vollkommen neuer Sensoren anregen, etwa für elektromagnetische Strahlung. Sie könnte zudem zur Entwicklung optoelektronischer Bauelemente führen, in denen Elektronen mit Licht gesteuert werden oder umgekehrt, oder zur Entwicklung winziger mechanischer Antriebe für die Nanotechnologie. Denkbar sei es aber auch, Fensterglas mit Licht schlagartig auf undurchsichtig zu schalten, sagt Cavalleri. So könnten sich seine Experimente im Mikrokosmos auch auf unsere Makrowelt auswirken. ◀

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- **Andrea Cavalleri und sein Team am Max-Planck-Institut für Struktur und Dynamik der Materie manipulieren die Eigenschaften von Materialien mit Laserlicht.**
- **Mit speziellen Laserpulsen bringen die Forscher etwa Kristalle eines Kuprat-Hochtemperatursupraleiters kurzzeitig dazu, bei Raumtemperatur verlustfrei Strom zu leiten. Auf dieselbe Weise erzeugen sie auch in Kristallen der kugelförmigen Buckminster-Fullerene bei relativ hohen Temperaturen Supraleitung.**
- **Mit Röntgenlasern wie dem XFEL in Hamburg untersuchen die Wissenschaftler, welche Veränderungen in der Anordnung der Atome zu den Effekten führen.**
- **Die Erkenntnisse könnten neuartige Sensoren etwa für elektromagnetische Strahlung oder optoelektronische Bauteile ermöglichen.**

### GLOSSAR

**Cooperpaare:** In Supraleitern schließen sich jeweils zwei Elektronen zu Cooperpaaren zusammen, sodass der elektrische Widerstand des Materials auf null sinkt. Der Mechanismus, durch den die Elektronen sich paaren, ist nur für konventionelle Supraleiter (siehe unten) geklärt. Demnach treiben die Gitterschwingungen in einem Metall dessen Leitungselektronen bei tiefen Temperaturen gewissermaßen zusammen.

**Supraleitung:** Bei den Materialien, die Strom verlustfrei leiten, unterscheiden Physiker zwischen konventionellen und unkonventionellen Supraleitern. Bei konventionellen Supraleitern setzt die Supraleitung unter Normaldruck meist erst unter minus 196 Grad Celsius ein, sodass die Materialien mit sehr teurem flüssigem Helium gekühlt werden müssen. Zu den unkonventionellen Supraleitern, bei denen die Bildung von Cooperpaaren nicht durch Gitterschwingungen bewirkt wird, zählen die Hochtemperatursupraleiter. Deren prominenteste Vertreter sind Kupratkeramiken, die neben Kupferoxid weitere Metalle wie Barium und Yttrium enthalten. Bei ihnen tritt Supraleitung bereits über minus 196 Grad Celsius ein, im Extremfall sogar bei minus 140 Grad Celsius und mehr. Sie können daher mit relativ preiswertem flüssigem Stickstoff gekühlt werden.

**Terahertzstrahlung** heißt der Teil des elektromagnetischen Spektrums zwischen 100 Mikrometern und einem Millimeter Wellenlänge, sie liegt also zwischen der Infrarotstrahlung und der Mikrowellenstrahlung. Neben vielen Anwendungen in der Forschung wird sie auch in Körperscannern zur Sicherheitsüberprüfung von Personen eingesetzt und könnte zudem für die medizinische Diagnostik nützlich sein.

# jugend forscht 2018

schüler experimentieren



Spring!



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung