

Supraleiter Atom für Atom aufgebaut

# Designer-Supraleiter nehmen Form an

GLENN WAGNER | MARTINA O. SOLDINI | FELIX KÜSTER | PAOLO SESSI | STUART PARKIN | TITUS NEUPERT

*Die theoretische Physik sagt eine große Zahl verschiedener Typen von Supraleitern vorher. Doch die meisten davon konnten bisher noch in keinem Material nachgewiesen werden. Nun hilft die Forschung der Natur auf die Sprünge und baut gezielt neue supraleitende Phasen mit atomarer Präzision.*

**A**ls Heike Kamerlingh-Onnes 1911 die Supraleitung entdeckte, war das zweifelsohne eine der überraschendsten physikalischen Entdeckungen überhaupt. Zum ersten Mal hatte man einen makroskopischen Quanteneffekt beobachtet, und eben darum widersprach er sämtlicher „klassischer“ Intuition, die man über das Verhalten von Materie bis dahin entwickelt hatte. Mehr noch: Zu dieser Zeit steckte die Quantenmechanik in den Kinderschuhen, und man war überhaupt nicht in der Lage, das beobachtete Verhalten – den sprunghaften Verlust des elektrischen Widerstandes unterhalb einer Sprungtemperatur – theoretisch zu erklären.

Dies glückte John Bardeen, Leon Neil Cooper und John Robert Schrieffer erst ein halbes Jahrhundert später, nachdem viele Erklärungsansätze verworfen worden waren. Sie beschrieben den Supraleiter als einen Zustand, in dem Elektronen zu Cooper-Paaren zusammenfinden. Diese Paarung der Elektronen ist für Supraleitung unerlässlich. Denn einzelne Elektronen sind Fermionen, und wegen des Pauli-Prinzips ist jedes Fermion im Universum in einem anderen Quantenzustand. Andererseits sind Paare von Elektronen Bosonen. Bosonen können nach den Regeln der Quantenstatistik einen einzigen Quantenzustand kohärent besetzen – sie bilden ein Bose-Einstein-Kondensat. Ein Bose-Einstein-Kondensat von Cooper-Paaren hat keinen elektrischen Widerstand. Verantwortlich dafür, dass die Elektronen zu Cooper-Paaren zusammengebunden werden, sind Phononen – die Quanten einer akustischen Welle. Die gleichen Teilchen, die dafür verantwortlich sind, dass ein Gong klirrt, sind auch dafür verantwortlich, falls der Gong bei niedrigen Temperaturen supraleitet.

Kamerlingh-Onnes hatte erstmals Supraleitung in Quecksilber nachgewiesen. Heute wissen wir, dass auch viele andere Materialien dieses Phänomen zeigen – auch elementare Metalle wie Blei oder Aluminium. Tatsächlich

wird fast jedes Metall bei niedrigen Temperaturen zu einem Supraleiter. Ironischerweise sind es genau die Metalle, die im Normalzustand am leitfähigsten sind, zum Beispiel Kupfer und Gold, die nicht zu einem Supraleiter werden. Der Grund dafür liegt darin, dass die Phononen, die für die Supraleitung verantwortlich sind, bei Raumtemperatur mit den Elektronen streuen und so den elektrischen Widerstand eines Metalls erhöhen. Die Elektronen in guten Metallen, die also eine hohe Leitfähigkeit haben, haben schwächere Kopplung an die Phononen. Diese Metalle sind daher bei niedrigen Temperaturen schlechte Supraleiter.

Heute finden Supraleiter viele wichtige Anwendungen, insbesondere wenn es darum geht, hohe Magnetfelder zu erzeugen. Wegen des fehlenden elektrischen Widerstands können in einem Supraleiter starke elektrische Ströme fließen, und diese erzeugen nach dem Ampèreschen Gesetz ein starkes Magnetfeld. Supraleiter kommen daher zum Beispiel in der Medizintechnik in der Kernspintomographie zum Einsatz, aber auch in Teilchenbeschleunigern wie beim Large Hadron Collider im CERN, wo die Magnetfelder dazu dienen, einen Protonenstrahl zu steuern. Supraleiter können auch eingesetzt werden, um Maglev-Züge schweben zu lassen, die Geschwindigkeiten von bis zu 600 km/h erreichen. Sogar die Quantencomputer von Google und IBM basieren auf Supraleitern.

## Unkonventionelle Supraleiter

Die Theorie der Supraleitung, die Bardeen, Cooper und Schrieffer entwickelt haben, ist einer der großen Erfolge der Physik des 20. Jahrhunderts. Allerdings wissen wir mittlerweile auch, dass Supraleiter nicht gleich Supraleiter ist. Die Supraleiter, die wir bisher beschrieben haben, sind alle konventionell: Sie können mit der Theorie von Bardeen, Cooper und Schrieffer beschrieben werden. Es gibt aber auch exotischere Arten von Supraleitern. 1986 entdeckten Georg Bednorz und Alex Müller den ersten Hochtemperatur-Supraleiter (siehe Physik in unserer Zeit **2006**, 37(4), 154). Bis heute ist nicht geklärt, wie Hochtemperatur-Supraleiter funktionieren. Laut der Theorie von Bardeen, Cooper und Schrieffer sollten sie nicht existieren. Die Erklärung der Hochtemperatur-Supraleitung ist eine der großen offenen Fragen der Physik. Eingesetzt wird sie ungeachtet dessen [1], denn Hochspannungskabel aus Supraleitern können höhere Kapazitäten erzielen. In New York

*This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.*



**Abb. 1** Der Genus  $G$  eines Körpers ist eine topologische Invariante und gibt die Anzahl der Löcher im Körper an. Zwei Körper mit dem gleichen Genus können kontinuierlich ineinander verformt werden. Ein Apfel hat Genus  $G=0$  und kann daher kontinuierlich in ein Glas (auch  $G=0$ ) verwandelt werden. Eine Kaffeetasse ( $G=1$ ) kann kontinuierlich in einen Donut (auch  $G=1$ ) umgeformt werden. Um die Tasse in einen Apfel zu verwandeln, müsste der Tassengriff abgebrochen werden. Dies kann nicht kontinuierlich geschehen. Eine Brezel ( $G=3$ ) kann in keinen der anderen beiden Körper verformt werden.

wurde 2008 zum ersten Mal ein Hochspannungskabel mit Hochtemperatur-Supraleitern verlegt.

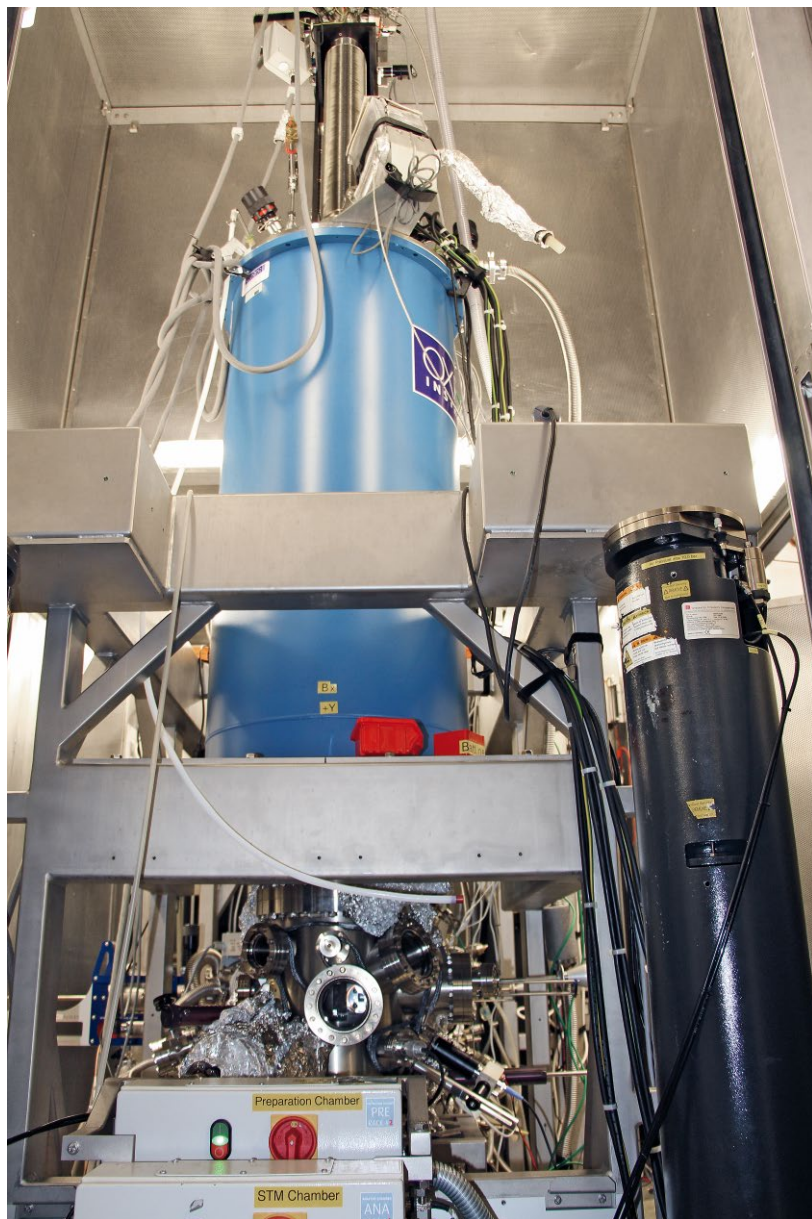
Eine weitere Art exotischer Supraleiter sind die topologischen Supraleiter, also Supraleiter, für welche die Erkenntnisse der Topologie eine Rolle spielen. Die Topologie ist ein Fachbereich der Mathematik, der zunehmend auch in der Physik Anwendung findet [2]. Sie klassifiziert mathematische Körper, indem einem Körper eine ganze Zahl zuordnet wird. Ein Beispiel für eine topologische Invariante ist der Genus eines mathematischen Körpers – umgangssprachlich bedeutet das die Anzahl der Löcher in dem Körper. So wird einem Apfel die Zahl Null zugeordnet, weil er keine Löcher hat, einem Donut wird die Zahl Eins, weil er ein Loch hat, und einer Brezel die Zahl Drei, weil sie drei Löcher hat (Abbildung 1).

Diese Zahl der Löcher nennt man topologische Invariante: Sie verändert sich nicht, wenn der Körper kontinuierlich verformt wird. In der gleichen Weise kann einem Supraleiter eine ganze Zahl – also eine topologische Invariante – zugeordnet werden. Alle konventionellen Supraleiter bekommen die Zahl Null zugeordnet. In der theoretischen

Physik war es schon lange eine faszinierende Frage, ob es auch topologische Supraleiter gibt, die also eine topologische Invariante haben, die nicht gleich null ist. Diese Frage ist auch aus dem Grund so spannend, weil topologische Supraleiter dafür verwendet werden können, einen Quantencomputer zu bauen [3].

Allerdings sind solche topologischen Supraleiter selten, und bisher sind nur wenige Beispiele bekannt. Theoretisch wurde hingegen eine große Vielfalt topologischer Supraleiter vorhergesagt, die in natürlich vorkommenden Materialien größtenteils unentdeckt sind. Können wir der Natur auf die Sprünge helfen und im Labor Supraleiter zusammenbauen, die solche neuen Eigenschaften aufweisen?

Diese Frage stellten wir uns, eine Kooperation von Gruppen am Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik in Halle, der Universität Zürich, dem Forschungszentrum Jülich und an der Ludwigs-Maximilians-Universität Würzburg. Unser Projekt lief in einer engen Zusammenarbeit zwischen Experiment und Theorie, zwei Doktoranden waren maßgeblich daran beteiligt. Felix Küster ist Doktorand in der Arbeitsgruppe von Paolo Sessi am Max-Planck-Institut in



**Abb. 2** Das Foto zeigt das Rastertunnelmikroskop der Gruppe von Paolo Sessi in Halle. Es befindet sich in einem Kryostaten, der Temperaturen knapp über dem absoluten Nullpunkt erreichen kann.

## RASTERTUNNELMIKROSKOP

Ein Rastertunnelmikroskop erlaubt es, die Elektronendichte an der Oberfläche von Materialien zu messen. Das Mikroskop besteht aus einer Tunnelspitze, von der aus Elektronen zur Oberfläche „tunneln“. Dabei überwinden die Elektronen den Abstand zwischen der Tunnelspitze und der Oberfläche dank des quantenmechanischen Tunneleffekts. Der Tunnelstrom

zwischen der Spitze und der Oberfläche hängt von der Elektronendichte an der Oberfläche ab. Seine Messung an verschiedenen Stellen an der Oberfläche kann daher eingesetzt werden, um ein Bild von der Elektronendichte an der Oberfläche zu machen. Ein Rastertunnelmikroskop hat eine so hohe Auflösung, dass es einzelne Atome abbilden kann.

Halle und hat die experimentelle Arbeit am Rastertunnelmikroskop durchgeführt. Martina Soldini ist Doktorandin in der Gruppe von Titus Neupert an der Universität Zürich und hat das theoretische Modell simuliert. Um diese Aufgabe in Angriff zu nehmen, fingen wir also an Lego zu spielen, und zwar mit einzelnen Atomen.

### Lego mit einzelnen Atomen

Die Beziehung zwischen atomarer Struktur und physikalischen Eigenschaften von Materialien herzustellen, ist eine der großen Herausforderungen der Physik. Ihr begegnet man mit viel Rechenpower, immer weiter optimierten Algorithmen, die mittlerweile auch Maschinenlernen beinhalten, und mit enormen, immer besser strukturierten Datenbanken [4]. Gewisse Eigenschaften lassen sich auf diese Weise in der Tat recht zuverlässig vorhersagen, etwa ob ein Material Isolator, Halbleiter oder Metall ist. Allerdings sind wir bei dieser Vorgehensweise auf natürlich vorkommende Materialien beschränkt und können nicht die Myriaden von Zuständen erforschen, welche die theoretische Physik vorhersagt.

Die Entwicklung des Rastertunnelmikroskops (siehe „Rastertunnelmikroskop“ auf dieser Seite, Abbildung 2) hat es ermöglicht, einzelne Atome zu manipulieren. Mit einem Rastertunnelmikroskop können Atome hochgehoben, bewegt und deponiert werden. Forscher konnten so sogar ein Sierpinski-Dreieck aus Atomen aufbauen [5]. Dies ist jedoch experimentell aufwendig, und die Technologie muss an das Material, auf dem die Atome deponiert werden sollen, angepasst werden. Unser Ziel war es, Atome auf einem Supraleiter zu deponieren und so einen Designer-Supraleiter zu bauen. Angefangen haben wir mit Niob. Dass Niob supraleitend ist, weiß man schon seit den 1930er-Jahren. Niob bietet sich an, da es unter allen elementaren Metallen bei den höchsten Temperaturen supraleitend ist, nämlich bei fast 10 K ( $-263\text{ °C}$ ). Aus diesem Grund wird Niob bereits seit Jahren vielfach technisch eingesetzt, zum Beispiel wird in Japan eine neue Maglev-Strecke gebaut, mit einer Niob-Titan-Legierung als Supraleiter.

Um einen exotischen Supraleiter zu bauen, haben wir zunächst mit der Spitze eines Rastertunnelmikroskops Chromatome auf der Oberfläche von Niob deponiert (Abbildung 3). Etwa 100 Chromatome, in einem rechteckigen Gitter angelegt, können wir so auf der Oberfläche platzieren und bewegen. Wer schon einmal am Jahrmarkt versucht hat, mit einem Greifautomaten Plüschtiere zu greifen, kann sich vorstellen, wie viel schwieriger es ist, einzelne Atome, die mehr als milliardenfach kleiner sind, hochzuheben und zu bewegen. Aber was passiert nun, wenn Chromatome auf den Supraleiter gelegt werden?

Chrom ist magnetisch. Magnetismus ist normalerweise der Gegner der Supraleitung. Ein Supraleiter verdrängt ein Magnetfeld aus seinem Inneren. Das ist die Eigenschaft, die es ermöglicht, mit Supraleitern schwebende Züge zu bauen. Ist das angelegte Magnetfeld allerdings stark genug, wird die Supraleitung zerstört, und der Supraleiter wandelt sich

zurück in ein normales Metall. Sobald die Chromatome auf den Niob-Supraleiter gelegt werden, zerstören sie lokal den Supraleiter, aber nur auf fast atomarer Skala: In der Umgebung der Chromatome bildet sich ein sogenannter Yu-Shiba-Rusinov-Zustand (siehe „Yu-Shiba-Rusinov-Zustände“ auf dieser Seite) [6–8]. Jeder Supraleiter hat eine Bandlücke: ein Energiebereich, in dem es keine Anregungen gibt. Die Yu-Shiba-Rusinov-Zustände liegen in der Bandlücke und können von einzelnen freien Elektronen besetzt werden. Die Folge: Elektronen können nun auf diesem Gitter von Chromatomen zwischen den verschiedenen Yu-Shiba-Rusinov-Zuständen hüpfen. Die spannende Frage ist nun: Können die Elektronen im Yu-Shiba-Rusinov-Gitter wieder supraleitend werden?

### Ein Supraleiter auf dem Supraleiter

Um diese Frage zu beantworten, haben wir die Niob-Oberfläche mit den Chromatomen mit dem Rastertunnelmikroskop vermessen. Die ersten Messungen schienen zu bestätigen, was wir uns erhofft hatten: Die Elektronen im Yu-Shiba-Rusinov-Gitter sind ebenfalls supraleitend, bilden also einen eigenen Supraleiter auf der Oberfläche des Niob-Supraleiters. Allerdings genügte uns das noch nicht, denn unser Ziel war, dass diese Elektronen einen topologischen Supraleiter bilden.

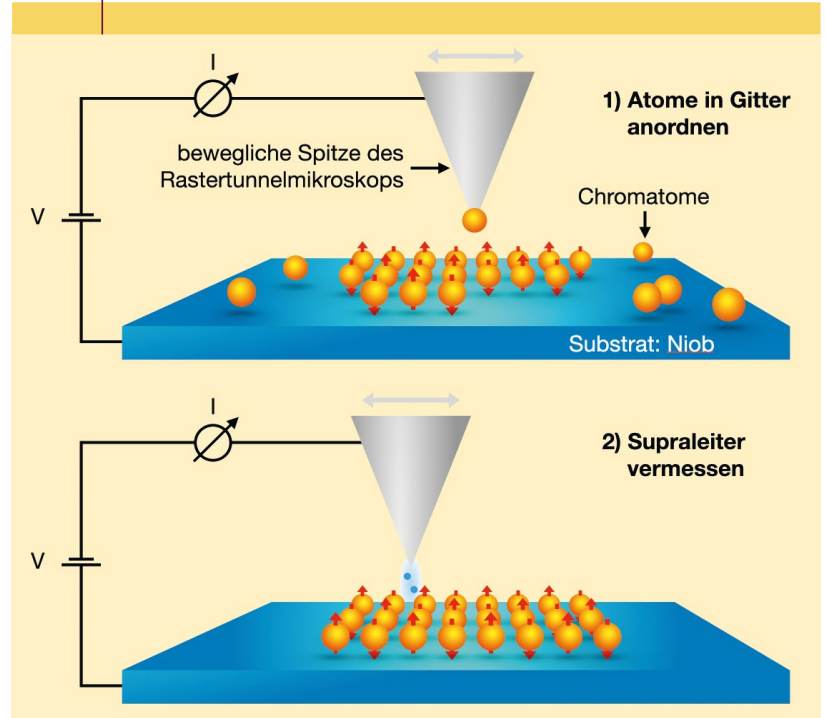
Um zu verstehen, ob wir diesem Ziel näherkommen, ist ein theoretisches Modell nötig, das diesen komplexen Zustand auf die einfachsten Bestandteile reduziert. Wir haben ein solches Modell entwickelt, um zu beschreiben, wie sich die Elektronen im Yu-Shiba-Rusinov-Gitter verhalten. Dieses Modell hat vier Zutaten. Zuerst hat es einen Term, der beschreibt, wie die Elektronen zwischen den Yu-Shiba-Rusinov-Orbitalen hüpfen. Zweitens beschreibt das Modell, wie das supraleitende Niob in den Yu-Shiba-Rusinov-Elektronen Supraleitung induziert. Drittens beschreibt es die Spin-Bahn-Kopplung der Elektronen. Viertens koppelt es schließlich den Spin der Elektronen an den Spin der Chromatome. Aus diesem Modell kann dann die topologische Invariante berechnet werden.

Die Rechnungen zeigten etwas Beeindruckendes: Je nachdem, wie die Chromatome auf der Oberfläche des Niobs angeordnet werden, entstehen Supraleiter mit verschiedenen topologischen Invarianten. Alle möglichen topologischen Supraleiter wurden bereits 2009 klassifiziert, und die entsprechenden topologischen Invarianten sind in einem „Periodensystem“ der topologischen Supraleiter zu finden [9, 10]. Für die verschiedenen Anordnungen der Atome können wir durch die unterschiedlichen Symmetrien des Gitters ablesen, um welchen Supraleiter aus diesem Periodensystem es sich handelt.

Die Chromatome können auf zwei verschiedene Arten auf dem Niob angeordnet werden: entweder rechteckig oder rautenförmig. So können wir zwei verschiedene neuartige Supraleiter bauen. Nun muss überprüft werden, ob diese Supraleiter topologisch sind – wir müssen einen Weg finden, die topologische Invariante sichtbar zu machen. Die Signa-

tur des topologischen Supraleiters sind die Randzustände, denn das Gitter selbst ist schließlich zweidimensional. In dem rechteckig angeordneten Supraleiter sollte es an den eindimensionalen Rändern oder an den nulldimensionalen, also punktförmigen, Ecken eine erhöhte Ladungsdichte geben. Ob es Rand- oder Eckzustände gibt, ist davon abhängig, ob der Rand oder die Ecken bestimmten Spiegelsymmetrien gehorchen, also von der Geometrie des gesamten Systems.

ABB. 3 | SCHEMATISCHER AUFBAU DES EXPERIMENTS



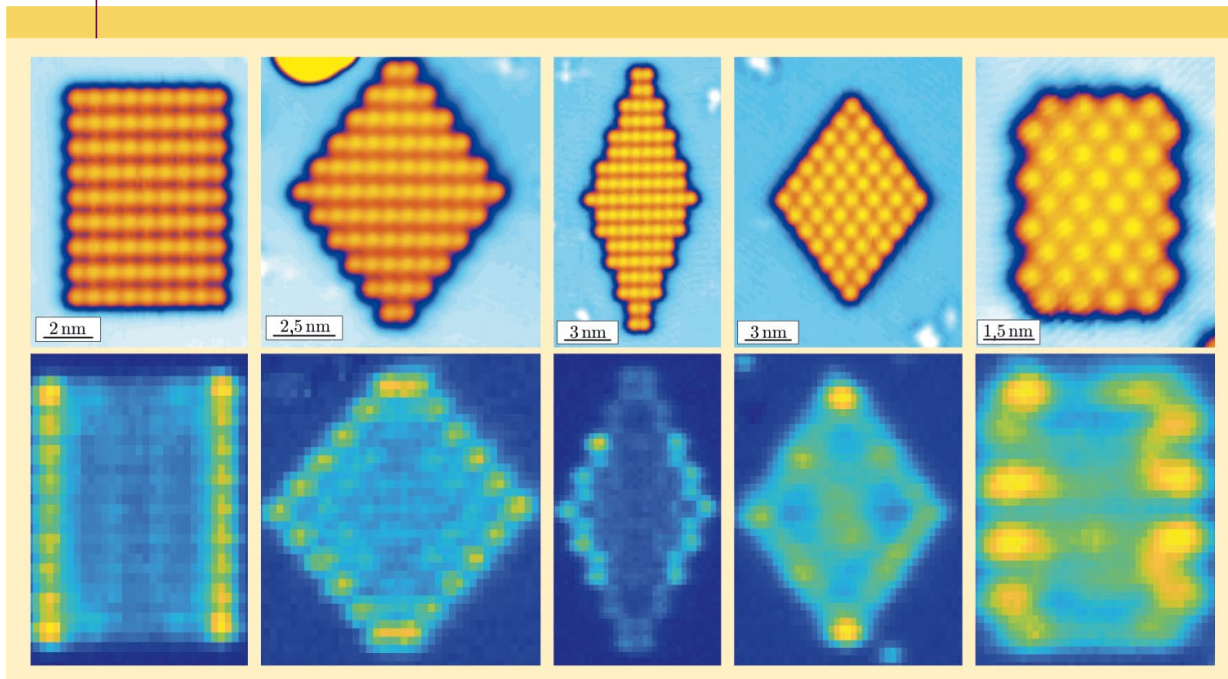
**Im ersten Schritt werden mit der Spitze des Rastertunnelmikroskops die Chromatome Atom für Atom in einem Gitter auf der Oberfläche eines Niob-Supraleiters angeordnet. Die Chromatome haben ein magnetisches Moment und richten sich antiferromagnetisch aus. Im zweiten Schritt fährt das Rastertunnelmikroskop über die Oberfläche und misst den elektrischen Strom bei einer vorgegebenen Spannung. Dies erlaubt die Berechnung der Ladungsdichte.**

### YU-SHIBA-RUSINOV-ZUSTÄNDE

Ein Metall leitet elektrischen Strom, weil es Elektronen gibt, die sich frei bewegen können. Die Energie dieser Elektronen nennt man Fermi-Energie  $E_F$ . Eine der wichtigsten Eigenschaften eines Supraleiters ist die Energielücke  $\Delta$ . Sie entsteht, wenn aus einem Metall ein Supraleiter wird, weil sich Cooper-Paare bilden. In einem Supraleiter gibt es keine Zustände mit Energien zwischen  $E_F - \Delta$  und  $E_F + \Delta$ .

Beim Niob allerdings befinden sich zum Beispiel die Yu-Shiba-Rusi-

nov-Zustände genau in dieser Energielücke. Falls die Elektronen in den Yu-Shiba-Rusinov-Zuständen supraleitend werden, dann existiert dieser neue Supraleiter in der Lücke des Niob-Supraleiters. Es ist ein Supraleiter innerhalb eines Supraleiters, eine Situation, die an eine Matrjoschkapuppe erinnert. Der ursprüngliche Supraleiter wurde also an der Oberfläche durch die Chromatome zerstört, aber aus seinen Trümmern wurde ein neuer Supraleiter gebaut.

**ABB. 4 | YU-SHIBA-RUSINOV-GITTER**

**Oben:** Mit dem Rastertunnelmikroskop aufgenommene, topographische Bilder des Chromatomgitters. Jeder helle Punkt entspricht einem einzelnen Chromatom. Wir haben zwei verschiedene Supraleiter untersucht: Die linken drei Bilder zeigen die Anordnung in einer rechteckigen Einheitszelle, die rechten zwei Bilder zeigen die Anordnung in der rautenförmigen Einheitszelle. Die unterschiedlichen Außenformen dienen der Untersuchung verschiedener Randbedingungen. **Unten:** Die gemessene Ladungsdichte in einem Energiefenster im Bereich der Fermi-Energie (siehe „Yu-Shiba-Rusinov-Zustände“ auf S. 125). Die linken drei Bilder zeigen im Inneren des Supraleiters keine Ladungsdichte, es besteht also eine Energielücke, ein Kennzeichen eines Supraleiters. Die Rand- und Eckzustände deuten auf einen topologischen Supraleiter hin. Die rechten zwei Bilder zeigen auch im Inneren des Supraleiters eine Ladungsdichte, daher handelt es sich um einen unkonventionellen Supraleiter, der keine Energielücke besitzt.

### Topologische „Designer-Supraleiter“

Mit diesen Konstruktionsplänen für zwei verschiedene Supraleiter konnten wir nun mit neuen Experimenten anfangen. Den Plänen zufolge mussten die Chromatome angeordnet werden, und es musste mit verschiedenen Orientierungen und Geometrien gearbeitet werden; für die rechteckige Orientierung gab es drei verschiedene Geometrien zu überprüfen, für die rautenförmige zwei. Um festzustellen, ob tatsächlich der vorhergesagte Supraleiter entstanden war, konnten wir berechnen, wie die verschiedenen Supraleiter unter dem Rastertunnelmikroskop ausschauen sollten. Das Rastertunnelmikroskop dient somit sowohl als Werkzeug zum Aufbau des Supraleiters als auch als Messgerät (Abbildung 3, Schritt 2).

Eindimensionale topologische Supraleiter wurden schon 2014 realisiert [11, 12]. In unserer Arbeit gelang es zum ersten Mal, Atom für Atom einen zweidimensionalen, mutmaßlich topologischen Supraleiter zu bauen [13]. Die Rand- und Eckzustände als Hinweis auf die Topologie des Supraleiters konnten wir nun mit dem Rastertunnelmikroskop überprüfen. Im Rastertunnelmikroskop wird die Ladungsdichte der Elektronen in einem bestimmten Energiefenster vermessen. Die erhöhte Ladungsdichte an den Rändern und Ecken tauchte in den Rastertunnelmikroskop-Bildern als

helle Region auf und wurde wie von unserem Modell vorhergesagt gemessen (Abbildung 4).

Aus der theoretischen Perspektive können die Randzustände als Majorana-Zustände interpretiert werden. Majorana-Fermionen, nach dem italienischen Physiker Ettore Majorana benannt, sind Fermionen, bei denen Teilchen und Antiteilchen identisch sind [14]. Das Standardmodell der Teilchenphysik beinhaltet keine Majorana-Fermionen. Alle darin enthaltenen und bekannten Fermionen, zum Beispiel Elektronen und Neutrinos, sind nicht ihr eigenes Antiteilchen. Es besteht allerdings die Hoffnung, dass sich im Labor Majorana-Fermionen als Quasiteilchen erzeugen lassen. Die in unseren Experimenten beobachteten Randzustände enthalten wahrscheinlich nicht isolierte Majorana-Fermionen, denn es gibt zu viele andere Zustände, die wir nicht von den Majoranas trennen können.

Es ist der Traum vieler Physikteams, eines Tages ein isoliertes Majorana-Fermion im Labor zu erzeugen. Denn Majorana-Fermionen eignen sich dazu, einen neuartigen Quantencomputer zu bauen, einen sogenannten topologischen Quantencomputer. Das Problem mit allen derzeitigen Quantencomputern ist der hohe Rauschanteil, der zu Fehlern in den Berechnungen führt. Es besteht die Hoffnung, dass ein topologischer Quantencomputer robuster

ist und dieses Problem umgeht. Denn genau so, wie es unmöglich ist, eine Kugel kontinuierlich in eine Brezel zu verwandeln und somit die topologische Invariante zu verändern, ist es auch schwierig, in einem topologischen Quantencomputer Fehler zu induzieren.

### Zusammenfassung

Es ist uns gelungen, neue Designer-Supraleiter Atom für Atom aufzubauen. Dazu nutzten wir ein Rastertunnelmikroskop, um Chromatome auf einer Niob-Oberfläche gezielt in einem zweidimensionalen Gitter anzuordnen. Durch die magnetischen Chromatome entstehen dabei Quantenzustände, die in der supraleitenden Bandlücke des Niobs liegen. Es zeigte sich, dass diese sogenannten Yu-Shiba-Rusinov-Zustände einen eigenen supraleitenden Zustand bilden können. Dessen Eigenschaften hängen von der geometrischen Anordnung der Chromatome ab. Theoretische Berechnungen und Messungen mit dem Rastertunnelmikroskop deuten darauf hin, dass es sich um einen zweidimensionalen topologischen Supraleiter handelt. Solche topologischen Supraleiter würden sich für wesentlich robustere Quantencomputer eignen.

### Stichwörter

Designer-Supraleiter, Rastertunnelmikroskop, Yu-Shiba-Rusinov-Zustände, Majorana-Quasiteilchen, topologischer Supraleiter, Quantencomputer.

### Danksagung

Wir danken allen anderen Autoren des Artikels [13]. Open-Access-Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch die Universität Zürich.

### Literatur

- [1] M. Noe, M. Bauer, Phys. Unserer Zeit **2021**, 52(6), 290.
- [2] P. Gehring, M. Burghard, Phys. Unserer Zeit **2014**, 45(6), 299.
- [3] C. Nayak, S. H. Simon et al., Rev. Mod. Phys. **2008**, 80, 1083.
- [4] D. Raabe, Phys. Unserer Zeit **2024**, 55(2), 72.
- [5] S. N. Kempkes et al., Nat. Phys. **2019**, 15, 127.
- [6] L. Yu, Acta Phys. Sin. **1965**, 21, 75.
- [7] H. Shiba, Prog. Theor. Phys. **1968**, 40, 435.
- [8] A. I. Rusinov, Zh. Eksp. Teor. Fiz. Pisma Red. **1969**, 9, 146.
- [9] A. Kitaev, AIP Conf. Proc. **2009**, 1134(1), 22.
- [10] S. Ryu et al., New J. Phys. **2010**, 12, 065010.
- [11] S. Nadj-Perge et al., Science **2014**, 346, 602.
- [12] M. Ruby et al., Phys. Rev. Lett. **2015**, 115, 197204.
- [13] M. O. Soldini et al., Nat. Phys. **2023**, 19, 1848.
- [14] W. Pfaff, M. Wimmer, Phys. Unserer Zeit **2019**, 50(5), 232.

### Die Autoren



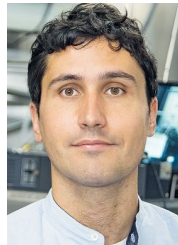
Glenn Wagner promovierte 2021 an der Universität Oxford und hat seitdem eine Stelle als Postdoktorand in der Gruppe von Titus Neupert an der Universität Zürich inne. Er ist Theoretiker und erforscht zweidimensionale Materialien mit starken Wechselwirkungen.



Martina Ondina Soldini schloss 2021 ihr Masterstudium in Physik an der ETH Zürich ab und ist seitdem Doktorandin an der Universität Zürich in der Gruppe von Titus Neupert. Ihre Forschung beschäftigt sich mit Quantenmaterialien mit starken Wechselwirkungen und ihren topologischen Eigenschaften.



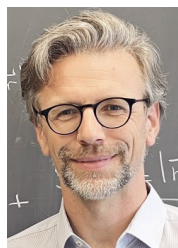
Felix Küster studierte Physik in Jena und trat 2018 eine Stelle als Doktorand am Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik in der Gruppe für Tieftemperatur-Rastertunnelmikroskopie unter Paolo Sessi an. Als experimenteller Physiker forscht er im Rahmen seiner Promotion an Wechselwirkungen zwischen magnetischen Störstellen in Supraleitern.



Paolo Sessi promovierte 2010 am Polytechnikum Mailand und ist seit 2018 Gruppenleiter am Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik in Halle. Er erforscht die elektronischen und magnetischen Eigenschaften von Oberflächen, vor allem mit Hilfe der Rastertunnelmikroskopie.



Stuart Parkin ist Direktor am Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik in Halle. Bevor er der Max-Planck-Gesellschaft beitrug, war er IBM Fellow am IBM Almaden Research Center in San Jose, Kalifornien. Seine Forschungsinteressen reichen von Spintronik, unkonventioneller Supraleitung, topologischen und chiralen Materialien bis hin zu Iontronik mit einem Schwerpunkt auf der grundlegenden Erforschung neuartiger Speicher- und Logikgeräte.



Titus Neupert promovierte 2013 an der ETH Zürich und wurde nach dreijährigem Postdoktorat in Princeton 2016 als Professor für theoretische Festkörperphysik an die Universität Zürich berufen. Seine Forschung ist auf Supraleitung, topologische Zustände von Materie sowie numerische Methoden zu deren Beschreibung fokussiert.

### Anschriften

Prof. Dr. Titus Neupert, Physik-Institut, Universität Zürich, Winterthurerstrasse 190, 8057 Zürich, Schweiz. Titus.Neupert@physik.uzh.ch, Glenn.Wagner@physik.uzh.ch, Martina.Soldini@physik.uzh.ch

Dr. Paolo Sessi, Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik, Weinberg 2, 06120 Halle (Saale), Deutschland. Paolo.Sessi@mpi-halle.mpg.de, Felix.Kuester@mpi-halle.mpg.de, Stuart.Parkin@mpi-halle.mpg.de