

Überraschende Physik mit einfachen Mitteln

Der Festkörperphysiker Prof. Christian Pfleiderer und sein Team haben dort genauer hingeschaut, wo Forschern seit Jahrzehnten nichts Besonderes aufgefallen war. Und sie entdeckten überraschende Phänomene, die ein ganz neues Arbeitsgebiet begründeten. Es ist so neu, dass es noch nicht einmal einen richtigen Namen hat

Könnte man die Richtung der Elektronenspins an einer Metalloberfläche mit bloßem Auge erkennen, würde sich dieses Bild darbieten, wenn man die Materialien betrachtet, die Christian Pfleiderer und seine Mitarbeiter untersuchen: Die Spins bilden regelmäßige Wirbel aus

Link
www.e21.ph.tum.de

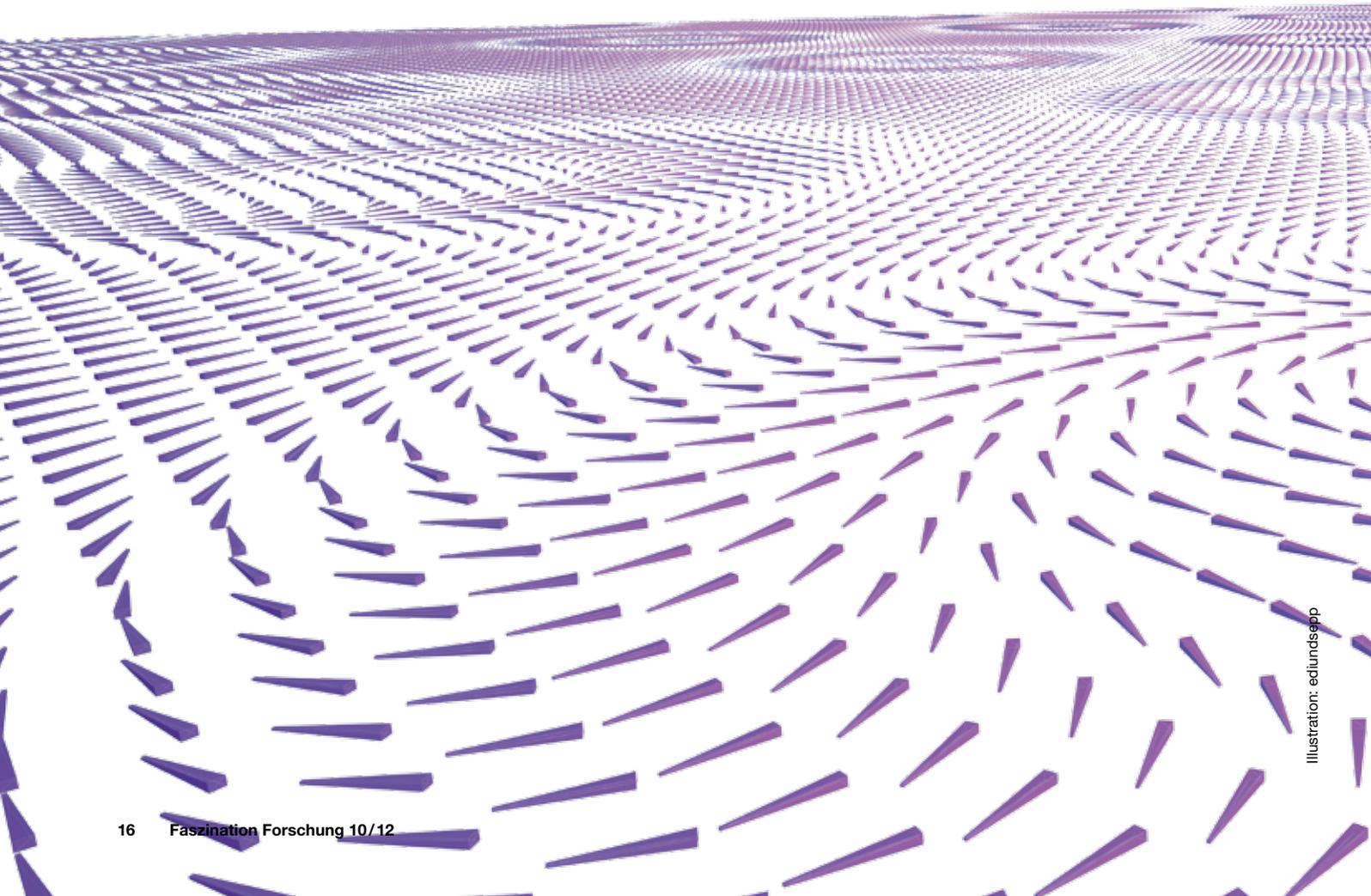


Illustration: edmundsepp

Auf dem Arbeitstisch liegen kleine, mattgraue Metallstückchen, die völlig unscheinbar wirken. Durch eine besondere Eigenart haben sie aber in der letzten Zeit in der wissenschaftlichen Welt Furore gemacht: Kühlt man sie fast bis zum absoluten Nullpunkt und bringt sie in ein Magnetfeld, dann zeigen sie plötzlich ein völlig anderes magnetisches Verhalten. Heute weiß man, dass sie winzig kleine, regelmäßig angeordnete, äußerst stabile Magnetwirbel ausbilden, aber das musste man erst einmal heraus-

finden. Christian Pfleiderer, seit Ende 2004 Professor an der TU München, und seine Mitarbeiter hielt diese Aufgabe fast drei Jahre lang in Atem. Und sie ist noch längst nicht abgeschlossen, ganz im Gegenteil: „Wir haben da ein richtig großes Fass aufgemacht“, sagt der 46-jährige Festkörperphysiker. Ende vergangenen Jahres erhielt er 2,2 Millionen Euro vom European Research Council (ERC), um die Arbeiten zu vertiefen und Potenziale für praktische Anwendungen auszuloten. ▷

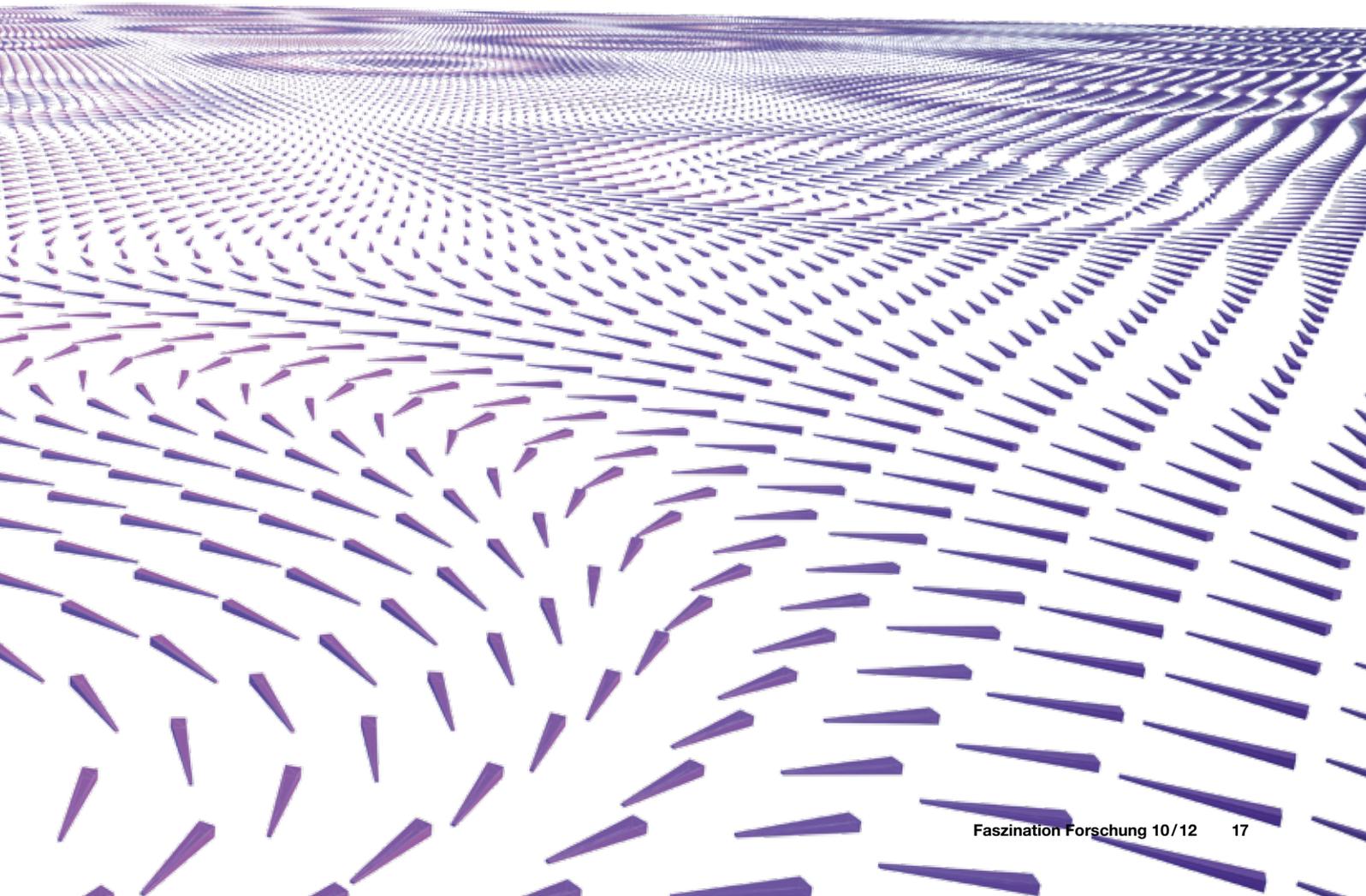




Foto: Naeser, MPI für Quantenoptik; Grafik: TUM

Christian Pfeleiderer bei der Vorbereitung der Messeinrichtung. Sie enthält die Materialprobe, die anschließend bei sehr tiefen Temperaturen im Garchingener Forschungsreaktor einem Neutronenstrom ausgesetzt wird

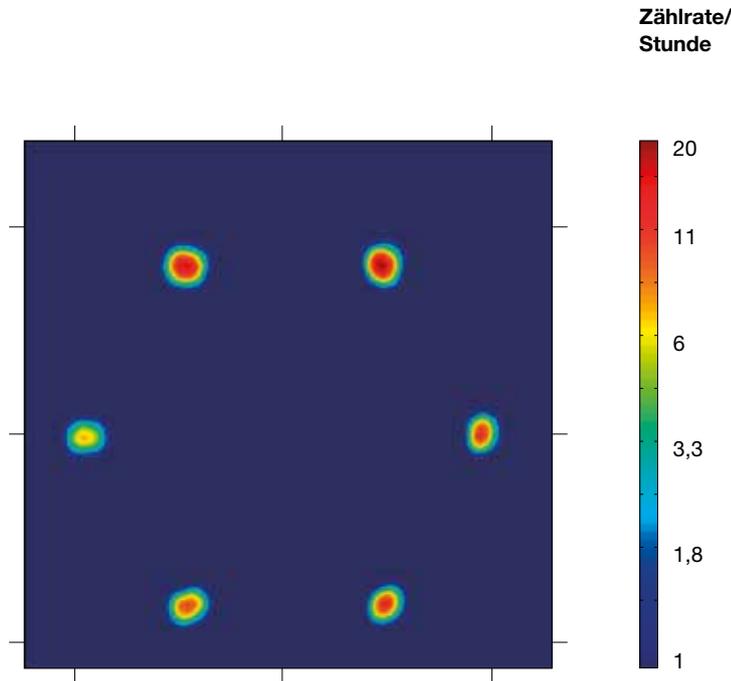
Ein neues Arbeitsgebiet entsteht

In der Wissenschaft – auch in der Physik – gibt es immer wieder Modethemen, die eine hohe Anziehungskraft auf Forscher ausüben und deren Beliebtheit wächst. Die Nanotechnik gehört dazu oder auch die Kurzzeitphysik. Nichts von alledem macht Christian Pfeleiderer. Seine Arbeit kann man in einem kleinen Team schaffen – ganz im Gegensatz zu den großen Kollaborationen beispielsweise in der Teilchenphysik, in denen Hunderte von Forschern zusammenarbeiten. „Es gibt eben auch außerhalb typischer Modethemen oder der üblichen monumentalen Fragestellungen extrem viele spannende Dinge zu entdecken“, betont er, „und man kann auch mit relativ einfachen Mitteln ganz tolle Physik machen.“

Genau dies ist ihm und seinem Team gelungen, und daraus entsteht nun ein neues Arbeitsgebiet. Es gehört zu einem Bereich der Physik, der den sperrigen Namen „Stark korrelierte Elektronensysteme“ trägt. Hier lassen sich nicht nur bereits bekannte Phänomene im Detail untersuchen und aufklären, sondern noch neue entdecken. Wissenschaftler sprechen von emergenten Eigenschaften und meinen damit Erscheinungen, die in einem System ganz spontan unter bestimmten Bedingungen auftauchen und durch das

Zusammenspiel seiner Elemente entstehen, ohne dass man sie aus deren Eigenschaften vorhersehen konnte. Dazu gehören beispielsweise das plötzliche Gefrieren von Wasser zu Eis, die Supraleitung oder auch das Entstehen von Bewusstsein im menschlichen Gehirn. In Bezug auf die Materialforschung steigen mehr und mehr Gruppen in Deutschland und weltweit auf dieses Teilgebiet ein. Sie suchen gezielt nach Materialien, die diese Eigenschaften zeigen, „da geht jetzt die Post ab“. Aber so einfach, wie Pfeleiderer es mit einer gewissen Bescheidenheit darstellt, sind die Arbeiten natürlich nicht. Es gehört viel Know-how dazu. Der Blick muss darauf vorbereitet sein, das Neue zu erkennen, und man braucht manchmal ein ungewöhnlich großes Messgerät wie den Forschungsreaktor München II (FRM II), um die physikalischen Geheimnisse der emergenten Eigenschaften mikroskopisch zu entschlüsseln.

Es beginnt schon mit der richtigen Auswahl der Materialien und der Herstellung hochreiner Einkristalle – eine Kunst für sich. Nicht jedes Metall ist geeignet, aber es sind keineswegs nur neue Substanzen, die man sich anschaut. „Wir betrachten auch viele Materialien, die man seit Jahrzehnten kennt, aber eben unter neuen Gesichtspunkten“, sagt Pfeleiderer. Er interessiert sich dafür, seit er an der britischen Uni-



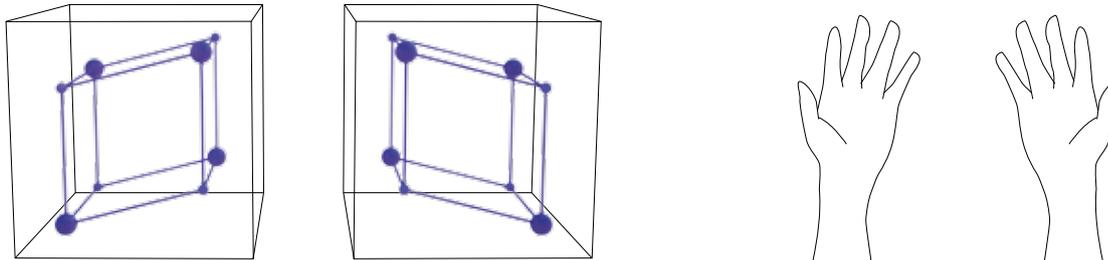
Sechs verräterische Punkte: Dieses Muster kam durch die Neutronenstreuung am Forschungsreaktor zustande. Es deutet auf eine regelmäßige magnetische Struktur hin, die zunächst einmal niemand erklären konnte

versität Cambridge promovierte und dort in Pionierarbeiten zum ersten Mal magnetische Phasenübergänge bei extrem tiefen Temperaturen als Funktion eines Drucks oder Magnetfelds untersuchte. „Wir stellten in unseren Experimenten fest, dass derartige Übergänge auch bei höheren Temperaturen starke Auswirkungen haben“, so der Physiker. Er entschloss sich deshalb, diese Richtung weiter zu verfolgen, auch später, als er an der TUM eine neue Arbeitsgruppe aufbaute, die sich mit magnetischen Materialien beschäftigte.

Völlig unerwartete Eigenschaften

Die theoretische Erklärung der neu entdeckten Vorgänge ist kompliziert, weil die Theorie der Metalle äußerst anspruchsvoll ist. Denn das einfache Bild, das man normalerweise von Stromleitern hat, beschreibt die Wirklichkeit nur unzureichend. Sicherlich ist richtig, dass Leitungselektronen sich im Kristallgitter bewegen können und beim Anlegen einer Spannung verschoben werden. Hinzu kommt aber, dass sich diese Elementarteilchen aufgrund ihrer Ladung und ihres Spins (einer Art quantenmechanischem Drill) so stark gegenseitig beeinflussen, dass man sie häufig gar nicht mehr voneinander unterscheiden kann. „Es müssen mehrere theoretische Konzepte ineinandergreifen,

um ein Vielteilchensystem wie das der Elektronen in einem Festkörper zu beschreiben“, sagt Pfeleiderer. „So kommt es eben häufig vor, dass die Elektronen am Schluss als Kollektiv völlig neue, unerwartete Eigenschaften entwickeln.“ Alles in allem ein relativ aufwendiges Theoriegebäude, in dem Konzepte aus der Elementarteilchenphysik und der Physik von Polymeren oder Flüssigkristallen zusammenspielen. Noch komplizierter wird es, wenn man mit Materialien arbeitet, die zwar ein regelmäßiges Kristallgitter besitzen, aber gleichzeitig eine händische Symmetrie. Das heißt, es gibt zwei Arten von Gitteraufbau, die sich nicht durch Drehen oder Verschieben ineinander überführen lassen, ebenso wie die beiden Hände des Menschen. Schon 1905 hat der britische Physiker Lord Kelvin solche Systeme als chiral bezeichnet. Mangan-Silizium ist so eine Substanz, eine Legierung, bei der die Mangan- und Siliziumatome entweder in einer rechtshändigen oder linkshändigen Struktur auskristallisieren. „An sich ist dieses Material sehr gut verstanden. Es wird ja schließlich seit vielen Jahrzehnten intensiv untersucht“, sagt Pfeleiderer. Dennoch entdeckten er und sein Team bei Experimenten massive Unregelmäßigkeiten, die auf ein anomales Metall hinweisen, bei dessen Beschreibung alle traditionellen Vorstellungen versagen. ▷



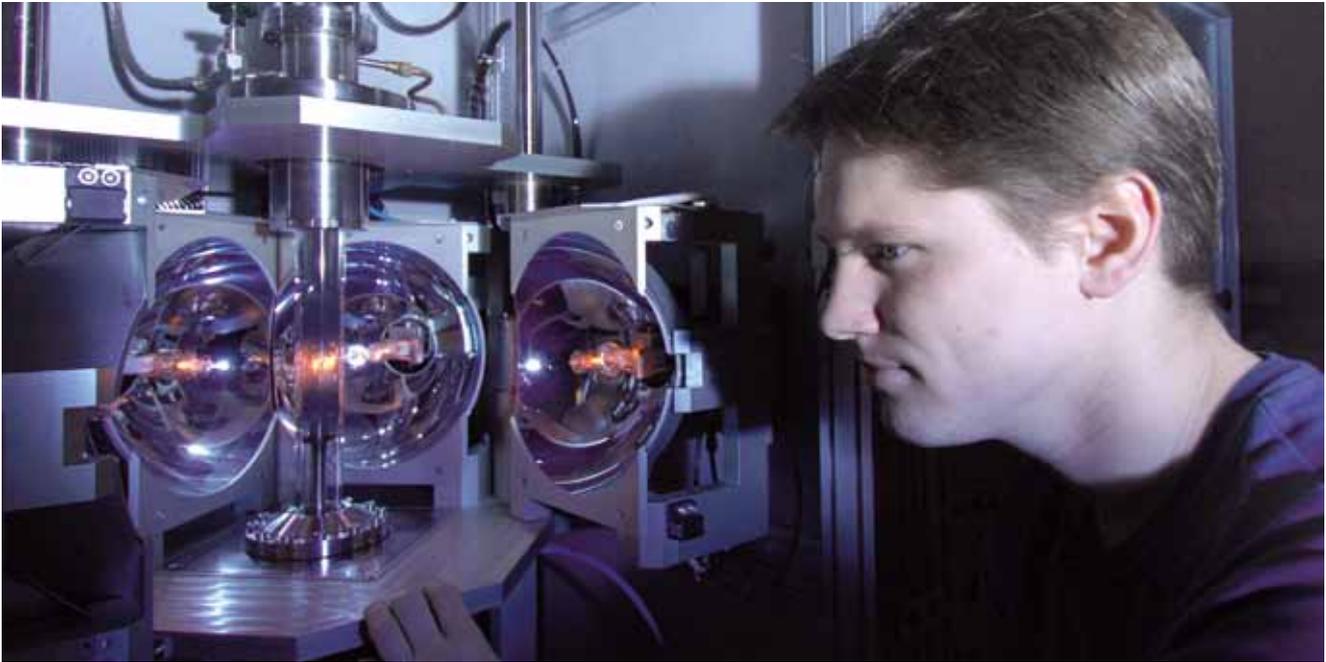
Chirale Materialien haben eine händische Symmetrie. Das heißt, sie kommen in zwei Arten vor, deren Gitteraufbau sich nicht durch Drehen oder Verschieben ineinander überführen lässt, ebenso wie die beiden Hände des Menschen

Eine völlig andere Fragestellung verfolgten die Physiker im Jahr 2008 im gleichen Material. Hier ging es darum, einen Vorschlag des theoretischen Physikers Prof. Achim Rosch von der Universität zu Köln zu untersuchen, nämlich ob man die magnetische Ordnung in einem Metall durch einen elektrischen Strom verändern kann. Etwas Derartiges war bisher noch nie beobachtet worden. Ihre Untersuchungen zu dieser Frage machten Pfeleiderer und sein Team im Garching Forschungsreaktor mit Neutronen. Diese elektrisch neutralen Teilchen eignen sich gut, um magnetische Eigenschaften zu untersuchen, denn sie besitzen einen Spin, werden also durch Magnetfelder beeinflusst. Pfeleiderer schätzt die Möglichkeiten am FRM II, der nur wenige Meter von seinem Büro in der Fakultät für Physik entfernt ist: „Das ist ein toller Zugang zu einer weltweit führenden Großforschungsanlage. Wir können mit den Materialien, die wir in unseren Kristallzüchtungslabors herstellen, direkt hinübermarschieren und mit Neutronen die Kristallstruktur, die magnetische Struktur, deren Dynamik und viele andere Eigenschaften schneller als irgendeine andere Gruppe weltweit untersuchen.“

Eine unerwartete Wendung nahm die Suche nach strominduzierten Veränderungen einer magnetischen Ordnung,

als die beteiligten Doktoranden Sebastian Mühlbauer und Florian Jonietz das Neutronenstreuexperiment anders als geplant aufbauten. Sie hatten das Magnetfeld für die Untersuchungen am Instrument MIRA, das von Prof. Peter Böni und Mitarbeitern am FRM II entwickelt wurde, parallel anstatt wie sonst üblich senkrecht zum Neutronenstrahl eingestellt. Und so kam es, dass die Physiker äußerst ungewöhnliche Messergebnisse erhielten. „Auf einmal sahen wir auf dem Bildschirm einen Ring aus sechs Punkten, der bei einem elektrischen Strom um einen kleinen Winkel verkippt wurde“, erzählt der 32-jährige Sebastian Mühlbauer. Zufälligerweise war das am 1. April, sodass Pfeleiderer zunächst an einen Aprilscherz des Doktoranden glaubte. Doch das sechseckige Muster war tatsächlich sichtbar, wie die Wiederholung der Experimente zeigte, genauso wie die Verkipfung bei Stromfluss. Und zwar bei einer Temperatur von $-245,15$ Grad Celsius und einem Magnetfeld von $0,2$ Tesla. Das deutete auf eine regelmäßige magnetische Struktur hin, die zunächst niemand erklären konnte. Und zum ersten Mal hatte ein elektrischer Strom einen sichtbaren Einfluss auf eine magnetische Struktur.

Es folgten weitere Experimente und intensive Diskussionen mit den theoretischen Physikern um Achim Rosch. Bald



Dr. Sebastian Mühlbauer an der Apparatur zur Herstellung von Einkristallen mit dem chiralen Gitteraufbau. Der Physiker hatte in seiner Doktorarbeit deren außergewöhnliche magnetische Eigenschaften untersucht

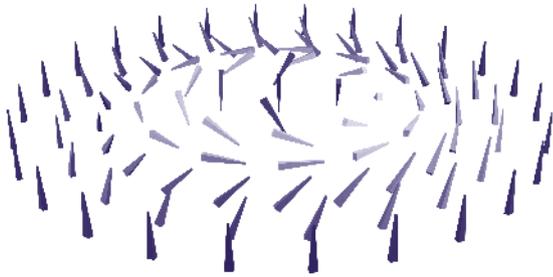
war klar, dass die Kristallstruktur zu chiralen magnetischen Wechselwirkungen führte, die für die seltsamen Phänomene verantwortlich sein mussten. Allmählich kristallisierte sich die Vermutung heraus, dass die Leitungselektronen die magnetische Struktur deshalb beeinflussen konnten, weil diese aus regelmäßig angeordneten kleinen Wirbeln bestand, ein Phänomen, das man vorher noch nicht gesehen hatte. Diese Wirbel sind sehr stabil und verlaufen parallel zum äußeren Magnetfeld durch die gesamte Probe hindurch. Dreht man das Material im Magnetfeld, verändert sich die Richtung der Wirbelfäden – sie bleiben immer parallel dazu. Die Kölner rechneten diese Hypothese durch, und tatsächlich konnten sie die Experimente der Münchner erklären. „Die Wirbelfäden verhalten sich wie ein magnetischer Kristall, der sich in einem festen Körper nahezu frei bewegen kann“, sagt Sebastian Mühlbauer.

Bessere Datenspeicherung

Besonders wichtig an den magnetischen Wirbelfäden dürfte jedoch sein, dass die Entdeckung von Pfeleiderer und Kollegen große Fortschritte in der Datenverarbeitung verspricht. Bereits 1959 hatte der legendäre Physiker Richard Feynman vorhergesagt, dass man Daten auf sehr winzigen

Strukturen speichern könne. „Es ist noch viel Platz da unten“ war der Titel seiner inzwischen weltberühmten Rede, die er am 29. Dezember 1959 im kalifornischen Pasadena als After-Dinner-Talk vor der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft hielt. Er rechnete darin unter anderem vor, dass es theoretisch möglich ist, die gesamten 24 Bände der Encyclopaedia Britannica auf einen Stecknadelkopf zu schreiben. Für jeden einzelnen Buchstaben stünden dann immer noch rund 1000 Atome zur Verfügung – eine ausreichende Menge, so meinte er. Seither gelang es, Datenspeicher um ein Vielfaches zu verkleinern, sodass man glaubt, in der nahen Zukunft an die physikalischen Grenzen des Machbaren zu stoßen.

Ein wichtiger Durchbruch, der 2007 mit dem Nobelpreis für Peter Grünberg und Albert Fert ausgezeichnet wurde, bestand in der Manipulation von elektrischen Strömen durch die magnetischen Eigenschaften ausgewählter Materialien. Die umgekehrte Vorgehensweise dagegen, nämlich mit elektrischen Strömen magnetische Eigenschaften zu verändern und damit Daten viel schneller als heute zu schreiben und zu verarbeiten, stellt ein bisher ungelöstes Problem dar, dem derzeit weltweit intensive Forschungsaktivitäten gewidmet sind. ▶

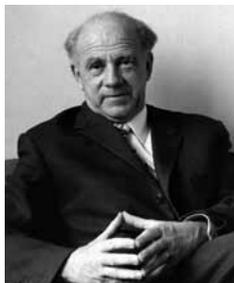


Hier ist ein einzelner Magnetwirbel herausgegriffen. Die Pfeile zeigen die Richtung der magnetischen Momente. Physiker sprechen auch von einem Skyrmion, nach dem britischen Physiker Tony Skyrme (siehe unten)

Die Begründer der Skyrmionen

Werner Karl Heisenberg
Physiker und
Nobelpreisträger

* 5. Dezember 1901
† 1. Februar 1976



Der Münchner theoretische Physiker Werner Heisenberg gilt als einer der Väter der Quantenphysik, für deren Begründung er 1932 den Nobelpreis für Physik erhielt. Bis heute ist er berühmt durch die Formulierung der Heisenbergschen Unschärferelation. Vor allem in seinen späteren Jahren beschäftigte er sich damit, eine Weltformel zu entwickeln, die alle Bausteine des Universums, also sowohl Teilchen wie Kräfte, gleichermaßen umfasst. Dabei verwendete er auch topologische Konzepte, und so erklärte er Teilchen als Knoten in einem Kontinuum. Erst später wurde klar, dass derartige Knoten auch in anderen Gebieten der Physik auftreten, etwa in der Festkörperphysik oder beim Quanten-Hall-Effekt. Bestimmte Knoten erhielten Anfang des 21. Jahrhunderts den Namen Skyrmionen.

Tony Hilton Roy Skyrme
Kernphysiker

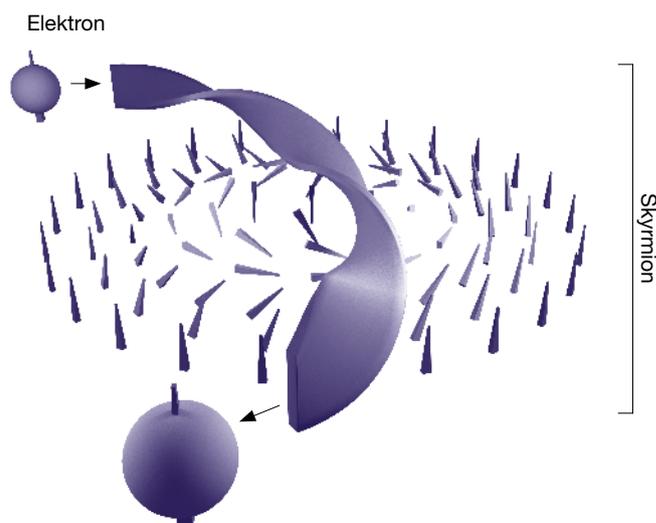
* 5. Dezember 1922
† 25. Juni 1987



Auch der Brite Tony Skyrme arbeitete als theoretischer Physiker. Während des Zweiten Weltkriegs beteiligte er sich am amerikanischen Entwicklungsprogramm für die Atombombe. Nach dem Krieg beschäftigte er sich mit theoretischer Kernphysik, beispielsweise mit Konzepten zum inneren Aufbau von Atomkernen. In den 60er-Jahren griff er die Idee der topologischen Knoten im Kontinuum auf und baute das Konzept weiter aus. Die von ihm vorgeschlagenen Quasiteilchen sind deshalb heute nach ihm benannt.

Behandelt man die magnetischen Eigenschaften eines Festkörpers als eine Art Kontinuum, so sind die magnetischen Wirbel, die Pfeilerer und Kollegen in Festkörpern entdeckt haben, genau solche Skyrmionen.

Bananenflanke: Fliegt ein Elektron über einen solchen Magnetwirbel hinweg, muss dessen Elektronenspin dem Wirbel folgen. Dabei führt es eine charakteristische Torkelbewegung aus, die eine Kraft erzeugt



Pfleiderers Idee dazu ist, die Entstehung der Magnetwirbel zu steuern und mit ihrer Hilfe Informationen zu manipulieren und zu speichern. Einen Fortschritt hat er schon vor Augen: Im Dezember 2010 berichtete seine Forschergruppe in „Science“, was es mit der Verkippung des Rings aus sechs Punkten auf sich hat, den sie bei einem Stromfluss in der Neutronenstreuung beobachtete. Es stellte sich nämlich heraus, dass sich die Wirbelfäden ab einer bestimmten Stromstärke losreißen und dass sie mit den Leitungselektronen mitschwimmen. Weil dafür nur extrem niedrige Stromstärken nötig sind, eröffnen sich ganz neue Möglichkeiten. „Wenn man magnetische Strukturen über Ströme kontrollieren kann, eröffnet sich langfristig eine ganz neue Art der Elektronik“, meint Rosch.

Weltweite Aufmerksamkeit

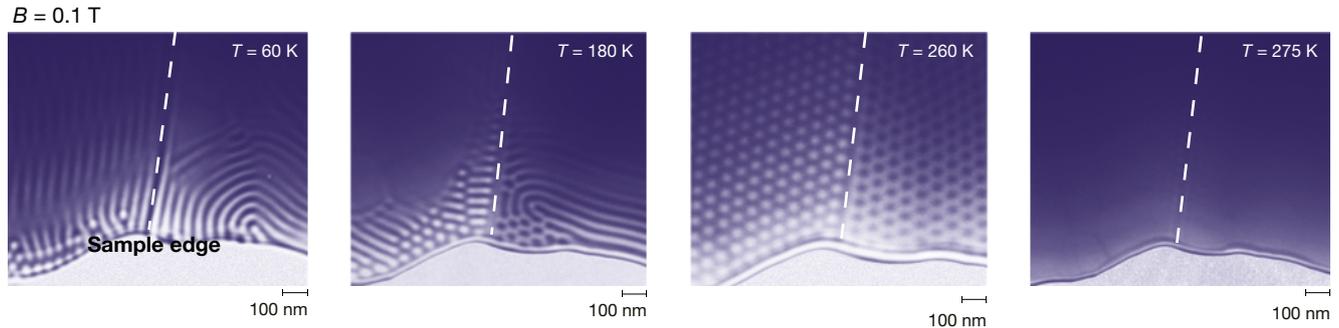
So spannend die neu entdeckten Materialeigenschaften sind: Mangan-Silizium selbst ist nicht für Anwendungen geeignet, da man sehr tiefe Temperaturen benötigt. Aber es ist nicht das einzige Material, das magnetische Wirbelfäden ausbildet. So ist es beispielsweise der Gruppe um Yoshinori Tokura vom Advanced Science Institute RIKEN und der Universität Tokio kürzlich gelungen, diese Er- ▶

Bananenflanke

Die Kräfte, die auf die magnetischen Wirbel wirken und sie losreißen, beruhen auf einem quantenmechanischen Effekt, der zu Gemeinsamkeiten mit einem Phänomen führt, das jedem Fußballspieler bekannt ist:

Schneidet man einen Ball an, sodass er sich im Flug schnell um die eigene Achse dreht, dann wird der Ball durch die sogenannte Magnuskraft von seiner geraden Flugbahn abgelenkt und fliegt als Bananenflanke um die Kurve. Der um seine Achse wirbelnde Ball reißt die Luft mit sich. Die mitgerissene Luft trifft auf die entgegenströmende und erzeugt auf der einen Seite des Balls einen Unterdruck und auf der anderen einen Überdruck, wovon der Ball abgelenkt wird.

Bei den magnetischen Wirbeln ist es ähnlich: Hier übernehmen effektive magnetische Wirbelströme die Rolle der Luftströmung. Sie klingen jedoch auch ohne Energiezufuhr niemals ab, und die Stärke der Wirbel nimmt einen durch die Gesetze der Quantenmechanik genau festgelegten Wert an. Auch die Kopplung der Wirbel an die Bewegung der Elektronen wird durch quantenmechanische Effekte bestimmt. Wenn ein Elektron durch diese Wirbelstruktur durchfliegt, muss der Elektronenspin dem Wirbel folgen. Dabei führt er eine charakteristische Torkelbewegung aus, die diese Kraft erzeugt.



Darstellungen: Y. Tokura, RIKEN

Der Gruppe um Yoshinori Tokura vom Advanced Science Institute RIKEN in Tokio gelang es, ähnliche Magnetwirbel mittels Transmissionselektronenmikroskopie in Eisen-Germanium bei Raumtemperatur nachzuweisen

scheinungen mittels der Transmissionselektronenmikroskopie in Eisen-Germanium, einer Substanz, die Mangan-Silizium stark ähnelt, bei Raumtemperatur nachzuweisen. Es wird sogar daran gearbeitet, durchsichtige Materialien zu finden, in denen man die magnetischen Wirbel mit Licht oder elektrischen Feldern beeinflussen kann, um elektronische Bauteile zu erschaffen, die ganz ohne elektrischen Strom auskommen. Und so suchen die Münchner nun, zusammen mit einer steigenden Anzahl anderer Arbeitsgruppen weltweit, weitere Materialien, die solche Wirbel zeigen. Das Geld vom ERC wird dabei helfen.

Voraussetzung sind bei dieser Suche immer die chiralen magnetischen Eigenschaften. Besonders an Oberflächen können sich – wegen ihrer Asymmetrie – magnetische Wirbel ausbilden. Und tatsächlich hat, motiviert durch die Arbeiten von Pfeleiderer und Kollegen, ein Team von Physikern um Prof. Stefan Heinze von der Universität Kiel und Prof. Roland Wiesendanger von der Universität Hamburg kürzlich die Existenz von Magnetwirbeln in einer Eisenschicht auf einem Iridiumsubstrat nachgewiesen, die nur eine Atomlage dick ist. Eine weitere spannende Frage, die die Münchner und Kölner Physiker nun angehen wollen, ist die, ob man auch einzelne Wirbel verschieben kann.

Selbst hinsichtlich der Aufklärung der anomalen metallischen Eigenschaften, die Pfeleiderer und Kollegen zunächst in Mangan-Silizium entdeckten, bieten die Wirbelfäden eine mögliche Erklärung, sodass sich der Kreis schließt. „Da tun sich ganz neue Welten auf“, sagt Pfeleiderer. „Es ist eine faszinierende Mischung aus Grundlagen- und angewandter Forschung.“

Was aber nach wie vor fehlt, ist ein griffiger Name für die neue Forschungsrichtung. Da der Ausdruck Spintronik nur einen Teil der neuen Erkenntnisse erfasst, wurde von den Herausgebern der englischen Zeitschrift „Nature Materials“ kürzlich der Name Skyrmionik vorgeschlagen. Der Begriff geht auf den britischen Physiker Tony Skyrme zurück. Der theoretische Kernphysiker griff in den 60er-Jahren eine Idee des Münchner Nobelpreisträgers Werner Heisenberg auf, die die Bausteine des Universums als Knoten in einem Kontinuum erklärt, woraufhin diese Teilchen Skyrmionen genannt wurden. Skyrme wurde für seine Arbeit die Hughes Medal der Royal Society verliehen. Behandelt man die magnetischen Eigenschaften eines Festkörpers als eine Art Kontinuum, so sind die magnetischen Wirbel, die Pfeleiderer und Kollegen entdeckt haben, genau solche Skyrmionen.

Brigitte Röthlein