

DIE VERMESSUNG DER NANOWIRBEL

Kollektive Schwingungen von Elektronen erzeugen elektromagnetische Felder. Daraus können Wirbel entstehen. Mit einer neu entwickelten Methode lassen sie sich genau vermessen.

Physische Objekte von Steinen bis zu Atomen können sich zu Strukturen anordnen. Und auch die Eigenschaften von Objekten können Strukturen bilden: Wasserwirbel oder Windhosen etwa sind solche gut sichtbaren Zusammenballungen, die aus Wasser in Wasser oder Luft in Luft bestehen. Bilden elektrische Feldlinien solche kreisförmigen Strukturen auf der Nanoskala, so spricht man bei diesen zunächst unsichtbaren Wirbelwindlingen von *Skyrmionen*. Sie lassen sich mithilfe von Elektronen auf einer Oberfläche erzeugen. Die dabei entstehenden starken elektrischen Felder sind zum Beispiel interessant für die Telekommunikation. Auch die Magnetismusforschung untersucht Skyrmionen, um sie zukünftig als Speichereinheiten in Computern nutzen zu können.

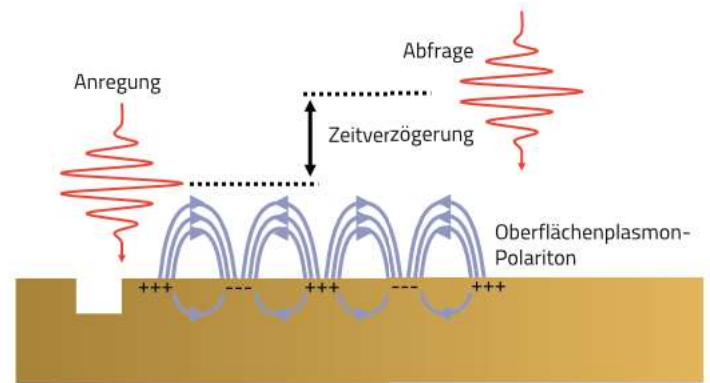
In dünnen Goldfilmen lassen sich Skyrmionen mithilfe von Licht erzeugen. Diese sogenannten plasmonischen Skyrmionen entstehen durch kollektive Schwingungen von Elektronen (Plasmonen), welche ein elektromagnetisches Feld erzeugen, das wiederum mit der Elektronenoszillation interagiert. Dieses komplexe Zusammenspiel wird als Oberflächenplasmon-Polariton (engl. surface plasmon polariton, SPP) bezeichnet. Plasmonische Skyrmionen können durch die Überlagerung von SPPs entstehen. Diese zu vermessen – und damit sichtbar zu machen – ist eine große Herausforderung, denn die plasmonischen Skyrmionen sind weniger als 400 Nanometer groß und ändern ihre Ausrichtung innerhalb von wenigen Femtosekunden.

KOMBINATION ZWEIER TECHNIKEN

Ein klarer Fall für die Anrege-Abfrage-Technik: Das elektrische Feld eines ersten Laserpulses lenkt an einer Kante oder einer Ritze einer Metalloberfläche ein Elektron aus seiner Ruhelage heraus. Dabei entsteht ein elektrisches Feld, das die benachbarten Elektronen mitzieht: Eine SPP-Welle bildet sich aus und wandert über die Oberfläche. Ein zweiter, zeitverzögerter Laserpuls wird dann mit dem elektrischen Feld des SPP überlagert. An den Stellen konstruktiver Interferenz kann die Strahlungsenergie Elektronen freisetzen. Bildet man die räumliche Verteilung der so emittierten Elektronen mit einem Photoemissions-Elektronenmikroskop (PEEM) ab, erlaubt dies Rückschlüsse auf das SPP zum Zeitpunkt der Abfrage. Um zeitaufgelöste Bilder der SPP zu bekommen, variiert man systematisch die Verzögerungszeit zwischen Anrege- und Abfragepuls. Diese „Nichtlineare Photoemissionsmikroskopie“ genannte Methode wurde erstmals vor gut 15 Jahren auf SPPs angewendet und seither kontinuierlich verbessert. Die Methode erlaubt aber keine Messung des gesamten elektrischen Feldes in allen drei Raumrichtungen. Damit fehlt auch der Zugang zu Informationen über die Orientierung plasmonischer Skyrmionen – das Bild der Nanowirbel bleibt unvollständig.

BERÜCKSICHTIGUNG DER POLARISATION

Unser Ansatz, dieses Problem zu lösen, war es, die Polarisation der abfragenden Laserpulse hinzuzuziehen. Dadurch konnten wir das gesamte elektromagnetische *Vektorfeld* rekonstruieren. In unse-



Durch die Rillen in der Goldstruktur kann ein Laserpuls ein Oberflächenplasmon-Polariton anregen, das über die Oberfläche läuft. Mit zeitlicher Verzögerung erfolgt dann die Abfrage.

rem Experiment haben wir die Laserpulse für Anrege und Abfrage in einem Interferometer getrennt und gegeneinander verzögert. Mithilfe optischer Bauteile konnten wir die Polarisationen der Anrege- und Abfragepulse dann unabhängig voneinander kontrollieren.

Als Probe diente ein winziger Goldkristall auf einem Siliziumträger. Mithilfe eines Ionenstrahls haben wir zunächst eine nahezu hexagonale Rillenstruktur in das Gold geschnitten. Ein zirkular polarisierter Anrege-Laserpuls sollte in dieser Geometrie ein hexagonales Gitter von plasmonischen Skyrmionen erzeugen. Um den Zustand des

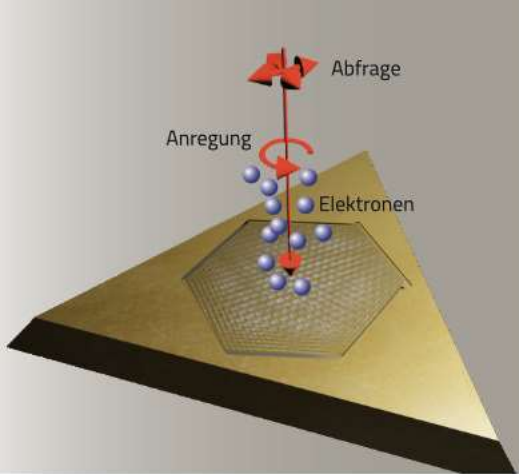
Ein Vektorfeld ist eine mathematische Funktion, die jedem Punkt im Raum einen Vektor zuordnet – etwa Richtung und Betrag der elektrischen Feldstärke.



In einem Interferometer werden Lichtwellen überlagert. Aus den resultierenden Interferenzen lassen sich Weglängenunterschiede sehr genau fest-beziehungsweise einstellen.

Zahlreiche Komponenten sind notwendig, um die Laser genau zu kontrollieren.





In dieser Struktur lassen sich dank des Rillennusters SPPs anregen und mithilfe des zweiten Laserpulses Elektronen freisetzen. Durch die Variation der Polarisation des zweiten Pulses kann man das gesamte Vektorfeld rekonstruieren.

licht es uns, die gesamte Komponente in der Ebene des elektrischen Feldes des SPP direkt aus den Daten zu

Systems kurze Zeit nach der Anregung abzufragen, schickten wir einen weiteren Laserpuls auf die Probe – in zwei

extrahieren: Die Interferenz des SPP mit dem Abfragepuls in x-Richtung ergibt die x-Komponente des Feldes, die Interferenz in y-Richtung ergibt die y-Komponente des Feldes. Die dritte (z-)Komponente ergibt sich mithilfe der Annahme, dass sich direkt über der Metalloberfläche keine freien Ladungen befinden, aus der *Maxwell-Gleichung*.

Experimenten: Wir nutzten beide Male die gleiche Zeitverzögerung, aber jeweils eine unterschiedliche Polarisation.

REKONSTRUKTION DER FELDVEKTOREN

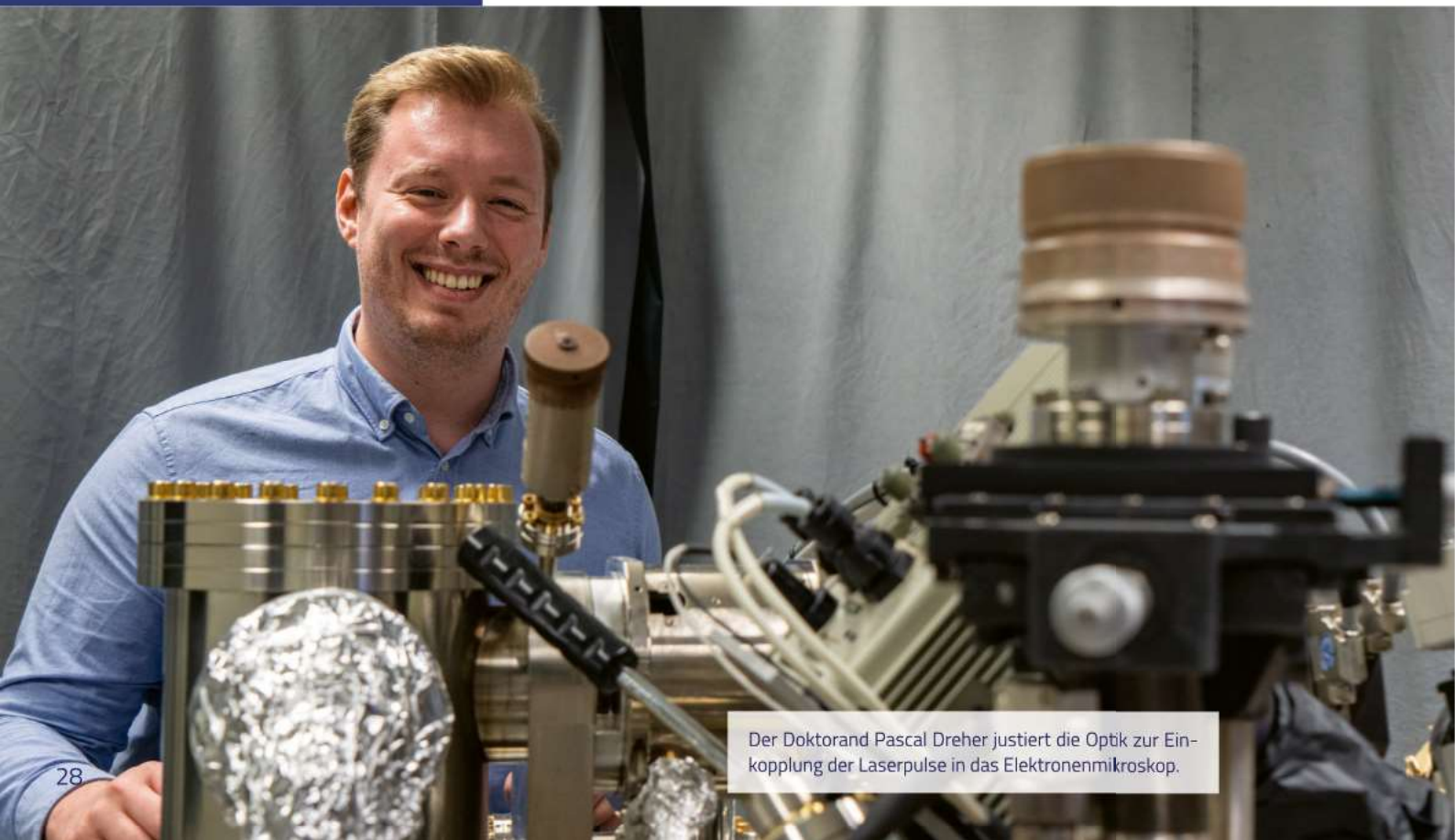
Leider sind die erhaltenen PEEM-Signale nicht ausschließlich auf die angeregten Schwingungen zurückzuführen, sondern enthalten auch Photoelektronen aus statischen und anderen Prozessen. Es bedarf also einer mathematischen Filterung, um die gewünschten Signale aus den Daten herauszuziehen. Dies gelingt mithilfe einer *Fourier-Transformation* und der plausiblen Annahme, dass das SPP-Feld deutlich schwächer ist als das elektromagnetische Feld des Abfrage-Laserpulses. Man erhält durch diese mathematischen Operationen ein Signal, das in der Probenebene liegt. Die

Messung des gleichen SPP mit zwei senkrechten Polarisationen ermög-

Bei der Fourier-Transformation wird ein wiederkehrendes, zeitabhängiges Signal als Summe von Schwingungen unterschiedlicher Frequenzen dargestellt. So erhält man einen Einblick in die Abhängigkeit des Signals von der Frequenz.

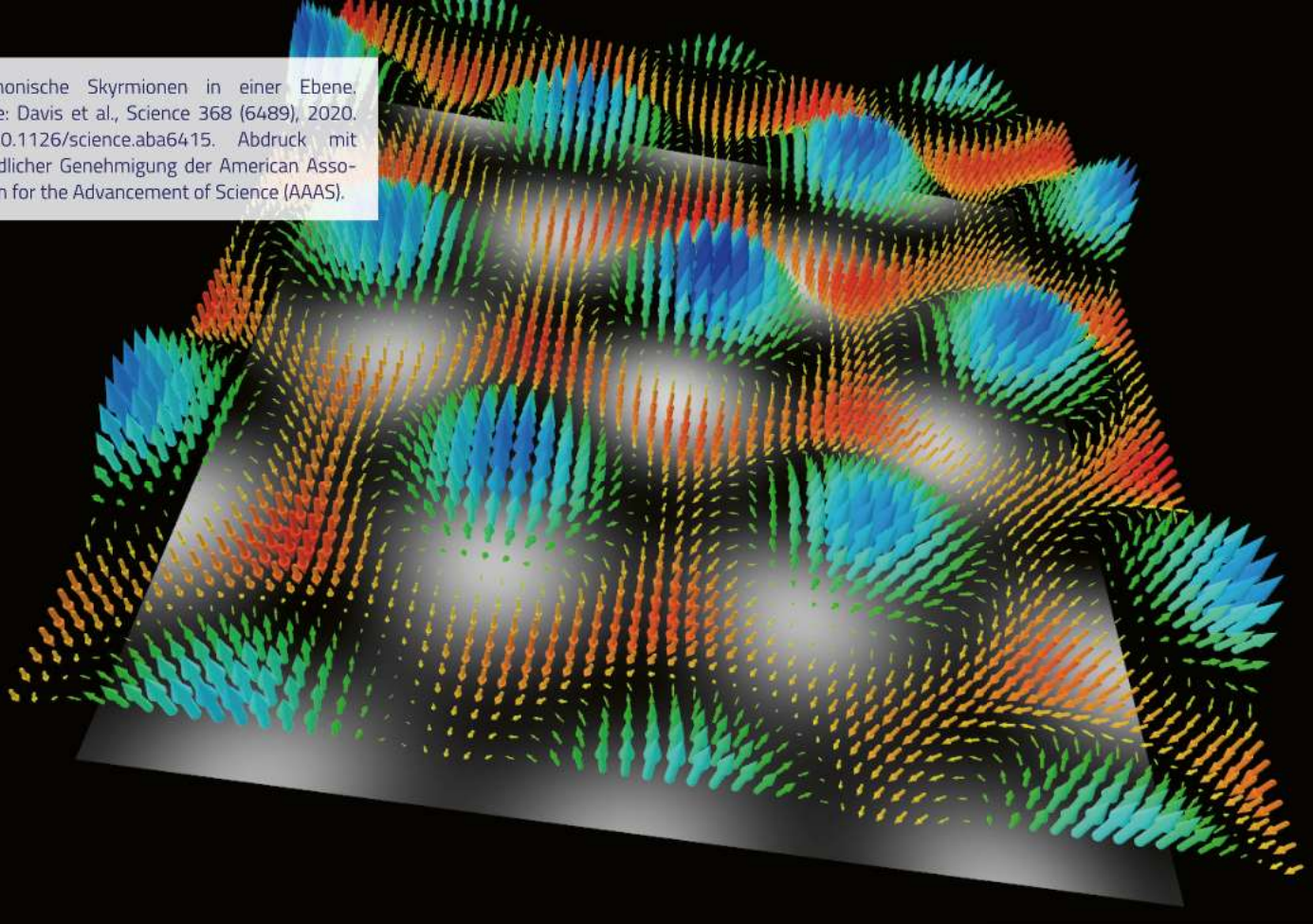
Die vier Maxwell-Gleichungen beschreiben elektromagnetische Felder. Eine dieser Gleichungen beschreibt das Aussehen der elektrischen Feldlinien in den drei Raumrichtungen in Form der sogenannten Divergenz. Sie ist ein Maß für das Auseinanderlaufen der Feldlinien und damit für die Quellstärke: An einer positiven Punktladung entstehen Feldlinien, die in alle Raumrichtungen fortstreben. Die Divergenz ist dann positiv. Die positive Ladung wäre in diesem Fall die Quelle elektrischer Feldlinien. Umgekehrt spricht man bei einer negativen Punktladung von einer Senke, die Feldlinien laufen hier zusammen, die Divergenz an diesem Punkt ist negativ. In unserem Fall konnten wir davon ausgehen, dass solche Quellen oder Senken direkt über der Oberfläche unseres Metalls überhaupt nicht existieren. Die Divergenz war demnach null.

Die ersten beiden Vektorkomponenten werden also direkt gemessen, die dritte berechnet. Damit ist es vollbracht: Das dreidimensionale SPP-Feld ist vollständig aus den Messungen rekonstruiert, und wir können uns in einem ultraschnellen Film ansehen, wie sich das Skyrmionengitter verändert: Die Vektoren des elektrischen Feldes wechseln, entsprechend dem schwingenden SPP-Feld,



Der Doktorand Pascal Dreher justiert die Optik zur Einkopplung der Laserpulse in das Elektronenmikroskop.

Plasmonische Skyrmionen in einer Ebene.
 Quelle: Davis et al., Science 368 (6489), 2020.
 DOI: 10.1126/science.aba6415. Abdruck mit
 freundlicher Genehmigung der American Association
 for the Advancement of Science (AAAS).

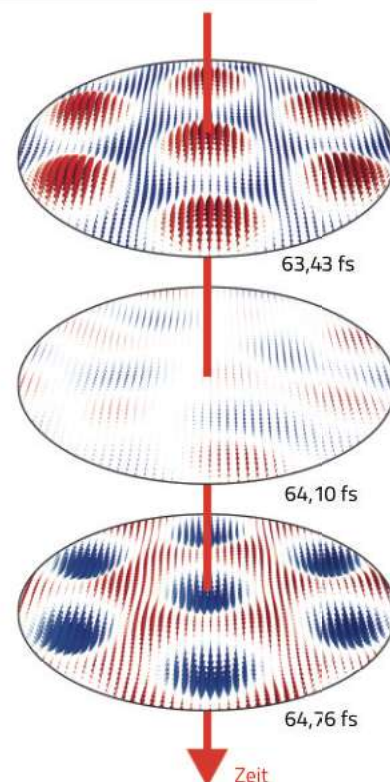


von nach oben zeigend zu nach unten zeigend.
 Darüber hinaus bleibt die Gesamtform des Gitters
 jedoch gleich.

POTENTIAL DER VEKTORMIKROSKOPIE

Die Vektormikroskopie bietet weitere Anwendungsmöglichkeiten, da jedes starke elektrische Feld optischer Frequenz an einer Oberfläche damit untersucht werden kann. Das macht sie zu einer neuen und leistungsfähigen Technik und zu einem wichtigen Werkzeug für die Nanophotonik, also den Anwendungen von Licht im ganz Kleinen.

Durch die Form der Rillen und der Wahl der Polarisation lassen sich zum Beispiel nicht nur plasmonische Skyrmionen erzeugen, sondern auch SPPs in einem Brennpunkt konzentrieren. Auf diese Weise entstehen sehr starke Felder, mit denen Elektronen beim Austritt aus dem Material in Wechselwirkung treten. Mit der Vektormikroskopie lässt sich also das Feld an der Oberfläche zum Zeitpunkt des Austritts genau untersuchen. Mithilfe der Elektronenemission werden im Mikroskop dann zusätzlich die Energie und die Richtung der emittierten Elektronen detektiert. Durch die Kombination der Vektormikroskopie mit der Elektronenemission erhält man Aufschluss über die Wechselwirkung des SPP mit den gebundenen Elektronen im Goldkristall und kann so etwas über Nichtgleichgewichtssituationen in Metallen lernen.



Durch die mathematischen Operationen können wir uns wie in einem Film ansehen, wie sich das Skyrmionen-Gitter verändert. Hier sind drei Zeitausschnitte gezeigt; der QR-Code führt zum Video.



Projektleitung: Frank Meyer zu Heringdorf