

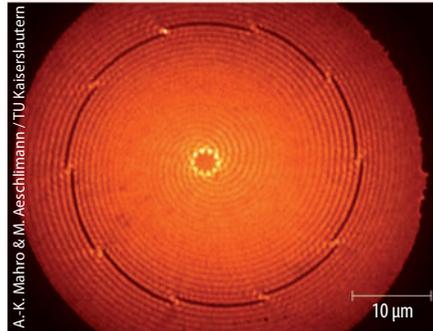
## ■ Plasmonen mit Drehsinn

Plasmonische Wellenfelder können nicht nur Wellenlängen im Nanometerbereich besitzen, sondern auch Wirbelstrukturen ausbilden.

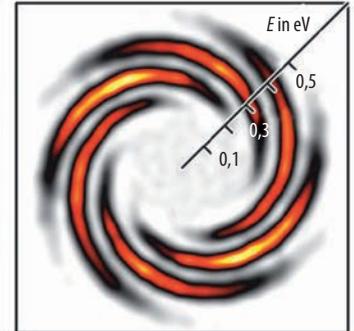
Prof. Dr. Christoph Lienau, Priv.-Doz. Dr. Petra Groß und Prof. Dr. Matthias Wollenhaupt, Institut für Physik, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Carl-Von-Ossietzky-Str. 9–11, 26129 Oldenburg

Oberflächen-Plasmon-Polaritonen, im Fachjargon auch „Plasmonen“ genannt, sind optische Elementaranregungen, die an der Grenzfläche zwischen einem Metall und einem umgebenden Dielektrikum existieren. Sie entstehen, wenn eine einfallende Lichtwelle die Leitungselektronen des Metalls zu kollektiven Dipol-Oszillationen anregt. Dabei breiten sich die abgestrahlten elektrischen Felder nicht frei in das umgebende Dielektrikum aus, sondern laufen als evaneszente Welle entlang der Grenzfläche. Sie wechselwirken wieder mit den Leitungselektronen, sodass sich eine gekoppelte Anregung aus Elektronenoszillationen und Licht ausbildet: das Plasmon.

Diese Plasmonen haben interessante Eigenschaften, die zu einer ganzen Reihe von vielversprechenden Anwendungen geführt haben. Zum einen können sie sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit über Distanzen von bis zu einigen Millimetern entlang der Materialoberfläche ausbreiten, bevor sie im Inneren des Metalls in Wärme umgewandelt werden. Zum anderen erlaubt es die Veränderung der Oberflächengeometrie, ihre Wellenlänge drastisch zu reduzieren.



Plasmonische Wirbelfelder entstehen, wenn kleine, spiralförmig angeordnete Spalte in einem dünnen Goldfilm mit einem Paar zirkular polarisierter, ultrakurzer Lichtimpulse beleuchtet werden (links). Die durch das Plasmonfeld emit-



tierten Photoelektronen lassen sich ortsaufgelöst nachweisen. Das rechte Bild zeigt Elektronenwirbel nach einer Multiphotonenionisation von Kalium-Atomen durch zwei entgegengesetzt zirkular polarisierte Femtosekunden-Laserimpulse.

Damit lassen sich an gekrümmten Oberflächen wie konischen Spitzen leicht und effizient lokalisierte Plasmonfelder mit Fleckgrößen von nur etwa 10 nm erzeugen [1, 2]. In den Spalten zwischen zwei metallischen Nanostrukturen sind sogar noch deutlich kleinere Fleckgrößen möglich [3]. Das ist hochinteressant für die optische Mikroskopie, Spektroskopie und ultraempfindliche Sensorik. Bei Beleuchtung plasmonischer Nanostrukturen mit ultrakurzen Lichtimpulsen lassen sich Elektronenimpulse erzeugen, welche die Grundlage für neue

Elektronenmikroskopie mit Femtosekunden-Zeitauflösung bilden [4, 5]. Regelmäßige Anordnungen von metallischen Nanostrukturen bzw. plasmonische Metaoberflächen mit maßgeschneiderten optischen Eigenschaften versprechen den Einsatz als optische Elemente beispielsweise in hochauflösenden Kameras [6].

Eine weitere, noch wenig untersuchte Eigenschaft plasmonischer Wellenfelder besteht darin, Wirbelstrukturen auszubilden. Diese ähneln denen, die von Wasser- oder Lichtwellen bekannt sind. Ihr Nachweis ist nun in einer israelisch-deutschen Zusammenarbeit gelungen [7]. Dabei untersuchten die Wissenschaftler Plasmonfelder, die durch die Beleuchtung von spiralförmig angeordneten Spalten an der Oberfläche eines dünnen Goldfilms angeregt werden. Die Spalte erzeugen als miniaturisierte Lichtstreuer an der Oberfläche des Goldfilms die Plasmonen, die sich dann entlang der Oberfläche ausbreiten. Durch Photoelektronen-Mikroskopie gelang es, die erzeugten Plasmonen ortsaufgelöst nachzuweisen [8, 9]. Bei dieser Methode werden Elektronen durch das lokale elektrische Feld, genauer durch die Feldkomponente, die senkrecht zur Oberfläche steht, durch einen Zwei-Photonen-

### KURZGEFASST

#### ■ Kein Untergrund im Untergrund

Das hochempfindliche Experiment GERDA soll im italienischen Untergrundlabor Gran Sasso den neutrino-losen doppelten Betazerfall ( $0\nu\beta\beta$ ) nachweisen. Dabei dient hochreines Germanium, angereichert mit dem Isotop  $^{76}\text{Ge}$ , als Zerfallsquelle und als Detektor. Für die Abschirmung von störendem Untergrund sorgen flüssiges Argon, hochreines Wasser und das Bergmassiv über dem Labor. In den ersten fünf Monaten ließ sich bei untergrundfreien Messungen kein  $0\nu\beta\beta$ -Zerfall beobachten. Daraus ergibt sich als Untergrenze der Halbwertszeit des  $0\nu\beta\beta$ -Zerfalls von  $^{76}\text{Ge}$   $5 \cdot 10^{25}$  Jahre – das  $10^{15}$ -fache Alter des Universums. *The GERDA Collaboration, Nature* **544**, 47 (2017)

#### ■ Seltsame Zerfälle und Teilchen

Am LHCb-Experiment des CERN gelang kürzlich der Nachweis fünf angeregter Zustände des  $\Omega_c^0$ -Baryons, bestehend aus einem Charm- und zwei Strange-Quarks. Die Anregungsenergien bzw. Massen liegen zwischen 3000 und 3119 MeV. Die extrem kleinen Produktionsraten und komplexen Zerfallsmodi machten den Nachweis äußerst schwierig. Auch die ALICE-Kollaboration berichtete neue Ergebnisse zu seltsamen Hadronen: In Protonenkollisionen werden viel mehr Teilchen mit mindestens einem Strange-Quark erzeugt als erwartet – ein Hinweis, dass bei der Kollision ein Quark-Gluon-Plasma entsteht. *LHCb Collaboration, Phys. Rev. Lett.* **118**, 182001 (2017); *ALICE Collaboration, Nat. Phys.*, DOI: 10.1038/nphys4111 (2017)

Prozess emittiert. Die Ortsauflösung betrug 30 nm und erlaubte es, räumliche Veränderungen der Emission sehr genau abzubilden.

Im Experiment dienen zwei zirkular polarisierte, zeitverzögerte Lichtimpulse dazu, die Photoelektronen zu erzeugen. Diese wiederum erzeugen ein Plasmonfeld, dessen räumliche Struktur deutlich von der Relativphase der beiden Lichtimpulse abhängt. Im Fall einer Spaltspirale mit einem Durchmesser von etwa vier Mikrometern ist deutlich zu erkennen, wie sich Zeitverschiebungen zwischen den zwei Impulsen von weniger als einer Femtosekunde, also viel weniger als einem optischen Zyklus (etwa 2,7 fs), auf die räumliche Struktur des Emissionsbildes auswirken. In einer Zeitsequenz dreht sich das Plasmonfeld spiralförmig nach innen. Bei einer größeren Archimedes-Spirale mit einem Durchmesser von rund 20  $\mu\text{m}$  (Abb.) reicht die zeitliche Auflösung des Experiments von etwa 20 fs aus, um den Einfluss der Propagation der Plasmonwellen von den Spalten zum Emissionsort aufzulösen. Damit hängt das Emissionsbild nicht nur von der Relativphase der einfallenden Lichtimpulse, sondern auch von deren Zeitverzögerung ab. Hier breiten sich Plasmonwellen im Wesentlichen an der Grenzfläche zwischen dem Metallfilm und der umgebenden Luft aus. Deren Wellenlänge ist damit nur geringfügig kleiner als die der entsprechenden Lichtwelle im Vakuum. Das ändert sich beim Nachweis von Plasmonwellen, die sich an der Grenzfläche zwischen Goldfilm und darunterliegendem Siliziumsubstrat ausbreiten. Hier reduziert sich die Wellenlänge der Plasmonen etwa um einen Faktor 4, was sich experimentell überzeugend bestätigen ließ.

Die Arbeit belegt, dass es möglich ist, Plasmonfelder mit Wirbelcharakter zu erzeugen und mittels Photoelektronenemissions-Mikroskopie nachzuweisen. Ein nächster Schritt könnte sein, diese sich drehenden Plasmonfelder auf Dimensionen unterhalb von 100 nm einzuschränken. Das könnte dazu beitragen, neue nanoskopische

optische Pinzetten zu entwickeln, die levitierten Teilchen einen Drehimpuls aufprägen. Interessanter noch erscheinen Anwendungen in der optischen Spektroskopie: Die Möglichkeit, plasmonische Felder mit ungewöhnlichen Polarisationszuständen zu erzeugen, könnte die Detektion von chiralen optischen Übergängen erlauben, die bisher verborgen blieben.

Vielleicht jedoch liegt der Schlüssel zur Umsetzung der neuen Beobachtungen auch darin, Anregungen aus angrenzenden Forschungsfeldern zu übernehmen. So wurde beispielsweise vorhergesagt, dass bei der Photoionisation von Helium mit zwei zeitverzögerten, entgegengesetzt zirkular polarisierten Attosekunden-Laserimpulsen Elektronenwirbel in Form einer archimedischen Spirale entstehen [10]. Kürzlich gelang der experimentelle Nachweis dieser Wirbel [11]. Der physikalische Mechanismus beruht dabei auf der Erzeugung eines quantenmechanischen Überlagerungszustandes aus zwei Elektronenwellenpaketen mit entgegengesetztem Drehimpuls. Das Zusammenwirken der azimuthalen Interferenz der beiden Drehimpulszustände und der radialen Phase, die aus der quantenmechanischen Zeitentwicklung des ersten Elektronenwellenpakets resultiert, verleiht dem Elektronenwirbel die Form einer archimedischen Spirale. Die Übertragung dieser Erkenntnisse auf plasmonische Wirbel könnte interessante Perspektiven eröffnen.

**Christoph Lienau, Petra Groß und Matthias Wollenhaupt**

- [1] E. J. Sanchez, L. Novotny und X. S. Xie, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 4014 (1999)
- [2] C. Ropers et al., *Nano Lett.* **7**, 2784 (2007)
- [3] F. Benz et al., *Science* **354**, 726 (2016)
- [4] A. Feist et al., *Nature* **521**, 200 (2015)
- [5] J. Vogelsang et al., *Nano Lett.* **15**, 4685 (2015)
- [6] M. Khorasaninejad et al., *Science* **352**, 1190 (2016)
- [7] G. Spektor et al., *Science* **355**, 5 (2017)
- [8] A. Kubo et al., *Nano Lett.* **5**, 1123 (2005)
- [9] M. Aeschlimann et al., *Nature* **446**, 301 (2007)
- [10] J. M. N. Djiokap et al., *Phys. Rev. Lett.* **115**, 113004 (2015)
- [11] D. Pengel et al., *Phys. Rev. Lett.* **118**, 053003 (2017)