

gie auf. Zusammen mit dem unbesetzten Grundzustand beschreiben diese drei Zustände das Quantenpunktsystem. Wird der höherenergetische Ladungszustand mit einem Spin-up-Elektron besetzt, verweilt es dort eine charakteristische Zeit, bevor es in den niederenergetischen Spin-down-Zustand übergeht. Genau diese charakteristische Spin-Lebensdauer lässt sich mittels Resonanzspektroskopie bestimmen. Hierbei nutzt man aus, dass das Messsignal (**Abb. 1**, rechts) in einer Art „Morse-Code“ die Wahrscheinlichkeit verschlüsselt, mit der N Elektronen nach einem Zeitintervall t den Quantenpunktschaltkreis durchqueren [2]. Eine Besonderheit ist hierbei, dass die Autoren der ak-

tuellen Arbeit die Wahrscheinlichkeitsverteilung als Abweichung von einer Poisson-Verteilung auffassen, anstatt der üblichen Abweichung von einer Gauß-Verteilung [3]. Zwar sind beide Beschreibungen im Prinzip äquivalent. Da die gemessene Tunnelwahrscheinlichkeit jedoch eher einer Poisson-Verteilung ähnelt, die seltene Tunnelereignisse charakterisiert, ist diese Auswertung robuster gegenüber nicht-idealen Messungen [4].

Diese Arbeit zeigt somit eine neue Möglichkeit auf, die Eigenschaften einzelner Quantensysteme zu studieren. Eine erstmals angewandte, ausgefeilte theoretische Methode erlaubt es hierbei, Eigenschaften wie Lebensdauern oder Kohärenzzeiten von

Quantenzuständen zu bestimmen [1]. Diese spielen eine zentrale Rolle bei der Verwendung von Quantenpunkten in Quantenrechnern sowie in der Quantenkommunikation.

- [1] A. Kurzmann et al., Phys. Rev. Lett. **122**, 247403 (2019)
- [2] W. Belzig, Physik Journal, August/September 2005, S. 75
- [3] L. Mandel und E. Wolf, Optical Coherence and Quantum Optics, Cambridge University Press (2008)
- [4] D. Kambly et al., Phys. Rev. B **83**, 075432 (2011)

Autoren

Dr. Robert Hussein und **Prof. Dr. Wolfgang Belzig**, Universität Konstanz, Fachbereich Physik, Universitätsstr. 10, 78457 Konstanz

Ein Wirbelwind aus Licht

Erstmals ist es gelungen, einen Lichtpuls mit veränderlichem Drehimpuls zu erzeugen und nachzuweisen.

Sonja Franke-Arnold

Ein rotierender Kreisel wird mit der Zeit immer langsamer und verliert durch Reibung seinen Drehimpuls, bis er schließlich torkelnd umfällt. Doch was passiert, wenn der Kreisel völlig schwerelos und ohne jede Wechselwirkung im Raum schwebte? Laut Drehimpulserhaltung sollte er sich dann gleichmäßig und mit konstanter Drehgeschwindigkeit weiterdrehen. Wissenschaftler des JILA in Boulder, Colorado, haben – unterstützt von theoretischen Vorschlägen ihrer Kollegen an der Universität von Salamanca und dem Institut de Ciències Fotòniques in Spanien – einen „Kreisel“ aus Licht konstruiert [1]. Dieser dreht sich schneller und schneller – mit einem Drehimpuls, der sich innerhalb von zehn Femtosekunden verdoppelt – und die ultrakurzen Lichtpulse zeichnen sich durch ein so genanntes Selbst Drehmoment („self torque“) aus.

Licht und einzelne Photonen besitzen Energie, Impuls und Drehimpuls. Das lässt sich direkt aus Maxwells Theorie für elektromagnetische Wellen ableiten. Der Drehimpuls teilt

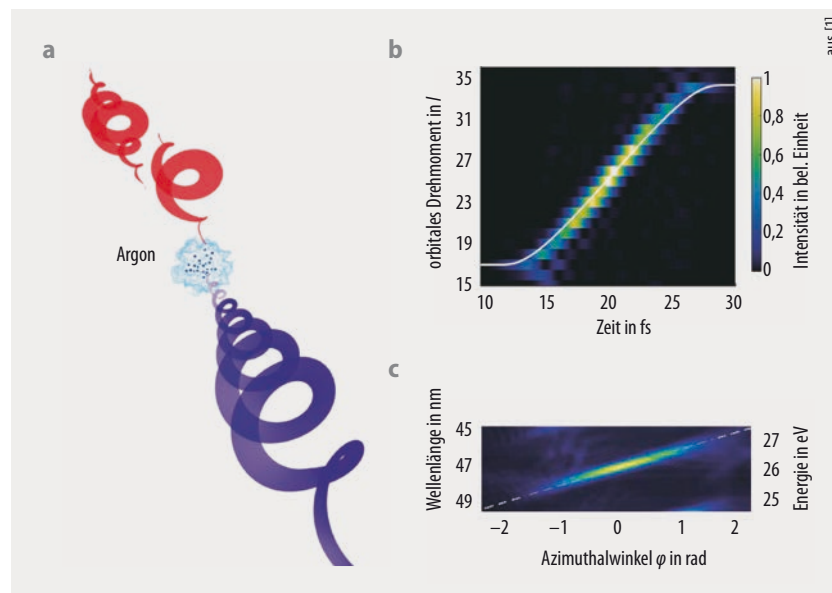


Abb. 1 Der EUV-Lichtpuls (a, blau) entsteht, nachdem zwei IR-Lichtpulse (rot) die Argon-Atome eines Gargets ionisiert haben. Das orbitale Drehmoment des EUV-Pulses ändert sich ebenso wie seine Intensität mit der Zeit (b). Die Abhängigkeit der Wellenlänge vom Azimutalwinkel dient dem Nachweis des Selbstdrehmoments des EUV-Pulses (c).

sich auf in einen Eigendrehimpuls S_z für zirkulare Polarisation und einen Bahn- oder Orbitaldrehimpuls L_z für verdrehte Wellenfronten. Quantenmechanische Betrachtungen zeigen,

dass sowohl der Eigen- als auch der Bahndrehimpuls des Lichts quantisierte Größen sind. Licht mit einem azimutalen Phasenfaktor $\exp(-i \cdot l \cdot \varphi)$ hat einen Drehimpuls von $L_z = l \cdot \hbar$ pro

Photon [2]. Dieser optische Orbitaldrehimpuls wurde im letzten Vierteljahrhundert intensiv studiert [3], zunächst vor allem seine fundamentalen und topologischen Eigenschaften. Inzwischen interessieren vermehrt auch mögliche Anwendungen in klassischer und Quantenkommunikation, Mikroskopie und optischer Mikromanipulation. Bisher war es eine unausgesprochene Annahme, dass der Orbitaldrehimpuls eines Lichtpulses konstant bleibt. Dies lässt sich nicht in Experimenten mit einzelnen Photonen oder Licht mit nur einer Frequenz untersuchen, weil sich der Orbitaldrehimpuls dann ohne äußere Wechselwirkung nicht verändern kann. Wie ist es nun gelungen, Licht mit einem veränderlichen Drehmoment bzw. einem dynamischen Drehimpuls zu erzeugen und damit scheinbar den Erhaltungssatz zu umgehen?

Die Forscher nutzen dazu einen Prozess aus der nichtlinearen Optik, die Frequenzvervielfachung (**Abb. 1a**). Ein infraroter Lichtpuls (IR) mit einer Wellenlänge von 800 nm ionisiert Argon in einem Gastarget. Beim folgenden Zerfall zurück in den Grundzustand wird ein extrem ultraviolettes Photon (EUV) emittiert, zum Beispiel mit einer Wellenlänge von 47 nm. Bei diesem Verhältnis der Wellenlängen erzeugen 17 IR-Photonen ein EUV-Photon. Die Methode lässt sich auch auf andere Verhältnisse übertragen, solange diese sich für den Ionisierungsprozess eignen.

In diesem Prozess sind Energie, Impuls und Drehimpuls erhalten. Das hochenergetische EUV-Photon besitzt die gesamte Energie der 17 niederenergetischen IR-Photonen. Die Richtung der absorbierten Photonen gibt die Richtung vor, in die das EUV-Photon abgestrahlt wird, und sein Drehimpuls entspricht der Summe der Drehimpulse aller absorbierten Photonen. Haben beispielsweise alle IR-Photonen einen Orbitaldrehimpuls von $L_z = 1\hbar$, trägt das EUV-Photon einen Orbitaldrehimpuls von $17\hbar$ – das wurde in früheren Arbeiten bereits gezeigt [4].

Um einen Lichtpuls mit Selbstdrehmoment zu erzeugen, braucht es einen Trick: Einem ersten extrem kurzen Lichtpuls mit einem Orbital-

drehimpuls von $1\hbar$ pro Photon folgt wenige Femtosekunden später ein zweiter, ebenso kurzer Lichtpuls mit einem Orbitaldrehimpuls von $2\hbar$. Die Lichtpulse überlappen zeitlich, sodass zu jedem Zeitpunkt Photonen aus beiden Lichtpulsen zur Ionisation beitragen, allerdings mit wechselndem Anteil. Naiv könnte man eine Binominalverteilung erwarten, die Wirklichkeit ist aber komplizierter. Der resultierende Drehimpuls des EUV-Pulses verändert sich kontinuierlich von $17\hbar$ zu $34\hbar$ (**Abb. 1b**), und das Drehmoment berechnet sich gemäß der klassischen Mechanik aus dem Verhältnis von Drehimpulsdifferenz und Pulsdauer zu $\Delta L_z/\Delta t$. Der EUV-Puls transportiert dieses Drehmoment dann mit sich. Bei einer späteren Messung durchläuft sein Drehimpuls rasant schnell alle Werte von $17\hbar$ bis $34\hbar$.

Durch den Raum geschraubt

Licht mit Drehmoment kann man sich gut als verdrehte Wellenfronten vorstellen. Im Verlauf des Lichtpulses drängen sich mehr und mehr Vortexlinien zum Zentrum des Lichtstrahls, und die Rotationssymmetrie verdoppelt sich. Damit verbunden verändert sich auch die Geschwindigkeit, mit der sich die verdrehten Wellenfronten durch den Raum schrauben, also die azimuthale Frequenz des Lichtpulses. Mathematisch betrachtet ist mit dem Drehmoment automatisch ein Frequenzchirp verbunden, also ein zeitliches Durchlaufen unterschiedlicher Frequenzen – ähnlich dem akustischen Doppler-Effekt, bei dem ein Ton kontinuierlich höher oder tiefer wird. Den Frequenzchirp des Lichtpulses verursacht der nun zeitabhängige azimuthale Phasenfaktor $\exp(-i \cdot l(t) \cdot \varphi)$. Genau diese azimuthalen Frequenzen dienen der Forschergruppe als Erkennungsmerkmal für das Selbstdrehmoment (**Abb. 1c**).

Ist dieser Effekt wirklich erstaunlich? Die Erhaltung des Drehimpulses ist auf dem Quantenniveau nicht verletzt. Jedes einzelne Photon des Lichtpulses hat einen konstanten Drehimpuls, aber über die Pulsdauer verändert sich die Zusammensetzung des Ensembles. So sind wohl am An-

fang des Pulses mehr Photonen mit einem niedrigeren Drehimpuls vorhanden als am Ende, und in der Mitte liegt eine Mischung vor. Über weit aus längere Zeiträume könnte man mit wesentlich einfacheren Mitteln Lichtstrahlen mit variablem Drehimpuls erzeugen, zum Beispiel mittels so genannter Spatial Light Modulatoren (SLM) oder Digital Micromirror Displays (DMD).

Die Tatsache, dass die Frequenzvervielfachung den extrem kurzen Lichtpuls ein Selbstdrehmoment aufprägt, eröffnet attraktive Möglichkeiten für Anwendungen in der Mikromanipulation oder zur Untersuchung von biologischen und chemischen Prozessen, die innerhalb von Femtosekunden ablaufen. Entsprechend kurz müssen die Lichtpulse sein, um Schnappschüsse dieser Prozesse aufzunehmen. Ein veränderliches Drehmoment könnte es erlauben, die Chiralität der beteiligten Moleküle abzubilden: Sie reagieren womöglich unterschiedlich auf Licht mit verschiedenem Drehmoment. Darüber hinaus präsentieren die Pulse ein azimuthales Superkontinuum.

Aber auch weil sich die physikalische Erklärung für diese Vorgänge in groben Zügen aus einfachen mechanischen Grundsätzen ableitet, überrascht es doch, dass ein frei durch den Raum fliegender Lichtpuls seinen Drehimpuls verändern kann.

- [1] L. Rego et al., *Science* **364**, eaaw9486 (2019)
- [2] L. Allen et al., *Phys. Rev. A* **45**, 8185 (1992)
- [3] S. Franke-Arnold und N. Radwell, *Optics & Photonics News* **28**, Juni 2017, S. 28
- [4] R. Gêneaux et al., *Nat. Commun.* **7**, 12583 (2016)

Autorin

Prof. Dr. Sonja Franke-Arnold, School of Physics and Astronomy, University of Glasgow, Glasgow, G12 8QQ, Schottland