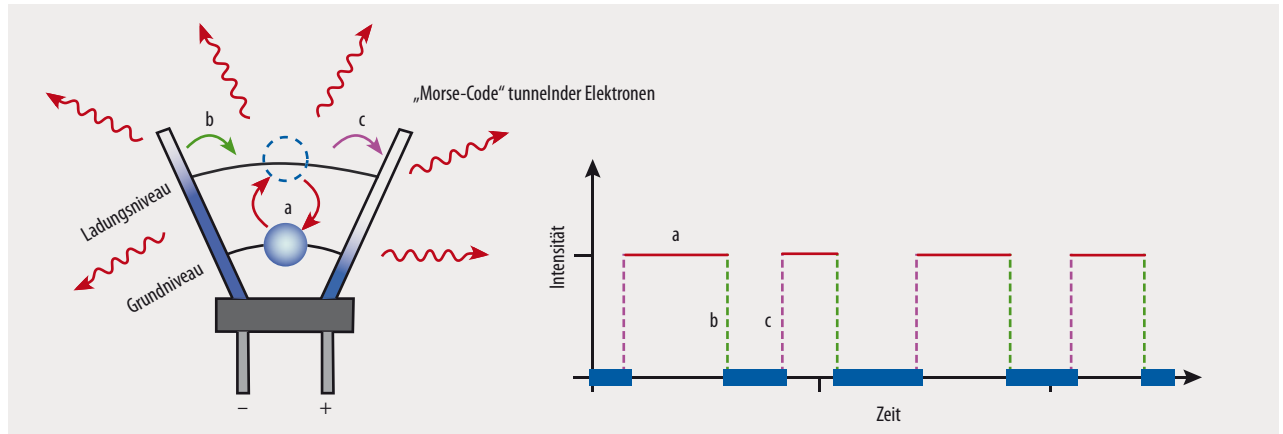


# Elektronen telegraphieren ihren Lebenslauf

Tunnelereignisse von Elektronen geben Aufschluss über ihr magnetisches Moment.

Robert Hussein und Wolfgang Belzig



**Abb. 1** Der Grundzustand eines Einzelquantenpunkts lässt sich mittels resonanter Anregung durch den darauffolgenden Übergang in den Ausgangszustand feststellen; dieser geht mit spontaner Emission von Licht einher (a). Beim Besetzen des Ladungsniveaus durch ein Elektron wird das Messsignal unterdrückt (b). Es verweilt dort einige Zeit, bis es den Quantenpunkt wieder verlässt (c). Der Transportzyklus beginnt aufs Neue. Aus dem „Morse-Signal“ lässt sich der Lebenslauf der Elektronen rekonstruieren.

**W**ird eine Glühbirne an die beiden Pole einer Batterie angeschlossen, können Elektronen von einem Pol zum anderen fließen und den Glühfaden erhitzen. Die Lampe leuchtet auf. Ihr kontinuierliches Lichtspektrum ähnelt der Sonne und gibt Aufschluss über die Temperatur des Glühfadens. Doch emittiertes Licht vermag es auch, Auskunft über die Eigenschaften von Systemen auf atomarer Ebene zu geben.

Betrachten wir einen miniaturisierten Schaltkreis, bei dem ein Quantenpunkt die Glühbirne ersetzt. Dieser Quantenpunkt zeichnet sich durch diskrete Energieniveaus aus, die sich beispielsweise in einem elektrostatischen Potential ausbilden. Auch hier können Elektronen vom Minuspol der Batterie über den Quantenpunkt zum Pluspol gelangen. Nehmen wir an, dass dies sequenziell geschieht: Ist der Quantenpunkt schon mit einem Elektron besetzt, so muss ein weiteres Elektron nicht nur die Tunnelbarriere überwinden, um in den Quantenpunkt zu tunneln, sondern auch die Coulomb-Wechselwirkung. Bei zu geringem Spannungsgefälle an der Batterie ist das jedoch nicht möglich. Das im Quantenpunkt befindliche Elektron muss diesen verlassen, be-

vor ein weiteres Elektron ihn besetzen kann. Somit tragen Elektronen, die den Quantenpunkt scheinbar zufällig verlassen, Informationen über vorliegende Wechselwirkungen – kodiert in ihrer Verweildauer. Gelingt es nun, diese individuellen Tunnelereignisse zeitlich aufgelöst zu messen, lassen sich damit die Transporteigenschaften des Quantenpunkt-Schaltkreises rekonstruieren.

Eine Möglichkeit des Auslesens besteht darin, den Zustand des Quantenpunkts kapazitiv durch einen benachbarten Schaltkreis zu ermitteln, der nur so lange Strom führt, wie der Quantenpunkt unbesetzt ist. Befindet sich hingegen ein Elektron im Quantenpunkt, so bricht der Stromfluss im Messschaltkreis ab. Allerdings wirkt der Messschaltkreis seinerseits auf das Quantenpunktsystem zurück und kann es dadurch verändern.

Einen Ausweg bietet eine optische Messung mittels Resonanzspektroskopie, bei welcher der Ladungszustand des Quantenpunktsystems nichtinvasiv ermittelt wird (**Abb. 1**). Ist der Quantenpunkt ungeladen, so lässt sich mittels eines Lasers ein im Grundzustand befindliches Elektron anregen, das nach einer charakteris-

tischen Zeit wieder in den Grundzustand übergeht und dabei spontan ein Photon gleicher Wellenlänge emittiert. Im geladenen Fall ist das Resonanzfluoreszenzsignal vernachlässigbar gering. Im typischen Messsignal telegraphieren Elektronen durch eine Abfolge von Lichtblitzen, die kürzer oder länger andauern, sozusagen ihren Lebenslauf. Somit kann das emittierte Licht auch auf atomarer Ebene Auskunft über die Merkmale des Systems geben.

Einem Team der Universität Duisburg-Essen ist es auf diese Weise gelungen, die Spin-Lebensdauer selbstorganisierter InAs-Quantenpunkte zu bestimmen [1]. In dem Experiment verwenden die Wissenschaftler jedoch nur einen Kontakt, der als Elektronenreservoir dient. Durch das Anlegen einer geeigneten Gatterspannung verschieben sich die Energieniveaus des Quantenpunkts relativ zum chemischen Potential des Elektronenreservoirs. Dadurch ist es möglich, diesen zu entladen oder mit einem Elektron zu besetzen. Im Magnetfeld spaltet der Ladungszustand, der sich zuvor mit einem Elektron beliebigen Spins besetzen ließ, in zwei Zustände verschiedener Niveaue-

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

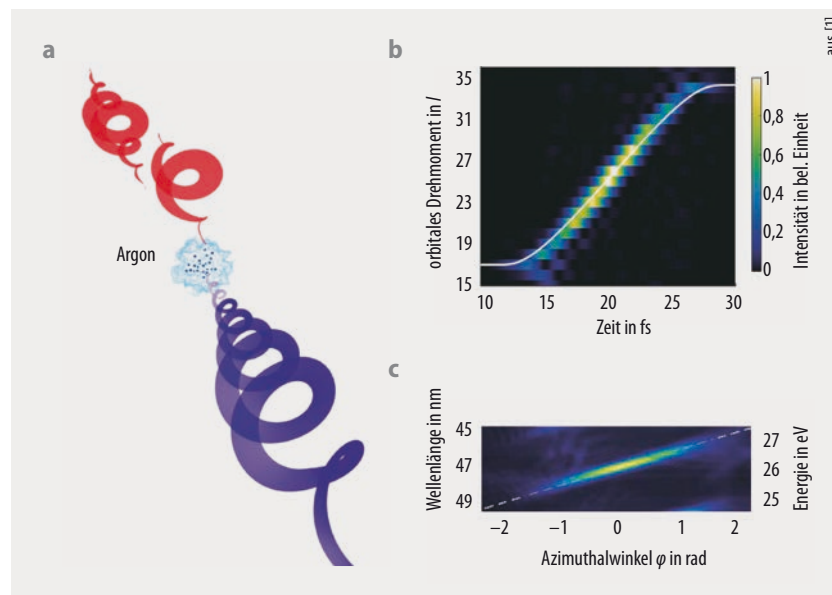
## Ein Wirbelwind aus Licht

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

Sonja Franke-Arnold

**E**in 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