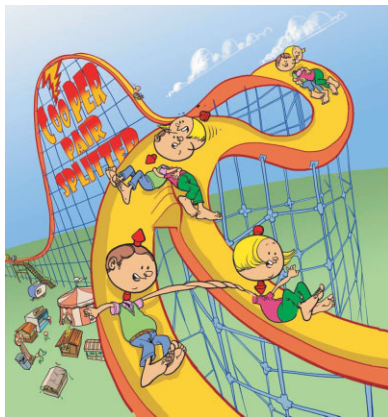


## QUANTENMECHANIK

## Eine Trenneinrichtung für Quantenpaare

Die Quantenmechanik erlaubt neben der Überlagerung von Zuständen auch deren Verschränkung. Das betrifft Teilchen mit Ruhemasse wie Elektronen ebenso wie masselose Photonen. Zwei Forscherteams ist es jüngst gelungen, verschränkte Elektronen in Form von Cooper-Paaren als Quelle verschränkter Elektronen zu nutzen [1, 2]. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für grundlegende Experimente zur Quantenmechanik und könnte den Weg zur Quanteninformation auf einem Chip ebnen.

**Abb. 1** Illustration des Cooper-Paar Splitters. Die verschränkten „Kinderpaare“ werden an einer Stelle der Rutsche getrennt, bleiben aber weiterhin verschränkt (Grafik: R. Geschwind and the Experimental Mesoscopic Physics Group, U Basel).



Verschränkte Teilchen, zum Beispiel Elektronen, besitzen eine verblüffende Eigenschaft: Misst man mit einem Detektor den Spinfreiheitsgrad von einem der beiden Elektronen, so wird der Zustand des Elektrons am anderen Detektor instantan in die entgegengesetzte Richtung „projiziert.“ Diese Wirkung zwischen zwei verschränkten Teilchen hat Einstein als „spuk-

hafte Fernwirkung“ bezeichnet. Zu Ehren des berühmten Gedankenexperiments von Einstein, Podolsky und Rosen (EPR) nennt man solche Paare auch EPR-Paare (Physik in unserer Zeit 2004, 35 (4), 168).

EPR-Paare haben in den letzten Jahren durch die Quanteninformationstheorie eine große Bedeutung erlangt. Bei der Quantenteleportation beispielsweise wird ein Quantenzustand von einem Ort zum anderen „kopiert.“ Als Quelle von EPR-Paaren dienen in diesen Experimenten Photonenpaare, die in einem nichtlinearen Kristall durch parametrische Konvertierung aus Licht erzeugt werden. Eine analoge Quelle für Elektronen gibt es heute leider noch nicht. Dies könnten die neuen Experimente ändern, in denen Cooper-Paare als Quelle verschränkter Elektronen dienen.

Der Grundzustand eines Supraleiters besteht aus einem Kondensat von Elektronenpaaren, den Cooper-Paaren. Der Spin dieser Paare ist bereits in einem Singlett-Zustand, so dass ein Cooper-Paar gleichzeitig ein EPR-Paar bildet. Da das Kondensat in einem metallischen Supraleiter wie Aluminium aber aus sehr vielen Cooper-Paaren besteht, muss man zuerst einzelne Paare isolieren und sie danach in die beiden Elektronen auftrennen.

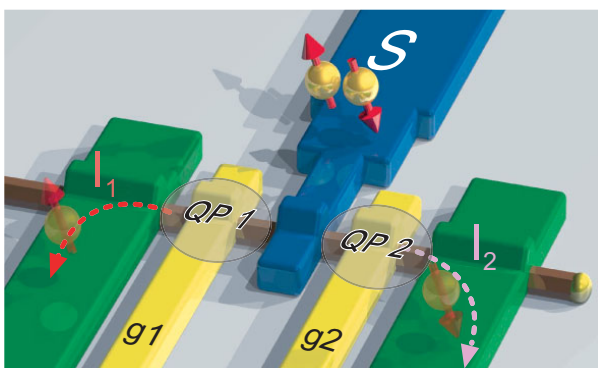
Im ersten Schritt werden die Cooper-Paare aus dem Kondensat einzeln extrahiert. Das geht sehr einfach, nämlich über den Tunneleffekt. Wenn ein normalleitender Kontakt über eine Tunnelbarriere mit einem Supraleiter verbunden ist, können nur

Cooper-Paare durch die Barriere tunneln, vorausgesetzt, die angelegte Spannungsdifferenz über dem Kontakt ist kleiner als die Paarbindungsenergie pro Elektron im Supraleiter. Außerdem darf die Tunnelbarriere nicht zu transparent sein, damit die Elektronen sich nicht vorher auftrennen und als Einzelelektronen eins nach dem anderen durch die Barriere tunneln.

Die wirklich große Herausforderung besteht nun darin, die einzelnen Cooper-Paare aufzutrennen. Abbildung 1 veranschaulicht das Problem: Wenn ein Cooper-Paar an die Stelle kommt, wo sich die Rutschbahn in zwei Teilbahnen trennt, soll ein Elektron nach links und das andere nach rechts rutschen. Keinesfalls sollen die beiden Elektronen zusammenbleiben und über dieselbe Seite abgleiten. Wenn wir uns die beiden Bahnen als makroskopische elektrische Leiter denken, dann kann dieser unerwünschte Effekt leider auftreten. Die Lösung besteht darin, dass der Leiter so schmal ist, dass jeweils nur ein Teilchen Platz findet. Diese Restriktion erzwingt das Trennen der beiden Partner.

Die Trennung erfolgt über die Coulomb-Abstoßung (Abbildung 2). Die supraleitende Quelle für Cooper-Paare (S) ist an zwei Quantenpunkte (QP1 und QP2) gekoppelt (ein Quantenpunkt ist eine Falle für Elektronen, auch künstliches Atom genannt). Wenn nun ein Cooper-Paar sich nicht auftrennt und als Paar durch einen der beiden Quantenpunkte geht, kostet das doppelt so viel Ladungsenergie, wie wenn die Elektronen sich aufspalten, und eines durch QP1 und das andere durch QP2 geht. Dies ist deshalb so, weil die Ladungsenergie proportional zum Quadrat der Ladungszahl ist. Bei hinreichend tiefer Temperatur kann diese Auswahlregel zu einer hundertprozentigen Trennung der Cooper-Paare führen.

Unser Forscherteam (Universität Basel, Budapest University of Technology and Economics, Niels-Bohr-Institut, Kopenhagen) setzte halbleitende



**Abb. 2** EPR-Paare können durch Aufspaltung einzelner Cooper-Paare, die aus einem Supraleiter (S) stammen, erzeugt werden. Die Aufspaltung wird durch die Coulomb-Wechselwirkung beim Tunneln durch die beiden Quantenpunkte QP1 und QP2 erzwungen.

Nanodrähte zur Realisierung der beiden Quantenpunkte ein [1]. Die zweite Gruppe (Universität Regensburg, Ecole Normale Supérieure, Paris, Universidad Autónoma de Madrid) verwendete dagegen Kohlenstoff-Nanoröhren [2].

Die beiden Experimente sind nicht nur komplementär im verwendeten Materialsystem, sie bewegen sich auch in unterschiedlichen Parameterbereichen [4]. Beide demonstrieren aber eindeutig eine Trennung der Cooper-Paare in die einzelnen Elektronen, und das mit erstaunlich

hoher Effizienz. Während man für die Erzeugung von optischen EPR-Paaren nur eine Effizienz von weniger als  $10^{-6}$  erreicht, konnten wir in unseren Experimenten eine Effizienz um 10 % nachweisen. Die Theorie zeigt sogar, dass eine Effizienz von 100 % möglich sein sollte, wenn der Cooper-Paar-Splitter im richtigen Parameterbereich betrieben wird [3].

Diese Experimente sind Meilensteine in der Entwicklung einer EPR-Quelle für Elektronen. Mit einer solchen Quelle werden wir Experimente zu den Grundlagen der Quan-

tenmechanik zukünftig auch mit Elektronen durchführen. Diese können dann den Weg zur Quanteninformation auf einem Chip ebnen.

- [1] L. Hofstetter et al., *Nature* **2009**, 460, 906.
- [2] L. G. Herrmann et al., *Phys. Rev. Lett.*, im Druck.
- [3] P. Recher et al., *Phys. Rev. B* **2001**, 63, 165314.
- [4] C. Strunk, *Nature Nanotechnology* **2009**, 5, 11.

*Christian Schönenberger,  
Uni Basel*

## QUANTENOPTIK

### Frequenzkamm beschleunigt die Spurensuche

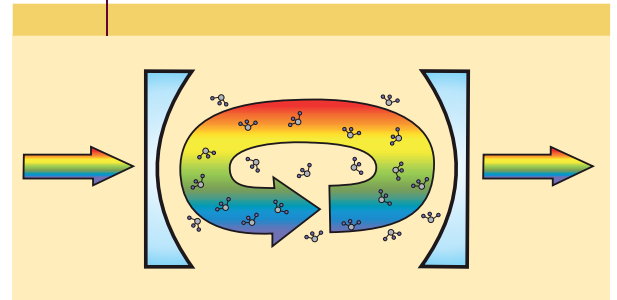
*Spurengase kommen ihrer Definition nach in extrem geringen Konzentrationen vor. Dennoch spielen sie in vielen Bereichen eine große Rolle, so zum Beispiel in der Klimaforschung, der Luftanalyse oder zukünftig auch beim Studium der Atmosphären von extrasolaren Planeten. In einer Kooperation mit der Universität Tokio hat unser Forscherteam am Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) in Garching ein Gerät entwickelt, das Spurenstoffe besonders präzise und schnell nachweist [1]. Hierin kommen Frequenzkämme zum Einsatz, für deren Entwicklung Theodor W. Hänsch 2005 den Physik-Nobelpreis erhielt.*

Chemische Verbindungen lassen sich anhand ihres Absorptionsspektrums eindeutig identifizieren. Um das Spektrum eines unbekanntes Gases zu messen, wird Licht durch eine Probe der Substanz geschickt und die charakteristische Absorption verschiedener Wellenlängen aufgezeichnet. Für die Wellenlängezeichnung benötigt man ein bekanntes Vergleichsspektrum. Hierfür eignen sich Frequenzkämme besonders gut. Ein Frequenzkamm enthält etwa eine Million Spektrallinien in regelmäßigen und kontrollierbaren Abständen – daher der Name Kamm (siehe *Physik in unserer Zeit* **2005**, 36 (6), 258). Er wirkt wie ein Lineal, an dem man das Spektrum mit den zu identifizierenden Linien anlegt. Mit einer einzigen

Messung lässt sich so ein breites Spektrum sehr präzise bestimmen.

Allerdings liegen die Absorptionslinien verschiedener Moleküle oft sehr nahe beieinander und sind – insbesondere bei kleinen Konzentrationen – nur schwach ausgeprägt. Um dennoch Gase mit geringer Konzentration zu identifizieren, muss das Signal zunächst verstärkt werden. Dazu lassen wir den Frequenzkamm in einem Resonator mit der Probe interagieren. In ihm wird das Licht zwischen Spiegeln vielfach reflektiert, bevor es auf den Detektor fällt. Somit verlängert sich die Strecke, auf der die Moleküle das Licht absorbieren können, und das gemessene Signal wird deutlich besser erkennbar (Abbildung 1).

ABB. 1 | RESONATOR



**Das breitbandige Licht eines Frequenzkamms wird in einem Resonator durch vielfache Reflexion gespeichert. Das transmittierte Licht enthält ein Absorptionsmuster, das mit einem zweiten Frequenzkamm für die schnelle Detektion überlagert wird (im Bild nicht dargestellt).**

Diese Technik wurde schon vor wenigen Jahren entwickelt, um schwache Signale präzise zu messen [2]. Doch Geräte, die bislang zur Analyse von Gasen dienten, waren für viele Anwendungen nicht geeignet. Der Grund: Eine einzelne Messung dauerte relativ lange, weil zum Auslesen ein Beugungsgitter nötig war, das die Frequenzen des Signals einzeln abtastete.

Unsere Gruppe am MPQ um Theodor W. Hänsch und Nathalie Picqué hat nun ein Gerät entwickelt, das dies umgeht. Es misst die Spektren von Molekülen nicht nur mit *einem* Frequenzkamm, sondern liest sie mit einem weiteren auch aus. Wir überlagern das Frequenzmuster, das durch die Wechselwirkung des ersten

