

PHYSIKonkret

Quantentunneln in der Makrowelt

- Der Nobelpreis für Physik 2025 würdigt die drei Preisträger für die Beobachtung makroskopischer Quantenphänomene in supraleitenden elektrischen Schaltkreisen.
- Die Physik-Nobelpreisträger haben kollektives Tunneln und Energiezustände auf makroskopischer Skala nachgewiesen. Diese Energiezustände bilden eine der Grundlagen für moderne Quanteninformationstechnologien.

Nach der Quantentheorie können leichte Teilchen Barrieren „durchtunneln“. Die diesjährigen Nobelpreisträger in Physik – John Clarke (Berkeley), Michel Devoret (Santa Barbara) und John Martinis (Qolab) – haben in bahnbrechenden Experimenten demonstriert, dass dies auch für Millionen von Teilchen gleichzeitig möglich ist, und zwar in supraleitenden Schaltkreisen. Supraleitende Elektronen zeigen kollektives Verhalten, das zu unerwarteten Quantenphänomeren auf der makroskopischen Ebene führt [1,2]. Diese Arbeiten waren der Ausgangspunkt für gegenwärtige Durchbrüche in der Quantentechnologie. Zudem passt das Thema ausgezeichnet in das Internationale Jahr der Quantenwissenschaften. Der Tunneleffekt ist typisch für die Quantenphysik – das

„Durchdringen von Wänden“ widerspricht unserer klassischen Intuition. Auf der mikroskopischen Ebene ist dieses Phänomen jedoch allgegenwärtig. Es liegt zum Beispiel dem radioaktiven Zerfall und der kovalenten chemischen Bindung zugrunde.

Die Preisträger zeigten, dass es neben dem „konventionellen“ Tunneleffekt für Elektronen einen zweiten, ganz andersartigen Tunneleffekt gibt: In einem Supraleiter wird die Gesamtheit der supraleitenden Ladungsträger durch eine makroskopische Wellenfunktion mit einer bestimmten Phase beschrieben. Ein Josephson-Kontakt koppelt zwei Supraleiter über eine dünne Isolatorschicht. Dieser Kontakt kann in zwei Zuständen vorliegen: einem mit dem Widerstand Null und einem zweiten mit endlichem Widerstand. Die Phasendifferenz zwischen den Supraleitern bestimmt den Suprastrom. Die Forscher initialisierten den Kontakt in dem Zustand mit Widerstand Null. Dieser ist aufgrund thermischen Rauschens nicht stabil, bei höheren Temperaturen kann das Schalten in den resistiven Zustand thermisch ausgelöst werden, was sich durch das Auftreten einer Spannung äußert. Sie stellten fest, dass die Schaltrate erwartungsgemäß mit der Abkühlung des Systems abnahm. Bei immer tiefer werdenden Temperaturen sank sie jedoch nicht weiter ab, sondern blieb konstant – ein Beweis dafür, dass der Kontakt zusätzlich auch durch Quan-

„Die Supraleitung findet bereits zahlreiche Anwendungen, beispielsweise in der Medizintechnik und Elektronik. Makroskopische Quantenphänomene ermöglichen nun neuartige, auf Supraleitung basierende Plattformen für Quanteninformationstechnologien.“

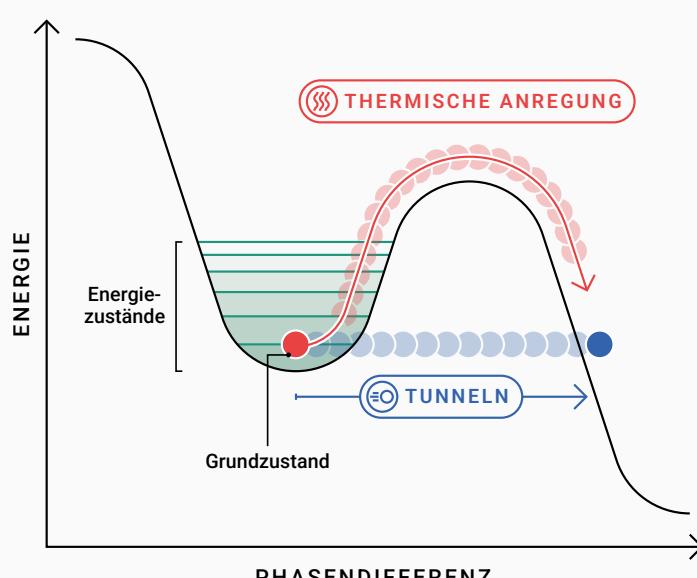


Klaus Richter
Präsident der Deutschen
Physikalischen Gesellschaft e. V.

tentunneln der makroskopischen Phasendifferenz aus dem widerstandslosen in den resistiven Zustand übergehen kann [1]. Die Forscher haben außerdem beobachtet, dass der Kontakt – genau wie ein Atom – eine diskrete Leiter höherer Energiezustände aufweist [2]. So wurde zum ersten Mal gezeigt, dass man eine Art künstliches Atom bauen und elektrisch kontrollieren kann.

Die Möglichkeit, atomähnliches Verhalten in einem makroskopischen Schaltkreis zu erzeugen, stieß in den folgenden Jahren auf großes Interesse. Verschiedene Arbeitsgruppen realisierten supraleitende Schaltkreise, die auch im Zeitverhalten Atomen ähneln [3]. Komplexere Chips wurden entwickelt, mit denen Quanteninformationen gespeichert und verarbeitet werden können. Gegenwärtig ist die supraleitende Technologie eine beliebte Plattform für die Realisierung von quantenlogischen Schaltkreisen [4]. Diese Entwicklung wird darüber hinaus die schon jetzt zahlreichen Anwendungen der Supraleitung (z. B. in der Medizintechnik oder der supraleitenden Elektronik) um ganz neue Aspekte erweitern.

→ Diskrete Zustände in der Energienlandschaft eines Josephson-Kontakts (grüne Linien), analog zu denen eines Elektrons in der Atomhülle. Bei tiefen Temperaturen ist die Phasendifferenz des Josephson-Kontakts in einem Minimum gefangen. Dies entspricht dem Zustand mit dem Widerstand Null. Bei ausreichender Temperatur kann die Phase die Energiebarriere überwinden (roter Pfeil) und der Kontakt in einen Zustand mit einem endlichen Widerstand schalten. Aber auch sehr nahe am absoluten Temperaturnullpunkt kann der Kontakt schalten, indem die Phasendifferenz die Barriere durchtunnelt (blauer Pfeil).



Fußnoten und Quellen

- ¹ M. H. Devoret, J. M. Martinis, J. Clarke, "Measurements of Macroscopic Quantum Tunneling out of the Zero-Voltage State of a Current-Biased Josephson Junction," *Phys. Rev. Lett.* 55, 1908 (1985). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.55.1908>
- ² J. M. Martinis, M. H. Devoret, J. Clarke, "Energy-Level Quantization in the Zero-Voltage State of a Current-Biased Josephson Junction," *Phys. Rev. Lett.* 55, 1543 (1985). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.55.1543>
- ³ Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin & J. S. Tsai, "Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box," *Nature* 398, 786 (1999). <https://doi.org/10.1038/19718>
- ⁴ E. M. Levenson-Falk, S. A. Shanto, "A review of design concerns in superconducting quantum circuits," *Mater. Quantum. Technol.* 5, 022003 (2025). <https://doi.org/10.1088/2633-4356/ade10d>

Die DPG dankt ihren Autor:innen:

- Prof. Dr. Christoph Strunk, Universität Regensburg
- Prof. Dr. Elke Scheer, Universität Konstanz
- Prof. Dr. Ulrich Eckern (emeritiert), Universität Augsburg

Über uns



Die Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V. (DPG), deren Tradition bis in das Jahr 1845 zurückreicht, ist die älteste und, gemessen an der Zahl ihrer Mitglieder, auch die größte nationale physikalische Fachgesellschaft der Welt. Sie versteht sich als offenes Forum für Physikerinnen und Physiker und möchte der Physik eine Stimme geben. Als gemeinnütziger Verein verfolgt sie keine wirtschaftlichen Interessen. Abiturient:innen, Studierende und Lehrkräfte sind in der DPG ebenso vertreten wie Lehrende und Forschende aus der Universität und Fachkräfte aus der Industrie.

Weltberühmte Wissenschaftler waren Präsidenten der DPG – so Max Planck und Albert Einstein. Mit Tagungen und wissenschaftlichen Publikationen fördert die DPG den Gedankenaustausch innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft. Physikalische Spitzenleistungen würdigte sie mit Preisen von internationaler Reputation. Die DPG motiviert mit Physikwettbewerben den naturwissenschaftlichen Nachwuchs und

zeichnet – für herausragende Physikleistungen im Abitur – bundesweit Schülerinnen und Schüler aus. Sie engagiert sich auch in politischen Diskussionen: Themen wie Bildung, Forschung und Klimaschutz stehen dabei im Mittelpunkt.

Sitz der DPG ist das Physikzentrum Bad Honnef, welches auch Tagungsstätte der DPG und Treffpunkt für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus aller Welt ist. In Berlin unterhält die DPG ihre Hauptstadtrepräsentanz zur Vernetzung mit Akteuren aus Politik und Gesellschaft. Für alle Interessierten finden dort regelmäßig wissenschaftliche Gesprächsrunden und Vorträge statt.

Die DPG macht Physik öffentlich: Mit populärwissenschaftlichen Publikationen und öffentlichen Veranstaltungen beteiligt sie sich aktiv am Dialog zwischen Wissenschaft und Öffentlichkeit, anlassbezogen auch gemeinsam mit anderen Wissenschaftsorganisationen. Zentrales Anliegen ist es, allen Neugierigen einen Zugang zur Physik schaffen.

