



DAS THEMA

HALBLEITERPHYSIK

# Auf dem Weg zum Quantencomputer

Elektronen-Talfahrt erweist sich im Experiment als schnell, zuverlässig und wenig störungsanfällig

## ZUR PERSON

**Professor Stephan W. Koch** (64) stammt aus Südsachsen. Er studierte von 1971 bis 1977 Physik an der Universität Frankfurt und war bis 1984 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Theoretische Physik der Universität Frankfurt. Nach Zwischenstationen in den USA und Deutschland übernahm er 1985 den Lehrstuhl für Theoretische Festkörperphysik an der Philipps-Universität. 1997 erhielt er den Leibniz-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Er erforscht die theoretischen Grundlagen der Wechselwirkung von Licht mit Materie in Halbleitermaterialien, insbesondere in Laserstrukturen.



Physik-Professor Stephan W. Koch. Foto: Jansch/Viv Marburg

## ZUR PERSON

**Dr. Ulrich Hütter** (30) stammt aus Augsburg. Er studierte von 2007 bis 2016 Physik an der Universität Marburg. 2016 gewann er den Promotionspreis der Leibniz-Gesellschaft für seine Doktorarbeit zu starken Terahertz-Anregungen in Halbleitern.



Dr. Ulrich Hütter. Privatfoto

## HINTERGRUND

Die Entwicklung von Quantencomputern steckt noch in den Kinderschuhen. Die neue Generation von viel schnelleren Computern könnte aber die Computerindustrie erneut revolutionieren. Computer bestehen aus Bausteinen, die auf der Bewegung von Elektronen basieren. Der Elektronentransport kommt durch das Anlegen einer elektrischen Spannung zustande. Die Erzielung von verbesserten Leistungen durch miniaturisierte Bausteile stößt jedoch an seine Grenzen. Einem Ausweg aus diesem Dilemma könnte die Kontrolle von Elektronenbewegungen durch das elektrische Feld einer Lichtwelle darstellen. Für eine künftige Quanteninformationstechnologie arbeiten Physiker auf der ganzen Welt an bestechendsten neuartigen Instrumenten.

Physiker der Universitäten Marburg, Regensburg und Ann Arbor (USA) haben Elektronen auf eine rasante Talfahrt geschickt, die die Computerindustrie revolutionieren könnte.

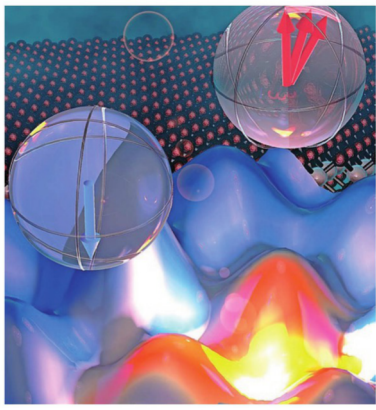
von Manfred Hitzeroth

**Marburg.** Eine vor zehn Jahren veröffentlichte theoretische Übung des Marburger Physikers Stephan W. Koch könnte jetzt durch die Umsetzung in die experimentelle Praxis einen wichtigen Baustein auf dem Weg zur Entwicklung eines Quantencomputers darstellen. Eigentlich erschienen dem Marburger Physiker die in den theoretischen quantenmechanischen Berechnungen aufgelisteten Parameter als zu extrem. „Es ist faszinierend, wie sich die Möglichkeiten der Umsetzung verbessert haben“, erläutert Koch im Gespräch mit der OP.

Das in der OP vorgelagerten Ergebnisse wieder aus der Schublade holte, geht auf die Initiative des Regensburger Experimentalphysikers Professor Huber zurück. Dieser zeigte sich überzeugt davon, dass es die darauf aufbauenden Messungen in seinem Labor machen könnte.

Nach monatelangen gemeinsamen Forschungsarbeiten der Teams beider Physiker sowie des ehemaligen Marburger Forschers Professor MacKillo Kira (Michigan) ist jetzt eine Publikation in der weltweit renommierten Zeitschrift „Nature“ der Endpunkt. Darin zeigen die Forscher, dass ein schwallenderer Berg- und Talwandler von Elektronen führen könnte, als das Rechenleistung eine Million mal schneller als bisher ausfällt werden könnten.

Die dabei auftretenden Effekte bieten den Physikern aber auch erstaunliche Mengen an Informationen über Halbleitermaterialien. Die von Professor Koch entwickelte Halbleiter-Blochgleichung bot Koch entscheidende Hinweise, die er mit Regensburg mit einem Material aus einer speziellen neuen Klasse von Halbleitermaterialien, welche in einer hauchdünnen Schicht hergestellt wurde. In diesem Fall handelte es sich um Wolframselenid, das nur aus jeweils einer Lage von Atomen der Elemente Wolfram und Selen besteht. „Das Verhalten der Elektronen dieses Halbleitermaterials interessierte die Forscher vor allem. „Ohne Lichtblitz befinden sich die Elektronen in ihrem Grundzustand“, beschreibt Professor Koch. Bei den Experimenten wird dann aber die Eigenschaft von allen Halbleitermaterialien ausgenutzt, durch Licht Elektronen anzuregen. Das funktioniert im Fall des Wolframselenids besonders



Künstlerische Gestaltung des Themas: Gezeigt wird die Energielandschaft (blaue Fläche) einer Lage Wolframselenids (Gitter im Hintergrund). Die Kugeln stellen Elektronen dar, die von einem ins andere Energielicht beschleunigt werden (rot-gelbe Einstrahlung). Grafik: Stefan Schludermann/Regensburg

schnell, zuverlässig, störungsanfällig und skalierbar. Erklärt Koch. Dabei gibt es um das möglichst schnelle Umschalten der Elektronen zwischen zwei unterschiedlichen Zuständen. Das dafür verwendete Laserlicht im Terahertz-Bereich besteht aus elektromagnetischen Wellen aus einem rasant schwingenden elektrischen und magnetischen Feld. Analog zum Aus- und Einschalten einer Spannung an einem Halbleiter werden die Elektronen, die zu nächst optisch angeregt werden, in einem zweiten Schritt mit den Terahertz-Lichtimpulsen extrem schnell beschleunigt. Nach vor der Schwingung

berechnen, dass durch die Befestigung der Wolframselenidschicht auf einem Substrat aus Diamant-Kristall das Lichtfeld geschwächt wurde und die Experimentierbedingungen somit leicht verändert wurden. Am 2. Mai wurden die Ergebnisse der Forscher publiziert. Für die Wissenschaftler aus Marburg

und Regensburg war es nicht das erste Mal, dass ihnen eine gemeinsame „Nature“-Publikation gelang. In zahlreichen Gesprächen floßen immer wieder neue Argumente ein, bis die Publikationsvorbereitungen reif war und auch der Begutachtung durch Fachkollegen standhielt.

## Teamwork von Physikern ermöglicht Aufsatz

„Nature“-Publikation erschien am 2. Mai | Forscher aus Regensburg, Marburg und Ann Arbor kooperieren

Physiker der Marburger Universität haben maßgeblich zu der „Nature“-Publikation beigetragen.

von Manfred Hitzeroth

**Marburg.** „Lichtwellen-Valley-Kira“ (Ann Arbor) zählen zu dem Team von Koch nach Dr. Peter Hawkins und Dr. Ulrich Hütter. Sie waren hauptsächlich verantwortlich für quantenmechanische Berechnungen. Sie berechneten einerseits die Eigenschaften des Halbleiters und griffen andererseits auf Modelle der Quantenmechanik zurück, um die Prozesse im Inneren des Materials zu beschreiben. Dabei handelt es sich nicht mehr um klassische Physik, sondern um die Berechnung von Wellen oder Teilchen auf der Ebene der Quantenmechanik“, erläutert Koch. Auf der atomaren Ebene des Halbleitermaterials, mit dem experimentiert wurde, treten die Quanteneigenschaften des Materials in Erscheinung. In der elektronischen Struktur der Materialien entstehen zwei ungleichwertige „Energieleiter“ (Eingelände Valley). Ob sich nun ein Elektron in dem einen oder anderen Tal aufhält, das kann mit einer Größe beschrieben werden, die dem quantenmechanischen Spin – also dem

Eigen Drehimpuls eines Elektrons – entspricht. In diesem Fall sprechen die Forscher vom Pseudospin. Die Versuche, diese Pseudospin als Quantenbit zu verwenden, werden als „Valleytronik“ bezeichnet. In den Versuchen wurde nun gezeigt, wie der Valley-Pseudospin von Wolframselenid illustriert Koch. Für das Setting der Experimente mussten auch die genaues Bewegungen auf Basis von Programmierungen festgelegt werden. Zum Beispiel ging es um die genaue Einstellung der Frequenzen, mit denen an der Regensburger Hochfeld-Terahertz-Quelle intensive Lichtimpulse erzeugt werden.

Dabei mussten die Wissenschaftler beispielsweise mit ein-

und Regensburg war es nicht das erste Mal, dass ihnen eine gemeinsame „Nature“-Publikation gelang. In zahlreichen Gesprächen floßen immer wieder neue Argumente ein, bis die Publikationsvorbereitungen reif war und auch der Begutachtung durch Fachkollegen standhielt.

Das graue Sechseck steht für das Halbleitermaterial Wolframselenid. Bei ihm sind eingetragene die „N“-Täler und die „K“-Täler. Die Elektronen werden mit Licht zur Bewegung in den K-Tälern oder den K'-Tälern angeregt. Grafik: AG Koch

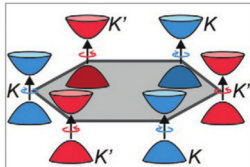
der Lichtwelle bringt diese Welle die Ladungen dann wieder zur Kollision und sendet spektral breitenbandiges Licht (Licht verschiedener Farben) aus, die sogenannte Erleuchtung.

Die Elektronen müssen von einem Energielicht in ein anderes ungleichwertiges Energielicht gelangen und dabei eine Art Berg überwinden. Im erfolgreichen Experiment gelang es den Forschern in Regensburg, 66 Prozent der Elektronen innerhalb von sieben Femtosekunden zu transportieren, wobei eine Femtosekunde den Millionsten Teil einer Milliardstel Sekunde bezeichnet. Laut Koch ist das eine der schnellsten Übertragungsgeschwindigkeiten, die bisher weltweit erreicht wurden. Mit Hilfe einer Simulation sagen die Forscher sogar eine Erhöhung von 96 Prozent für leicht verbesserte Bedingungen voraus.

Die jetzt erreichte Schaltgeschwindigkeit bedeutet auch, dass sich die Rechengeschwindigkeit in einem potenziellen Quantencomputer heute jetzt in Experiment erarbeitete Methode um ein Vielfaches erhöhen lässt. US-Forscher Professor MacKillo Kira geht sogar davon aus, dass auch ein auf Basis der Erkenntnisse hergestellter Quantencomputer um eine Million mal schneller rechnen könnte als herkömmliche Computer (siehe HINTERGRUND).

Ob die Idee aus Marburg und Regensburg wirklich die erfolgversprechendste Variante in einem internationalen Wettlauf darstellt, das bleibt abzuwarten. Laut Professor Koch arbeiten eine Reihe von Forschergruppen mit unterschiedlichen Halbleitermaterialien und Herangehensweisen an Ideen für die nächste Generation von Computern: die Quantencomputer. Dabei existieren bereits einzelne Prototypen und Bausteine wie Transistoren.

Auf die marktreife Einführung eines Quantencomputers würden aber noch Milliardeninvestitionen und viel ingenieurwissenschaftliches Know-how notwendig sein. Das wäre dann aber nicht mehr die Aufgabe von theoretischen und experimentellen Physikern.



Das graue Sechseck steht für das Halbleitermaterial Wolframselenid. Bei ihm sind eingetragene die „N“-Täler und die „K“-Täler. Die Elektronen werden mit Licht zur Bewegung in den K-Tälern oder den K'-Tälern angeregt. Grafik: AG Koch