

Verschränkung

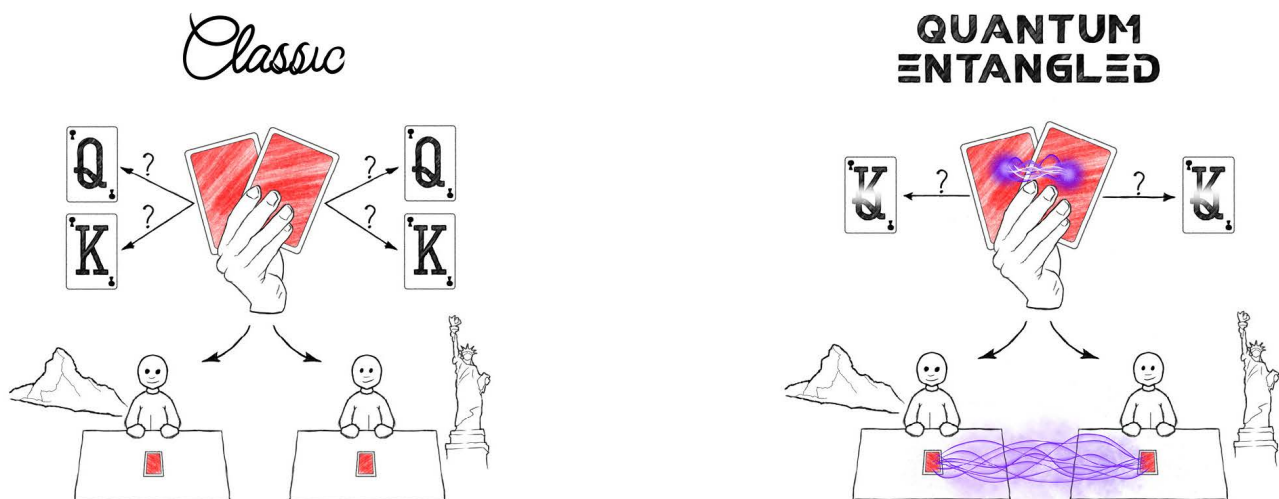
Nobelpreiswürdig und ein spannendes Forschungsthema im SNI-Netzwerk

Im Oktober hat das Nobelpreis-Komitee bekannt gegeben, dass die Professoren Alain Aspect, John Clauser und Anton Zeilinger den diesjährigen Physik-Nobelpreis bekommen werden. Die drei Physiker haben mit ihren bahnbrechenden Experimenten mit verschränkten Lichtteilchen (Photonen) die Grundlage für unterschiedliche Anwendungen der Quantenphysik gelegt. Auch innerhalb des SNI-Netzwerks beschäftigen sich verschiedene Forschungsgruppen mit der experimentellen Untersuchung der Verschränkung und haben dabei auch konkrete Anwendungen im Visier. Anhand einiger Beispiele zeigen wir, wie die Forschenden am Departement Physik der Universität Basel dieses quantenmechanische Phänomen untersuchen, das sich so schwer mit unseren Erfahrungen aus der Makrowelt vereinbaren lässt.

Enge Verbindung auch über grosse Distanzen

Bei dem quantenphysikalischen Phänomen der Verschränkung sind bestimmte Eigenschaften von Teilchen eng miteinander verbunden. Auch wenn sie Tausende von Kilometern voneinander getrennt werden – solange die Teilchen nicht gestört werden, bleibt diese Beziehung zueinander bestehen. Dabei können beispielsweise die Wellenlänge von Lichtteilchen oder die Orientierung des magnetischen Moments (Spin) von Teilchen miteinander verschränkt sein.

Mit unseren Erfahrungen aus der Makrowelt lässt es sich nicht vereinbaren, dass es eine derartige enge Verbindung gibt, ohne dass irgendeine Art der Kommunikation dahintersteckt. Auch Albert Einstein hat sich mit dem Phänomen der Verschränkung beschäftigt. Er lehnte es ab, dass diese starke Korrelation zwischen zwei Teilchen so existiert und ging davon aus, dass sie auf noch unbekannten Mechanismen basiert. Er bezeichnete das Phänomen daher als «spukhafte Fernwirkung».



Um eine Annäherung an die komplexe Quantenwelt und die Verschränkung zu bekommen, stellen wir uns vor, dass zwei Personen, die weit voneinander entfernt wohnen, je eine Spielkarte (Dame (Q) oder König (K)) bekommen und diese genau zur gleichen Zeit umdrehen. In der klassischen Welt bekommt eine der Personen eine Dame, die andere Person einen König und schon beim Verteilen steht fest, wer welche Karte bekommen hat. In der Quantenwelt können die Spielkarten beim Verteilen aber sowohl Dame wie auch König sein – eine quantenmechanische Überlagerung. Erst beim Aufdecken dieser «magischen» Karten entscheidet sich per Zufall, ob es sich um eine Dame oder einen König handelt. Wurden diese magischen Karten vor dem Verteilen auch noch verschränkt, besteht zwischen ihnen eine enge Verbindung, die auch über die Distanz bestehen bleibt. Wenn eine Person eine Dame aufdeckt, besitzt die andere Person immer einen König – und das, obwohl sich bei beiden Karten erst im Augenblick des Aufdeckens entscheidet, ob sie Dame oder König sind und beide Karten die Fähigkeit hätten Dame oder König zu sein. (Bild: SNI und Scixel)

Weitere Informationen:

Forschungsgruppe Philipp Treutlein

<https://atom.physik.unibas.ch/en/>

Uni News

<https://www.unibas.ch/de/Aktuell/News/Uni-Research/Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon-erstmals-in-Vielteilchensystem-beobachtet.html>

Uni News

<https://www.unibas.ch/de/Aktuell/News/Uni-Research/Verschr-nkte-Atome--berwinden-Grenzen-der-Messgenauigkeit.html>

Korrelationen experimentell nachgewiesen

Die drei Nobelpreisträger haben aber experimentell nachgewiesen, dass es diese Verschränkung tatsächlich gibt – zumindest in der Quanten- und Nanowelt. Eine Basis für ihre Untersuchungen sind sogenannte Bell-Tests. Dabei gehen die Forschenden zunächst davon aus, dass die Eigenschaften von Teilchen unabhängig voneinander und an einem bestimmten Ort existieren. Eine Messung des einen Teilchens sollte dementsprechend keinen Einfluss auf die eines anderen Teilchens haben – das Aufdecken der einen Karte also unabhängig vom Aufdecken der anderen Karte sein – so wie wir es in der uns vertrauten Welt erleben. Aus solchen Überlegungen lässt sich eine Ungleichung herleiten, die die Messergebnisse erfüllen müssten.

Die Experimente der Nobelpreisträger mit verschränkten Lichtteilchen (Photonen), die an zwei räumlich voneinander getrennte Messstationen geschickt wurden, haben aber gezeigt, dass diese sogenannte Bell-Ungleichung verletzt werden kann. Das bedeutet dann, dass die Eigenschaften der Photonen in den Experimenten voneinander abhängen – also eine sogenannte Bell-Korrelation zwischen ihnen existiert. Dabei bekommen die Teilchen ihre Eigenschaften erst durch eine Messung – was ebenfalls unseren Erfahrungen aus der Makrowelt widerspricht, denn wenn wir unser Gedankenexperiment

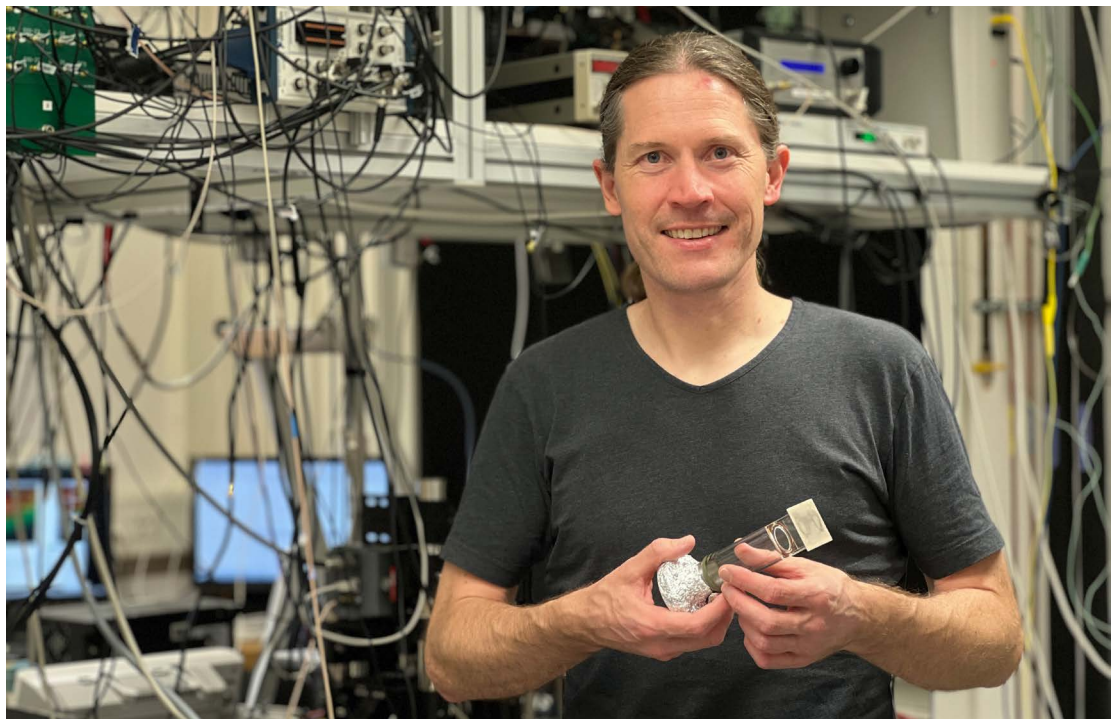
betrachten (siehe Abbildung), war die ausgewählte Karte auch vorher schon Dame oder König.

Mit diesen spannenden Phänomenen beschäftigen sich auch einige Arbeitsgruppen am Departement Physik der Universität Basel, die zum Netzwerk des SNI gehören. Die verschiedenen Teams haben dabei ganz unterschiedliche Strategien, verschränkte Teilchen zu erzeugen und zu untersuchen – und verfolgen auch unterschiedliche Ziele mit ihrer Forschung. Allen gemeinsam ist die Neugier und das Interesse daran, die Gesetze der Quantenwelt zu verstehen und damit Möglichkeiten für verschiedene Anwendungen zu eröffnen.

Hört die Quantenmechanik irgendwo auf?

Ähnlich wie die drei Nobelpreisträger untersucht auch Professor Philipp Treutlein mit seinem Team grundlagenwissenschaftliche quantenmechanische Phänomene – jedoch nicht anhand einzelner Photonen, sondern in Vielteilchen-Systemen, die über tausend Atome enthalten.

«Die elementare Frage hinter unserer Forschung ist, ob es eine fundamentale Größengrenze für diese quantenmechanischen Phänomene gibt und die Makrowelt den klassischen Gesetzen folgt, die wir aus unserer Alltagswelt kennen – denn im Allgemeinen verschwinden die Quantenphänomene



Philipp Treutlein untersucht das Phänomen der Verschränkung in Vielteilchensystemen, die über tausend Atome enthalten.

in grossen Systemen. Oder ob die Quantengesetze, die Phänomene wie Verschränkung beinhalten, auch in der Makrowelt gelten und deren Nachweis nur eine Frage des Aufwandes und der angewandten Techniken ist», erklärt Philipp Treutlein. «Wir untersuchen diese Frage, indem wir Verschränkung und Bell-Korrelationen in immer grösseren Systemen mit immer mehr Teilchen nachweisen».

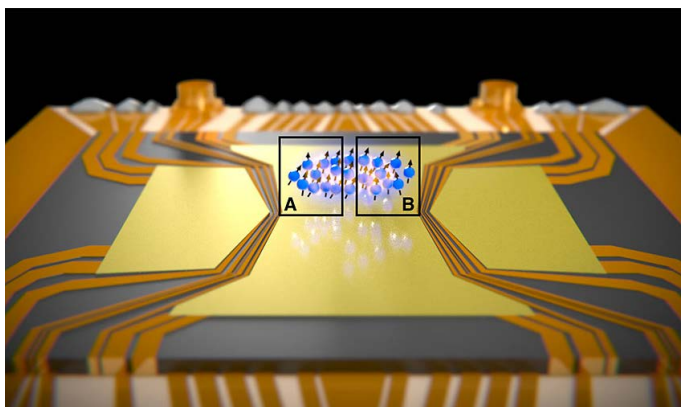
Experimente mit ultrakalten Atomwolken

Für ihre Untersuchungen produzieren die Forschenden eine Wolke aus ultrakalten Atomen, die durch Laserlicht auf Temperaturen von wenigen milliardstel Grad über dem absoluten Nullpunkt gekühlt werden. In dieser Wolke kommt es dauernd zu Zusammenstössen der Atome – was wiederum bewirkt, dass sich die magnetischen Momente (Spins) aller Atome miteinander verschränken. «Betrachten wir dann zwei beliebige Atome der Wolke, bilden diese ein Paar: hat eines der Atome einen eher nach oben gerichteten Spin, ist der des anderen automatisch eher nach unten gerichtet», erklärt Philipp Treutlein. Die Richtung wird jedoch erst festgelegt, wenn das magnetische Moment gemessen wird – auch das ist ja eine der Besonderheiten in der Quantenwelt.

In der Wolke mit den ultrakalten verschränkten Atomen können die Forschenden räumlich getrennte Bereiche untersuchen. Sie messen die Korrelation der Spins in den getrennten Bereichen und bestimmen die genaue Position der Atome. Auf Grundlage der Messungen in einem bestimmten Bereich kann das Treutlein-Team dann auch die Ergebnisse in einem anderen Bereich vorhersagen. «Kürzlich ist es uns sogar gelungen, die Wolke zu teilen und räumlich zu trennen», berichtet Philipp. «Auch hier lässt sich anhand der Messungen belegen, dass die Spins der beiden Wolken miteinander verschränkt sind. Die Messung des Spins in der einen Wolke beeinflusst das Ergebnis der Messung in der anderen Wolke – genau wie bei der «spukhaften Fernwirkung», die Einstein beschrieben hat.»

Reduktion des Quantenrauschens

Mit diesen Experimenten zeigen die Forschenden nicht



Eine Wolke aus Atomen wird von elektromagnetischen Feldern über einem Chip gehalten. Zwischen den räumlich getrennten Regionen A und B konnte das Treutlein-Team die Verschränkung nachweisen. (Illustration: Universität Basel, Departement Physik)

nur, dass die Gesetze der Quantenmechanik auch in dem untersuchten Vielteilchensystem gelten. Sie bieten auch Potenzial für verschiedene Anwendungen.

Mögliche Anwendungen sind präzisere Sensoren und Abbildungsmethoden. Interessanterweise lässt sich mithilfe der Verschränkung der Zustand eines Teilchens über die Messung des anderen Teilchens bestimmen und auch modifizieren. Das Treutlein-Team nutzt dies aus, um die Messgenauigkeit von Atominterferometern zu verbessern. Die Geräte gehören zu den präzisesten Instrumenten, um Gravitation, elektromagnetische Felder und andere fundamentale Grössen zu vermessen.

Das Atominterferometer mittelt bei der Bestimmung eines elektromagnetischen Feldes die Messergebnisse einer grossen Zahl von Atomen. Da die Messergebnisse der einzelnen Atome in der Quantenwelt jedoch zufällig sind, kommt es zu Schwankungen der Messwerte. Diese werden zwar durch die Mittelung reduziert, aber es verbleibt immer noch ein sogenanntes «Quantenrauschen». Durch die Verschränkung sind die Teilchen aber nicht mehr unabhängig voneinander, sondern verhalten sich wie eine Einheit. Das Quantenrauschen der einzelnen Atome ist korreliert und durch eine geschickte Wahl des Messverfahrens lässt sich die Präzision der Messung deutlich verbessern.

Sichere Kommunikation

«Über die Verschränkung lässt sich theoretisch auch eine sichere Kommunikation realisieren», erklärt Philipp Treutlein. Dabei würde der Schlüssel für die auszutauschende Information auf verschränkten Quantensystemen, in der Regel Photonen, basieren. Wenn jemand diesen Schlüssel abhört, merken Sender und Empfänger dies sofort an dem Zustand des Partnerphotons. Wenn aber niemand in das System eingedrungen ist, kann die eigentliche Nachricht verschlüsselt und versendet werden.

Verschränkung für bessere Sensoren

Auch Professor Patrick Maletinsky sieht Vorteile für seine Forschungsziele in der Nutzung der Verschränkung. Er entwickelt zum einen empfindliche Sensoren für winzige magnetische und elektrische Felder, zum anderen beschäftigt er sich in Zusammenarbeit mit Professor Richard Warburton auch mit der Quantenkommunikation.

«In unserer Forschung nutzen wir Stickstoff-Vakanzzentren in Diamanten. In den Vakanzzentren kreisen einzelne Elektronen, deren Spin sich verändert, wenn sie einem elektrischen oder magnetischen Feld ausgesetzt sind. Die Elektronen können angeregt werden und senden dann einzelne Photonen aus, die dann Information über den Zustand des Spins liefern. Auf diese Art und Weise bekommen wir Information über die Änderung einzelner Spins basierend auf den untersuchten Feldern», erklärt Patrick Maletinsky das Prinzip seines Forschungsansatzes.

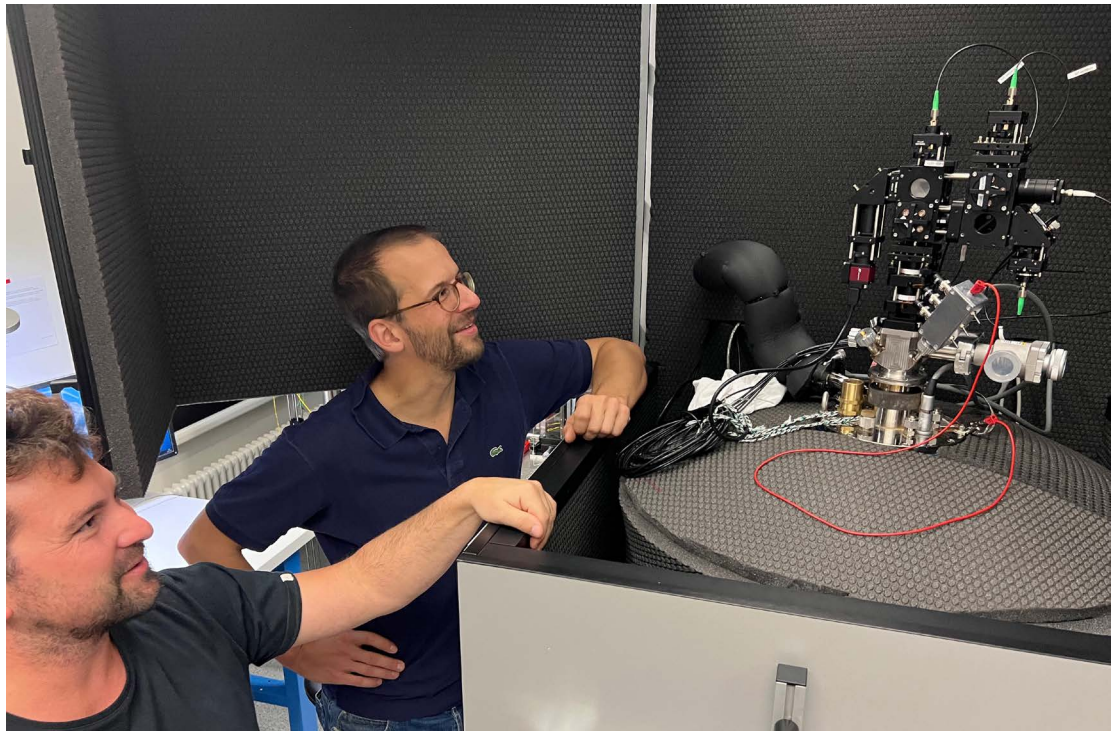
Weitere Informationen:

Forschungsgruppe Patrick Maletinsky

<https://quantum-sensing.physik.unibas.ch/en/>

SNI-Mitteilung

<https://nanoscience.ch/de/2022/10/24/laserlicht-beliebiger-wellenlaenge/>



Patrick Maletinsky untersucht mit seinem Team Möglichkeiten, um seine Sensoren, die auf Stickstoff-Vakanzzentren in Diamanten basieren, mithilfe verschränkter Spins noch besser zu machen. Die Messungen werden bei sehr tiefen Temperaturen in einem Kryostaten durchgeführt.

Forschungsgruppe Richard Warburton

<https://nano-photonics.unibas.ch>

Uni News

<https://www.unibas.ch/de/Aktuell/News/Uni-Research/Photonenzwillinge-ungleicher-Herkunft.html>

Uni News

<https://www.unibas.ch/de/Aktuell/News/Uni-Research/Physiker-entwickeln-rekordverdaechtige-Quelle-fuer-Einzelphtononen.html>

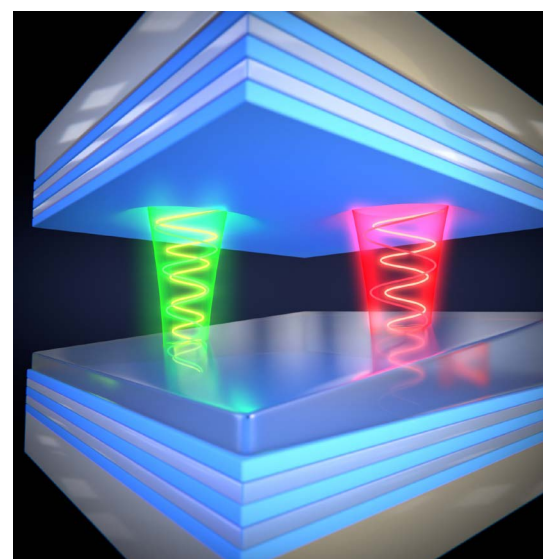
Er sucht mit seinem Team Möglichkeiten, um die Messungen noch weiter zu präzisieren, indem er die Zahl der Sensoren erhöht und die Messergebnisse mittelt, ähnlich wie bei den Atomen im Atominterferometer. Um eine zehnfach genauere Messung zu erhalten, muss er die Zahl der Sensoren von eins auf hundert erhöhen. Wären die Spins der Sensoren jedoch alle miteinander verschränkt, würde theoretisch eine Verzehnfachung der Sensorenzahl ausreichen, um eine zehnmal genauere Messung zu erzielen. «Problematisch ist bei unseren Experimenten im Moment noch, dass wir zu viel Zeit benötigen, um die Spins zu verschränken und dann zu wenig Zeit für die Messung bleibt. Das müssen wir lösen, bevor wir die Verschränkung bei unseren Sensoren auch praktisch nutzen können», beschreibt Patrick Maletinsky.

Spiegelsysteme für bessere Kommunikation

In Zusammenarbeit mit dem Warburton-Team möchte die Gruppe von Patrick Maletinskys Quantum Sensing Lab die Verschränkung der Elektronen in den Diamantsensoren auch zur Quantenkommunikation zu nutzen.

Um verschränkte Spins zu erzeugen, nutzen die Forschenden winzige Vertiefungen, sogenannte Kavitäten, in denen zwei parallel

angeordnete Spiegel dafür sorgen, dass ein Photon nicht verloren geht, sondern hin und her gespiegelt wird und mit Quantensystemen dazwischen interagieren kann. In einer solchen Kavität kann ein Photon zwei Quantensysteme, beispielsweise Elektronen, miteinander koppeln und deren magnetisches Moment (Spin) verschränken. Eine andere Möglichkeit ist es, mehrere Kavitäten mit je einem Quantensystem auszustatten. In jeder Kavität lässt sich dann zum Beispiel der Spin eines Elektrons mit dem Photon ver-



In den Kavitäten gehen die Photonen nicht verloren, sondern werden hin und her gespiegelt. (Bild: Flägan, Riedel und Scixel)

schränken. Die Photonen der verschiedenen Kavitäten lassen sich mit einem geeigneten Versuchsaufbau zur Interferenz bringen, wodurch es zu einer sogenannten «Remote-Verschränkung» zwischen den getrennten Spins kommt. Noch arbeiten die Forschenden daran, diese Art der Verschränkung in ihrem System zu realisieren, um später die Effizienz des Ansatzes weiter zu erhöhen.

Quantenpunkte als Quelle für Quantenlicht

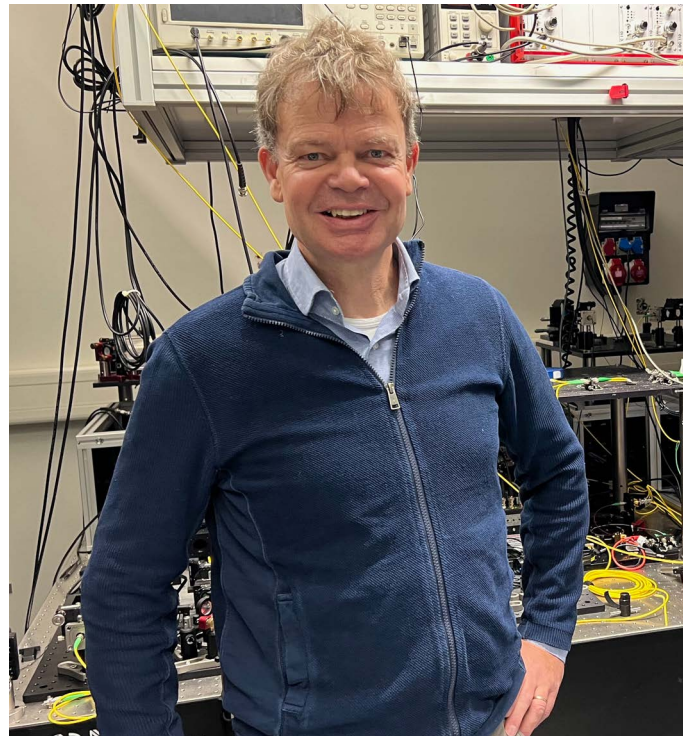
Bei anderen Ansätzen arbeitet Richard Warburton nicht mit den Stickstoff-Vakanzzentren wie in der Zusammenarbeit mit Patrick Maletinsky, sondern mit sogenannten Quantenpunkten. Das sind winzige, nanometerkleine Strukturen in Halbleitermaterialien, in denen Elektronen «gefangen» sind, die nur ganz bestimmte Energieniveaus annehmen. Mit einem Laserpuls kann dann ein Elektron vom niedrigsten Energieniveau auf ein höheres befördert werden. Wenn das Elektron wieder nach unten fällt, wird ein einzelnes Lichtteilchen (Photon) erzeugt.

Kürzlich ist es dem Warburton-Team auf diese Weise gelungen, mit zwei getrennten Quantenpunkten fast vollkommen übereinstimmende Photonen herzustellen. Wenn diese dann auf einen halbdurchlässigen Spiegel treffen, kommt es zu einer Verschränkung der Lichtteilchen und sie reagieren immer als Paar – so wie das auch bei der oben beschriebenen Remote-Verschränkung passiert. Die Lichtteilchen passieren dann den Spiegel entweder zusammen oder sie werden beide reflektiert. In der uns viel vertrauteren Makrowelt gäbe es für zwei Photonen auch noch die Möglichkeit, dass eines der Photonen reflektiert wird, das andere aber den Spiegel passiert. Bei identischen Photonen passiert dies jedoch nicht.

Kette und Gitter als Ziel

«Wir arbeiten vor allem daran, nicht nur ein verschränktes Photonenpaar herzustellen, sondern eine ganze Kette verschränkter Photonen (cluster states) und später dann auch komplexere Gitter (graph states) mit verschränkten Photonen», beschreibt Richard Warburton. «Solche größeren Strukturen mit mehreren verschränkten Photonen könnten in der Quantenkommunikation oder auch in einem Quantencomputer eingesetzt werden.»

Das Herstellungsprinzip für diese größeren verschränkten Strukturen hört sich in der Theorie gar nicht so schwierig an, in der Praxis ist es aber eine enorme Herausforderung mehr als ein verschränktes Photonenpaar herzustellen. Die Forschenden verwenden bei diesem Ansatz einen Quantenpunkt mit einem einzigen Elektron. Sie regen das Elektron an und dieses sendet ein einzelnes Photon aus, das sich dann mit dem Spin des Elektrons verschränkt. Da sich Licht bekanntlich sehr schnell fortbewegt, verschwindet das Lichtteilchen sofort nachdem es ausgesendet wurde. Die Verschränkung mit dem Elektron bleibt aber bestehen. Das Elektron wird dann ein zweites Mal angeregt, es entsteht wieder ein Photon,



Richard Warburton und sein Team nutzen Quantenpunkte als Quelle für Quantenlicht.

das sich dann aber mit dem ersten Photon verschränkt. «Wenn der Prozess zum dritten Mal stattfindet, kann eine kurze Kette mit drei verschränkten Photonen entstehen, die wir dann noch weiter verlängern würden. Und obwohl die Lichtteilchen sich inzwischen an einem ganz anderen Ort befinden, bliebe ihre enge Verbindung bestehen», beschreibt Richard Warburton den von seinem Team gewählten Ansatz. «Ein Gitter mit verschränkten Photonen ist allerdings noch Zukunftsmusik.»

Verschränkte Paare gratis

Während es für manche Forschungsansätze sehr aufwendig ist, Photonen oder Elektronen miteinander zu verschränken, bekommt das Team von Professor Christian Schönberger und Dr. Andreas Baumgartner verschränkte Elektronenpaare «gratis». Die Forschenden von der Quantum- und Nanoelectronics-Gruppe nutzen nämlich Supraleiter als natürliche Quelle, da in einem Supraleiter Elektronen immer paarweise verschränkt auftreten.

Bereits vor einiger Zeit haben die Forschenden erfolgreich ein Bauteil entwickelt, mit dem sich diese verschränkten Elektronenpaare, Cooper-Paare genannt, entnehmen und danach räumlich trennen lassen. Die Trennung erfolgt in zwei räumlich getrennten Fallen, sogenannten Quantenpunkten, in denen die Elektronen für kurze Zeit festgehalten werden. Erst kürzlich konnten die Forschenden dann zeigen, dass zwischen den Spins der beiden getrennten Partner eines Paares eine negative Korrelation existiert – also immer ein Partner einen nach oben gerichteten und der andere Partner einen nach unten gerichteten Spin besitzt. Die Forschenden verwenden dazu zwei Spinfilter,

Weitere Informationen:

Forschungsgruppe Christian Schönenberger
<https://nanoelectronics.unibas.ch/people/christian-schoenenberger/>

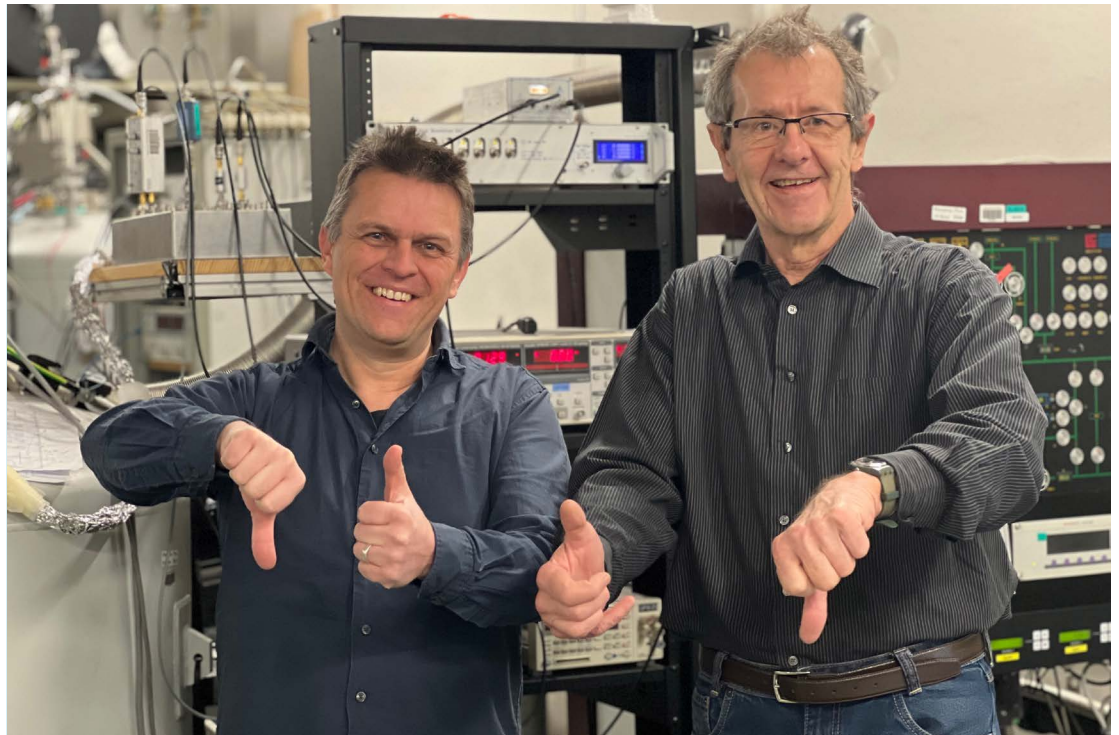
Uni News
<https://www.unibas.ch/de/Aktuell/News/Uni-Research/Spin-Korrelation-zwischen-gepaarten-Elektronen-nachgewiesen.html>

Nature
<https://www.nature.com/articles/s41586-022-05436-z>

Forschungsgruppe Dominik Zumbühl
<https://zumbuhllab.unibas.ch/en/>

Uni News
<https://www.unibas.ch/de/Aktuell/News/Uni-Research/Elektrisch-schaltbares-Qubit-ermoglicht-Wechsel-zwischen-schnellem-Rechnen-und-Speichern.html>

Uni News
<https://www.unibas.ch/de/Aktuell/News/Uni-Research/Heisse-Spin-Quantenbits-in-Siliziumtransistoren.html>

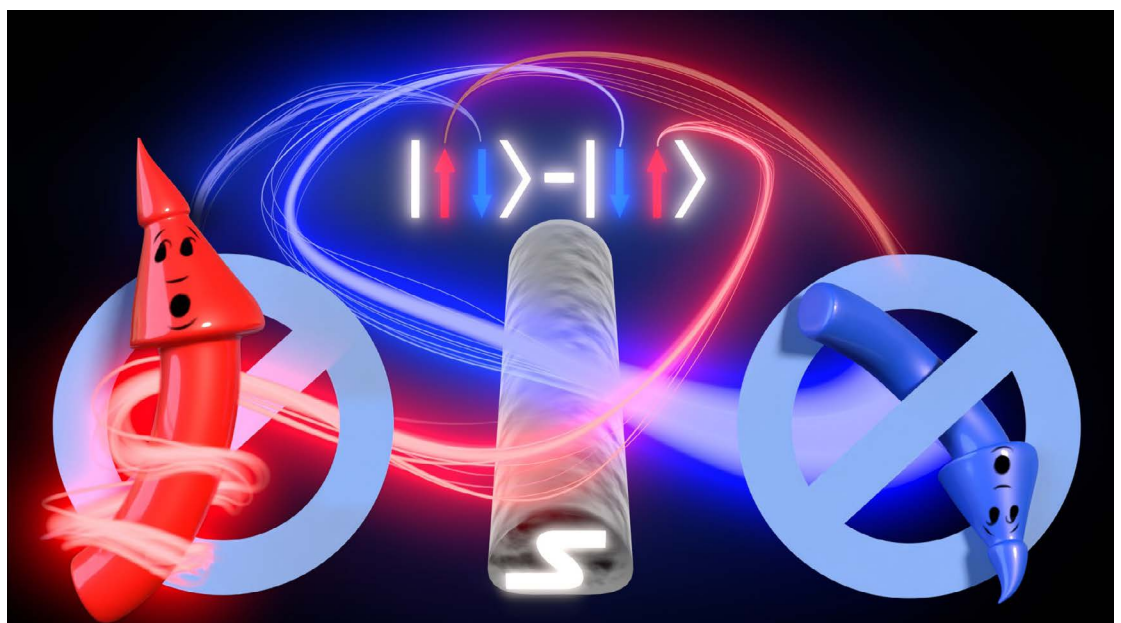


Spin down/Spin up und Spin up/Spin down – Andreas Baumgartner und Christian Schönenberger nutzen Supraleiter als natürliche Quelle für verschränkte Elektronen.

die so eingestellt werden können, dass sie vor allem Elektronen mit einer bestimmten Spinrichtung durchlassen. Wenn beide Spinfilter so eingestellt sind, dass beispielsweise nur Elektronen mit Spin nach oben passieren können, wird der Stromfluss unterdrückt. Wenn aber die beiden Spinfilter in entgegengesetzte Richtungen zeigen, fließt ein elektrischer Strom.

«Die Elektronen der Cooper-Paare sind jedoch räumlich nicht weit genug voneinander getrennt, sodass das Experiment nicht als Bell-Test mit Elektronen gewertet werden kann. Aber daran arbeiten wir noch», berichtet Andreas Baumgartner.

«Nutzen liessen sich derartige verschränkte Elektronen bei der Realisierung des Quanten-



Elektronen verlassen einen Supraleiter nur als Paare mit jeweils entgegengesetztem Spin. Werden beide Wege der Elektronen für eine Spinart durch parallele Spinfilter blockiert, sind gepaarte Elektronen aus dem Supraleiter blockiert – der Stromfluss nimmt ab. (Bild: SNI und Scixel)



Dominik Zumbühl erforscht mit seinem Team die Grundlagen für einen spinbasierten Quantencomputer. Dieser setzt verschränkte Qubits voraus.

computers», erklärt Christian Schönenberger. «So könnte ein Supraleiter zwischen zwei Speichereinheiten (Qubits) des Quantencomputers platziert werden und über die verschränkten Cooper-Paare die beiden Qubits verbinden. Bisher funktionieren die erforderlichen Wechselwirkungen zwischen zwei Qubits nämlich nur, wenn diese sehr nahe beieinander sind – was aber für die Realisierung eines grösseren Systems nicht ideal ist.»

Elementar für Quantencomputing

Für die Entwicklung eines spinbasierten Quantencomputers, zu dessen Entwicklung die Gruppe von Professor Dominik Zumbühl beiträgt, ist die Verschränkung mehrerer Spins eine Grundvoraussetzung.

Ein Quantencomputer arbeitet nicht mit Bits wie ein herkömmlicher Computer, sondern mit quantenmechanischen Zuständen geeigneter Systeme, sogenannten Qubits. Weltweit werden verschiedene Möglichkeiten zur Realisierung von Qubits diskutiert. In Basel wird der Ansatz verfolgt, ein Qubit durch das magnetische Moment (Spin) eines Elektrons zu realisieren. Anders als ein Bit bei einem konventionellen Computer, kann der Spin eines Elektrons nicht nur zwei Zustände (0 und 1) annehmen, sondern kann gleichzeitig nach oben, unten und in zahlreiche andere Richtungen zeigen. Diese verschiedenen Zustände des Spins sind überlagert und stehen erst bei der Messung fest – was zu der viel höheren Rechenleistung eines Quantencomputers im Vergleich zu einem konventionellen Computer führt.

Das Zumbühl-Team untersucht Methoden, um so einen spinbasierten Computer in Halbleitern zu realisieren. Schwierig ist dabei den Elektronenspin stabil zu halten und zu steuern. Den Forschenden gelingt dies bei einzelnen Elektronen über angelegte elektrische Felder schon recht gut. Zusätzlich müssen aber auch mehrere Spins miteinander gekoppelt werden – was in der Quantenwelt über die Verschränkung erfolgt.

Den Forschenden aus dem Quantum Coherence Lab von Dominik Zumbühl ist es kürzlich gelungen, zwei Qubits herzustellen, deren Spins sich beliebig steuern lassen und die miteinander verschränkt sind. «Die beiden Quantensysteme sind dann nicht mehr unabhängig voneinander, sondern reagieren als Einheit», erklärt Dominik Zumbühl. «Bei zwei Qubits führt dies noch nicht zu einer drastischen Beschleunigung der Rechenleistung. Wenn die Zahl der Qubits aber erhöht wird, macht das einen gravierenden Unterschied, da die Rechenoperationen bei verschränkten Qubits nicht nacheinander, sondern parallel ausgeführt werden können.»

Zusammenarbeit ist der Schlüssel zum Erfolg

Beteiligt an den beschriebenen Projekten sind immer ganze Teams – nicht nur von der Universität Basel, sondern von Forschungseinrichtungen aus der ganzen Welt. Enorm wichtig ist auch die enge Zusammenarbeit mit theoretischen Physikerinnen und Physikern. Gerade in Basel gibt es mit den Gruppen der Professoren Christoph Bruder, Jelena Klinovaja, Daniel Loss und Patrick Potts exzellente theoretische Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die eng mit den Forschenden der Experimentalphysik zusammenarbeiten und Impulse für neuartige Anwendungen liefern.

Die Verleihung des Nobelpreises an die drei Quantenforscher Alain Aspect, John Clauser und Anton Zeilinger hat sicher dazu beigetragen, dass Quantenforschung noch mehr in den Fokus der Öffentlichkeit rückt. Nach wie vor ist es zwar für Nicht-Experten schwierig, sich vorzustellen wie das Phänomen der Verschränkung zwischen den Teilchen funktioniert. Aber die beschriebenen Beispiele zeigen, dass diese quantenmechanische Kopplung ein spannendes Forschungsfeld ist und zahlreiche Möglichkeiten für Anwendungen eröffnet. Alle erwähnten Ansätze unterscheiden sich und tragen dazu bei, die Gesetze der Quantenmechanik besser zu verstehen und zu lernen, die enormen technischen Hürden zu überwinden. Obwohl die Quantenforschung in den letzten Jahren enorme Fortschritte gemacht hat, gibt es noch viele Fragezeichen und Herausforderungen bei der technischen Bewältigung der Kontrolle einzelner Teilchen und der winzigen Strukturen.