

Präzisionsschub für die Quantensensorik

13.04.2026, 08:54 | Wissenschaft, Forschung, Bildung

Pressemitteilung von: *idw - Informationsdienst Wissenschaft*

Ein zentraler Faktor für die Leistungsfähigkeit von Sensoren ist die Geschwindigkeit, mit der das System nach einer Störung beziehungsweise Messung in seinen Ausgangszustand zurückkehrt, ähnlich wie das Trieren einer Waage. Bei dem untersuchten Quantensensor entspricht dies dem Übergang von Elektronen aus einem energetisch angeregten in den Grundzustand. Hierbei verharren die Elektronen allerdings für eine kurze Zeit in einer Art „metastabilem Zwischenzustand“. Ein Team von Physikern der Julius-Maximilians-Universität Würzburg (JMU) hat jetzt diese „Wartezeit“ in einem zweidimensionalen Material direkt gemessen: Sie dauert exakt 24 Milliardstel Sekunden.

Dieses Wissen ist vor allem für die Quantentechnologie von Bedeutung. Auf seiner Basis lässt sich die Genauigkeit atomarer Sensoren deutlich steigern; das ebnet den Weg beispielsweise für eine medizinische Diagnostik der Zukunft. Verantwortlich für die jetzt in der Fachzeitschrift *Science Advances* veröffentlichte Studie war Professor Vladimir Dyakonov, Leiter des Lehrstuhls für Experimentelle Physik VI (EPVI).

Fehlstellen als Grundlage von Quantensensoren

Zum Hintergrund: In der modernen Quantentechnologie bilden sogenannte atomare Fehlstellen in Festkörpern die Grundlage für präzise Messinstrumente. Lange Zeit galt Diamant als Standardmaterial für die Quantensensorik, da seine dreidimensionale Kristallstruktur effektiv vor Störeinflüssen von außen schützt. Fehlt in dem normalerweise perfekten Gitter von Kohlenstoffatomen eines dieser Atome, fungiert dieser Defekt als winziger Quantensensor, dessen Eigenschaften man mit Lasern und Mikrowellen kontrollieren kann.

Das Problem dabei: Im dreidimensionalen Diamantgitter ist der Abstand zwischen dem Sensor-Defekt und dem zu untersuchenden Objekt relativ groß, was die Signalstärke reduziert. Anders verhält es sich bei dem Material, das das Würzburger Team untersucht hat: hexagonales Bornitrid (hBN) – ein zweidimensionales Material, das aus einer einzelnen Lage von Atomen aufgebaut ist.

„Im Gegensatz zu 3D-Kristallen erlaubt hBN die Positionierung von Spin-Defekten mit atomarer Präzision innerhalb einer sehr dünnen Schicht“, erklärt Vladimir Dyakonov den entscheidenden Vorteil dieses Materials. Dies ermöglicht einen deutlich geringeren Abstand zum Messobjekt und damit eine stärkere Wechselwirkung. Insbesondere die negativ geladenen Bor-Fehlstellen sind vielversprechend, da sie auch bei Raumtemperatur optisch adressierbar sind. Um das Potenzial dieser 2D-Sensoren voll auszuschöpfen, reicht die bloße räumliche Nähe jedoch nicht aus; es ist zwingend erforderlich, die interne „Uhr“ und die dynamischen Prozesse dieser Defekte genau zu verstehen.

Elektronen verharren in einer Warteschleife

Die Geschwindigkeit, mit der das System nach einer optischen Anregung in seinen Grundzustand zurückkehrt, ist dabei ein entscheidender Faktor. Ein sogenannter „metastabiler Zwischenzustand“, bildlich gesprochen eine Art Parkplatz oder ein Wartezimmer für Elektronen, nimmt dabei eine wichtige Rolle ein: Bevor Elektronen in den Grundzustand zurückkehren können, verweilen sie kurzzeitig in diesem Zustand, was die Abfolge der Messzyklen begrenzt.

Bisher basierte das Wissen über diesen Zwischenzustand primär auf theoretischen Simulationen. Dem Team der Universität Würzburg ist es nun gelungen, die Lebensdauer dieses Zustands erstmals direkt experimentell zu messen. „Bei Raumtemperatur beträgt diese exakt 24 Nanosekunden, bei Temperaturen von flüssigem Helium ist diese Lebensdauer nahezu verdoppelt. Um das beobachten zu können, benutzen wir einen Laser wie ein Stroboskop und machen Schnappschüsse unseres Systems“, erläutert Paul Konrad, Doktorand am Lehrstuhl EPVI, der die Experimente durchgeführt hat. Diese direkte experimentelle Validierung ist für die Fachwelt von hoher Relevanz, da sie eine verlässliche Grundlage bietet, um die Ansteuerung der Sensoren exakt auf die natürliche Dynamik des Materials

abzustimmen.

Effizienzsteigerung durch intelligentes Timing

Wichtig ist das, weil die Empfindlichkeit eines Quantensensors maßgeblich von der sogenannten „kohärenten Kontrolle“ abhängt – also der Fähigkeit, Quantenzustände präzise zu steuern. Die Forschenden konnten nachweisen, dass ein optimiertes Zeitmanagement die Effizienz dieser Steuerung signifikant steigert. Durch das Einfügen einer gezielten Verzögerung von etwa 150 Nanosekunden zwischen der Laseranregung und einer Manipulation durch Mikrowellen wurde sichergestellt, dass das „Wartezimmer“ des Zwischenzustands vollständig geleert ist und alle Elektronen für die Messung im Grundzustand bereitstehen.

Die Ergebnisse dieser Optimierung: „Der Kontrast der Messergebnisse steigerte sich um fast 26 Prozent. Daraus resultiert eine Verbesserung der Sensitivität des Gesamtsystems um etwa elf Prozent“, sagt Dyakonov. Grund für diese Steigerung sei der Effekt, dass durch das angepasste Timing gleichzeitig mehr Spins im Ensemble adressiert werden können. „Da die Empfindlichkeit statistisch mit der Anzahl der beteiligten Spins zunimmt, führt die Entleerung des ‚Parkplatzes‘ direkt zu einem präziseren Messergebnis“, fasst der Physiker zusammen.

Ausblick: Der Weg zur nächsten Generation von Quantensensoren

Die gewonnenen Erkenntnisse sind ein wichtiger Schritt für die Weiterentwicklung quantensensorischer Technologie auf Basis von 2D-Materialien. Das Wissen über die Lebensdauer des Zwischenzustands ermöglicht nun die Gestaltung komplexerer Messprotokolle oder den Einsatz in neuartigen 2D-Heterostrukturen.

Trotz dieser Fortschritte bleiben technologische Herausforderungen bestehen. Die magnetische Umgebung in hBN ist komplexer als in Diamant, da das Material zu 100 Prozent aus magnetischen Isotopen besteht, deren Kernspins die Kohärenzzeit der Sensoren verkürzen. Künftige Forschungsarbeiten müssen daher Wege finden, diese Umgebungsstörungen weiter zu minimieren.

wissenschaftliche Ansprechpartner:

Prof. Dr. Vladimir Dyakonov, Lehrstuhl für Experimentelle Physik VI, T +49 931 31-83111, vladimir.dyakonov@uni-wuerzburg.de

Originalpublikation:

Intermediate excited state relaxation dynamics of boron vacancy spin defects in hexagonal boron nitride. Paul Konrad, Mehran Kianinia, Lesley Spencer, Andreas Sperlich, Lukas Hein, Selin Steinicke, Igor Aharonovich, and Vladimir Dyakonov. Science Advances, 12, eaea0109 (2026) <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aea0109>

Julius-Maximilians-Universität Würzburg

GunnarBartsch (Mitarbeiter in der Presse- und Öffentlichkeitsarbeit)

(0931) 31-82172

gunnar.bartsch@uni-wuerzburg.de

News-ID: 1309027 • Views: 122 (Stand: 02.08.2026)

Link zur Pressemitteilung:

<https://www.openpr.de/news/1309027/Praezisionsschub-fuer-die-Quantensensorik-idw.html>