

Defekte mit Effekt

Einzelne Spins von Defekten in Diamant lassen sich gezielt manipulieren.

Fedor Jelezko

Das letzte Jahrzehnt brachte revolutionäre Fortschritte auf dem Gebiet der Festkörper-Spintronik mit sich. Bis vor wenigen Jahren nicht mehr als ein Gedankenexperiment, lassen sich heute die Spins einzelner Atome kontrollieren und auslesen. Dies ermöglicht bahnbrechende Untersuchungen zu den Grundlagen der Quantenphysik und verspricht wichtige Fortschritte bei der Quanteninformation und der Quantenkryptographie.

Die Methoden der Kernspin- und Elektronenspinresonanz, NMR bzw. ESR, lassen sich heute aus Physik, Chemie und Medizin nicht mehr wegdenken. Da die magnetischen Momente der Nucleonen bzw. Elektronen recht klein sind, liegt die typische Empfindlichkeit dieser konventionellen Methoden zum Auslesen von Spins bei 10^{16} bis 10^{18} Spins für NMR-Experimente und bei 10^{12} bis 10^{14} für ESR-Experimente. Seit den 1940er-Jahren ist bekannt, dass sich die Empfindlichkeit von magnetischen Resonanzexperimenten steigern lässt, indem man die magnetischen Resonanzeffekte im optischen Spektralbereich detektiert (Optically Detected Magnetic Resonance, ODMR) [1]. Damit ist es gelungen, die Empfindlichkeit um sieben Größenordnungen zu verbessern, d. h. 10^5 Spins zu detektieren.

Neueste Verbesserungen auf dem Gebiet der Einzelmolekülspektroskopie haben es inzwischen sogar ermöglicht, den Zustand eines einzelnen Kernspins auszulesen. Diese Technik beruht darauf, die hochauflösende optische Spektroskopie mit der Fluoreszenzmikroskopie zu kombinieren. In den 1960er-Jahren wurde erkannt, dass sich der mit elektronischen Übergängen verbundene hohe Absorptionswirkungsquerschnitt geeigneter organischer Farbstoffmoleküle nutzen lässt, um aromatische Verbindungen hochempfindlich optisch zu detektieren. Moerner und Orrit gelang in einer Pionierarbeit die Spektroskopie an einzelnen Fremdmolekülen in Festkörpern bei tiefen Temperaturen [2, 3].

Der Übergang zur Detektion und Manipulation einzelner Spins liegt recht nahe. Dazu lässt sich die Einzelmolekülspektroskopie mit ODMR-Techniken verknüpfen. 1993 gelang es zwei Arbeitsgruppen gleichzeitig, einzelne Spins in Pentacen-Molekülen, die sich in einem Wirtskristall befanden, zu detektieren. Bei diesen Experimenten regten sie einzelne Moleküle

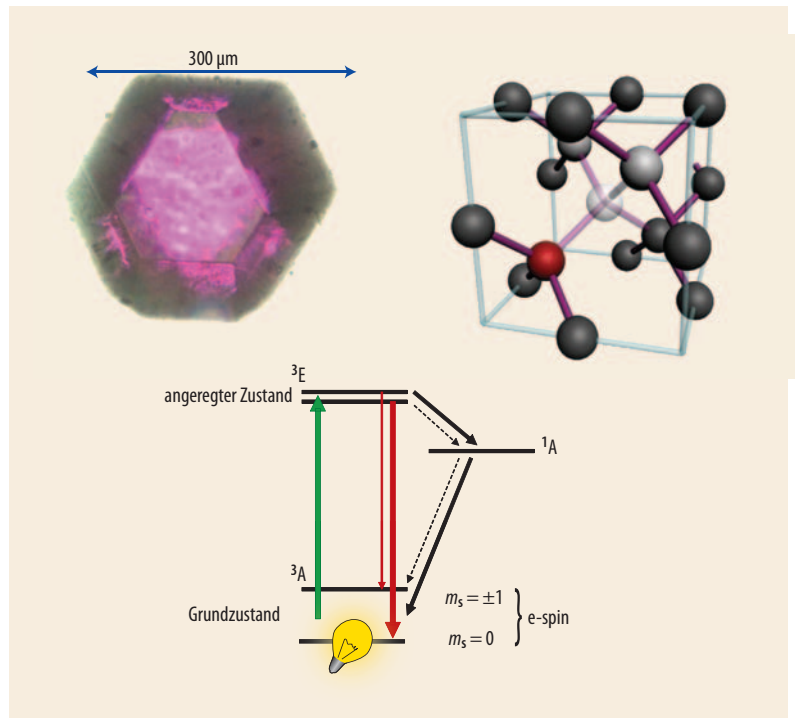


Abb. 1 Farbzentren, die Diamanten eine Pinkfärbung geben (links), versprechen vielfältige Anwendungen. Bei diesen sog. NV-Zentren (rechts) besetzt ein Stickstoffatom (rot) einen Kohlenstoff-

gitterplatz, der nächste Nachbargitterplatz ist eine Fehlstelle (weiß). Das NV-Zentrum besitzt einen starken optischen Übergang zwischen den Spinzuständen mit $m_s = 0$ (rot, unten).

optisch resonant an und detektierten mit Standard-ODMR-Techniken Spinübergänge zwischen den Unterzuständen des Pentacen-Triplett-Zustands [4, 5]. Aufgrund ihrer kurzen Lebensdauer von typischerweise einigen Mikrosekunden sind die optisch angeregten

KOMPAKT

- Das Stickstoff-Fehlstellenzentrum (NV-Zentrum) in Diamant besitzt einen starken optischen Übergang sowie einen Spinfreiheitsgrad mit hohen Kohärenzzeiten und ist daher ein vielversprechender Kandidat für ein Qubit.
- Die Einzelmolekülspektroskopie in Kombination mit der optischen Detektion von magnetischer Resonanz erlaubt es, die optischen Eigenschaften einzelner NV-Zentren zu untersuchen sowie deren Spins kohärent zu manipulieren.
- Die Kernspins mehrerer ^{13}C -Atome lassen sich über die Elektronenspins kontrollieren und bilden somit ein Quantenregister. Es ist bereits gelungen, zwei Kern- und einen Elektronenspin in Diamant zu verschränken.

Dr. Fedor Jelezko, 3. Physikalisches Institut, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 57, 70550 Stuttgart – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Walter-Schottky-Preises auf der 72. Jahrestagung der DPG in Berlin.

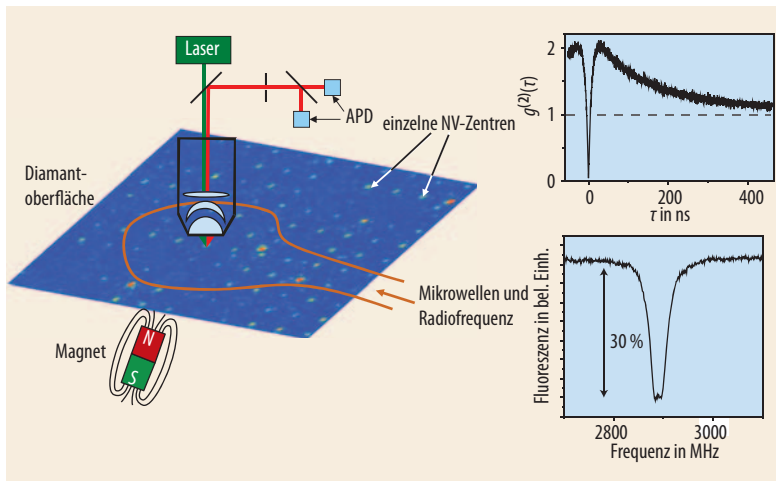


Abb. 2 Im Experiment lassen sich einzelne Spins aufgrund ihrer Fluoreszenz detektieren (links). Die Photonenautokorrelationsfunktion (rechts oben) verschwindet bei $t = 0$, da ein einzelnes NV-Zentrum keine zwei Photonen gleichzeitig emittieren kann (Photonen-antibunching). Das optisch detektierte

ESR-Signal eines einzelnen NV-Zentrums (rechts unten) zeigt, dass sich mit resonanter Mikrowellenstrahlung (2,88 GHz) der $m_s = 0$ -Zustand zugunsten des $m_s = \pm 1$ -Zustands entvölkern lässt. Dieser zeigt eine um ca. 30 % geringere Fluoreszenzintensität.

Triplettzustände organischer Moleküle allerdings von begrenztem Interesse für viele Anwendungen. Im Gegensatz dazu eröffnet die optische Detektion einzelner paramagnetischer Fehlstellen in Diamant neue Perspektiven für Festkörper-Quantentechnologien, die auf einzelnen Spins basieren [6].

Defekt im Diamant

Diamant ist für seine einzigartigen Eigenschaften bekannt – extreme Härte und Beständigkeit, hoher Brechungsindex und die höchste Wärmeleitfähigkeit überhaupt (fünfmal höher als Kupfer). Diese Merkmale eröffnen ihm immer mehr Anwendungsfelder. In letzter Zeit wuchs auch das Interesse an Diamant für die Quanteninformationsverarbeitung. Grund dafür sind die außergewöhnlichen optischen Eigenschaften einer natürlich auftretenden Verunreinigung in Diamant, die in hoher Konzentration für die Pinkfärbung von Diamantkristallen verantwortlich ist (Abb. 1). Dieses sog. Nitrogen-Vacancy Zentrum (NV) ist einer der meistuntersuchten Defekte in Diamant und besteht aus einem Stickstoffatom auf einem Kohlenstoffplatz sowie einer benachbarten Fehlstelle. Da es sich ähnlich verhält wie ein Atom, das im Gitter gefangen und somit von der Umwelt isoliert ist, ist das NV-Zentrum ein attraktiver Kandidat für ein Qubit: Es besitzt einen starken optischen Übergang mit einer Lebensdauer von einigen Nanosekunden und einen Elektronenspinfreiheitsgrad mit hohen Kohärenzzeiten.

Trotz zahlreicher Anstrengungen ist die genaue Struktur des NV-Zentrums noch nicht aufgeklärt. Sicher ist, dass das NV-Zentrum in zwei Ladungszuständen, NV^0 und NV^- , existiert, die einen optischen Übergang bei 575 nm bzw. bei 637 nm (1,945 eV) aufweisen. Dieser Artikel widmet sich

ausschließlich dem NV^- -Zentrum, das in natürlichem Diamant hauptsächlich auftritt und von hier an lediglich als NV-Zentrum bezeichnet wird. Zu den fünf Elektronen, die sich aus den drei Kohlenstoffbindungen und den beiden Valenzelektronen des Stickstoffs zusammensetzen, kommt eine zusätzliche negative Ladung, sodass insgesamt sechs Elektronen mit dem NV-Zentrum assoziiert sind. Hinsichtlich der elektronischen Struktur ist allgemein anerkannt, dass das NV-Zentrum C_{3v} -Symmetrie aufweist. In neuerer Zeit ist es dank konfokaler Mikroskopietechniken gelungen, an einzelnen NV-Zentren Photonenkorrelationsstatistiken, einzelne optische Übergänge, die Kopplung an Nachbarspins und weitere Effekte zu untersuchen, was im Ensemble schwierig oder unmöglich durchzuführen wäre.

Leuchtende Zentren

Das kleine Anregungs- und Detektionsvolumen unseres konfokalen Mikroskops, kombiniert mit einer niedrigen NV-Konzentration in der Probe, ermöglicht es uns, einzelne NV-Zentren abzubilden. Beim Scannen des Fokalbereichs über die Probe leuchten NV-Zentren aufgrund ihrer Fluoreszenz als helle Punkte auf (Abb. 2). Mithilfe der Photonenstatistik der Fluoreszenz lässt sich verifizieren, dass es sich hierbei um einzelne Quantenemitter handelt. Dazu misst man die Wahrscheinlichkeit dafür, zwei Photonen innerhalb eines gewissen Zeitabstands τ zu detektieren, die sog. Autokorrelationsfunktion zweiter Ordnung $g^{(2)}(\tau)$. Während sowohl thermische als auch kohärente Lichtquellen eine Verteilung von Photonenzahlen emittieren, ist es für einen einzelnen Quantenemitter unmöglich, zu einem Zeitpunkt mehr als ein Photon zu emittieren. Daher sollte bei einem einzelnen Quantenemitter idealerweise $g^{(2)}(\tau)$ für $\tau \rightarrow 0$ verschwinden (sog. Antibunching), während für klassische Lichtquellen $g^{(2)}(0) \geq 1$ zu erwarten ist. Da für eine Zweiphotonenquelle $g^{(2)}(0) = 1/2$ gilt, reicht ein Messergebnis von $g^{(2)}(0) < 1/2$ aus, um zu zeigen, dass ein einzelnes Quantensystem die untersuchten Photonen emittiert hat. Als Einzelphotonenquelle hat das NV-Zentrum für die Quantenkryptographie und andere Anwendungen in der Tat viel Aufmerksamkeit erlangt.

Präparieren, messen, manipulieren

Während frühere Experimente gezeigt haben, dass der Spin des NV-Zentrums unter optischer Bestrahlung eine endliche Polarisierung aufweist – der Spinzustand $m_s = 0$ im Grundzustand wird mit einer Wahrscheinlichkeit von über 80 % besetzt – deuten neuere Experimente darauf hin, dass sogar vollständige Polarisierung stattfinden kann. Dennoch wird der genaue Prozess, der für die optisch induzierte Spinpolarisierung verantwortlich ist, noch immer kontrovers diskutiert. Derzeitige Modelle für die Spinpolarisierung

beinhalten einen elektronischen Singulettzustand, der energetisch zwischen den Grund- und angeregten Triplettzuständen liegt (Abb. 1). Übergänge in diesen Singulettzustand finden hauptsächlich aus den angeregten $m_s = \pm 1$ -Zuständen statt, Übergänge aus dem Singulettzustand meist in den $m_s = 0$ -Grundzustand. Falls die verbleibenden optischen Übergänge spinerhaltend sind, sollte dieser Mechanismus das NV-Zentrum vollkommen in den $m_s = 0$ -Zustand polarisieren.

Ein Großteil der derzeitigen Forschung am NV-Zentrum basiert darauf, den Spin im Grundzustand optisch zu detektieren. Da ein im $m_s = 0$ -Zustand präpariertes NV-Zentrum stärker fluoresziert als im $m_s = 1$ -Zustand [7], ist bei Raumtemperatur eine effiziente Detektion der mittleren Spinpopulation möglich. Bei resonanter Anregung unter Tieftemperaturbedingungen ist dieser Effekt noch stärker ausgeprägt, sodass ein einzelner Laserpuls reicht, um den Spinzustand auszulesen (Single Shot Readout) [8]. Bei Raumtemperatur erlaubt es derselbe Prozess, der die Spinpolarisierung bewirkt, den Spinzustand auszulesen. Nichtresonante Anregung (z. B. bei 532 nm) regt optische Übergänge für $m_s = 0$ sowie für $m_s = \pm 1$ an. Da jedoch die Triplett-Singulett-Übergänge hauptsächlich aus den angeregten $m_s = \pm 1$ -Zuständen stattfinden, kann die Population der $m_s = \pm 1$ -Zustände weniger Fluoreszenzzyklen durchlaufen, bevor sie in den relativ langlebigen Singulettzustand gelangt. Der $m_s = \pm 1$ -Zustand fluoresziert daher weniger stark als der $m_s = 0$ -Zustand, wobei die anfängliche Fluoreszenzdifferenz 20 bis 40 % beträgt. Ein externes Mikrowellenfeld in Resonanz mit den Übergängen erlaubt es, den Spinzustand zu manipulieren. Obwohl es schwierig ist, ein Mikrowellenfeld an einen einzelnen Spin anzulegen, lassen sich dennoch einzelne Spins untersuchen und manipulieren, indem das optische Anregungsvolumen auf ein einzelnes NV-Zentrum beschränkt wird.

Mit diesen Werkzeugen besitzt man die Mittel, um einzelne Elektronenspins in Festkörpern bei Raumtemperatur zu präparieren, zu messen und zu manipulieren.

Spins im Bad

In einem kleinen externen Magnetfeld bildet der Übergang von $m_s = 0$ nach $m_s = 1$ des NV-Zentrums ein effektives Zwei-Niveau-System. Treibt man diesen Übergang resonant mit Mikrowellen, so werden Populationsoszillationen zwischen $m_s = 0$ und $m_s = 1$ induziert, bekannt als Rabi-Oszillationen. Um diese zu messen, variieren wir die Dauer τ der resonanten Mikrowellenpulse und lesen die im Zustand $m_s = 0$ verbleibende Population aus [9] (Abb. 3). Da die Rabi-Oszillationen einem vollständigen Zustandsübergang zwischen $m_s = 0$ und $m_s = 1$ entsprechen, können wir unsere Messinstrumente bezüglich der Population p im $m_s = 0$ -Zustand kalibrieren. Wie Abb. 3 zeigt, findet sich die minimale Fluoreszenz bei $p = 0$ und die maximale

Fluoreszenz bei $p = 1$. Die Frequenz der Rabi-Oszillationen hängt von der Mikrowellenleistung ab. Für eine gegebene Mikrowellenleistung messen wir die Rabi-Oszillationen, um die für einen Spinflip zwischen $m_s = 0$ und $m_s = 1$ nötige Pulslänge festzustellen. Dieser Puls wird π -Puls genannt, denn er entspricht einer halben Rabi-Periode. Kürzere oder längere Pulse erzeugen Superpositionen der Spineigenzustände. Speziell überführt ein θ -Mikrowellenpuls (d. h. ein Puls der Dauer $\Omega_{\text{Rabi}} \tau = \theta$, wobei Ω_{Rabi} die Frequenz der Rabi-Oszillationen ist) den Zustand $m_s = 0$ in den Zustand $\cos(\theta/2)|0\rangle + i \sin(\theta/2)|1\rangle$. Das ist äquivalent zu einer Drehung des Spin- $1/2$ -Systems um einen Winkel θ um eine Achse auf der Bloch-Kugel. Die Phase der Mikrowellenanregung bestimmt die relative Phase zwischen den beiden Komponenten (oder äquivalent: die Orientierung in der x - y -Ebene).

Rabi-Oszillationen entsprechen einer getriebenen Spindynamik. Es ist auch möglich, freie (ungetriebene) Spindynamik zu untersuchen, indem man eine Superposition der $m_s = 0$ - und $m_s = 1$ -Eigenzustände erzeugt und diese sich frei entwickeln lässt. Daraufhin ermöglicht es ein sog. Hahn-Echo mit der Mikrowellenpulssequenz $\pi/2 - \tau_1 - \pi - \tau_2 - \pi/2$, die Phase der beiden Zustände wieder in eine messbare Populationsdifferenz umzuwandeln (Abb. 4). Für ein einfaches Zwei-Niveau-System führt die Hahn-Echo-Sequenz zu einer maximalen Population am Ende der Sequenz, falls die beiden Intervalle τ_1 und τ_2 der freien Präzession gleich lang sind. Der π -Puls in der Mitte der Echosequenz refokussiert die Magnetfeldfluktuationen. Allerdings lassen sich schnelle Fluktuationen, die innerhalb der Echosequenz auftreten, nicht refokussieren, wodurch die Echoamplitude abnimmt. Im Allgemeinen führen paramagnetische Verunreinigungen in Diamant, die man „Spinbad“ nennt, zu derartigen Fluktuationen. Kürzlich wurde gezeigt, dass sich Wechselwirkungen innerhalb dieses Spinbads in hochreinen Diamanten stark unterdrücken lassen [10, 11]. Ein weiterer Effekt

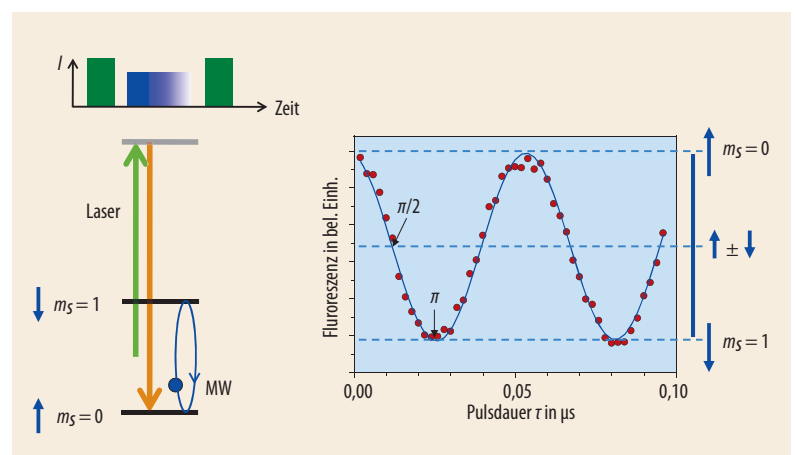


Abb. 3 An einzelnen Elektronenspins lassen sich Rabi-Oszillationen nachweisen. Dazu wird mit dem ersten Laserpuls das NV-Zentrum im $m_s = 0$ -Zustand präpariert. Darauf folgt ein Mikrowellenpuls der Länge τ . Der letzte Laserpuls dient

dazu, den Spinzustand des NV-Zentrums über die Fluoreszenzintensität auszulesen. Durch die genaue Kontrolle der Mikrowellenpulslänge ist es möglich, beliebige Superpositionszustände oder Bevölkerungsinverson zu erzeugen.

des Spinbads sind Flip-Flop-Prozesse, die zwischen den Kernspins der seltenen ^{13}C -Isotope auftreten (natürliches Vorkommen: ca. 1 %). Deshalb lässt sich die Kohärenzzeit durch Züchtung isotonenreiner ^{12}C -Diamanten verbessern.

Kontrollierte Kopplung

Die längste Kohärenzzeit aller Festkörpersysteme (zumindest bei Raumtemperatur) und die Verfügbarkeit gängiger optischer Ausleseverfahren machen das NV-Zentrum zu einem der vielversprechendsten Kandidaten der Festkörper-Quanteninformationsverarbeitung. Die im Diamantgitter vorkommenden ^{13}C -Kohlenstoff-Atomkerne (Kernspin $I = 1/2$) sind nicht nur Quellen für Dekohärenz, sondern lassen sich auch gezielt nutzen. Speziell sind diejenigen ^{13}C -Kerne von Interesse, die in der nächsten Umgebung (wenige nm) des Elektronenspins liegen [10, 12]. Diese Kernspins spüren das von den Elektronenspins erzeugte Magnetfeld, sodass sich ihre Energieniveaus relativ zu denen der Kernspins im Spinbad verschieben. Flip-Flop-Prozesse mit Kernspins aus dem Spinbad sind dann nicht mehr erlaubt. Über den Elektronenspin ist es also möglich, diese nahegelegenen Kernspins effizient zu kontrollieren. Die Magnetfeldaufspaltung der Kohlenstoffkerne ist bei Raumtemperatur sehr klein verglichen mit der thermischen Energie. Dadurch ist die Kernspinpolarisation sehr gering. Die Spinpolarisation des optisch ausgerichteten Elektronenspins lässt sich allerdings auf den Kohlenstoff-Kernspin transferieren. Da man durch optisches Pumpen eine sehr hohe Elektronenspinpolarisation und somit auch hohe Kernspinpolarisation erreicht, liegen die effektiven Kernspintemperaturen in einem solchen System im Sub- μK -Bereich [13], obwohl der Diamantkristall noch immer Raumtemperatur hat. Die Kohärenzzeiten der

Kernspins übertreffen die der Elektronenspins wegen ihrer kleineren magnetischen Momente um mindestens zwei Größenordnungen. Daher eignet sich ein solches System aus mehreren Kernspins als kleines Quantenregister. Erst kürzlich gelang es, in einem solchen Elektron-Kern-Spin-Cluster im Diamantgitter Verschränkung zwischen drei Spins (ein Elektron und zwei Kernspins) zu zeigen [14]. Damit spielt diamantbasiertes Quantencomputing in derselben Liga von Quantensystemen wie Ionen und Photonen, wo ebenfalls bereits mehr als zwei Teilchen verschränkt wurden.

Ein Kernpunkt auf dem Weg zum Quantenprozessor ist die Skalierbarkeit hinauf zu großen Zahlen an Qubits. Diese setzt Kopplung zwischen verschiedenen Elektronenspin-Qubits voraus. Neueste Experimente gehen erste Schritte in Richtung einer solchen Kopplung zwischen eng benachbarten Elektronenspins. Demnach lassen sich einzelne NV-Zentren im Diamantgitter mit hoher Genauigkeit erzeugen. Aufgrund der kurzreichweitigen dipolaren magnetischen Kopplung der Spins setzt eine kontrollierbare Kopplung jedoch eine auf wenige Nanometer genaue Implantationsposition voraus. Erste Experimente sind in Arbeit, um dieses Ziel zu erreichen. Eine andere Möglichkeit, die Elektronenspins zu koppeln, sind optisch aktive spinabhängige Übergänge im NV-Zentrum. Bei tiefen Temperaturen tragen Photonen, die ein einzelnes NV-Zentrum emittiert hat, Informationen über seinen Spinzustand [8, 15, 16]. Dadurch lässt sich Kopplung von Elektronenspin-Qubits über die Kopplung optischer Dipole realisieren. Abb. 5 zeigt, wie Photonen, die von zwei voneinander entfernten NV-Zentren stammen, dazu verwendet werden können, um Verschränkung zu erzeugen. Zwei einzelne Photonen von zwei verschiedenen NV-Zentren interferieren in einem Strahlteiler. Da die beiden Photonen ununterscheidbar sind, gibt ein Klick auf einem Detektor keine Information

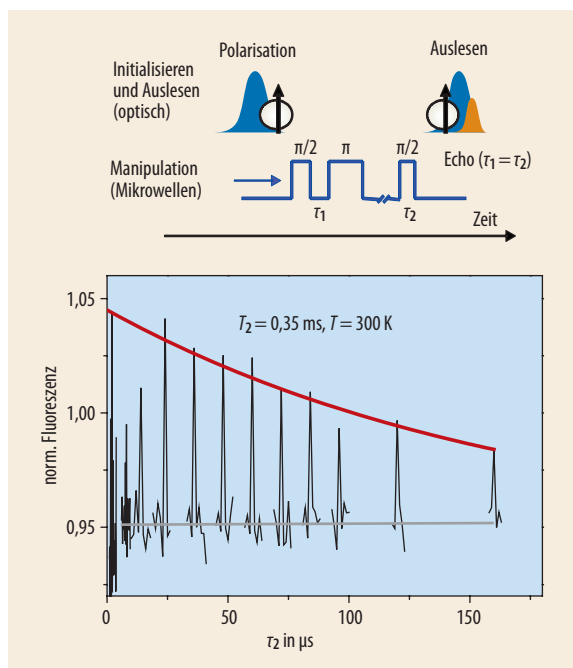


Abb. 4 Beim Hahn-Echo an einem einzelnen Elektronenspin erzeugt der erste $\pi/2$ -Puls einen Spin-Superpositionszustand (oben). Dessen Phase entwickelt sich frei im darauffolgenden Zeitintervall τ_1 . Da die Sequenz sehr oft wiederholt wird, wirkt sich ein fluktuierendes Magnetfeld auf die Phasenentwicklung des jeweiligen Durchlaufs unterschiedlich aus. Die Zustände verschiedener Durchläufe akkumulieren also während τ_1 verschiedene Phasen. Der mittlere π -Puls der Sequenz invertiert die Phase des Zustands, sodass nach Verstärken eines weiteren Zeitintervalls $\tau_2 = \tau_1$ die verschiedenen Phasen refokussiert werden. Der zweite $\pi/2$ -Puls überführt die Phase des Superpositionszustands wieder in eine Populationsdifferenz, die sich mit der bereits beschriebenen Methode optisch auslesen lässt. Diese Echo-Sequenz kann also nur Magnetfeldfluktuationen korrigieren, die sich im Vergleich zur Dauer der Sequenz nur langsam ändern. Schnellere Magnetfeldfluktuationen lassen sich nicht korrigieren und führen zu einem exponentiellen Zerfall der Echoamplitude mit steigendem τ .

über den Weg, den die Photonen genommen haben. Somit ist es möglich, zwei weit voneinander entfernte Spins zu verschränken. Auch wenn dieser Ansatz nur mit beschränkter Effizienz (d. h. probabilistisch) funktioniert, ermöglicht er es dennoch, eine große Anzahl von Spins zu verschränken. Deterministische Verschränkung lässt sich durch starke Kopplung zwischen Photonen und Spins erreichen, welche durch Resonatoren hoher Güte vermittelt wird.

Verschlüsselte Botschaften im Diamant

Es mag den Anschein haben, dass Quantencomputing und die damit verbundene präzise Kontrolle über eine große Anzahl einzelner Atome noch sehr weit von der experimentellen Realisierung entfernt ist. Einfachste Quantencomputer sind jedoch bereits in kommerziell erhältlichen Quantenkryptographie-Systemen implementiert. Die Sicherheit solcher Systeme beruht darauf, dass es unmöglich ist, einen Quantenzustand zu kopieren. Deshalb lässt sich ein kryptographischer Schlüssel, wenn er in einzelnen Photonen kodiert ist, nicht ausspionieren. Die Information im Zustand einzelner Photonen (gewöhnlich im Polarisationsfreiheitsgrad) zu kodieren, scheint trivial, ausschlaggebend ist vielmehr die Realisierung effizienter Einzelphotonenquellen. Stark abgeschwächte Laserstrahlung eignet sich nicht, da Intensitätsschwankungen immer zu einer endlichen Wahrscheinlichkeit führen, zwei Photonen gleichzeitig im Puls zu haben. Da man das zweite Photon aus dem Kommunikationskanal extrahieren kann, ohne das erste zu stören, wäre die Sicherheit des Quantenkryptographie-Systems nicht mehr gegeben.

Seit dem vergangenen Jahrzehnt ist bekannt, dass man mit einzelnen Quantensystemen einzelne Photonen effizient erzeugen kann. Einzelne Moleküle in organischen Trägern und Quantenpunkte sind Beispiele für effiziente Einzelphotonenquellen. Der Nachteil bei Quantenpunkten besteht in den notwendigen tiefen Temperaturen. Einzelne organische Moleküle können einzelne Photonen bei Raumtemperatur erzeugen, allerdings ist hier die Photostabilität problematisch. Die einzigen Festkörpersysteme, welche die Erzeugung einzelner Photonen bei Raumtemperatur erlauben, sind Defektzentren in Diamant. Dabei scheint das bisher beschriebene NV-Zentrum allerdings nicht der ideale Kandidat für praktische Quantenkryptographie zu sein, da es ein breites Fluoreszenzspektrum von 640 bis 750 nm hat. Daher ist es nicht möglich, den Einzelphotonenstrom von der Hintergrundstrahlung zu isolieren, insbesondere für die Transmission eines Schlüssels durch den freien Raum im Tageslicht. Andere Defekte (wie z. B. das Nickelbasierte NE8-Zentrum) mit schmalen Emissionslinien versprechen weitere Verbesserungen [17]. Das NE8-Zentrum besteht aus einem zentralen Nickelatom, das von vier Stickstoffatomen umgeben ist. Die Fluoreszenzlinie ist bei Raumtemperatur lediglich 1,5 nm breit. Außerdem liegt die Emissionslinie um 800 nm,

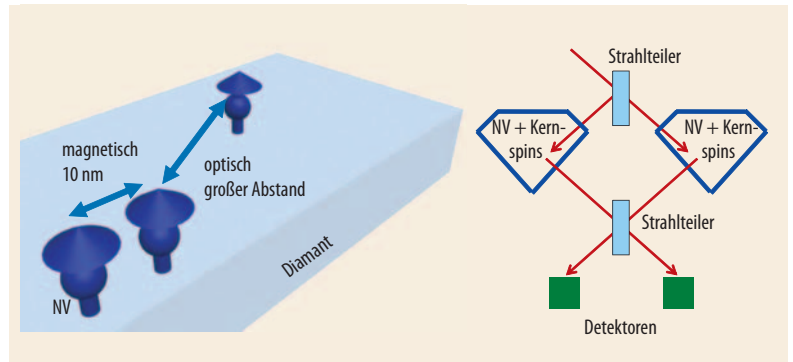


Abb. 5 Verschränkung zwischen Spins im Diamant über dipolare magnetische und optische Kopplung.

was sich für optische Datenübertragungskanäle eignet. Die wesentlichen photophysikalischen Parameter sind denen des NV-Zentrums ähnlich, besonders die Lebensdauer des angeregten Zustands von ungefähr 5 ns erlaubt eine hohe Wiederholrate der Einzelphotonenquelle. Da das NE8-Zentrum vier N-Atome beinhaltet, scheint es unwahrscheinlich, dass man es wie das NV-Zentrum implantieren kann. Allerdings lässt es sich während des Wachstumsprozesses eines synthetischen Diamanten durch chemische Gasphasenabscheidung erzeugen [18].

Diamant – des Forschers bester Freund

Dieser Artikel hat die außergewöhnlichen optischen Eigenschaften einzelner Atomfehlstellen und ihrer Spins im Diamantgitter aufgezeigt. Das Potenzial solcher Defektzentren als Kandidaten für die Quanteninformationsverarbeitung und Quantenkryptographie hat man bereits vor einem Jahrzehnt erkannt, allerdings stehen die dafür erforderlichen Technologien zur Kontrolle einzelner Spins erst seit der jüngeren Vergangenheit zur Verfügung.

Moderne Technologien geben der wissenschaftlichen Forschung oft neue Impulse. Die Möglichkeit der Einzelatomimplantation erlaubt es, die optischen Eigenschaften von Defektzentren in Diamant zu nutzen, um einzelne Photonen zu erzeugen. Des Weiteren lassen sich die magnetischen Momente einzelner Atome für Quantenanwendungen nutzen. Die Erzeugung und präzise Charakterisierung kleiner Quantenregister wurde bereits unter Beweis gestellt. Dies beweist die erstklassige Güte der Verschränkung, was die potenzielle Verwendung einzelner Spins in Quantenanwendungen wie Quantenteleportations-Protokollen vorantreibt. Der zukünftige Einsatz der diamantbasierten Quanteninformationsverarbeitung hängt vom Fortschritt auf dem Gebiet der Materialwissenschaften ab. Deterministische Implantation einzelner Atome mit hoher räumlicher Auflösung ist ein wichtiges Ziel, erste Schritte hierzu sind kürzlich gelungen [19, 20]. Zudem würde die optische Kopplung zwischen Zentren eine Verschränkung über große Abstände durch Interferenz einzelner Photonen ermöglichen.

Eine andere in der Entstehung begriffene Anwendung einzelner Spins im Diamant findet sich in der Magnetometrie. Die sehr langen Kohärenzzeiten

einzelner Spins im NV-Zentrum ermöglichen ihren Einsatz als extrem sensible Magnetfeldsonden. Die Feldgenauigkeit ist durch die Linienbreite des ESR-Übergangs begrenzt. Auch wenn Gasmagnetometer für gewöhnlich eine höhere Feldempfindlichkeit aufweisen, hat das NV-Zentrum den Vorteil, einzelne Spins messen zu können. Die Sondengröße liegt somit in der Größenordnung einzelner Atome und ermöglicht räumliche Auflösungen im Sub-Nanometerbereich [21].

Danksagung

Mein außerordentlicher Dank für die jahrelange Unterstützung gilt Prof. Jörg Wrachtrup und den Mitarbeitern des 3. Physikalischen Institutes der Universität Stuttgart. Ich bedanke mich auch bei Florian Kaiser und Johannes Beck für die Hilfe beim Schreiben des Artikels. Des Weiteren möchte ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft, der EU und der Landesstiftung Baden-Württemberg für ihre großzügige finanzielle Unterstützung danken.

Literatur

- [1] J. Brossel und F. A. Bitter, Phys. Rev. **86**, 308 (1952)
- [2] M. Orrit und J. Bernard, Phys. Rev. Lett. **65**, 2716 (1990)
- [3] W. E. Moerner und L. Kador, Phys. Rev. Lett. **62**, 2535 (1989)
- [4] J. Wrachtrup et al., Nature **363**, 244 (1993)
- [5] J. Kohler et al., Nature **363**, 242 (1993)
- [6] A. Gruber et al., Science **276**, 2012 (1997)
- [7] F. Jelezko und J. Wrachtrup, J. Phys.-Cond. Matt. **16**, R1089 (2004)

- [8] F. Jelezko et al., Appl. Phys. Lett. **81**, 2160 (2002)
- [9] F. Jelezko et al., Phys. Rev. Lett. **92**, 076401 (2004)
- [10] L. Childress et al., Science **314**, 281 (2006)
- [11] T. Gaebel et al., Nature Phys. **2**, 408 (2006)
- [12] F. Jelezko et al., Phys. Rev. Lett. **93**, 130501 (2004)
- [13] M. Dutt et al., Science **316**, 1312 (2007)
- [14] P. Neumann et al., Science **320**, 1326 (2008)
- [15] A. Batalov et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 077401 (2008)
- [16] P. Tamarat et al., New Journal of Physics **10**, 045004 (2008)
- [17] T. Gaebel et al., New Journal of Physics **6**, 98 (2004)
- [18] J. R. Rabeau et al., Appl. Phys. Lett. **86**, 131926 (2005)
- [19] J. Meijer et al., Applied Physics A **83**, 321 (2006)
- [20] J. Meijer et al., Applied Physics A **91**, 567 (2008)
- [21] G. Balasubramanian et al., Nature, im Druck (2008)

DER AUTOR

Fedor Jelezko (hier bei der Preisverleihung in Berlin) hat in Minsk Physik studiert und in Bordeaux promoviert. Dort lernte er die Spektroskopie und Mikroskopie an einzelnen Molekülen kennen, mit denen er sich seither beschäftigt. Von 1998 bis 2000 war Fedor Jelezko in Chemnitz tätig, seit 2000 arbeitet er in Stuttgart, wo er in wegweisenden Experimenten gezeigt hat, welches Potenzial Farbzentren in Diamant für die Quanteninformationsverarbeitung haben.



J. Röhl