

■ Kernspinbad unter Kontrolle

Drei Arbeitsgruppen ist es gelungen, Kernspins in einer Entfernung von mehreren Nanometern vom NV-Zentrum in Diamant zu koppeln.

Um ein einzelnes Quantensystem zu untersuchen, muss man es normalerweise von der Umgebung abschirmen, damit seine Kohärenz erhalten bleibt. Das ist z. B. die Voraussetzung für die Experimente, die im Zentrum des diesjährigen Physik-Nobelpreises stehen.⁺⁾ Wenn die Umgebung des Quantensystems aber kein rein thermisches Bad mit inkohärenten Bewegungen ist, sondern selbst aus Quantensystemen besteht, können diese als Ausgangspunkt für neue Anwendungen dienen. Dies ist nun für das NV-Zentrum in Diamant gelungen. Das NV-Zentrum besteht aus einem Stickstoffatom mit benachbarter Gitterfellehlerstelle, die ein effektives Zwei-Elektronen-System im Diamant bilden [1]. Dies führt zu einem Elektronenspin $S = 1$, der sich bei Raumtemperatur präzise kontrollieren und optisch auslesen lässt.

Die starre Diamantmatrix umgibt das NV-Zentrum und schirmt es gegen Störeinflüsse ab. Für die Phasenkohärenz des NV-Zentrums ist seine magnetische Umgebung ausschlaggebend. Störungen durch andere Elektronenspins lassen sich meist vermeiden. Weit schwieriger ist dies für ^{13}C -Isotope, die im Gegensatz zu ^{12}C einen Kernspin $I = 1/2$ haben. Bei einer natürlichen Häufigkeit von 1,1 Prozent sind zwei ^{13}C -Kerne im Diamant nur rund 0,5 nm voneinander entfernt. In Material mit einem ^{13}C -Gehalt von nur 100 ppm vergrößert sich der Abstand auf rund 2,5 nm.

Die Umgebung eines NV-Zentrums ist also voll von ^{13}C -Kernen, die ihre Spinorientierung ändern und magnetische Fluktuationen verursachen können. Daher limitieren sie die Phasenkohärenz eines NV-Elektronenspins [2], obwohl jeder einzelne Kernspin selbst ein Quantensystem ist. Gelänge es, diese Quantensysteme kohärent zu kontrollieren, so ließen sich die magnetischen Fluktuationen unterdrücken, und ein größeres Quantensystem könnte beispiels-

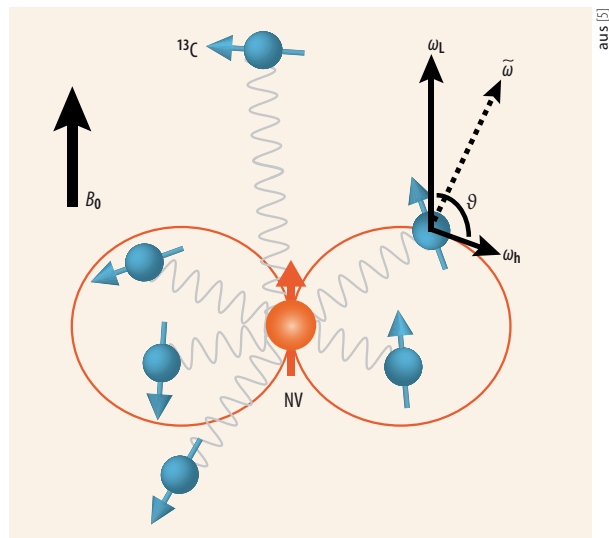


Abb. 1 Wird der NV-Elektronenspin in den Superpositionszustand gebracht und durch π -Pulse periodisch invertiert, so präzidiert jeder ^{13}C -Kernspin im Kernspinbad abwechselnd um eine Achse ω_L und eine Achse $\tilde{\omega}$, die von seiner Hyperfeinkopplung ω_h abhängt (orangene Linie).

weise dazu dienen, ein Quantenregister aufzubauen. Mittels der starken Hyperfeinkopplung zum NV-Elektronenspin ist es in direkter Nachbarschaft zum NV-Zentrum gelungen, die ^{13}C -Kernspins zu kontrollieren [2].

Dreifache Kontrolle

Nun konnten drei Forschergruppen unabhängig voneinander diese Kontrolle auf weit entfernte ^{13}C -Kernspins im Diamant ausdehnen [3–5]. Diese weisen eine sehr ähnliche Hyperfeinkopplung an das NV-Zentrum auf und tragen somit normalerweise als störendes „Kernspinbad“ zur Dekohärenz bei. In Stuttgart haben Forscher um Jörg Wrachtrup in sehr reinen Diamanten, in denen die Phasenkohärenz des NV-Zentrums besonders lang ist, ^{13}C -Kernspins bis zu einem Abstand von 3 bis 4 nm koppeln können [3]. Eine Arbeitsgruppe in Harvard hat normale Diamantproben im schwachen äußeren Magnetfeld untersucht, wo die Anisotropie der (dipolaren) Hyperfeinkopplung zwischen NV-Elektronenspin und ^{13}C -Kernspin deutlich zutage tritt [4]. Fedor Jelezko und Kollegen von der TU Delft konnten mittels hoher Magnetfelder bis zu sechs Kernspins simultan beobachten [5].

Allen Arbeiten gemeinsam ist die Strategie, das Spinbad als Gan-

zes durch periodisches Umklappen des NV-Elektronenspins zu entkoppeln (Abb. 1). Dazu wurde der Elektronenspin in einem Superpositionszustand präpariert und durch eine periodische Folge von Mikrowellenpulsen (Entkopplungssequenz) von den meisten ^{13}C -Kernspins isoliert. Die Mikrowellenpulse invertieren den NV-Elektronenspin (Drehwinkel π), wodurch sich die Magnetfeldfluktuationen fast aller ^{13}C -Kernspins ausmitteln. Dadurch verlängert sich die Kohärenzzeit des NV-Elektronenspins.

Die Quantennatur des ^{13}C -Kernspinbades äußert sich darin, dass jeder Kernspin eine kohärente Präzessionsbewegung ausführt, deren Geschwindigkeit und Rotationsachse durch das lokale Magnetfeld vorgegeben ist. Dieses setzt sich zusammen aus dem äußeren Magnetfeld und demjenigen, das durch die Hyperfeinkopplung zum NV-Elektronenspin zustande kommt. Stimmt der Abstand der π -Pulse mit der Präzessionsbewegung eines bestimmten ^{13}C -Kernes überein, so verstärkt sich die Wechselwirkung mit dem NV-Elektronenspin periodisch bis hin zur Verschränkung. Bei einem hohen äußeren Magnetfeld ($\omega_L \gg \omega_h$) ergibt sich die einfache Resonanzbedingung (Abb. 1)

$$\tau(\omega_L + \omega_h \cos \vartheta) = (2k - 1)\pi, k \in \mathbb{N},$$

^{+) vgl. den Artikel auf S. 24 in diesem Heft}

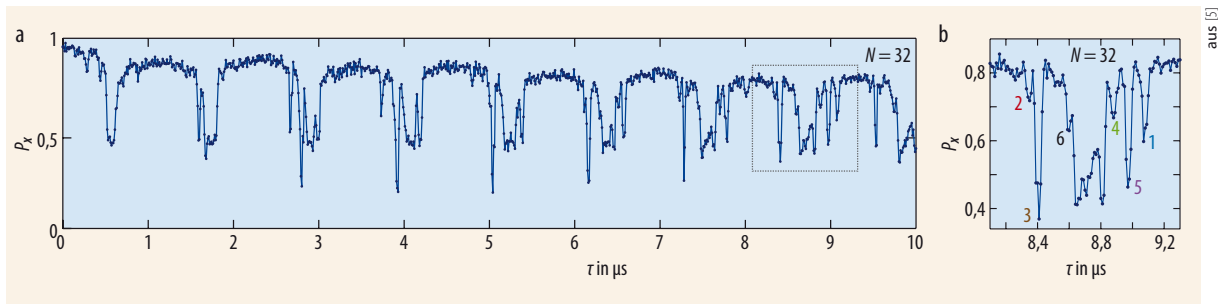


Abb. 2 Die natürliche Umgebung eines NV-Zentrums zeigt periodische Resonanzen (a). Bei niedriger Evolutionszeit τ

ist nur das Spinbad zu sehen. Bei $\tau \approx 8,1 \mu\text{s}$ heben sich die Resonanzen von bis zu sechs ^{13}C -Kernspins deutlich von

der breiten Resonanz des restlichen Spinbades ab (b). Weitere Resonanzen deuten sich in der Mitte an.

wobei 2τ der Abstand der π -Pulse ist. Diese Bedingung erfüllen aufgrund der Verteilung von ω_h und ϑ nur wenige ^{13}C -Kerne. Die resonanten ^{13}C -Kerne hinterlassen einen leicht zu identifizierenden Fingerabdruck im Fluoreszenzsignal des NV-Elektronenspins (Abb. 2). Je nach Stärke und Orientierung des äußeren Magnetfelds sowie des Pulsabstands lassen sich beliebige ^{13}C -Kerne der Umgebung mit dem NV-Elektronenspin koppeln. Insbesondere gelingt dies für relativ weit entfernte Kerne, die ohne die π -Pulsfolge im Summensignal aller ^{13}C -Kerne verborgen blieben. Auf diese Weise lässt sich die gesamte Umgebung eines NV-Elektronenspins ausmessen und mithilfe der Hyperfeinparameter ω_h und ϑ für jeden einzelnen ^{13}C -Kernspin die Form und Ausdehnung der Wellenfunktion des zentralen NV-Elektronenspins bestimmen [3–5]. Das Experiment ist dabei präziser als Berechnungen der Elektronenwellenfunktion.

Spins als Speicher

Die Wechselwirkung zwischen dem zentralen NV-Elektronenspin und einem resonant gekoppelten ^{13}C -Kernspin verläuft kohärent, d. h. der ^{13}C -Kernspin lässt sich mit dem NV-Elektronenspin verschränken. Dies eröffnet die Möglichkeit, Quanteninformation über den zentralen NV-Elektronenspin in der ^{13}C -Kernspin-Umgebung zu verteilen und dort zu speichern. Auch früher gelang es bereits, kohärente Wechselwirkungen zwischen NV-Elektronenspin und unmittelbar benachbarten ^{13}C -Kernspins nachzuweisen [2]. Dadurch erschien die Kernspinumgebung zwar als

ein akademisch interessanter, aber nicht sehr weit skalierbarer Bereich für Quantenregister. Nun ist es möglich, ^{13}C -Kerne in einem Abstand von bis zu 4 nm zu kontrollieren [3]. Daher scheint es realistisch, dass weit mehr als nur eine Handvoll sehr stabiler und präzise zu kontrollierender Qubits zu einem Quantenregister beitragen können.

Gelingt es, die Kopplung an Kern- oder Elektronenspins auf der Diamantoberfläche kohärent zu kontrollieren, könnte das NV-Zentrum zu einem bahnbrechenden Quantensystem werden. Die grundsätzliche Schwierigkeit besteht darin, dass äußere Spins vom NV-Zentrum einige Nanometer entfernt sind. Schon heute ist es möglich, NV-Zentren nahe der Oberfläche durch niederenergetische Implantation von Stickstoff-Ionen und anschließende Rekombination mit Kohlenstoff-Vakanzen gezielt zu erzeugen. Obgleich die NV-Konversionsausbeute und die Kohärenzzeiten bei oberflächennahen Zentren noch schlechter als bei „tiefen“ Zentren sind, waren in den letzten zwei Jahren deutliche Fortschritte zu verzeichnen [3]. Durch den neuen Ansatz, unerwünschte Spins zu entkoppeln und die Wechselwirkung mit ausgewählten Spins selektiv zu koppeln, scheint das Messproblem aber handhabbar.

Wäre es möglich, externe Elektronenspins mit dem NV-Elektronenspin sichtbar zu machen, ließe sich das kleinste ESR-Spektrometer (Elektronenspinresonanz) der Welt bauen, das Einzelspin-Sensitivität hätte und damit zehn Größenordnungen empfindlicher wäre als ein herkömmliches ESR-Spektrometer. Gelingt es zusätzlich, die exter-

nen Elektronenspins kohärent zu kontrollieren, wären molekulare Quantenregister möglich, z. B. auf Basis endohedralear Fullerene [6]. Diese funktionieren viel schneller als kernspinbasierte Quantenregister. Erste Schritte in Richtung der Kontrolle externer Elektronenspins mit einem NV-Zentrum sind bereits gelungen [7].

Ganz neue Möglichkeiten eröffnen sich in Materialwissenschaften, Biologie und Medizin, wenn äußere Kernspins detektierbar würden [8]. Damit wäre das kleinste NMR-Spektrometer der Welt möglich, das die Struktur einzelner Nanoobjekte oder Makromoleküle, z. B. anhand ihrer Protonen-Verteilung, aufklären könnte. So ließen sich beispielsweise die chemische Funktionalisierung einzelner Kohlenstoff-Nanoröhren oder die Tertiärstruktur einzelner Proteine visualisieren. Die neuen Arbeiten zeigen einen sehr allgemeinen Ansatz auf, mit dem diese Ziele in naher Zukunft erreichbar scheinen.

Wolfgang Harneit

- [1] F. Jelezko, *Physik Journal*, September 2008, S. 63; J. Schliemann, *Physik Journal*, Oktober 2010, S. 16
- [2] N. Mizuochi et al., *Phys. Rev. B* **80**, 041201 (2009)
- [3] N. Zhao et al., *Nature Nanotechnology* **7**, 657 (2012)
- [4] S. Kolkowitz et al., *Phys. Rev. Lett.* **109**, 137601 (2012)
- [5] T. H. Taminiu et al., *Phys. Rev. Lett.* **109**, 137602 (2012)
- [6] W. Harneit, *Phys. Rev. A* **65**, 032322 (2002)
- [7] M. S. Grinolds, *Nature Phys.* **7**, 687 (2011); B. Grotz et al., *New J. Phys.* **13**, 55004 (2011)
- [8] P. C. Hammel, *Nature* **458**, 844 (2009)

Dr. Wolfgang Harneit, Institut für Physikalische Chemie, JGU Mainz, Duesbergweg 10–14, 55099 Mainz