

## ■ Auslese beim Auslesen

Defekte in Diamant ermöglichen Fortschritte für Spins als Quanteninformationsträger.

Quantencomputer bieten die Perspektive, unter Ausnutzung des Superpositionsprinzips Rechenaufgaben zu lösen, deren Behandlung durch klassische Computer vollkommen aussichtslos ist. Im Hinblick auf ihre praktische Umsetzung ließen sich bisher jedoch nur Demonstrationsexperimente mit sehr geringer Anzahl von Qubits erfolgreich durchführen. Insbesondere ist gegenwärtig keineswegs offensichtlich, welche Arten physikalischer Systeme sich als Hardware der Quanteninformationsverarbeitung am praktikabelsten erweisen werden [1]. Unter der Vielzahl der Vorschläge gelten Spins in Festkörpersystemen als besonders aussichtsreich. Eine wichtige Arbeitsrichtung ist hier die Untersuchung von „NV-Zentren“ (nitrogen vacancy centers) in Diamant. Ein solches Zentrum besteht aus einem Stickstoffatom auf einem Kohlenstoffplatz sowie einer benachbarten Fehlstelle (Abb. 1). In seiner einfach negativ geladenen Version enthält ein solcher Gitterdefekt zwei ungepaarte Elektronen, die sich in ihrem Grundzustand zum Spin  $S = 1$  koppeln. Zudem trägt das Stickstoffisotop  $^{14}\text{N}$  (natürliche Häufigkeit: 99,63 %) einen Kernspin  $I = 1$ . Beide Spins kommen prinzipiell als Quanteninformationsträger infrage.

Im Hinblick auf Anwendungen in der Quanteninformationsverarbeitung besitzen NV-Zentren eine Reihe günstiger Eigenschaften:

- Sie sind chemisch und thermisch sehr stabil und zeigen kein „Ausbleichen“ durch wiederholte optische Anregung.
- Die Transparenz des Diamants ermöglicht optische Kontrolle und Manipulation.
- Wegen der geringen Spin-Bahn-Kopplung infolge der kleinen Kernladung von Kohlenstoff und Stickstoff beeinflussen Phononen den Elektronenspin auch bei hohen Temperaturen nur relativ wenig.
- Die Hyperfeinwechselwirkung des Elektronenspins mit umge-

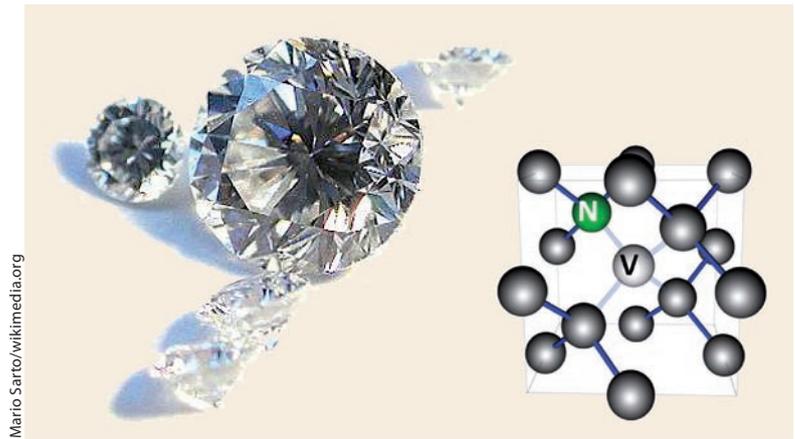


Abb. 1 Natürlicher Diamant kann in seinem Kohlenstoffgitter (rechts) bis zu ein Prozent an Stickstoff (N) aufweisen. Bei Bestrahlen entstehen Fehlstellen (V), die

sich durch Glühen im Gitter bewegen können und aufgrund der Gitterspannungen in der Nähe der Stickstoffatome dort effizient eingefangen werden.

benden Kernspins des Kohlenstoffisotops  $^{13}\text{C}$ , das nur mit einer natürlichen Häufigkeit von 1,11 % auftritt, ist schwach. Ansonsten ist das System frei von zusätzlichen Kernspins.

Für einen Quantencomputer ist es notwendig, die Informationsträger nach Beendigung des Rechengangs sicher auszulesen. Hier hat eine Kollaboration um die Stuttgarter Fedor Jelezko und Jörg Wrachtrup kürzlich interessante Fortschritte erzielt [2]. In ihrem Experiment fungiert der Kernspin des Stickstoffatoms als Informationsträger, während der Elektronenspin zu dessen zerstörungsfreiem Auslesen dient. Die Multipletts beider Spins sind durch Hyperfeinwechselwirkung energetisch aufgespalten (Abb. 2).

Zunächst pumpen die Physiker den Elektronenspin eines einzel-

nen NV-Zentrums optisch in den Zustand mit  $S_z$ -Eigenwert  $m_s = 0$ , wobei die  $z$ -Richtung durch die Verbindungsachse zwischen Fehlstelle und Stickstoff definiert ist. Anschließend setzen sie das System einem „selektiven“ Mikrowellenpuls aus, der idealerweise den Elektronenspin dann und nur dann in den Zustand  $m_s = -1$  befördert, wenn der Kernspin im Zustand  $m_I = -1$  ist.

In diesem Sinne lässt sich der Kernspinzustand  $m_I = -1$  als einer der beiden Qubitzustände auffassen, während der andere durch den Unterraum der verbleibenden Zustände  $m_I = 0, 1$  gebildet wird. Die erwähnte Selektivität wird energetisch möglich durch die langen Lebensdauern sowohl von Elektronenspin als auch Kernspin, durch welche sich die Hyperfeinstruktur spektral auflösen lässt.

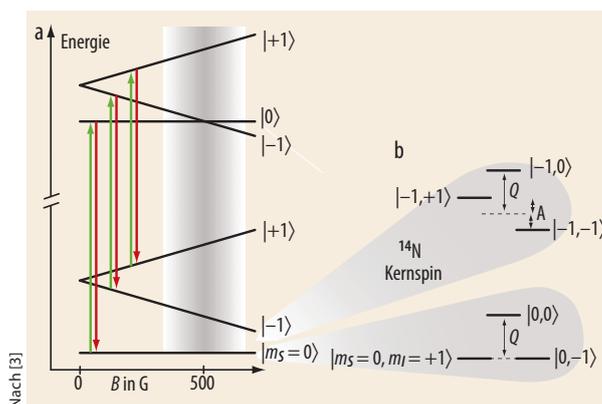


Abb. 2 Energieniveaus eines NV-Zentrums in Abhängigkeit von der Magnetfeldstärke  $B$  (a); wenn es sich bei dem Stickstoffatom um das Isotop  $^{14}\text{N}$  handelt, sind die Spinzustände des Elektrons in drei Hyperfeinniveaus aufgespalten (b).

Folgender Beitrag zum Hamilton-Operator beschreibt die Hyperfeinwechselwirkung [4]:

$$H = \frac{A_{\perp}}{2} (S^+ I^+ + S^- I^-) + A_{\parallel} S^z I^z$$

mit Kopplungsparametern  $A_{\perp}$ ,  $A_{\parallel}$  der Größenordnung  $10^{-4}$  eV. Die Kopplung der  $z$ -Komponenten verursacht die Hyperfeinaufspaltung, während die verbleibenden „Flip-Flop“-Terme unerwünscht sind und durch ein hinreichend starkes Magnetfeld in  $z$ -Richtung energetisch unterdrückt werden müssen [5]. Da im vorliegenden Fall bisher nur ein eher moderates Magnetfeld von 0,7 Tesla anlag, dürfte der obige Mechanismus die wesentlichste Fehlerquelle des Experiments darstellen.

Den bei Kernspinzustand  $m_I = -1$  resultierenden Zustand  $m_S = -1$  des Elektronenspins nach Einstrahlen des Mikrowellenpulses kann man durch seine Fluoreszenzeigenschaften klar vom Ausgangszustand  $m_S = 0$  unterscheiden. Diese Messprozedur lässt sich nun entweder genau einmal durchführen („single shot“) oder aber mehrfach wiederholen, da der zu messende Kernspinzustand hierbei idealerweise unbeeinflusst bleibt („quantum nondemolition measurement“).

Im Falle der „single shot“-Messung ließ sich der Kernspinzustand mit einer Verlässlichkeit von gut 92 % auslesen. Die verbleibende Fehlerrate von circa 8 % liegt zwar immer noch deutlich über dem im Zusammenhang mit Quantenalgorithmen zur Fehlerbehandlung häufig diskutierten Schwellenwert von  $10^{-4}$ , sie lässt sich aber mit hoher Wahrscheinlichkeit durch das Anlegen stärkerer Magnetfelder deutlich reduzieren. Die gegenwärtig erreichte Verlässlichkeit ist jedoch ein bereits recht guter Wert im Vergleich zu Experimenten mit ähnlicher Zielsetzung an Elektronenspins in Halbleiter-Quantenpunkten, ein ebenfalls wichtiges Modellsystem zur möglichen Realisierung von Qubits. Hier erreichten „single-shot“-Messungen vor einigen Jahren eine Verlässlichkeit von 80 % bei tiefen Temperaturen [6]. Das hier diskutierte Experiment spielt sich jedoch bei Zimmertem-

peratur ab, was zweifellos einen weiteren Vorzug darstellt. Freilich bleibt aber auch bei NV-Zentren noch eine Reihe von Problemen zu lösen, bis sich diese Methode zur Implementation von Quantenalgorithmen verwenden lässt. Um logische Operationen durchzuführen, muss man beispielsweise zwei Qubits (hier: Kernspins) in kontrollierte Wechselwirkung bringen. Erste Schritte zur kontrollierten Kopplung elektronischer Spins verschiedener NV-Zentren wurden kürzlich ebenfalls unter federführender Beteiligung der Stuttgarter Gruppe gemacht [7].

In den vergangenen Monaten haben auch andere Arbeitsgruppen über interessante Fortschritte in Zusammenhang mit Quanteninformationsverarbeitung in NV-Zentren berichtet: Der Gruppe um Mikhail Lukin an der Harvard University gelang es, den Elektronenspin eines NV-Zentrums mit einem einzelnen Photon zu verschränken [8], während eine Kollaboration aus Gruppen in Santa Barbara und Berkeley eine Technik zur kontrollierten Herstellung von räumlich homogen angeordneten NV-Zentren präsentiert [9].

**John Schliemann**

- [1] *T. Ladd et al.*, Nature 464, 45 (2010)
- [2] *P. Neumann et al.*, Science, DOI: 10.1126/science.1189075 (2010)
- [3] *M. Steiner et al.*, Phys. Rev. B 81, 035205 (2010)
- [4] *W. A. Coish und J. Baugh*, Phys. Stat. Sol. B 246, 2203 (2009)
- [5] *J. Schliemann, A. Khaetskii und D. Loss*, J. Phys. Condens. Matter 15, R1809 (2003)
- [6] *R. Hanson et al.*, Phys. Rev. Lett. 94, 196802 (2005)
- [7] *P. Neumann et al.*, Nature Physics 6, 249 (2010)
- [8] *E. Togan et al.*, Nature 466, 730 (2010)
- [9] *D. M. Toyli et al.*, Nano Lett. 10, 3168 (2010)