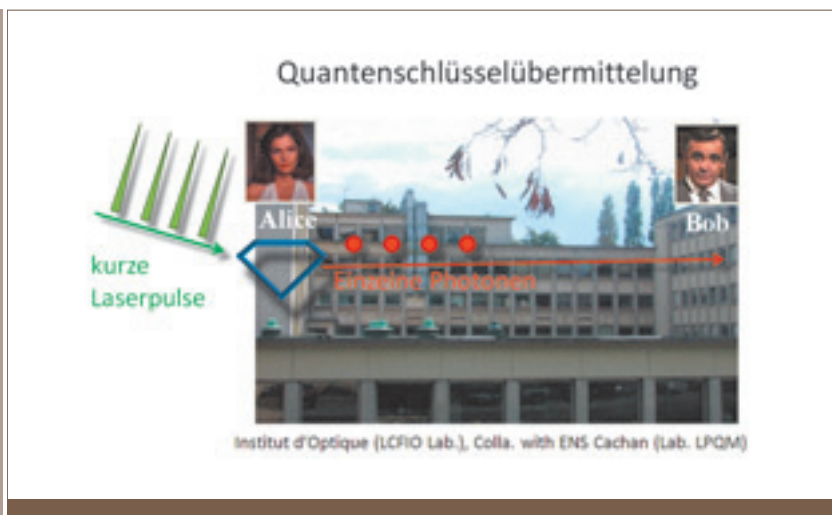


Ein Quantencomputer in Diamant



Die Möglichkeit Materialien auf der atomaren Skala zu strukturieren und ihre chemische Zusammensetzung zu kontrollieren hat dazu geführt, dass Quanteneffekte, die in der Vergangenheit nur aufwendig im Forschungslabor herzustellen waren, nun Einzug in die technische Nutzung halten. Da sich die atomare Welt in Teilen völlig anders als die makroskopische Welt verhält, hält die Quantenmechanik

einige Möglichkeiten parat, die unseren Alltag komplett revolutionieren würden, wenn sie makroskopisch „nutzbar“ gemacht werden können. Dazu bedarf es einerseits eines tiefgehenden Verständnisses der Quantenmechanik, andererseits des richtigen Systems um diese möglichst unter Umgebungsbedingungen sichtbar zu machen. Überraschenderweise stellt Kohlenstoff unter bestimmten Gesichtspunkten ein solches Material dar. Zurzeit sorgt beispielsweise Graphen, das sind Monolagen aus Kohlenstoff in sp^2 -hybridisierter Form (wie im Graphit), aufgrund seiner ungewöhnlichen elektronischen Eigenschaften für Furore. Aber auch Diamant verspricht aufgrund einiger seiner Eigenschaften ein nahezu perfektes Quantenmaterial zu sein.

1. Materialeigenschaften von Diamant

Diamant wird seit Jahrzehnten als nahezu idealer Halbleiter gehandelt. Einerseits ist er optisch transparent mit einer Bandlücke von ca. 5.5 eV und damit für die Optoelektronik nahezu ideal geeignet – im Gegensatz zu Silizium. Andererseits besitzt er eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit, sodass

eines der größten Hindernisse zunehmender Integrationsdichte in modernen nanoelektronischen Schaltkreisen, die Hitzeentwicklung, für den Diamant kein Problem darstellen würde. Allerdings ist es trotz jahrelanger intensiver Forschung nicht gelungen durch Dotierung genug Leitungselektronen in Diamant zu erzeugen, um die für viele elektronische Anwendungen notwendige Leitfähigkeit herzustellen.

Die Karriere von Diamant als Elektronikmaterial der Zukunft ist damit ungewiss. Im Bereich der Quantenspintronik stellt sich die Situation allerdings vollkommen anders dar. Hier ist man nicht auf der Suche nach einem System, das wie bei der klassischen Elektronik, viele bewegliche Elektronen (und Löcher) im Leitungsband (bzw. Valenzband) aufweist. Eher im Gegenteil sucht man nach Festkörpermateriale in denen sich einzelne Quantensysteme, das bedeutet z.B. einzelne Elektronen, lokalisieren lassen. Neben dem Herstellungsproblem besteht dabei die Herausforderung, diese Quantensysteme auch zu detektieren und in größere Einheiten zu integrieren. Mit anderen Worten, statt elektronische Schaltungen mit einigen 10^{16} Elektronen zu betreiben, basiert die Funktion z.B. einer Quantenspintronik auf dem magnetischen Moment einzelner Elektronen. Hier kommen nun dem Diamant Eigenschaften zugute, die seinen Einsatz im Bereich der klassischen Elektronik eher erschweren.

Die große Bandlücke von Diamant beispielsweise erlaubt es, einzelne Quantensysteme optisch zu adressieren. Diese Möglichkeit besteht z.B. in Silizium aufgrund der geringen Bandlücke nicht. Weiterhin lässt sich das Material mittlerweile in einer Reinheit herstellen, die selbst die von hochreinem Silizium übertrifft. Um die Quanteneigenschaften des definierten Systems nutzen zu können, ist es zudem unerlässlich, eine Ausgangssituation zu schaffen, in denen diese nicht durch Umgebungseffekte verwischt werden. Üblicherweise werden hierzu die Quantensysteme auf sehr geringe Temperaturen abgekühlt, sodass sämtliche Umgebungseinflüsse ausgefroren werden. In Festkörpern sind dies zumeist Schwingungen der Bausteine, aus denen das Material aufgebaut ist. Diese Schwingungen (Phononen) sorgen dafür, dass die Phase eines Quantenzustandes, der beispielweise aus einer Überlagerung der beiden Quantenzustände des magnetischen Momentes eines Elektrons resultiert, innerhalb einer kurzen Zeit einen zuvor eingestellten Wert verliert.

Ein praktisch nutzbares Quantenmaterial wird daher dadurch ausgezeichnet sein, dass solche Phononen unter Umgebungsbedingungen nicht oder kaum existieren. Auch hier kommt Diamant eine vorteilhafte Sonderrolle zu. Aufgrund der gerin-

gen Massen der Gitterbausteine und deren hoher Bindungskraft liegen die Frequenzen der Phononen bei so hohen Werten, dass diese thermisch selbst bei Raumtemperatur nicht oder kaum angeregt sind. In der Tat war bereits in den 60er Jahren bekannt, dass viele Eigenschaften von Diamant bei einer Temperatur von $T=20^{\circ}\text{C}$ denen von z.B. Silizium bei $T=-200^{\circ}\text{C}$ entsprechen. Man kann daher von Diamant als Raumtemperatur Quantenmaterial sprechen.

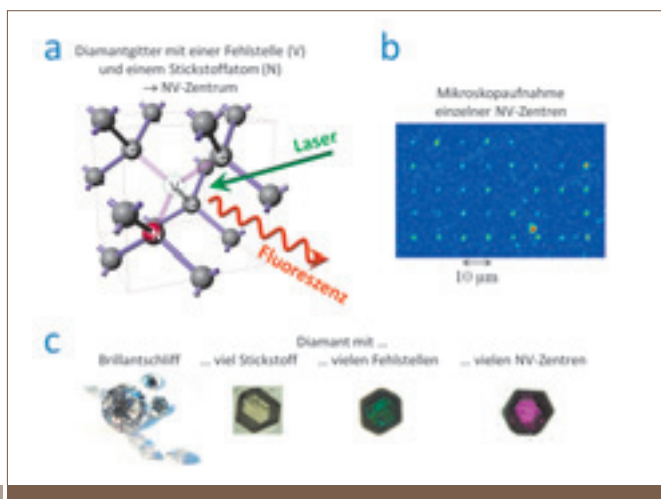
Es besteht nun die Frage, welche Quantensysteme sich in Diamant definieren lassen und wie mit diesen gearbeitet werden kann. Dazu benutzen wir Farbzentren im Diamant, die wir gezielt durch eine Dotierung mit Fremdatomen herstellen. Den meisten wird Diamant als farblos, transparenter Edelstein bekannt sein. Allerdings ist die überwiegende Anzahl geschürfter und auch künstlich hergestellter Diamanten farbig. Zumeist findet man eine bräunliche bzw. gelbliche Färbung der Steine, die auf eine hohe Stickstoffkonzentration schließen lassen (siehe **01c**). Neben diesen Färbungen findet man praktisch sämtliche anderen Farben der Farbskala. Häufig übertreffen die farbigen Diamanten bei entsprechender optischer Qualität die farblosen Varianten bei weitem an Wert. Die Farbe kommt dadurch zustande, dass in das Diamantgitter Fremdatome eingebaut werden, die Licht einer für die Verunreinigung spezifischen Wellenlänge absorbieren und dem farblosen Stein seine Farbe verleiht.

Im Falle der hier geschilderten Forschungsarbeiten wird Diamant gezielt mit Stickstoffatomen dotiert. Das Stickstoffatom

SUMMARY

In recent years quantum technology has evolved from the laboratories towards technical application. Some of them like quantum cryptography are already in commercial use, others like quantum computers are in development. The biggest obstacle with quantum devices is decoherence, the loss of the quantum properties due to interaction with the environment. Solid state systems usually have to be cooled down to low temperatures in order to freeze out the vibrations of the lattice. Diamond has several advantages over all other candidates in the field, because of its unique material properties. It is transparent so qubits embedded in the lattice can be addressed optically. Its vibrational properties at room temperature match those of e.g. Silicon at 20 K. For ^{12}C has no nuclear spin the lattice is mostly invisible to a given qubit. One can speak of Diamond as a high-temperature-quantum-material.

We use the nitrogen-vacancy-color-center (NV-center) as a quantum register. It is exceptionally suitable for this task, for it features a triplet ground state which can be initialized by simply shining green laser light on the center. The fluorescence light intensity depends on the spin state, so lasers can be used for read out as well. With those optical properties the NV-center can serve as a single photon source for quantum cryptography. As qubits the electron spin of the NV as well as nuclear spins (e.g. ^{13}C) in close vicinity of the center are utilized. Because the nuclear spins cannot be read-out optically they are controlled via their hyperfine coupling to the electron spin of the NV-center. Up to four qubits are realizable at a single site right now. This is sufficient for the use as a quantum repeater, a device to mediate quantum entanglement over long distances. To scale up the number of qubits several NV-centers have to be coupled together. This should again be possible e.g. via optics. Therefore one has to be able to place the NV-centers in the lattice precisely. For that purpose ion implantation techniques are being greatly improved. Since quantum effects are way out of our normal experience, bringing them into our macroscopic world will surely revolutionize our daily lives.



a) Struktur des NV Zentrums im Diamantgitter.

b) Fluoreszenzmikroskopische Aufnahme von einzelnen NV Zentren in einem Diamantkristall.

c) Diamantkristalle in verschiedenen Stadien der Präparation

on (Fluoreszenz) des Defekts. Es hat sich ein sogenanntes Farbzentrum gebildet (01a). Die Absorptionswellenlänge des Farbzenters liegt bei ca. 640 nm, d.h. im roten Spektralbereich. Diamanten, die eine hohe Konzentration an NV Zentren aufweisen, sind daher dunkelblau oder pink gefärbt. In den hier geschilderten Experimenten sind die Farbzentren durch Implantation von Stickstoff aus einem Stickstoffatomstrahl erzeugt worden (01b). Absorptions- und Emissionsstärke der NV Zentren sind in etwa mit einem guten Farbstoffmolekül vergleichbar, d.h. die Fluoreszenz einzelner Defektzentren kann mit einem konfokalem Mikroskop und entsprechend hochempfindlichen Detektoren nachgewiesen werden (01b). Dies ist die wesentliche Grundlage aller im weiteren beschriebenen Experimente und Anwendungen.

2. Einzelphotonenquellen für geheime Datenübertragung

In einer Welt, in der der Datentransfer ständig zunimmt, kommt dessen sicherer Übertragung eine steigende Bedeutung zu. Internethandel oder Banktransaktionen sind darauf angewiesen, dass die Informationen zwischen Empfänger und Sender in einer Weise übermittelt werden, dass ein Abhören vertraulicher Daten unmöglich ist. Gegenwärtig wird diese Abhörsicherheit durch eine Datenverschlüsselung mit öffentlichen Schlüsseln z.B. nach dem sogenannten RSA-Verfahren gewährleistet. Verkürzt gesagt tauschen Sender und Empfänger öffentlich einen Schlüssel, d.h. eine N-stellige Zahl aus. Die Verschlüsselung der Nachricht geschieht mit diesem

alleine absorbiert Licht nicht besonders stark. Falls sich allerdings ein sogenanntes Stickstoff-Fehlstellenzentrum (NV-Zentrum) bildet, kommt es zu einer intensiven Absorption und auch Emission

Schlüssel und basiert darauf, dass es für das Zerlegen einer Zahl in Primfaktoren keinen effizienten Algorithmus gibt. Benutzt man große Zahlen als Schlüssel zur Verschlüsselung einer Nachricht nach dem RSA Verfahren, so müssen zu deren Entschlüsselung zunächst die Primfaktoren dieser Zahl gefunden werden. Da die Dauer der Suche nach diesen Faktoren exponentiell mit der Anzahl der Stellen anwächst, ist dieses Verfahren umso sicherer, je länger der verwendete Schlüssel ist. Gegenwärtig wird z.B. bei der Übermittlung der elektronischen Steuerklärung ein Schlüssel mit einer Länge von 128 Bit benutzt. Mit den verfügbaren Rechenleistungen und unserem Kenntnisstand bei der Primzahlzerlegung würde ein Knacken dieser Verschlüsselung derzeit ca. 10^{19} Jahre dauern. Allerdings ist bisher nicht bewiesen, dass es keine effizienteren Zerlegungsalgorithmen gibt. Ein zukünftiger Quantencomputer z.B. hätte das Potential, die Primzahlzerlegung mit dem Shor-Algorithmus erheblich zu beschleunigen und damit die gegenwärtigen Verschlüsselungssysteme, auch wenn noch deutlich längere Schlüssel zum Einsatz kämen, unbrauchbar zu machen. Es gibt daher ein großes Interesse daran, neuartige Verschlüsselungsprinzipien zu entwickeln.

Eine neue Methode, die bereits Eingang in dieses Anwendungsfeld gefunden hat, ist die Quantenkryptografie. Hier beruht die Verschlüsselung von Daten auf fundamentalen physikalischen Prinzipien, deren Gültigkeit in zahllosen Messungen bestätigt wurde. Genauer nutzt man den Umstand, dass eine Messung an einem Quantensystem stets dieses Quantensystem selbst beeinflusst. Dieser Einfluss lässt sich nachweisen und somit ein Abhören eines Kommunikationskanals im Nachhinein feststellen. Dazu muss allerdings die Information mittels eines Quantensystems übertragen werden.

Das offensichtlich am besten geeignete System sind einzelne Photonen. Beispielsweise lässt sich eine Null oder Eins als Polarisation des Photons darstellen. Die Methode wird genutzt, um einen Schlüssel der nur einmal verwendet wird, ein sogenanntes „one time pad“, zwischen einem Sender (Alice) und Empfänger (Bob) auszutauschen. Das „one time pad“ als Verschlüsselungsverfahren kann nicht gebrochen werden, wenn der Schlüssel nicht, z.B. durch Abhören der Schlüsselübertragung,

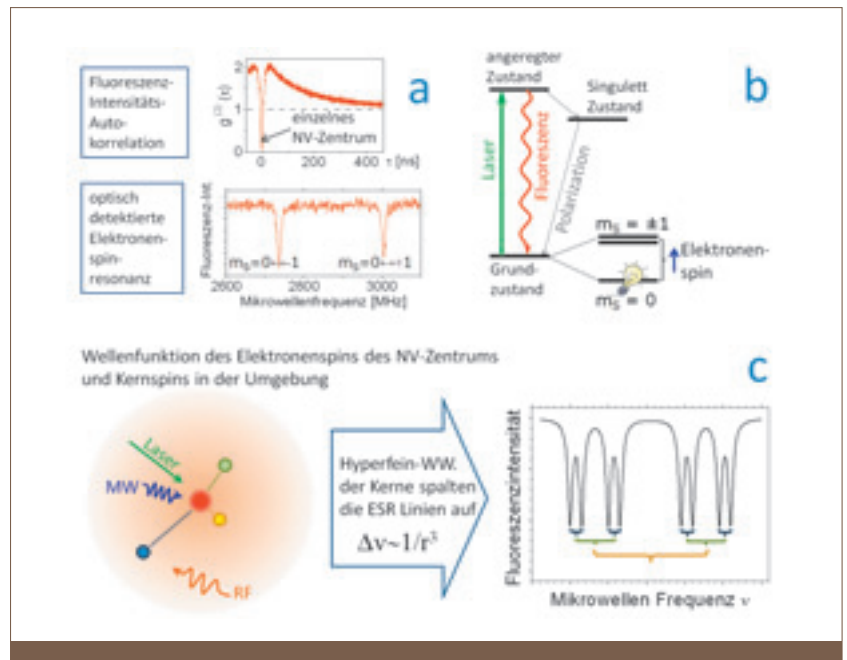
bekannt wird. Wird jedes Bit dieses Schlüssels mit nur einem Photon übertragen, so lässt sich aus der Übermittlung schließen, ob die Daten von einem „Spion“ (Eve) abgehört wurden.

In groben Zügen gehen Sender und Empfänger dabei wie folgt vor. Der Sender polarisiert Photonen entlang zweier orthogonaler Richtungen, um die Bitwerte „0“ und „1“ zu codieren. Der Empfänger benutzt Polarisatoren vor dem Photonendetektor, um diese Bitwerte auszulesen. Indem sie die gemessenen Werte miteinander vergleichen, erhalten beide Information darüber, ob jemand während der Übertragung die Polarisation der Photonen gemessen und damit verändert hat. Erst wenn der Quantenschlüssel auf beiden Seiten der Kommunikationspartner vorliegt, benutzen sie ihn um geheime Botschaften auszutauschen.

3. Einzelphotonenquelle aus Diamant

Eine wichtige Voraussetzung für die abhörsichere Quantenkryptographie ist es, dass der Sender über eine Quelle für einzelne Photonen verfügt. Geeignete Einzelphotonenquellen präparieren dabei gezielt einen ausgewählten Quantenzustand. In einem Laserstrahl dagegen unterliegt die Anzahl der Photonen einer Poissonverteilung, bei der die Abweichung um einen Mittelwert (z.B. N Photonen) \sqrt{N} beträgt. D.h. auch wenn die Laserintensität so eingestellt wird, das im Mittel nur ein Photon emittiert wird, besteht eine bestimmte, durch die Poissonverteilung festgelegte Wahrscheinlichkeit, dass kein bzw. zwei Photonen emittiert werden. Eine geeignete Einzelphotonenquelle muss also Quantenzustände realisieren, die keiner Wahrscheinlichkeitsverteilung unterliegen, bei denen die Photonenzahl also einen definierten, scharfen Wert besitzt. Solche Zustände werden als Fockzustände bezeichnet und werden beispielsweise durch die Emission einzelner Quantenemitter, z.B. Farbzentren realisiert.

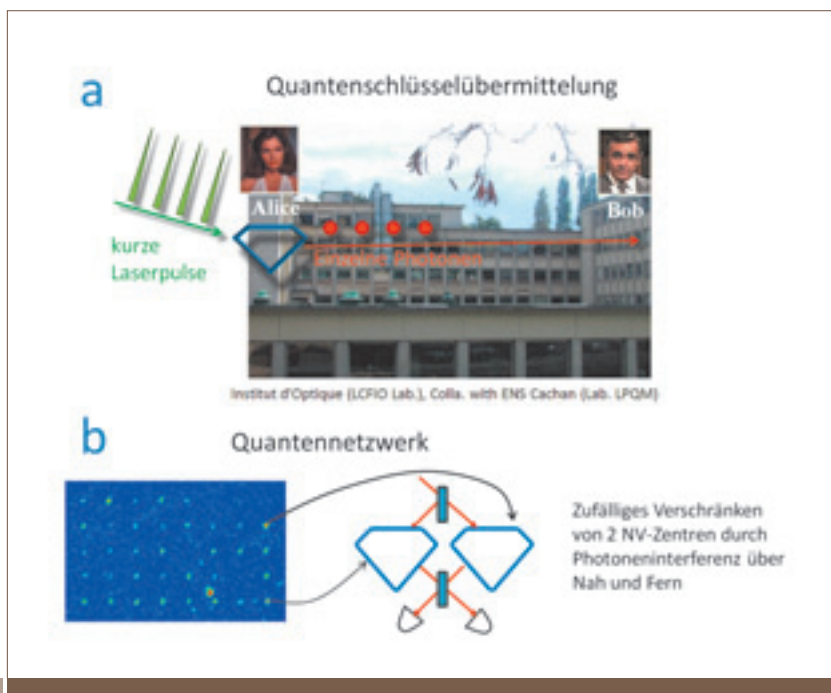
Eine von der Poissonverteilung abweichende Photonenemission wird durch die Messung einer Intensitätsautokorrelationsfunktion bestätigt (02a). In dieser Grafik ist die Wahrscheinlichkeit aufgetragen, ein Photonenpaar mit einem zeitlichen Abstand τ zu detektieren. In der Abbildung ist die entsprechende Statistik für die



Fluoreszenzemission eines einzelnen NV Defekts durchgeführt worden. Wie aus der Abbildung ersichtlich wird, geht die Wahrscheinlichkeit, Fluoreszenzphotonen mit einem Zeitabstand $\tau=0$ nachzuweisen gegen Null. Ein einzelnes NV Zentrum emittiert demnach immer nur ein einzelnes Photon. Physikalisch lässt sich dies sehr leicht anhand des Energieniveauschemas in 02b nachvollziehen. Wird vom Farbzentrum ein einzelnes Photon emittiert, so befindet sich der NV Defekt anschließend im Grundzustand. Aus diesem Zustand muss das NV Zentrum zunächst in den ersten angeregten Zustand (E) durch den Anregungslaser gebracht werden. Die mittlere Zeit die hierzu notwendig ist, beträgt $\Omega_{12}t = \pi$, wenn Ω_{12} die Laserrabifrequenz ist.

Nach diesen Überlegungen werden niemals zwei Photonen gleichzeitig emittiert. Dass sich mit der Emission von einzelnen Photonen aus NV Defektzentren Daten übertragen lassen, konnte J.F. Roch 2004 zeigen, indem er und seine Kollegen einen Kryptoschlüssel zwischen zwei Gebäudeflügeln des Photonikzentrums in Cachan bei Paris übertrugen (03a). Diese ersten Experimente mussten aufgrund der Freistrahübertragung und der geringen Emissionsrate des Zentrums bei Nacht durchgeführt werden. Um höhere Übertragungsraten zu erhalten und einen Routinebetrieb unabhängig von der Umgebungsbedingung zu erreichen, ist es entscheidend, eine größere Emissionsrate zu

- a) Die Fluoreszenzautokorrelationsfunktion zeigt mit ihrem Dip bei $\tau=0$ ns, dass ein einzelnes NV-Zentrum vorliegt. Optisch detektierte magnetische Resonanz an einzelnen NV Defekten zeigt die beiden Übergänge zwischen den Niveaus $m_s=0 \leftrightarrow -1$ und $0 \leftrightarrow +1$.
- b) Energieniveauschema des NV Defekts inklusive der Spin Feinstruktur.
- c) Kernspins (blauer, grüner, gelber Punkt) mit verschiedenen Abständen zum NV-Zentrum (roter Punkt) erzeugen aufgrund verschiedener Hyperfeinkopplungen eine unterschiedlich starke Aufspaltung des Elektronenspin Resonanzspektrums. Je kleiner der Abstand desto größer die Linienaufspaltung (siehe Farbkodierung).



a) Übertragungsstrecke in Cachan (Paris) auf der mittels einzelner NV Photonen ein Kryptographieschlüssel transmittiert wurde.

b) Schematische Darstellung der Verschränkung zweier Defekte mittels der Interferenz zweier ununterscheidbarer Photonen auf einem Strahlteiler.

erreichen und auch die Emissionswellenlänge entsprechend anzupassen. Dies gelingt durch die Wahl anderer Defekte wie Nickelatomen, die im Diamantgitter eingebaut sind. Derzeit bereitet die Arbeitsgruppe um Prof. Roch Tageslichtübertragungen mit diesem Emittor vor.

Es gibt eine ganze Reihe von Quantensystemen, die sich als Einzelphotonenemitter eignen. Letztendlich sind alle Quantensysteme, die eine hohe Photonenemissionsrate aufweisen, geeignete Kandidaten. Dazu gehören Farbstoffmoleküle und Quantenpunkte. Farbzentren in Diamant haben einen großen Vorteil, denn sie bleichen nicht aus und müssen nicht bei niedrigen Temperaturen betrieben werden. Entsprechend ist bereits von einer Firma in Australien ein Gerät auf den Markt gebracht worden, das als Einzelphotonenquelle für Telekommunikationsanwendungen auf einzelnen Defekten in Diamant basiert (**03b**).

4. Verstärker für Einzelphotonen

Momentan sind Quantenkryptographiesysteme auf relativ kurze Entfernungen beschränkt, da aufgrund von Übertragungsverlusten einzelne Photonen maximal ca. 100 km weit übertragen werden können. Klassische Signalverstärker, wie derzeit in der optischen Datenübertragung üblich, können nicht zum Einsatz kommen, da das Verstärken wie eine Messung des

Signals zur Dekohärenz, dem Verlust der Quanteneigenschaften, führt und damit die sichere Übertragung nicht mehr gewährleistet wäre. Den Ausweg bieten sogenannte, bisher nur vorgeschlagene, Quantenrepeater, kleine Quantencomputer, die zunächst einen Kanal aufbauen, indem sie untereinander verschränkt werden. Das bedeutet automatisch, dass der erste Repeater mit dem letzten der Reihe verschränkt ist. Nun kann die gewünschte Information zwischen den beiden Endstellen teleportiert werden.

Teleportation (siehe Beitrag Schmidt-Kaler, in diesem Heft) beruht auf einer Messung an einem Paar von verschränkten Quantenbits, welche den Zustand eines dritten Quantenbits beim Empfänger nichtlokal festlegt. Hierfür wären schon Quantencomputer mit sehr kleinen Registern ausreichend, da im Prinzip immer nur wenige Qubits gespeichert werden müssen. Ein erster Schritt besteht darin, zwei entfernte Defektzentren miteinander zu verschränken. Dies kann durch die Photonen, die beide Defekte emittieren geschehen. Überlagert man diese Photonen auf einem Strahlteiler, so kann man die Interferenz der beiden von unterschiedlichen Defekten emittierten Photonen nutzen, um die Defekte selber miteinander zu verschränken, ohne dass diese jemals direkt miteinander in Wechselwirkung getreten sind.

Eine wichtige Voraussetzung ist, dass die Defektzentren Photonen emittieren, die eine geringe Frequenzbandbreite aufweisen, sodass das Interferenzmuster deutlich ausgeprägt ist. Dies konnte in dem in **03a** dargestellten Experiment gezeigt werden. Der zeitliche Verlauf der dargestellten Rabioszillationen des optischen Übergangs zeigt, dass die emittierten Photonen transferlimitiert sind, d.h. eine Kohärenzzeit aufweisen, die nur durch die Lebensdauer des angeregten Zustandes des Defektzentrums begrenzt ist. Das NV Zentrum hat damit beste Voraussetzung, um als Knoten in einem Quantenrepeater eingesetzt zu werden.

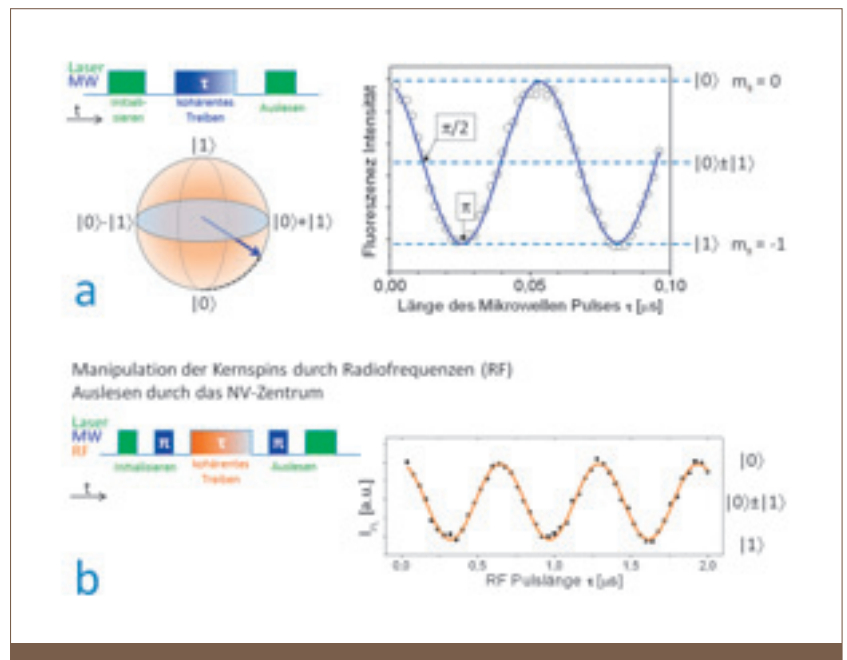
5. Verschränkte Quantenbits in Diamant

Seit Ende der 90er Jahre wird nach Realisierungsmöglichkeiten für Quantencomputer geforscht. Ansätze mit eingefangenen

Ionen, supraleitenden Ringen und flüssig-NMR führten zu Quantencomputern mit bis zu 8 Qubits (2005 an der Universität Innsbruck). Die Stärke eines zukünftigen Quantencomputers liegt darin, dass er nicht mit klassischen Bits arbeitet, die „nur“ die beiden Werte „0“ oder „1“ annehmen können, sondern mit Quantenbits. Liest man diese aus, erhält man zwar auch nur die Werte „0“ \rightarrow $|0\rangle$ oder „1“ \rightarrow $|1\rangle$, aber während man mit ihnen arbeitet, können sie auch alle Werte „dazwischen“ annehmen. Man spricht dann von einem Überlagerungszustand. Dieser „Lebensraum“ eines Qubits entspricht der Oberfläche einer Kugel, der sogenannten Bloch-Kugel (04a). Dabei entsprechen die Zustände $|0\rangle$ und $|1\rangle$ gerade den Polen. Der Blochvektor zeigt von der Mitte zur Position des Quantenbits auf der Kugeloberfläche. Da ein Quantencomputer nicht nur mit „0“ und „1“ rechnet, sondern auch mit allen Überlagerungszuständen, kann man mit ihm massiv parallel arbeiten, d.h. das Ergebnis einer Rechnung würde z.B. alle Lösungen enthalten, die man mit einem herkömmlichen Rechner in vielen Einzelrechnungen ermitteln müsste. Das gibt dem Quantencomputer seinen Geschwindigkeitsvorteil, der mit wachsendem Quantenregister mehr und mehr zum Tragen kommt (siehe **Infokasten Quantenbits auf Seite 71**).

Das Hauptproblem bei der Vergrößerung von Quantenregistern ist Dekohärenz, dem Verlust der Quanteneigenschaften durch Wechselwirkung mit der Umgebung und der freien Zeitentwicklung gekoppelter Qubits. Fügt man immer mehr Qubits einem Register hinzu, verkürzt sich die Zeit, die man für Berechnungen zur Verfügung hat, immer weiter. Man benötigt also ein System, das gut von seiner Umgebung abgeschirmt ist und es zulässt, die Wechselwirkung zwischen einzelnen Qubits an- und abzustellen. In den meisten Systemen begegnet man diesen Problemen, indem man zu sehr tiefen Temperaturen übergeht, was sehr großen technischen Aufwand erfordert.

Wie bereits erwähnt, verhält sich Diamant bei Raumtemperatur bei diesen Dekohärenzprozessen, wie andere Materialien erst bei tiefen Temperaturen. Somit sind tiefe Temperaturen hier nicht zwingend notwendig und Experimente am NV-Zentrum können unter Umgebungsbedingungen durchgeführt werden. Neben seiner zuver-



04

lässigen und großen „Helligkeit“, welche das NV-Zentrum zu einem Kandidat für Einzelphotonenquellen macht, besitzt es noch eine weitere interessante Eigenschaft. In seinem elektronischen Grundzustand besitzt es zwei ungepaarte Elektronen, welche zusammen einen Gesamtspin von $S=1$ haben. Man nennt ein solches System Triplet, da dieser Spin in einem Magnetfeld drei mögliche Einstellungen bzw. Zustände annehmen kann, bezeichnet mit der magnetischen Spinquantenzahl $m_s = -1, 0, +1$ (02b). Mit zwei dieser drei Zustände kann man nun ein Qubit darstellen.

Eine weitere Besonderheit des NV-Zentrums macht es außerdem möglich, den Spinzustand eines einzelnen Zentrums auszulesen und damit den Zustand des Qubits. Befindet sich das Farbzentrum im $m_s=0$ Zustand und regt man es mit grünem Laserlicht an, erhält man eine starke Fluoreszenzintensität, da das Zentrum vom $m_s=0$ Niveau des angeregten Triplet Zustandes wieder direkt unter Emission eines Photons in den Grundzustand zerfällt ($m_s=0$) (02b). Befindet sich das Farbzentrum jedoch im Grundzustand in einem der beiden Niveaus $m_s=\pm 1$, wird es in das entsprechende Niveau des angeregten Zustandes gebracht und gelangt seltener direkt unter Photonenemission in den Grundzustand. Wahrscheinlicher ist ein Übergang in einen Singulettzustand (02b). Hier gibt es keine ungepaarten Elektronen mehr und damit auch keinen

a) Rabi-Oszillation eines einzelnen NV-Elektronenspins,
 b) eines einzelnen ^{13}C -Kernspins jeweils mit entsprechender Pulssequenz für Laser, Mikrowelle (MW) und Radiofrequenz (RF). In a) ist zusätzlich die Bloch-Kugel als Lebensraum eines Spins und der Blochvektor (blauer Pfeil), der den Zustand des Spins zeigt, abgebildet. Der schwarze gestrichelte Pfeil deutet zusätzlich die Entwicklung während der Rabi-Oszillation an.

Elektronenspin ($S=0$). Es gibt somit nur ein Niveau. Der Übergang über diesen Singulettzustand zurück in den Grundzustand dauert länger und es wird kein Photon im ursprünglichen Wellenlängenbereich emittiert. Somit kann man den Übergang in den Singulettzustand mit dem Übergang in einen Dunkelzustand gleichsetzen, da die mittlere emittierte Photonenrate drastisch reduziert ist. Somit sind die Zustände $m_S=\pm 1$ an einer geringen Fluoreszenzintensität zu erkennen.

Mit Hilfe des Laserlichts liest man den Quantenzustand des NV-Zentrums nicht nur aus, man kann auch einen gezielten Anfangszustand herstellen. Dabei ist der Singulettzustand behilflich. Von diesem aus relaxiert das System nämlich hauptsächlich in das $m_S=0$ Niveau des Grundzustandes. Dorthin kehrt es, wie oben beschrieben, nach mehreren Anregungs- und Zerfallszyklen auch immer wieder zurück, während die Wahrscheinlichkeit, das System im $m_S=\pm 1$ Zustand zu finden mit jedem Zyklus weiter abnimmt. Am Ende liegt das System polarisiert im $m_S=0$ Niveau des Grundzustandes vor (**02b**). Zusammenfassend haben wir ein einzelnes Quantensystem vorliegen, dessen Anfangszustand ($m_S=0$) gezielt hergestellt werden kann und dessen Endzustände optisch ausgelesen werden können.

Zwischen den Eigenzuständen ($m_S=-1, 0, +1$) kann man mittels Mikrowellenstrahlung Übergänge induzieren und ein sogenanntes Elektronenspin-Resonanzspektrum erzeugen (**02b**). Dabei schaut man sich die Fluoreszenzintensität eines Farbzenters an während man die Frequenz der Mikrowellenstrahlung verändert. Entspricht diese der Übergangsenergie zwischen den Niveaus $m_S=0$ und -1 oder 0 und $+1$, kann man das System aus dem Anfangszustand 0 in den Zustand -1 oder $+1$ bringen. Diese besitzen eine geringere Fluoreszenzintensität und das wird im Spektrum sichtbar als „Spitze“ nach unten. Die Lage der Resonanzfrequenzen kann durch ein externes Magnetfeld beeinflusst werden.

Untersucht man genauer, was eine resonante Mikrowellenstrahlung mit dem Anfangszustand $m_S=0$ macht, erkennt man, dass sich der Zustand z.B. in den $m_S=-1$ entwickelt und wieder zurück. Das wird sichtbar gemacht, indem man das NV-Zentrum mit einem kurzen Laserpuls in den Anfangszustand bringt (**04a**).

Während der Laser aus ist, schaltet man kurz die Mikrowellenquelle ein. Am Ende liest man mit einem weiteren Laserpuls den Zustand aus. Lässt man die Länge des Mikrowellenpulses immer länger werden, erkennt man eine cosinusförmige Oszillation der Fluoreszenzintensität (**04a**), die Rabioszillation.

Solche kohärenten Manipulationen, also solche bei denen der Ausgangszustand wieder hergestellt werden kann, werden in der Quantenmechanik mit unitären Transformationen beschrieben, die als Drehungen um bestimmte Winkel interpretiert werden können. Anschaulich kann man diese Entwicklung zwischen den beiden Zuständen $m_S=0$ und -1 auf einer Kugeloberfläche, der Blochkugel, graphisch darstellen (**04a**), wie bei einem Qubit. Sie entspricht einer Kreisbewegung entlang eines Längengrades der Kugel angefangen beim Südpol, dem $m_S=0$ Zustand hin zum Nordpol, dem $m_S=-1$ Zustand. Wie in **04a** zu erkennen ist, sind die Pole mittlerweile nicht mehr mit den m_S Niveaus beschriftet sondern mit $|0\rangle$ und $|1\rangle$. Dies sind die zwei Eigenzustände eines Qubits, welches durch das NV-Zentrum dargestellt wird. Bricht man die Rabioszillation nach einer halben Periode ab, wurde die Besetzungswahrscheinlichkeit komplett von einem auf das andere Niveau übertragen, man spricht von einem Pi-Puls. Nach einer viertel Periode wurde eine 50/50 Superposition hergestellt, der für die Quantencomputer-Anwendung interessante Zustand, man spricht von einem Pi-halbe-Puls.

Neben den oben beschriebenen Gitterschwingungen (Phononen) kann der Quantenzustand des NV-Zentrums auch durch die Wechselwirkung mit anderen Spins in der Umgebung zerstört werden. Hier zeichnet sich Diamant speziell dadurch aus, dass sein elementarer Baustein, das Kohlenstoffatom (C), hauptsächlich als Isotop ^{12}C vorliegt, welches keinen Kernspin besitzt und somit das Diamantgitter, bis auf den Anteil ^{13}C (Kernspin $1/2$), für die Qubits „unsichtbar“ ist. Dies führt zu sehr langen Kohärenzzeiten (die Zeit die ein Quantenzustand erhalten bleibt) von etwa 1 ms bei Raumtemperatur.

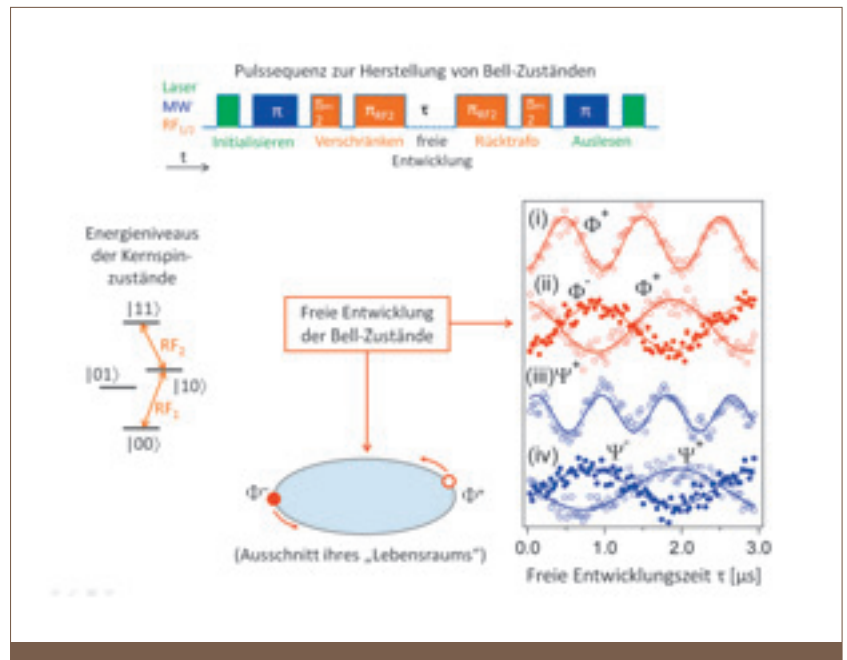
Der kleine Anteil an ^{13}C Atomen ist nun aber kein Fluch, sondern kann sogar ein Segen sein. Denn deren Kernspins stellen eine weitere Ressource von nützlichen Spins bzw. Qubits dar. Die einzelnen Kernspins können zwar nicht direkt im opti-

schen Mikroskop adressiert, jedoch können Sie durch ihre Hyperfeinwechselwirkung mit dem Elektronspin gesteuert werden. Wie bereits weiter oben erwähnt weist das NV Zentrum einen Elektronentriplett-Grundzustand auf (**02a**).

Durch ihre Wechselwirkung mit dem NV-Zentrum teilt jedes ¹³C Atom jede Linie des Elektronenspinresonanzspektrums (**02a**) in zwei neue Linien mit einem Abstand, der von der Entfernung NV-¹³C abhängt, auf (**02c**). Je kleiner dabei der Abstand ist, desto größer ist die Aufspaltung der zwei Linien. Eine Linie repräsentiert den |1⟩-, die andere den |0⟩-Zustand des Kernspins. Somit weist das Spektrum für jede Einstellmöglichkeit der Qubits ein Energieniveau auf. Wählt man nun die Resonanzfrequenz einer dieser Linien aus, kann man nur für die entsprechende Kernspineinstellung den Elektronenspin beeinflussen.

Die kohärente Manipulation der Kernspins erfolgt analog zum Elektronenspin über Radiowellenpulse, die auf die jeweiligen Energieabstände abgestimmt sind und so die einzelnen Übergänge selektiv treiben. Quantencomputing mit Spins im Diamant funktioniert also wie folgt: zunächst wird mittels eines Lasers das System initialisiert, dann führt man eine Radio-/Mikrowellen-Pulssequenz, sozusagen das Programm, durch und liest schlussendlich den gewünschten Zustand wieder mit dem Laser aus (**04b**). Auf diese Art wurden bislang an der Universität Stuttgart zunächst komplexe Quantenzustände aus mehreren Qubits hergestellt, die praktisch die Grundlage für weitere Anwendungen, z.B. Quantenalgorithmen bilden. Diese Zustände werden nach Physikern, die erstmals ihre besondere Rolle hervorgehoben haben als Bell-, Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ)- und W-Zustände benannt. Dabei handelt es sich um die maximal verschränkten Zustände von zwei (Bell), bzw. drei (GHZ und W) Qubits.

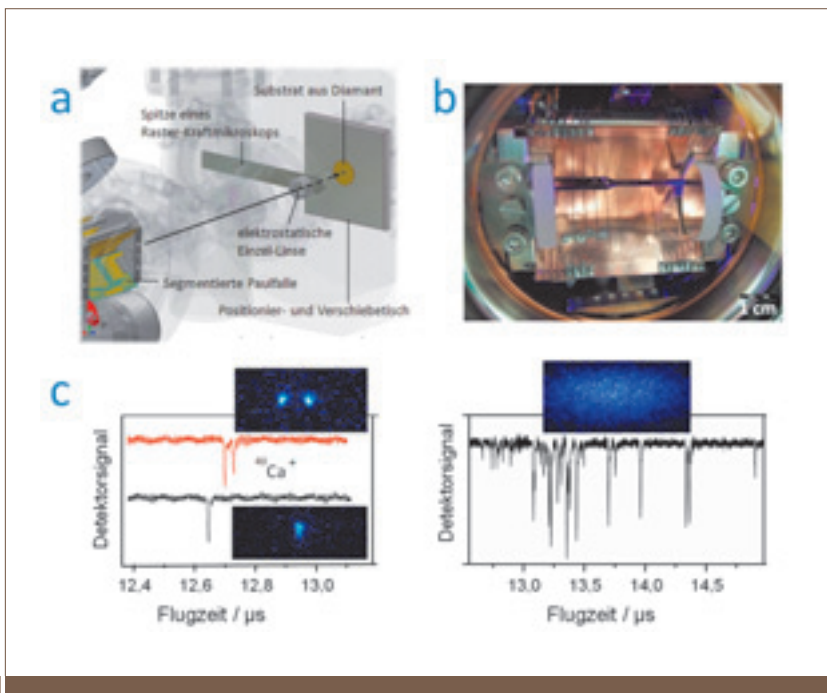
Verschränkung ist eine Quanteneigenschaft, die beschreibt, dass bei der Messung eines Qubits auch der Zustand des mit ihm verschränkten Qubits feststeht, egal wie weit die beiden Systeme voneinander getrennt sind. Aus den Quantenzuständen lokaler Qubits, d.h. Kernspins lassen sich demnach globale Quantenzustände herstellen, bei dem sich die Teilsysteme stets als Bestandteil des Gesamtsystems verhalten. Im Fall des GHZ Zustandes handelt es sich



um eine Drei-Teilchen Verschränkung, entfernt man ein Qubit, bleibt keine Verschränkung der anderen beiden zurück. Anders verhält es sich beim W-Zustand, bei dem die drei Qubits jeweils paarweise miteinander verschränkt sind. Entfernt man hier ein beliebiges Qubit bleibt ein Bell-Zustand der restlichen beiden Qubits. Wie man sieht, ist die Verschränkung beim W-Zustand wesentlich robuster gegen äußere Einflüsse als der GHZ-Zustand.

Die Herstellung maximal verschränkter Zustände ist ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zu konkreten Quantenalgorithmen, die im Allgemeinen mehr als drei Qubits benötigen. Anhand des Bell Zustands Φ^- soll nun das Vorgehen zur Erzeugung und zum Nachweis von verschränkten Zuständen von Spins in Diamant näher erklärt werden. Der Zustand wird in zwei Schritten erreicht: Zunächst wird eine Superposition der Quantenzustände zweier Kernspins nämlich |01⟩ und |00⟩, mit einem Pi-halbe Mikrowellenpuls hergestellt. Das System befindet sich nun im Zustand $1/\sqrt{2}(|00\rangle + |10\rangle)$. Nun erfolgt ein Pi-Puls auf den Übergang |01⟩ nach |11⟩. Danach sind wir im Zustand $\Phi^- = 1/\sqrt{2}(|00\rangle + |11\rangle)$ angelangt (**05a**). Um nun nachzuweisen, dass man wirklich die gewünschte Kohärenz hergestellt hat, bedient man sich sogenannter Ramsey-Fringes (s. **05b**). Dazu ändert man die Frequenz der Mikrowellen ein wenig und ist dadurch nicht mehr exakt resonant mit dem Übergang. Die Abweichung der bei-

Erzeugung, Auslesen und der Nachweis von Bellzuständen zwischen zwei ¹³C Kernspins am NV Zentrum. Oben ist die entsprechende Pulssequenz dargestellt. Links sind die Energien der Zustände und die sie verbindenden Radiofrequenzübergänge (RF_{1,2}) gezeigt. Rechts ist die Entwicklung von Bellzuständen als Schema und anhand von Messdaten, den Ramsey-Fringes, zu sehen.



a) Schema der deterministischen Implantation. Ionen werden aus der Falle mit einer Linse in das Diamantsubstrat fokussiert. Zur Zeit ist an Stelle der Ionenoptischen Linse ein Ionendetektor eingebaut.
 b) Bild der segmentierten Ionenfalle, die als deterministische Ionenquelle dient. Diese Quelle ist 250mm vom Detektor entfernt ist.
 c) links: Zwei Ionen werden auf der CCD Kamera beobachtet und dann aus der Falle geschossen, der Detektor zeigt das Signal der Ionen nach etwa 12 μ s, was einer Geschwindigkeit von 20000km/s entspricht. Rechts: Eine Ionenwolke wird aus der Falle geschossen. Signale der Ionen sind auf dem Detektor zu messen.

den eingesetzten Mikrowellenquellen bezeichnen wir mit $\Delta\omega_1$ bzw. $\Delta\omega_2$. Dadurch ist das Phasenverhältnis zwischen Mikrowelle und Gesamtzustand nicht mehr konstant und der Spin beginnt sich relativ zur Mikrowelle mit der Frequenz $\Delta\omega = \Delta\omega_1 + \Delta\omega_2$ zu drehen. Die Frequenzen der beiden Spins verbinden sich hier zu einer einzigen Frequenz, wodurch noch einmal die Globalität des Zustands plaktiert wird. Diese Oszillation kann man detektieren. Anhand der Phasenlage unterscheidet man, ob der $\Phi^+ = 1/\sqrt{2}(|00\rangle + |11\rangle)$ oder der $\Phi^- = 1/\sqrt{2}(|00\rangle - |11\rangle)$ Zustand erzeugt wurde. Für die anderen beiden Bell Zustände $\Psi^\pm = 1/\sqrt{2}(|10\rangle \pm |01\rangle)$ subtrahieren sich die beiden Frequenzen. Wäre keine Kohärenz erzeugt worden, würde man bei dieser Messung keine Oszillation sehen.

Leider ist ein Quantenregister aus einem einzelnen NV-Zentrum gegenwärtig auf wenige Qubits beschränkt, da es bei kleinen ^{13}C Konzentrationen (1,1 Prozent ist das natürliche Vorkommen) sehr schwierig ist, mehrere ^{13}C in der direkten Umgebung eines NV-Zentrums zu finden. Erhöht man die ^{13}C Konzentration verkürzt man gleichzeitig die Kohärenzzeit. Der Ausweg besteht in der gezielten Positionierung von ^{13}C -Atomen oder der Kopplung mehrerer NV-Zentren. Dorthin führen zwei Wege, entweder man schafft es NV-Zentren so nahe beieinander (<10nm) zu erzeugen, dass sie direkt miteinander

wechselwirken, oder man koppelt sie optisch durch eine Resonatormode, in der Licht von NV-Zentrum zu NV-Zentrum geführt wird und die Kopplung übernimmt. In **03b** ist schematisch der Aufbau eines solchen Quantennetzwerks gezeigt, bei dem mehrere NV-Zentren durch Interferenz an einem Strahlteiler miteinander wechselwirken. Je nachdem, ob zwei Photonen in einem räumlich symmetrischen oder antisymmetrischen Gesamtzustand auf den Strahlteiler treffen, werden sie hinter dem Strahlteiler den gleichen Weg wählen, bzw. sich auf zwei verschiedenen Wegen bewegen. Nun misst man, mit zwei Photodetektoren, wo Photonen auftreffen. Sieht man in jedem Arm ein Photon, sind die Quellen der Photonen miteinander verschränkt, andernfalls ist dies nicht der Fall und man muss einen neuen Versuch starten. Auf diese Art und Weise können im Prinzip beliebig viele NV-Zentren miteinander gekoppelt werden. Dies birgt allerdings immense technische Herausforderungen, da die beiden Photonen am Strahlteiler völlig ununterscheidbar sein müssen. Das bedeutet vor allem, dass sie ihn innerhalb eines sehr kurzen Zeitfensters, das kleiner als die Zeitunschärfe des Photons selbst sein muss, erreichen müssen. Um so ein Netzwerk aufzubauen, müssen außerdem die NV-Zentren kontrolliert in ihren Resonatoren erzeugt werden. Dazu bedient man sich der Ionenimplantation.

6. Deterministische Implantation von Farbzentren

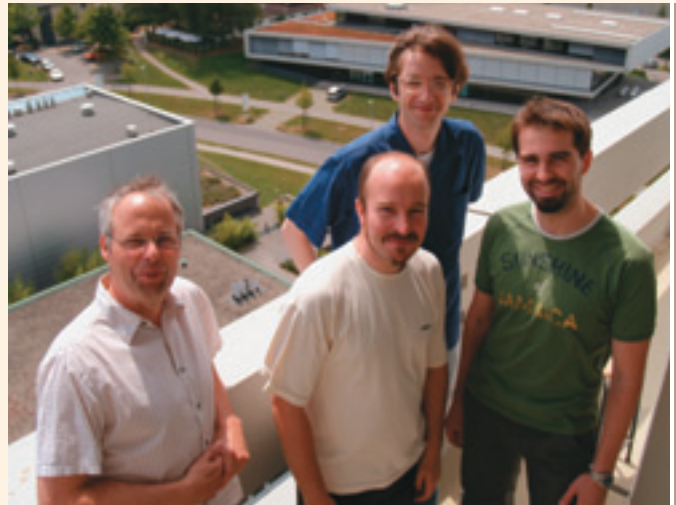
Schon jetzt sind mit eingebetteten Farbzentren verschränkte Zustände in Diamant hergestellt worden. Unser Ziel ist es aber, eine weit größere Zahl von solchen Qubits in einem zukünftigen Festkörper-Quantencomputer zu nutzen. Natürlich eingebettete Farbzentren sind nie so zueinander positioniert, dass gegenseitige Kopplungen für eine Verschränkung genutzt werden können, denn die Wahrscheinlichkeit, dass sich solche NV Zentren in größerer Zahl genau auf den richtigen Abständen befinden ist praktisch Null. Die deterministische Implantation von einzelnen Stickstoffatomen wird z.Z. entwickelt, um eine universell einsetzbare Methode zu haben, die eine nm genaue Einzelatom-Dotierung ermöglicht. Als ultra-kalte Quelle nutzen wir dabei eine lineare segmentierte Ionen-

PHILIPP NEUMANN (r.) und
FLORIAN REMPP (mitte vorn)

studierten Physik an der Universität Stuttgart und promovieren dort am
3. Physikalischen Institut.

FEDOR JELEZKO

(mitte hinten) hat in Minsk Physik studiert und an den Universität von
Bordeaux I und der Belarusian State University in Minsk promoviert.
Zwischen 1999 und 2000 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter an der
TU Chemnitz. 2000 bis 2007 war er wissenschaftlicher Angestellter
am 3. Physikalischen Institut der Universität Stuttgart. Seit 2007 ist er
Akademischer Rat. 2006 verbrachte er im Rahmen des Forschungs-
stipendium „Quantum Communication Victoria“ in Melbourne. 2007
lehrte er als Gastdozent an der Ecole Normale Supérieure de Cachan in
Frankreich. 2008 erhielt er den Walter-Schottky-Preis der DPG.

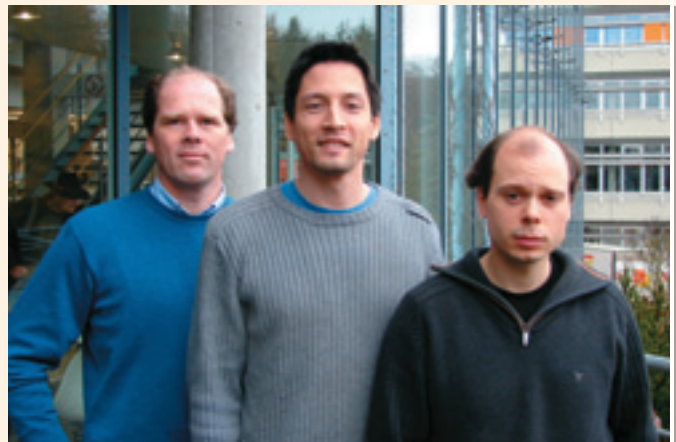


JÖRG WRACHTRUP

(li.) studierte Physik an der FU Berlin. Dort promovierte er 1994 mit einer Doktorarbeit über Magnetische Resonanz an einzelnen Molekülen.
Nach einer Postdoktorandenzeit am Institut für Physik der TU Chemnitz habilitierte er sich dort im Jahr 1998 mit einer Arbeit über Optische
Spektroskopie an einzelnen Quantensystemen im Festkörper. Er erhielt Rufe an die Universitäten Hamburg, Göttingen und Leipzig sowie Stuttgart.
Seit Januar 2000 leitet er das 3. Physikalische Institut der Universität Stuttgart.

FERDINAND SCHMIDT-KALER

(l.) studierte an den Universitäten Bochum, Bonn und München und
schloss mit dem Diplom in Physik an der TU München ab. In seiner
Doktorarbeit bei T. W. Hänsch am Max-Planck-Institut für Quanten-
optik in Garching beschäftigte er sich mit Präzisionsspektroskopie an
Wasserstoff. Nach einer Post-Doc Zeit bei S. Haroche an der Ecole
Normale Supérieure in Paris wurde er Assistent bei R. Blatt im Insti-
tut für Experimentalphysik Innsbruck und forschte dort an ultrakalten
gespeicherten Ionen für einen Quantenprozessor. Seit 2004 ist er Leiter
des Instituts für Quanten-Informationsverarbeitung an der Universität
Ulm. Er erhielt den Helmholtz-Preis der Physikalisch-Technischen
Bundesanstalt Braunschweig, den Rudolf-Kaiser Preis, und ist seit
2008 stellvertretender Vorsitzender der Fachgruppe Quantenoptik und
Photonik der DPG.



KILIAN SINGER

(m.) studierte Physik an der Universität Heidelberg und promovierte an der Universität Freiburg mit einer Doktorarbeit über ultrakalte Rydberg
Atome. Nach einer Postdoktorandenzeit am selben Institut ist er seit 2005 Assistent bei F. Schmidt-Kaler im Institut für Quanten-Informations-
verarbeitung an der Universität Ulm (Akademischer Rat). Er wird seit Anfang diesen Jahres vom Eliteförderprogramm für Postdoktoranden der
Landesstiftung Baden-Württemberg gefördert.

WOLFGANG SCHNITZLER

(r.) studierte Physik an der Universität Ulm und promoviert dort am Institut für Quanten-Informationsverarbeitung.

Kontakt

3. Physikalisches Institut, Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 57, 70550 Stuttgart, Tel.: 0711/685-65278, Fax: 0711/685-65281, E-Mail: wrachtrup@physik.uni-stuttgart.de

falle, in der einzelne Ionen gefangen, gekühlt und identifiziert werden. Ist die richtige Anzahl, z.B. ein einzelnes Ion vorhanden, wird eine Hochspannung angelegt und das Ion deterministisch aus der Falle extrahiert. Durch die Laserkühlung kann ein Ion in Ort und Impuls auf die fundamentale Grenze der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation gekühlt werden, was typisch einer Wellenpaketgröße von wenigen nm entspricht. Die extrahierten einzelnen Ionen müssen nur noch durch eine Ionenlinse auf das Substrat geschickt werden, um dort einzelne Farbzentren erzeugen zu können. Unsere Methode ist universell, kann also mit jedem atomaren und sogar einer großen Anzahl molekularer Ionen arbeiten. Sie erlaubt die genaue Zahl von Dotierungsatomen vorher einzustellen und die räumliche Auflösung sollte nach unseren numerischen Simulationen eine Genauigkeit von etwa 5 nm erreichen können. Bisher haben wir schon zeigen können, dass deterministisch extrahierte Ionen nach einer Entfernung von 250 nm in einem Detektor nachgewiesen werden können, und dass die Geschwindigkeitsverteilung tatsächlich sehr eng ist, sodass Ionen-opti-

sche Elemente sehr hohe Auflösung erreichen.

7. Ausblick

Wir konnten in diesem Artikel zeigen, wie einzelne Farbzentren im Diamantgitter eingebaut, und für die Speicherung und Verarbeitung von Quantenzuständen genutzt werden. Mit zunehmender Miniaturisierung elektrischer und optischer Bauelemente treten quantenmechanische Effekte in den Vordergrund. Quantenchemische Phänomene können gezielt genutzt werden; die Quanteninformationsverarbeitung und die Quantenkryptologie sind erste Schritte auf diesem Weg. Auch in der Metrologie, also bei Präzisionsmessungen physikalischer Größen, ermöglicht die Quantentechnologie entscheidende Verbesserungen. Aber nicht nur für zukünftige technologische Entwicklungen sondern auch für die Grundlagenforschung ist die Quanteninformationsverarbeitung in Festkörpersystemen hochinteressant. •

*Fedor Jelezko, Philipp Neumann, Florian Rempp,
Wolfgang Schnitzler, Kilian Singer,
Ferdinand Schmidt-Kaler, Jörg Wrachtrup*