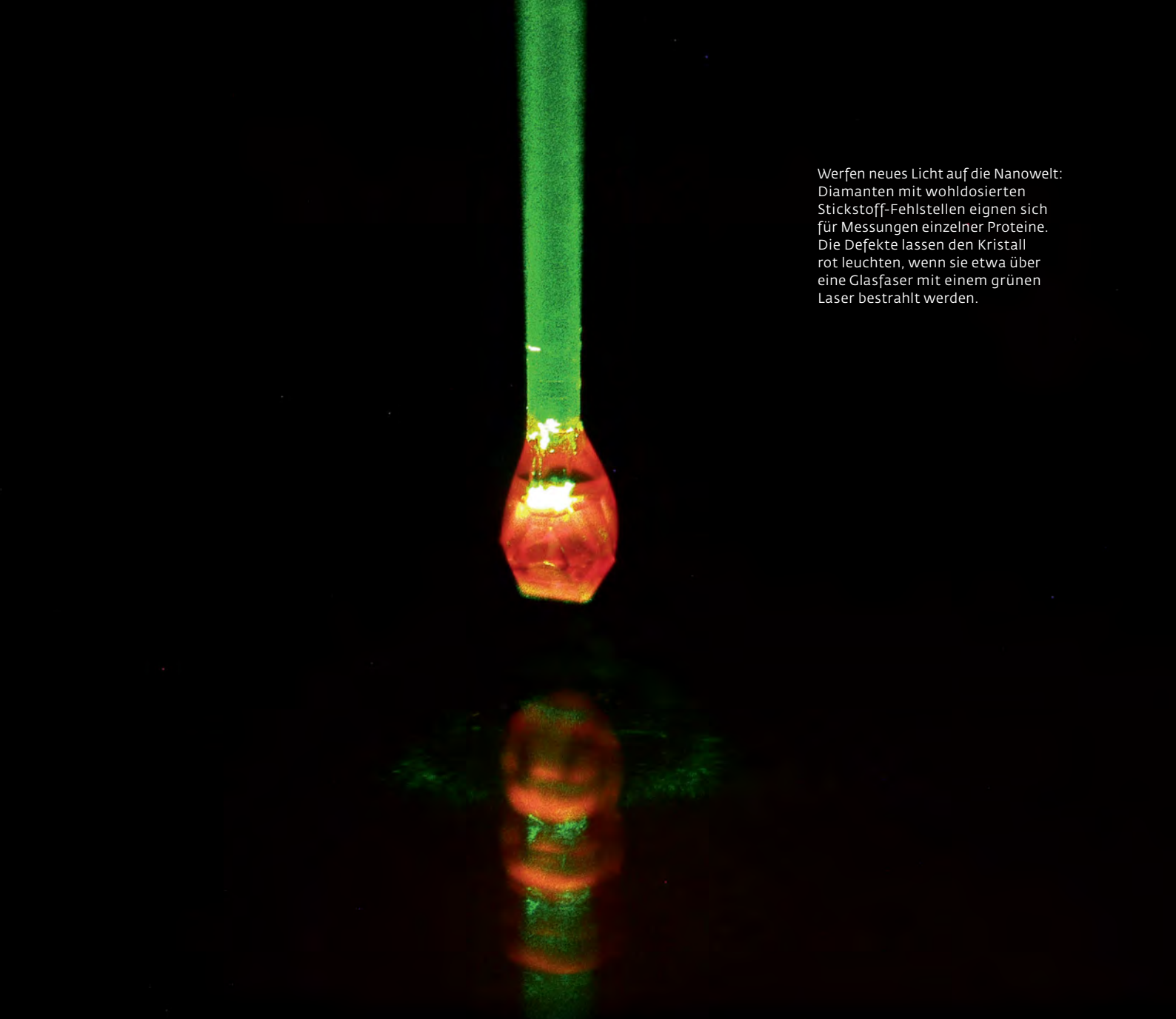


Diamant – ein lupenreiner Sensor

Als Brillanten können sie ein betörendes Feuer versprühen, doch das reizt **Jörg Wrachtrup** weniger an den Edelsteinen. Der Physikprofessor an der Universität Stuttgart und Fellow am dortigen **Max-Planck-Institut für Festkörperforschung** arbeitet mit eher unscheinbaren Diamanten. Daraus entwickelt sein Team Sensoren, um die molekulare Maschinerie einer lebenden Zelle live zu beobachten. Von den Einblicken in die Nanowelt könnte auch die Medizin profitieren.



Werfen neues Licht auf die Nanowelt: Diamanten mit wohldosierten Stickstoff-Fehlstellen eignen sich für Messungen einzelner Proteine. Die Defekte lassen den Kristall rot leuchten, wenn sie etwa über eine Glasfaser mit einem grünen Laser bestrahlt werden.

TEXT **ROLAND WENGENMAYR**

So können Diamanten also auch aussehen. Ein winziger, pechschwarzer Quader liegt in einem Kästchen, das Matthias Pfender aus einer Schublade geholt hat. Pfender ist Doktorand von Jörg Wrachtrup, und wir befinden uns in einem Labor an der Universität Stuttgart. Wrachtrup ist dort Professor für Physik, zudem forscht er als Fellow am benachbarten Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, das Wrachtrup aus dem Fenster seines Büros an der Uni gut im Blick hat.

Matthias Pfender zeigt nun ein gelbes Diamantplättchen, das mit seiner laserschnittenen Form an ein kleines

Plastikbauteil aus einem Kinderzimmer erinnert. „Wir schleifen eben keine Brillanten aus unseren Diamanten“, kommentiert Wrachtrup schmunzelnd den erstaunten Blick des Gasts. Im Gegenteil, seine Forschung baut sogar gezielt Fehler in Diamantkristalle ein, und diese manifestieren sich in einer Verfärbung. Es geht hier nicht um Bling-Bling, und Einbrecher wären angesichts der winzigen, kaum als solche erkennbaren Diamanten enttäuscht.

Hier in Stuttgart geht es gewissermaßen um die inneren Werte der Kristalle, die Physikerinnen und Physiker interessieren. Denn die Fehler, die den Diamanten Farbe verleihen, haben be-

sondere Quanteneigenschaften. Man kann sie als extrem kleine, superempfindliche Quantensensoren für Magnetfelder verwenden – oder als Bauteile für eine zukünftige Quanteninformationstechnik. Auf beiden Gebieten forschen Teams von Jörg Wrachtrup, der als Pionier geradezu ein wissenschaftliches Diamantenfieber in die Welt gesetzt hat. So wächst die Zahl der Forschungsteams, die heute auf dem Gebiet arbeiten, beständig. Viele davon werden von ehemaligen Schülern Wrachtrups aufgebaut und geleitet.

Der Besuch in Stuttgart gilt den kleinsten Magnetsensoren der Welt. Eines Tages sollen diese in der Lage sein,

» Eine Technik, mit der sich Biomoleküle direkt, Atom für Atom und in der lebenden Umgebung beobachten lassen, würde für die biomedizinische Forschung einen Durchbruch markieren.

den chemischen Aufbau zum Beispiel von Biomolekülen zu entschlüsseln. „Es ist ein großer Traum, mit so einem Quantensensor kleine oder große Moleküle in lebenden Zellen oder deren Membranen studieren zu können“, skizziert Wrachtrup das Fernziel seiner Forschung.

Es gibt zwar schon lichtmikroskopische Techniken, die den Bewegungen etwa von Proteinen mithilfe von Tricks folgen können. Doch wie sich die Atome in Biomolekülen anordnen, während diese ihre Aufgaben erledigen, können Lichtmikroskope nicht auflösen. Das ist aber oft entscheidend für das Verständnis der biochemischen Lebensprozesse. Denn oft genug sind es winzige Bewegungen in bestimmten Abschnitten der großen Molekülknäule, die einen solchen Prozess antreiben. Ein genauer Blick auf Proteine bei der Arbeit könnte auch helfen, Ansatzpunkte für neue medizinische Wirkstoffe zu entwickeln.

Eine Molekülstruktur atomar auflösen können bislang nur Techniken, die es erfordern, die Moleküle in lebensfeindliche Umgebungen zu platzieren, in Vakuum und Kälte. Doch eine zum Beispiel mit Röntgenlicht aufgenommene Molekülstruktur kann sehr stark von der Struktur abweichen, die in der lebenden Zelle wirkt. Deshalb würde eine Technik, mit der sich Biomoleküle direkt, Atom für Atom und in der lebenden Umgebung beobachten lassen, für die biomedizinische Forschung einen Durchbruch markieren.

FEHLER MIT BESONDEREN QUANTENEIGENSCHAFTEN

Bei einem Kaffee erklärt Jörg Wrachtrup lebhaft, aus welchem Grund er und seine Mitarbeiter für solche Messungen Diamanten benötigen: Nur in diese können die Wissenschaftler die Fehler

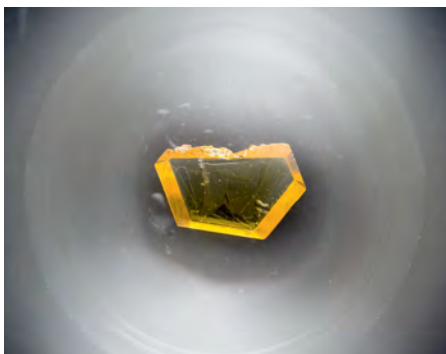
mit den besonderen Quanteneigenschaften einbauen.

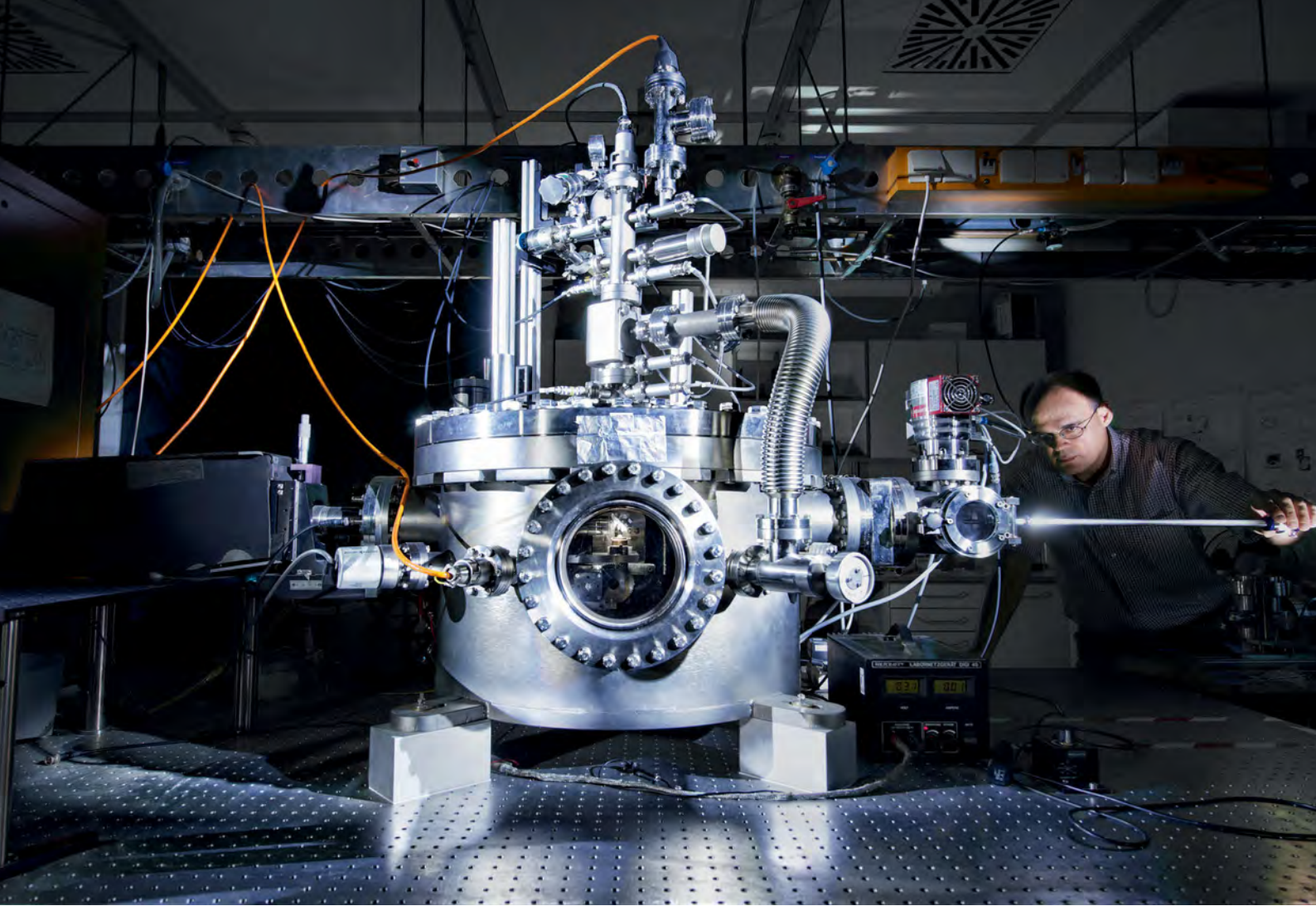
Die künstlichen Kristalle werden dabei mit zwei Verfahren hergestellt. Eines ist das etablierte Industrieverfahren, bei dem der Kohlenstoff unter enormem Druck und hohen Temperaturen zu Diamant gepresst wird, der härtesten und edelsten Form, die Kohlenstoff annehmen kann. „Das gibt besonders perfekte, spannungsfreie Diamanten“, sagt Wrachtrup. Die andere Methode heißt chemische Gasphasenabscheidung. Dabei wächst der Diamant Atomlage für Atomlage auf einem Substrat. Auf diese Weise kann man flache, seitlich ausgedehnte Diamantproben herstellen, die sich gut mit Lasern in verschiedene Formen schneiden lassen. Solche Diamanten haben eine typische Plättchenform, wie die im Labor gezeigte gelbe Probe.

Diamanten herzustellen, die sich optimal als Quantensensoren eignen, ist ein Ziel einer Kooperation zwischen dem Max-Planck-Institut für Festkörperforschung und dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF in Freiburg. Dabei geht es auch darum, in feiner Dosierung Stickstoffatome in einen der künstlichen Steine einzubauen. Stickstoffatome sind ähnlich groß wie Kohlenstoffatome, fügen sich also gut in das Kristallgitter ein. Viele Stickstoffatome sorgen auch für dessen Gelbfärbung, denn anders als das reine Kohlenstoffgitter können sie sichtbares Licht aufnehmen oder abgeben. Deshalb heißen solche Fehler auch Farbzentren.

Das ist aber erst der Anfang. Die entscheidende Zutat zum perfekten Fehler

Varianten von Diamanten: In einem Industrieverfahren entstehen bei hohem Druck und hoher Temperatur besonders perfekte Steine, die durch viele eingebaute Stickstoffatome eine gelbe Farbe erhalten (links). In der Gasphasenabscheidung wachsen dagegen flächige Kristalle, die sich in verschiedene Formen schneiden lassen (rechts).





Physikalisch veredelt: Um einen künstlich hergestellten Diamanten in einen Quantensensor zu verwandeln, zieht Andrej Denisenko ihn mit einem Teleskopstab in die Kammer eines Implantorgeräts. Dort wird der Kristall mit Stickstoffatomen versetzt, die ihm die besonderen Quanteneigenschaften geben.

ist ein Loch, ein im dreidimensionalen Netz des Kristallgitters fehlendes Atom. Die beim Präparieren erzeugten Löcher wandern so lange durch das Diamantgitter, bis sie an Stickstoffatomen hängen bleiben, weil Defekte oft dazu neigen, sich zueinander zu gesellen. Dieser Glücksfall für die Forschung sorgt für das Entstehen sogenannter Stickstoff-Fehlstellen-Zentren. Sie werden kurz NV-Zentren genannt, nach den englischen Wörtern *nitrogen* für Stickstoff und *vacancy* für Fehlstelle.

Das Besondere an diesem Doppelfehler ist nun, dass er mehrere einzelne Elektronen zu einem winzigen Stabmagneten zusammenschaltet. Elektronen sind selbst kleine Elementarmagnete, Ursache ist ihr Spin, eine Art quantenmechanische Pirouette. Im NV-Zentrum sorgt die sehr spezielle Umgebung dafür, dass sie zusammen einen winzigen, drehbaren Stabmagneten bilden. Allerdings kann dieser wie ein altmodi-

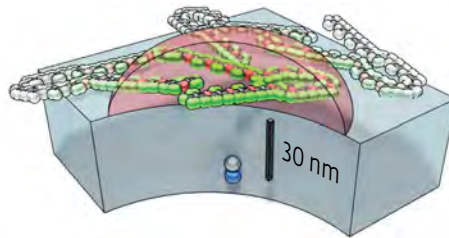
scher elektrischer Drehschalter nur in zwei Positionen einrasten, sobald er in ein Magnetfeld gerät, nämlich parallel oder antiparallel zu diesem Feld. Das erzwingen die Gesetze der Quantenphysik. Weil diese beiden Zustände die Information Null und Eins speichern können, machen sie den Magneten zu einem perfekten Quantenbit – der kleinsten Recheneinheit eines Quantencomputers, der manche Aufgaben künftig möglicherweise einmal um ein Vielfaches schneller lösen könnte als herkömmliche Rechner. Zudem ist ein NV-Zentrum im Diamanten als superempfindlicher Quantensensor für Magnetfelder einsetzbar.

Solche Quantensensoren für Magnetfelder eignen sich nicht nur, um die Strukturen einzelner Proteine oder anderer Biomoleküle zu untersuchen, sondern auch, um Unregelmäßigkeiten in der Struktur von Festkörpern mit nanoskopischer Detailgenauigkeit zu analy-

sieren. Daran arbeitet Jörg Wrachtrup gemeinsam mit Klaus Kern, Direktor am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung. So könnten Quantensensoren in Diamanten etwa helfen, den Aufbau von Supraleitern genau zu analysieren, die Strom bereits bei relativ hohen, aber noch nicht praxistauglichen Temperaturen ohne Verlust leiten. Solche Untersuchungen könnten helfen, diesen Effekt besser zu verstehen und alltagstaugliche Materialien für widerstandslosen Stromtransport zu entwickeln.

DIE STRUKTUR DES DIAMANTEN SCHÜTZT DEN ZUSTAND

Für derartige Einblicke in die Nanowelt eignet sich der Doppelfehler aus einem Stickstoffatom und einer Lücke im Kristallgitter des Diamanten so gut, weil dessen Struktur den empfindlichen Quantenzustand, in dem diese Spins vorliegen, außergewöhnlich gut



Kernspin-Untersuchungen in der Nanowelt: Ein Stickstoff-Fehlstellen-Zentrum, angedeutet durch die blaue und die weiße Kugel, in einem Diamanten kann winzige magnetische Signale detektieren. Daher eignet es sich, um die Struktur eines einzelnen Proteins aufzuklären, das sich, in einem Tropfen gelöst, auf der Oberfläche des Kristalls befindet.

schützt. So behalten die NV-Zentren einen in den Elektronenspin eingespeicherten Quantenzustand auch bei Zimmertemperatur einige Tausendstelsekunden lang – in der Quantenwelt eine kleine Ewigkeit.

NV-ZENTRUM LIEFERN MIT LICHT LESBARE INFORMATION

In herkömmlichen Materialien würde der Spinzustand ungefähr eine Milliarde Mal schneller zerstört, wenn er nicht mit riesigem Aufwand isoliert und auf Temperaturen weit unter dem Gefrierpunkt gekühlt würde. Denn künstlich präparierte Quantenzustände sind meist äußerst empfindlich, besonders gegen die rüttelnden Wärmebewegungen der Atome in der Umgebung. Zimmertemperatur ist also für viele Quantentechnologien ein geradezu verbotenes Terrain. Dass NV-Zentren ihren besonderen Quantenzustand auch bei Zimmertemperatur behalten, prädestiniert sie für die Erforschung biologischer Systeme, die bei sehr tiefen Temperaturen ihre Funktion einstellen.

NV-Zentren haben aber noch eine wichtige Eigenschaft: Sie können die Quantenzustände der winzigen Magnete direkt in eine mit Licht lesbare Information übersetzen. Hier kommt nun die Eigenschaft des Farbzentrums ins Spiel. Einfach gesagt: Richtet man

Laserlicht passender Farbe auf den Diamanten, dann leuchten die NV-Zentren auf. Die Intensität dieses Leuchtens hängt nun jeweils vom Quantenzustand der winzigen Magnete ab. Das Licht kann man über ein Mikroskopobjektiv mit einem Kamerasensor aufnehmen und analysieren.

Wer also mit den NV-Zentren im Diamanten geschickt umgehen kann, hat ein ausgesprochen nützliches System zur Hand. Weil er mikroskopisch klein ist und damit selbst Teil der molekularen Welt, kann er als magnetische Superlupe direkt an die zu untersuchenden Moleküle heranrücken. Die räumliche Auflösung lässt sich bis auf die Größe eines einzelnen NV-Zentrums steigern. „Wenn wir damit Proben abfahren, können wir Magnetfelder mit einem Ångström Auflösung nachweisen“, sagt Jörg Wrachtrup. Ein Ångström ist ein Zehntel eines Nanometers, eines milliardstel Meters. Ein Kohlenstoffatom zum Beispiel hat als Baustein des Diamantgitters einen Durchmesser von etwas weniger als einem Ångström.

Praktisch laufen Messungen mit dem Quantensensor nach dem Muster eines schon lange etablierten Verfahrens ab. Es heißt Kernspinresonanz oder kurz NMR-Spektroskopie, NMR steht für den englischen Begriff *nuclear magnetic resonance*. Seine medizinische Variante ist der Magnetresonanztomo-

graf (MRT), bekannter als Kernspintomograf. Beide Verfahren machen sich zunutze, dass die Atomkerne bestimmter chemischer Elemente winzige Magnete sind. Am wichtigsten ist der allgegenwärtige Wasserstoff, der massenhaft in alle biologisch relevanten Moleküle eingebaut ist. Ein anderes Beispiel ist ^{13}C . Dieses natürlich vorkommende stabile Isotop des Kohlenstoffatoms spielt für die Stuttgarter eine wichtige Rolle: Es enthält ein Neutron mehr als ^{12}C , das in der Natur fast hundertmal häufiger ist.

KREISELNDE KERNE WERDEN VON DER UMGEBUNG BEEINFLUSST

NMR- und MRT-Messungen, also auch solche mit einem NV-Zentrum als Sensor, funktionieren so, dass sie die magnetischen Atomkerne in einem starken Magnetfeld kreiseln lassen. Im Labor der Stuttgarter Forscher erzeugt dieses Feld ein supraleitender Magnet in einem Tank mit einem Kältemittel, der an einen Warmwasserspeicher in manchen Wohnungen erinnert. In einer Röhre, die unter dem Tank sitzt und einen handbreiten Hohlraum umschließt, platzieren die Forscher den diamantenen Quantensensor. Allerlei optische Instrumente komplettieren den Versuchsaufbau auf dem Labortisch, der so viel Platz bietet wie ein Doppelbett.



Diamant in der Röhre: Nabeel Aslam (links) und Matthias Pfender justieren die optischen Geräte, mit denen sie die Ergebnisse von Magnetfeldmessungen eines Quantensensors auslesen (oben). Den Sensor platzieren sie in einem Hohlraum (links, halb verdeckt von einem Tank mit Kühlmittel) im Feld eines supraleitenden Magneten, der bei einer Temperatur weit unter dem Gefrierpunkt arbeitet. Für die Messungen müssen die Forscher Mikrowellenpulse auf den Diamanten strahlen. Daher spannen sie den Kristall in eine Struktur, die solche Pulse erzeugt (unten).

Fotos: Wolfram Scheible (2)

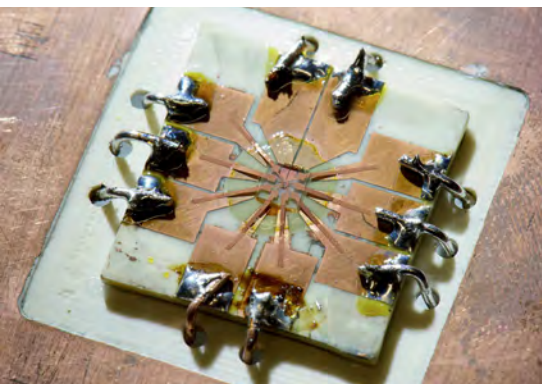
Sobald die Forscher die Probe für die Untersuchung auf den Diamanten aufgebracht haben, strahlen sie ein Radiosignal darauf, das die atomaren Kreisel der Probenmoleküle kippt. Anschließend kehren die rotierenden Kernspins allmählich zurück in ihre Ausgangslage. Während sie das tun, strahlen sie ihrerseits ein Radiosignal ab. Diese Antwort zeichnen Empfangsspulen auf. Medizinische MRT-Geräte machen daraus Bilder vom Körperinneren.

NMR-Spektrometer wie auch der Stuttgarter Quantensensor liefern andere Informationen. Die wichtigste und am einfachsten zu entschlüsselnde Information ist das chemische Element, das der sendende Atomkern repräsentiert. Aber aus dem Signal lässt sich noch viel mehr herauslesen, weil die kreiselnden Kerne wie kleine Kompass von den Atomen in ihrer Umgebung beeinflusst werden. So lässt sich aus NMR-Signalen sehr genau auf die chemische Struktur der Moleküle rückschließen. Wie ein Fingerabdruck verraten bestimmte Signalanteile, wo das sendende Atom im Molekül sitzt und

welche chemischen Bindungen es zu seinen Nachbarn eingeht. Damit ist die NMR-Spektroskopie eine der mächtigsten Methoden der chemischen Strukturaufklärung geworden. Noch mächtiger wäre die Technik allerdings, wenn sich damit auch die Struktur eines einzelnen Moleküls aufklären ließe. Doch dafür sind heutige NMR-Geräte mit ihren relativ großen Spulen für die Radiosignale, die ein Molekül ausstrahlt, nicht empfindlich genug.

MAGNETENSORIK IN DER NANOWELT

Die Grenze zur Magnetsensorik in der Nanowelt können die Quantensensoren aus Jörg Wrachtrups Labor durchbrechen. Dazu bringt man die Probe auf die Oberfläche des winzigen Diamanten auf. Direkt unter ihr befindet sich im Extremfall ein einziges NV-Zentrum als Sensor. „Es ist dann viel kleiner als das damit untersuchte Molekül“, betont Wrachtrup. So kann es genau erfassen, wie weit ein bestimmtes Atom im Molekül von ihm entfernt ist. Man





Zu Testzwecken messen die Stuttgarter Forscher mit einem Diamanten das Feld eines würfelförmigen Magneten (links). Der Quantensensor befindet sich als hauchdünne Membran in dem runden Loch in der Mitte des Plättchens. Wie intensiv er leuchtet, wenn er mit grünem Laserlicht bestrahlt wird, hängt von der Stärke des Magnetfelds ab. Jörg Wrachtrup (rechts) hat mit seinen Ideen maßgeblich dazu beigetragen, dass Diamanten als solche Sensoren eingesetzt werden können.

kann sich das ungefähr vorstellen, als würde man direkt unter einem Apfelbaum stehen und genau sehen, wo über einem die einzelnen Früchte hängen. Natürlich ist diese Sichtweite begrenzt: Die Signalstärke der kreiselnden Atomkerne nimmt mit dem Abstand schnell ab, sodass das NV-Zentrum ein Volumen von einigen Nanometern Radius erfassen kann. Wenn die Methoden, um die chemischen Fingerabdrücke der NMR-Spektroskopie zu analysieren, eines Tages an die Auswertung der Lichtsignale aus den NV-Zentren angepasst sein werden, wird sich so die genaue chemische Struktur eines Moleküls entschlüsseln lassen.

BEWEGUNGEN EINES PROTEINS LASSEN SICH BEOBACHTEN

Erste Experimente beweisen, dass das im Prinzip funktioniert. Bereits 2015 haben die Stuttgarter Forscher in einer internationalen Wissenschaftskoopera-

tion demonstriert, dass sich damit die Bewegungen eines Proteins beobachten lassen. Das Team verwendete für den Test ein Protein, das für die Zellteilung wichtig ist, und setzte es in eine Umgebung, welche die Bedingungen in einer lebenden Zelle simulierte.

Um die Signale einzelner Atome in einem solchen Protein genau auflösen zu können, mussten die Stuttgarter aber noch ein grundsätzliches Problem knacken: Die magnetischen Sendefrequenzen der Atomkerne unterscheiden sich so wenig, dass sie nur schwer trennbar sind. Das erinnert an Radiosender, die auf der Frequenzskala dicht nebeneinanderliegen. Nur ein gutes Radio kann sie klar empfangen.

Exakt das ist das Problem der NV-Zentren als Quantensensoren: Sie sind zwar empfindlich, können aber die atomaren Sendefrequenzen in einem Molekül nicht auflösen. Denn eine einzelne Messung liefert nur ein schwaches Signal, das schwer von den Nachbar-

signalen abzugrenzen ist. Man kann sich das Problem anhand zweier lose gekoppelter Pendel vorstellen, wobei ein Pendel die Frequenz des zweiten messen soll. Dazu muss das Messpendel lange genug mitlaufen können, um sich sauber auf die Frequenz des anderen Pendels einschwingen zu können. Der Quantensensor entspricht einem Pendel, das nicht lange genug mitlaufen kann.

MEHRERE MESSERGEBNISSE WERDEN GESPEICHERT

Die Stuttgarter Forscher hatten also die Idee, die Ergebnisse mehrerer einzelner Messungen zu speichern. Darauf gekommen waren sie nicht zuletzt, weil sie auch erforschen, wie sich mit NV-Zentren Quanteninformation verarbeiten lässt. Dabei kommt es darauf an, ein Quantenbit für längere Zeit speichern zu können. Und da lag es nahe, die Information der magnetischen Quantensensoren auf dieselbe

» Man könnte sozusagen dem Leben selbst bei seiner Arbeit in einer Zelle zuschauen.

Weise zu speichern, wie sie etwa Zwischenergebnisse der Quanteninformationsverarbeitung aus einem NV-Zentrum aufbewahren.

Der Trick: Die Wissenschaftler übertragen die Frequenzinformation einer kurzen Magnetmessung mit einem NV-Zentrum in einem direkt benachbarten Langzeitspeicher. Als solchen nutzen sie den Kernspin eines ^{13}C -Atoms. Diese Variante des Kohlenstoffs ist auch im Diamantgitter immer wieder anzutreffen und manchmal auch in unmittelbarer Nähe eines NV-Zentrums. Die Messung mit ihrem Quantensensor wiederholen die Forscher nun mehrmals und speichern das Ergebnis immer wieder mithilfe einer ausgeklügelten Folge von Radio- und Mikrowellen, sodass die im ^{13}C -Kern gespeicherte Frequenzinformation immer präziser wird. Mit dem Trick kann der Quantensensor nun doch die eng benachbarten Sendefrequenzen aus dem Probenmolekül auseinanderhalten.

Dieser Schritt lieferte den entscheidenden Schlüssel, um den Quantensensor für NMR-Untersuchungen in der Nanowelt einsetzen zu können. Doch es gibt noch viel zu forschen. Gemeinsam mit ihren Kollegen des Fraunhofer-Instituts IAF entwickeln die Stuttgarter Forscher ein Gerät für die Nano-NMR, deren Herz ein diamantener Quantensensor bildet und die künftig in vielen Laboratorien oder gar in der medizinischen Radiologie Einblicke in die Nanowelt liefern kann.

„Die große Vision ist, die Technik zu nehmen und dann in eine echte mikroskopische Abbildung zu überführen“, sagt Wrachtrup. So arbeitet sein Team an einer Kombination des Quan-

tensors mit extrem hochauflösenden Lichtmikroskopen. Das Lichtmikroskopbild könnte zeigen, wo sich ein bestimmtes Proteinmolekül in einer Zelle gerade aufhält. Und der Nano-NMR-Sensor würde dann die chemische Struktur erfassen, die das Protein hat. Damit könnte man sozusagen dem Leben selbst bei seiner Arbeit in einer Zelle zuschauen. Zudem könnte

eine solche Technik ganz neue Wege eröffnen, um Krankheiten früh zu erkennen: Mit den Diamanten aufgerüstete klinische Magnetresonanztomografen wären so empfindlich, dass sie viel kleinere Tumore aufspüren könnten als heutige Geräte. Diamanten für die Nano-NMR könnten der Biologie und der Medizin also zum nächsten Quantensprung verhelfen. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Um biologische Prozesse besser zu verstehen und neue Ansatzpunkte für medizinische Therapien zu finden, entwickeln Forscher um Jörg Wrachtrup einen Quantensensor, der die Struktur einzelner Proteine und anderer Biomoleküle analysieren kann, während diese in Zellen aktiv sind.
- Ein NV-Zentrum in einem Diamanten kann als Quantensensor dazu dienen, die atomare Struktur einzelner Biomoleküle zu untersuchen. Denn die Fehlstellen im Kristallgitter nehmen NMR-Signale von Atomen in ihrer Umgebung wahr. Diese Information lässt sich optisch auslesen.
- Um die NMR-Signale unterschiedlicher Atome mit ihrem Quantensensor auflösen zu können, sammeln die Stuttgarter Forscher die Ergebnisse einzelner Messungen in einem Quantenspeicher, sodass die verschiedenen Signale verstärkt werden und sich deutlich gegeneinander abgrenzen.

GLOSSAR

NMR-Spektroskopie: NMR steht für *nuclear magnetic resonance*, englisch für Kernspinresonanz. Sie liefert Informationen über die magnetischen Eigenschaften einzelner Atome. Da die magnetischen Signale von der Anordnung in einem Molekül oder Kristall beeinflusst werden, lässt sich mit der NMR-Spektroskopie die chemische Struktur eines Probenmaterials analysieren. In der Weiterentwicklung zur medizinischen Magnetresonanztomografie (MRT) gibt sie detaillierte Einblicke in den menschlichen Körper.

NV-Zentrum: Ein Stickstoffatom, das in einem Diamanten, gepaart mit einer Lücke im Kristallgitter, auftritt (NV für *nitrogen vacancy*). Durch seine besondere elektronische Konfiguration wird ein solcher Defekt zum winzigen Stabmagneten, der sehr schwache Magnetfelder detektiert und in eine optische Information umwandelt.

Supraleiter: Materialien, die Strom ohne elektrischen Widerstand leiten. Der Effekt tritt unter Atmosphärendruck erst deutlich unter minus 100 Grad Celsius auf. Spulen aus solchen Materialien erzeugen starke Magnetfelder und werden deshalb in der NMR-Spektroskopie und in der Magnetresonanztomografie eingesetzt.