

BRAUNE ZWERGE

Sterne mit Raumtemperatur

Mit dem Infrarotteleskop WISE haben Astronomen die bislang kältesten Zwergsterne gefunden. Einer von ihnen ist mit 25 Grad Celsius nicht einmal körperwarm.

VON JAN HATTENBACH

Eindrucksvolle 15 Millionen Grad Celsius herrschen im Kern der Sonne. Nach außen nimmt ihre Temperatur aber drastisch ab. Die sichtbare Oberfläche, die Photosphäre, bringt es auf gerade noch rund 6000 Grad. Masse-reichere Sterne erreichen hier bis zu mehrere hunderttausend, die kleinsten Exemplare immerhin noch 2000 Grad.

Noch tiefere Sterntemperaturen hatten die astronomischen Datensätze lange nicht zu bieten. Die nächstkühleren Objekte waren die Planeten. Sie besitzen kaum innere Energiequellen und

sind daher vor allem auf die Strahlung ihrer Zentralsterne angewiesen. In Jupiters äußeren Atmosphärenschichten messen die Forscher darum minus 110 Grad, beim sonnenfernsten Planeten Neptun nur noch minus 200 Grad.

Mittlerweile aber sind Forscher in die »Lücke« zwischen Planeten und Sternen vorgestoßen. Schon vor einigen Jahrzehnten hatten sie vermutet, dass man hier gescheiterte Sterne finden könnte: Objekte, die groß genug sind, damit in ihrem Innern zumindest zeitweise Kernfusionsprozesse einset-

zen, aber zu klein, als dass sie daraus zuverlässig für lange Zeit Energie gewinnen könnten. Diese Braunen Zwerge, wie sie in den 1970er Jahren von der berühmten SETI-Forscherin Jill Tarter (SETI: englisch für Suche nach außerirdischer Intelligenz) getauft wurden, besitzen der gängigen Theorie zufolge mindestens 13, aber nicht mehr als 75 bis 80 Jupitermassen. Sie strahlen nur wenig sichtbares Licht ab und sind damit ähnlich schwierig aufzuspüren wie Planeten um andere Sterne. Tatsächlich wurden die ersten von ihnen etwa zeitgleich mit den ersten Exoplaneten Mitte der 1990er Jahre entdeckt. Und das, obwohl es höchstwahrscheinlich viel mehr Braune Zwerge als »richtige« Sterne gibt.

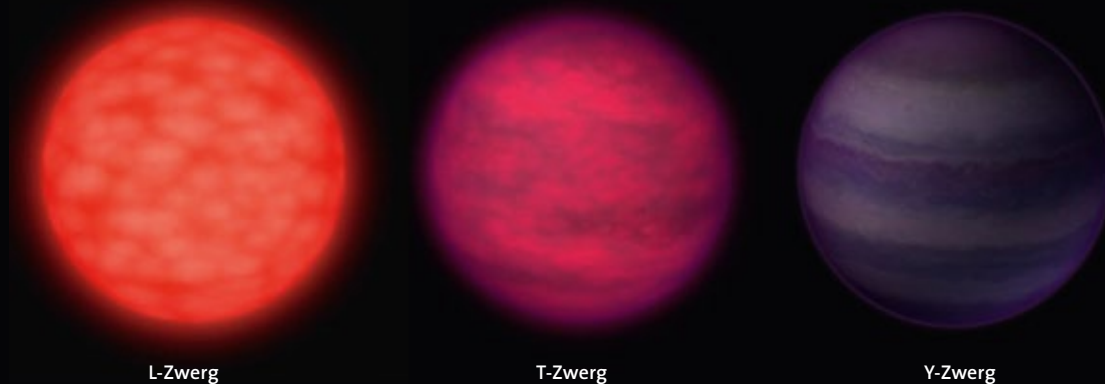
Ihre Wärmestrahlung macht sie zu lohnenden Zielen für Weltrauminfrarotteleskope wie Spitzer, Herschel oder WISE. Sie sind Gegenstand vieler Fragen: Wo liegt die Massenuntergrenze, bis zu der sich normale Sterne bilden, und was folgt daraus für ihre Entstehungsprozesse? Welche zusätzlichen Entstehungsmechanismen kommen für Braune Zwerge in Frage? Wie können die Astronomen extrasolare Planeten sicher von kühlen Sternen unterscheiden? Und welche besonderen Beobachtungschancen bieten die Objekte? Schließlich dürften sie auch in nächster Nähe zur Erde häufig vorkommen.

Die kältesten Braunen Zwerge weisen Oberflächentemperaturen von mehreren hundert Grad Celsius auf. Dies war



NASA/JPL/CALTECH/UCRA

Mit rund 25 Grad Celsius Oberflächentemperatur ist der Braune Zwerg WISE 1828+2650 (grüner Punkt in Bildmitte) der kälteste, den wir bislang kennen. Wie bei anderen Vertretern dieses Sterntyps reichte seine Masse nicht aus, um in seinem Innern die Kernfusion zu zünden. Das Infrarotbild ist farbkodiert: Rot steht für die längsten, Grün für mittlere und Blau für die kürzesten Wellenlängen.



zumindest bis vor Kurzem Stand der Dinge. Mit Hilfe des Satelliten WISE (Wide Field Infrared Explorer), der den Himmel bis zum Februar 2011 im Infrarotlicht beobachtete, konnten die Forscher die Werte jüngst noch weiter hinunterschrauben. Michael Cushing vom California Institute of Technology in Pasadena und seine Kollegen fanden sechs Exemplare, deren Photosphären nicht einmal 250 Grad Celsius heiß sind – Backofentemperatur. Den Rekord bricht aber WISE 1828+2650. Die Photosphäre des etwa 30 Lichtjahre entfernten Objekts bringt es auf gerade einmal 25 Grad, weniger, als im Innern des menschlichen Körpers herrscht. Klassische Sterne werden mit abnehmender Temperatur in die Spektralklassen O, B, A, F, G, K und M eingeteilt («oh be a fine girl kiss me», so der Merkspruch); die Sonne etwa ist ein G-Stern. Für Braune Zwerge existierten bislang lediglich die Klassen L und T. Die sechs kürzlich entdeckten Exemplare sind nun aber so kühl, dass sie der neuen Spektralklasse Y zugeordnet werden müssen, berichteten Cushing und seine Kollegen in der Fachzeitschrift »Astrophysical Journal«.

Viele der Objekte bilden sich vermutlich genau wie sonnenähnliche Sterne beim Kollaps großer Gaswolken. Das belegen unter anderem Aufnahmen von Spitzer, auf denen spanische Astronomen 2009 ein Paar Brauner Zwerge entdeckten, die noch im Entstehen begriffen sind. Bereits vier Jahre

Astronomen teilen Braune Zwerge in drei Spektralklassen ein. Die Atmosphären typischer L-Zwerge besitzen eine Temperatur von rund 1400 Grad Celsius, während T-Zwerge etwa 900 Grad warm sind. Die nun entdeckten Exemplare wurden in die neue Spektralklasse Y eingeteilt, die von etwa minus 100 bis plus 300 Grad Celsius reicht. L- und T-Zwerge besitzen tatsächlich ungefähr die Farben, in denen sie in der Illustration dargestellt sind. Der abgebildete Y-Stern wurde hingegen im Infraroten entdeckt; seine Einfärbung entspricht vermutlich nicht der Realität.

zuvor hatten Forschergruppen mehrere junge Braune Zwerge gefunden, die ähnlich wie junge Sterne von Staubscheiben umgeben sind. Die Forscher vermuten, dass sich aus ihnen einmal Miniaturplanetensysteme formen könnten – ein tausendstel Mal so groß wie unser eigenes.

Manche Zwerge senden periodisch Radiopulse aus

Einer der Zwerge besaß gerade einmal das Achtfache der Jupitermasse. Würde er einen Stern umrunden, hätte man ihn ohne Weiteres als Planet klassifiziert, zumal sich Braune Zwerge auch ähnlich wie Planeten in den Gas- und Staubscheiben junger Sterne bilden könnten. Als denkbarer Entstehungsprozess gilt zudem, dass bei der Begegnung junger Sterne Gasmassen verwirbelt werden, die sich anschließend zu Braunen Zwergen verdichten, wie Modellrechnungen kanadischer Astrophysiker bereits 2006 zeigten. Noch ist allerdings unklar, welche der gegenwärtig diskutierten Varianten vorherrscht.

Manche der Objekte senden intensive periodische Radiopulse aus, wie

US-Astronomen mit Hilfe der Radioteleskope des Very Large Array in New Mexico 2007 überraschend herausfanden. Verantwortlich dafür dürfte die Rotation des Sterns und seiner Magnetfelder sein – wie bei Pulsaren, den ausgebrannten Resten einstmal massereicher Sterne. Zuvor hatte man allerdings geglaubt, die Felder müssten extrem stark sein, um das Phänomen hervorzurufen.

In galaktischen Maßstäben sind uns die meisten der bislang gefundenen Zwerge sehr nah. Die von Cushing entdeckten Exemplare befinden sich in lediglich 9 bis 40 Lichtjahren Entfernung. Wenn sich die Messungen bestätigen, könnte WISE J1541-2250 sogar zur neuen Nummer sieben der sonnen nächsten Sterne werden. Und weil die Jagd nach den kühlen Zwergsternen derzeit sehr erfolgreich ist, könnte eine Neuentdeckung sogar dem sonnen nächsten Stern Proxima Centauri schon bald den Rang ablaufen.

Jan Hattenbach ist Physiker und freier Wissenschaftsjournalist in Aachen. Er bloggt auf www.scilog.de/kosmo/blog/himmelslichter.

Sinnvolle Selbstüberschätzung

Von sich selbst eine zu hohe Meinung zu haben, hat im Alltag oft negative Konsequenzen. Doch nach einer neuen evolutionstheoretischen Studie bringt es zumindest dann einen Vorteil, wenn der lockende Gewinn das Risiko übersteigt.

VON MATTHIJS VAN VEELEN UND MARTIN A. NOWAK

Man braucht nur Menschen mit Führerschein zu fragen: Die allermeisten glauben, sie fahren besser Auto als der Durchschnitt. Ob wir unsere geistigen Fähigkeiten, unsere Attraktivität oder die psychische Normalität unseres Verhaltens bewerten sollen – stets kommt Ähnliches heraus: Normalerweise schätzen wir uns selbst zu hoch ein. Das zeigte auch eine große amerikanische Studie zur Selbstbewertung von einer Million Oberschülern. Volle 70 Prozent der Jugendlichen hielten sich für überdurchschnittlich, dagegen nur zwei Prozent für unterdurchschnittlich. Amerikanische Collegeprofessoren toppen das noch: Ganze 94 Prozent von ihnen glauben, dass ihre Lehrqualität über dem Mittelwert liegt.

Natürlich können diese Leute mit ihrer Selbsteinschätzung nicht alle Recht haben. Trotzdem ist eine solche Einstellung keineswegs unsinnig oder gar krank. Gerade geistig völlig gesunde Personen erfreuen sich so genannter posi-

ver Illusionen. Das heißt, sie pflegen ihre eigenen Fähigkeiten ebenso wie ihren Einfluss auf andere zu überschätzen, während sie hingegen Gefahren und Risiken für sich selbst gern verkennen und als nicht so schlimm abtun. Sicherlich gibt es auch Menschen, die damit übertreiben und unmäßig große Stücke auf sich halten. Dazu gehören narzisstische Persönlichkeitsstörungen und der Größenwahn. Bei gesunder Selbstüberschätzung hingegen sieht man sich anscheinend oft nur ein klein wenig zu rosig. Wieso ein leicht überhöhtes Eigenbild so oft auftritt und weshalb es von Vorteil ist, erklären der Biologe und Politologe Dominic D. P. Johnson von der University of Edinburgh und der Sozialwissenschaftler James H. Fowler von der University of California in San Diego anhand eines Evolutionsmodells (*Nature* 477, S. 317, 15. September 2011).

Evolutionstheoretiker fragten sich schon länger, wieso die Neigung von Menschen zu einem überhöhten, somit falschen Selbstbild der natürlichen Selektion überhaupt standhält. So stark verbreitet wie diese Eigenschaft unter uns offenbar ist, muss sie wohl irgendeinen evolutionären Anpassungswert haben. Nur: Was kann gut daran sein, sich selbst so gern falsch zu beurteilen? Verführt das nicht auch zu schmerzhaften Fehlentscheidungen?

Einige Forscher vermuteten den Vorteil darin, dass auf Grund unseres selbstgewissen Auftretens auch andere von uns eine hohe Meinung gewinnen. Denn es vermag nun einmal niemand seine Mitmenschen besser von den eigenen Qualitäten zu überzeugen als derjenige, der fest an sich selbst glaubt. Ebendieser Zusammenhang sollte demnach im

Lauf der Evolution die Selbstbeurteilung hochschaukeln. Gelegentlich mögen uns dann zwar Fehler unterlaufen, doch sollte die hohe Wertschätzung, die wir erfahren, kleine Misslichkeiten aufs Ganze gesehen überwiegen.

Aber Johnson und Fowler erklären das Phänomen nun ganz anders. Ihrem Modell zufolge verhilft einem ein falsches Selbstbild sogar eher zu einer vorteilhaften Entscheidung als ein reelles. Wieso? Die beiden Forscher verwenden bei ihrer Untersuchung das Werkzeug der Spieltheorie (siehe »Stichwort«), weichen allerdings in einem wesentlichen Aspekt davon ab. Und zwar setzen sie nicht allein auf rationale oder quasirationale Entscheidungsprozesse.

Suche nach der besten Strategie

Ihr Ansatz geht wie folgt: Angenommen, es gibt eine wertvolle Ressource, und zwei Individuen können jedes für sich entscheiden, ob sie darauf Anspruch erheben. Möchten beide das begehrte Objekt haben, werden sie im einfachsten Fall darum kämpfen – ein für beide Seiten kostspieliger Einsatz, bei dem der Stärkere gewinnt. Falls nur einer die Ressource anstrebt, erhält derjenige sie natürlich ohne Kampf. Falls von vornherein keiner von ihnen einen Anspruch erhebt, gehen zwangsläufig beide leer aus.

Nun wäre es denkbar, dass jeder die Kampfstärke des anderen schon vorher ganz genau einschätzen kann. Dann wäre die beste Strategie, als Stärkerer zu kämpfen und als Schwächerer nachzugeben. Interessant wird es aber, wenn sich die Stärke des anderen nicht präzise erkennen lässt. Unter Umständen gibt jemand dann sofort klein bei, weil er

Stichwort

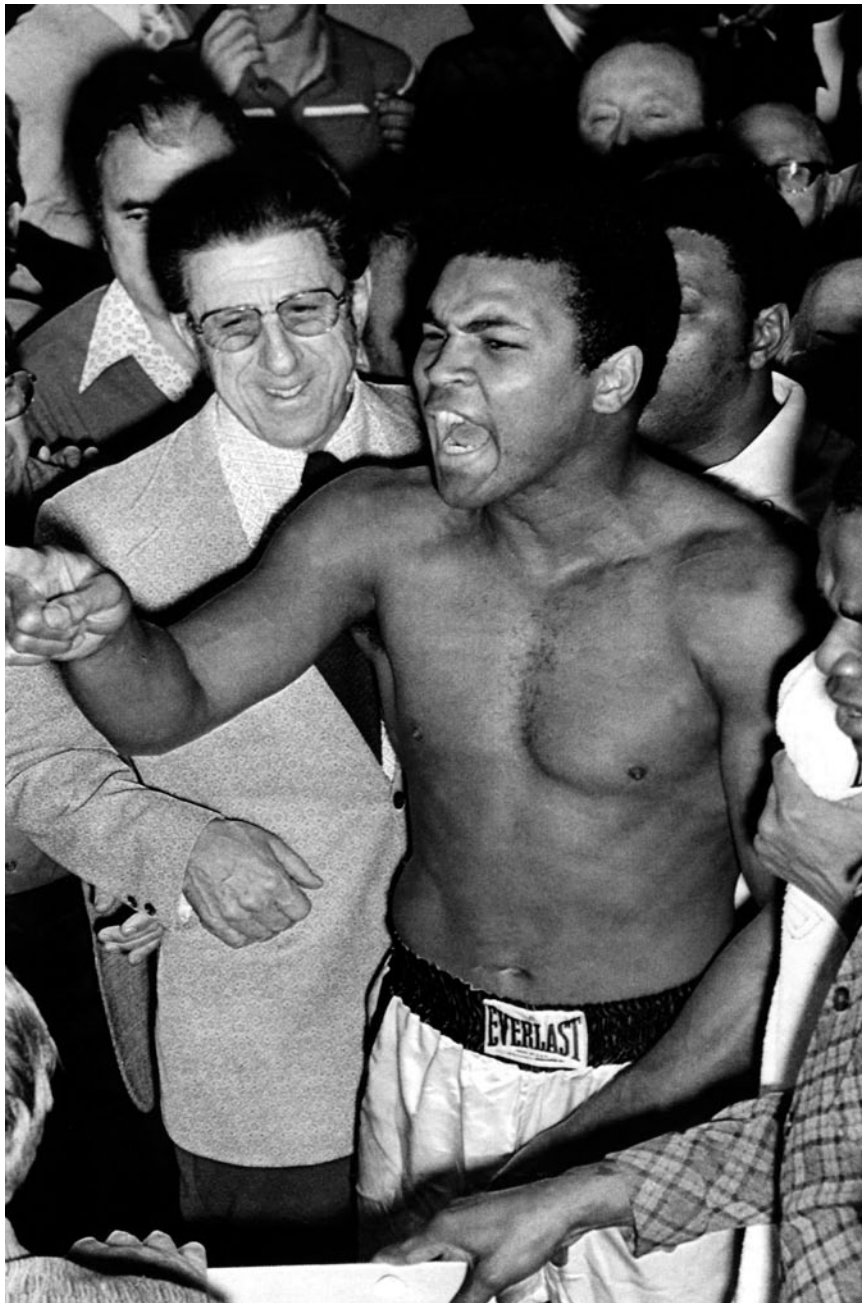
Das hier diskutierte Modell lehnt sich an die evolutionäre Spieltheorie an, die Biologen in Abwandlung der Spieltheorie der Ökonomie entwarfen. Letztere untersucht in mathematischen Modellen Hintergründe von Entscheidungsstrategien und fragt dabei insbesondere nach der dahinterstehenden Rationalität. Erstere befasst sich mit der Evolution von Verhaltensstrategien, das heißt komplexen Verhaltensabläufen, bei Tier und Mensch.

den Gegner für kräftiger hält, als dieser wirklich ist. So könnte manchmal sogar der Schwächere den Sieg davontragen.

Ökonomen entwerfen für solche Konstellationen gern Szenarien, in denen absolute Rationalität herrscht: Die Kontrahenten durchschauen ihre Situation vollkommen. Und sie kennen ebenso die Entscheidungshintergründe des Gegners. Sie wissen also auch, welche Chancen sich der andere für eine

bestimmte Situation gegen sie ausrechnet, und versuchen das bei ihrem eigenen Verhalten zu berücksichtigen.

Johnson und Fowler halten stattdessen eine Konstellation mit verkürztem, knapperem Entscheidungsweg für plausibler, bei dem Rationalität nur einen Teil ausmacht. In ihrem Modell kommt zu einer einfachen rationalen Komponente (»Kämpfe, wenn du der Stärkere bist«) ein schiefes Selbstbild



Der Boxer Cassius Clay alias Muhammad Ali machte in den 1960er und 1970er Jahren nicht nur durch Weltmeistertitel von sich reden, sondern noch mehr durch übersteigerte Selbstinzenierung und markige Sprüche.

www.klaus-tschira-preis.info

2012 **KlarText!** **Klaus Tschira Preis**
für verständliche
Wissenschaft

Wissenschaft
+ Verständlichkeit
+ Öffentlichkeit
KlarText!

Bewerben Sie sich

um KlarText!, den Klaus Tschira Preis für verständliche Wissenschaft 2012.

Die Klaus Tschira Stiftung zeichnet jährlich Wissenschaftler aus, die die Ergebnisse ihrer herausragenden Dissertation in einem allgemein verständlichen Artikel beschreiben.

Jeder Bewerber hat die Möglichkeit, am Workshop Wissenschaftskommunikation teilzunehmen.

Bewerbungsbedingungen

- Promotion 2011 in Biologie, Chemie, Informatik, Mathematik, Neurowissenschaften, Physik oder einem angrenzenden Fachgebiet
- Herausragende Forschungsergebnisse
- Ein allgemein verständlicher Textbeitrag über die eigene Forschungsarbeit
- Einsendeschluss: 29. Februar 2012

Mitmachen lohnt sich

- 5000 Euro Geldpreis pro Gewinner in jedem der sechs Fachgebiete
- Veröffentlichung der Siegerbeiträge
- Teilnahme der Gewinner an den Kommunikationstrainings der Klaus Tschira Stiftung

Ein Projekt der
Klaus Tschira Stiftung
gemeinnützige GmbH



hinzu. Dieses kann überhöht, aber auch zu bescheiden sein.

Nun hängt es vom Wert der Ressource gegenüber den Kosten eines Kampfeinsatzes ab, welches Verhalten in einer Situation am günstigsten ist: gleich klein begeben oder die Ressource wenn nötig erkämpfen. Fällt ihr Wert stärker ins Gewicht als die möglichen Einbußen, lohnt ein wenig Selbstüberschätzung durchaus. Denn dann zählt das Risiko, dass es zum Kampf kommt, eher wenig im Vergleich zu dem hohen Gewinn, der anfallen kann, wenn einem keiner die Ressource streitig macht.

Im umgekehrten Fall, wenn die Kampfkosten den Gewinn übersteigen, sollte man die eigene Stärke lieber etwas zu niedrig bewerten. Genau genommen sind die Verhaltenskonstellationen des Modells von Johnson und Fowler allerdings komplexer als hier beschrieben. Beispielsweise könnte sich in Populationen mit der Zeit ein stabiles Verhältnis von Selbstüberschätzern und Selbstunterschätzern herausbilden.

Allerdings ließe sich überhöhte Selbstachtung evolutionär auch noch anders erklären. Ein gutes Beispiel dafür ist Roulette: Wer fest daran glaubt, dass sein Einsatz irgendwann alles abräumt, der spielt immer wieder – auch wenn er ständig verliert. Doch die Gewinner sind in der Regel ebensolche Vielspieler. Wo der Gewinner alles bekommt, herrscht somit eine starke Selektion auf Selbstüberschätzung.

Theoretisch könnte die Gewinnstrategie – die hohe Kampfkosten vermeidet – im Gehirn auf zwei Weisen verankert sein. Entweder kämpfe nur, wenn du dich für stärker hältst, aber überschätze dich dabei ruhig etwas. Bei der zweiten Möglichkeit herrscht perfekte Rationalität, also komplette Einsicht in die Situation, und die Selbsteinschätzung entspricht der tatsächlichen Kampfstärke. Falls nun der Kampfausgang vorher nicht ganz sicher ist, lohnt es sich aber, auch gegen einen etwas stärker scheinenden Gegner anzutreten. Welche Möglichkeit unser Verhal-

ten besser beschreibt, müssen zukünftige Studien erweisen.

Aufschlussreich wäre herauszuarbeiten, wie die Befunde des Modells und verschiedene Alltagssituationen zusammenhängen: bei überhöhtem Selbstvertrauen im Handel; bei der Bereitschaft, übermäßig komplexe Finanzprodukte zu kaufen (angeblich Hintergrund der Finanz- und Bankenkrise); bei politischen Entscheidungen, die zu Kriegen führen. Wenn sich 94 Prozent der amerikanischen Collegeprofessoren für überdurchschnittlich gut halten, müsste bei ihnen ja genügend Selbstvertrauen herrschen, um sich an solche Fragen heranzuwagen.

Matthijs van Veelen forscht an der Universität Amsterdam, **Martin A. Nowak** ist Professor an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts).

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 477, S. 282–283, 15. September 2011

MOLEKÜLSIMULATION

Das Innenleben des Spinnenfadens

Hauchdünn und dennoch unglaublich reißfest – Spinnenseide hat erstaunliche Eigenschaften. Computersimulationen ihres inneren Aufbaus zeigen, warum.

VON FRAUKE GRÄTER

Ein Spinnennetz ist ein kleines Wunderwerk der Natur. Im Gegensatz zu anderen Materialien wie Stahl oder Kunststoff kombiniert die Spinnenseide zwei Eigenschaften, die auf den ersten Blick unvereinbar scheinen: Erstens reißt selbst ein hauchdünner Faden erst bei vergleichsweise sehr hohen Zugkräften. Zweitens kann er stark gedehnt werden, bevor er bricht – nämlich um das Zwei- oder sogar Dreifache seiner Länge, je nach Spinnen- und Seidenart.

Physikalisch gesprochen ist die Arbeit, die man beim Ziehen leistet, gleich Kraft mal Weg (hier die Ausdehnung). In einen Seidenfaden kann man also

sehr viel mechanische Arbeit hineinstecken. Diese Eigenschaft bezeichnet man in der Mechanik auch als Zähigkeit. Zum Vergleich: Stahl bricht zwar erst bei hohen Kräften, verändert dabei seine Länge aber nur wenig. Ein konventionelles Gummiband hingegen lässt sich sehr stark dehnen, reißt jedoch schon bei relativ geringer Krafteinwirkung. Übrigens kommen auch die Fäden der Seidenraupen, die zu Stoffen verwoben werden, in dieser Hinsicht nicht an die Spinnenseide heran.

Woran liegt es, dass die Seidenfäden der Spinne diese besonderen Eigenschaften besitzen? Schon seit Jahrzeh-

ten versuchen Forscher, ihr Geheimnis zu lüften. Optimal wäre es, die einzelnen Verformungen von Molekülen innerhalb des gespannten Fadens in Echtzeit verfolgen zu können. Nur lassen sich leider die Bausteine der Seidenfaser nicht so einfach voneinander trennen, um sie einzeln zu studieren. Versucht man das, verlieren sie ihre charakteristischen strukturellen und mechanischen Eigenschaften, die sie im Gesamtzusammenhang des Seidenfadens besitzen. Selbst wenn man alle diese Eiweißbausteine im Labor zusammenmischt, ist es kaum möglich, daraus einen guten Faden zu spinnen,

so wie es die Spinne schafft. Hinzu kommt, dass sich die entscheidenden Eigenschaften des Seidenfadens erst im Nanometerbereich (milliardstel Meter) finden und dadurch nur indirekt beobachten lassen, zum Beispiel mit Röntgenstreuung.

Zerstückeln im Computer

Angesichts solcher Hürden helfen Simulationen mittels Computer, wie wir sie am Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS) in der Gruppe für »Molecular Biomechanics« durchführen. Dabei können wir, anders als im Labor, die Seide in kleinste Untereinheiten zerteilen, diese quasi beliebig neu kombinieren und daraus Rückschlüsse auf die Fäden als Ganzes ziehen.

Die Fasern bestehen hauptsächlich aus zwei sehr ähnlichen Eiweißbausteinen: dem Spidroin-1 und -2. Zusammen bilden die Proteine zwei unterschiedliche Phasen, in denen aber jeweils beide Moleküle vorkommen – das lässt sich durch Röntgenstreuung an einzelnen Fasern messen. Die eine Phase ist kristallin, also hochgeordnet, und die Proteinketten sind entlang der Achse der Faser ausgerichtet. Die andere Phase erscheint stark ungeordnet mit ineinander verknäuelten Ketten, ähnlich wie eine Portion gekochter Spaghetti auf dem Teller. Zwar lassen sich mit Experimenten die Details der Phasen nur schwer erfassen, doch konnten wir ihre molekulare Struktur am Computer nachbauen.

Wir haben hierfür Modelle entwickelt, welche die genaue Anordnung der Atome dieser Strukturen zueinander aufzeigen. Nun können wir am Computer solch ein Modell unter eine hohe Zugspannung setzen und in aufwändigen Simulationen beobachten, wie es sich verformt und letztendlich bricht (*Biophys. J.* 100, S. 1298–1305, 2011). Das Ergebnis einer solchen Molekulardynamiksimulation zeigt Bild a (im Kasten rechts). Hier simulierten wir einen Seidenkristall der Spinne, aus dem ein einzelner Proteinstrang herausgezogen wird – ein Vorgang, der Kräfte von einigen Nanonewton erfordert. Diese Werte sind natürlich winzig im Vergleich zu den Kräften im Newtonbereich, mit de-

nen wir im Alltag zu tun haben. Doch für das Auseinanderziehen von anderen Proteinen braucht man laut Studien von uns und anderen Forschungsgruppen nur ein paar hundert Pikonewton, also etwa eine Größenordnung weniger. So betrachtet ist der kristalline Baustein der Seide extrem reißfest. Vermutlich ermöglicht es die besondere Struktur der kristallinen Einheiten, die Proteinketten so miteinander zu verknüpfen, dass eine Seidenfaser großen Kräften standhalten kann, ohne zu reißen.

Woher rührt dann die Fähigkeit des Fadens, sich so stark auszudehnen? Der Kristall selbst lässt sich nur um drei bis fünf Prozent dehnen, bevor er entzweibricht, trägt also nur geringfügig zur

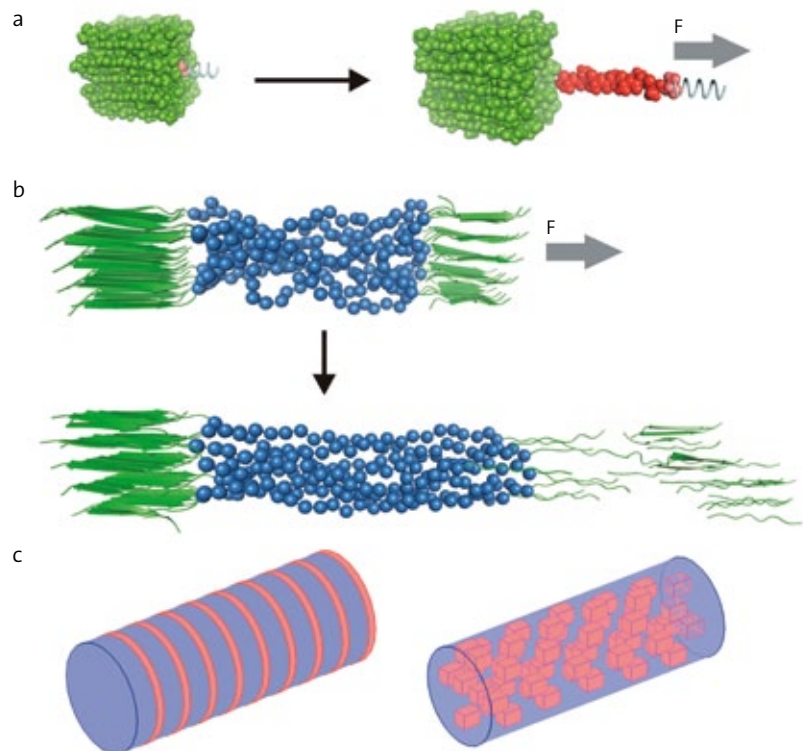
Elastizität der Seide bei. Unsere Computersimulationen zeigten, dass hierfür stattdessen die amorphe, ungeordnete Phase verantwortlich ist. Wir haben am Computer zwei Kristalle über ungeordnete Proteinketten miteinander verknüpft und der Zugspannung ausgesetzt. Die Proteinketten ließen sich dabei auf etwa die doppelte Länge strecken. Erst dann waren die Kräfte in den Kristallen so hoch, dass sie anfangen aufzubrechen (Bild b).

Ein wesentliches Geheimnis der Seidenfäden liegt also im Zusammenspiel der zwei Phasen. Aus der Simulation folgerten wir, wie die beiden zueinander angeordnet sein sollten, damit sie optimal »zusammenarbeiten«: Anstatt

Computermodell der Seidenfaser

Aus einem Seidenkristall (grün), wie er in Spinnenfäden vorkommt, wird in einer Computersimulation ein Seidenprotein (rot) herausgezogen (a). Seidenkristalle können wesentlich größeren Zugkräften standhalten als andere Proteine dieser Größe.

Die Elastizität einer Seidenfaser entsteht durch die Streckung von verknäuelten Proteinsträngen (blau) zwischen den Kristallen (grün) (b). In dem neuen Modell einer gesamten Seidenfaser (c) können die Kristalle (rosa) entweder in Scheiben angeordnet vorliegen (links) oder zufällig in der amorphen Phase (blau) verteilt sein (rechts). Ersteres führt zu einer höheren mechanischen Belastbarkeit.



FRAUKE GRÄTER

einer zufälligen Verteilung im Faden, wie sie bisher gemeinhin für Seide angenommen wurde, erweist sich eine Anordnung in Scheiben als vorteilhaft (Bild c, links). Das sorgt für eine homogene Kraftverteilung und dadurch für maximale Belastbarkeit.

Mit einer bewährten Methode aus dem Bauingenieurwesen, der Finite-Elemente-Analyse, bestätigten wir dies. Die oben beschriebenen Molekulardynamik-

simulationen sind nämlich so aufwändig, dass nur ein paar der Bausteine damit berechnet werden können – und selbst das dauert mehrere Wochen. Mit Hilfe der Finite-Elemente-Analyse konnten wir stattdessen ganze Seidenfasern simulieren. Demnach führt die parallele Anordnung der geordneten und ungeordneten Phasen in Scheiben zu höherer Stabilität. Optimal ist dabei ein kristalliner Anteil von 10 bis 40 Prozent.

Inwieweit die Natur dieses Bauprinzip in der Seide umsetzt, darüber sind sich die Forscher noch nicht einig. Doch laut unseren Simulationen sollte es angestrebt werden, wenn es darum geht, ein Material mit Eigenschaften wie denen der Seide zu entwerfen.

Frauke Gräter leitet seit 2009 die Forschungsgruppe Molecular Biomechanics am Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS).

NANOPHOTONIK

Leuchtende Quantenmagnete unterm Mikroskop

Ein Trick, der vor über zehn Jahren die Fluoreszenzmikroskopie revolutionierte, setzt bei magnetischen Quantenspeichern buchstäblich neue Maßstäbe. Die STED-Technik, mit deren Hilfe Forscher die Auflösungsgrenze im Lichtmikroskop überwinden, registriert nun auch in winzigen Störstellen von Diamanten gespeicherte Informationen.

VON MIKE BECKERS

Mehr als ein Jahrhundert lang galt in der Mikroskopie ein unumstößliches Gesetz: Die Wellenlänge des Lichts, das auf ein Untersuchungsobjekt fällt, bestimmt die erreichbare Auflösung. Nur Strukturen, die gröber sind als etwa 200 Nanometer, lassen sich im sichtbaren Licht noch unterscheiden.

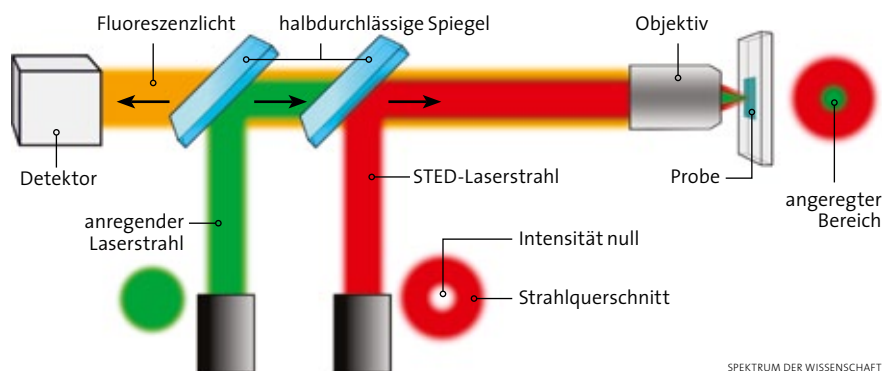
Bei kleineren dominieren Beugungseffekte – dann verschwimmt das Bild.

Diese fundamentale Einschränkung überwinden Forscher unter anderem mit der STED-Mikroskopie (stimulated emission depletion). Ihr Erfinder ist Stefan Hell, heute Direktor am Göttinger Max-Planck-Institut für biophysikali-

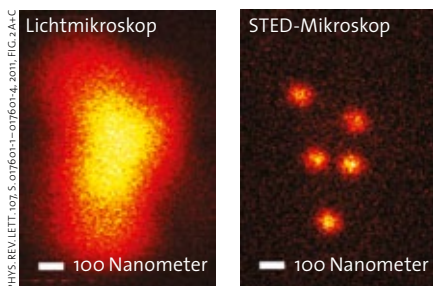
sche Chemie. Nachdem er die Idee 1994 vorgestellt hatte, demonstrierte der Physiker sein Verfahren fünf Jahre später erstmals im Experiment. Seither hat es ihm zahlreiche Preise eingebracht, und seit 2007 untersuchen Wissenschaftler Material- oder Gewebeproben mit kommerziellen STED-Mikroskopen.

Eine neue Anwendung von STED steckt indessen noch in den Kinderschuhen. Mit STED-ODMR (optical detection of magnetic resonances, optischer Nachweis magnetischer Resonanzen) übertrugen Forscher um Hell die Methode auf ein weiteres physikalisches System. Sie betrachteten die atomaren magnetischen Zustände einer Probe unter dem Lichtmikroskop – bei einer Auflösung von etwa 50 Nanometern (*Physical Review Letters* 107, S. 17601, 2011).

Die STED-ODMR-Technik analysiert hochreine Diamanten, in deren sonst perfektem Kohlenstoffgitter Unregelmäßigkeiten erzeugt wurden. An diesen so genannten Stickstofffehlstellen im Kristall sitzt an Stelle von Kohlen-



In einem STED-Mikroskop wird der Anregungsstrahl (grün) von einem ringförmigen STED-Strahl (rot) überlagert, in dessen Mitte die Intensität null beträgt. Wo er auf die Probe trifft, regt er die Moleküle sofort wieder ab und schaltet ihre Fluoreszenzfähigkeit aus. Nur die Moleküle, die sich innerhalb eines kleinen Flecks befinden, leuchten dann noch. So lassen sich feinere Details erkennen, als wenn benachbarte Moleküle ebenfalls fluoreszieren würden. Bewegt man die Probe nun schrittweise, entsteht Punkt für Punkt ein hoch aufgelöstes Bild.



Das Fluoreszenzsignal von mehreren Stickstofffehlstellen im Lichtmikroskop (links) verschwimmt, wenn ihr Abstand die durch Beugungsgesetze vorgegebene Grenze unterschreitet. Die Anzahl der Lichtquellen ist dann unmöglich zu erkennen. Die STED-mikroskopische Aufnahme (rechts) trennt hingegen fünf optische Signale.

stoff ein einzelnes Stickstoffatom; direkt daneben fehlt dem Diamantgitter ein Kohlenstoffatom (Grafik S. 21). Die Fehlstellen verhalten sich wie atomare Magneten, denn an ihnen treten frei ge-

wordene Elektronen aus den angrenzenden Atomhüllen miteinander in Wechselwirkung.

Elektronen besitzen einen quantenmechanischen Drehsinn, der ihre magnetischen Eigenschaften bestimmt. Dieser Spin kann den Wert $+\frac{1}{2}$ oder $-\frac{1}{2}$ annehmen. In einer Stickstofffehlstelle koppeln zwei solcher Elektronenspins aneinander, so dass sich die Einzelspins entweder zu null auslöschen oder zum Betrag eins addieren. Diese beiden magnetischen Ausrichtungen besitzen dann verschiedene Energien. Stickstofffehlstellen speichern also Information – genau wie die magnetischen Nullen und Einsen auf Computerfestplatten. Sie lassen sich auch zwischen null und eins umschalten. Dazu müssen die Forscher ihre Probe mit Mikrowellen bestrahlen, deren Frequenz dem Energieunterschied zwischen den Zuständen entspricht. Sie können sie aber auch mit dem Licht eines grünen Lasers anregen. Dann absorbieren die Fehl-

stellen dessen Energie und senden kurz darauf Fluoreszenzlicht größerer Wellenlänge aus, in diesem Fall rotes Licht. Weil null und eins unterschiedlich stark fluoreszieren, lässt sich der Spin der Fehlstelle nun einfach an der Lichtintensität ablesen.

Ideale Bauelemente für Quantencomputer?

Auf Grund ihrer quantenmechanischen und optischen Eigenschaften sind Stickstofffehlstellen in Diamanten schon längere Zeit heiße Anwärter auf die Rolle von Datenspeichern in zukünftigen Quantencomputern (siehe »Spintronik mit Diamant«, SdW 12/2007, S. 112). Die Spinzustände sind auch bei Raumtemperatur außergewöhnlich stabil, und ihre Lebensdauer übersteigt deutlich die Zeit, die für Rechenoperationen benötigt wird. Hinzu kommt, dass sich die Zustände über ihre Fluoreszenz auslesen lassen, die Datenübertragung also auf optischem Weg erfolgen kann.

www.spektrum.de/aboplus

Der Premiumbereich – exklusiv für Abonnenten von Spektrum der Wissenschaft



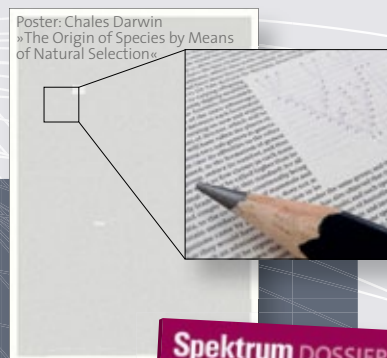
Abonnenten von **Spektrum der Wissenschaft** profitieren nicht nur von besonders günstigen Abokonditionen, exklusiv auf sie warten unter www.spektrum.de/aboplus auch eine ganze Reihe weiterer hochwertiger Inhalte und Angebote, unter anderem:

■ Alle **Spektrum der Wissenschaft**-Artikel seit 1993 im Volltext

◀ Ein Mitgliedsausweis, dessen Inhaber in zahlreichen Museen und wissenschaftlichen Einrichtungen Vergünstigungen erhält

▶ Vergünstigte Sonderhefte, kostenlose Downloads und das Produkt des Monats zum Spezialpreis

▶ Unter allen Abonnenten verlosen wir jeden Monat vier Gutscheine im Wert von € 25,- für den Science-Shop.de



Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand

www.spektrum.de/aboplus

Unwissen schadet nicht

Die Demokratie braucht Laien.

Die moderne Welt ist schrecklich kompliziert – nehmen wir nur so vertrackte Probleme wie die Eurokrise, »Stuttgart 21« oder die Endlagerung nuklearen Abfalls. In Talkshows und an runden Tischen redet man sich darüber die Köpfe heiß, und der verwirrte Zuhörer findet, dass jeder der gegensätzlichen Standpunkte etwas für sich hat. Aber am Ende muss ein Konsens herauskommen: Eurobonds ja oder nein, Kopf- oder Tiefbahnhof, Gorleben oder ein anderes Endlager.

Sicher soll es dabei demokratisch zugehen, aber je komplizierter das Problem, desto unwissender kommt einem die Mehrheit vor. Kann man wirklich diesem Heer von Laien die Entscheidung überlassen, wo doch Expertise gefragt ist? Als der vormalige griechische Premier Giorgos Andreas Papandreou sein Volk abstimmen lassen wollte, ob es einschneidende Sparauflagen für EU-Kredite gutheiße, gab es europaweites Kopfschütteln – und das Plebiszit wurde schleunigst abgeblasen. Angeblich kursierte in den Brüsseler Wandelgängen sogar der üble Scherz, am besten für Griechenland wäre eine Militärdiktatur. Im Ernst: Kann Demokratie in einer Welt funktionieren, in der nur noch ausgesuchte Experten, sei es für Finanzmärkte, Schienenverkehr oder Endlagergeologie, Bescheid wissen?

Bevor wir die Flinte der Demokratie ins Korn werfen, sollten wir auf Iain D. Couzin hören. Mit seinem Team erforscht er seit Jahren an der Princeton University kollektives Tierverhalten. Insekten, Vögel und Fische dienen ihm als Modelle für die Konsensbildung in sozialen Gruppen. Zur Klärung einzelner Fragen zieht er auch Computersimulationen heran (*Science* 334, S. 1578–1580, 2011).

Angenommen, eine Population muss sich zwischen zwei Optionen A und B entscheiden. Die Mitglieder werden zufällig von den Nachbarn beeinflusst, deren Ansicht zu übernehmen, leisten aber einen gewissen Widerstand, wenn sie die einmal gefasste Meinung ändern sollen. In der Population gibt es drei unterschiedliche Typen von Individuen. Zwei davon favorisieren jeweils von vornherein sehr stark eine der beiden Ansichten. Das sind sozusagen die »Experten«. Es gibt aber noch eine dritte Sorte von Teilnehmern: Die haben keine Präferenz und sind leicht beeinflussbar; sie spielen die »uninformierten Laien«.

Wie sich sowohl im Computermodell als auch in Tierexperimenten mit schwarmbildenden Süßwasserfischen zeigte, sorgen erst die »Laien« für einen demokratischen Meinungswechsel. Falls es nämlich nichts als kontroverse Experten gibt, setzt sich einfach die zahlen- oder meinungsstärkere Fraktion durch: Sie erzwingt die Entscheidung in ihrem Sinn – selbst wenn dies der Population schadet.

Im Tierversuch wurden die Fische mehrheitlich darauf konditioniert, ein gelbes Ziel anzusteuern, wo sie Futter erwarteten – das sich nun aber am anderen, blauen Zielort befand. Im Extremfall kompletter Konditionierung wäre die gesamte Population verhungert. Erst durch Beimengung einer Teilgruppe von unkonditionierten – »unentschlossenen« – Fischen bekehrte sich der Schwarm ziemlich rasch dazu, den Weg zum neuen Futter spendenden Ziel zu nehmen.

Wie das Experiment demonstriert, spielen uninformierte Individuen eine wichtige Rolle bei der »richtigen«, realitätsgerechten Konsensbildung. Indem der Laie die Angelegenheit ohne vorgefasste Meinung bewertet, ermöglicht er ein sachgerechtes Ergebnis, das auf demokratischem Weg zu Stande kommt. Es ist also durchaus zielführend, die Entscheidung über ein kompliziertes Problem – nach Anhörung von Pro und Kontra – einer Bevölkerung zu überlassen, die keineswegs nur aus Experten besteht.

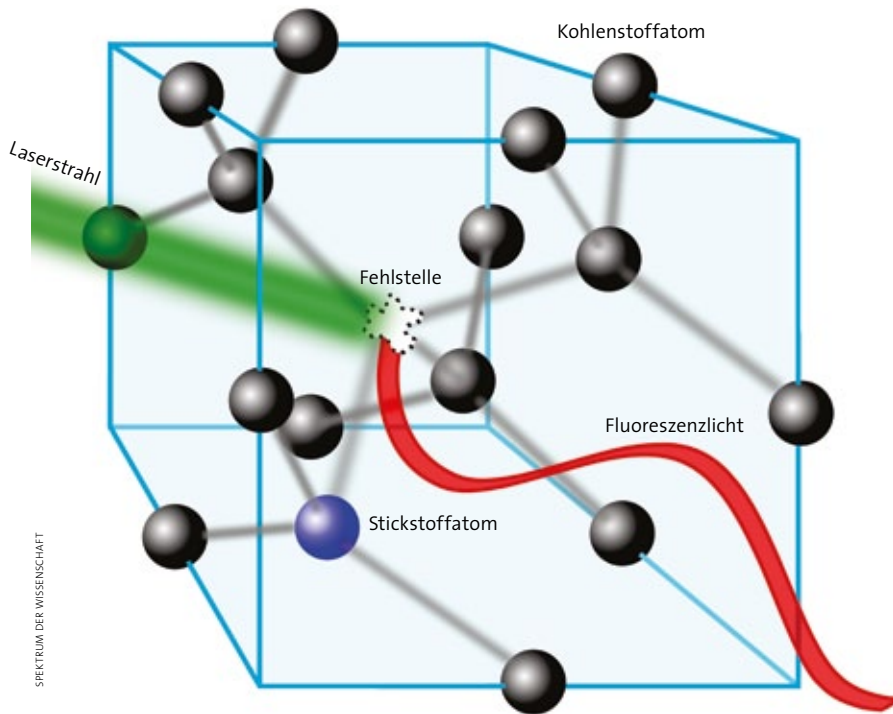


Michael Springer

Doch wenn die Information einer Fehlstelle sich über das Aussenden von Licht verrät, unterliegt auch dieses Signal der Beugungsgrenze. Damit wäre die Dichte der Daten, die sich mit einem Mikroskop aus dem Kristall auslesen lassen, durch die Wellenlänge des ausgesandten Lichts begrenzt. Hier kommt der Trick ins Spiel, mit dem Stefan Hell bereits in den 1990er Jahren die Auflösungsgrenze überwand. Bestrahlt man Moleküle mit einem Laser, um sie zum Fluoreszieren anzuregen, ist die leuchtende Fläche anschließend mindestens so groß wie der Fokus des Lasers. Auch dieser lässt sich infolge von Beugungseffekten nicht beliebig verkleinern.

Doch Hell richtete einen zusätzlichen ringförmigen Laserstrahl – wegen seiner Form Donutstrahl genannt – auf die Probe. Dieser zwingt die angeregten Moleküle zu so genannter stimulierter Emission: Sie senden also Photonen entsprechend der Frequenzen aus dem Donutstrahl aus. Damit haben sie ihre Energie verloren und sind gewissermaßen ausgeschaltet. Nur auf einem wenige zehn Nanometer großen Fleck im Zentrum des Donutstrahls, wo dessen Intensität null ist, bringt der anregende Laserstrahl den Farbstoff tatsächlich zum Fluoreszieren (Grafik S. 18). Indem Hell und sein Team die Probe Schritt für Schritt durch den Fokus der einander überlagernden Laserstrahlen bewegten, ließen sie Punkt für Punkt ein mikroskopisches Bild entstehen.

Bereits 2010 hatte eine Gruppe internationaler Forscher, darunter Hell selbst, ein ähnliches Prinzip an Stickstofffehlstellen demonstriert (*Nature Physics* 6, S. 912, 2010). Es arbeitet ebenfalls mit einem Donutstrahl, ist aber kein STED-Verfahren im engeren Sinn, weil die stimulierte Emission dabei keine Rolle spielt. Die Forscher unterschieden benachbarte Stickstofffehlstellen anhand der verschieden stark fluoreszierenden Spinzustände null und eins. Unter Federführung des Physikers Peter Maurer, Doktorand an der Harvard University in Boston, richteten sie mit Laser- und Mikrowellenstrahlung zunächst alle Stickstofffehlstellen in den Zustand eins aus. Anschließend ver-



So wird ein Diamant zum leuchtenden Datenspeicher: An künstlich erzeugten Stickstofffehlstellen in seinem Gitter aus Kohlenstoffatomen sitzt Stickstoff (blau) an Stelle eines Kohlenstoffatoms (schwarz); daneben fehlt ein Kohlenstoffatom. Diese Fehlstelle absorbiert grünes Laserlicht und fluoresziert daraufhin rot. Je nach Gesamts핀 (nicht abgebildet) der Fehlstelle ist das Fluoreszenzleuchten unterschiedlich hell.

setzten sie mit einem Donutstrahl alle Spins – außer im Zentrum des Strahls – in den Zustand null.

Weil der Zustand null um 30 Prozent heller als der Zustand eins leuchtet, erhielten die Forscher immer dann ein anderes Fluoreszenzsignal aus dem bestrahlten Bereich, wenn das Zentrum des Donutstrahls auf eine Stickstofffehlstelle traf. Durch viele Messungen entlang der Probe unterschieden die Forscher auf diese Weise zwei benachbarte Stickstofffehlstellen, die nur 150 Nanometer voneinander entfernt lagen.

Methodische Unzulänglichkeiten

Die Methode kämpft allerdings mit Unzulänglichkeiten. »Zwischen den An- und Aus-Zuständen herrscht kein absoluter Hell-dunkel-Kontrast wie zwischen 100 und 0 Prozent, sondern lediglich einer zwischen 100 und 70 Prozent«, erläutert Stefan Hell. Liegen die Stickstofffehlstellen sehr dicht beieinander, so der Physiker, lasse sich das Signal daher nur durch sehr lange Messungen klar identifizieren. Zudem müsse man außer dem Laserlicht auch Mikrowellen einstrahlen und das Resonanzverhalten der Spinzustände kennen, um zwischen ihnen umzuschalten.

Darum stellten Dominik Wildanger aus Göttingen und Jeronimo Maze aus

Chile – Maze war schon 2010 mit an Bord – gemeinsam mit Hell 2011 eine neue Variante des Verfahrens zur Vermessung und scharfen Trennung von eng benachbarten Fehlstellen vor. Sie kommt ohne Mikrowellen aus und beruht nur auf optischen Prinzipien: Mit einem STED-Strahl zwangen die Forscher alle Spinzustände außerhalb des Strahlzentrums zur stimulierten Emission. So fielen die Fehlstellen in den dunklen Grundzustand. Dort hielt sie der STED-Strahl auch in der Folge fest, während der anregende Laser nur noch die Fehlstelle im Zentrum aufleuchten ließ.

Mit diesem absoluten Hell-dunkel-Kontrast erreichten sie nicht nur eine beeindruckende Auflösung von etwa 50 Nanometern (siehe Bild S. 19). Auch die Messdauer verringerte sich um mehrere Größenordnungen. Das einzige Problem: Der Laserstrahl muss sehr intensiv sein, um die Moleküle effektiv genug am Fluoreszieren zu hindern. Die 2010 vorgestellte Methode kommt hingegen mit einem schwachen Donutlaser aus; schließlich schaltet sie nur zwischen eins und null um und unterdrückt nicht die Fluoreszenz. Doch dieser Vorteil hebe die Nachteile im Vergleich zu STED nicht auf, so Hell. Mit einem nochmals stärkeren STED-Laser wären,

so betonen die Autoren in ihrer Veröffentlichung, sogar Strukturen im Bereich einzelner Nanometer zugänglich. Denn dann ließe sich das Loch in der Mitte des Donutstrahls, in dem Fluoreszenz erlaubt ist, weiter verkleinern.

Für zukünftige Anwendungen ist aber nicht nur die hohe Auflösung und Geschwindigkeit der STED-ODMR-Technik entscheidend, sondern auch ihre Eigenschaft, den ursprünglichen Zustand der Spins zu erhalten. Andernfalls würden die Informationen eines diamantenen Datenspeichers während der Messung verloren gehen. Tatsächlich, so zeigten Experimente, bleibt die Ausrichtung der Spins unter dem STED-Strahl erhalten – zumindest wenn die Intensität des Lasers einen Wert nicht überschreitet, der einer Auflösung von etwa 100 Nanometern entspricht. Bei höherer Intensität nehmen aber immer mehr Spins einen Energiezustand ein, aus dem sie nicht ohne Informationsverlust zurückkehren können.

Im Prinzip scheint es jedoch möglich, dass Computer eines Tages tatsächlich die magnetischen Informationen einzelner, dicht gepackter Kristalldefekte auslesen und optisch übertragen. Von der Elektronik, die auf der elektrischen Ladung von Elektronen beruht, wäre damit ein weiterer Schritt in Richtung der Spintronik erfolgt, die auf dem Spin der Teilchen basiert. Dazu bräuchte es nicht einmal Diamanten. Für das Verfahren kommen den Göttinger Forschern zufolge alle Materialien in Frage, in denen leuchtende Spinzustände existieren.

Mike Beckers ist Diplomphysiker und Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.