

Dunkle Materie in der Milchstraße gefunden – oder doch nicht?

Die Milchstraße wirbelt zu schnell, das wollen Wissenschaftler nun bestätigt haben. Doch ihre Arbeit erntet Kritik. Und die Behauptung, sie beweise die Existenz der Dunklen Materie in unserer Galaxie, ist vorschnell.

von Jan Hattenbach

Auch unsere unmittelbare kosmische Umgebung soll große Mengen Dunkler Materie enthalten – das jedenfalls berichteten Anfang Februar Fabio Iocco vom Institut für theoretische Physik der Universität São Paulo, Miguel Pato, tätig an der Technischen Universität München und der Universität Stockholm, sowie Gianfranco Bertone von der Universität Amsterdam (*Nature Physics* 11, S. 245–248, 2015). Für die Mehrzahl der Astrophysiker wäre das keine überraschende Erkenntnis. Ohne die Dunkle Materie läuft nichts im All. Sie bestimmt das Wachstum und die Entwicklung der Galaxien, ist zentraler Bestandteil im Standardmodell der Kosmologen. Doch obwohl der mysteriöse Stoff, aus dem sich immerhin rund 80 Prozent der Masse des Universums zusammensetzen sollen, für viele eine ausgemachte Sache zu sein scheint, ist seine Existenz nach wie

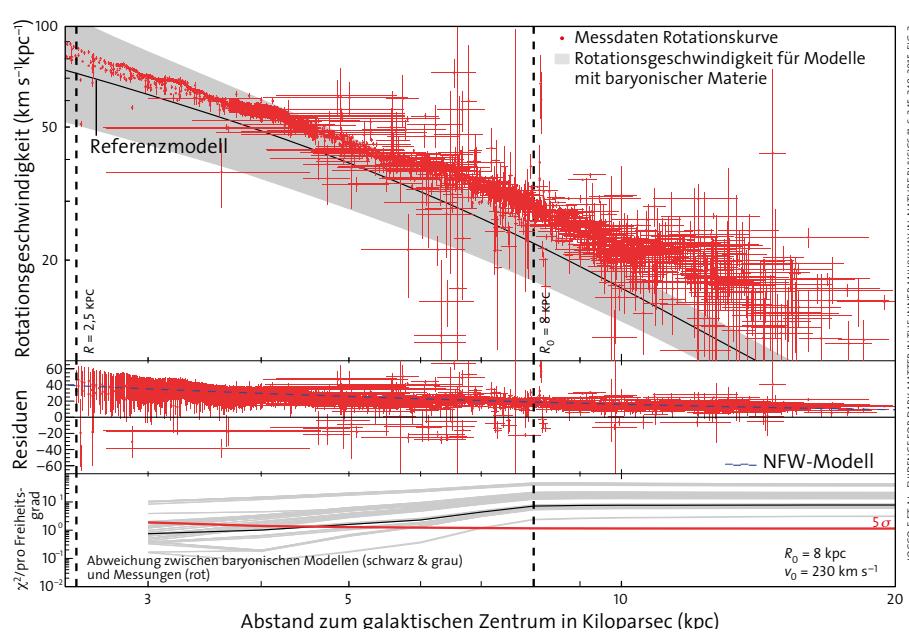
vor eine Hypothese, die ihrer Bestätigung harrt. Kein Experiment konnte bisher ein Dunkle-Materie-Teilchen zweifelsfrei nachweisen. Tatsache ist: Die baryonische, also uns in Form von Atomen und freien Elementarteilchen vertraute Materie reicht bei Weitem nicht aus, um die Gravitationskräfte in Galaxien zu erklären.

Auch nicht in unserer Milchstraße. Um das herauszufinden, trugen die drei Wissenschaftler Daten der Bewegung von Sternen und Gaswolken um das Milchstraßenzentrum zusammen und erstellten daraus die Rotationskurve unserer Galaxis (siehe die beiden Bilder). Beim Vergleich dieser gemessenen Kurve mit theoretisch berechneten Rotationskurven, zu denen allein die in der Milchstraße verteilte baryonische Materie die Gravitation beisteuert, stellten sie fest: Keines der baryonischen Modelle passt – auch in der Gal-

axis wirbelt die Materie schneller, als diese erklären könnten.

Die Forscher wandten damit eine bewährte Untersuchungsmethode auf die Milchstraße an, die in den 1970er Jahren die Idee der Dunklen Materie erst hoffähig machte. Damals hatte die amerikanische Astronomin Vera Rubin erkannt, dass sich praktisch alle fernen Spiralgalaxien schneller drehen, als dies durch ihre sichtbare Materie zu erklären ist. Dieses Rotationskurvenproblem, in den Jahrzehnten danach vielfach bestätigt, dient seither als Kronzeuge für die Existenz einer dunklen – weil unsichtbaren – Materiekomponente, die für die zusätzliche Beschleunigung der Galaxien verantwortlich ist. Die Alternative, ein modifiziertes Gravitationsgesetz (bekannt unter dem Sammelbegriff »modified Newtonian dynamics«, kurz MOND), hat in der Wissenschaftergemeinde nur wenige Fürsprecher.

Die Grafik zeigt die Abweichung der gemessenen Rotationsdaten (rot, mit Fehlerbalken) von der Voraussage der einsteinschen Gravitation in Verbindung mit der Verteilung der baryonischen Materie (grauer Bereich). Die Messwerte beginnen ab einem Abstand von etwa 6 Kiloparsec (20 000 Lichtjahr) zum galaktischen Zentrum von den Vorhersagen abzuweichen – die Materie dreht sich schneller, als durch gewöhnliche Materie allein zu erklären ist. Ein aus numerischen Simulationen stammendes Dunkle-Materie-Profil (Navarro-Frenk-White, NFW) ist als blaue gestrichelte Linie den Residuen (Differenz zu Referenzmodell) überlagert und scheint den Messwerten zu folgen. Eine mathematische Ausgleichsrechnung erfolgte jedoch nicht.



Anders als ferne Galaxien sehen Astronomen die Milchstraße von innen heraus. Sowohl ihre Kenntnis der Materieverteilung als auch der Rotationskurve unserer Galaxie sind daher bisher mit großen Unsicherheiten behaftet – es ist schließlich auch einfacher, einen Stadtplan anhand von Luftbildern zu zeichnen als von einem Zimmerfenster aus. Iocco und seine Kollegen vollbrachten nun eine Fleißarbeit: Wie die Teile eines Puzzlespiels fügten sie historische und neue Datensätze, die in den vergangenen Jahren verfügbar geworden waren, zusammen und leiteten daraus eine Rotationskurve ab, die erstmals auch die Bereiche der inneren Galaxie abbildet.

Doch belegt ihre Studie wirklich die Existenz der Dunklen Materie, wie die Autoren behaupten? Und bezieht sie sich tatsächlich auf das »Herz« oder den »Kern« der Milchstraße, wie in vielen Medienberichten zu lesen war?

Eine Reihe von Forschern, darunter Vertreter der MOND-Hypothese, bemängeln die in der Fachzeitschrift »Nature Physics« veröffentlichte Arbeit: Ihr Resultat sei weder neu noch auf methodisch einwandfreie Weise zu Stande gekommen, schreiben die Kritiker um Stacy McGaugh von der Case Western Reserve University im US-Bundesstaat Ohio in einem kurzen, polemischen

Aufsatz, der auf dem Preprint-Server ArXiv abrufbar ist. Man könne nicht einfach unterschiedlichste Datensätze kombinieren. Zudem sei die »innere Galaxie« überhaupt nicht untersucht worden – wobei dieser Begriff in der medialen Berichterstattung weiter zugespitzt wurde. So sprach eine Pressemitteilung der Technischen Universität München sogar von »dunkler Materie im Herzen der Milchstraße«.

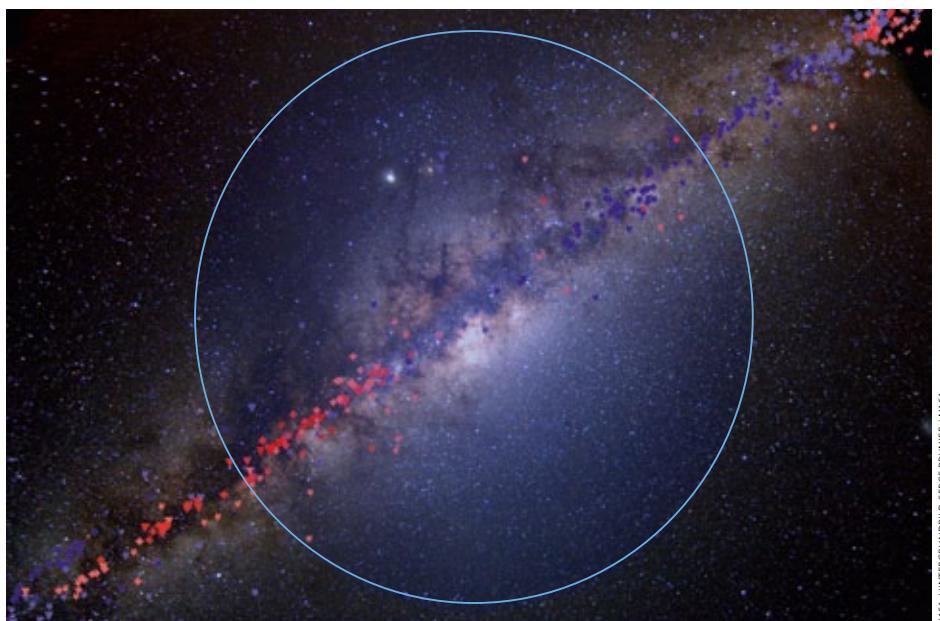
Eine Frage der Definition

Das lieferte zwar griffige Schlagzeilen, führt jedoch in die Irre. Denn eine in diesem Fall nahe liegende Interpretation für das »Herz« der Galaxie (ein wissenschaftlich nicht definierter Begriff) wäre zum Beispiel der zentrale, etwa 20000 Lichtjahre durchmessende »Milchstraßenbauch«, eine sphärische Verdichtung aus vor allem älteren Sternen. Diesen Bereich betrachteten die Forscher in ihrer Untersuchung in der Tat nicht, liefern allerdings auch einen plausiblen Grund dafür. Hier dominiert nämlich in jedem Fall die baryonische Materie. Stattdessen definierten Iocco und seine Kollegen die Bahn der Sonne um das Milchstraßenzentrum als Grenze der »inneren Milchstraße« – diese umfasst einen Raumbereich von rund 56000 Lichtjahren Durchmesser. Das ist gut die Hälfte der etwa 120000 Lichtjahre

durchmessenden galaktischen Scheibe. Es überrascht also nicht, dass die Autoren selbst nicht von »Herz« oder »Kern« sprechen.

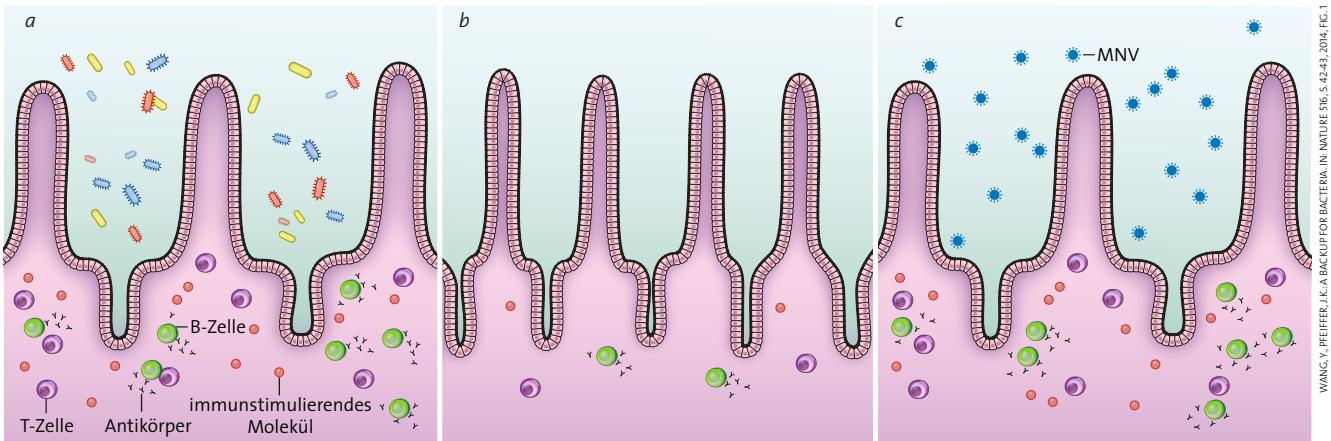
In diesem Bereich, genauer ab einem Zentrumsabstand von 20000 Lichtjahren, zeigt sich die erwähnte Abweichung der Rotationskurve – und damit in einem Bereich, in dem sich unser Sonnensystem befindet. Das aber sei Literaturwissen, schreiben McGaugh und seine Mitstreiter. Es sei lange bekannt, dass die baryonische Materie allein nicht für die gesamte auf die Sonne wirkende Gravitationskraft verantwortlich sein könnte – zumindest nach den derzeit bekannten Gravitationsgesetzen. Auch James Binney von der University of Oxford, Experte für die Dynamik und Modellierung von Galaxien und an McGauchs Gegenrede nicht beteiligt, teilt diese Kritik: »(Iocco et al.) tragen nichts zum Kenntnisstand der Rotationskurve, der Struktur der galaktischen Scheibe oder des galaktischen Halos bei«, so Binney. »Es ist absurd, dass ihre Arbeit zur Veröffentlichung akzeptiert wurde.«

Den Nachweis eines handwerklichen Fehlers liefern die Kritiker allerdings nicht. Auch den Vorwurf, ihr Ergebnis bringe keine neuen Erkenntnisse, weisen Iocco und sein Team in einer Erwiderung zurück: Ihre Studie unterschei-



Eine Vielzahl einzelner Messpunkte diente dazu, die bislang vollständigste Rotationskurve der Milchstraße zusammenzustellen. Die Punkte sind hier einer optischen Aufnahme der inneren Milchstraße überlagert: Sterne, Sternhaufen und Gaswolken, beobachtet in unterschiedlichen Wellenlängen. Blaue Punkte nähern sich der Sonne, rote entfernen sich von ihr. Der Bereich im blauen Kreis symbolisiert die Verteilung von Dunkler Materie, wie die Autoren sie sie anhand ihrer Arbeit vermuten.

NASA/HINTERGRUND: SERGE BRUNIER / NASA



WANG Y, PFEIFFER L-K, A BACKUP FOR BACTERIA IN NATURE 516 S. 424-3, 2014, FIG. 1

Im Darm normaler Mäuse findet sich eine vielfältige Population von Mikroorganismen (links). Dazu gehören Bakterien, welche die Gewebsarchitektur aufrechterhalten und die Entwicklung von Lymphozyten (T- und B-Zellen) vorantreiben. Letztere produzieren Antikörper und andere Moleküle, die das Immunsystem stimulieren. Mäuse ohne Mikrobiom haben einen veränderten Darmauf-

bau, zum Beispiel dünnerne Zotten sowie eine eingeschränkte Lymphozytentwicklung (Mitte). Dadurch sind sie anfälliger für Verletzungen und bakterielle Erreger. Eine ähnliche Situation tritt bei Mäusen auf, die mit Antibiotika behandelt wurden. Die Infektion solcher Tiere mit dem Mäuse-Norovirus (MNV) kann die korrekte Struktur und Immunfunktion des Darms wiederherstellen (rechts).

Die Gesamtheit der im Darm vorkommenden Viren – das intestinale Virom – umfasst solche, die Bakterien infizieren (Bakteriophagen), Archaeaviren, Pflanzenviren und Säugerviren. Bakteriophagen gibt es reichlich, während sich Säugerviren nur gelegentlich nachweisen lassen. Letztere umfassen pathogene Viren, die nach Ausheilen der Krankheit im Körper verbleiben; harmlose Arten, die oft auch bei gesunden Individuen vorkommen; sowie bislang nicht genauer charakterisierte, deren Nukleinsäuresequenzen mit jener bekannter Viren nur wenig übereinstimmen.

»Keimfreie« Mäuse

Ein recht verbreitetes Mitglied des intestinalen Mäusevioms ist das Mäuse-Norovirus (MNV), von dem mehrere Stämme in Tierforschungseinrichtungen entdeckt wurden. Es ruft in Nagern mit einem funktionierenden Immunsystem im Allgemeinen keine Symptome hervor, wohingegen einige immungeschwächte Mäuse durch es erkranken. Die Forscher um Kernbauer untersuchten anhand von drei repräsentativen MNV-Stämmen, ob sich die Homöostase des Verdauungstrakts durch Viren beeinflussen lässt. Dazu verwendeten sie »keimfreie« Mäuse,

denen das natürliche Mikrobiom fehlt. Der Mangel an nützlichen Bakterien führt zu Veränderungen des Darms und einer fehlerhaften Entwicklung von Lymphozyten, einer Gruppe wichtiger Immunzellen. Mit Antibiotika behandelte Mäuse zeigen ebenfalls solche Anomalien. Kernbauer und ihre Kollegen wiesen nach, dass eine Infektion mit MNV viele dieser Defekte beheben konnte (siehe Grafik).

Zum Beispiel erlangten die ungewöhnlich dünnen Zotten (Ausstülpungen der Schleimhaut) ihre normale Dicke zurück. Die Paneth-Zellen der Darmwand produzierten wieder die übliche Menge an Granula mit antimikrobiellen Stoffen. Zudem normalisierte sich die Anzahl an CD4- und CD8-positiven T-Zellen (zwei Lymphozytentypen), deren Produktion immunstimulierender Moleküle, die Menge an Antikörpern sowie die Population angeborener lymphoider Zellen, einer weiteren Klasse intestinaler Immunzellen. So konnte ein einziger Virustyp viele Beeinträchtigungen beseitigen, die durch das Fehlen von Bakterien in keimfreien und antibiotikabehandelten Mäusen entstanden.

Dieses Virus scheint also einige Aufgaben des Mikrobioms zu ersetzen. Aber können dann virale Infektionen

keimfreien Mäusen auch dabei helfen, Krankheiten, Verletzungen oder Infektionen mit pathogenen Bakterien zu bekämpfen? Um das zu testen, hat das Team um Kernbauer normale und mit Antibiotika behandelte Mäuse mit einer den Darm schädigenden Chemikalie behandelt und untersucht, ob sich die Anzahl überlebender Tiere durch eine MNV-Infektion ändert. Ergebnis: Durch die Chemikalie starben mehr antibiotikabehandelte als herkömmliche Nager, jedoch verbesserte eine MNV-Infektion das Überleben Ersterer. Ebenso war eine Infektion mit krankheitserregenden Bakterien nach Antibiotikabehandlung schädlicher als ohne, aber eine virale Infektion minderte wiederum die Symptome dieser Mäuse. Somit kann eine MNV-Infektion das Mikrobiom funktionell ersetzen und den Gesundheitszustand der Tiere verbessern.

Zwar werden intestinale Säugerviren generell als schädlich für den Wirt angesehen, doch haben bereits frühere Studien einen positiven Effekt viraler Infektionen in anderem Zusammenhang nachgewiesen. Zum Beispiel können Herpesviren bakterielle Infektionen unterdrücken, und Retroviren waren an der Evolution der Plazenta beteiligt. Weitere nichtpathogene Viren im Verdauungstrakt dürften in »kom-

mensalen« Gemeinschaften vorkommen, in denen sich das Virus vermehrt, ohne den Wirt zu schädigen, oder sogar in mutualistischen Verbindungen, von denen beide – Virus und Wirt – profitieren. Zukünftige Untersuchungen müssen ermitteln, wie häufig und dauerhaft diese Viren im Mikrobiom zu finden sind, in welchen Säugetieren sie vorkommen und was sie bewirken.

Weiterhin offen bleibt die Frage, ob intestinale Säugerviren dem Wirt auch im Rahmen einer normalen Darmflora nützen. Kernbauers Studie untersuchte den positiven Effekt von MNV an Mäusen, denen ein Mikrobiom fehlt oder die mit mehreren Antibiotika behandelt wurden. Vielleicht würde der Vorteil eines intakten Mikrobioms den Nutzen einer therapeutischen Virus-

infektion überdecken. Bereits bekannt ist jedoch, dass ein bestimmter darin vorkommender Bakterientyp (»segmented filamentous bacteria«) Entzündungsreaktionen fördert. Ähnlich spezifische Effekte könnten daher auch gewisse intestinale Viren hervorrufen, sogar in einem gesunden Wirt mit einem normalen Mikrobiom. In der Tat beobachtete das Team um Kernbauer, dass die drei eng verwandten MNV-Stämme leicht unterschiedliche Reaktionen in den keimfreien Mäusen auslösten – also sehr spezifisch wirkten.

Könnten intestinale Säugerviren am Ende vielleicht als Probiotika nützlich sein? Beim Menschen können Darmentzündungen auf den Gebrauch von Antibiotika, genetische Anlagen und andere Faktoren zurückgehen. In man-

chen Fällen heilen Fäkaltransplantationen eines gesunden Spenders – im Prinzip eine Übertragung eines intakten intestinalen Mikrobioms – solche Krankheiten. Vielleicht könnten bestimmte Darmviren ebenfalls Symptome lindern. Zudem beruht der Nutzen von Fäkaltransplantationen möglicherweise auf Viren innerhalb der Spenderproben. Zukünftige Studien des intestinalen Vioms sollten Antworten auf diese Fragen liefern.

Yao Wang und **Julie K. Pfeiffer** forschen am Department of Microbiology der University of Texas Southwestern Medical Center in Dallas.

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 516, S. 42–43, 4. Dezember 2014

MATHEMATIK

Abelpreis für John Nash und Louis Nirenberg

Die Norwegische Akademie der Wissenschaften vergibt den mit einer knappen Million Euro dotierten Preis an die beiden Mathematiker »für ihre herausragenden und bahnbrechenden Beiträge zur Theorie der nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen und ihre Anwendungen in der geometrischen Analysis«.

von CHRISTOPH PÖPPE

Abelpreis für John Nash? Das mag auf den ersten Blick aussehen wie ein 20 Jahre alter Druckfehler. Nash hat 1994, gemeinsam mit Reinhard Selten und John Harsanyi, den Wirtschaftsnobelpreis erhalten (Spektrum der Wissenschaft 12/1994, S. 25–33), und das nach ihm benannte Nash-Gleichgewicht ist mittlerweile ein zentrales Konzept der Spieltheorie. Sein tragisches Schicksal ist durch das Buch »A Beautiful Mind« von Sylvia Nasar (Spektrum der Wissenschaft 4/2000, S. 106–107) und vor allem durch den gleichnamigen Film einem breiten Publikum bekannt geworden: Nash erkrankte 1959 an Schizophrenie und verbrachte 30 Jahre in geistiger Umnachtung, bis er Anfang der 1990er Jahre wie durch ein Wunder wieder daraus erwachte.

Es ist aber kein Druckfehler. Nash ist in erster Linie Mathematiker und hat selbst seine spieltheoretischen Arbeiten stets als Nebensache angesehen. Eigentlich befasste er sich mit partiellen Differentialgleichungen.

Ein Genie – auch nach den Maßstäben des Courant Institute

Dasselbe Arbeitsgebiet hat auch sein Mitpreisträger Louis Nirenberg; aber kurioserweise haben die beiden nie eine gemeinsame Arbeit veröffentlicht. Immerhin hatten sie ungefähr ein Jahr lang engen Kontakt an der New York University.

Nirenberg hatte 1945 dort nur vorgesprochen, um sich für ein Masterstudium zu bewerben. Bei den Professoren Richard Courant und Kurt Friedrichs

hinterließ er jedoch einen so nachhaltigen Eindruck, dass sie ihm auf der Stelle einen Assistentenjob anboten.

Nashs Karriere hatte bereits einen steilen Aufschwung genommen, als er im akademischen Jahr 1956/1957 in New York war – inoffiziell. Eigentlich war er Professor am MIT und hatte für ein Freijahr (»sabbatical«) eine Stelle in Princeton. Aber wie Nirenberg in einem Interview erzählte, »hing er einen großen Teil der Zeit am Institut herum«, weil seine Freundin und spätere Ehefrau Alicia in New York lebte.

Während Nashs eindrucksvolle Karriere durch seine Erkrankung plötzlich abbrach, stieg Nirenberg zu einer zentralen Figur des Instituts auf, das unter dem Namen Courant Institute of Mathematical Sciences weltberühmt wur-

kleiner Molekülbausteine bestehen: den so genannten Monomeren. In der Natur kommen sie in zahlreichen Varianten vor, etwa als Kautschuk, Insektenpanzer oder Spinnenfäden. Die Monomere sind über stabile chemische Bindungen miteinander verknüpft. Dies verleiht dem Material Festigkeit und Flexibilität. Da die verschiedensten Moleküle als Kettenglieder dienen können, ergibt sich eine enorme Vielfalt an Strukturen. Polymere sind schon seit Langem eine wichtige Substanzklasse und spielen als Kunststoffe in unserem Alltag eine bedeutende Rolle. Doch erst die Methoden des molekularen Designs ermöglichen die Herstellung intelligenter Materialien, die in gewünschter Weise auf veränderte Umweltbedingungen reagieren.

Wir selbst entwickeln so genannte thermoresponsive Polymere, die auf Wärme ansprechen. Sie bestehen aus Monomeren, deren Eigenschaften sich ändern, wenn die Temperatur der Lösung einen bestimmten Schwellenwert überschreitet. Dann verwandeln sie sich von hydrophilen in hydrophobe Substanzen, schalten also von gut wasserlöslich auf Wasser abweisend um. Dabei ändern sie ihre Gestalt derart, dass ein geringerer Anteil ihrer Oberfläche mit dem umgebenden

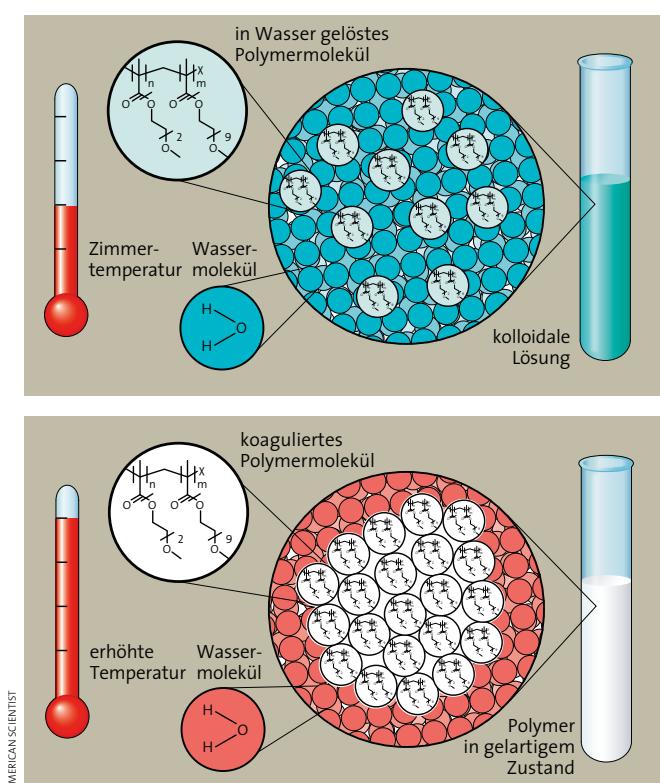
Wasser in Kontakt kommt. Diese Veränderung stört das Netzwerk von Wasserstoffbrückenbindungen zwischen ihnen und den Molekülen des Lösungsmittels. Das gebundene Wasser wird rasch verdrängt, und die Polymere verknäulen sich zu kompakten Kugelchen, die aus der Lösung ausfallen. Sinkt die Temperatur wieder unter den kritischen Wert, schalten sie jedoch zurück zum hydrophilen Verhalten und nehmen größere Mengen Wasser auf – das Material geht vom festen in den gelösten Zustand über.

Behandlung von Geschwüren in der Gebärmutter

Eine solche temperaturabhängige Verhaltensänderung macht thermoresponsive Polymere zu interessanten Komponenten von intelligenten Transportsystemen für Arzneistoffe. Mediziner, Biotechnologen und Pharmakologen haben dieses Potenzial rasch erkannt und nutzen es zunehmend. Teils werden Polymere sogar eigens als Wirkstoffträger entwickelt. ReGel, ein breit eingesetztes Carriersystem der US-Firma Allergan, ist Bestandteil von zwei Medikamenten: OncoGel, mit dem Wirkstoff Paclitaxel zur Behandlung des Ösophaguskarzinoms, und Cytoryn, mit dem Zytokin Interleukin-2 (IL-2) zur Immuntherapie von Krebskrankungen. Außerdem dient es in dem Präparat Timoptic-XE (Merck & Co.) zur kontrollierten Freisetzung des Wirkstoffs Timolol gegen erhöhten Augeninnendruck.

Unser Labor an der North Carolina Central University war führend bei der Entwicklung von LiquoGel, einem anderen synthetischen thermoresponsiven Polymer zur gezielten Freisetzung medikamentöser Wirkstoffe. (Wir haben ein Patent beantragt, nutzen das System jedoch noch nicht kommerziell.) Bei Raumtemperatur bildet LiquoGel eine wirkstoffhaltige wässrige Lösung, die mittels Spritze oder Kanüle an einer geeigneten Körperstelle injiziert werden kann. Im Gewebe erwärmt sich die Lösung auf Körpertemperatur und wandelt sich dadurch in ein Gel um. Dieses hält die gelöste Wirksubstanz am Injektionsort fest, so dass sie erst beim allmählichen Abbau des Materials ins umgebende Gewebe gelangt, was eine kontinuierliche Freisetzung in kleinen Dosen über einen längeren Zeitraum gewährleistet.

Da LiquoGel seine Materialeigenschaften schon bei mäßigem Erwärmen verändert, eignet es sich für vielerlei medizinische Zwecke. In einer der bisher am besten untersuchten Anwendungen prüfen unsere Kooperationspartner an der Duke University in Durham (North Carolina), ob es sich zur lokalen Behandlung von Uterusmyomen einsetzen lässt. Solche Geschwülste, die aus Muskel- und Bindegewebe bestehen, finden sich bei 70 bis 80 Prozent der Frauen im Alter von 50 Jahren in der Wand der Gebärmutter. Obwohl sie nicht bösartig sind, führen sie teils zur erheblichen gesundheitlichen Beeinträchtigungen; so verursachen sie oft Schmerzen, verstärkte Monatsblutungen oder auch Schwangerschaftskomplikationen. Uterusmyome sind in den USA (in Deutschland ebenso) der häufigste Grund für das operative Entfernen der Gebärmutter (Hysterektomie) und belasten das Gesundheitssystem mit rund zwei Milliarden US-Dollar pro



Ein thermorespones, also auf Temperaturänderung reagierendes Polymer kann dazu dienen, einen Wirkstoff dosiert an einer bestimmten Stelle im Körper freizusetzen. Bei Raumtemperatur ist es wasserlöslich (oben). Sobald es sich nach der Injektion ins Gewebe des Zielbereichs auf Körpertemperatur erwärmt, fällt es jedoch aus und geht in einen gelartigen Zustand über (unten). Dabei schließt es den Wirkstoff ein und hält ihn fest. Es gibt ihn dann kontinuierlich in kleinen Mengen ab, während es langsam abgebaut wird.

Moleküle mit Licht steuern

Außer thermoresponsiven Materialien gibt es einen weiteren hochinteressanten Typ von intelligenten Polymeren: Sie ändern ihre Eigenschaften, wenn Licht bestimmter Wellenlängen auf sie fällt. Licht ist ein »sauberer« Reiz, der eine berührungsreie Steuerung ermöglicht. Fotoresponsive Materialien eignen sich daher für vielerlei Zwecke – beispielsweise in optischen oder mikroelektrochemischen Systemen, Sensoren, Textilien, Beschichtungen und Solarzellen.

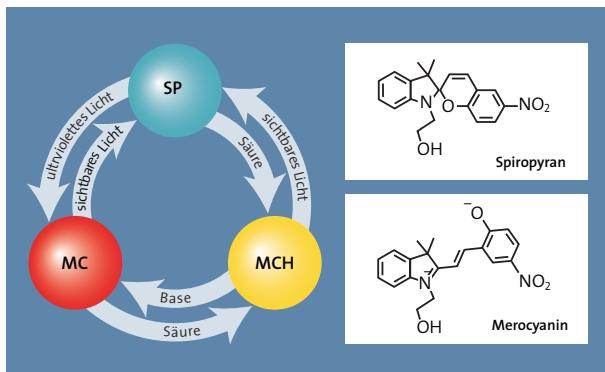
Besondere Aufmerksamkeit schenken die Forscher derzeit Materialien, die lichtabhängig ihre Farbe verändern. In unserem Labor untersuchen wir eine Familie von Polymeren, die ein so genanntes Spiropyran enthalten. Wenn es mit ultraviolettem Licht bestrahlt wird oder wenn sich der Säuregrad der Umgebung ändert, öffnet sich ein Ring in diesem Molekül. Dadurch entsteht eine chromophore Gruppe (eine farberzeugende Molekülregion), die sichtbares Licht stark absorbiert. Als Folge davon schließt sich der Ring wieder.

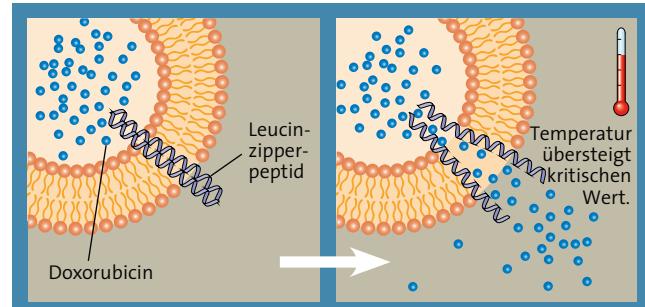
Wie andere im Artikel besprochene Materialien eignet sich dieses intelligente Polymer für biomedizinische Anwendungen – etwa zur kontrollierten Freisetzung verkapselfter Wirkstoffe. Es lässt sich aber auch für ganz andere Zwecke heranziehen, zum Beispiel in der Textilindustrie. Hier könnte man fotoresponsive Polymere in Stoffe einweben, so dass diese ihre Farbe ändern oder ein aufgedrucktes Muster sichtbar machen, wenn sie dem Tageslicht ausgesetzt werden. Fasern, deren Farbwechsel eine übermäßige Sonnenexposition anzeigen, wären womöglich für Kinderkleidung sinnvoll.

Polymere sind zwar üblicherweise Isolatoren. Doch manche leiten Strom, wenn sie elektromagnetische Strahlung absorbieren. Dabei wird ein Elektron auf ein höheres Energieniveau gehoben, wo es frei beweglich ist. Da es beim Rückfall auf eine niedrigere Stufe ein Photon aussendet, sind solche Stoffe meist fluoreszierend.

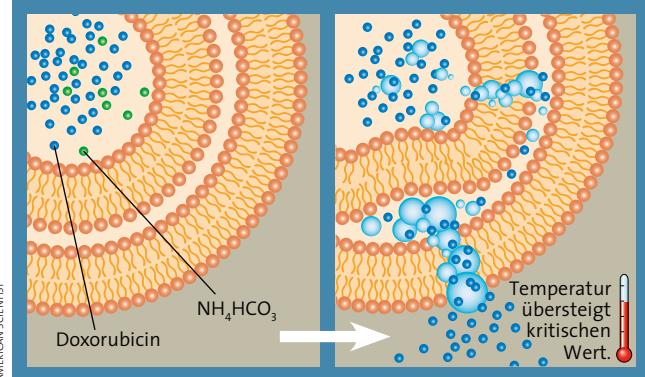
Derartige Polymere können auch zum Einfangen von Sonnenlicht für Photovoltaiksysteme dienen. Zwar lässt sich damit bisher nicht so effizient Strom erzeugen wie mit herkömmlichen Halbleitern. Dennoch gelten sie als das Material der Zukunft in der Photovoltaik, da sie kostengünstig herzustellen sind. Forscher arbeiten daran, ihren Wirkungsgrad zu verbessern. Im Idealfall könnten Solarzellen auf Polymerbasis ein breites Spektrum von Wellenlängen vom ultravioletten bis zum infraroten Bereich erfassen und so zum Beispiel elektronische Geräte netzunabhängig mit kostenlosem Strom versorgen.

Unser Team interessiert sich in diesem Zusammenhang schon seit Längerem für Materialien aus kurzkettigen Polymeren von para-Phenylen. Wie wir in experimentellen und theoretischen Untersuchungen herausgefunden haben, verschiebt sich das Absorptionspektrum dieser fotoresponsiven Substanzen zu längeren Wellenlängen hin – also stärker in den roten





Intelligente Liposomen können ihren Inhalt, etwa das Krebsmedikament Doxorubicin, über verschiedene Mechanismen freisetzen. Ist ihre Lipidhülle mit einem »Reißverschluss« (englisch: zipper) aus leucinhaltigen Peptiden verschlossen (oben links), dann öffnet dieser sich beim Erwärmen (oben rechts). Alternativ kann man dem Liposom auch Ammoniumhydrogencarbonat zufügen (unten links), das sich oberhalb einer bestimmten Temperatur zersetzt. Dabei entsteht gasförmiges Kohlendioxid, das die Membranen durchdringt und den Wirkstoff entweichen lässt (unten rechts).



AMERICAN SCIENTIST

Einen weiteren interessanten Ansatz hat die Arbeitsgruppe um Z.S. Al-Ahmady am Centre for Drug Discovery des University College in London beschrieben. Die Forscher verwenden eine Mischkonstruktion aus Peptiden und Liposomen. In die Lipid-Doppelschicht sind dabei kurze spiralförmige Ketten aus der Aminosäure Leucin eingebettet. Das System nutzt die Faltung dieser Peptide für einen wärmeabhängigen Schalter. Bei Raumtemperatur bilden je zwei Leucinketten dichte reißverschlussartige Strukturen. Oberhalb der Grenztemperatur von 40 bis 45 Grad Celsius öffnen sich die Reißverschlüsse und entlassen den Wirkstoff aus dem Inneren des Liposoms in die Umgebung. Weil sich die auslösende Temperatur und die Konfigurationsänderung der Peptide fein justieren lassen, sind die Leucinpeptide sehr gut geeignet für die Entwicklung von intelligenten liposomalen Wirkstoffträgern.

Der wohl ungewöhnlichste Mechanismus zum Öffnen eines Liposoms bei einer kritischen Temperatur ist das Freisetzen von Kohlendioxidblasen in ihrem Inneren mit Hilfe von Ammoniumhydrogencarbonat (Hirschhornsalz), das bei etwa 42 Grad Celsius zerfällt. Das Gas erzeugt einen Überdruck, der die Anordnung der Moleküle in der Lipid-Doppelschicht verzerrt und die Hülle dabei durchlässig macht, so dass es entweichen kann. Gleichzeitig kommt der Wirkstoff frei. Gasgefüllte Liposomen eignen sich auch als Kontrastmittel bei der bildgebenden Darstellung von Geweben mittels Ultraschall.

Wie diese Beispiele deutlich machen, gewinnen intelligente Materialien nach Jahrzehnten der Forschung und Entwicklung zunehmend an Bedeutung in der Medizin, aber auch in der Biotechnologie. Die Kombination von Polymeren mit funktionstragenden chemischen Komponenten eröffnet

schier unbegrenzte Möglichkeiten. So werden intelligente Polymere schon in naher Zukunft

- zur Messung des pH-Werts in den Nieren dienen, um das Säure-Basen-Gleichgewicht zu überwachen,
- Blutgerinnsel anhand bestimmter Enzyme erkennen und sie auflösen,
- biochemische Wirkstoffe zur Reparatur fehlgefalteter Proteine bei der Alzheimer-, Parkinson- und Huntingtonkrankheit ins Gehirn transportieren,
- die Konzentration von Bestandteilen des Blutplasmas wie zum Beispiel Glukose regulieren helfen und
- chemische Signale blockieren, welche bösartige Wucherungen von Zellen auslösen.

Was einst nur eine theoretische Möglichkeit war, ist somit dabei, zum wichtigen Instrument für die Medizin der Zukunft zu werden. ≈

DIE AUTOREN



Darlene K. Taylor (Foto) ist Associate Professor am Chemischen Institut der North Carolina Central University in Durham und betreut **Uddhav Balami** als Doktoranden. Sie wurde vor Kurzem als Stipendiatin in das Programm Interdisciplinary Research Careers in Women's Health der National Institutes of Health der USA in Bethesda (Maryland) aufgenommen.

QUELLEN

- Al-Ahmady, Z. S. et al.:** Lipid-Peptide Vesicle Nanoscale Hybrids for Triggered Drug Release by Mild Hyperthermia in Vitro and in Vivo. In: American Chemical Society Nano 6, S. 9335–9346, 2012
- Chen, K.-J. et al.:** A Thermoresponsive Bubble-Generating Liposomal System for Triggering Localized Extracellular Drug Delivery. In: American Chemical Society Nano 7, S. 438–446, 2013
- Nirmal, H. B. et al.:** In-Situ Gel: New Trends in Controlled and Sustained Drug Delivery System. In: International Journal of Pharm-Tech Research 2, S. 1398–1408, 2010
- Roy, D. et al.:** Future Perspectives and Recent Advances in Stimuli-Responsive Materials. In: Progress in Polymer Science 35, S. 278–301, 2010
- Taylor, D. K., Leppert P. C.:** Treatment for Uterine Fibroids: Searching for Effective Drug Therapies. In: Drug Discovery Today: Therapeutic Strategies 9, e41–e49, 2012

Heißes Wasser in der Tiefe des Enceladus



Nanopartikel von Saturs Eismond Enceladus, aufgespürt mit dem Staubdetektor der Raumsonde Cassini, liefern das verblüffende Bild eines außerirdischen Ozeans, von dessen Grund heißes Salzwasser emporströmt. Herrschen auf dem Trabanten günstige Bedingungen für die Entstehung von Leben?

Von Frank Postberg und Thorsten Dambeck

Tief unter den Wellen des Atlantiks hat die Natur eigenartige Türme errichtet: Bis zu 60 Meter ragen sie über dem Meeresgrund auf und erinnern an die verlassenen Wolkenkratzer einer versunkenen Stadt. Nur Tauchroboter und U-Boote gelangen an diesen Ort 4500 Meter unter der Meeresoberfläche, wo der Lichtkegel ihrer Scheinwerfer das ewige Dunkel durchbricht und auf allerlei Getier fällt, das hier gedeiht.

In Massen besiedeln Schnecken, Krebse und Muscheln das hydrothermale Feld »Lost City« im Atlantis-Massiv, einem untermeerischen Gebirge des mittelatlantischen Rückens, das auf 30 Grad nördlicher Breite liegt. Die vermeintlichen Bauwerke bestehen aus Kalk und sind in Wahrheit hydrothermale Schleote, an denen heißes, mineralreiches Wasser aus dem Meeresboden austritt. Erst seit dem Jahr 2000 kennt man diesen exotischen Ort, den der I-Max-Film »Aliens of the Deep« in der Folge einem breiteren Publikum bekannt machte.

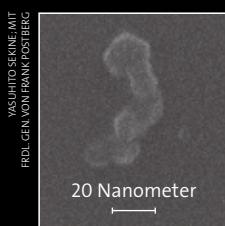
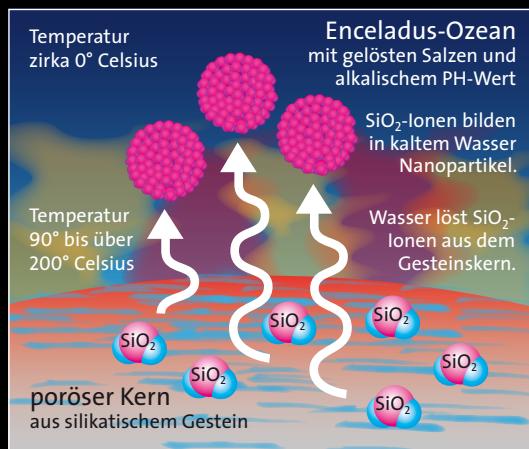
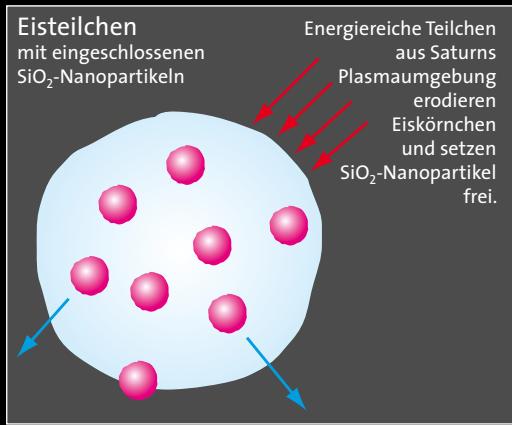
Mittlerweile sind auch Planetenforscher auf das bizarre Biotop aufmerksam geworden. Denn jüngste Ergebnisse

zeigen, dass »Lost City« in seinen physikalischen und chemischen Umweltbedingungen einer außerirdischen Welt ähnelt: dem Grund des Ozeans, den die Raumsonde Cassini in der Tiefe des Saturnmonds Enceladus entdeckt hat.

Unter den mehr als 60 bekannten Saturnmonden ist Enceladus ein eher kleines Exemplar, sein mittlerer Durchmesser beträgt nur 504 Kilometer. Entdeckt hat ihn 1789 der britisch-deutsche Astronom William Herschel. Auch in der Folgezeit blieb der Minimond lange Zeit ein Lichtpunktchen im Fernrohr; erst den Voyager-Sonden gelangen in den 1980er Jahren erste Porträts des Himmelskörpers. Er zeigt sich komplett eisbedeckt und stellt mit seiner hohen Rückstrahlfähigkeit, die sogar diejenige von Neuschnee übertrifft, alle anderen Oberflächen von Planeten und ihren Trabanten in den Schatten.

Auffällig ist auch die Bahn, die er um Saturn zieht. Denn Enceladus kreist inmitten von dessen E-Ring. Dieser diffuse Ring geringer Dichte weit jenseits der – bereits mit Amateurteleskopen sichtbaren – Hauptringe war den Astronomen lange

Woher stammen die vom Staubdetektor der Cassini-Sonde gemessenen SiO₂-Nanoteilchen (pink)? Der Indizienkette der Forscher zufolge entstehen sie aus SiO₂-Ionen, die durch heißes Wasser aus dem Gesteinskern gelöst wurden und sich in kühlerem Wasser zu nanometergroßen Partikeln aneinanderlagern. Durch Ozean und Eiskruste hindurch gelangen die Teilchen dann an die Oberfläche des Eismonds, wo sie, eingebaut in Eisteilchen, mit den Fontänen ins All geschleudert werden.



Auch bei Experimenten, welche die Bedingungen am Grund des Enceladus-Ozeans simulierten, bilden sich aus gelösten SiO₂-Molekülen Nanopartikel (hier von einem Rasterkraftmikroskop aufgenommen), wenn die Temperatur abnimmt.

kam es zur Übersättigung mit SiO₂, das daraufhin in Form von Nanopartikeln ausfiel. Diese wuchsen wegen des alkalischen pH-Werts der Lösung aber nicht zu makroskopischen Körnern heran. Aus den Daten lässt sich extrapoliieren, dass die Wassertemperaturen an Enceladus' Gesteinsgrenzfläche mindestens 90 Grad Celsius betragen müssen, denn bei geringeren Temperaturen löste sich im Experiment nicht genügend SiO₂, so dass sich beim späteren Abkühlen auch nicht ausreichend Nanopartikel bilden konnten. Denkbar sind sogar Wassertemperaturen von deutlich über 200 Grad.

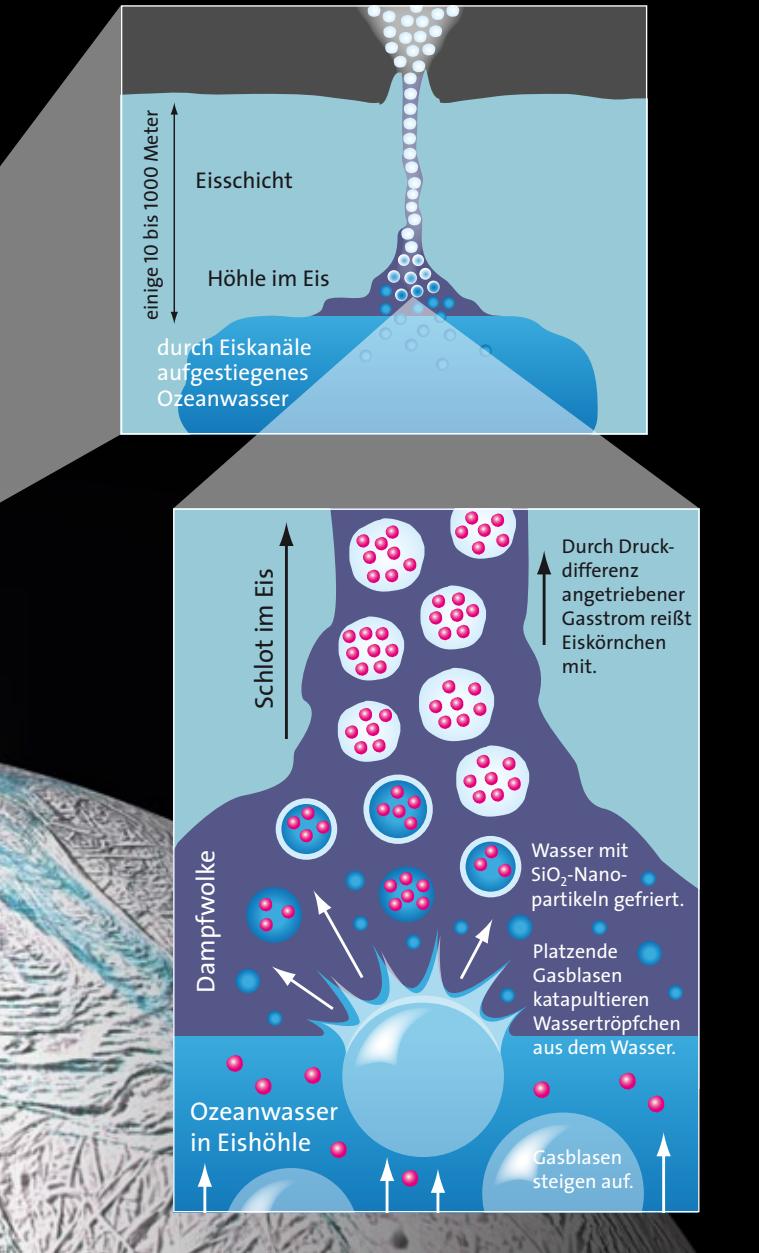
4 Im Enceladus-Ozean finden mächtige Umwälzungsprozesse statt

Im Experiment bildeten sich zunächst SiO₂-Teilchen mit Radien von rund zwei Nanometern. Die typische Größe der Nanopartikel von Enceladus, von denen wir Tausende mit unserem CDA-Instrument vermessen haben, liegt ebenfalls nur zwischen zwei und acht Nanometern, keines war größer als zehn. Sowohl die Laborexperimente als auch theoreti-

sche Arbeiten der japanischen Kollegen zeigen, dass die ursprünglich zwei Nanometer großen Teilchen bereits binnen einiger Monate, höchstens weniger Jahre zu dieser Größe heranreifen.

Daraus lassen sich zwei wichtige Dinge folgern. Zum einen müssen die vom CDA aufgefangenen Partikel erst kurze Zeit vor ihrer Messung entstanden sein, sonst wären sie größer gewesen als beobachtet; sie sind also keine Relikte vergangener hydrothermaler Aktivität, sondern zeugen von gegenwärtig ablaufenden Prozessen. Und zweitens: Dass sie in wenigen Monaten den rund 50 Kilometer weiten Weg vom Ozeangrund bis zur Oberfläche überwunden haben müssen, deutet klar auf mächtige Umwälzungen im Ozean hin.

Zusammengenommen bedeutet unsere Indizienkette: Im Tiefenmeer von Enceladus finden derzeit hydrothermale Prozesse statt. Besonders auch der alkalische pH-Wert von 9 bis 10,5 erinnert dabei an die Verhältnisse in »Lost City«. Möglicherweise kommt es auf Enceladus genau wie in den



Tiefen des Atlantiks zur so genannten Serpentinisierung. Bei dieser Reaktion, die bei den in Kashiwa durchgeführten Experimenten ebenfalls auftrat, reagiert Gestein mit Wasser zu Serpentinmineralen, wobei molekularer Wasserstoff und vor allem viel Wärme frei wird – dies könnte die hohen Temperaturen erklären.

Wie gelangen Nanopartikel, Wasser und Dampf nun aber ins All? Ihr Weg nach oben führt zunächst durch den rund zehn Kilometer mächtigen Ozean. Begrenzt wird dieser durch eine 30 bis 40 Kilometer dicke Eisschicht, die wahrscheinlich von wassergefüllten Rissen durchzogen ist. Das vergleichsweise warme Eis in dieser Schicht ist gleich irdischen Gletschern zwar plastisch verformbar. Durch seine Füllung mit Wasser wird es allerdings hinreichend gegen die an ihm zerrenden Gezeitenkräfte stabilisiert, so dass das mit Nanopartikeln angereicherte Salzwasser darin aufsteigen kann.

Wegen des Dichteunterschieds zwischen Eis und Wasser dürfte Letzteres nach den hydrostatischen Gesetzen jedoch

nur bis auf einige Kilometer an die äußere Grenze der eisigen Mondoberfläche herankommen. Der so genannte Champagner-Effekt hilft ihm aber vermutlich noch weiter hinauf. Während des Aufstiegs durch die wassergefüllten Risse nimmt nämlich der Druck ab, wodurch Kohlendioxid freigesetzt wird, das zuvor im Wasser gelöst war. Die Gasblasen sorgen also entlang des gesamten Wegs nach oben für zusätzlichen Auftrieb, der das Salzwasser schließlich eine Höhe von vielleicht einigen hundert Metern unter der Mondoberfläche erreichen lässt.

Dort, so vermuten wir, sammelt es sich in Eishöhlen. Aus der Oberfläche des Wassers werden nun, wie bei perlendem Sekt, winzige Tröpfchen herausgerissen und bilden feinste Nebelwolken. Schnell gefrieren die Tröpfchen zu mikrometergroßen Eiskörnchen, die auch die kleinen Nanopartikel wie Rosinen in einem Brötchen einschließen. Der Unterdruck, der infolge der geringen Distanz zum Vakuum des Weltraums herrscht, lässt darüber hinaus große Mengen Wasser verdampfen. Durch Kanäle im Eis, die hier oben nicht mehr mit Wasser gefüllt sind, zieht der Dampf wie durch einen Kamin bis zur Mondoberfläche hinauf und reißt dabei die kleinen Teilchen mit sich. Am Ende werden sie von den Fontänen emporgeschleudert.

Der Beschuss der Eiskörnchen mit energiereichen Teilchen setzt die Nanopartikel wieder frei

Rund 200 Kilogramm Gas und Eis gelangen so pro Sekunde ins All. Die schnellsten der Eisteilchen bekommen genug Energie mit, um Saturns E-Ring zu erreichen. Hier sind sie der korrosiven Plasmaumgebung des Planeten ausgesetzt und werden mit energiereichen geladenen Partikeln bombardiert. Der Beschuss setzt nach und nach die eingeschlossenen Nano-SiO₂-Rosinen frei, die nun ein dynamisches Eigenleben beginnen. Sie werden vom Plasma innerhalb weniger Stunden oder Tage aufgeladen und so zum Spielball elektromagnetischer Kräfte. Verleiht ihnen Saturns Magnetosphäre die für den endgültigen Abschied vom Ringplaneten nötige Fluchtgeschwindigkeit, mischen sie sich anschließend unter den Sonnenwind. Mit bis zu einer Million Kilometer pro Stunde sind sie dann unterwegs – das ist rund ein Prozent der Lichtgeschwindigkeit – und verschwinden in den Weiten des Sonnensystems.

Doch kehren wir zurück zu Enceladus. Neben dem CDA nehmen auch andere Cassini-Instrumente regelmäßig die geologisch aktive Südprovinz ins Visier. Dazu gehören neben den beiden Infrarot-Instrumenten, dem Composite Infrared Spectrometer (CIRS) und dem Visible and Infrared Mapping Spectrometer (VIMS), auch die Bordkamera (Imaging Sub System, ISS). Die mit diesen Instrumenten gewonnenen Ergebnisse fassten US-Kollegen im Sommer 2014 in einer Publikation zusammen. Mit bildgestützten Methoden, wie sie auch geodätischen Messungen zu Grunde liegen, hatten die Forscher die Positionen zahlreicher Fontänen vermessen. Mit den Infrarot-Instrumenten stellten sie dann fest, dass die Temperaturen an vielen Austrittsorten teilweise mehr als

100 Grad über dem Umgebungsniveau von minus 200 Grad Celsius liegen. Laut den VIMS-Daten sind die Austrittsöffnungen mit weniger als zehn Meter Durchmesser zudem sehr klein. Daraus lässt sich folgern, dass ihre ungewöhnlich hohen Temperaturen durch so genannte latente Wärme verursacht werden, die frei wird, wenn der aufsteigende Dampf an den kalten Eiswänden gefriert.

Unklar bleibt aber weiterhin, woher die Wärme letztlich stammt, die den sonnenfernen Ozean flüssig hält. Der offensichtlichste Kandidat wäre eine Gezeitenheizung, wie sie im Jupitersystem für die vulkanische Aktivität auf dem Mond Io und für den bereits erwähnten Ozean von Europa verantwortlich ist. Die Wirkung eines solchen Mechanismus lässt sich immer dann beobachten, wenn ein Trabant auf seinem elliptischen Orbit rhythmisch den Abstand zu seinem Planeten ändert: Dessen Schwerkraftwirkung deformiert ihn in wechselndem Maß, was zu Reibungsprozessen in Mantel und Kruste und damit zu Wärme führt.

Ragen auch am Grund des Enceladus-Ozeans solche Schlote empor? Die Aufnahme stammt vom Hydrothermalfeld »Lost City« im mittleren Atlantik. Hier treten aus rund 30 dieser bis zu 60 Meter hohen Kalksteingebilde stark alkalische Lösungen mit Temperaturen bis zu 90 Grad Celsius aus. Vielen kleinen wirbellosen Tieren wie etwa Schnecken und Muscheln bieten sie einen Lebensraum.

Dass Saturns Gezeiten in der Tat eine wichtige Rolle spielen, hatten Analysen von VIMS-Daten schon 2013 nahegelegt; die Bordkamera der Sonde bestätigte sie 2014. Den Daten zufolge schwankt die Helligkeit der Eruptionsfahne und somit die Menge des ausgestoßenen Materials periodisch. Offenbar öffnen sich die Wasser und Dampf führenden Spalten und Schlotte in Enceladus' rissigem Eismantel mal mehr und mal weniger, abhängig vom Zerren der Gezeitenkräfte. Ein einfaches Modell des Effekts kann die periodische Helligkeitsänderung gut nachbilden, versagt bislang allerdings dabei, das Geschehen auch zeitlich korrekt vorherzusagen.

Allerdings untermauern neuere Analysen, dass mindestens 5000 Megawatt Heizleistung notwendig sind, um die Wärmeabgabe von Enceladus zu erklären – fünfmal mehr, als die Gezeitenheizung liefern könnte. Da dem Mond also zu wenig Energie zugeführt wird, als dass er seine Aktivität dauerhaft aufrechterhalten könnte, stellt sich die Frage, ob seine gegenwärtige Aktivität nur eine vorübergehende Erscheinung ist. Modellrechnungen lassen dies durchaus denkbar erscheinen. Womöglich wechselt der Mond zwischen aktiven und passiven Perioden, die jeweils viele Millionen Jahre anhalten.

Welche Rolle spielt aber die Wärme aus der Serpentinisierung? Besondere Bedeutung bekäme sie, falls Enceladus' Gesteinskern porös ist. Dann könnte es sein, dass Wasser tief in den Kern eindringt und dort ein riesiges Reservoir für

