

Michael Groß

# Der Kuss des *Schnabeltiers*

und 60 weitere  
irrwitzige Geschichten  
aus Natur und  
Wissenschaft



ERLEBNIS  
wissenschaft



# 1

## Crazy! – Verrückte Geschichten

Es liegt in meiner Natur, dass ich die leicht exzentrischen Geschichten aus den Naturwissenschaften denen vorziehe, die eine naheliegende Frage auf direktem und nahezu vorhersagbarem Wege beantworten. Die Art von Verrücktheit, die mich interessiert, kann aus den chaotischen Wegen entstehen, welche die Evolution in der Entwicklung des Lebens auf der Erde einschlug. Sie kann aber auch aus den Köpfen der Wissenschaftler kommen, die sich Herausforderungen stellen, denen jeder vernünftige Mensch aus dem Weg gehen würde. Es kann sogar beides vorkommen, oder etwas in der Mitte zwischen beiden Verrücktheiten. Es existiert ein breites Spektrum von der wissenschaftlichen Verrücktheit bis hin zur verrückten Wissenschaft.

Andererseits muss man anmerken, dass manche der hier vorgestellten Forschungsfelder ihre Laufbahn am exzentrischen Rand der modernen Wissenschaft begannen, dann aber zu respektablen Fachgebieten mit eigenen Abteilungen, oder gar mit kommerziellen Anwendungen evolvierten. Man kann vorher nicht wissen, was geschehen wird, und das macht diese exzentrischen Themengebiete noch spannender.

## Bärtierchen – Überlebenskünstler unter Druck

Die verrückten Lebewesen an den Grenzen unserer Biosphäre faszinieren mich schon seit vielen Jahren. Da ich mich sowohl in meiner Doktorarbeit als auch in meinem zweiten Buch, *Exzentriker des Lebens*, mit diesem Thema auseinandergesetzt habe, bin ich nicht mehr ganz so leicht zu beeindrucken. Leben in kochendem Wasser, in Sandwüsten, im ewigen Eis oder im Toten Meer – alles schon bekannt. Doch die folgende Geschichte übertrifft alle Extreme, die mir bisher bekannt waren.

Können Lebewesen hohen Drücken standhalten, und wenn ja, wie? Diese Frage beschäftigt die Wissenschaft seit mehr als einem Jahrhundert. Im Jahre 1884 nämlich berichtete der Biologe A. Certes der Pariser *Académie des Sciences*, dass sich in den bei den Expeditionen der Forschungsschiffe *Travailleur* und *Talisman* gesammelten Proben vom Meeresboden lebende Mikroorganismen befanden. Der Arzt und Physiologe Paul Regnard nahm daraufhin gleich eine systematische Untersuchung quer durch die gesamte bekannte Biologie vor und untersuchte die Beständigkeit von Pflanzen, Hefen, Muscheln, Fischen, Blutegeln, Infusorien (Aufgusstierchen) und Krustentieren gegenüber Drücken von bis zu 600 Atmosphären. Bei seiner Generalinventur, von der er noch im selben Jahr der *Académie* berichtete, fand Regnard heraus, dass höhere Organismen offenbar empfindlicher sind als niedere. Die von ihm untersuchten Fische waren nach dem Druckschock »tot und steif«, die Infusorien und Blutegel verfielen lediglich in einen Schlaf, aus dem sie alsbald wieder erwachten, und den Hefen und löslichen Fermenten schien die Behandlung nicht weiter geschadet zu haben.

Heute wissen wir, dass nicht alle Fische so empfindlich und nicht alle Mikroorganismen so resistent sind wie die von Regnard untersuchten. Anhand von Fischen haben Hochdruckforscher und Meeresbiologen vor allem die physiologische Reaktion auf Druckunterschiede untersucht, etwa die Veränderung der Membranbausteine zur Aufrechterhaltung der optimalen Fluidität. Die etwas resistentere Mikroorganismen dienen vor allem zu biochemischen Untersuchungen unter der Fragestellung, wie die Maschinerie der Zelle mit Druck fertigwird. Allein dem von Regnard beobachteten »Schlafzustand« der Infusorien und Blutegel ist niemand gründlicher nachgegangen. Doch wie zwei japanische Wissenschaftler 1998 in einer Kurzmitteilung in *Nature* berichteten, finden sich gerade im Bereich der mikroskopisch kleinen Primitivtiere die erfolgreichsten Überlebenskünstler mit der erstaunlichsten Widerstandsfähigkeit gegenüber hohen Drücken.

Kunihiro Seki und Masato Toyoshima von der Kanagawa-Universität untersuchten die Druckresistenz zweier Arten aus dem Stamm der Bärtierchen (*Tardigrada*). Diese mikroskopisch kleinen Minimonster (Bild 1) werden höchstens einen halben Millimeter lang, fänden also auf einem i-Punkt noch reichlich Platz. Sie leben für gewöhnlich in Wassertröpfchen auf Moosen und Flechten und werden auf allen Kontinenten gefunden. Sie besitzen mindestens zwei verschiedene »Notprogramme«. Wenn ihr Lebensraum überschwemmt wird und Sauerstoffmangel droht, blähen sie sich zu einem ballonartigen Passivstadium auf, das für einige Tage im Wasser herumtreiben kann. Droht hingegen Wassermangel, so schrumpfen sie zu den sogenannten »Tönnchen«, einem sporenartigen Dauerstadium, in dem sie nachweislich mehr als 100 Jahre verharren können. (Man fand dies heraus, als man so alte Moosproben aus Museen in Wasser legte, und die Proben alsbald von Bärtierchen wimmelten.)

Bärtierchen in diesem Tönnchen-Zustand waren auch die Untersuchungsobjekte, welche die japanischen Forscher für ihre Hochdruck-Studien verwendeten. Weil die Anwesenheit von Wasser die Tierchen in ihren aktiven Zustand zurückversetzt hätte, wurden die Tönnchen in einem Fluorkohlenwasserstoff suspendiert und für eine Dauer von jeweils 20 Minuten Drücken von bis zu 6000 Atmosphären ausgesetzt – dem Sechsfachen des in den tiefsten Meerestiefen vorkommenden Wasserdrucks. Während Populationen im aktiven Zustand bereits bei 2000 Atmosphären vollständig abgetötet wurden,



**Bild 1** Bärtierchen (Tardigrada) wie der hier gezeigte *Hypsibius dujardini* finden sich fast überall auf der Erde in den Wassertröpfchen auf Moosen und Flechten. Hintergrundinformationen über die Biologie der Tierchen sind im Internet unter <http://www.kancrn.org/tardigrades/> zu finden.

betrug die Überlebensrate im Dauerstadium selbst bei 6000 Atmosphären für Tierchen der Art *Macrobiotus occidentalis* 95 Prozent, und für *Echiniscus japonicus* 80 Prozent.

Eine derartige Belastbarkeit war bisher im Tierreich nicht bekannt – lediglich Flechten und Bakteriensporen sind vergleichbar zäh. Fans der Bärtierchen wussten bereits, dass man die Dauerstadien problemlos in flüssigem Helium einfrieren kann – sie sind mindestens bis 0,5 Kelvin frostresistent. Detailgenau erklären lassen sich diese phänomenalen Leistungen noch nicht. Da die Tardigrada dem Menschen weder nützlich noch schädlich sind, ist über ihre Molekularbiologie vergleichsweise wenig bekannt. Man weiß immerhin, dass in den Dauerstadien hohe Konzentrationen des Zuckers Trehalose vorliegen, der auch der Bierhefe als Stressschutzmittel dient.

Angesichts der nahezu unbegrenzten Haltbarkeit der »Tönnchen« beginnen sich nun Mediziner dafür zu interessieren, ob sich das Erfolgsrezept der Bärtierchen auch auf die Haltbarmachung von Organen zu Transplantationszwecken übertragen ließe. In einem ersten Experiment auf dem Weg zur Entwicklung einer von den Tardigraden abguckten Konservierungsmethode haben Seki und seine Mitarbeiter Rattenherzen zunächst in Trehaloselösung »eingezuckert«, dann auf Silicagel getrocknet und schließlich in Fluorkohlenwasser-

stoff unter Luftabschluss aufbewahrt. Nach zehntägiger Lagerung bei Kühlschranktemperatur konnten sie die Herzen problemlos rehydrieren und wiederbeleben. Man hofft, dass sich aus diesen vielversprechenden Anfängen innerhalb einiger Jahre ein Lagerverfahren für menschliche Spenderorgane entwickeln lässt, das die bisher auf frischverstorbene Spender angewiesene Transplantationsmedizin revolutionieren könnte.

Auch als Hilfsmittel zur Haltbarmachung von pharmazeutischen Präparaten ist Trehalose bereits seit längerem im Gespräch. Die Neigung zuckeriger Lösungen, sich beim Abkühlen in einen Sirup und schließlich in eine glasartige Substanz zu verwandeln, könnte die Haltbarkeit vor allem jener Pharmaprodukte verbessern, die empfindliche Biomoleküle enthalten. Auch wenn diese nicht unbedingt ein Jahrhundert überleben müssen wie die Tardigraden im Museumsmoos, so wäre doch eine garantierte Haltbarkeit von einigen Jahren erstrebenswert.

Die schiere Unverwüstlichkeit der von den Bärtierchen selbst erzeugten Biokonserven dürfte auch all jene interessieren, die über eine mögliche Ausbreitung von Lebensformen durch den Weltraum spekulieren. Bisher galten Bakteriensporen als die aussichtsreichsten Kandidaten für solche Weltraumreisen. Doch die Tönnchen in Assoziation mit den ähnlich resistenten Flechten könnten möglicherweise ebenso gut andere Himmelskörper besiedeln.

(1999)

### Literaturhinweise

M. Groß, *Exzentriker des Lebens*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1997.  
K. Seki, M. Toyoshima, *Nature*, 1998, 395, 853.

### Was danach geschah

Sie werden es nicht glauben, aber Forscher an der Universität von Kristianstad in Schweden haben meinen Vorschlag, den ich in *Spektrum der Wissenschaft* und in der englischen Paperbackausgabe der *Exzentriker*, *Life on the Edge*, publiziert hatte, tatsächlich in die Tat umgesetzt und Bärtierchen ins All geschickt. Das nach der Zeitmaschine aus der Fernsehserie *Dr. Who* benannte Projekt TARDIS (Tardigrades in Space) war ein Bestandteil der Mission FOTON M-3, die

am 14. September 2007 startete und nach 189 Erdumkreisungen am 26. wohlbehalten wieder landete.

Die im September 2008 veröffentlichten Ergebnisse der tierischen Weltraummission zeigen, dass die Bärchen tatsächlich das Vakuum glänzend meistern. Etwas mehr zu schaffen macht ihnen jedoch die harte Strahlung im All. Mit Schutzfiltern, die nur UVA und UVB durchlassen überlebte noch ein Großteil der Tierchen. Von denen, die ungeschützt dem kompletten UV-Spektrum ausgesetzt waren, überlebten hingegen nur wenige Exemplare.

Tardigrada sind damit die ersten Tiere, die im Weltraum überleben können. Bisher gelang dies nur mit Flechten und bakteriellen Sporen.

Was lernen wir daraus: Falls jemand Bärtierchen zum Mars schicken will, kommt es auf den Druckanzug nicht an, aber ein ordentlicher Strahlenschutzschild wäre sinnvoll. Und vor Ort benötigt man natürlich zur Wiederbelebung der Biester etwas flüssiges Wasser.

#### **Literaturhinweise**

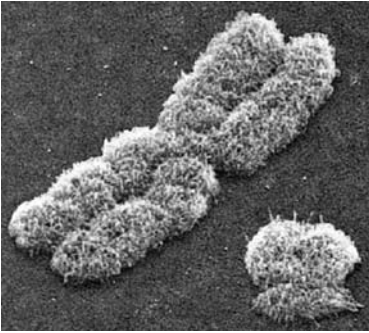
K. I. Jönsson et al., *Current Biology*, 2008, 18, R729.  
<http://tardigradesinspace.blogspot.com>

## Ypsilon mit Gimmicks

Einer der Schwachpunkte, die unseren Anspruch auf die »Krone der Schöpfung« ad absurdum führen, ist das Geschlechtschromosomenpaar. Insbesondere das Männer-exklusive Y-Chromosom ist alles andere als eine Sternstunde der Evolution. Es ist degeneriert, verkrüppelt, mit genetischem Müll und nutzlosen Mehrfachkopien überladen (Bild 5). Wenn man seine Entwicklung in die Zukunft extrapoliert, ist es eindeutig auf dem Weg ins Aus, und womöglich wird es unsere Species mit in den Abgrund reißen. Wir Männer sollten wirklich aufhören, uns über die äußeren Merkmale unserer Männlichkeit Gedanken zu machen, und uns stattdessen verschärft um unser Y-Chromosom sorgen. Der Genetiker Steve Jones hat ein ganzes Buch darüber geschrieben, doch ich will mich hier kurz fassen und es bei einem einzigen Kapitel belassen.

Mann und Frau unterscheiden sich auf molekularbiologischer Ebene vor allem dadurch, dass männliche Körperzellen ein bisschen weniger DNA abbekommen als weibliche. Statt eines zweiten X-Chromosoms besitzen sie nur ein sehr viel kleineres Y-Chromosom. Zählt man nur die Basen – ohne Rücksicht darauf, ob sie aktive Gene tragen oder nicht – dann fehlen dem Manne etwa 3 % der weiblichen DNA, die mit etwa 1 % typisch männlichem Genmaterial ersetzt sind.

Die molekulargenetische Forschung brachte allerdings nicht viel Positives über dieses eine Prozent Männlichkeit. Zwar fand man dort den geschlechtsbestimmenden Faktor, sowie einige für die Fruchtbarkeit nötige Gene, aber es blieben erstaunlich wenige. Der Großteil des Y-Chromosoms schien aus Evolutionsmüll zu bestehen: endlose Wiederholungen und inaktive Pseudogene. Immerhin konnte der ge-



**Bild 5** Elektronenmikroskopische Aufnahme eines menschlichen X- (links) und Y-Chromosoms. Vergrößerung ungefähr 10 000-fach.

kränkte Mannesstolz in der Erkenntnis Trost finden, dass von den beiden X-Chromosomen der Frau eines zum größten Teil inaktiviert ist, so dass das Ungleichgewicht an aktivem Genmaterial doch nicht so gravierend ausfällt.

Der hohe Anteil an Sequenzwiederholungen machte das Sequenzieren des Y-Chromosoms schwieriger als das des restlichen menschlichen Genoms. Die ansonsten höchst effiziente Schrotschussmethode, nach der man das Erbmaterial in Zufallsfragmente spaltet, diese sequenziert, und am Ende das Zusammenpuzzeln dem Computer überlässt, gerät ins Schleudern, wenn es zu viele Verwechslungsmöglichkeiten gibt. Auch die traditionelle Methode (Gene erst kartographieren, dann einzeln klonieren und sequenzieren) greift hier nicht.

Deshalb mussten die Forscher aus drei Laboratorien in Amsterdam, St. Louis, und Cambridge (Massachusetts), unter Federführung von David Page am MIT eine neue Strategie entwickeln, um den beim Humangenom-Projekt ausgesparten hochgradig repetitiven Teil des Chromosoms zu sequenzieren. Sie beschränkten sich zunächst auf das Y-Chromosom eines einzelnen Mannes und rückten diesem mit einem iterativen Prozess zuleibe, der aus abwechselndem Kartographieren und Sequenzieren bestand. Entgegen den Befürchtungen vieler, dass dieses Chromosom den Aufwand nicht wert sei, erhielten sie interessante und neuartige Einblicke in die Evolution des kleinen Unterschieds.

Vor langer Zeit, als die Evolution der Säugetiere gerade erst anfang, waren X und Y ein normales, identisches Chromosomenpaar. Wie bei den anderen 22 Chromosomenpaaren (Autosomen) des heutigen menschlichen Genoms auch, konnte es durch den Vorgang des »*Crossing-Over*« zu Austauschen von DNA-Abschnitten zwischen den beiden Chromosomen kommen. Dieser Vorgang ist wichtig für die Durchmischung des genetischen Materials bei der Fortpflanzung, und für die Konstanz des Inhalts eines gegebenen Chromosoms. Die Struktur des Y-Chromosoms zeigt was passiert, wenn *Crossing-Over* nicht mehr stattfindet.

Heute ist ein kleiner Teil des Y-Chromosoms immer noch an *Crossing-Over* mit dem X-Chromosom beteiligt. (Dieser Bereich heißt auch pseudo-autosomaler Bereich, weil sich dort X und Y wie Autosomen verhalten.) Der schwierig zu sequenzierende, hochgradig repetitive Teil des Chromosoms ist allerdings der andere, der keinen Gen-Austausch mit dem X-Chromosom mehr unterhält. David Page und seine Mitarbeiter schlagen vor, diesen Bereich, der bisher als *Non-Recombining region* (NRY) bekannt war, in *Male Specific region* (MSY) umzutaufen, da ihre Sequenzierung Rekombinationsereignisse anderer Art zutage förderte. Die MSY-Region umfasst 95 % der Gesamtlänge des Y-Chromosoms.

Die Sequenzdaten zeigen, dass der aktive Teil des genetischen Materials in der MSY ein Mosaik aus drei sehr verschiedenen Arten von DNA-Abschnitten ist. Am einfachsten einzuordnen sind die »X-transponierten« Bereiche, die lediglich zwei der insgesamt 76 Gene der MSY-Region enthalten. Diese sind offenbar das Resultat eines einzelnen Gentransfers vom X- auf das Y-Chromosom, der vor etwa vier Millionen Jahren stattgefunden haben muss, also kurz nach der Artentrennung zwischen Hominiden und Schimpansen. Sie sind damit die jüngsten Zuwanderer in der MSY-DNA.

Die »ältesten« Gene, das heißt diejenigen, die schon am längsten »typisch männlich« und vom X-Chromosom abgekoppelt sind, finden sich in der zweiten Gruppe, die Page et al. als »X-degeneriert« bezeichnen. Diese Gruppe enthält 14 funktionierende Gene (darunter den geschlechtsbestimmenden Faktor SRY) sowie 13 offenbar nicht transkribierte Kopien von Genen, sogenannte Pseudogene. Alle 27 DNA-Sequenzen zeigen deutliche Verwandtschaft (60–96 % Identität) mit entsprechenden Abschnitten auf dem X-Chromosom. Diese waren offenbar paarweise auftretende autosomale Gene, und began-

nen sich auseinander zu entwickeln, sobald in dem betreffenden Bereich das *Crossing-Over* aufhörte. Die Unterschiede zwischen den beiden Versionen dienen als molekulare Uhr, anhand derer man die fortschreitende »Entfremdung« zwischen X und Y nachvollziehen kann.

Die Entdeckung, dass seit Beginn der Säugetier-Evolution knapp die Hälfte der 27 Gene in der zweiten Gruppe ihre Funktionsfähigkeit verloren haben, weist auf ein chronisches Problem hin: Während die Vermischung des Erbguts bei der sexuellen Fortpflanzung mit der Möglichkeit des *Crossing-Over* die genetische Konstanz garantiert, ist der MSY-Bereich des Y-Chromosoms von diesen Mechanismen ausgeschlossen. Ironischerweise pflanzt sich ausgerechnet der geschlechtsbestimmende Teil unseres Genoms ungeschlechtlich fort, von Vater zu Sohn. Damit besteht die Gefahr, dass sich verderbliche Mutationen in diesem Teil des Chromosoms ungehindert anreichern. Die Gegenmaßnahme der Evolution, die einem solchen Verfall vorbeugt, fanden die Forscher in der dritten Gruppe von Sequenzen, den sogenannten ampliconischen DNA-Abschnitten.

Ein Amplicon ist ein DNA-Abschnitt, der amplifiziert, also vervielfältigt wird. Und Vervielfältigung gibt es in der MSY-Region in Umengen. Mit einer Gesamtlänge von über 10 Megabasen ist die ampliconische DNA die größte der drei Gruppen, und macht fast die Hälfte der Gesamtlänge der MSY-Region aus. Sie enthält 60 aktive Gene, die allesamt ausschließlich oder hauptsächlich in den Hoden exprimiert werden also vermutlich alle in irgendeiner Weise der Fruchtbarkeit dienen. Große Teile dieses Sequenzbereichs treten als Palindrome auf, d. h. auf einen gegebenen DNA-Abschnitt folgt direkt ein spiegelbildlicher Abschnitt mit derselben genetischen Information im Gegenstrang. Das längste Palindrom dieser Art erstreckt sich über 2,9 Megabasen und enthält innerhalb seiner Sequenz zwei kleinere Palindrome – verwirrende Mehrfachspiegelungen der genetischen Information.

Die Herkunft der Gene in diesem genetischen Spiegelkabinett ist bunt gemischt. Bereits in den 90er Jahren fand Page heraus, dass eine Gruppe von Genen namens DAZ, deren Ausfall zur männlichen Unfruchtbarkeit führt, ursprünglich auf dem Chromosom 3 beheimatet war. Im Laufe der Evolution wurden diese und andere mit der männlichen Fortpflanzungsfunktion verbundene Gene in das Y-Chromosom aufgenommen. Dies ist das einzige Beispiel eines Chromosoms, das sich auf eine Funktion spezialisiert und zugehörige Ge-

ne »sammelt«. Die Anordnung der Gene in den übrigen Chromosomen ist überwiegend zufällig.

Genauere Untersuchung der vielfachen Spiegelungen und Kopien im ampliconischen Bereich ergab eine überraschende Antwort auf das Problem des fehlenden *Crossing-Over*. Die Spiegelungen dienen offenbar als Sicherheitskopie und Austauschpartner in derselben Weise, wie bei den Autosomen das zweite Chromosom. Anstatt des – aufgrund mangelnder Übereinstimmung unmöglich gewordenen – *Crossing-Over* mit dem X-Chromosom greift das Y-Chromosom zur Selbsthilfe und betreibt Rekombination innerhalb seines eigenen DNA-Strangs. Und dieser Vorgang scheint schon seit vielen Millionen Jahren im Gange zu sein, denn in einer zweiten Arbeit in *Nature* berichten Page und Mitarbeiter, dass sechs der acht großen Palindrome auch beim Schimpansen vorliegen, also mehr als 5 Millionen Jahre alt sind.

Weitere Vergleichsstudien mit anderen Säugetieren (und mit mehr als einem Vertreter unserer Species!) werden nötig sein, um das über Hunderte von Millionen Jahren hinausgezogene Auseinanderdriften von X und Y genauer zu verstehen. Doch es steht jetzt schon fest: Endlose Wiederholungen, auch wenn sie den Forschern das Leben schwermachen, müssen nicht nutzlos und langweilig sein.

(2003)

### Literaturhinweise

- S. Jones, *Der Mann, ein Irrtum der Natur?*, Rowohlt, 2003.  
H. Skaletsky et al., *Nature*, 2003, 423, 825.  
S. Rozen et al., *Nature*, 2003, 423, 873.

### Was danach geschah

Die Erforschung des Männer-Genoms hat kürzlich einen enormen Schub erhalten, da bereits mindestens zwei Prachtexemplare unseres Geschlechts, nämlich der Doppelhelix-Entdecker James Watson, und der Genomik-Pionier Craig Venter, ihre höchst persönliche Genomsequenz in Empfang nehmen durften. Wie es genau in dem genetischen Spiegelkabinett dieser beiden Herren aussieht, weiß ich allerdings leider nicht.

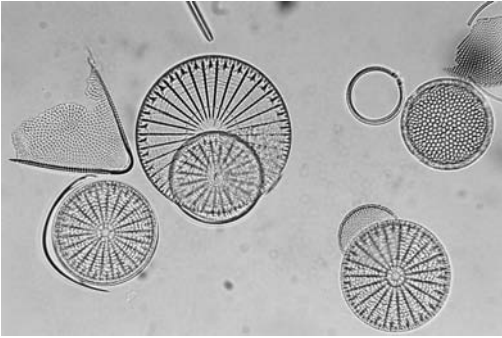
## Die wunderbare Welt der Kieselalgen

Universitäten sind wie Bahnhöfe, man sieht viele Menschen auf der Durchreise, die einem dann nie wieder begegnen. Ein flüchtiger Bekannter aus der Regensburger Zeit, Nils Kröger, ist mir jedoch, zumindest durch seine phantastischen Publikationen, immer wieder begegnet. Er knackte die molekularen Bausteine der bemerkenswert regelmäßig aufgebauten Silikatschalen der Kieselalgen und machte sich dieses Gebiet zu eigen, aus dem es seitdem immer wieder spannende Forschung zu berichten gab.

### Kieselalgen zum selbst Bauen

Diatomeen, auch Kieselalgen genannt, sind einzellige Algen, die sich in Tausenden von Arten in Ozeanen und Seen rund um den Globus finden. Ihre Schalen mit wunderschönen Mustern von Poren, die kleiner als ein Mikrometer sind, haben die Forscher im Bereich der Biomineralisation vor riesige Herausforderungen gestellt (siehe Bild 21). Da die Muster genetisch festgelegt sind, müssen Biomoleküle an ihrer Erzeugung beteiligt sein, doch diese sind so verschieden von normalen Proteinen, dass es viele Jahre dauerte, bis man sie aus den Schalen extrahieren und eingehender untersuchen konnte.

Nils Kröger und seine Kollegen an der Universität Regensburg haben mehrere verschiedene Peptide, die Silaffine, und langkettige Polyamine aus Diatomeenschalen isoliert und gezeigt, dass diese die Ausfällung der Silikatminerale katalysieren. Im Jahr 2002 berichtete die Regensburger Gruppe, dass Modifizierungen der Peptide nach ihrer Synthese, etwa das Ankoppeln von Polyamin-Ketten an Lysinreste, für die Funktion der Silaffine im Organismus wichtig sind. Als die Forscher erstmals Silaffine aus Kieselalgen isolierten, waren



**Bild 21** Elektronenmikroskopische Aufnahme von Diatomeenschalen. Das subtile, an Spitzen erinnernde Muster von Poren im Nanometer-Maßstab ist genetisch vorbestimmt. Wie diese Muster zustande kommen ist eine der kniffligsten Fragen der modernen Biologie.

diese Moleküle verloren gegangen. Nun haben sie jedoch erstmals die vollständigen, »naturidentischen« Versionen von drei Silaffinen aus *Cylindrotheca fusiformis* wieder hergestellt und ein Rezept entwickelt, das festlegt, wie diese Moleküle kombiniert werden müssen, damit man Nanostrukturen nach Art der Kieselalgen auch im Reagenzglas produzieren kann.

Kröger und seine Mitarbeiter fanden heraus, dass Silaffin-2 allein (ein Phosphoprotein mit 40 Kilodalton Molekulargewicht) nur wenig zur Ausfällung von Silikat beiträgt. In Anwesenheit von Silaffin-1A (6,5 Kilodalton) scheint es jedoch eine regulatorische Funktion zu haben, da es die Aktivität des anderen Proteins, je nach dem Konzentrationsverhältnis, anregen oder hemmen kann.

Der Grundbaukasten zur Erzeugung von Silikatstrukturen mit der richtigen Porengröße im Reagenzglas muss eine positiv geladene (kationische) Molekülsorte enthalten, wie etwa langkettige Polyamine oder das naturidentische Silaffin-1A mit seinen Polyamin-Anhängseln, sowie eine negativ geladene (anionische), wie etwa das hochgradig phosphorylierte Silaffin-2. Die Forscher vermuten, dass diese beiden Molekülsorten aufgrund ihrer elektrostatischen Wechselwirkungen ein dreidimensionales Gitter bilden, wobei offenbar das kationische Molekül die Ausfällung des Silikats katalysiert, während das anionische den Vorgang steuert.

Sollte sich dieses Rezept als allgemeingültig erweisen, so wird es den Wissenschaftlern ermöglichen, eine unendliche Zahl von Varia-

tionen auszuprobieren und so neue Wege zu nanostrukturierten Materialien nach dem Vorbild der Kieselalgen zu finden.

(2003)

### Literaturhinweise

N. Kröger et al., *Science*, 2002, **298**, 584.

N. Poulsen et al., *Proc. Natl. Acad. Sci USA*, 2003, **100**, 12087.

## Vergoldete Kieselalgen

Diatomeen sind bekannt für die erstaunlich vielfältigen und subtilen Muster ihrer aus Silikat aufgebauten Schalen, die nach Art einer Pralinenschachtel aus einem flachen Boden und einem darüber greifenden Deckel bestehen. Beide Schalteile der mikroskopisch kleinen Einzeller sind mit feinsten Poren ausgestattet, deren Anordnung in spitzenartigen Mustern genetisch determiniert ist. Dieses Phänomen der Biomineralisation erweckt den Neid der Nanotechnologen, die auch gerne imstande wären, unter milden Synthesebedingungen ebenso subtile, programmierbare, und gleichzeitig widerstandsfähige Nanostrukturen zu erzeugen.

Die Erforschung der genauen biochemischen Mechanismen erwies sich als außerordentlich schwierig, und an biomimetische Prozesse in technischem Maßstab ist im Moment noch nicht zu denken. Andererseits könnte man ja vielleicht von den bereits existierenden, natürlichen Nano-Schachteln ausgehen, und diese chemisch modifizieren. Forscher in den USA haben jetzt demonstriert, dass diese Vorgehensweise tatsächlich gut funktioniert.

Die Arbeitsgruppe von Chad Mirkin an der Northwestern University in Evanston (US-Bundesstaat Illinois) züchtete zwei verschiedene Arten von Kieselalgen (*Synedra* und *Navicula*) und präparierte deren Schalen, indem sie das gesamte organische Material in einem starken Säurebad wegätzten. Um die verbleibenden anorganischen Skelette chemischen Modifikationen zugänglich zu machen, setzten die Forscher sie mit einem üblichen Aminosilan-Reagenz um. An die nun vorliegenden freien Amin-Funktionen kuppelten sie DNA-Oligonucleotide. An diese konnten sie natürlich beliebige andere Agentien anhängen, vorausgesetzt sie besitzen den entsprechenden, komplementären DNA-Strang. Um die erfolgreiche und flächendeckende

Modifizierung der Diatomeenschalen im Elektronenmikroskop besser sichtbar zu machen, entschieden sie sich zunächst erst einmal für DNA-gekoppelte Gold-Nanoteilchen. Tatsächlich konnten sie nicht nur eine, sondern nach und nach bis zu sieben Gold-Schichten auf das anorganische Substrat aufbringen und elektronenmikroskopisch nachweisen.

Da das ganze Verfahren mit beiden Arten gleichermaßen problemlos abläuft, hoffen die Forscher, dass es sich verallgemeinern lässt. Unter den Tausenden von Diatomeen-Arten der Natur gibt es eine reiche Auswahl an Nanomustern. Wenn sich an jede von ihnen über die Amino-Funktionalisierung viele verschiedene (bio)chemische Funktionen (zum Beispiel auch Antikörper, Enzyme, molekulare Sensoren...) anbinden lassen, gibt es nahezu unendlich viele Möglichkeiten, darunter mit Sicherheit auch viele, die sich in der Nanotechnologie als nützlich erweisen werden.

(2004)

#### **Literaturhinweise**

N. L. Rosi et al., *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2004, **43**, 5500.

### **Was danach geschah**

Das Verständnis und die Nutzbarmachung der subtilen Architektur der Diatomeenschalen ist immer noch eine der größten und wichtigsten Herausforderungen an der Grenzfläche zwischen Biologie und Nanotechnologie. Im Jahr 2007 berichtete Krögers Arbeitsgruppe zum Beispiel von der Immobilisierung eines Proteinmoleküls auf einer solchen Schale, und die Gruppe von Hans G. Börner am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Potsdam erzeugte Bio-Glasfasern aus Diatomeen-Silikat und Peptiden.