

Fortsetzung von der vorigen Seite

## „Brauchen ein Umdenken“

Biodiversität oder das Einbringen neuer Substanzen wie Mikroplastik in unsere Umgebung. Mittlerweile greifen wir in sämtliche Kreisläufe des Systems Erde ein. Diese Verflechtung unseres Handelns mit den biogeophysikalischen Prozessen unseres Planeten erfordert eine ganz neue, interdisziplinäre Betrachtung des Mensch-Erde-Systems.

**Auch im neuen Global-Tipping-Points-Bericht, an dem Sie mitgewirkt haben, ist ja deutlich geworden, wie wichtig es ist, Sozial- und Geisteswissenschaften mit einzubeziehen, wenn es darum geht, Lösungen zu finden und damit eine Wende zum Besseren. Welche Rolle spielt das in Ihrer Forschung?**

Wir können die Klimakrise nur gemeinsam lösen. Ich bin davon überzeugt, dass wir die enge Zusammenarbeit aller Wissenschaftsdisziplinen brauchen, nicht nur um die zugrunde liegenden Dynamiken zu verstehen, sondern insbesondere auch um mögliche Lösungswege aufzuzeigen. Daher arbeiten wir in der Klimafolgenforschung seit mehreren Jahren verstärkt in interdisziplinären Teams zusammen. So auch für den Kippunkte-Bericht, an dem mit mir mehr als 200 Forschende aus aller Welt mitgewirkt haben. Der Bericht beschreibt zum einen die Risiken, die aus dem möglichen Überschreiten von Kippunkten im Erdsystem erwachsen, zum anderen skizziert er Chancen, wie gesellschaftliche Kippdynamiken den notwendigen transformativen Wandel hin zum raschen Ausstieg aus fossilen Brennstoffen und zur Verringerung der Emissionen aus der Landnutzung beschleunigen können.

**Ihre junge Generation hat ein besonderes Interesse, dass die Klimawandelrisiken sich möglichst schnell im öffentlichen Bewusstsein festsetzen und so zum notwendigen Handeln führen. Was wollen Sie tun?**

Als Wissenschaftlerin ist meine primäre Aufgabe natürlich zu forschen, neue Erkenntnisse zu schaffen und so hoffentlich dazu beizutragen, Handlungsoptionen zu entwickeln. Gleichzeitig empfinde ich persönlich auch eine große Verantwortung, unsere Erkenntnisse zu kommunizieren. Denn der Klimawandel und seine Folgen betreffen alle Menschen. Und jeder Einzelne von uns kann auch Teil der Lösung sein. Leider wird im Alltag der Klimaschutz als komplexe, dauerhafte Herausforderung von aktuellen Krisen immer wieder in den Hintergrund gedrängt. Dieses kurzfristige Denken können wir uns aber einfach nicht leisten: Wir wissen, dass die schlimmsten Folgen der Klimakrise vor allem von den kommenden Generationen zu tragen sein werden. Es ist wichtig, dass diese langfristigen Auswirkungen in unser Alltagsdenken vordringen: Wir brauchen dringend ein Umdenken in unserem Verständnis und in unserem Umgang mit den relevanten Zeitskalen. Letztlich geht es um die Frage, welchen Planeten wir hinterlassen wollen. Wichtig ist mir daher auch, das Vertrauen in die Wissenschaft zu stärken. Ein Schritt hierzu ist aus meiner Sicht, dass wir nicht nur verstärkt unsere wissenschaftlichen Ergebnisse und Erkenntnisse kommunizieren, sondern gleichzeitig auch unsere Methoden erklären und transparent zugänglich machen. Daher sind zum Beispiel der Code und die Daten aus unseren numerischen Modellen für jeden frei verfügbar.

**Welche von den immer dringenderen Empfehlungen der Wissenschaft sehen Sie noch nicht ausreichend berücksichtigt?**

Ich sehe im Moment als größte Herausforderung, dass wir den notwendigen gesellschaftlichen Wandel deutlich beschleunigen müssen, um die negativen Folgen der Klimaerwärmung so gut es irgend geht zu begrenzen. Grundsätzlich sind eine Reihe von Ländern zum Beispiel beim Umbau ihrer Energiesysteme hin zu erneuerbaren Energien auf dem richtigen Weg – aber der Wandel läuft insgesamt immer noch zu langsam. Wie sich der entsprechende Übergang zu einer nachhaltigeren Lebensweise ausreichend schnell und dennoch sozial verträglich gestalten lässt, ist daher sicher die zentrale Frage. Dabei wissen wir, dass eine globale Transformation hin zu Netto-Null-Emissionen nicht nur das Klima schützt, sondern auch die globale Ungleichheit reduzieren würde. Aber ich bin überzeugt, dass uns dieser Wandel gelingen kann – wenn sich die Gesellschaft gemeinsam um Lösungen bemüht und die Politik den dafür notwendigen, sozial verträglichen Rahmen setzt. Dann können wir unserer Verantwortung für die Zukunft unseres Planeten doch noch gerecht werden.

Die Fragen stellte **Joachim Müller-Jung**.

Gut durchlüftet und voller Fledermäuse: die Cueva de los Murciélagos nahe der Ortschaft Albuñol in der Provinz Granada

Foto Blas Ramos Rodríguez

# Die Grasleute von Granada

In einer Höhle überdauerte fragiles Flechtwerk aus der Steinzeit – sogar unbenutzte Sandalen.

Von Diemut Klärner

Steine waren der Werkstoff der Steinzeit, daher heißt sie ja auch so. Leicht zu bearbeiten und vielseitiger verwendbar war aber pflanzliches Material. Dass Frühmenschen aber bereits vor 300.000 Jahren hölzerne Lanzen als Jagdwaffen verwendet haben, bezeugt ein Fund aus Schöningen in Niedersachsen. Solche Objekte sind allerdings rar, denn sie überdauern nur unter besonderen Bedingungen. In der Cueva de los Murciélagos („Höhle der Fledermäuse“) im Süden der spanischen Provinz Granada blieb ein außergewöhnliches Sortiment erhalten, das neben ein paar Werkzeugen aus Holz vor allem Flechtarbeiten enthält. Als Mitte des 19. Jahrhunderts in dieser Höhle Bleiglanz abgebaut wurde, entdeckten die Bergleute dort eine Reihe von Bestattungen samt Grabbeigaben. Allerdings räumten sie den fraglichen Höhlenabschnitt ohne viel Federlesens frei und brachten dabei unzählige urgeschichtliche Artefakte aus Pflanzenmaterial nach draußen. Vieles wurde verfeuert oder zerstreut, einiges aber auch mit nach Hause genommen.

Erst zehn Jahre später kam der Archäologe Manuel de Góngora y Martínez nach Granada, um die Höhle zu besichtigen und mit Bergleuten und Anwohnern zu sprechen – nicht zuletzt um von den Funden vielleicht noch etwas zu retten. Dabei tauchten Keramikscherben auf, Klingen aus Quarz und Feuerstein, eine geschliffene Steinaxt und Ahlen aus Knochen. Neben etlichen Schmuckstücken aus durchbohrten Muscheln und Wildschweinzähnen fand sich sogar ein goldenes Diadem. Aus Sicht der Archäologen aber nicht minder wertvoll waren verschiedenartige Flechtarbeiten, manche in perfektem Erhaltungszustand. Denn in der Cueva de los Murciélagos hatten Pilze und

Bakterien kaum eine Chance, sich über organisches Material herzumachen. Zum einen weil das Klima in der Region seit jeher recht trocken ist. Zum anderen erzeugt die Topographie einen Wind, der die Höhle optimal durchlüftet.

Wissenschaftler um Francisco Martínez Sevilla von der Universidad de Alcalá in Alcalá de Henares und Maria Herrero Ojalvo von der Universität Autònoma de Barcelona in Bellaterra nahmen kürzlich einige Funde genauer unter die Lupe, als es ihren Vorgängern möglich gewesen war. So lassen sich Radiokarbondatierungen heute an nur einem halben Milligramm Fundmaterial durchführen, und ein tragbares digitales Mikroskop dokumentiert Objekte, ohne sie viel zu bewegen.

Wie Francisco Martínez Sevilla und seine Kollegen in „Science Advances“ berichten, ließen sich drei zierliche Körbchen – keines mehr als etwa zehn Zentimeter breit und doppelt so hoch – eindeutig als Produkte der Mittelsteinzeit datieren. Rund 7400 Jahre vor Christus, als die Bewohner der Iberischen Halbinsel noch als Jäger und Sammler lebten, gab es unter ihnen offenbar schon versierte Korbflechterinnen oder Korbflechter. Wie Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop zeigen, dienten Blätter des Federgrases *Stipa tenacissima* als Flechtmaterial.

Von Natur aus flach wie bei den meisten Gräsern rollen sich dessen Blätter bei trockenem Wetter derart ein, dass sie die Verdunstung von Wasser minimieren. In diesem Zustand wurde das Esparto genannte Gras bis in die jüngste Vergangenheit für Flechtarbeiten genutzt. In Spanien hat

man es traditionell im Sommer gesammelt und für manche Zwecke vor dem Trocknen noch eine Weile in wassergefüllten Gruben verstaubt, sogenannten Rotten. Dort konnten sich Bakterien über unerwünschte Blattbestandteile hermachen. Ehe sich das getrocknete Esparto-Gras dann zu Körben, Schnüren oder Sohlen von Espadrilles verarbeiten ließ, musste es abermals in Wasser eingeweicht werden, um es wieder biegsam zu machen.

Als in Spanien die Landwirtschaft Fuß gefasst hatte, wurde Esparto-Gras bereits bemerkenswert vielseitig verwendet. Das bezeugen Funde, die auf unterschiedliche Zeitpunkte zwischen circa 5100 und 4300 Jahre vor Christus datiert wurden. Aus diesem Abschnitt der Jungsteinzeit stammt ein Sortiment von kleinen und größeren Körben, die mit ganz unterschiedlichen Flechttechniken hergestellt und meist mehr oder weniger stark beschädigt sind. Einige Fragmente lassen sich nicht einmal eindeutig interpretieren, es könnte sich auch um Überreste geflochtener Matten handeln.

Wie die Körbchen aus der Mittelsteinzeit bestehen fast alle Korbflechterarbeiten der Jungsteinzeit aus naturbelassenen Esparto-Blättern. Schnüre, ob gedreht oder zopfartig geflochten, wurden dagegen aus weichgeklopftem Esparto-Gras angefertigt. Womöglich kam dabei ein Holzhammer wie jener aus Cueva de los Murciélagos zum Einsatz. Er wurde auf etwa 4500 Jahre vor Christus datiert, ist aus Olivenholz mit einem waagrecht bestehenden Ast als Stiel. Beim Weichklopfen wird die Blattstruktur des Esparto-Grases zerstört,

die langen Faserbündel aus Zellulose bleiben jedoch intakt. Das machte Schnüre aus diesem Material biegsam und geschmeidig – und daraus angefertigte Sandalen entsprechend komfortabel.

Die insgesamt 22 Sandalen aus der Cueva de los Murciélagos sind das älteste Schuhwerk, das bislang in Europa entdeckt wurde. Obwohl sie alle mehr oder minder beschädigt sind, lässt sich das funktionale Design noch erkennen: Aus einigen Sandalensohlen steht ein Büschel Esparto hervor, das wohl – ähnlich wie der Zehensteg unserer Flip-Flops – zwischen den ersten und zweiten Zeh geklemmt wurde. Seitlich an den Sohlen waren außerdem geflochtene Schnüre angebracht, mit denen sich die Sandalen am Knöchel fixieren ließen.

Bedauerlicherweise konnte kein Archäologe die steinzeitliche Flechtkunst an ihrem ursprünglichen Fundort studieren. Informationen aus dem Kontext der Grabstätte sind unwiederbringlich verloren gegangen. Bei manchen der später wieder aufgespürten Gegenstände ist nicht einmal klar, ob es sich überhaupt um Grabbeigaben handelt. Am sichersten scheint das bei den auffallend gut erhaltenen Körbchen aus der Mittelsteinzeit, von denen sich einige durch merkwürdigen Inhalt wie Haare oder mineralische Pigmente auszeichnen.

Als Manuel de Góngora y Martínez an der Cueva de los Murciélagos eintraf, waren die Grabstätten in der Höhle längst geplündert und ein Großteil der steinzeitlichen Flechtarbeiten zerstört. In den 1868 veröffentlichten Ergebnissen seiner Nachforschungen beschreibt Góngora zum Beispiel, dass die in der Höhle bestatteten Personen außer Sandalen auch Kleider und Hüte aus Esparto-Gras trugen. Wenn sie tatsächlich so ausgestattet waren, so ist außer den Sandalen freilich nichts davon erhalten geblieben.

Bei dieser Fußbekleidung fällt übrigens auf, dass manche der Flechtsandalen völlig unbenutzt aussehen, andere aber ziemlich abgetragen. Das könnte darauf hindeuten, dass einige der Toten völlig neu eingekleidet, andere dagegen in ihrer Alltagskleidung bestattet wurden. Von den archäologischen Schätzen der Cueva de los Murciélagos, die es bis in die Museumssammlungen geschafft haben, erwarten sich die Archäologen jedenfalls noch weitere Einblicke in das Leben prähistorischer Gemeinschaften.

## Wissen in Kürze

### Tabletten statt Spritzen

Ringförmige Moleküle aus mehreren Aminosäuren, sogenannte cyclische Peptide, sind vielversprechende Medikamentenkandidaten. Denn sie binden gezielt an Enzyme oder beeinflussen im Körper Wechselwirkungen zwischen Proteinen, die im menschlichen Organismus bei einigen Krankheiten eine Rolle spielen. Allerdings werden diese Peptide, wenn Patienten sie in Tabletten einnehmen, in Magen und Darm zu schnell abgebaut oder kaum aufgenommen. Sie müssen daher gespritzt werden. Nun hat die Forschergruppe um Christian Heinis in der Fachzeitschrift „Nature Chemical Biology“ eine Synthesstrategie vorgestellt, mit der sie mehrere Tausend cyclische Peptide mit unterschiedlichen Aminosäuresequenzen zusammensetzen können und für die zwischendurch keine Reinigungsschritte erforderlich waren. zbi

### Uralte Distanzwaffe

Pfeil und Bogen kamen im alten Amerika erst spät auf. Die bisher frühesten Hinweise gab es in Nordchile, und sie sind zwischen 3500 und 1500 Jahre alt – während der älteste sichere Beleg für einen Bogen in der Alten Welt auf 16.000 Jahre kommt. Nun haben Forscher um Luis Flores-Blanco von der University of California in Davis in „Quaternary International“ durch Analyse von 1179 steinernen Projektilspitzen im Becken des Titicacasees Hinweise darauf gefunden, dass das Bogenschießen dort bereits vor rund 5000 Jahren Einzug hielt. Das machen sie an einer plötzlichen Verkleinerung der Steinspitzen fest, die nun nicht mehr zu Speeren oder Lanzen, sondern eben zu Pfeilen gehören. Überdies sei die Einführung der neuen Waffentechnologie im Titicaca-Becken mit einem Anstieg an gesellschaftlicher Komplexität einhergegangen, berichten die Forscher. Die Zahl der Siedlungen nahm ab, ihre Größe dagegen stieg, und die Verwendung exotischer Güter wie Obsidian boomte. Obwohl es also mehr Grund und Gelegenheit zum Streit gab, wurde der offenbar aber nicht gewaltsam ausgetragen, denn die Hinweise auf interpersonale Gewalt nahmen über jenen Epochenwechsel hinweg nicht zu. Vielleicht weil die neue Distanzwaffe vor Versuchen dazu abschreckte. UvR

### Quecksilber im Meer

Der größte Teil des Quecksilbers in den Ozeanen geht auf Aktivitäten der Menschen zurück. Bisher war unklar, welchen Anteil natürliche Quellen im Meeresboden haben. Ein Forschungsteam aus Frankreich, Spanien, Deutschland und den USA hat die Flüssigkeiten und Schwebstoffe analysiert, die aus vulkanischen aktiven Gebirgszügen in der Tiefsee quellen. Daraus haben die Forscher die Mengen abgeschätzt, die weltweit natürlicherweise ins Wasser geraten: 1,5 bis 65 Tonnen pro Jahr, schreiben sie in „Nature Geoscience“. Bisher war man von bis zu 2000 Tonnen ausgegangen. Durch menschliche Aktivitäten gelangen heute jährlich rund 3100 Tonnen Quecksilber in die Umwelt, etwa durch Bergbau oder Verbrennung von Kohle. Im Vergleich zur vorindustriellen Zeit hat sich die Quecksilberkonzentration im Ozean etwa verdreifacht. Diese lasse sich wieder senken, schreiben die Autoren, und damit auch die Konzentration des giftigen Schwermetalls in Fisch. zbi



Den mesolithischen Körben sieht man die 9500 Jahre kaum an. Foto Matermur Project

# Moleküle proben den Quantenspuk

Zweiatomiges Calcium-Monofluorid gehorcht jetzt Einsteins seltsamer Fernwirkung

Die Verschränkung ist wohl das seltsamste Phänomen der Quantentheorie. Zwei miteinander verschränkte Teilchen bleiben quasi wie ein siamesisches Zwillingpaar, unabhängig davon, wie weit sie voneinander entfernt sind: Bestimmt man durch eine Messung die Eigenschaft eines Teilchens, wird augenblicklich auch der Quantenzustand des Partners festgelegt. Im Labor und in Freilandversuchen ist die Gültigkeit dieses „spukhaften“ Phänomens, das Albert Einstein noch äußerst skeptisch war, mit Photonen, Atomen und anderen Quantenteilchen auf Herz und Nieren getestet worden. Auch gelang es bereits, supraleitende Quantenobjekte sowie einzelne Lichtteilchen und Atomwolken, aber auch mikrometergroße Objekte in dieser Weise quantenmechanisch zu verkoppeln.

Beim Versuch, zwei Moleküle in den verschränkten Zustand zu überführen, waren Physiker bislang allerdings gescheitert. Der Grund ist der im Vergleich zu Atomen komplizierte Aufbau selbst kleinerer Mo-

leküle und die große Zahl an möglichen sogenannten Freiheitsgraden. Doch nun ist es gleich zwei amerikanischen Forschergruppen gelungen, diese noch offene Lücke zu schließen, was erstmals die Anwendungen von Molekülen in den Quantentechnologien ermöglicht.

Weil Moleküle aus mehreren Atomen zusammengesetzt sind und sich nicht nur in drei Raumrichtungen bewegen, sondern auch schwingen sowie um ihre Achse rotieren können, sind sie deutlich schwerer zu handhaben als Atome. Man benötigt besondere Techniken, um sie zu kontrollieren und zu manipulieren. Dabei laufen die Physiker stets Gefahr, die inneren Freiheitsgrade anzuregen und so die Moleküle aufzuheizen. Ein Hindernis, das den Weg zu verschränkten Molekülpaaren bisher versperrt hat.

Diese Hürde haben jetzt sowohl die Physiker um Yicheng Bao von der Harvard University als auch die Forscher um Connor Holland von der Princeton University

mit zweiatomigen Calcium-Monofluorid-Molekülen (CaF) gemeistert. Dazu nutzen beide Gruppen den Umstand, dass Calcium-Monofluorid ein starkes elektrisches Dipolmoment besitzt. Kommen sich zwei solche polare Moleküle nahe, ziehen sie sich gegenseitig an und bilden ein stabiles Paar.

Doch zunächst mussten bei Forscher-teams die in alle Richtungen umherfliegenden CaF-Moleküle bändigen. Mit Laserstrahlen wurden diese zunächst bis zum Stillstand abgebremst und dann einzeln in jeweils eine sogenannte optische Pinzette gesperrt, um sie so räumlich zu fixieren. Erst vor Kurzem war es Forschern um John Doyle aus Harvard gelungen, einzelne Calcium-Monofluorid-Moleküle auf diese Weise zu präparieren.

Anschließend regten die Forscher mit Mikrowellenpulsen gezielt bestimmte Rotationsschwingung in den gefangenen Molekülen an. Dann folgte der entscheidende Schritt: Mit einer Folge weiterer Mikrowel-

lenpulse verschränkten sie die Rotationszustände je zweier benachbarter Moleküle, die über Dipolkräfte aneinander gebunden waren. Dass die Molekülpaare tatsächlich ein für die Verschränkung typisch korreliertes Verhalten aufwiesen, demonstrierten die Forscher anhand geeigneter Messungen: Wurde der Rotationszustand eines Moleküls ermittelt, lag sofort auch derjenige des Partners fest. Während die Forscher um Bao eine Verschränkungsgrad von 89 Prozent erreichten, erzielten Holland und seine Kollegen sogar 95 Prozent.

Dank der Ergebnisse aus Harvard und Princeton, die beide im Fachmagazin „Science“ veröffentlicht wurden, können Moleküle nun auch für das Quantencomputing und weitere Anwendungen genutzt werden, bei denen die Verschränkung eine große Rolle spielt. Bislang verwendet man als Quantenbits, wie man die elementaren quantenphysikalischen Informationsträger nennt, hauptsächlich geladene Atome,

die man in Ionenfallen festhält, oder supraleitende Resonatoren, die man mit flüssigem Helium kühlt. Moleküle als Träger von Quanteninformationen haben den großen Vorteil, dass sie nicht nur zwei Quantenzustände gleichzeitig einnehmen können, sondern gleich mehrere, je nachdem wie es rotiert oder vibriert. Ein Quantencomputer auf Basis verschränkter Moleküle sollte deshalb eine noch höhere Rechenleistung erreichen.

Dass man stark korrelierte Moleküle logisch verschalten kann, haben die Forscher aus Harvard anhand eines sogenannten iSWAP-Gatters demonstriert. In diesem Quantenschaltkreis werden die eingehenden Werte der Quantenbits – in diesem Fall die beiden Rotationszustände des verschränkten Molekülpaars – einfach vertauscht. Mithilfe dieses iSWAP-Gatters lassen sich weitere Quantengatter verwirklichen, die bereits in vielen Quantenalgorithmen vorgesehen sind. MANFRED LINDINGER