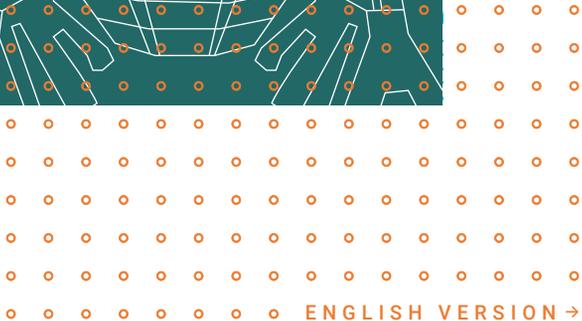


**HIGHLIGHTS**  
**2018** AUS DEM JAHRBUCH DER  
MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT





# Editorial

Jedes Jahr legt die Max-Planck-Gesellschaft einen wissenschaftlichen Tätigkeitsbericht in Form des Jahrbuchs als Rechenschaftslegung gegenüber der Öffentlichkeit und ihren Zuwendungsgebern vor. Im Zentrum stehen dabei die Fragen: Wo stehen wir und wo wollen wir hin? Die Max-Planck-Institute sind gebeten, aus ihren wissenschaftlichen Arbeiten, soweit diese zu einem gewissen Abschluss gekommen sind, jeweils eine Arbeit oder ein Projekt herauszugreifen, das sich für eine Darstellung im Jahrbuch eignet. Die Jahrbuch-Beiträge aller Max-Planck-Institute werden im Internet unter [www.mpg.de/jahrbuecher](http://www.mpg.de/jahrbuecher) veröffentlicht.

Für den hier vorliegenden gedruckten Jahrbuchband wurden 15 aus Sicht der Wissenschaftskommunikation besonders geeignete und gerade auch für den Nicht-Fachmann interessante Beiträge herausgesucht und journalistisch aufbereitet. Zu den Highlights des Jahrbuchs 2018 gehören zum Beispiel Forschungsergebnisse im Bereich des Protein-Engineerings, die zur Entwicklung künstlicher Biosensoren für die schnelle und selbstbestimmte Kontrolle von Blutwerten führen sollen und große Erleichterung für viele Patienten mit Stoffwechselerkrankungen bringen können. Oder die Idee, Kohlendioxid als alternative Kohlenstoffquelle für die Produktion von Kraftstoffen bis zu hochwertigen Feinchemikalien zu erschließen, sogenannte „Power-to-X“-Konzepte. Und schließlich die Bemühungen eines Teams von Rechtswissenschaftlern, das Geflecht aus EU-Richtlinien, nationalem Recht und wissenschaftlichen Regelwerken zu entwirren, die zu den „Commentaries on European Contract Laws“ geführt haben, die nun als wissenschaftliche Basis für ein modernes europäisches Vertragsrecht dienen können.

Ein Blick in das Jahrbuch 2018 lohnt sich auf alle Fälle!

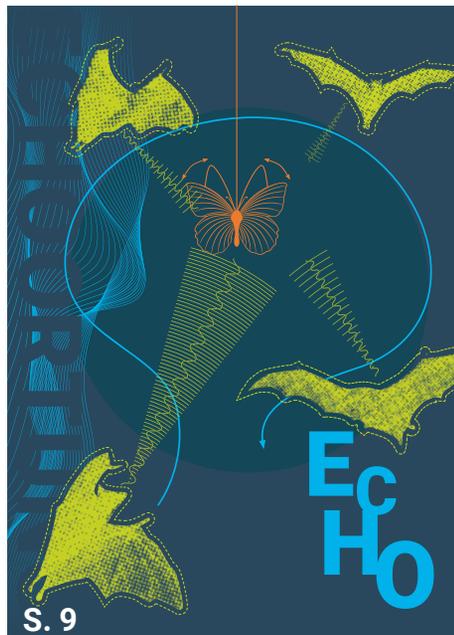
# Inhalt



**1** Biosensor für den Bluttest zuhause S. 4

**2** Pflanzen mit Gedächtnis S. 7

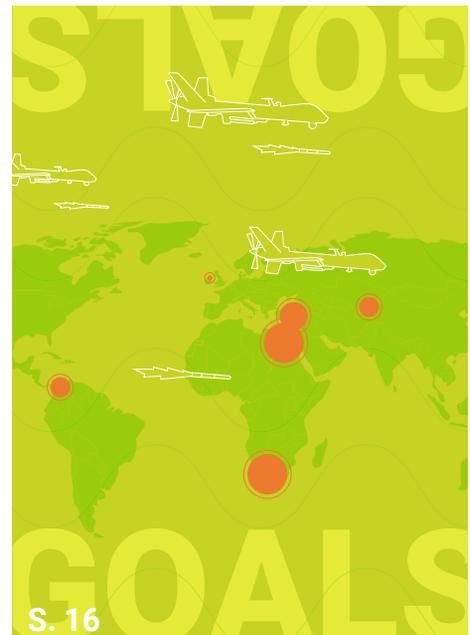
**3** Akustische Tarnkappen und Lauschangriffe S. 9



**4** Blick in die Maschinerie eines Massemonsters S. 13

**5** Wege aus dem Terrorismus S. 16

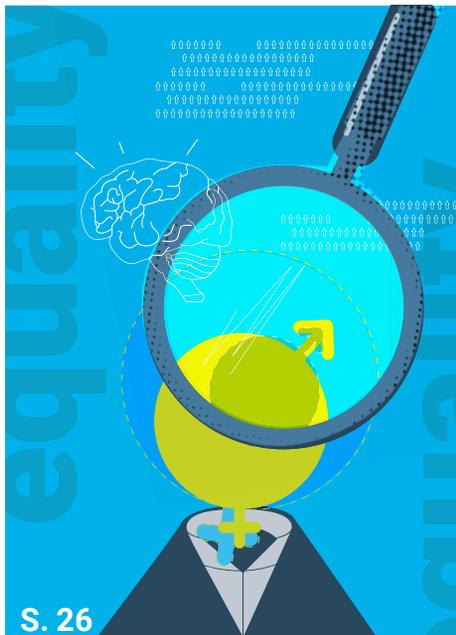
**6** CO<sub>2</sub> – ein Rohstoff für die Chemieproduktion S. 20



**7** Appetitanreger im Gehirn S. 23

**8** Psychologischer Trick für mehr Chancengleichheit S. 26

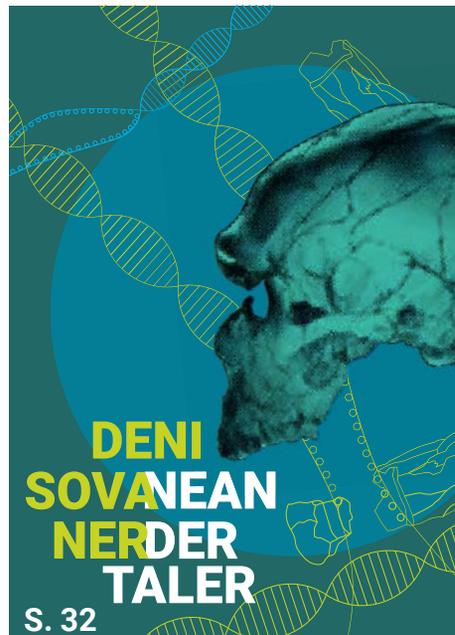
**9** 3D-Metalldruck im Pulverbett S. 29



**10** Rendezvous in  
der Steinzeit S.32

**11** Wildwest  
im Internet S.35

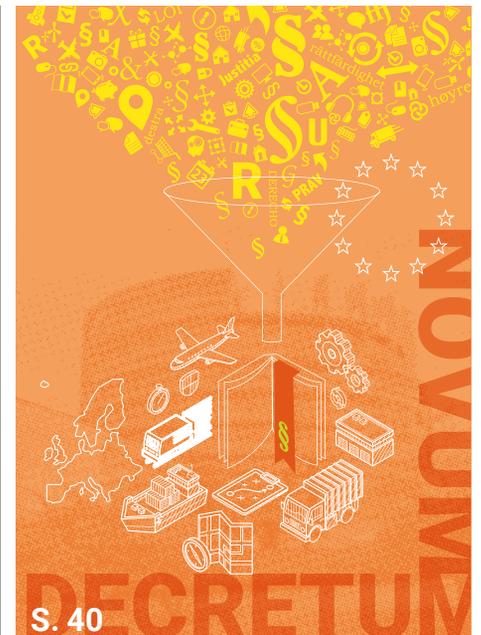
**12** Hoffnung für  
Neuropathie-  
Patienten S.37



**13** Ein roter Faden  
im Labyrinth der  
europäischen  
Vertragsrechte S.40

**14** Wasser, Eis und  
Schnee – Akteure  
im arktischen  
Klimawandel S.43

**15** Im Kreißsaal  
eines Planeten S.47



# 1 Biosensor für den Bluttest zuhause

**KAI JOHNSON**  
↳ Max-Planck-Institut  
für medizinische Forschung,  
Heidelberg

Einfach essen, was schmeckt? Das ist bei vielen Stoffwechselerkrankungen absolut tabu. Strenge Diät und regelmäßige Labortests gehören zum Alltag – eine psychische und soziale Belastung. Unsere neuesten Forschungsergebnisse könnten bald für diese und viele andere Patienten große Erleichterung bringen: „Protein-Engineering“ ermöglicht den Entwurf von künstlichen Biosensoren für die schnelle und selbstbestimmte Kontrolle von Blutwerten.

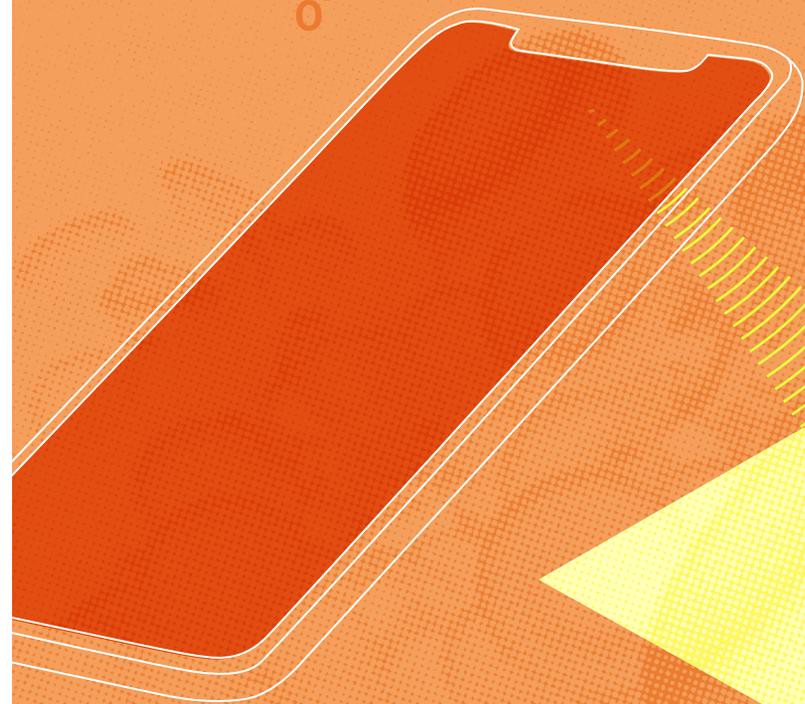
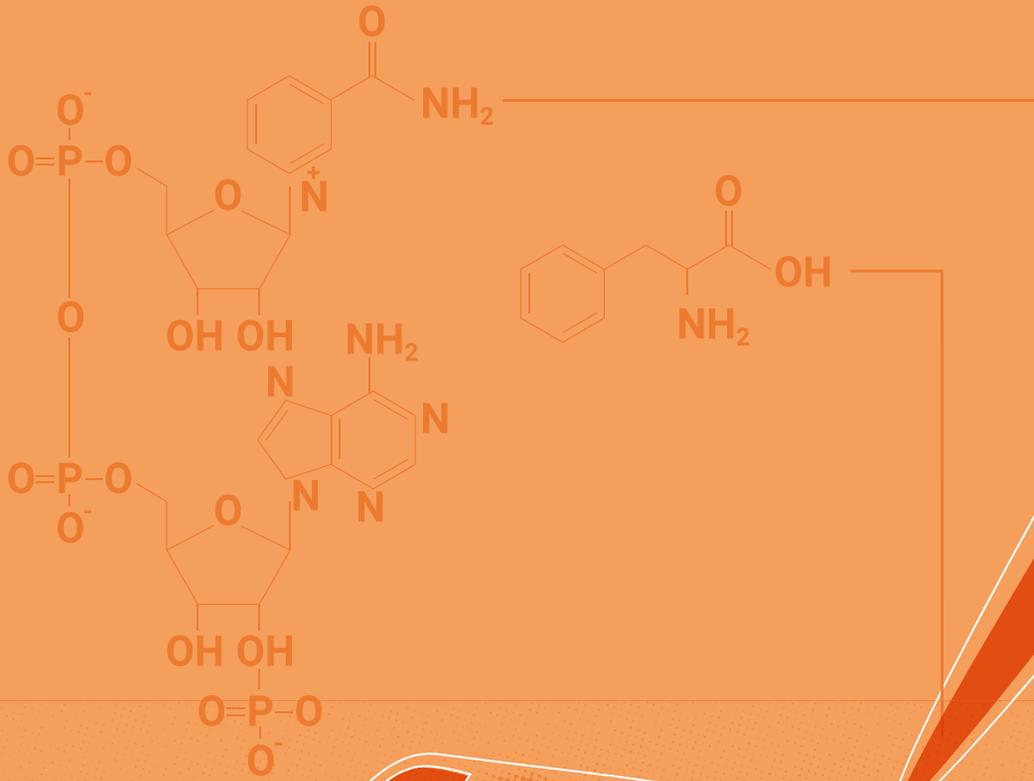
**D**ie Stoffwechselerkrankung Phenylketonurie erkennt der Arzt in der Regel in den ersten Lebenstagen eines Neugeborenen. Bereits seit den 1970er Jahren gibt es die Untersuchung auf die erbliche Erkrankung, die eines von 10.000 Kindern betrifft. Weil das Enzym Phenylalanin-Hydroxylase nicht oder nur eingeschränkt funktionsfähig ist, sammelt sich die Aminosäure Phenylalanin im Blut an und kann das im Wachstum befindliche Gehirn schädigen. Für den Alltag bedeutet die Erkrankung einen Verzicht auf die meisten natürlichen Lebensmittel. Stattdessen müssen die Betroffenen spezielle Eiweißersatz-Präparate zu sich nehmen, denn insbesondere die Aminosäure Tyrosin, die der Körper gesunder Menschen aus Phenylalanin herstellt, ist für uns lebenswichtig.

Für die Eltern erkrankter Kinder ist es wichtig, den Phenylalanin-Spiegel ihrer Kinder zu kennen. Nur dadurch können sie die Spielräume für ein normales Leben einschätzen. Hat das Kind auf dem Schulausflug etwa „gesündigt“? Morgens wurde in der Kita unerlaubt

ein Müsliriegel verspeist: Kann er Folgen haben? Wie groß muss die Einschränkung danach sein? Um den Blutwert zu erfahren, heißt es jedoch: ab zum Arzt zur Blutabnahme, dann zwei bis drei Tage auf das Ergebnis warten. Schulausflug und Müsliriegel sind bis dahin längst Geschichte.

## Blutwert zur Dosierung von Medikamenten

Für Erwachsene sind mittlerweile Medikamente zugelassen, die bei circa 30 Prozent der Patienten die Toleranz gegenüber Phenylalanin verbessern können. Auch hier ist der Laborwert ein wichtiges Werkzeug, um die richtige Dosierung einzustellen und die Wirksamkeit des Medikaments zu kontrollieren. Und für Schwangere, die an Phenylketonurie leiden, ist die strikte Meidung von Phenylalanin besonders wichtig, um das Ungeborene nicht zu gefährden.



NICOTINAMIDADENININDI  
NUKLEOTIDPHOSPHAT

Die Blutwerte patienten- und zeitnah überwachen zu können, würde für Patienten den Alltag und die Lebensqualität maßgeblich verbessern. Doch für ein solches Vorhaben müssen wir Forscher tief in die biochemische Trickkiste greifen: „Molekulares Engineering“ heißt die Technik, mit der wir eine solche Analyse in greifbare Nähe gerückt haben.

## Blutwerte aus dem Labor

Gegenwärtig werden Stoffwechselprodukte oder andere Biomarker in Blutproben meist durch herkömmliche Labormethoden nachgewiesen. Die meisten Versuche zur zeitnahen Diagnostik am Krankenbett oder der häuslichen Umgebung des Patienten zielen darauf ab, bestehende Analysetechnik zu verkleinern.

Unsere Methode hingegen geht einen grundsätzlich anderen Weg. Er beruht auf einem neuartigen molekularen Werkzeug, einem sogenannten semisynthetischen Biosensor. Dieser besteht aus einem Multifunktionsprotein und einem künstlichen Farbstoff, der an das Protein gekoppelt wird. Das Protein selbst besteht aus zwei Komponenten: einer Luciferase – einem Enzym, das blaues Licht ausstrahlt. Dieser Prozess ist beispielsweise für das Leuchten von Glühwürmchen verantwortlich. Die zweite Protein-Komponente ist ein Rezeptor für den Farbstoff. Der besondere Trick: Dieser Rezeptor kann den Farbstoff nur in Anwesenheit des Ko-Faktors Nikotinamidadenindinukleotid (kurz: NADPH) binden. Bindet nun der Farbstoff an den Rezeptor und gelangt so in die Nähe der Luciferase, ändert sich die Farbe des von der Luciferase ausgestrahlten Lichtes von Blau zu Rot. Diese Farbänderung ist sogar mit dem bloßen Auge sichtbar.

Durch molekulares Engineering entsteht also ein leuchtender Biosensor, der seine Farbe in Anwesenheit des Kofaktors NADPH verändert. In einer Enzymreaktion wird dann für jedes Molekül Phenylalanin ein Molekül NADPH gebildet. Dadurch ist nun die NADPH-Konzentration an die Farbe des Biosensors an die Phenylalanin-Menge gekoppelt. Die Menge des entstehenden NADPH ist also direkt proportional zur Phenylalanin-Konzentration. Die Farbänderung von Blau nach Rot lässt sich mittels einer einfachen Kamera messen und aus diesem Wert die Phenylalanin-Konzentration berechnen.

Derselbe Biosensor kann aber auch für den Nachweis anderer Stoffwechselprodukte genutzt werden, indem man in einer spezifischen Enzymreaktion für jedes Molekül des Stoffwechselproduktes wiederum ein

Molekül NADPH bildet. So konnten wir bereits zeigen, dass unser Sensor im Labor neben Phenylalanin auch für die Bestimmung der Blutkonzentrationen von Glutamat und Glukose eingesetzt werden kann – und es sind noch eine Vielzahl anderer Anwendungen denkbar.

Wie sieht nun der Test für den Patienten aus? Zuerst wird mit einer einfachen Lanzette, wie Diabetiker sie vom Zuckertest kennen, ein kleiner Tropfen Blut gewonnen. Anschließend wird ein kleiner Teil dieser Probe mit Enzymen verdünnt, die das enthaltene Phenylalanin in die entsprechende Menge NADPH umsetzen. Die Probe wird dann auf einen Teststreifen mit dem getrockneten Biosensor aufgetragen. Der Biosensor beginnt Licht auszustrahlen, das von einer Digitalkamera oder einem Smartphone aufgezeichnet wird. Das Verhältnis von Blau zu Rot, also die Farbe des Lichts, spiegelt direkt die Phenylalanin-Konzentration wider. Das gesamte Verfahren dauert nur rund zehn Minuten und könnte mit einfachen Hilfsmitteln direkt beim Patienten vor Ort durchgeführt werden. Die Genauigkeit der Ergebnisse ist vergleichbar mit der Genauigkeit moderner Standardmethoden in klinischen Laboren.

## Erfolgreiche Tests an Patienten

Unsere neue Analyseverfahren wurde bereits in Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern der Universitätskliniken Heidelberg und Lausanne an Patienten erfolgreich getestet. Diese ersten vielversprechenden Resultate sollen gegenwärtig in weiterführenden Studien in Heidelberg bestätigt werden. Die schnelle und einfache Handhabung sowie die Genauigkeit des Verfahrens prädestiniert es für zukünftige Anwendungen in der Diagnostik am Krankenbett oder zuhause. Selbstverständlich muss es hierfür weiter vereinfacht, automatisiert und getestet werden.

Die Aussicht, betroffenen Patienten ein neuartiges Hilfsmittel für ein selbstbestimmteres Leben zur Verfügung zu stellen, ist für uns eine besondere Motivation, diese Herausforderungen zu meistern. Aus wissenschaftlichen Gesichtspunkten ist unsere Arbeit zudem ein Beispiel dafür, wie die Synergie zwischen synthetischer Chemie und Protein-Engineering genutzt werden kann, um semisynthetische Biomoleküle mit völlig neuartigen Eigenschaften zu erzeugen. ○

# 2 Pflanzen mit Gedächtnis

**SALMA BALAZADEH**

↳ Max-Planck-Institut  
für molekulare  
Pflanzenphysiologie,  
Potsdam-Golm

Anders als die meisten Tiere können Pflanzen nicht weglaufen oder Schutz suchen. Hat eine Pflanze erst mal Wurzeln geschlagen, ist sie allen Widrigkeiten an ihrem Standort auf Gedeih und Verderb ausgeliefert. Pflanzen müssen daher über ausgeklügelte Überlebensstrategien verfügen. Wie diese funktionieren, erforschen meine Kollegen und ich am Max-Planck-Institut für molekulare Pflanzenphysiologie.

**S**chädlinge, Krankheiten, Frost, Hitze, Trockenheit, Lichtmangel oder Sturmschäden – Pflanzen müssen viele Herausforderungen meistern. Wie schaffen sie das? Und können sie dank einer einmal gemachten Erfahrung einer erneuten Gefahr besser widerstehen?

## Erinnerung an ungünstige Umweltbedingungen

Pflanzen verfügen tatsächlich über eine Art zelluläres Gedächtnis, das sie auf einen späteren Umweltstress vorbereitet. Bisher sind die molekularen Grundlagen dieses pflanzlichen Gedächtnisses aber nur ansatzweise bekannt. Im Mittelpunkt unserer Forschung stehen daher zwei Fragen: Welche Mechanismen nutzen Pflanzen, um die schwierige, aber überlebensnotwendige Balance zwischen Wachstum und Stresstoleranz zu regulieren, und wie können Pflanzen auf rasch wechselnde Umweltbedingungen reagieren? Gerade diese Aspekte sind für die Landwirtschaft und auch für den Erhalt und das Verständnis von Ökosystemen von großer Relevanz. So ließe sich beispielsweise der Einsatz von Pestiziden verringern.

Inzwischen haben wir mehrere molekulare Netzwerke identifiziert, die die pflanzliche Stresstoleranz sowohl in Modell- als auch Kulturpflanzen kontrollieren. In den kommenden Jahren wollen wir unsere Forschung verstärkt auch auf bisher wenig untersuchte Kulturpflanzen wie beispielsweise die ursprünglich in Südamerika angebaute Quinoa ausweiten, denn die Unterschiede zwischen den einzelnen Pflanzenarten sind groß. Wenn wir die Gründe dafür kennen, können wir leichter neue, an bestimmte Standorte angepasste Pflanzensorten züchten.

In der Modellpflanze *Arabidopsis thaliana*, zu Deutsch Ackerschmalwand, haben wir vor einigen Jahren ein Regulator-Gen identifiziert, das zum einen Toleranz gegenüber verschiedenen Stressfaktoren vermittelt, zum anderen aber auch das Wachstum kontrolliert. Wegen seiner Eigenschaft, stressbedingte Alterungsprozesse zu hemmen, nennen wir diesen Regulator JUNGBRUNNEN 1 (abgekürzt: JUB1).

Inzwischen haben wir die Gen-Netzwerke teilweise entschlüsselt, die von JUB1 kontrolliert werden. Dabei zeigte sich, dass JUB1 das Gleichgewicht des Wachstum beeinflussender Pflanzenhormone wie Gibberellinsäure und Brassinosteroide beeinflusst. Zu JUB1 ähnliche Gene gibt es auch in anderen Pflanzen,

zum Beispiel in Tomatenpflanzen. Dort spielt JUB1 eine zentrale Rolle für die Toleranz gegenüber Umweltstress. Weitere Versuche haben ergeben, dass eine leichte Steigerung der Aktivität von JUB1 eine Pflanze Trockenheit besser verkraften lässt, ohne dabei das Wachstum der Pflanzen selbst stark zu beeinflussen. Zurzeit sind wir dabei, die dafür zugrundeliegenden Vorgänge genauer zu analysieren.

## Hitzestress-Protein schützt vor hohen Temperaturen

Vor kurzem haben wir herausgefunden, wie Pflanzen gefährlich hohe Temperaturen überleben können, wenn sie zuvor einer leichten Temperaturerhöhung ausgesetzt waren. Eine Rolle bei diesem „molekularen Gedächtnis“ spielt dabei das in den Chloroplasten vorkommende Hitzestress-Protein HSP21, das andere Proteine vor zu hohen Temperaturen schützt. Das HSP21-Protein wird nach einem leichten Temperaturanstieg zunächst im Pflanzengewebe gebildet, dann aber wieder abgebaut, sobald die Temperatur sinkt. Die Geschwindigkeit, mit der HSP21 aus den Zellen verschwindet, ist ein Maß dafür, wie lange nach dem ersten schwachen Hitzestress die Pflanze eine weitere starke Wärmeperiode überlebt.

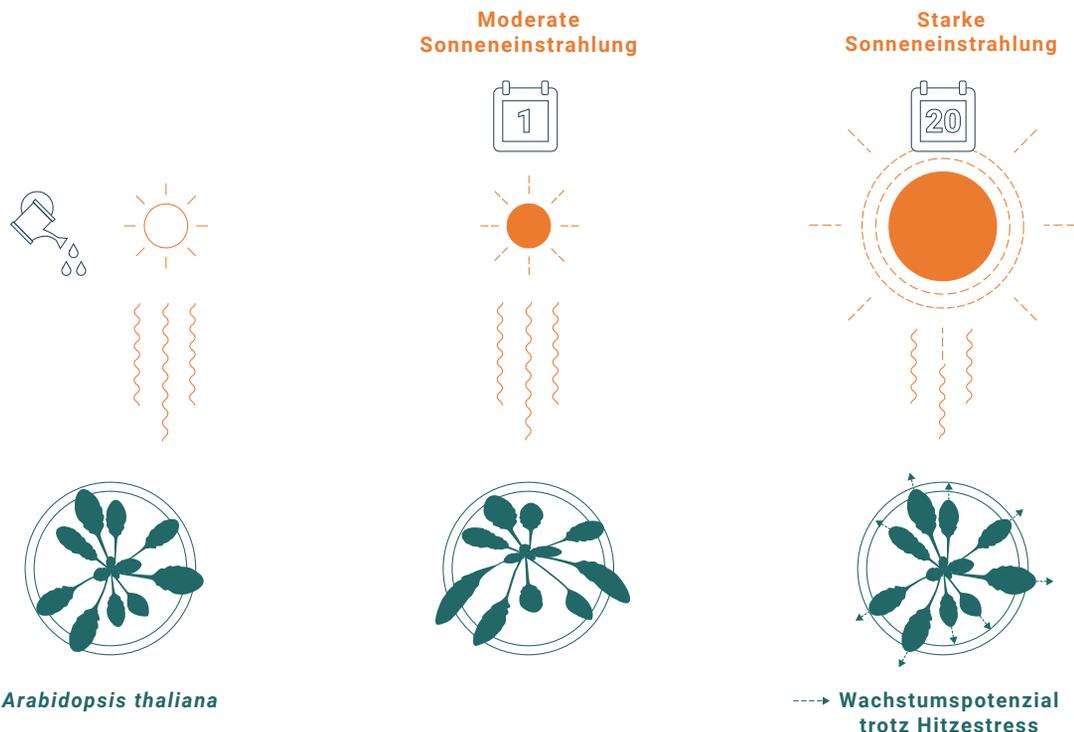
Ein Protein verdauendes Enzym, genannt FtsH6, ist maßgeblich am Abbau des HSP21-Proteins beteiligt.

Beide Proteine beeinflussen sich offenbar gegenseitig und könnten wichtige Elemente eines molekularen Hitzestress-Gedächtnisses von Pflanzen sein.

Auch ein biologischer Recyclingprozess, der unbrauchbare Proteine oder Zellbestandteile abbaut und wiederverwertet, scheint eine Rolle für das zelluläre Gedächtnis zu spielen. Mutanten mit defektem Zellrecycling besitzen nämlich ein besseres Temperaturgedächtnis als Pflanzen, bei denen dieser Mechanismus aktiv ist. Der Recyclingprozess ist auch am Abbau bestimmter Hitzeschockproteine beteiligt. In Mutanten, in denen das Recycling nicht mehr funktioniert, bleiben die Hitzeschockproteine länger erhalten, was dem Thermogedächtnis förderlich sein könnte.

Jedes Jahr gehen Tausende Hektar Agrarflächen verloren. Wir müssen deshalb auf den verbleibenden Flächen an das jeweils herrschende Klima angepasste ertragreiche Kulturpflanzenarten züchten und anbauen. Die Aufklärung der zellulären Vorgänge, die die Stresstoleranz von Pflanzen kontrollieren, ist für die Züchtung von Nutzpflanzen wegen des zu erwartenden Klimawandels und der ständig wachsenden Weltbevölkerung enorm wichtig. In den kommenden Jahren wollen wir daher die molekularen Netzwerke der pflanzlichen Reaktion auf Hitze- und Trockenstress weiter entschlüsseln und die einzigartigen Überlebensformeln der Pflanzen nach und nach verstehen, um sie für uns Menschen und unsere Umwelt nutzbar zu machen. o

Dank ihres zellulären Gedächtnisses an leicht ungünstige Umweltbedingungen wie Trockenheit und Hitze (Mitte) kann eine Pflanze einen nachfolgenden, stärkeren Stress überleben (rechts).



# 3 Akustische Tarnkappen und Lauschangriffe

**HOLGER GOERLITZ**  
↳ Max-Planck-Institut  
für Ornithologie, Seewiesen

Ein lauer Sommerabend, eine leichte Brise weht, schwerer Blütenduft erfüllt die Nacht. Nachtfalter tanzen durch die Dunkelheit. Plötzlich ertönt ein nur für sie hörbarer Schrei. Erst leise, dann immer lauter, schneller, näherkommend. Ein Nachtfalter fällt zu Boden. Ein zweiter fliegt einen Haken. Ein dritter reagiert zu spät und wird zur Beute eines dunklen Schattens. Angelockt durch die Rufe erscheint ein weiterer Schatten: eine Fledermaus.

**N**ahrungssuche und Räubervermeidung sind für alle Tiere von immenser Wichtigkeit. In einem evolutionären Wettrüsten entwickeln Räuber und Beute fortlaufend Anpassungen, um Jagd und Flucht zu optimieren. Eine Schlüsselrolle dabei spielen die Sinnessysteme: Räuber und Beute müssen sich zuerst gegenseitig wahrnehmen, erkennen und lokalisieren, bevor sie mit entsprechendem Verhalten reagieren können. Auf der anderen Seite nutzen beide Seiten Strategien, um diese Wahrnehmung zu verhindern.

Dazu zählen verschiedene Arten der Tarnung. Bei „Tarnung“ denken die meisten Menschen an die äußere Anpassung: grüner Frosch auf tropischem Pflanzenblatt, braun-gemusterte Schlange auf ebensolcher Baumrinde. Doch für manche Tiere, wie die nachtaktiven Insekten und ihre Jäger, die Fledermäuse, sind akustische Reize viel bedeutsamer. Sie tarnen und täuschen mit Schall.

## Echoortung – Jagen mit Schall

Akustische Kommunikation ist in der Tierwelt allgegenwärtig, zum Beispiel der Gesang von Vögeln oder die Geräusche der Insekten, die der Partnerwahl und Revier-

verteidigung dienen. Eulen, insektenfressende Affen und viele andere Räuber machen sich dies zu Nutze, um ihre Beute aufzuspüren. Da der Schall auch in der Dunkelheit funktioniert, verlassen sich vor allem die nachtaktiven Tiere auf ihren Gehörsinn.

Eine besondere Anpassung zur Orientierung bei Nacht ist die Echoortung der Fledermäuse und Zahnwale. Dabei senden die Tiere fortlaufend hochfrequente, stakkato-artige „Schall-Blitze“ in ihre Umgebung aus. Diese Rufe können so laut wie ein Presslufthammer sein. Unsere Ohren könnten also auf Dauer Schaden nehmen, wenn diese nicht im für uns Menschen unhörbaren Ultraschall-Bereich angesiedelt wären.

Für die nachtaktiven Tiere lohnt sich der Aufwand: Der von der Umgebung zurückgeworfene Schall liefert den Echolot-Jägern ein akustisches Bild ihrer Umgebung mitsamt der darin befindlichen Beute. Die zeitliche Verzögerung zwischen Aussendung des Rufes und der Ankunft des Echos informiert die Fledermaus über die Entfernung zu Hindernissen und Beute. Die Richtung eines Objektes errechnet die Fledermaus anhand von Zeit- und Frequenzunterschieden zwischen den beiden Ohren. Und die Eigenschaften eines Objekts, wie Größe und Struktur, sind in der Lautstärke, der Dauer und dem „Klang“ der Echos verschlüsselt.



E  
C  
H  
O

Um ihren Jägern entkommen zu können, haben viele Insekten mehrfach unabhängig voneinander Hörorgane entwickelt. Damit können sie die Echoortungslaute der jagenden Fledermäuse von weitem hören und auf diese mit schnellen Ausweichmanövern reagieren. Entsprechend finden sich normalerweise im Bauch von Fledermäusen nur wenige dieser hörfähigen Insekten wie beispielsweise viele der großen Nachtfalterarten.

## Mopsfledermäuse pirschen sich unter einer akustischen Tarnkappe an

Umso verwunderlicher war es bislang, dass sich die Mopsfledermaus *Barbastella barbastellus* fast ausschließlich von hörenden Nachtfaltern ernährt. Wir haben deshalb vermutet, dass sich die Mopsfledermaus akustisch tarnen kann. Aber wie genau macht sie das?

### Flüsternde Fledermäuse

Wir waren überzeugt, dass der Schlüssel zum Erfolg der Mopsfledermaus in der Lautstärke ihrer Rufe liegen muss. Um das zu überprüfen, haben meine Kollegen und ich unseren eigenen „Lauschangriff“ gestartet: Wir haben Nachtfalter mit Miniaturmikrofonen ausgerüstet und sie Mopsfledermäusen in ihrem natürlichen Lebensraum angeboten. Durch eine besondere Anordnung von vier Mikrofonen ließ sich sowohl die dreidimensionale Flugbahn und der Abstand der Mopsfledermaus von ihrer Beute als auch die Rufintensität messen.

Dabei zeigte sich, dass die Ruflautstärke der Mopsfledermaus nur ein Zehntel der sonst bei Fledermäusen üblichen beträgt. Und nicht nur das: Die Fledermaus entdeckt das Insekt aus ungefähr 1,6 Meter Abstand. Ab diesem Moment ruft sie dann leiser und leiser, während sie sich ihrer Beute annähert. Täte sie das nicht, würde sich durch ihr Näherkommen die Lautstärke am Nachtfalter erhöhen und sie verraten. So aber bleibt der Nachtfalter ahnungslos: Er empfängt nur sehr leise Echoortungslaute, die auch leise bleiben. Diese geringe Lautstärke reicht nicht aus, um eine Ausweichreaktion auszulösen. Falls doch, kommt sie meistens zu spät, und der Falter wird zur leichten Beute.

Die geringe Lautstärke ist insofern erstaunlich, da Mopsfledermäuse in schnellem Flug im Wald und entlang von Vegetationskanten jagen. Durch ihre leisen Rufe können sie Hindernisse erst spät erkennen – sie nutzen gewissermaßen nur eine Kerze anstelle einer Taschenlampe zur Orientierung. Die Mopsfledermäuse haben also so etwas wie eine akustische Tarnkappe entwickelt. Mit ihrer Tarnkappe können sie sich „anpirschen“ und damit eine Nahrungsquelle nutzen, die lauterer Fledermäusen versagt bleibt. Ihr Nachteil: Sie erkennen ihre Beute erst auf kurze Distanz. Ähnlich leise Rufe kennt man von Fledermäusen, die auch im Wald jagen, ihre Beute aber anhand der leisen Raschelgeräusche finden und daher die störenden „Hintergrundechos“ der Blätter möglichst klein halten müssen.

### Echo des Flügelschlags

Auch die Gruppe der Hufeisennasen-Fledermäuse jagt im Wald. Doch sie hat eine besondere Jagdstrategie und besitzt dafür hochspezialisierte Anpassungen. Hufeisennasen stoßen lange Pfeiftöne mit konstanter Frequenz aus. Ähnlich der Funkfrequenz eines Radiosenders beinhaltet das Echo dieser Töne Informationen, die durch den Flügelschlag ihrer Beute erzeugt werden. Hufeisen-

## Hufeisennasen kombinieren unterschiedliche Hörtechniken für maximalen Jagderfolg

nasen können damit flügel-schlagende Beute innerhalb eines dichten, unbewegten Blättergewirrs entdecken. Der Preis für diese hohe Echoortungs-Präzision ist allerdings wiederum eine vergleichsweise geringe Reichweite. Beute, die sich nicht direkt innerhalb des Schallkegels befindet, ist für die Fledermäuse „unsichtbar“. Doch Hufeisennasen haben einen Weg gefunden, diesen Mangel auszugleichen. Neben der hochentwickelten Flatterecho-Wahrnehmung hören sie auch auf herkömmliche Weise. Wir konnten zeigen, dass Hufeisennasen äußerst empfindlich auf von der Beute erzeugte Raschelgeräusche reagieren. So wie wir unseren Blick hin zur knisternden Chips-Tüte richten, schwenken Hufeisennasen ihre Schallkeule hin zu Beutegeräuschen und kombinieren so unterschiedliche Hörtechniken miteinander, um ihren Jagderfolg zu maximieren.

### Auch andere Arten werden abgehört

Auch die Echoortungslaute anderer Fledermäuse lassen sich als Informationsquelle nutzen. Da Fledermäuse beim Angriff auf ein Insekt spezielle Fangrufe ausstoßen und die Zahl der Rufe pro Zeiteinheit erhöhen, hören andere Fledermäuse, wo sich ertragreiche Nahrungsstellen befinden. Tatsächlich nutzen viele Arten diese soziale Information. Und da Fledermäuse ihre Rufe oft von den Rufen anderer Arten unterscheiden können, horchensie auch über Artgrenzen hinweg die Echoortung anderer Jäger ab.

Je nachdem, welche Art ruft, wie viele Artgenossen noch da sind und wie viel Beute vorhanden ist, reagieren die Fledermäuse unterschiedlich: Wenn zum Beispiel die Aktivität von Artgenossen zu hoch ist, locken die Fangrufe keine weiteren Tiere an. Zudem bestimmt die Artzugehörigkeit die Reaktion: Fledermäuse reagieren besonders auf andere Arten, die akustisch und ökologisch ähnlich sind, also ähnlicher Rufe besitzen und ähnliche Beute jagen. Am stärksten reagieren Arten, deren Nahrung nur kurzfristig und lokal verfügbar ist, so dass sich die Jagd in der Gruppe lohnt.

Derzeit untersuchen wir, wie Insekten auf die Angriffe hochspezialisierter Jäger reagieren. Es scheint, als unterscheide sich das Ausweichverhalten der Nachtfalter von Art zu Art. Diese Unberechenbarkeit für Jäger würde wiederum den Räuberschutz für jeden Falter erhöhen. Selbst der Gesang mancher Heuschrecken, der neben paarungsbereiten Weibchen auch Fledermäuse anlockt, scheint akustisch so angepasst zu sein, dass er die Echoortung und damit die Orientierung der Fledermäuse stört. Mit welchen „Tricks“ die Fledermäuse wiederum darauf reagiert haben, ist dann die nächste spannende Frage in diesem sensorischen Wettstreit zwischen Räuber und Beute. ○

# 4 Blick in die Maschinerie eines Massemonsters

**FRANK EISENHAUER,  
REINHARD GENZEL**

↳ *Max-Planck-Institut  
für extraterrestrische Physik,  
Garching*

Vor gut einem Jahrhundert vollendete Albert Einstein seine allgemeine Relativitätstheorie. Die darin getroffenen Aussagen lassen sich im Universum testen – etwa im Zentrum unserer Milchstraße, wo die große Schwerkraft eines schwarzen Lochs fantastische Möglichkeiten bietet, bestimmte Effekte zu messen. Im Jahr 2018 ist uns dies in drei Fällen hervorragend gelungen: So konnten wir mit dem unter der Leitung unseres Instituts gebauten Instrument Gravity erstmals die Gravitationsrotverschiebung im Schwerfeld des galaktischen schwarzen Lochs messen; zudem verfolgten wir die Kreisbahnen nahe dem Punkt ohne Wiederkehr und bestimmten die Masse von kosmischen Schwerkraftfallen, die Milliarden Lichtjahre entfernt sind. Mit seiner einzigartigen Bildschärfe und Empfindlichkeit wird Gravity die Astronomie revolutionieren.

**A**lbert Einstein hat mit seiner Beschreibung der Gravitation in der allgemeinen Relativitätstheorie den Grundstein für unser Verständnis von Raum und Zeit gelegt. Die Gültigkeit seiner Theorie wurde in den schwachen Schwerfeldern von Sonne und Erde in vielen Experimenten eindrucksvoll bestätigt. Und deren Anwendung, etwa in den weltweiten Navigationssystemen, bringt ganz konkreten Nutzen für uns alle. Die Effekte der Gravitation sind verblüffend: Die Zeit vergeht langsamer, der Raum wird gekrümmt und in schwarzen Löchern werden ganze Raumregionen unumstößlich von der Umgebung abgetrennt. Damit ist ein schwarzes Loch so etwas wie der „Stein von Rosetta“ für die Entschlüsselung des Alls.

Mit dem unter der Führung unseres Instituts entwickelten Instrument Gravity können wir nun erstmals ganz präzise die Eigenschaften von schwarzen Löchern beobachten. Hierfür schalten wir die vier größten Fernrohre der Europäischen Südsternwarte (ESO) zu einem virtuellen 130-Meter-Teleskop zusammen. Diese Technik

– genannt Interferometrie – geht auf Albert Michelson (1852 bis 1931) zurück, der damit erstmals den Durchmesser eines Sterns gemessen hat. Dabei werden die Lichtwellen eines Objekts überlagert und dieses erscheint im Ergebnis schärfer. Das bedeutet konkret, das Gravity in Verbindung mit den vier Acht-Meter-Spiegeln des erwähnten Very Large Telescope den Abstand zweier Autos auf dem Mond bis auf zwei Zentimeter genau messen könnte. So ist uns nach Jahrzehnten intensiver Beobachtung mit anderen Instrumenten jetzt dank Gravity ein technischer Durchbruch gelungen, und wir beginnen damit die Geheimnisse der schwarzen Löcher zu ergründen.

Das schwarze Loch im Zentrum unserer Milchstraße ist für unsere Forschungen ein ideales Labor. Denn kein anderes schwarzes Loch mit ähnlich großer Masse (gut vier Millionen Sonnen) ist uns näher. Doch selbst dessen Durchmesser erscheint nur so groß wie eine Euromünze auf dem Mond. Mit Gravity gelang es uns, die Bewegung von Sternen und heißem Gas auf den



*Farbwechsel: Diese Illustration zeigt den Stern S2 beim Vorübergang am schwarzen Loch im galaktischen Zentrum. Deutlich zu sehen ist die durch das extrem starke Schwerfeld verursachte Gravitationsrotverschiebung.*

Bahnen um das schwarze Loch sehr exakt zu verfolgen. Mit seiner Genauigkeit und Empfindlichkeit übertrifft Gravity seine Vorgänger um das Hundert- bis Tausendfache und ist damit weltweit einzigartig.

## Ein Stern beschleunigt bis auf 27 Millionen Kilometer pro Stunde

Das galaktische schwarze Loch offenbart sich zuallererst durch seine ungeheure Schwerkraft. Ganz ähnlich wie die Planeten im Schwerfeld der Sonne, kreisen im Herzen der Milchstraße die Sterne um das Massemonster. Seit mehr als 25 Jahren verfolgt unsere Gruppe die Bewegung dieser Sterne. Insbesondere ein Stern – genannt S2 – nähert sich wie ein Komet alle 16 Jahre dem schwarzen Loch bis auf lediglich den 120-fachen Abstand zwischen Sonne und Erde, umgerechnet entspricht das einer Distanz von rund 17 Lichtstunden. Die Anziehungskraft des schwarzen Lochs beschleunigt den Stern auf ein Tempo von etwa 27 Millionen Kilometern pro Stunde, also 2,5 Prozent der Lichtgeschwindigkeit.

Aufgrund der geringen Distanz zum schwarzen Loch kommt es zu einem Effekt, der sich in der Gravitationsrotverschiebung im Licht des Sterns zeigen sollte. Dazu muss man wissen, dass eine solche Rotverschiebung nicht nur vom Dopplereffekt herrührt. Diesen kennen wir aus dem Alltag, wenn etwa ein Rettungswagen an uns vorbeifährt und die Tonhöhe des Martinshorns an- und abschwilt, was gleichzeitig einer Verschiebung der Wellenlänge in den kurz- beziehungsweise langwel-

ligen Bereich entspricht. Diesen Effekt gibt es auch bei Lichtwellen, wo man dann von Blau- oder eben Rotverschiebung spricht. Unabhängig davon tritt im Gravitationsfeld eine Rotverschiebung auf, wenn sich Licht dort bewegt und gewissermaßen dagegen ankämpft. Mit der überragenden Präzision und Empfindlichkeit von Gravity und dem ebenfalls an unserem Institut entwickelten Spektrometer Sinfoni gelang es, diesen Effekt der allgemeinen Relativitätstheorie erstmals für ein massereiches schwarzes Loch direkt zu messen und damit Einsteins Vorhersage eindrucksvoll zu bestätigen.

Obwohl das eigentliche schwarze Loch unsichtbar ist, macht es sich doch immer wieder bemerkbar – und zwar immer dann, wenn einfallendes Gas auf Temperaturen von Milliarden Grad aufgeheizt wird und dadurch leuchtet. In diesem rotierenden Gas entstehen starke Magnetfelder. Sie entladen sich in Strahlungsausbrüchen, ähnlich wie wir sie auch von Sonneneruptionen her kennen. Im Sommer 2018 konnten wir mit Gravity drei solche Flares beobachten.

## Flares nahe dem Ereignishorizont

Die Ergebnisse sind spektakulär: Die Strahlungsausbrüche stammen offenbar aus der sogenannten Akkretionsscheibe – einem Ring aus Gas mit einem Durchmesser von nur etwa zehn Lichtminuten, der sich mit extrem hoher Geschwindigkeit um das galaktische Zentrum dreht. Die Materie kann dabei gefahrlos kreisen, solange sie dem schwarzen Loch nicht zu nahe kommt. Materie

innerhalb des Ereignishorizonts (dem Punkt ohne Wiederkehr) gelingt es aber nicht mehr, der enormen Schwerkraft zu entfliehen. Die Flares entstehen also in einem Orbit nahe dem Ereignishorizont.

In allen drei Fällen beobachteten wir, wie das heiße Gas mit 30 Prozent der Lichtgeschwindigkeit nur knapp über dem Ereignishorizont um das schwarze Loch feigt. Ein Umlauf dauert dabei lediglich 45 Minuten. Wir schließen daraus, dass die ungeheure Masse von mehr als vier Millionen Sonnen auf kleinstem Raum konzentriert ist. Genau das sagt die Theorie der schwarzen Löcher vorher. Dieses Ergebnis ist eine überwältigende Bestätigung des Paradigmas von dem massereichen schwarzen Loch im Zentrum unserer Milchstraße.

Mit dem Very Large Telescope und Gravity haben wir jedoch auch sehr tief ins All geschaut, weit jenseits

Annahmen für die unbekanntete Verteilung und Bewegung dieser Wolken machen. Dank Gravity haben wir nachgewiesen, dass sich auch diese Gaswolken auf geordneten Kreisbahnen um die kosmische Schwerkraft-falle bewegen. Dazu haben wir einen Quasar mit der Katalogbezeichnung 3C 273 ins Visier genommen – das erste dieser „quasi-stellaren Objekte“, das der Astronom Maarten Schmidt vor mehr als 50 Jahren als solches identifiziert hatte. Der Quasar erwies sich als extrem heller, aber weit entfernter Himmelskörper. Die Energie, die er abgibt, ist viel größer als die einer normalen Galaxie wie unserer Milchstraße und lässt sich nicht durch reguläre Fusionsprozesse im Innern von Sternen erklären. Vielmehr gehen die Astronomen davon aus, dass Gravitationsenergie in Hitze umgewandelt wird, wenn Materie in ein extrem massereiches schwarzes Loch strudelt.

*Turbulente Schwerkraftfalle: Diese Visualisierung basiert auf Simulationen der Bewegung von Gas, das mit etwa 30 Prozent der Lichtgeschwindigkeit auf einer kreisförmigen Umlaufbahn um das schwarze Loch im galaktischen Zentrum herumwirbelt.*



des 26.000 Lichtjahre entfernten galaktischen Zentrums. Denn massereiche schwarze Löcher finden sich nicht nur in unserer Heimatgalaxie, sondern in den Herzen aller großen Milchstraßensysteme. Sie können bis zu mehrere Milliarden Sonnenmassen in sich vereinen. Wenn Materie auf diese schwarzen Löcher fällt, leuchtet das erhitzte Gas so hell, dass es die gesamte Galaxie überstrahlt und noch in einer Entfernung von Milliarden Lichtjahren sichtbar ist. Aber gerade deshalb sind diese aktiven schwarzen Löcher nur schwer zu vermessen, denn man sieht die Sterne nicht mehr, aus deren Umlaufbahnen man sonst die Zentralmasse berechnen könnte.

Bisher ließen sich die Massen solcher Objekte nur über das Lichtecho an Gaswolken ableiten, die das schwarze Loch umgeben. Aber hierzu muss man

## Raumzeit in Rotation

Unser Team hat tief ins Herz dieses Quasars 3C 273 geblickt und direkt die Struktur des sich schnell bewegenden Gases um das zentrale schwarze Loch beobachtet. Bisher waren solch detaillierte Einsichten aufgrund der geringen Winkelgröße der inneren Region des Quasars nicht möglich, da diese nur etwa die Ausdehnung unseres Sonnensystems hat, aber etwa 2,5 Milliarden Lichtjahre entfernt ist. Mit dem gemessenen Abstand der Wolken zum Zentrum von 150 Lichttagen und deren Umlaufgeschwindigkeit konnten wir erstmals die Masse eines aktiven schwarzen Lochs bestimmen: 300 Millionen Sonnenmassen.

In Zukunft wollen wir einen weiteren Effekt messen, der aus Einsteins Theorie folgt. Er hängt mit einer ungewöhnlichen Eigenschaft schwarzer Löcher zusammen: Wenn diese rotieren, dann sollten sie auch den Raum und die Zeit mitreißen – gleichsam wie ein Löffel, den man in Honig taucht und dann dreht. Dazu lautet eine höchst erstaunliche Vorhersage der allgemeinen Relativitätstheorie, dass alle beobachtbaren Eigenschaften eines schwarzen Lochs durch lediglich zwei Größen bestimmt sind: Masse und eben Rotation, und dies unabhängig von der komplexen Entstehungsgeschichte und dem inneren Aufbau. Mit Gravity und weiteren am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Entwicklung befindlichen Instrumenten werden wir in den nächsten Jahren diese Rotation der Raumzeit in der Bewegung der Sterne und der einfallenden Materie vermessen – und damit einen nächsten großen Schritt hin zum Verständnis der allgemeinen Relativitätstheorie machen. ◦

# 5 Wege aus dem Terrorismus

**CAROLIN GÖRZIG**

↳ Max-Planck-Institut  
für ethnologische Forschung,  
Halle (Saale)

Drei von fünf Bundesbürgern fürchten laut einer Umfrage terroristische Gewalt. Die Angst speist sich nicht nur aus der wahrgenommenen Skrupellosigkeit der Gewalttäter, sondern auch daraus, dass Terroristen in ihrem Vorgehen kaum berechenbar erscheinen. Doch auch radikale Gruppen agieren nach einer gewissen Logik, die sich erforschen lässt. Unsere Untersuchungen fokussieren auf die Frage, nach welchen Mustern sich Terroristen einerseits radikalieren und andererseits von der Gewalt abwenden.

**F**inden Sie, man sollte mit Terroristen verhandeln? In Politik und Öffentlichkeit wird oft diskutiert, ob dies überhaupt machbar wäre. Was dabei aus dem Blick gerät, ist die Frage nach dem *Wie*. Um fundierte Aussagen darüber zu machen, wie man mit Terroristen verhandeln kann, ist es sinnvoll, Lernprozesse von Terrorgruppen im Hinblick darauf zu untersuchen, wie ein Nachdenken über die Sinnhaftigkeit von Gewalt in Gang gesetzt wird.

Wir beschäftigen uns in unserer Forschungsgruppe vergleichend mit Lernprozessen von Terrorgruppen, die sowohl zur Deradikalisierung, also zu einer Abkehr von der Gewalt, als auch zu einer Radikalisierung führen können. Empirische Daten erheben wir in Interviews mit ehemaligen und gegenwärtigen Mitgliedern unterschiedlicher Terrorgruppen und wir haben dazu Feldforschung in Ägypten, Kolumbien, Palästina, Syrien, im Niger, in Kirgisistan, Nordirland und in der Türkei durchgeführt.

Im Ergebnis haben wir eine Deradikalisierungslogik ausgemacht: Gruppen ändern ihre Ziele – zumindest

zunächst – nicht; sie hinterfragen vielmehr die Mittel sowie die Werte, die ihre Ziele definieren. Diese Überlegungen können der Diskrepanz zwischen gesetzten und erreichten Zielen entspringen. Es kann aber auch sein, dass sich Ziele widersprechen und die Gruppen versuchen, diesen Konflikt aufzulösen.

Um den Mechanismus der Deradikalisierung in Gang zu setzen, müssen die Gruppen solche Widersprüche selbst problematisieren. Wie die Organisationswissenschaftler Chris Argyris und Donald A. Schön beschreiben, geht es darum, sogenannte Doublebinds diskutierbar zu machen. Das sind Situationen, in denen man aufgrund unvereinbarer Anforderungen nur verlieren kann, wobei die Widersprüche nur schwer zu benennen sind.

Die militante ägyptische Bewegung Gamaa Islamija etwa erkannte für sich, dass der Dschihad – der zum Selbstzweck geworden war – nicht mit ihrem Ziel vereinbar ist, die Menschen zu führen, und befand ihn letztlich als kontraproduktiv. Die Gruppe löste die Doublebinds,



## Ein Dialog kann Terrorgruppen die Widersprüchlichkeit ihrer Ziele verdeutlichen

indem sie Ziele priorisierte und schlussfolgerte, dass der Dschihad lediglich Mittel zum Zweck sei. Wichtig ist, dass den Anführern solcher Gruppen die Unvereinbarkeit ihrer Ziele bewusst wird.

Dabei können auch Verhandlungen helfen. Denn entgegen der Annahme, Verhandlungsbereitschaft und -erfolg basiere nur auf dem rationalen Kosten-Nutzen-Kalkül der Verhandlungsteilnehmer, kann schon ein Dialog an sich dazu beitragen, Terrorgruppen die Widersprüchlichkeit ihrer Ziele zu verdeutlichen. Auch die irische IRA hat die Mittel geändert, um ihre Ziele zu erreichen. Gewalt aufzugeben und gleichzeitig den eigenen Zielen treu zu bleiben, das hatten sie unter anderem vom südafrikanischen ANC gelernt.

Statt an Terrorgruppen mit dem Anspruch heranzutreten, sie müssten ihre Ziele vollständig aufgeben, was als Kapitulation empfunden wird und Doublebinds eher verstärkt, sollten Verhandlungen auf die Veränderung der Mittel abzielen. So können die Gespräche auch dazu dienen, den Anführern Argumente zu liefern, um ihre Basis zu überzeugen. Verhandlungen können darauf aufbauen, dass das eigentliche Lernen darin liegt, die Mittel und Werte zu hinterfragen, welche die Ziele definieren.

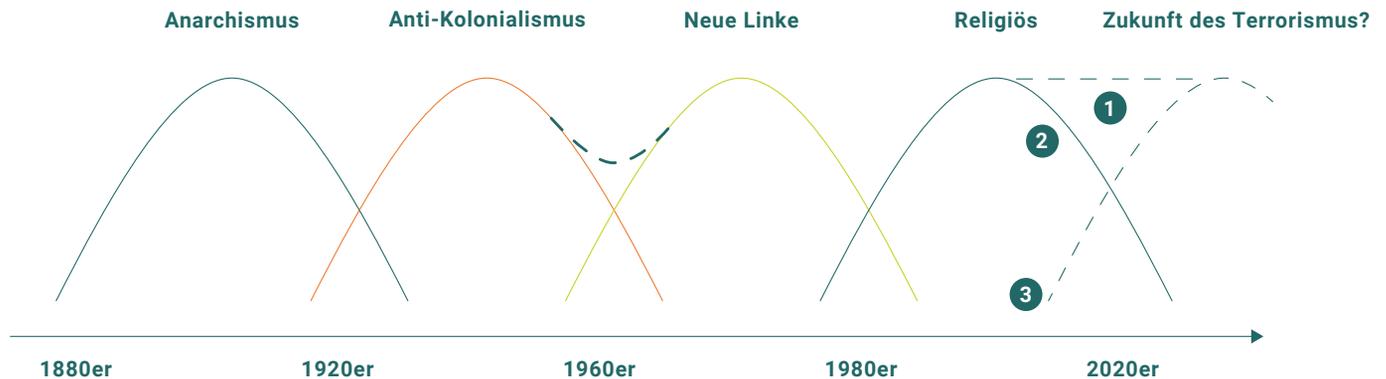
Der Mechanismus der Deradikalisierung kann aber auch mit einer Radikalisierung verbunden sein. Wenn sich Gruppen von der Gewalt abwenden, spalten sich oft radikalere Fraktionen ab. Als sich die Bewegung Gamaa Islamija deradikalisierte, wanderten Mitglieder zu al-Qaida ab. Diese verstand die Mäßigung der Gamaa Islamija als Niederlage und reagierte darauf, indem sie die Gewalt gegen den „fernen Feind“ – kulminierend in den Anschlägen vom 11. September – eskalierte. Das rief einen neuen Zielkonflikt zwischen dem globalen Dschihad und der lokalen Agenda islamistischer Gruppen hervor, die sich eher auf den Sturz ihrer Heimatregierungen konzentrierten, statt den Westen allzu sehr zu provozieren.

## Der Drohnenkrieg produziert mehr Terroristen als er tötet

Die Globalisierung des Dschihad führt wiederum zu radikaleren staatlichen Gegenmaßnahmen wie etwa dem US-amerikanischen Drohnenkrieg. Solche Maßnahmen sind allerdings oft kontraproduktiv, da sie die Argumente der radikalen Splittergruppen gegenüber sich mäßigenden Gruppen stärken. So fallen den Drohnen immer wieder zahlreiche Zivilisten zum Opfer, was selbst hochrangige US-Militärs zu dem Schluss bringt, dass der Drohnenkrieg mehr Terroristen produziert als er tötet. Die Opfer des Antiterrorkampfes dienen radikaleren Gruppen häufig als Argument gegenüber moderaten Organisationen. Al-Qaida-Anführer Aiman al-Sawahiri beschuldigte beispielsweise die Gamaa Islamija, ihre Ideale an den ägyptischen Staat zu verraten, als sie sich mäßigte. Der Vorwurf lautete, die Bewegung kaufe sich aus dem Gefängnis frei und gebe ihre Ziele auf, während viele andere Islamisten in ägyptischen Gefängnissen gefoltert werden. Solche Argumente lassen sich entschärfen, wenn staatliche Akteure bei der Terrorbekämpfung weniger brutal vorgehen und in Verhandlungen auf Maximalforderungen wie die Aufgabe von Zielen verzichten.

## Die nächste Gewaltwelle könnte von Rechtsextremen ausgehen

Die Entwicklung des Terrorismus seit den 1880er-Jahren wurde von dem Politologen und Pionier der Terrorismusforschung David Rapoport in vier sich überlappende historische Wellen unterteilt, die jeweils rund 40 Jahre andauerten: die anarchistische Welle (ca. 1880er bis 1920er-Jahre), die antikoniale Welle (ca. 1920er-1960er), die Welle der Neuen Linken (ca. 1960er-1990er), und



- 1 Fortdauer/ Erneuerung der religiösen Welle
  - 2 Abschwellen der religiösen Welle
  - 3 Neue Welle (Rechtsextremismus?)
- — Wellenübergreifende Organisation (z.B. IRA, PLO)

*Nach dem Politologen  
David Rapoport  
entwickelt sich der  
Terrorismus in Wellen,  
wobei sich die Ziele  
wandeln.*

die gegenwärtige religiöse Welle, die etwa in den 1970er / 80er-Jahren begann. Die beschriebene Logik der Radikalisierung und Deradikalisierung betrifft sowohl Gruppen der aktuellen religiösen Welle wie auch Gruppen vorheriger Wellen, wie die Beispiele des ANC, der IRA oder auch der Palästinenserorganisation PLO belegen.

In der Radikalisierung von Gruppen einer Welle und in der Überreaktion von Staaten könnte bereits die Entstehung einer nächsten Welle begründet liegen. Auch wenn militärische Gewalt Terrorismus kurzfristig eindämmen kann, wurzeln in ihr langfristige Entwicklungen von Gewalt und Terror. Verhandlungen können eine Alternative sein, die die Gewaltspirale der Wellen des Terrorismus und Counterterrorismus unterbrechen.

Die parallele Radikalisierung von Staat und nicht-staatlichen Gruppen wirft jedenfalls die Frage nach der Zukunft des Terrorismus auf. Wenn man annimmt, dass sich die gegenwärtige religiöse Welle gemäß Rapoport's historischem Muster dem Ende zuneigt, bleibt die Frage nach der nächsten Welle. Aktuelle Entwicklungen deuten darauf hin, dass Rechtsextremismus hier eine Rolle spielen könnte. Es könnte aber auch der dschihadistischen Bewegung gelingen, die Energie ihrer Welle zu erhalten

oder an eine zweite religiöse Welle zu übertragen. Des Weiteren lässt sich beobachten, dass Rechtsextreme Elemente religiöser Gruppen übernehmen und zum Beispiel an den christlichen Fundamentalismus oder an das germanische Neuheidentum anknüpfen. Eine zukünftige Welle könnte auch eine Mischform sein.

Lässt sich die Gewaltspirale zwischen Staat und Terroristen durchbrechen? Die Anführer der Gamaa Islamiya kamen zu ihren neuen Positionen, als sie sich im Gefängnis mit anderen politischen Gefangenen austauschten, etwa mit nicht-religiösen Liberalen. Nicht nur interne Prozesse und neue Argumentationsketten können von außen angestoßen werden, auch Argumente für Radikalisierung können von außen entschärft werden. Die Lernprozesse von Terrorgruppen geben Aufschluss darüber, welcher Logik die Mechanismen der Radikalisierung und Deradikalisierung folgen. Unser Ziel ist es, diesen Mustern auf den Grund zu gehen. Unsere Einsichten in die Logik von Eskalation und Deeskalation können Antwort darauf geben, wie solche Prozesse umgekehrt werden. Es geht darum, Wege aus der Gewalt zu finden und Alternativen zur Wiederholung kontraproduktiver Maßnahmen zu entwickeln. Finden Sie, man sollte mit Terroristen verhandeln? o

# 6 CO<sub>2</sub> – ein Rohstoff für die Chemieproduktion

**WALTER LEITNER**

↳ *Max-Planck-Institut für chemische Energiekonversion, Mülheim an der Ruhr*

Erdöl ist für die chemische Produktion heute der wichtigste Energieträger und Rohstoff. Die zunehmende Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien eröffnet jedoch die Möglichkeit, alternative Kohlenstoffquellen wie zum Beispiel Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) für die Produktion von chemischen Produkten zu erschließen. Mit Wasserstoff, der mit Elektrizität aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen wird, und gegebenenfalls mit weiteren energiereichen Reaktionspartnern erzeugen wir aus dem reaktionsträgen CO<sub>2</sub> chemische Produkte – von Kraftstoffen bis zu hochwertigen Feinchemikalien. Effiziente Katalysatoren sind dabei das entscheidende Werkzeug für solche „Power-to-X“-Konzepte.

**D**ie Herstellung chemischer Produkte ist wie die Energiegewinnung seit Beginn der Industrialisierung auf fossile Rohstoffe angewiesen. Der Siegeszug der Petrochemie im 20. Jahrhundert ist nicht zuletzt auf die Verzahnung von Raffinerieprozessen zur Herstellung von Treibstoffen und chemischen Grundstoffen zurückzuführen. Sowohl die Energiewirtschaft als auch die chemische Industrie müssen künftig jedoch verstärkt auf erneuerbare Energie und Rohstoffe setzen. Denn die fossilen Kohlenstoffquellen sind Energieträger, keine Energiequellen! Sie sind über Jahrmillionen aus Biomasse entstanden, die die Natur durch die photosynthetische Umwandlung von Kohlendioxid und Wasser mit Hilfe von Sonnenenergie erzeugt hat. Die Menschheit beutet die fossilen Ressourcen heute in einer solchen Größenordnung und Geschwindigkeit aus, dass sich diese Form des Wirtschaftens durch lokale Umwelt-

belastungen und den globalen Klimawandel tiefgreifend auf das Ökosystem unseres Planeten auswirkt.

Der notwendige Umbau der Stromerzeugung hat immerhin bereits begonnen. So werden die Techniken, mit denen Elektrizität durch Photovoltaik, Wind- und Wasserkraft sowie Geothermie gewonnen wird, weltweit immer konkurrenzfähiger. Die Stromerzeugung wird damit von den kohlenstoffbasierten fossilen Rohstoffen zunehmend unabhängig: Sie kann dekarbonisiert werden. Das bietet die Chance, auch die Kopplung zwischen Energie und Chemie neu zu gestalten. Eine chemische Wertschöpfung ohne Kohlenstoff ist unmöglich, und auch kohlenstoffbasierte flüssige Energieträger bleiben im Gesamtsystem unverzichtbar. Sie könnten aber unter Einsatz von kohlenstofffreier Primärenergie und alternativen Kohlenstoffquellen wie CO<sub>2</sub> produziert und damit defossilisiert werden. Aber wie kann das gelingen?

Das CO<sub>2</sub> Molekül ist ja ausgesprochen reaktionsträge, weshalb das Gas auch in Feuerlöschern verwendet wird.

## Katalysatoren für Basischemikalien und höherwertige Produkte

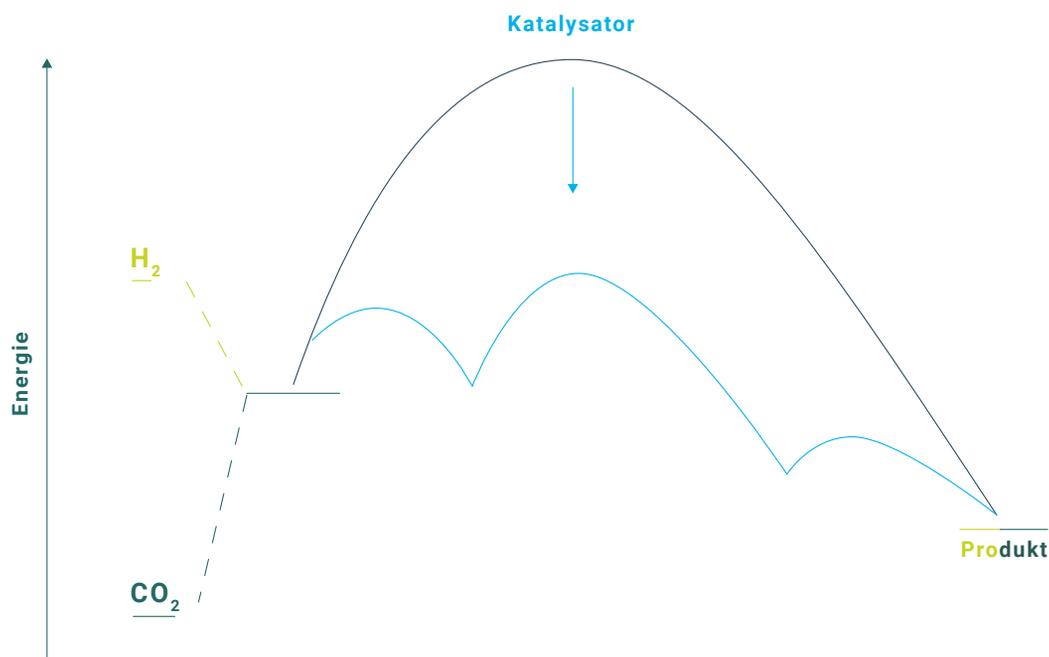
Die Triebkraft zur Umsetzung des thermodynamisch stabilen CO<sub>2</sub> Moleküls kann entweder direkt aus regenerativen Stromquellen oder aus elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff stammen, wodurch sich die Energie aus erneuerbaren Quellen in Form von nützlichen Produkten ernten lässt. Weitere energiereiche Reaktionspartner können zusätzliche Treiber sein. Hoch effiziente Katalysatoren ermöglichen dann den Reaktionsablauf oder lenken ihn zu den gewünschten Produkten.

Einen solchen Ansatz verfolgt auch der Exzellenzcluster „The Fuel Science Center“, in dem Wissenschaftler der RWTH Aachen, des Forschungszentrums Jülich und der Mülheimer Max-Planck-Institute an synthetischen Kraftstoffen für neuartige Motorenkonzepte mit reduzierten Emissionen und erhöhtem Wirkungsgrad

arbeiten. Um CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> auch in relevante Stoffe für die Chemieproduktion umzusetzen, erforschen wir am Max-Planck-Institut für chemische Energiekonversion gemeinsam mit unserem Team an der RWTH Aachen metallorganische Katalysatoren, die aus einem oder mehreren Metallatomen und daran gebundenen organischen Molekülen, sogenannten Liganden, bestehen.

Zielprodukte sind dabei zum einen wichtige Basischemikalien wie Methanol, Formaldehyd oder Ameisensäure. Durch geeignete Kopplung mit weiteren Reaktionspartnern können die entsprechenden Bausteine oder Funktionalitäten aber auch in komplexere Strukturen für höherwertige Produkte eingebaut werden. Metallorganische Katalysatoren auf Basis von Edelmetallen wie etwa Platin, Rhodium und Ruthenium ermöglichen heute bereits eine wachsende Zahl solcher Reaktionen, von denen wir manche erstmals demonstrieren konnten. Dagegen ist dies mit den in der Natur weitverbreiteten und kostengünstigen Übergangsmetallen wie Mangan oder Eisen bislang nur in wenigen Fällen möglich. Unser Team hat vor kurzem zeitgleich mit zwei anderen Gruppen metallorganische Mangankatalysatoren

*Chemische Starthilfe: Wenn das energiearme CO<sub>2</sub> und der energie-reiche Wasserstoff (H<sub>2</sub>) miteinander reagieren sollen, ist eine extrem hohe Aktivierungsenergie nötig (ober, blaugrüne Linie). Ein Katalysator reduziert den Energieaufwand erheblich (hellblaue Linie) und führt über Zwischenprodukte zum gewünschten Produkt.*



entdeckt, die organische Carbonate, also Ester der Kohlensäure, zu Methanol hydrieren. Die Hydrierung des freien CO<sub>2</sub> ist bisher noch nicht möglich, wohl aber die analoge Reaktion mit einer reaktiveren Bor-Wasserstoff-Verbindung.

## Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen für den gesamten Prozess

Um die katalytischen Umwandlungen besser zu verstehen, nutzen wir ein umfangreiches Arsenal an experimentellen und computerchemischen Methoden. Lange sind Chemiker davon ausgegangen, dass das reaktionsträge CO<sub>2</sub> bei seiner katalytischen Umwandlung aktiviert werden muss. Inzwischen wissen wir aber, dass bei vielen dieser Reaktionen der Katalysator oft den ohnehin schon sehr reaktiven Partner wie etwa den Wasserstoff oder die entsprechende Bor-Wasserstoff-Verbindung chemisch noch angriffslustiger macht, um das CO<sub>2</sub> so einzufangen. Solche Erkenntnisse gewinnen wir unter anderem, indem wir mit Hilfe spektroskopischer Methoden die Zwischenprodukte analysieren, die der Katalysator mit den Ausgangsstoffen bildet. Das hilft uns, chemische Umwandlungen effizienter zu machen oder sogar Reaktionswege zu öffnen, die bislang verschlossen waren.

Neben dem Metall als katalytisch aktivem Zentrum sind für den Verlauf der Reaktionen die Liganden entscheidend. Dies sind organische Moleküle, die über Stickstoff- oder Phosphoratome ans Metall gebunden sind und von deren elektronischen Eigenschaften und räumlicher Form abhängt, welche Zwischenprodukte sich bevorzugt bilden und welche Stoffe daraus entstehen. Durch die optimale Kombination der Metalle mit geeigneten Liganden steuern wir, ob CO<sub>2</sub> zur Ameisensäure, zu Formaldehyd, oder zu Methanol hydriert wird. Bei der Kopplung mit weiteren Reaktionspartnern lässt sich nicht nur die bevorzugte chemische Funktionalität, sondern auch ihre Anordnung im Zielmolekül steuern. Dies ist für die Anwendung hochwertiger Produkte wie Spezialkunststoffe oder biologisch wirksame Substanzen von entscheidender Bedeutung.

Ein geeigneter Katalysator für die Hydrierung von CO<sub>2</sub> sowie ein genaues Verständnis der chemischen Reaktion reicht aber noch nicht, um solche Synthesen auch prozesstechnisch umzusetzen. Hierfür sind

neben der eigentlichen chemischen Umwandlung die Gewinnung des reinen Produkts und die Rückgewinnung des Katalysators ein entscheidender Faktor. Deshalb entwickeln wir Methoden, wie unsere Katalysatoren, die im Reaktionsmedium gelöst oder in Form von Nanopartikeln fein verteilt vorliegen, sich mit Hilfe integrierter Prozesse energiesparend von den Produkten trennen lassen.

## Ein geschlossener Kohlenstoff-Kreislauf als Idealbild

Abgesehen von den zentralen Forschungsfragen, die wir seitens der chemischen Grundlagenforschung und Reaktionstechnik klären müssen, sind natürlich weitere Aspekte zu berücksichtigen, um „Power-to-X“-Konzepte in der Praxis zu realisieren. Für die Identifizierung vielversprechender Zielprodukte und Reaktionspfade ist das entscheidende Kriterium, ob ein CO<sub>2</sub>-basierter Prozess Ressourcen und Klima eher schont als ein entsprechendes Herstellungsverfahren auf Basis fossiler Rohstoffe. Wir arbeiten daher eng mit Experten für Lebenszyklen-Analysen zusammen, um die Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen sowie die Umweltverträglichkeit für den gesamten Prozess zu analysieren. Fragen der sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen diskutieren wir intensiv mit Partnern aus Wissenschaft, Industrie und Gesellschaft im Rahmen des Kopernikus Projekts „P2X“.

Die Vision eines vollständig geschlossenen anthropogenen Kohlenstoffkreislaufs nach dem Vorbild der Natur hat der italienische Chemiker und Schriftsteller Primo Levi in seinem Buch „Das periodische System“ sehr anschaulich formuliert. Diesem Ideal durch eine nachhaltige Gestaltung der Schnittstelle zwischen Energie und Chemie näher zu kommen, ist Motivation und Ansporn der Katalyseforschung an unserem Institut. ◦

# 7 Appetitanreger im Gehirn

**RÜDIGER KLEIN**

↳ Max-Planck-Institut  
für Neurobiologie,  
Martinsried

Sie blättern in der Speisekarte Ihres Lieblingsrestaurants. Nudeln mit Sahnesoße, oder nur ein kleiner Salat? Was Sie dem Kellner schließlich mitteilen, ist das Ergebnis einer komplexen Entscheidungsfindung im Gehirn, bei der nicht nur Hunger eine Rolle spielt. Im Mausgehirn haben wir „Genuss-Neurone“ identifiziert, die an diesem Prozess wesentlich mitwirken. Mit der Erforschung ihrer Aktivität wollen wir auch Störungen des Essverhaltens beim Menschen auf die Spur kommen.

**W**oher kommt der Appetit? Und warum sind manche Menschen versessen auf jede Kalorie, während andere krankhaft hungern? Zum Leidwesen vieler Menschen ist dem Ernährungsverhalten nicht leicht beizukommen. Zu viele Faktoren scheinen eine Rolle zu spielen. Tatsächlich bestimmen nicht eine bestimmte, sondern mehrere Gehirnregionen unser Essverhalten. Die Regulierung des Appetits präsentiert sich den Wissenschaftlern wie ein riesiges Puzzle. Doch mittlerweile wurden Neurone entdeckt, deren Aktivität und Steuerung für unser Essverhalten offenbar maßgeblich sind.

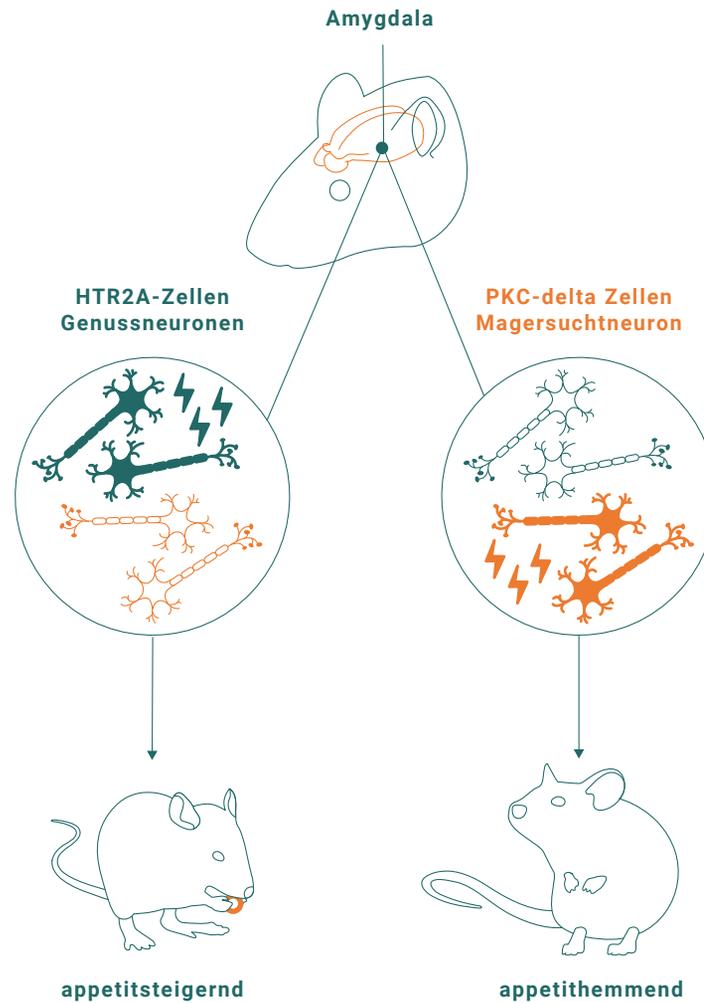
## Hungerneurone und Glücksbotenstoffe

Zunächst ist da der grundsätzliche Bedarf an Energie, den unser Gehirn reguliert. Signale aus Sinnesorganen, Darm, Bauchspeicheldrüse, Muskel- und Fettgewebe informieren über den Istzustand. Sie werden in der Steuerzentrale des vegetativen Nervensystems verarbeitet,

dem sogenannten Hypothalamus. Dort regulieren spezialisierte Nervenzellen Nahrungsaufnahme, Verdauung und Speicherung von Nährstoffen. Im Hypothalamus kennt man die sogenannten „Hungerneurone“, die während der Suche nach Nahrung hoch aktiv sind. Sobald Nahrungsaufnahme stattfindet, stellen sie ihre Aktivität wieder ein.

Und doch essen wir oft unabhängig vom Hungergefühl. Denn unser Appetit wird nicht nur durch den Energiehaushalt, sondern auch durch Emotionen reguliert. Innere Reize wie Stress sowie äußere Reize wie der Geschmack beeinflussen die Nahrungsaufnahme. Der Nucleus accumbens des basalen Vorderhirns vermittelt bei Nahrungsaufnahme durch die Freisetzung der „Glücksbotenstoffe“ Dopamin, Endorphin und körpereigene Opiate einen Belohnungseffekt.

Die Bedeutung eines anderen Gehirnzentrums für die Appetitsteuerung blieb lange unterschätzt: die sogenannte Amygdala, auch als Mandelkern-Region bezeichnet. Erst seit wenigen Jahren weiß man, dass sie nicht nur bei Emotionen wie Angst oder Freude eine



Netzwerke aus Nervenzellen in der Amygdala des Gehirns bestimmen das Essverhalten: Eine Maus mit aktiven Genussneuronen isst weiter, selbst wenn sie satt ist (links). Sind dagegen die Magersuchtneurone aktiv, hört sie trotz Hungers zu fressen auf (rechts).

wesentliche Rolle spielt, sondern auch bei der Nahrungsaufnahme. Die Amygdala verknüpft Ereignisse mit Emotionen, speichert diese und leitet die entsprechenden Verhaltensmuster ein. War ein Vorfall beispielsweise mit unangenehmen Gefühlen verbunden, kann die Amygdala eine starke Reaktion wie zum Beispiel Übelkeit auslösen: ein wichtiger Schutz, um zum Beispiel verdorbenes Essen zukünftig zu erkennen und zu vermeiden.

### Gegenspieler gesucht

Vor einigen Jahren fanden Forscher im zentralen Nukleus der Amygdala von Mäusen einen besonderen Nervenzelltyp: „Magersuchtneuronen“, wissenschaftlich bekannt als PKC-delta-Zellen, stoppen bei Übelkeit die Nahrungsaufnahme. Werden diese Nervenzellen bei hungrigen Mäusen aktiviert, stellen die Tiere mitten in der Mahlzeit das Fressen ein. Die Magersuchtneuronen zeigen diese Aktivität auch infolge anderer Reize, wie Sättigkeit, Bittergeschmack oder Übelkeit. Sie fungieren

offenbar als zentrale Appetit-Ausschalter. Fasziniert von diesen verblüffend eindeutigen Ergebnissen, stellten wir uns die Frage: Gibt es in der Amygdala auch Neuronen-Typen, welche die Nahrungsaufnahme entsprechend positiv beeinflussen – die also den Appetit anschalten?

### HTR2A-Zellen fördern die Nahrungsaufnahme

Bei unserer Suche nach den Genuss-Neuronen in Mäusen konzentrierten wir uns auf einen Nervenzelltyp, der den Serotonin-Rezeptor HTR2A produziert. Diese HTR2A-Zellen bilden zusammen mit den Magersuchtneuronen einen gemischten Verband. Unser Verdacht war, dass sie die Aktivität der Magersuchtneurone unterdrücken, beziehungsweise selbst von den Magersuchtneuronen gehemmt werden.

Zur Aktivierung der HTR2A-Zellen haben wir einen lichtempfindlichen Ionenkanal in die Zellen eingebracht

und die Zellen über zwei Lichtleiter stimuliert, die wir vorher beidseitig über die rechte und linke Amygdala implantiert hatten.

Tatsächlich hatte diese künstliche Aktivierung der HTR2A-Zellen den Effekt, dass die Tiere länger fraßen – er war umso größer, je gesättigter die Tiere bereits waren. In einem weiteren Experiment konnten die Mäuse HTR2A-Zellen durch einen Lichtleiter selbst aktivieren, indem sie mit ihrer Schnauze einen Lichtschalter betätigten. Das Ergebnis: Am liebsten haben die Tiere aktive HTR2A-Zellen.

In einem anderen Versuchsaufbau konnten die Tiere sich in zwei verschiedenen Räumen aufhalten. Nur in einem dieser Räume wurden die HTR2A-Zellen aktiviert. Dass die Tiere sich deutlich länger im „Aktiviert“-Raum aufhielten, bestätigt, dass die Tiere aktive

## Die Genuss-Neurone steigern die Nahrungsaufnahme und erzeugen einen Belohnungseffekt

HTR2A-Zellen bevorzugen. Der wohl wichtigste Befund war jedoch, dass die Aktivität der HTR2A-Zellen für eine normale Nahrungsaufnahme notwendig war. Wurden die HTR2A-Zellen ausgeschaltet oder inaktiviert, waren die Fresszeiten der Tiere deutlich kürzer, selbst bei Hunger oder angesichts besonders schmackhafter Nahrung.

Es gibt in der Amygdala von Mäusen also auch Nervenzelltypen, die den gegenteiligen Effekt wie die „Magersucht-Neurone“ auslösen können. Die „Genuss-Neurone“ der Amygdala steigern die Nahrungsaufnahme bei gesättigten Tieren und erzeugen dabei einen Belohnungseffekt.

### Nahrung aktiviert die Genuss-Neurone

Die Aktivität von Nervenzellen lässt sich über den Einstrom von Kalzium in die Zelle messen. Auf diese Weise konnten wir zeigen, dass die HTR2A-Zellen erst aktiviert werden, wenn die Tiere zu fressen beginnen, und nicht bereits, wenn die Futterausgabe unmittelbar bevorsteht.

Diese Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die HTR2A-Zellen der Amygdala unabhängig vom Hungergefühl eine anhaltende Nahrungsaufnahme fördern, indem sie den Wert der Nahrung wie Geschmack und Appetitlichkeit positiv verstärken. Wie wichtig die HTR2A-Zellen für die positive Bewertung von Nahrungseigen-

schaften sind, zeigt ein weiterer Versuch: Allein durch das Aktivieren der HTR2A-Zellen können wir die Tiere dazu bringen, einen zuvor wenig beliebten Geschmack zu bevorzugen.

### Genuss-Neurone sind Teil eines neuronalen Netzwerks

Wie genau die HTR2A-Zellen innerhalb des Gehirns die Nahrungsaufnahme beeinflussen, ist noch nicht abschließend untersucht. Ein Teil des Mechanismus ist wahrscheinlich die gegenseitige Hemmung von HTR2A-Zellen und Magersuchtneuronen innerhalb der Amygdala. Nimmt das Tier verdorbene Nahrung auf, werden die Magersuchtneuronen aktiviert, dadurch die HTR2A-Zellen gehemmt und die Nahrungsaufnahme eingestellt. Frisst das Tier dagegen etwas Leckeres, werden die HTR2A-Zellen aktiv und die Magersuchtneuronen dadurch gehemmt. Außerdem regulieren die HTR2A-Zellen die Aktivität von Zellen in anderen Gehirnbereichen, die beispielsweise die Information über den Wert und die Qualität der Nahrung verarbeiten.

Umgekehrt empfangen die HTR2A-Zellen Signale aus anderen Hirnregionen, zum Beispiel der Inselrinde, dem gustatorischen Thalamus oder Hypothalamus. Sie liefern Informationen zum physiologischen Zustand wie Hunger oder Durst, aber auch emotionalen Befindlichkeiten, zum Beispiel Angst.

### Spezialisten oder Generalisten?

Die Erforschung der HTR2A-Zellen erweitert unser Wissen über die Rolle der Amygdala bei der Regulierung der Nahrungsaufnahme. Unsere Ergebnisse werfen aber auch weitere spannende Fragen auf. Funktionieren diese Zellen als Spezialisten bei der Nahrungsaufnahme oder eher als Generalisten bei anderem Konsumverhalten wie Trinken und Paarung? Oder sogar generell bei Belohnungsverhalten wie Aufzucht von Babys oder Altruismus gegenüber Artgenossen? Welche Rolle spielt bei all diesen Funktionen der Botenstoff Serotonin, für den die HTR2A-Zellen einen spezifischen Rezeptor haben? Könnten Fehlfunktionen in den Amygdala-Schaltkreisen zu extremem Essverhalten führen? Und schließlich: wäre die Manipulation der HTR2A-Zellen und Magersuchtneuronen ein Forschungsansatz zur Hilfe für Menschen mit krankhaftem Essverhalten?

Zuletzt haben wir damit begonnen, die Verschaltung der appetitsteigernden HTR2A-Zellen und appetithemmenden PKC-delta-Zellen zu analysieren. So erhoffen wir uns Hinweise auf die Rolle der Amygdala in Lernprozessen, bei denen äußere Reize mit Nahrungsvorkommen und Nahrungsqualität verknüpft werden. o

# 8 Psychologischer Trick für mehr Chancengleichheit

**MATTHIAS SUTTER**

↳ Max-Planck-Institut  
zur Erforschung von  
Gemeinschaftsgütern, Bonn

Chefposten sind nach wie vor überwiegend Männersache. Eine der Ursachen dafür ist, dass Frauen den Wettbewerb eher meiden. Deswegen bewerben sie sich seltener auf Leitungsstellen, auch wenn sie dafür geeignet wären. Männer überschätzen sich dagegen oft und streben Führungspositionen an, die ihre Fähigkeiten übersteigen. In einem Experiment konnten wir zeigen, dass sich diese Differenz mit einem einfachen Mittel überbrücken lässt.

**N**och 40 Jahre bis zur Gleichstellung, befand der *Spiegel* im Dezember 2018. So lange könnte es nach Berechnungen der Boston Consulting Group und der Technischen Universität München dauern, bis die Vorstände deutscher Unternehmen zu gleichen Teilen von Männern und Frauen besetzt sind – wenn sich die Verhältnisse im bisherigen Tempo verändern.

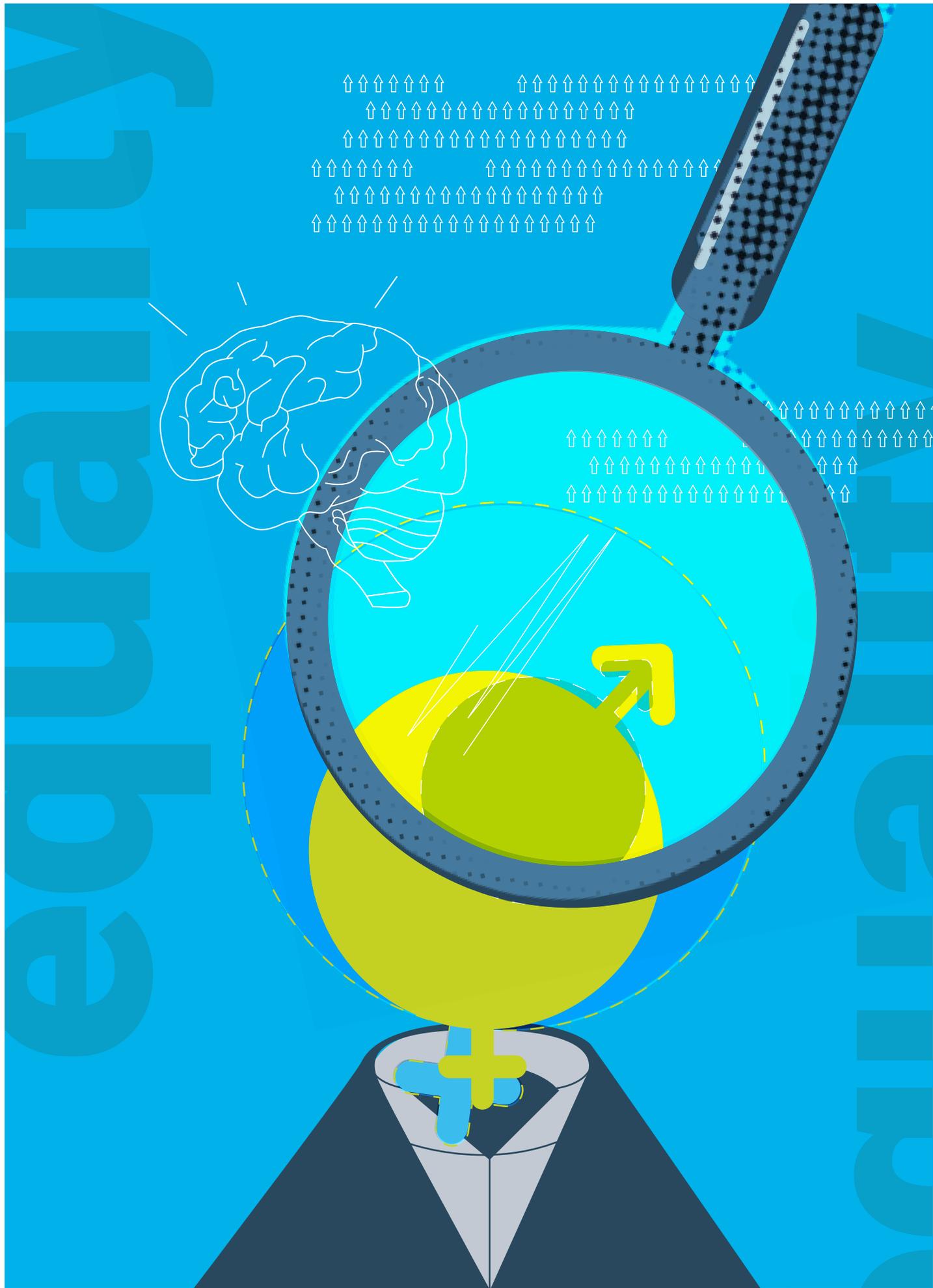
Warum so wenige Frauen an die Spitze von Unternehmen und öffentlichen Einrichtungen aufsteigen, wird seit Jahrzehnten untersucht. Traditionell stehen Faktoren wie die Diskriminierung von Frauen und das Problem, Familie und Beruf zu vereinbaren, im Mittelpunkt der Erklärungsansätze. Doch diese Deutung greift zu kurz.

Die verhaltensökonomische Forschung geht seit einigen Jahren der Frage nach, ob Geschlechterunterschiede im Wettbewerbsverhalten nicht auch eine wesentliche Ursache für die mangelnde Chancengleichheit von Männern und Frauen im Beruf sind. Also, ob Frauen weniger bereit sind als Männer, sich Konkurrenzsituationen zu stellen.

Tatsächlich sind die Ergebnisse eindeutig: Frauen meiden Wettbewerb deutlich stärker als Männer. Das kommt nicht zuletzt daher, dass sich auf der einen Seite Männer tendenziell häufiger überschätzen und dass auf der anderen Seite Frauen weniger gewillt sind, die Risiken von Wettbewerbssituationen zu akzeptieren. Für Unternehmen, aber auch für die Gesellschaft insgesamt, wäre es jedoch sinnvoller, wenn die am besten qualifizierten Personen – unabhängig von ihrem Geschlecht – Führungspositionen übernehmen würden.

## Eine Quote hilft Frauen im Wettbewerb, hat aber Nachteile

Wenn Frauen Wettbewerbssituationen häufiger meiden, wirft das die Frage auf, wie sich Geschlechterunterschiede in diesem Punkt überwinden oder zumindest reduzieren lassen. Vor einigen Jahren habe ich mit meinem Innsbrucker Kollegen Loukas Balafoutas in *Science* eine



## Es geht um eine realistische Einschätzung der eigenen Fähigkeiten

Studie veröffentlicht, die zeigt, dass politische Maßnahmen wie Quotenregelungen Frauen ermuntern können, sich häufiger im Wettbewerb zu stellen. Allerdings sind solche Regelungen sehr umstritten und häufig schwer einzuführen. Dazu kommt, dass gerade die Quote auch Nachteile haben kann: Frauen, die davon profitieren, sind häufig dem Vorwurf ausgesetzt, dass sie ihre Position nur ihrem Geschlecht und nicht ihrer Qualifikation verdanken.

### Männer verringerten signifikant ihre Wettbewerbsbereitschaft

Deshalb habe ich in einem gemeinsamen Forschungsprojekt mit Loukas Balafoutas und Helena Fornwagner von der Universität Innsbruck nach einem alternativen Ansatz gesucht. Unser Ziel war, die Nachteile von politischen Interventionen zu vermeiden und gleichzeitig die Unterschiede in der Wettbewerbsbereitschaft von Männern und Frauen nach Möglichkeit anzugleichen. Bei einem bekannten psychologischen Ansatz – dem *priming* – wurden wir fündig.

Wir baten die teilnehmenden Frauen und Männer in unserer Studie, in einem kurzen Aufsatz eine Situation aus ihrer Vergangenheit zu beschreiben, in der sie andere Personen erfolgreich beeinflusst haben. Mit diesem sogenannten *power priming* versetzten wir einen Teil der Teilnehmenden gedanklich in eine einflussreiche Lage. Die übrigen Probanden waren entweder gar nicht gepriemt oder sie wurden in eine Situation versetzt, in der sie sich machtlos und abhängig fühlten. Unsere Erwartung war, dass durch *power priming* die geschlechtsspezifischen Unterschiede im Wettbewerbsverhalten beseitigt und folglich Frauen und Männer zu gleichen Anteilen in einen Wettbewerb eintreten würden.

Die Ergebnisse gaben uns recht. In der neutralen Gruppe zeigte sich zunächst das geschlechtstypische Muster: 40 Prozent der Männer, aber nur 14 Prozent der Frauen entschieden sich dafür, in den Wettbewerb mit anderen zu treten. Auch beim *priming* auf eine Abhängigkeitssituation verhielten sich die Testpersonen weitgehend nach diesem Muster.

Die Erinnerung an eine einflussreiche Situation bewirkte dagegen, dass sich die Geschlechter tatsächlich in ihrem Verhalten angleichen. Interessanterweise unterschieden sich die Reaktionsweisen von Männern und Frauen erheblich und das Resultat ergab sich weniger durch die Reaktion der Frauen als durch die der

Männer. Bei den Frauen entschieden sich 20 Prozent, also etwas mehr als in der neutralen Gruppe, mit anderen in Konkurrenz zu treten. Statistisch ist das aber nur eine unbedeutende Erhöhung der Wettbewerbsbereitschaft. Dagegen verringerten die Männer ihre Wettbewerbsbereitschaft statistisch signifikant: Nur noch 28 Prozent von ihnen stellten sich der Konkurrenz.

*Power priming* ermöglicht offensichtlich allen Personen eine realistische Einschätzung der eigenen Fähigkeiten. Während es bei Frauen teilweise das Selbstbewusstsein stärkt, hält es Männer eher davon ab, ein erhöhtes Risiko einzugehen. Gerade das halten wir für ein wichtiges Ergebnis: Denn frühere Untersuchungen zur Wettbewerbsfähigkeit haben gezeigt, dass Männer sich häufig überschätzen und dann erfolglos an Wettbewerben teilnehmen. Dies ist nicht nur eine Vergeudung von Zeit und Anstrengung, sondern auch mit Frustrationen verbunden. *Power priming* führt hingegen dazu, dass Männer sich – wie Frauen – realistischer einschätzen und dementsprechend fast nur noch die besten in den Wettbewerb eintreten.

Der Umstand, dass *power priming* insbesondere bei Männern die Risikofreudigkeit verringert, ist auch in anderem Kontext von Bedeutung. Schließlich haben Unternehmen oft das Problem, dass Mitarbeiter zu hohe Risiken eingehen, wie die letzte Finanzkrise zur Genüge belegt hat. So könnte unsere Intervention, die ein übermäßiges Eingehen von Risiken verhindert, auch im Interesse von Unternehmen liegen.

### Die Methode ist in Schulen wie in Führungsetagen von Relevanz

Auf *priming* basierende Werkzeuge können in vielen Bereichen sinnvoll eingesetzt werden, unter anderem im Bildungssystem – insbesondere angesichts der Tatsache, dass geschlechtsspezifische Unterschiede in der Wettbewerbsbereitschaft früh im Leben auftauchen – oder in Berufsbildungsprogrammen als Teil aktiver Arbeitsmarktpolitik. Die Ergebnisse von Loukas Balafoutas, Helena Fornwagner und mir sprechen dafür, die Implementierbarkeit und die Folgenabschätzung von *priming*-Interventionen in diesen Praxisbereichen genauer zu erforschen.

Tatsächlich wurde bereits gezeigt, dass das in unserer Studie verwendete *power priming* die Leistung von Bewerberinnen und Bewerbern in Vorstellungsgesprächen für Jobs oder fürs College verbessert. Und nicht zuletzt ist *power priming* für die Führungsetagen in Unternehmen und öffentlichen Einrichtungen von Relevanz. Denn dort kann sich der Anteil an Frauen in den Spitzenpositionen nur erhöhen, wenn sich beide Geschlechter in gleichem Maße am Wettbewerb um diese Stellen beteiligen. o

# 9 3D-Metalldruck im Pulverbett

**ERIC A. JÄGLE**  
↳ Max-Planck-Institut  
für Eisenforschung GmbH,  
Düsseldorf

Der 3D-Druck von Kunststoffteilen ist in vielen Bereichen Standard, bei Metallen ist noch einiges an Forschungsarbeit zu leisten. Es ist aber offensichtlich, dass die additive Fertigung, wie der Fachausdruck für diese Technik lautet, das Potenzial hat, die Metallverarbeitung zu revolutionieren und neue Anwendungsbereiche zu eröffnen. Unsere Gruppe am Max-Planck-Institut für Eisenforschung entwickelt Verfahren, um das Design der Metalllegierungen für und durch den 3D-Druck zu verbessern.

**L**anglebige Turbinenschaufeln, auf den Patienten zugeschnittene Implantate und superleichte, aber stabile Autokarosserien – das sind nur einige potenzielle Anwendungsmöglichkeiten von Bauteilen, die mit additiver Fertigung, also 3D-Druck, hergestellt werden könnten. Als additive Fertigung werden alle Verfahren bezeichnet, bei denen Material computer-gesteuert Schicht für Schicht aufgetragen wird und ein dreidimensionaler Gegenstand entsteht.

Ein spezielles Verfahren der additiven Fertigung ist das selektive Laserstrahlschmelzen. Hierbei rastert ein mehrere hundert Watt starker Laserstrahl in Sekundenschnelle über eine dünne Schicht aus metallischem Pulver. Dieses schmilzt und kühlt innerhalb von Tausendstel Sekunden ab. Eine Bürste trägt neues Metallpulver auf, und der Laser fährt die gerade erstarrte Metallspur erneut ab. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis das gewünschte Werkstück fertig ist. Es wächst gewissermaßen aus dem Pulver wie ein Phönix aus der Asche.

Der 3D-Metalldruck hat gegenüber herkömmlichen Produktionsverfahren viele Vorteile. So lassen sich komplex geformte Körper wie aus einem Guss herstellen, ohne Schweißen, Fräsen oder Kleben einzelner Bauteile. Gleichzeitig ist es möglich, Formen individuell anzupassen und sogenannte Art-to-part-Konzepte zu realisieren, also Designs ohne vorherige Anpassung der Produktionslinie. Häufig lassen sich nämlich kreativ konzipierte Bauteile mit herkömmlichen Verfahren wegen technischer Beschränkungen nicht herstellen, mit additiver Fertigung ist im Prinzip jedes noch so komplizierte Design möglich. So können zum Beispiel Turbinenschaufeln für Kraftwerke und Flugzeuge, die extrem hohen Temperaturen ausgesetzt sind, mit komplex geformten und damit besonders effizienten Kühlkanälen gedruckt werden. Die ständige Kühlung während des Betriebs schützt das Material, ermöglicht höhere Betriebstemperaturen und spart Treibstoff. Auch im Automobilbau können Teile mit Hohlräumen

*Gruppenleiter Eric Jäggle (links) und sein Doktorand Priyanshu Bajaj befüllen die Kammer des 3D-Druckers mit Metallpulver. Dies ist so feinkörnig, dass es leicht eingeatmet werden könnte. Die beiden Forscher tragen deshalb Schutzkleidung.*



*Ein Beispiel für die Komplexität von Bauteilen, die mit additiver Fertigung hergestellt werden können: Das Logo des Max-Planck-Instituts für Eisenforschung als Relief auf 3D-gedruckten Münzen aus Edelstahl.*

gedruckt werden, die einerseits Material und somit Gewicht einsparen, aber durch die richtige Statik trotzdem eine hohe Stabilität garantieren.

Einer der derzeit limitierenden Faktoren im 3D-Metalldruck liegt nicht im Produktionsverfahren, sondern in der Legierung, also dem Material, aus dem das Bauteil hergestellt werden soll. Zwar sind aus der Praxis der klassischen metallverarbeitenden Verfahren, wie Schmieden, Gießen oder Sintern, für jeden Anwendungsbereich unzählige Legierungen bekannt, und einige eignen sich auch zum Teil für die additive Fertigung. Aber sie reizen das Potenzial dieses Verfahrens nicht vollständig aus, da sie an Bedingungen angepasst wurden, die Dank der additiven Fertigung nun keine Rolle mehr spielen. Deswegen müssen neue Ausgangsmaterialien für den 3D-Druck entwickelt werden. Das ist der Forschungsschwerpunkt unserer Gruppe am Max-Planck-Institut für Eisenforschung.

## Viele Faktoren beeinflussen die Materialeigenschaften

Ein Ansatz, den unser Team verfolgt, ist für uns von besonderer Bedeutung, weil er einen flexibleren Einsatz des 3D-Metalldrucks verspricht. Die kommerziell erhältlichen Metallpulver bestehen aus Legierungen mit einem festen Mischungsverhältnis der einzelnen Bestandteile. Jedes einzelne Pulverteilchen besteht aus dieser Metallmischung. Für die additive Fertigung eignen sich die klassischen Legierungen oft nicht. Speziallegierungen bei einer Firma anzufordern, ist aber teuer und aufwändig, und insbesondere kann man nicht mit beliebigen Stoffen experimentieren. Deswegen wäre es ideal, wenn sich Pulver aus reinen Elementen in den gewünschten Mischungsverhältnissen einsetzen ließen. In diesem Fall verschmelzen

## Das In-situ-Legierungsdesign eröffnet weitere Herstellungswege für Verbundwerkstoffe

die unterschiedlichen Pulverteilchen erst während des Drucks zu einer Legierung.

Um diese Möglichkeit zu untersuchen, haben wir Metallpulver aus Eisen, Chrom und Nickel verwendet und den Einfluss verschiedener Parameter vor und während des Druckprozesses auf die Eigenschaften der Legierung getestet. Die gedruckten Bauteile, der Einfachheit halber Würfel, untersuchten wir mit Licht- und Rasterelektronenmikroskopie sowie Röntgenspektroskopie und chemischen Analyseverfahren eingehend, mit dem Ergebnis: Die Geschwindigkeit, mit der der Laser über das Pulverbett fährt, die Stärke des Laserstrahls und dessen Durchmesser sowie die Dicke der Pulverschicht beeinflussen die Mikrostruktur, die wesentlich die Eigenschaften des Bauteils bestimmt. Aber der wirklich ausschlaggebende Faktor ist die Zeitspanne, in der die einzelnen Pulver flüssig im Schmelzbad vorliegen, bevor sie erstarren und ein chemisch homogenes Bauteil bilden. Denn damit sich die verschiedenen Elemente, die aus unterschiedlichen Pulverpartikeln stammen, gut vermischen, muss das Material für eine Weile im flüssigen Zustand gehalten werden. Das bestätigten wir auch mit Modellrechnungen.

Dieses In-situ-Legierungsdesign ermöglicht eine enorme Zeitersparnis und Flexibilität auch für die Forschung. Man kauft die reinen Metallpulver, mischt sie selbst im gewünschten Verhältnis und kann sehr schnell und unkompliziert damit experimentieren. Außerdem kann man Stoffe zusammenbringen, die sich klassisch nur sehr schwer mischen lassen, zum Beispiel Metallmatrix-Verbundwerkstoffe. Diese bestehen aus einer Metallmatrix, in die zur Verstärkung beispielsweise keramische Bestandteile eingebracht werden. Sie kommen in vielen Bereichen, wie der Leistungselektronik sowie der Automobil- und Luftfahrtindustrie zum Einsatz.

### Ein einfach herzustellender Werkstoff für hohe Einsatztemperaturen

Gleichzeitig eröffnet das In-situ-Legierungsdesign weitere Herstellungswege für Verbundwerkstoffe, zum Beispiel für oxiddispersionsgehärtete Legierungen. Diese kurz ODS genannten Stähle sind interessant für Anwendungen bei sehr hohen Temperaturen. Normalerweise müssen sie über einen aufwändigen Prozess des mechanischen

Legierens hergestellt werden, wobei dem Stahl Oxidpartikel beigemischt werden. Dies gelang uns direkt im In-situ-Legierungsdesign. Hierfür haben wir das sonst im Prozess verwendete Schutzgas (Stickstoff oder ein Edelgas wie Argon) mit Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) versetzt. Das ist zwar normalerweise sehr reaktionsträge, aber unter dem Laserstrahl wird es in Kohlenmonoxid (CO) und Sauerstoff aufgespalten, der dann in den Werkstoff eindringt. Unter diesen Bedingungen entstanden ganz von selbst fein verteilte Oxidpartikel im Material. Das Ergebnis: ein Werkstoff, der relativ einfach, ohne mechanisches Legieren hergestellt werden kann, und der bei hohen Einsatztemperaturen bis 800°C ungefähr 25 Prozent fester ist als der Grundwerkstoff ohne verstärkende Oxidpartikel.

### Interesse bei der Industrie

Die bisherigen Ergebnisse sind vielversprechend und haben bereits das Interesse bei der Industrie geweckt, die bis vor wenigen Jahren in Hinblick auf neue Legierungen für den 3D-Metalldruck noch sehr zurückhaltend war. Dies betrifft auch einen weiteren hoffnungsvollen Forschungszweig an sogenannten Hochentropie-Legierungen. Diese Materialklasse ist von besonderem Interesse, weil sie eine hohe Festigkeit aufweist und temperatur- sowie korrosionsbeständig ist. Hochentropie-Legierungen bestehen meist aus mindestens fünf metallischen Elementen, die jeweils in ähnlichen Mengen in der Legierung vertreten sind. Wir sind dabei, solche Legierungen speziell für die additive Fertigung zu entwickeln. Damit wäre der Weg frei für langlebigere Turbinenschaufeln, individuelle Implantate, leichtere Autokarosserien und vieles mehr. o

# 10 Rendezvous in der Steinzeit

**VIVIANE SLON,  
SVANTE PÄÄBO**

↳ *Max-Planck-Institut  
für evolutionäre  
Anthropologie, Leipzig*

In der Zeit von 400.000 bis 40.000 Jahren lebten in Eurasien zwei unterschiedliche Gruppen von Urmenschen: im Westen Neandertaler, im Osten die sogenannten Denisova-Menschen. Bei der Erbgutanalyse prähistorischer Knochen sind wir auf eine Frau gestoßen, deren Mutter Neandertalerin und Vater ein Denisova-Mensch war. Dieser Befund deutet darauf hin, dass sich verschiedene Menschenformen im Laufe der Geschichte immer wieder miteinander vermischt haben.

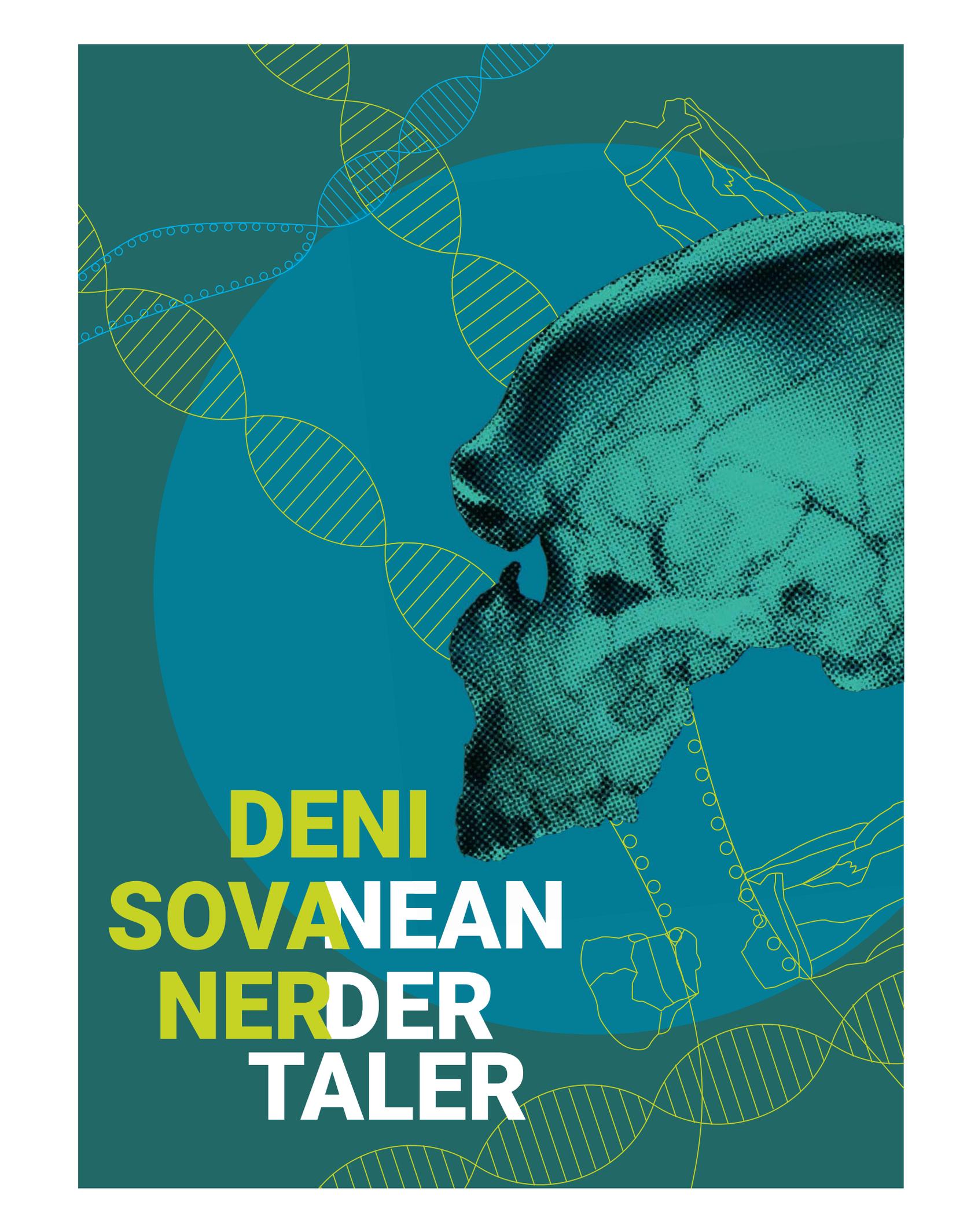
**D**ie ersten Überreste von Neandertalern sind schon 1856 in der Nähe von Düsseldorf entdeckt worden. Mittlerweile gibt es Hunderte von Neandertaler-Fundorten in Europa, im Mittleren Osten und Zentralasien. Die Existenz der Denisova-Menschen war jedoch noch bis vor wenigen Jahren unbekannt. 2010 analysierte ein Forschungsteam unter der Leitung von Svante Pääbo vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie einen winzigen Fingerknochen aus der Denisova-Höhle im Altai-Gebirge in Zentralasien. Die Erbgutanalysen ergaben, dass der Knochen zu einer Gruppe von Urmenschen gehörte, die sich genetisch von Neandertalern unterscheidet. Bisher sind Knochen dieser Menschenform nur in der Denisova-Höhle gefunden worden. Vor allem Menschen aus Ozeanien oder Südostasien tragen bis heute genetische Spuren dieser Denisova-Menschen in ihrem Erbgut. Die Denisovaner müssen folglich in Asien einst weit verbreitet gewesen sein. Die Frage ist, wie genau Neandertaler, Denisovaner und moderne Menschen miteinander umgingen, ob sie einander aus dem Weg

gegangen sind oder sich sogar regelmäßig miteinander vermischt haben.

Doch wie soll man die Beziehungen verschiedener Menschengruppen zueinander untersuchen, die vor mehreren zehntausend Jahren gelebt haben? Der Schlüssel zu solchen Fragen liegt wieder im Erbgut dieser Menschen. Wir haben deshalb zusammen mit Wissenschaftlern der Russischen Akademie der Wissenschaften das Erbgut aus einem kleinen Knochenstück analysiert, das 2014 in der Denisova-Höhle entdeckt worden war. Das „Denisova 11“ getaufte Fragment ist Teil eines Arm- oder Beinknochens eines mindestens 13 Jahre alten Individuums, das vor 90.000 Jahren gelebt hatte.

## Halb Neandertalerin, halb Denisovanerin

Unserer Analyse zufolge gehörte das Knochenstück einer Frau, denn im Erbgut von Denisova 11 sind zwei Kopien des X-Chromosoms vorhanden. Als nächstes



**DENI**  
**SOVANEAN**  
**NERDER**  
**TALER**

konzentrierten wir uns darauf, ob es sich bei Denisova 11 um die Überreste einer Neandertalerin oder eines Denisova-Menschen handelt. Dazu haben wir überprüft, welche Menschenform mehr genetische Varianten in ihrem Erbgut hinterlassen hat. Zu unserer Überraschung kommen beide Varianten zu fast gleichen Anteilen vor. Das bedeutet, dass die Frau sowohl von Neandertalern als auch von Denisovanern abstammt.

Für dieses Ergebnis kann es zwei Gründe geben: Entweder waren die Eltern von Denisova 11 selbst Mischlinge aus Neandertalern und Denisova-Menschen, oder ihre beiden Eltern gehörten jeweils zu einer der beiden Menschenformen. Wir haben daher analysiert,

Neandertalern verglichen. Dabei haben wir festgestellt, dass die Mutter von Denisova 11 näher mit einem Neandertaler aus Südeuropa als mit einem aus der Denisova-Höhle verwandt ist. Neandertaler müssen also zu mindestens einem Zeitpunkt in ihrer Geschichte von Europa nach Zentralasien oder in umgekehrter Richtung gewandert sein. Außerdem haben wir in der DNA, die die Frau von ihrem Denisova-Vater geerbt hat, geringe Mengen von Neandertaler-DNA gefunden. In seiner Ahnenreihe muss es also vor 300 bis 600 Generationen mindestens einen Neandertaler gegeben haben.

Das Erbgut von Denisova 11 bezeugt, dass sich ihre Neandertaler- und Denisovaner-Vorfahren mehrmals miteinander vermischt haben: einmal ihre Eltern und mindestens noch einmal die Vorfahren ihres Vaters. Möglicherweise geschah dies sogar immer, wenn sich die beiden Menschenformen getroffen haben. Diese Gelegenheiten dürften jedoch rar gewesen sein, da sich die vergleichsweise wenigen Individuen von Neandertalern und Denisova-Menschen in den Weiten der eiszeitlichen Tundra nur sehr selten begegnet sind. Das erklärt möglicherweise auch, wie die beiden Gruppen trotz gelegentlicher Vermischung genetisch unterschiedlich geblieben sind.

Unsere Studie ist also ein weiterer Beleg dafür, dass verschiedene Menschenformen in der Vergangenheit Kinder miteinander hatten. Aus früheren genetischen Analysen an unserem Institut wissen wir beispielsweise, dass sich Neandertaler mit den Vorfahren heutiger Nicht-Afrikaner sowie Denisovaner sich mit den Vorfahren der heutigen Asiaten und Ozeanier und mit einer früheren, noch unbekanntem Gruppe von Urmenschen vermischt haben. Ein etwa 40.000 Jahre alter moderner Mensch aus Rumänien wiederum besaß einen Neandertaler-Vorfahren, der nur vier bis sechs Generationen vor ihm gelebt hatte. ◦

## Verschiedene Menschenformen haben sich miteinander vermischt

wie oft sich die von der Mutter vererbten Chromosomen von denen des Vaters unterscheiden. Die Ergebnisse zeigen eindeutig: Die Eltern der Frau waren ein Neandertaler und ein Denisova-Mensch.

Da das Erbgut aus ihren Mitochondrien – winzigen Zellorganen für die Energiegewinnung, deren Erbgut nur von der Mutter vererbt wird – von einem Neandertaler stammt, musste Denisova 11 die Tochter einer Neandertaler-Mutter gewesen sein. Folglich war ihr Vater ein Denisovaner. Wir haben also einen eindeutigen Beleg dafür gefunden, dass diese beiden Menschenformen rund um die Höhle miteinander Kontakt hatten, in der die Überreste der Frau gefunden worden sind.

Die gemischte Herkunft von Denisova 11 bot uns die einzigartige Gelegenheit, zwei Gruppen von Urmenschen aus einem einzigen Erbgut heraus zu untersuchen. Zunächst haben wir die Neandertaler-DNA mütterlicherseits mit der von bereits untersuchten

# 11 Wildwest im Internet

**ANJA FELDMANN**  
↳ Max-Planck-Institut  
für Informatik, Saarbrücken

Internet-Routingprotokolle wie das Border Gateway Protocol (BGP) steuern den Datenfluss im Cyberspace und nutzen dafür spezielle Attribute, BGP-Communities. Sie regeln die Verteilung der Daten und können weitere Aktionen auslösen – etwa zum Schutz vor Hackerangriffen. Allerdings lassen sie sich auch leicht missbrauchen. Und ihre Wirkung ist nicht einmal verbindlich spezifiziert. Jeder kann machen, was er will: Wilder Westen im Internet. Am Max-Planck-Institut für Informatik zeigen wir, was möglich ist.

**Z**wei Wochen vor Weihnachten. Der Ansturm auf Geschenke erreicht seinen Höhepunkt, auch im Internet. Der Betreiber eines Online-Shops freut sich gerade über Rekordumsätze – da schnellst sein Puls plötzlich in die Höhe: Seine Website ist nicht mehr zu erreichen. Eine Analyse des Datenverkehrs zeigt, dass tausende Angreifer – zum Beispiel ein BotNet aus vielen Computern – seinen Online-Shop mit einer Flut von unsinnigen Anfragen bombardieren und so in die Knie gezwungen haben. Experten nennen das eine Distributed Denial-of-Service-Attacke (DDoS). Nichts geht mehr. Für den Händler ist der Ausfall eine wirtschaftliche Katastrophe.

Die bange Frage lautet nun: Was tun, um den angegriffenen Online-Shop aus der Schusslinie zu bekommen? Die brachiale Lösung: Man versteckt das gesamte Rechenzentrum, in dem der Server des Händlers steht. Es wird für eine gewisse Zeit einfach aus der Landkarte des Internet entfernt, bis wieder Ruhe einkehrt. So können die bössartigen Datenpakete den Weg zu ihrem Opfer nicht mehr finden. Damit sind aber auch alle anderen Computer im Rechenzentrum eine Zeitlang nicht mehr zu erreichen. Das könnten zum Beispiel weitere Online-Shops oder Server von Medien und Behörden sein.

Offensichtlich ist diese Lösung alles andere als optimal, weil sie hohe Kollateralschäden mit sich bringt.

## Eine neue Methode, um DDoS-Angriffe abzuwehren

Wir am Max-Planck-Institut für Informatik haben daher zusammen mit Partnern an der Technischen Universität Berlin und dem deutschen Internetknoten DE-CIX eine Methode entwickelt, um solche Angriffe abzuwehren. Es handelt sich um eine Art Erweiterung der BGP-Nachrichten, mit deren Hilfe der Datenverkehr im Internet geregelt wird. Sie werden regelmäßig zwischen den Internet-Routern ausgetauscht – jenen Zwischenstationen, an denen jedes Datenpaket auf seinem Weg vom Absender zum Empfänger für den Bruchteil einer Sekunde Halt macht. Die Router ermitteln bei dem kurzen Stopp das Ziel jedes Datenpaketes und schicken es daraufhin zum nächsten Router, der ein Stück näher am Endpunkt der Reise durch den Cyberspace liegt.

Im Fall der DDoS-Attacke auf den Online-Shop können die BGP-Communities genannten Protokollattribute zu einer entscheidenden Verteidigungslinie werden, wie

wir nachgewiesen haben. Der Ansatz heißt Advanced Blackholing und ermöglicht wesentlich präzisere Abwehrmaßnahmen als das zeitweilige Verstecken eines ganzen Rechenzentrums samt der vielen dort gehosteten Websites. Stattdessen könnte das Rechenzentrum eine BGP-Nachricht mit speziellen BGP-Communities an Router schicken, von denen es DDoS-Datenpakete erhält.

Schon bisher war es möglich, um ein einfaches Blackholing zu bitten: Einfach nichts mehr an den Netzwerkbereich des Angegriffenen weiterleiten! Das von uns mitentwickelte Advanced Blackholing erlaubt es, wesentlich komplexere Hilfeersuche abzuschicken, die dann von einem Internet Austauschnoten (IXP) automatisch behandelt werden können. Zum Beispiel ist es jetzt möglich, genau zu spezifizieren, welche Datenpakete von welchen Absendern an welchen Empfänger bearbeitet werden sollen; man kann sie einfach löschen, sie umleiten oder nur einige von ihnen durchlassen. Somit vermeidet man, dass das Opfer vom gutartigen Internet-Verkehr abgeschnitten wird.

Sobald sich die BGP-Community mit der Bitte um das Advanced Blackholing von Router zu Router verbreitet hat, ist der Angriff abgewehrt: Der unerwünschte Datenverkehr gelangt nicht einmal mehr in die Nähe des Opfers, aber alle anderen Verbindungen und auch der nicht betroffene Datenverkehr im Rechenzentrum bleiben weitgehend unbeeinträchtigt. Das Rechenzentrum kann ungestört weiterarbeiten, unbeteiligte Websites bemerken nichts von dem Angriff.

BGP-Communities dienen aber nicht nur der Abwehr von Cyberkriminellen. Sie können auch eingesetzt werden, um geltendes Recht im Internet durchzusetzen: So könnte beispielsweise ein Router in New York anderen Routern seinen Standort mitteilen. Diese wüssten dann, ob sie bestimmte Daten dorthin schicken dürfen oder nicht – etwa, weil die Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) das untersagt.

## BGP-Communities können auch Schaden anrichten

Leider haben BGP-Communities auch eine Schattenseite. Eines ihrer Kernprobleme: Ihr Absender kann nicht verifiziert werden – und überall, wo Anonymität herrscht, ist der Missbrauch bekanntlich nicht weit. So könnte beispielsweise folgende Situation auftreten: Ein Angreifer A will sein Opfer O vollständig von allem Datenverkehr abschneiden. Dazu sendet er eine Blackhole-Community an diejenigen Router, von denen O normalerweise mit Datenpaketen beliefert wird. Gelingt es A, diese Nachricht möglichst weit zu verbreiten, kommt bei O fast nichts mehr an.

BGP-Communities können also auch eine sehr effektive Methode sein, um großen Schaden anzurichten: Der Angreifer müsste nur ein kleines Routingpaket schicken, um sein Opfer fast vollständig zu isolieren.

Was im Fall der DDoS-Attacke dem Schutz vor Hackern diene, wird hier zu seiner Angriffswaffe. Natürlich wird die Manipulation auffallen – irgendwann. Und vielleicht ist es dann sogar möglich, dass der Übeltäter ausfindig gemacht und vom Opfer vor Gericht zur Rechenschaft gezogen werden kann.

## Die Schwächen der Abwehr und Wege, sie zu beheben

BGP Communities sind ein machtvolles Werkzeug, um auf das Routing von Datenpaketen im Internet Einfluss zu nehmen. Allerdings haben sie – wenigstens derzeit – drei wesentliche Schwächen, die wir untersuchen. Schwäche Nummer eins: Jeder BGP-Router kann Communities verschicken, und es gibt keine Möglichkeit, die Authentizität des Absenders festzustellen. Kommt eine Community von jemandem, der dazu berechtigt ist? Das lässt sich nur im Nachhinein feststellen. Wie man eine solche Authentizitätsprüfung vornehmen könnte, werden wir weiter erforschen.

Schwäche Nummer zwei: Es gibt keine anerkannten und verbindlichen Regeln. Es steht jedem Router frei zu entscheiden, was er mit erhaltenen Communities macht. Heute nehmen Router meist BGP-Communities von x-beliebigen anderen Routern an, was dem Missbrauch natürlich entgegenkommt – nur dadurch könnte Angreifer A sein Opfer O ohne großen Aufwand vom Internetverkehr ausschließen. Das ließe sich einfach ändern: Man könnte beispielsweise festlegen, dass Communities nur dann akzeptiert werden, wenn sie vom betroffenen Router selbst stammen. O hätte also von sich aus um ein Blackholing bitten können – wie im Fall der DDoS-Attacke. Aber kein anderer Router hätte das Recht gehabt, Datenpakete für O zu blockieren. Ganz so einfach ist die Welt aber leider nicht: Es gibt durchaus auch Fälle, in denen eine solche Fremdsteuerung gewünscht ist – zum Beispiel beim Outsourcing der Netzwerksteuerung oder bei Abhörmaßnahmen der Strafverfolgungsbehörden.

Schwäche Nummer drei: Die Bedeutung einer bestimmten BGP-Community ist nicht verbindlich definiert. So ist 666 zwar als BGP-Blackhole bekannt – aber niemand könnte einen Router daran hindern, zum Beispiel allen Datenverkehr von und zu einer Website mit vermeintlich kriminellen Inhalten als 666 zu flaggen.

Die letzten beiden Schwächen können vielleicht durch verbindliche Regeln in den Requests for Comments (RFC) behoben werden – den Dokumenten, in denen viele technische Grundlagen des Internets definiert sind. Für die Frage der zuverlässigen Authentifizierung von BGP-Communities gibt es dagegen heute noch keine zufriedenstellenden Lösungsansätze. Wir haben also noch eine Menge Arbeit vor uns. Und beim Routing dürfte noch eine Weile der Wilde Westen herrschen. ◦

# 12 Hoffnung für Neuropathie-Patienten

**MICHAEL SEREDA,  
LISA REINECKE,  
ROBERT FLEDRICH,  
THOMAS PRUKUP,  
RUTH STASSART,  
KLAUS-ARMIN NAVE**

↳ Max-Planck-Institut  
für experimentelle Medizin,  
Göttingen

Am Anfang ist es vielleicht nur ein Kribbeln oder Taubheitsgefühl. Der Fuß lässt sich nicht mehr anheben und fällt beim Absetzen schwer herab. Koordinationsstörungen, Schwäche, Muskelabbau: Die Charcot-Marie-Tooth-Krankheit schreitet unaufhaltsam fort – so dachte man bislang. Doch nun besteht Aussicht auf eine Therapie: eine einfache Nahrungsergänzung könnte die Symptome lindern.

**D**er etwas sperrige Name dieser erblichen peripheren Neuropathie geht auf drei Entdecker zurück, die Franzosen Jean-Martin Charcot und Pierre Marie und den Briten Henry Tooth. Mit einer Häufigkeit von 1: 2.500 fällt die Charcot-Marie-Tooth-Krankheit in die Kategorie „Seltene Erkrankung“. Doch so selten ist die Krankheit gar nicht: Allein in Deutschland sind insgesamt etwa 30.000 Menschen davon betroffen. Die Tendenz ist steigend, denn obwohl die Erkrankung häufig unerkannt bleibt, erhöhen moderne Nachweismethoden stetig die Anzahl der Diagnosen.

Um die Ursachen und Behandlungsmöglichkeiten möglichst effizient erforschen und unsere Erkenntnisse bündeln zu können, haben wir gemeinsam mit weiteren Ärzten und Wissenschaftlern aus Göttingen, München, Münster, Würzburg und Aachen ein Netzwerk gegründet ([www.CMT-NET.de](http://www.CMT-NET.de)), das von Göttingen aus koordiniert wird. Hier können sich Patienten, Wissenschaftler und Ärzte über Fortschritte informieren.

Der häufigsten Form der Erkrankung liegt eine Störung der Myelin-Produktion zugrunde. Das Myelin ist eine fettreiche Substanz, die vor allem von den sogenannten Schwann-Zellen gebildet wird. Ähnlich wie eine isolierende Kabelhülle umgibt und schützt sie die Fortsätze vieler Nervenzellen. Dank dieser Isolierschicht werden die elektrischen Nervenimpulse schneller geleitet. Bei dieser Form der Erkrankung ist die Myelin-Produktion offenbar gestört: Die elektrischen Signale der Nervenzellen werden langsamer weitergeleitet, und die gesamte Zelle wird geschädigt. Schließlich verkümmern wegen der fehlenden Nervensignale auch die Muskeln.

## Frühe Symptome

Die ersten Symptome treten oft bereits im Kindes- oder Jugendalter auf, können sich aber auch erst im Erwachsenenalter zeigen. Bei manchen Betroffenen

ist die Erkrankung so schwach ausgeprägt, dass sie zeitlebens unentdeckt bleibt. Für andere wiederum führt sie irgendwann zu einem Leben an Krücken oder im Rollstuhl. Kinder mit einem betroffenen Elternteil erben die Erkrankung mit 50-prozentiger Wahrscheinlichkeit.

Das Protein PMP22 („peripheral myelin protein 22“) findet sich als Bestandteil des Myelins im peripheren Nervensystem und spielt in der Myelin-Produktion der Schwann-Zellen eine zentrale Rolle. Zwischen 70 und 80 Prozent aller Patienten weisen Mutationen des pmp22-Gens auf Chromosom 17 auf; in den meisten Fällen liegt es verdoppelt vor. Wie genau die Krankheit entsteht, ist noch unklar.

## Genetisch veränderte Ratten als Modell

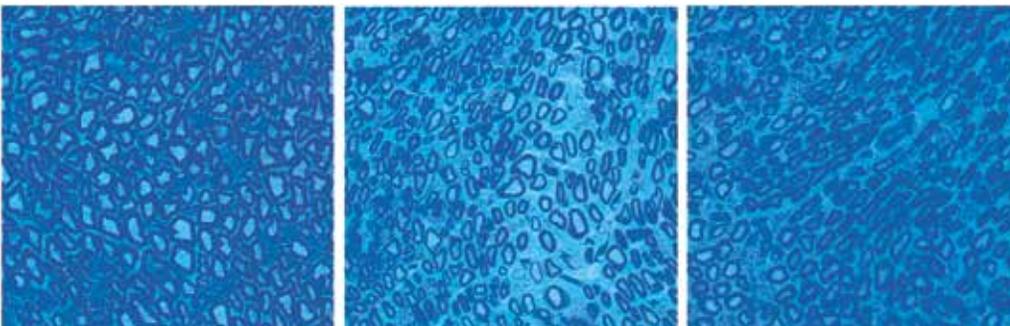
Zunächst wollten wir die Mechanismen der Erkrankung besser verstehen, um zum Beispiel neue Wirkstoffe zu finden und Behandlungswege zu testen. Dazu haben wir genetisch veränderte Ratten entwickelt, die ebenfalls eine zusätzliche Kopie des pmp22-Gens besitzen und ähnliche Symptome wie der Mensch entwickeln.

Damit Zellen in den ersten drei Wochen nach der Geburt das fettreiche Myelin bilden können, werden bei gesunden Ratten die am Fettsäurestoffwechsel beteiligten Gene vermehrt angeschaltet. In früheren Arbeiten

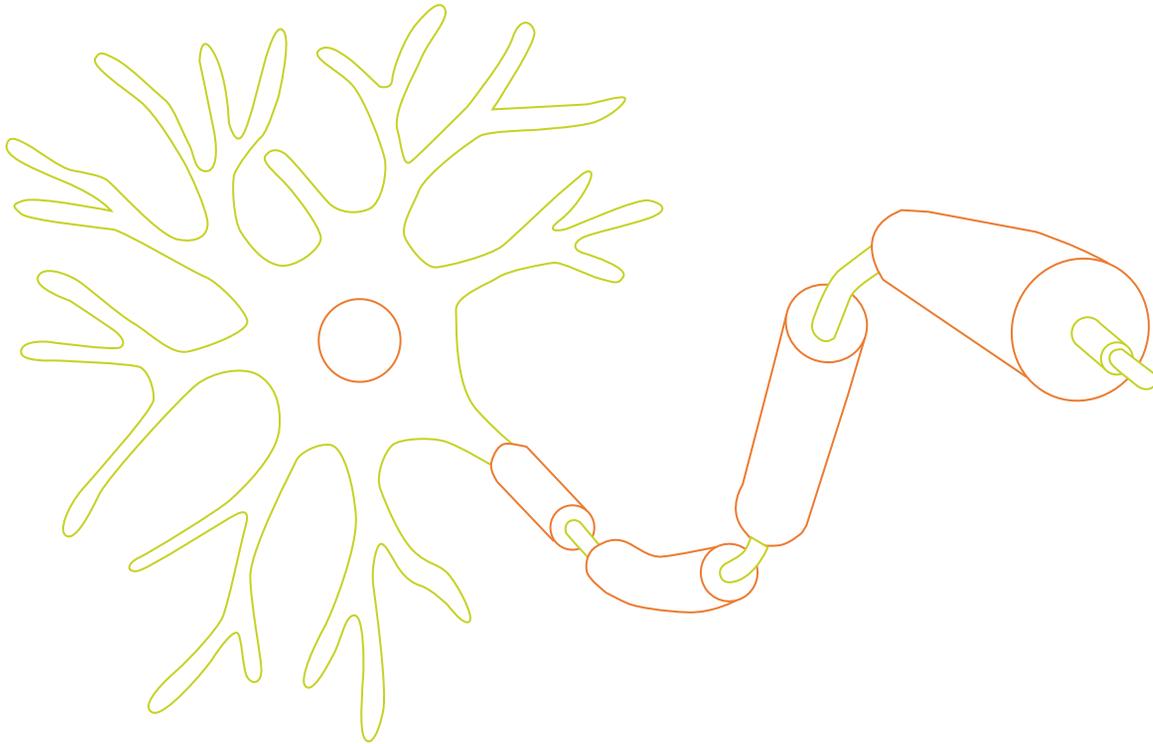
haben wir herausgefunden, dass in den Ratten mit der zusätzlichen Kopie des pmp22-Gens die Aktivierung von Fettgenen ausbleibt. Die fehlende Bildung von Fetten könnte demnach für die gestörte Myelinisierung bei Patienten mit Charcot-Marie-Tooth mitverantwortlich sein.

Als nächstes haben wir untersucht, ob wir die beeinträchtigte Fettsäuresynthese ausgleichen können. Ein naheliegender Kandidat für die Zufuhr von Fetten ist das fettähnliche Lecithin. Lecithin ist chemisch gesehen eine Mischung aus Phospholipiden und kommt besonders konzentriert in Eidotter und Pflanzensamen wie Soja vor.

In Vorversuchen haben wir herausgefunden, dass Schwann-Zellen von außen zugefügte Fette sowohl in Zellkulturen als auch in Versuchstieren in ihr Myelin einbauen. Eine sogenannte proof-of-principal-Studie mit den genetisch veränderten Ratten hat dann den Beweis erbracht, dass die erkrankten Tiere am Ende der Studie mehr Muskelkraft entwickeln, wenn sie ab dem zweiten Tag nach der Geburt 16 Wochen lang Lecithin als Nahrungsergänzung erhalten. Unter dem Mikroskop lässt sich auch der Grund dafür erkennen: eine erhöhte Anzahl myelinisierter Nervenzellfortsätze.



Bei gesunden Ratten zeigen sich im Nervenquerschnitt die Myelinscheiden der Nervenzellen als blaue Ringe (links). Im Vergleich dazu sind in genetisch veränderten Ratten deutlich weniger mit Myelin ummantelte Nervenfaser zu sehen (Mitte). Eine Behandlung dieser Tiere mit Lecithin erhöht die Anzahl myelinisierter Nervenzellen (rechts).



## Das Medikament wird voraussichtlich 2020 auf den Markt kommen

Neben PMP22 sind auch Hormone an der Myelin-Bildung beteiligt. Insbesondere das Hormon Progesteron beeinflusst die Myelinisierung in Schwann-Zellen und steigert die Bildung von PMP22. Wir konnten zeigen, dass sich die übermäßige Bildung von PMP22 durch eine Blockade des Progesteron-Rezeptors korrigieren und der Verlauf der Erkrankung damit behandeln lässt.

Da jedoch solche Progesteron-Blocker wegen der zentralen Bedeutung des Hormons für Stoffwechsel und Fruchtbarkeit als Wirkstoffe nicht geeignet sind, haben wir ein Kombinationspräparat mit dem Arbeitstitel PXT3003 aus Baclofen, Naltrexon und Sorbitol entwickelt. Diese drei Komponenten wirken gemeinsam auf die Überproduktion von PMP22, aber auch auf weitere krankheitsrelevante Signalwege. Gleichzeitig sind die beteiligten Wirkstoffe bereits zugelassen und damit für den Patienten sicher.

Wir haben jungen Ratten vom sechsten bis zum 18. Lebenstag den Kombinationswirkstoff PXT3003 verabreicht. Das Ergebnis fiel überraschend gut aus: Die Schwann-Zellen produzierten tatsächlich weniger PMP22-Protein und entwickelten sich normal. Bereits die kurze Therapie innerhalb der ersten zwei Lebens-

wochen verbesserte die motorischen Fähigkeiten der Tiere so weit, dass sich der Krankheitsbeginn deutlich hinauszögern ließ.

### Studie bestätigt Wirksamkeit

Nach vielversprechenden Ergebnissen in präklinischen Studien sowie einer nachfolgenden Phase-2-Studie durchlief PXT3003 bereits eine internationale Zulassungsstudie der Phase 3 mit ca. 300 Patienten. Die Wirkung von PXT3003 war darin sehr positiv. PXT3003 ist damit das erste Medikament für eine erbliche Neuropathie, das erfolgreich aus der präklinischen Forschung heraus entwickelt wurde. Es wird voraussichtlich 2020 in den USA und Europa erhältlich sein.

Mithilfe der PXT3003-Therapie wird bei Ratten das Auftreten von Symptomen also teilweise verhindert, und der Beginn der Krankheit verschiebt sich bis ins Erwachsenenalter. Wir hoffen, dass eine frühzeitige Behandlung sowie der Ersatz der fehlenden Fette durch Lecithin auch beim Menschen den Verlauf der Krankheit entscheidend beeinflusst. Da die Erkrankung mittlerweile durch genetische Tests bereits früh diagnostizierbar ist, können Kinder betroffener Eltern schon vor dem Auftreten erster Symptome genetisch untersucht werden. Eine frühzeitige Therapie könnte gerade für junge Charcot-Marie-Tooth-Patienten von großem Nutzen sein, denn zu Beginn verursacht die Erkrankung meist nur milde Symptome. o

# 13 Ein roter Faden im Labyrinth der europäischen Vertragsrechte

**REINHARD  
ZIMMERMANN**

Max-Planck-Institut  
für ausländisches und  
internationales  
Privatrecht, Hamburg

Ein einheitliches Vertragsrecht innerhalb der Europäischen Union – dieses Ziel zählt zu den bedeutsamsten Projekten der europäischen Privatrechtsentwicklung. Über sieben Jahre lang haben wir in einem Team aus 21 Rechtswissenschaftlern daran gearbeitet, das Geflecht aus EU-Richtlinien, nationalem Recht und wissenschaftlichen Regelwerken zu entwirren. Das Ergebnis, die *Commentaries on European Contract Laws*, können als wissenschaftliche Basis für ein modernes europäisches Vertragsrecht dienen – ähnlich, wie schon früher Rechtsetzung immer wieder auf theoretischer Vorarbeit aufbaute.

**A**ls Gratian, ein gelehrter Mönch in Bologna, um 1140 seine *Concordia Discordantium Canonum* fertigstellte, konnte kaum jemand ahnen, welche Bedeutung seine Zusammenstellung kirchenrechtlicher Schriften bald erlangen sollte. Kaum noch beherrschbar, geschweige denn überschaubar war die Fülle an Rechtsquellen, die sich in den Jahrzehnten nach der Gregorianischen Reform den Rechtsgelehrten des Hochmittelalters bot: Römisches Recht, Bibel, Papstbriefe, Konzils- und Synodalakten sowie ältere Rechtssammlungen prägten das damalige Recht. Gratian sammelte und sortierte in seinem Werk fast 4.000 Exzerpte, unter anderem Konzilsbeschlüsse und päpstliche Entscheidungen. Er versah sie mit eigenen Kommentaren, sodass sie einen Schlüssel zur Auflösung scheinbarer Widersprüche boten. Das *Decretum*, wie Gratians Hauptwerk später genannt werden sollte, gilt als juristische Meisterleistung und zählt zu den wichtigsten Quellen nicht nur des römisch-katholischen Kirchenrechts, sondern auch des mittelalterlichen und frühneuzeitlichen Privatrechts.

Als unübersichtlich und ein kaum entwirrbares Geflecht aus EU-Richtlinien, nationalem Recht und wissenschaftlichen Regelwerken, die ihrerseits ein Labyrinth von teilweise miteinander verwandten und aufeinander aufbauenden, teilweise aber auch voneinander unabhängigen Textstufen darstellen, zeigt sich für Außenstehende mitunter auch das europäische Vertragsrecht. Wann gelten Verträge als geschlossen? Welche Verjährungsfrist gilt und wann setzt sie an? – Fragen, die in den Rechtsordnungen der Mitgliedstaaten unterschiedlich beantwortet sein können.

## Politisch unabhängig und gründlich wissenschaftlich vorbereitet

Als Nils Jansen, Professor an der Universität Münster, und ich im Herbst 2010 diskutierten, was im europäischen Vertragsrecht zu tun sei, dachten wir beide spontan an das *Decretum Gratiani* als eine Art Vorbild. Wenige Wochen zuvor hatte die EU-Kommission unter



José Manuel Barroso ihr Grünbuch „Optionen für die Einführung eines Europäischen Vertragsrechts für Verbraucher und Unternehmen“ veröffentlicht. Darin präsentierte sie angesichts hoher Transaktionskosten im grenzüberschreitenden Handel, vieler Handelshemmnisse für kleine und mittlere Unternehmen und eines geschwächten Vertrauens der Bürger in den Binnenmarkt sieben Vorschläge zur Konsultation. Neben der Schaffung eines fakultativen EU-Vertragsrechts fand sich dort auch die Idee eines Europäischen Zivilgesetzbuchs im Ordnungswege.

In einer Arbeitsgruppe setzten wir uns mit den Kommissionsideen auseinander. Es entstand das Projekt, das intern schon bald als *Decretum novum* bekannt wurde. Konnte es gelingen, ein gemeinsames Vertragsrecht zu schaffen, das die Vertragsrechtsordnungen aller EU-Länder vereint, deren Wertungen berücksichtigt und die notwendige Akzeptanz in Wirtschaft und Gesellschaft erreicht? Uns war bewusst: Rechtsvereinheitlichende Projekte können nur dann erfolgreich umgesetzt werden, wenn sie politisch unabhängig, unvoreingenommen und wissenschaftlich gründlich vorbereitet werden.

Als Team von 21 Wissenschaftlern begannen wir verschiedene Rechtsquellen vergleichend zu evaluieren. In den vergangenen 40 Jahren war eine ganze Reihe von Entwürfen für ein gemeinsames Vertragsrecht vorgelegt worden: Ausgehend von den *Principles of European Contract Law*, dem ersten grundlegenden wissenschaftlichen Entwurf für ein europäisches Vertragsrecht, auf den auch heute schon nationale Richter und Gesetzgeber zurückgreifen, galt es, das tatsächlich bereits erlassene europäische Richtlinienrecht zu untersuchen. Dabei berücksichtigten wir auch über Europa hinausreichende Rechtsquellen, dazu gehörte insbesondere das UN-Kaufrecht.

## Ein Panorama rechtlicher Vielfalt mit großer Tiefenschärfe

Um der Komplexität und dem innovativen Charakter des Projekts gerecht zu werden, lag ein wesentliches Augenmerk auf einer einheitlichen Herangehensweise auf Grundlage der historisch-vergleichenden Methode und der Textstufenanalyse. Es musste ermittelt werden, ob die Quellen tatsächlich einen gemeinsamen Kern der Vertragsrechte in Europa bilden, der die zukünftige Grundlage für ein einheitliches Regelwerk darstellen kann: Was sind ihre Gemeinsamkeiten? Wo liegen die Unterschiede? Wie erklären sich die Unterschiede und wie sind sie zu bewerten?

Ein besonderer Reiz dieses Projekts war, das aktuell geltende europäische Recht in seiner bisweilen zwar dissonanten, häufig aber auch durchaus harmonischen Vielstimmigkeit angemessen darzustellen. Unser Team rekonstruierte alle bislang vorliegenden Entwürfe einerseits in ihrer Entstehung und verglich sie in ihren Wertungen. Damit entstand ein Panorama des gesamten Vertragsrechts mit außerordentlicher Tiefenschärfe: von den Regeln über Vertragsschluss und Stellvertretung bis hin zu Abtretung, Aufrechnung, Schuldnermehrheiten und Verjährung.

Über sieben Jahre lang forschte unser Team und stellte wichtige Grundlagen für die Schaffung eines einheitlichen Vertragsrechts auf. Die Erkenntnisse sind in den *Commentaries on European Contract Laws* niedergelegt, die 2018 bei Oxford University Press erschienen sind.

## Irgendwann wird der Ruf nach Vereinheitlichung wieder lauter

Dass ein einheitliches Vertragsrecht ein umfassender und ambitionierter Gesetzgebungsakt ist, zeigte sich noch während der Projektlaufzeit. Die Kommission legte ihre Ideen wieder ad acta, wofür es eine Vielzahl von Gründen gab. Zu den wichtigsten zählt sicherlich, dass der Entwurf des europäischen Gesetzgebers nicht hinreichend sorgfältig vorbereitet war und unter einem unsachgemäßen politischen Termindruck stand. Widerstand regte sich in den Mitgliedstaaten, weite Teile der deutschen Wirtschaft, Handwerk, Verbraucherschutz sowie Bundesnotarkammer lehnten das Vorhaben ab.

Für uns als Herausgeber der *Commentaries* kam diese Entwicklung nicht unerwartet. Es ist eher begrüßenswert, dass dieses europäische Gesetzgebungsprojekt – wie sinnvoll es an sich auch ist – zunächst einmal nicht umgesetzt wurde. Denn ein schlechtes europäisches Vertragsgesetzbuch hätte die Europaidee noch weiter desavouiert, als sie es in den Augen von vielen sowieso schon ist. Zudem wird der europäische Gesetzgeber sich in erster Linie auf die Umsetzung seiner Strategie für die Digitalisierung des Binnenmarktes konzentrieren.

Doch irgendwann wird der Ruf nach einem einheitlichen europäischen Vertragsrecht wieder lauter werden. Wir haben von wissenschaftlicher Seite die Chance ergriffen, das unübersichtliche Geflecht zu entwirren – und zwar losgelöst vom politischen Termindruck. In diesem Sinne bilanzieren die *Commentaries* die bisherige Entwicklung und bieten Orientierung für die Zukunft. ◦

# 14 Wasser, Eis und Schnee – Akteure im arktischen Klimawandel

**MATHIAS GÖCKEDE**

↳ Max-Planck-Institut  
für Biogeochemie, Jena

Wie stabil Kohlenstoff zukünftig im arktischen Permafrost gebunden bleibt, anstatt als Treibhausgas in die Atmosphäre zu entweichen, ist von großer Bedeutung für das globale Klima. Unsere Feldforschung in Sibirien erklärt anhand neuer Daten und Modelle, wie die Umverteilung von Wasser und eine erhöhte Schneebedeckung, zwei bekannte Folgen des momentanen Klimawandels, den Kohlenstoffhaushalt in der Arktis weiter destabilisieren können. Unsere Ergebnisse helfen, die Rolle der Arktis im globalen Klimawandel verlässlicher zu bewerten.

**E**twa die Hälfte des weltweit im Boden gespeicherten Kohlenstoffs ist in der Arktis gelagert. Selbst wenn dieser Vorrat nur teilweise freigesetzt würde, könnte sich der CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Atmosphäre merklich erhöhen. Daher kommt der Arktis mit ihren Dauerfrostböden eine zentrale Rolle im Klimawandel zu. Bereits in den vergangenen Jahrzehnten zeichnete sich ein klimabedingt bedenklicher Trend ab: Die mittlere Temperatur in der Arktis stieg stärker an als im globalen Mittel. Diese Entwicklung dürfte sich laut Vorhersagen weiter fortsetzen oder sogar noch beschleunigen. Damit drohen Teile der heute noch gefrorenen Bodenschichten aufzutauen, sodass mehr Kohlenstoff in Form von Treibhausgasen freigesetzt werden und der Klimawandel dadurch weiter angekurbelt werden könnte. Ob und welche Mengen Kohlenstoff letztlich aus der Arktis in die Atmosphäre entweichen und dort weiter zur Erderwärmung beitragen, hängt jedoch nicht allein von der (steigenden) Lufttemperatur in diesen Regionen ab.

Eine entscheidende Rolle spielt dabei der Wasserhaushalt und vor allem, in welcher Form das Wasser in diesen Regionen vorhanden ist. Da Wasser Wärme besonders gut speichert, aber auch weiterleitet, trägt es wesentlich zum Energieausgleich eines Gebiets bei und kann die Erwärmung lokal abschwächen oder beschleunigen. Zudem bildet es die Lebensgrundlage für Mikroorganismen und Vegetation, die den im Boden gebundenen Kohlenstoff in Stoffwechselprozessen überhaupt erst umsetzen und an die Atmosphäre abgeben oder diesen im Gegenzug binden können.

## Eine höhere Schneedecke gefährdet den Permafrost

Viele Landschaftsformen in der Arktis waren bislang nur deshalb stabil, weil lediglich die obersten Dezimeter bis Meter des Bodens im Verlauf des Sommers auftauten. Tiefer liegende Schichten blieben dauerhaft gefroren.

## Wenige schneereiche Jahre reichen aus, um die Permafrostböden zu destabilisieren

Paradoxerweise könnten größere Schneemassen im Winter die Stabilität des arktischen Permafrostbodens gefährden, so die Hypothese.

Denn je dicker die Schneedecke, desto besser isoliert sie den Boden vor den extrem niedrigen Temperaturen der winterlichen arktischen Atmosphäre, die über längere Zeit bei  $-30^{\circ}\text{C}$  bis  $-50^{\circ}\text{C}$  liegen können. Die Bodentemperaturen bleiben dabei hingegen oft vergleichsweise mild, so dass der Untergrund im Sommer leichter auftauert.

Unsere langjährigen Messdaten aus Nordost-Sibirien bestätigen diesen Zusammenhang: Im Verlauf der fünf Winter 2013 / 14 bis 2017 / 18 verdoppelte sich die mittlere Schneehöhe insgesamt, während im gleichen Zeitraum die Bodentemperaturen um bis zu  $6^{\circ}\text{C}$  anstiegen. Zudem entwichen aufgrund erhöhter Aktivität von Mikroorganismen um mehr als 50 Prozent größere

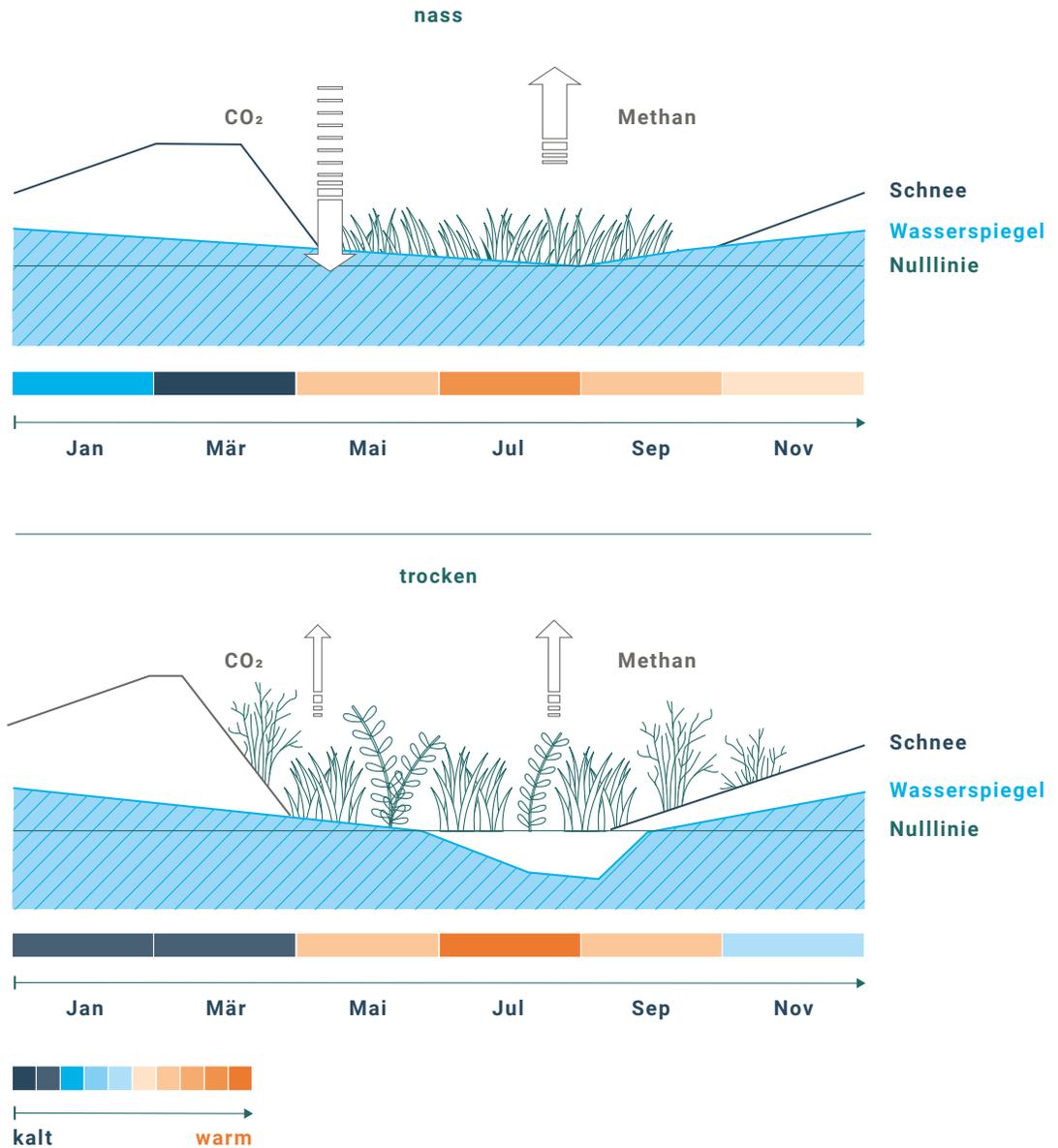
Mengen an Kohlenstoff aus dem Boden. Im darauffolgenden, eher schneearmen Winter 2018 / 19 sanken die Bodentemperaturen dann wieder stark ab; erste Analysen zeigen, dass auch die Kohlenstoffemission zurückgegangen ist. Damit belegen unsere Untersuchungen, dass wenige schneereiche Jahre ausreichen, um die Permafrostböden selbst in sehr kalten arktischen Regionen zumindest zeitweilig zu destabilisieren. Da für große Teile der Arktis bedingt durch den Klimawandel erhöhte Niederschläge prognostiziert werden, ist dieser Prozess äußerst wichtig für die weitere Entwicklung der Permafrost-Landschaften und deren Kohlenstoffbilanz.

### Die Umverteilung des Wassers kann den Klimawandel verstärken

Doch das verstärkte Auftauen der arktischen Permafrostböden – auch als direkte Folge des fortschreitenden Klimawandels – kann die geoökologische Landschaftsstruktur noch weitaus drastischer verändern: Permafrost-Klippen entlang der Flussufer und der Nordpolarmeerküste werden durch Erosion abgetragen, ein Vorgang, der sich durch Erwärmung der Böden deutlich beschleunigen könnte; andernorts, wo unterirdische Eislinien

*Wenn Permafrostböden wie hier auf der Kenai-Halbinsel in Alaska auftauen, wird mehr Kohlenstoff in die Flüsse gespült.*





Das Schema zeigt, wie sich das untersuchte Permafrost-Ökosystem als Folge der langfristigen Drainage verändert hat. Im Vergleich zum ursprünglich nassen Zustand (obere Abbildung) zeigt sich nach Drainage (trocken, untere Abbildung) im Sommer ein deutlich niedrigerer Wasserspiegel (schräffierte blaue Fläche). Als Folge davon setzte sich nach und nach ein höherer Pflanzenbewuchs durch. Auch der Verlauf der Bodentemperatur, dargestellt als farbkodierte Mittelwerte von je zwei Monaten, wurde dadurch verändert.

auftauen, entstehen Thermokarst-Seen. Und wenn im Boden liegende Eiskeile abschmelzen, bilden sich miteinander verbundene Grabensysteme, die das verfügbare Wasser großräumig umverteilen.

Wie aber wirken sich derartige Veränderungen auf das arktische Ökosystem und den lokalen Energie- und Kohlenstoffhaushalt aus? Dieser Frage ist unsere Arbeitsgruppe in einem einzigartigen, mittlerweile 14 Jahre andauernden Feldexperiment in einem Permafrost-Feuchtgebiet in Sibirien nachgegangen. Dazu haben wir einen Teil des Gebiets mit künstlichen Wassergräben trocken gelegt und mit einer natürlich belassenen Fläche verglichen. Wie sich zeigte, änderte sich durch diese langfristige Umverteilung des Wassers nicht nur die Zusammensetzung der Pflanzenwelt und der Bodenorganismen nachhaltig, sondern auch der Energiehaushalt.

Da Trockenheit im Boden speziell die Aktivität methanbildender Mikroorganismen, wie sie in Moor- oder Sumpfgebieten vorherrschen, einschränkt, wurden im Feldversuch verglichen mit den natürlich belassenen, feuchteren Gebieten wie erwartet nur noch kleinere Mengen des hochgradig klimawirksamen Treibhausgases Methan freigesetzt. Mikroorganismen hingegen, die Kohlenstoff zu Kohlendioxid verstoffwechseln, leben

einer moderaten Senke zu einer Quelle verändern wird, ist allerdings offen.

## Verbesserte Modelle auf Basis unserer Messdaten

Zur Klärung dieser Frage könnten künftig modernere Computersimulationen beitragen. Um den weiteren Verlauf des Klimawandels abzuschätzen und im speziellen die Auswirkungen des Wasserhaushalts auf die Methanemissionen in arktischen Permafrostgebieten zu ermitteln, haben wir ein geeignetes Computermodell, das Landoberflächenmodell des Max-Planck-Erdsystemmodells, JSBACH, erweitert. Im Gegensatz zu früheren Simulationen lässt sich die Entstehung von trockenen Gebieten einerseits und überfluteten Regionen andererseits anhand der vorherrschenden Topographie und unter Berücksichtigung der aktuellen Messdaten nun exakt im Modell abbilden. Unser verbessertes Modell stellt einen deutlichen Fortschritt für die prozessbasierte Simulation von zukünftigen arktischen Methan-Emissionen dar, da es die Auswirkungen trockenerer beziehungsweise nasserer Bedingungen auf den Kohlenstoffkreislauf sehr detailliert umsetzen kann.

Mit den Forschungsergebnissen aus den sibirischen Permafrostgebieten können wir die wesentlichen Faktoren und Mechanismen besser entschlüsseln, die die Stabilität dieser Ökosysteme mit ihrem enormen Kohlenstoffspeicher aufrechterhalten. Die Verfügbarkeit und Verteilung von Wasser spielt hierbei eine besondere Rolle: Sie beeinflusst nahezu alle Funktionen der arktischen Ökosysteme. Veränderte Wasserhaushalte, die wir über viele Jahre untersucht haben, waren meist mit einer Verstärkung von Treibhausgas-Emissionen verbunden. Diese Erkenntnisse müssen in verbesserte Modelle einfließen, die auch größere Gebiete umfassen, um die Rolle von Kohlenstoffemissionen aus Permafrostgebieten in zukünftigen Klimawandel-Prognosen richtig einzuordnen. Die Stabilität der arktischen Permafrostgebiete wird entscheidend sein für die zukünftigen Lebensbedingungen in vielen Regionen der Erde. Die Erforschung der zugrunde liegenden Prozesse ist wesentlich, um sie effektiv schützen zu können. ○

## Veränderungen im Wasserhaushalt verstärken meist die Treibhausgas-Emissionen

unter trockenen Bedingungen regelrecht auf. Höhere Pflanzen, die sich in den trockeneren Gebieten ebenfalls vermehrt ansiedeln und aus ihrer Umgebung CO<sub>2</sub> für die Photosynthese aufnehmen, konnten im Feldversuch die erhöhte Kohlenstoffemission nicht wettmachen. Entsprechend deutlich steigerte sich die CO<sub>2</sub>-Emission in den trockengelegten Gebieten. Aus unserer Fallstudie ergibt sich, dass sich der Klimawandel verstärken könnte, wenn die Landschaft umstrukturiert und die arktische Tundra dadurch austrocknen würde. Wenn man die gesamten arktischen Permafrost-Landschaften betrachtet, könnte durch derartige Bodenprozesse auch in einer insgesamt zunehmend feuchteren Arktis ein Mosaik kleinerer, trockener Parzellen mit wesentlich niedrigeren Methanemissionen entstehen. Ob sich parallel dazu, wie auf unseren Messflächen, auf diesen zunehmend trockeneren Parzellen die CO<sub>2</sub>-Bilanz von

# 15 Im Kreißaal eines Planeten

**MIRIAM KEPPLER,  
ANDRÉ MÜLLER**

↳ *Max-Planck-Institut  
für Astronomie,  
Heidelberg*

Die Astronomen kennen bisher etwa 4.000 Planeten, die um fremde Sonnen kreisen. Jetzt hat unser Team einen extrem jungen Exoplaneten entdeckt: Der Gasriese mit der Bezeichnung PDS 70b befindet sich innerhalb einer Lücke der Staub- und Gasscheibe um seinen Mutterstern – und damit in der Umgebung seiner Geburt. Offenbar zieht er immer noch neue Materie auf sich und wächst weiter. Damit bietet PDS 70b die einzigartige Gelegenheit, Entstehungsmodelle von Planeten zu testen und etwas über die frühe Geschichte unseres eigenen Sonnensystems zu erfahren.

**D**ie Suche nach Exoplaneten – Himmelskörper, die um fremde Sonnen kreisen – hat bisher ungefähr 4.000 Exemplare mit unterschiedlichen Größen, Massen sowie Abständen von ihren Muttersternen zutage gefördert. Wie sie entstehen, weiß man aber nicht genau. Zwar verfügen die Forscher über Theorien und Modelle möglicher Geburtsszenarien. Jedoch war es bisher kaum möglich, Planeten im Zustand ihrer Entstehung nachzuweisen, diesen Prozess direkt zu untersuchen und seine Eigenschaften mit den Berechnungen der Modelle zu vergleichen. Genau das ist unserer Gruppe am Max-Planck-Institut für Astronomie sowie unseren Kollegen aus dem Konsortium des SPHERE-Instruments am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte (ESO) gelungen.

Wir spürten den Planeten mit der Bezeichnung PDS 70b in einer Entfernung von 22 Astronomischen Einheiten (AE) von seinem Zentralgestirn PDS 70 auf. Der Planet ist damit 22-mal soweit von seiner Muttersonne entfernt wie die Erde von ihrer Sonne. Die

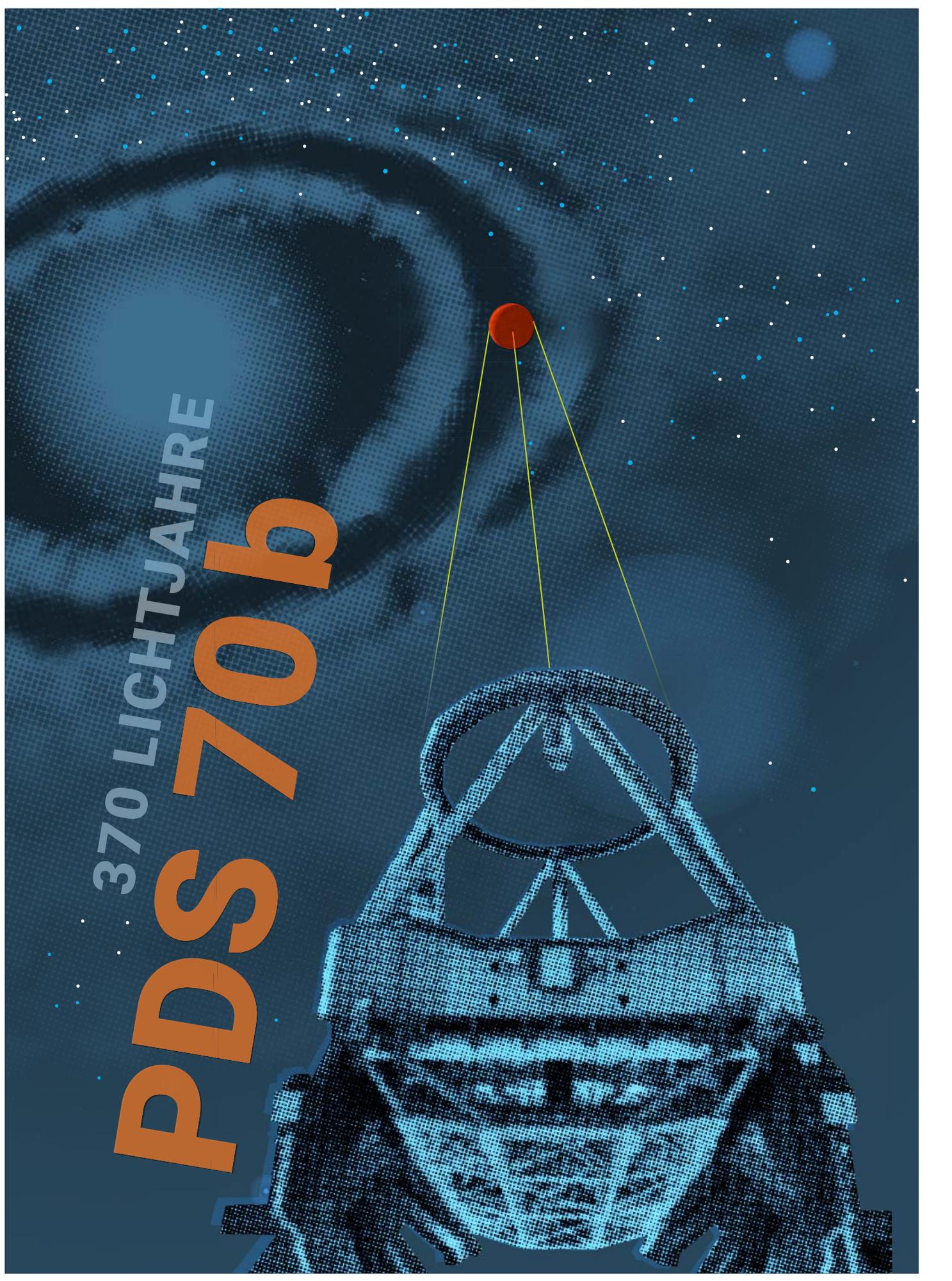
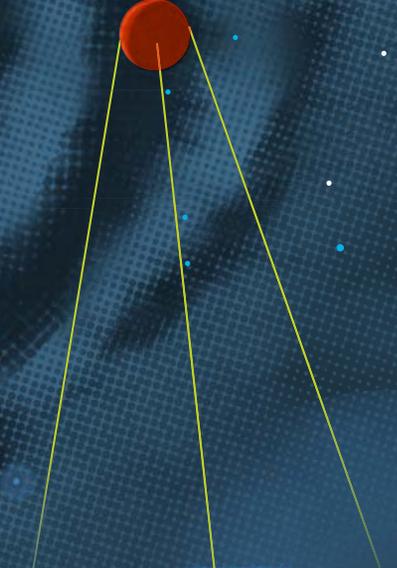
Entdeckung kam nicht von ungefähr, wir hatten uns für unsere Untersuchung mit PDS 70 einen Stern ausgesucht, bei dem man bereits vermutete, dass dort ein junger Planet seine Kreise zieht.

## Eine große Lücke in der zirkumstellaren Scheibe

Der 370 Lichtjahre entfernte PDS 70 ist nur etwa 5,4 Millionen Jahre alt und zählt zur Klasse der sogenannten T-Tauri-Sterne. Ihn umgibt eine protoplanetare Scheibe aus Gas und Staub mit einem Durchmesser von etwa 130 Astronomischen Einheiten. (Zum Vergleich: Der äußere Rand des Sonnensystems, der Kuipergürtel, reicht nur bis etwa 50 AE ins All hinaus.) Solche Scheiben bestehen aus Material, das nach der Entstehung eines Sterns übrigblieb. Die zirkumstellare Scheibe um PDS 70 weist eine große Lücke auf. Wir vermuten, dass sich diese Lücke dadurch erklären lässt, dass ein junger

370 LICHTJAHRE

**PDS 70 b**



## Ein Spektrum erlaubte es uns, atmosphärische und physikalische Eigenschaften zu bestimmen

Riesenplanet während seines Umlaufs Materie aus der Scheibe aufsammelt. Durch die Wechselwirkung mit der Scheibe verändert er dabei langsam seinen Abstand zum Zentralgestirn. Auf diese Weise räumt er allmählich eine größere Zone innerhalb der Scheibe frei.

In einer anschließenden Untersuchung gelang unserer Gruppe ein spektakuläres Bild des PDS-70-Systems. Auf dieser Aufnahme lässt sich der Planet am inneren Rand des Scheibenspalts eindeutig erkennen. Er läuft einmal innerhalb von etwa 120 Jahren um seinen Mutterstern herum. Ein Spektrum von PDS 70b erlaubte es uns, seine atmosphärischen und physikalischen Eigenschaften zu bestimmen. Diese Entdeckung bietet eine beispiellose Möglichkeit, theoretische Modelle der Planetenbildung zu testen.

### Der Himmelskörper ist von Wolken umgeben und 1.000 Grad heiß

Aus der Kombination von eigenen Messungen mit Archivdaten folgern wir, dass PDS 70b ein riesiger Gasplanet mit mehreren Jupitermassen und einer Oberflächentemperatur von etwa 1.000 Grad Celsius ist. Er ist damit ungleich heißer als jeder Planet in unserem Sonnensystem. PDS 70b ist jünger als der zentrale Stern – und wächst nach wie vor, wie die Beobachtungen eines US-amerikanischen Forscherteams seit unserer Entdeckung nachgewiesen haben. Unsere Daten zeigen außerdem, dass der Planet von Wolken umgeben ist. PDS 70b bestätigt zudem die Vorstellung, dass sich Gasplaneten wie Jupiter in größerer Entfernung von ihrem Zentralstern bilden sollten.

Um protoplanetare Scheiben sichtbar zu machen, müssen wir raffinierte Beobachtungs- und Auswertungsverfahren anwenden: Denn auf normalen Aufnahmen überstrahlt der Stern alle Objekte in seinem direkten Umfeld – auch seine eigenen Planeten. Mit dem Instrument SPHERE lässt sich das Licht, das uns direkt vom Stern erreicht, jedoch weitgehend eliminieren. SPHERE ist eine spezielle Kamera, die von einem internationalen Konsortium unter der Leitung unseres Max-Planck-Instituts

für Astronomie und dem Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble (IPAG) entwickelt und gebaut worden ist. Sie kommt an einem der Acht-Meter-Teleskope der Europäischen Südsternwarte in Chile zum Einsatz.

SPHERE nutzt die Eigenschaft der Polarisation des Lichts. Zur Erklärung: Lichtwellen sind elektromagnetische Wellen, die sich im Raum ausbreiten. Bei den einzelnen Wellenzügen ist die Schwingungsrichtung unterschiedlich und räumlich zufällig verteilt, das Licht ist unpolarisiert. Linear polarisierte Lichtwellen hingegen schwingen nur in einer Ebene. Das Licht eines Sterns ist überwiegend unpolarisiert, schwingt also in allen Richtungen. Trifft es auf eine den Stern umgebende Materiescheibe, wird es bei der Streuung an den Staubteilchen linear polarisiert.

Nutzt man nun einen entsprechenden Polarisationsfilter, der Lichtwellen in nur einer Schwingungsebene durchlässt, detektiert oder blockiert man je nach Ausrichtung des Filters das Licht, das von verschiedenen Bereichen der Scheibe kommt. Fotografen nutzen einen ähnlichen Effekt, wenn sie Reflexionen von einer glatten Oberfläche – etwa einer spiegelnden Fensterscheibe – ausblenden wollen. Vom Licht des Sterns erhält man dagegen unabhängig von der Filterkonfiguration immer ein Signal. Dieser Unterschied erlaubt es uns, das direkte Sternenlicht aus den Daten herauszurechnen. Unterstützt wird die Operation durch eine weitere Methode: Wir decken den Stern mit einer Blende ab. Übrig bleibt ein Abbild der Scheibe.

### Ein leistungsstarkes Instrument lässt einen Traum wahr werden

Nach zehn Jahren der Entwicklung neuer, leistungsstarker astronomischer Instrumente wie SPHERE sind wir endlich in der Lage, Planeten direkt während ihrer Entstehung zu finden und zu studieren. Damit wurde ein lang gehegter Traum wahr, und weitere spannende Entdeckungen warten auf uns. ◦

# Die Max-Planck-Gesellschaft

Die Max-Planck-Gesellschaft ([www.mpg.de](http://www.mpg.de)) ist eine der führenden Forschungseinrichtungen weltweit mit mehr als 23.000 Mitarbeiter\*innen. In den 84 Max-Planck-Einrichtungen betreiben rund 6.900 Wissenschaftler\*innen sowie mehr als 7.000 Nachwuchs- und Gastwissenschaftler\*innen Grundlagenforschung in den Natur-, Lebens- und Geisteswissenschaften.

**M**ax-Planck-Institute arbeiten dabei auf Forschungsgebieten, die besonders innovativ sind und nicht selten einen speziellen finanziellen oder zeitlichen Aufwand erfordern. Ihr Forschungsspektrum entwickelt sich ständig weiter: Neue Institute oder Abteilungen werden gegründet, bestehende umgewidmet, um Antworten auf zukunfts-trächtige wissenschaftliche Fragen zu finden. Diese ständige Erneuerung erhält der Max-Planck-Gesellschaft den Spielraum, neue wissenschaftliche Entwicklungen rasch aufgreifen zu können.

Entstanden ist sie 1948 als Nachfolgeorganisation der 1911 gegründeten Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft. Seither sind 17 Nobelpreisträger und eine Nobelpreisträgerin aus ihren Reihen hervorgegangen. Neben fünf Auslandsinstituten betreibt die Max-Planck-Gesellschaft weitere 20 Max Planck Center mit Einrichtungen wie dem US-amerikanischen Princeton, der Harvard University, Science Po in Frankreich, dem University College London / UK oder der Universität Tokio in Japan. Je zur Hälfte finanziert von Bund und Ländern, verfügt sie über ein jährliches Gesamtbudget von 1,8 Milliarden Euro.



## Impressum

### Herausgeber

Max-Planck-Gesellschaft  
zur Förderung der Wissenschaften e.V.  
Abteilung Kommunikation  
Hofgartenstr. 8, D-80539 München  
Tel: +49 (0)89 2108-1276  
Fax: +49 (0)89 2108-1207  
E-Mail: presse@gv.mpg.de  
Internet: www.mpg.de

### Redaktion

Christian Buck, Dr. Thomas Bürke,  
Dr. Virginia Geisel, Peter Hergersberg, Helmut Hornung,  
Dr. Jan-Wolfhard Kellmann, Dr. Felicitas Mokler,  
Mechthild Zimmermann

### Gestaltung

mattweis, München

### Druck

F&W Druck- und Mediencenter GmbH, Kienberg

Juni 2019

## Bildnachweis

### Biosensor für den Bluttest zuhause:

S. 5: Illustration: mattweis

### Pflanzen mit Gedächtnis:

S. 8: Infografik: mattweis

### Akustische Tarnkappen und Lauschangriffe:

S. 10: Illustration: mattweis; u. Verwendung v. freepik (Falter); Wikimedia Commons (Mopsfledermaus); istockphoto (Fledermäuse)

### Blick in die Maschinerie eines Massemonsters:

S. 14: ESO / M. Kornmesser

S. 15: ESO / Gravity Consortium / L. Calçada

### Wege aus dem Terrorismus:

S. 17: Illustration: mattweis; u. Verwendung v. Wikimedia Commons (Map-World)

S. 19: Infografik: mattweis, nach Vorlage von Michael Fürstenberg auf Basis von Rapoport, David C. „The four waves of modern terrorism.“

### CO<sub>2</sub> – ein Rohstoff für die Chemieproduktion:

S. 21: Infografik: mattweis, nach Vorlage von MPG

### Appetitanreger im Gehirn:

S. 24: Infografik: mattweis; u. Verwendung v. freepik (Mäuse), nach Vorlage von MPG

### Psychologischer Trick für mehr Chancengleichheit:

S. 27: Illustration: mattweis

### 3D-Metalldruck im Pulverbett:

S. 30, o.: Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH / Arbeitsgruppe Eric Jäggle

S. 30, u.: Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH / Arbeitsgruppe Eric Jäggle

### Rendezvous in der Steinzeit:

S. 33: Illustration: mattweis; MPG (Foto: Schädel)

### Hoffnung für Neuropathie-Patienten:

S. 38: MPI für experimentelle Medizin

S. 39: Infografik: mattweis

### Ein roter Faden im Labyrinth der europäischen

#### Vertragsrechte:

S. 41: Illustration: mattweis;  
istockphoto (Parlament; icons)

### Wasser, Eis und Schnee –

#### Akteure im arktischen Klimawandel:

S. 44: NOAA

S. 45: Infografik: mattweis; u. Verwendung v. Vecteezy.com (Gras), nach Vorlage von MPG

### Im Kreißaal eines Planeten:

S. 48: Illustration: mattweis;  
MPG (Teleskop und Planet)



Hier abtrennen  
und als  
Lesezeichen nutzen

