

# KlarText 2018

Preis für Wissenschaftskommunikation

MUSIKERKENNUNG  
Das ist Haydn.  
Ganz sicher!

VERGESSLICHKEIT  
Im Alter nichts Neues?

BIOLOGISCHE SANIERUNG  
Eine starke Allianz

BODENFEUCHTIGKEIT  
Von Fluten, Dürren und  
der Hilfe aus dem All

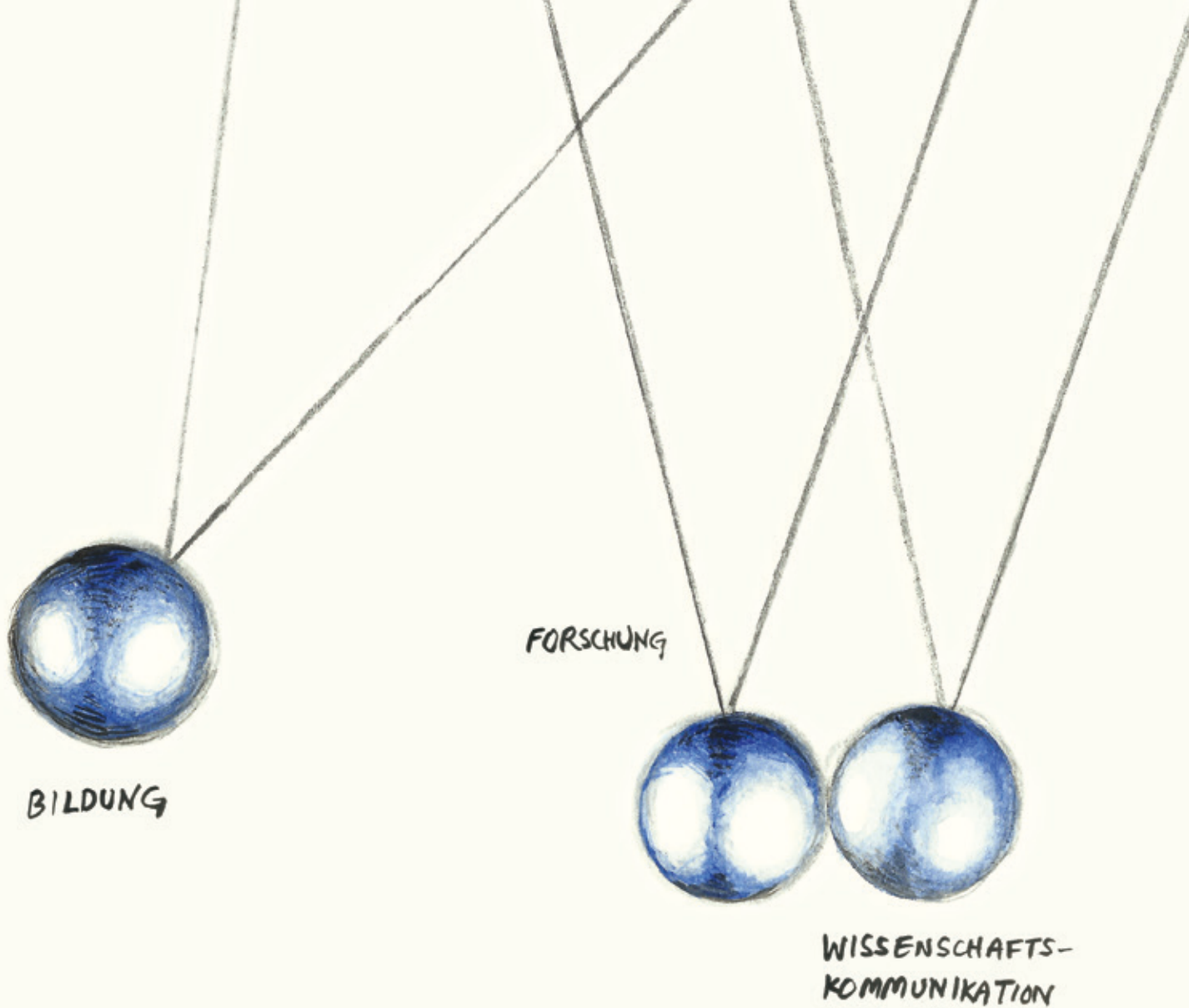
BIOKUNSTSTOFFE  
Plastik vom Acker

CHIROTOPE & PHIROTOPE  
Die reine Mathematik

Ein Magazin der

Klaus Tschira Stiftung  
gemeinnützige GmbH





**Wir fördern  
Naturwissenschaften,  
Mathematik  
und Informatik.**

1995 gründete der Physiker und SAP-Mitgründer Klaus Tschira mit privatem Vermögen die Klaus Tschira Stiftung (KTS). Heute zählt die KTS zu den großen gemeinnützigen Stiftungen Europas.

[www.klaus-tschira-stiftung.de](http://www.klaus-tschira-stiftung.de)



**Liebe Leserinnen und Leser,** wer eine Doktorarbeit schreibt, forscht in unbekanntem Terrain. In Zeiten des immer schnelleren Fortschritts fällt es sogar den Kolleginnen und Kollegen ein und derselben Disziplin schwer, die Arbeit der anderen zu verstehen. Angesichts dieser fortschreitenden Spezialisierung drohen neue Elfenbeintürme, in die die meisten von uns kaum Einblicke haben. Damit sich Wissenschaft und Gesellschaft nicht voneinander entfremden, muss Forschenden frühzeitig bewusst sein, wie wichtig es ist, ihre Arbeit einer breiten Öffentlichkeit zu erklären. Es ist dieses Bewusstsein, das gestärkt werden muss. Denn eines ist gewiss: Kaum eine Tätigkeit ist spannender als die Forschung. Das werden Sie auch in diesem Magazin sehen, in dem die KlarText-Preisträgerinnen und Preisträger 2018 über ihre Arbeit berichten. Ihre Artikel sind der Beleg dafür, dass auch komplizierte Sachverhalte eine große Leserschaft erreichen können – wenn sie gut erzählt sind. Klaus Tschira (1940 – 2015) hat dies schon in den 1990er Jahren erkannt und den KlarText-Preis für Wissenschaftskommunikation gestiftet. Seither beweisen die frisch gebackenen und preisgekrönten Doktorandinnen und Doktoranden in jedem Jahr, dass ihre Forschung nicht nur der Wissenschaft dienlich, sondern für uns alle von großer Bedeutung ist. **Wir wünschen viel Freude bei der Lektüre.**

Udo Tschira

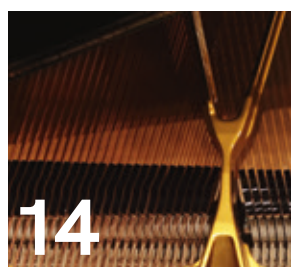
Harald Tschira

Beate Spiegel

## IMPRESSUM

**HERAUSGEBER** Klaus Tschira Stiftung gemeinnützige GmbH, Villa Bosch, Schloss-Wolfsbrunnenweg 33, 69118 Heidelberg, [www.klaus-tschira-stiftung.de](http://www.klaus-tschira-stiftung.de)  
**GESCHÄFTSFÜHRUNG** Beate Spiegel, Harald Tschira, Udo Tschira **KLARTEXT-PREIS** Renate Ries, Agnes Schulze (Projektleitung) **VERLAG** TEMPUS CORPORATE GmbH – Ein Unternehmen des ZEIT Verlags, Büro Berlin: Alt-Moabit 94, 10559 Berlin **GESCHÄFTSFÜHRUNG** Jan Hawerkamp **PROJEKT- UND REDAKTIONSLEITUNG** Dr. Joachim Schüring (JS) **GRAFIK** Christopher Delaney **BILDREDAKTION** Beatrice Jansen **KORREKTORAT** Frank Skerka **HERSTELLUNG** Dirk Woschei **DRUCK** Mohn Media Mohndruck GmbH **VERTRIEB** Das Magazin erscheint am 11.10.2018 und liegt der Wochenzeitung DIE ZEIT bei.

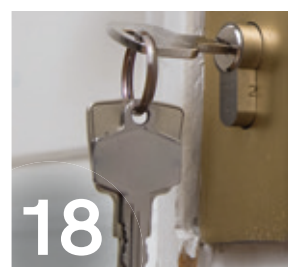
# INHALT



## Das ist Haydn. Ganz sicher!

*Christof Weiß*

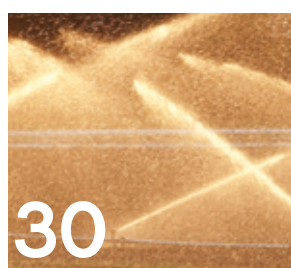
Schon nach wenigen Takten können viele Menschen den Komponisten eines unbekannteren Stücks erkennen. Irgendwann sollen Computer das auch schaffen



## Im Alter nichts Neues?

*Tineke Steiger*

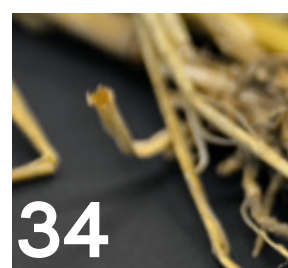
Mit den Jahren werden wir immer vergesslicher. Das liegt an strukturellen Veränderungen unseres Gehirns. Dabei spielt der Dopaminhaushalt eine wichtige Rolle



## Von Fluten, Dürren und der Hilfe aus dem All

*Martin Schrön*

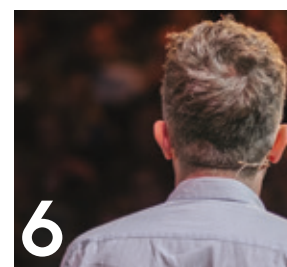
Der Strom kosmischer Strahlung hilft Bauern, den Wassergehalt in der Wurzelzone ihrer Äcker abzuschätzen



## Plastik vom Acker

*Jan-Georg Rosenboom*

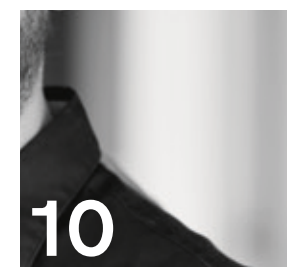
Biokunststoffe werden aus pflanzlichen Rohstoffen hergestellt. Das spart Öl. Mit der industriellen Produktion haperte es aber bisher



## Es geht um Begeisterung

*Stefan Verra*

Warum die Körpersprache entscheidet, ob ein Vortrag vor Publikum erfolgreich ist



## And the winner is ...

Sechs Forscherinnen und Forscher erhalten 2018 den KlarText-Preis für Wissenschaftskommunikation



## Eine starke Allianz

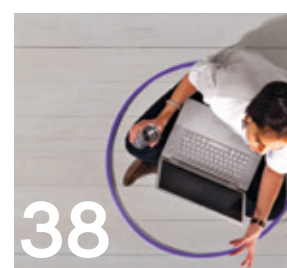
*Anja Worrlich*

Entlang unterirdischer Pilzgeflechte finden Bakterien ihren Weg zu Nahrungsquellen – und könnten auf diese Weise bei der Sanierung von Altlasten helfen



## „Als Kind alles ausprobiert“

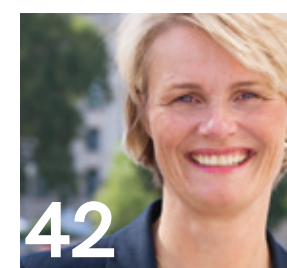
Die Erzieherin Martina Grundmann-Ecker und der Nobelpreisträger Stefan Hell unterhalten sich über die Faszination für die Wissenschaft. Und wie sie das eigene Leben prägt



## Die reine Mathematik

*Katharina Schaar*

Unter „Chirotopen“ und „Phirotopen“ versteht man Abstraktionen relativer Ortsangaben. Wer sie erklären will, muss kluge Analogien und Bilder ersinnen



## Fünf Fragen an Anja Karliczek

Wir befragten die Bundesministerin für Bildung und Forschung zur Bedeutung der Wissenschaftskommunikation – und baten Sie, uns ganz kurz das Thema ihrer Abschlussarbeit zu erklären

# Es geht um Begeisterung

Wer vor Publikum spricht,  
muss mehr tun als nur reden

Wirklich gute Wissenschaftler sind gut in ihrem Fach und gut darin, die eigene Arbeit anderen Menschen zu erklären. Dazu müssen sie das Publikum emotional erreichen. Nicht nur mit Worten

von STEFAN VERRA

„Sugarcoating, nichts als sugarcoating!“, rief er mir während eines Vortrags aus dem Auditorium zu. „Nur die Inhalte zählen. Wer beim Präsentieren auf sein Äußeres angewiesen ist, macht sich wissenschaftlich verdächtig.“ „Gemach, gemacht!“, dachte ich mir, zeigte mit geneigtem Kopf und aufmerksamem Augenkontakt bei gleichzeitiger NN-Regel\* volle Zugewandtheit. Man will schließlich nicht eskalieren. Dabei saß der junge Doktorand der Universität Basel einem Irrtum auf. Aber der Reihe nach.

Im Lauf der Evolution spielte die Körpersprache – nicht nur des Menschen – immer schon eine entscheidende Rolle. Beim Einschätzen von Freund und Feind war das Erscheinungsbild, aber vor allem die Art der Bewegung ein Hinweis, wie mit dem Gegenüber zu verfahren war. Also nicht der Säbelzahn-tiger an sich war gefährlich. Wenn der faul in der Sonne lag, alle Viere von sich gestreckt, krächte kein Steinzeithahn nach ihm. Wenn das Raubtier aber seine Haltung änderte – starrer Blick, zuckender Schwanz, bereit zum Losspringen –, war der Gazelle klar: Abhauen!

Diese erste Entscheidung fällen auch wir Menschen immer noch in unserem Stammhirn. Da unterscheiden wir uns nicht von den Tieren. Denn was ich hier am Beispiel einer Gefahrensituation beschreibe,

\* Nase-Nabel-Regel: Respekt, Wichtigkeit und Wertschätzung erkennen wir an der Körperdrehung. Zeigt die gesamte Körperachse, also die Linie zwischen Nase und Nabel, zu unserem Gesprächspartner, sind wir voll bei ihm. Das erhöht dessen Aufmerksamkeit und Aufnahmebereitschaft enorm.

gilt für alle grundlegenden Emotionen: Aggression, Angst, Trauer und Freude. Wir erkennen sie an den Bewegungen, also an der Körpersprache. Und das funktioniert über alle kulturellen Grenzen hinweg.

Folgen wir also der weiteren Entwicklung. Mit Hilfe der evolutionären „Erfindung“ des Mittelhirns können wir hierarchische Entscheidungen treffen. Das war ein entscheidender Sprung. Hierarchie bedeutet nämlich die Fähigkeit zur Über- beziehungsweise Unterordnung. Und wer dazu in der Lage ist, der kann Rudel bilden. Der Hund zeigt es uns. Er akzeptiert das Herrchen oder Frauchen (weshalb Eidechsen, die kein Mittelhirn haben und dies nicht tun, unpopuläre Haustiere sind).

Nun ist Hierarchie nicht nur im Sinne von Macht zu verstehen. Wir ordnen uns auch jenen unter, die uns Hinweise geben, die uns mit Lösungen versorgen. Damit folgen wir einem solchen Menschen bereitwillig. Patienten, die die Kompetenz des Arztes anerkennen, folgen seiner Therapie signifikant zuverlässiger (Michael D. Fetters, University of Michigan, 2011); Politiker, deren Auftritte Kompetenz vermitteln, haben deutlich höhere Zustimmungsraten (Alex Todorov, Princeton University, 2013). Nun werden Sie sagen: „Trump belegt ja wohl die geringe Beweiskraft solcher Studien.“ Mitnichten! Mit genau dieser unangepassten Körpersprache verspricht er seiner Wählerschaft Lösungskompetenz. Für andere ist es eben die stabile, diplomatische Zurückhaltung in der Körpersprache, die das verspricht. Diese grundsätzliche Einordnung treffen wir Menschen auf vorbewusster Ebene – vor allem

anhand der Körpersprache. Anders als Hunde oder Gazellen haben wir im Gehirn den Neocortex, das stammesgeschichtlich jüngste Teil der Großhirnrinde. Er bildet die typische, gefaltete und gewundene Oberfläche des menschlichen Gehirns. Mit diesen mehr als 20 Milliarden Neuronen denken wir, wägen ab, extrapolieren in die Zukunft – und machen uns bisweilen Sorgen über Dinge, die gar nicht eintreten. Mit diesem Gehirnteil können wir nicht nur Gedanken formulieren, wir können auch die Worte anderer intellektuell verarbeiten.

Und das, so scheint es, ist für viele Menschen die einzige Ebene jeder Kommunikation. Sie glauben, dass die Worte reichen, um Gefühle wie Kompetenz, Begeisterung und Sympathie auszulösen. Doch das ist falsch. Sie können noch so oft „Ich kenne mich hier aus“ sagen – wenn Sie dabei mit gesenkten Schultern, schlaffen Armen, gebeugten Knien und verzweifelmtem Blick gen Boden schauen, wird Ihnen diese Worte niemand abnehmen. Oder würden Sie sich von so einem Arzt gerne operieren lassen? Und wenn Sie mit dieser Körperhaltung zu einer Frau „Ich liebe dich“ sagen, kann es sein, dass Sie bald wieder Single sind.

Wer also seine Inhalte vermitteln will, ist darauf angewiesen, die serielle Schaltung dieser Entscheidungsprozesse zu beachten. Zuerst müssen wir nahbar wirken. Dann erst ist eine kompetente Wirkung von Vorteil. Und am Schluss muss die Ratio der Zuhörer jene Daten bekommen, die die ersten Eindrücke bestätigen. Es ist in etwa so, als wenn Sie auf einen Markt gehen und einen Apfel kaufen. Der muss zuerst gut und appetitlich aussehen. Wenn er das nicht tut, werden Sie sich mit seinen „inneren Werten“, also seinem Geschmack, niemals beschäftigen. Und genau so agieren wir in jeder menschlichen Kommunikation und damit auch im wissenschaftlichen Diskurs.

Das Wort Gestik stammt aus dem Lateinischen und bedeutet so viel wie „eine die Rede begleitende Gebärde“. Wie ungemein vielseitig – und bedeutsam – diese Form der Kommunikation ist, dürfte den meisten gar nicht bewusst sein

Manche hören ich jetzt rufen: „Ich nehme gerade die unansehnlichen Äpfel. Die sind die besten. Auch bei Menschen kann ich hinter die Kulisse schauen! Von der Oberfläche lasse ich mich nicht blenden.“ Mag sein, dass Sie diese Fähigkeit haben. Aber Sie sind damit eine absolute Ausnahme. Selbst wenn Sie es schaffen, alles Äußere auszublenden und nur auf den Inhalt der Worte zu hören, wird die große Mehrheit des Auditoriums genau so agieren, wie es sich für den Menschen im Laufe der Evolution als effektiv erwiesen hat. Nämlich nach den zuerst verfügbaren Signalen die grundlegendsten Einschätzungen zu treffen.

Früher, als die Wissenschaftler ihre Elfenbeintürme nicht verließen, blieb man dort unter sich, und es entwickelte sich eine eigene Art der Kommunikation: dozieren hinterm Rednerpult, Lesebrille, Arme hinterm Rücken verschränkt oder in Nachdenkhaltung mit Hand vorm Mund. Der Blick ins Manuskript oder Richtung Boden gerichtet, jedenfalls selten zum Auditorium. Möglicherweise lag in diesem inaktiven, zurückgenommenen Auftreten der Wunsch nach Rationalität. Doch am Ende war das auch nur eine Emotion. Nämlich das Gefühl von Seriosität.

Aber diese Art des frontalen Auftritts vor dem Publikum wird immer seltener. Science Slams, YouTube und TED Talks sind nur die Spitze einer neuen Art der Wissensvermittlung. In den sozialen Medien folgen mittlerweile Millionen Interessenten denjenigen, die ihr Wissen attraktiv vermitteln. Wer dort genau hinschaut, wird recht einfach jene Signale erkennen, die die Attraktivität und den Erfolg des jeweiligen Angebots ausmachen.

#### Erstens: Lächeln Sie! Öfter.

Dabei geht es nicht um gezwungenes Grinsen, ein entspannter, leicht positiver Gesichtsausdruck reicht. Wenn Sie zusätzlich Blickkontakt aufbauen, wirken Sie offen und signalisieren gleichzeitig Souveränität.



Jurga Anusauskienė / tedxvlnius

#### Zweitens: Augen, Mund und Hände.

Diese am sensorischen und motorischen Cortex besonders gut abgebildeten Körperteile (Homunculus) sind die mit am besten verknüpften Körperteile mit dem Gehirn. Sie geben damit besonders viel Auskunft über Emotionen eines Menschen. Sind diese drei Körperteile sichtbar, kann man Sie besser einschätzen. In der Folge vertraut man Ihnen eher, als wenn Sie Ihre Augen hinter einer dicken Brille verdecken, die Arme hinter dem Rücken verschränken oder mit einer Hand den Mund verdecken.

#### Drittens: Seien Sie agil!

Die zwei vielleicht wichtigsten Faktoren sind Frequenz und Amplitude Ihrer Bewegungen. Ein flinkes Heben der Augenbrauen, wenn Sie über das Ergebnis Ihrer Studie berichten. Ein schnelles Zuwenden, wenn eine Frage aus dem Publikum kommt und energetische Schritte zum Flipchart. Diese hohe Frequenz animiert mehr als Behäbigkeit in den Bewegungen. Achten Sie auch auf Ihren Bewegungsumfang. Vergrößern Sie Ihre Amplituden und seien Sie ruhig ein klein wenig ausladender mit Ihrer Gestik, Sie vermitteln damit enorm viel Kraft.

Diese drei Tipps werden den Wert Ihrer fachlichen Informationen niemals schmälern. Und gleichzeitig haben Sie viel getan, um Sympathie und Kompetenz zu zeigen. Damit rollen Sie Ihren Inhalten einen roten Teppich aus, über den Ihre Zuseher bereitwillig schreiten werden.

**STEFAN VERRA** ist einer der gefragtesten Experten für Körpersprache in Europa. Seine Analysen werden regelmäßig in führenden Medien publiziert. Der Bestsellerautor ist Dozent an mehreren Universitäten und hält Vorträge an Kliniken sowie bei Medizinkongressen

# And the winner is ...

## Der KlarText-Preis für Wissenschaftskommunikation geht in diesem Jahr an drei Forscherinnen und drei Forscher

„Was hast Du da eigentlich gemacht in Deiner Doktorarbeit?“ – um die Antwort auf genau diese Frage geht es bei KlarText, dem Preis für Wissenschaftskommunikation der Klaus Tschira Stiftung. Denn die Stiftung sucht junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die eine sehr gute Doktorarbeit geschrieben haben – und die es schaffen, einem breiten, an Wissenschaft interessierten Publikum zu erklären, was sie da geforscht haben.

Eigentlich wird der Preis in sieben Kategorien verliehen: Biologie, Chemie, Geowissenschaften, Informatik, Mathematik, Neurowissenschaften und Physik. Dass es in diesem Jahr nur sechs Gewinnerinnen und Gewinner gibt, liegt an den hohen Ansprüchen der Jury. Im Fachgebiet Physik gab es schlichtweg keinen preiswürdigen Beitrag.

Eben diese Jury entscheidet, wer am Ende den Preis erhält und sich über 5000 Euro Preisgeld freuen darf. Übrigens: Wer mitmacht, gewinnt auf jeden Fall. Denn alle Bewerberinnen und Bewerber – also nicht nur die Gewinner – dürfen an einem zweitägigen Workshop „Wissenschaftskommunikation“ des Nationalen Instituts für Wissenschaftskommunikation (NaWik) teilnehmen.

Alle Beiträge werden zunächst von Schülerinnen und Schülern der renommierten Deutschen Journalistenschule in München gelesen. Die fachliche

Prüfung erfolgt anschließend durch jeweils zwei Wissenschaftlerinnen oder Wissenschaftler aus dem jeweiligen Fachgebiet. Ihr Hauptaugenmerk liegt auf der fachlichen Brillanz. Vor allem prüfen sie aber auch, ob es im Beitrag wirklich um die eigene Forschungsleistung geht und nicht etwa allgemeine Prinzipien beschrieben werden.

Am Ende bleiben einige Dutzend Beiträge übrig, die von einer achtköpfigen Sprachjury aus Wissenschaftlern und Journalisten unter die Lupe genommen werden. Diese wählen in jeder der Kategorien die Beiträge aus, die ihnen am preiswürdigsten erscheinen und küren in der Jury-sitzung die Sieger.

Den letzten Schliff bekommen die Artikel durch professionelle Wissenschaftsjournalisten. In enger Zusammenarbeit mit den Preisträgern redigieren sie die Texte, bis sie druckreif sind.

Den Preis gibt es seit den 1990er Jahren, gestiftet wurde er von Klaus Tschira (1940–2015), Physiker und Mitgründer des Softwarekonzerns SAP.

Wer im nächsten Jahr KlarText-Preisträgerin oder -Preisträger werden will, findet hier alle weiteren Informationen:

[www.klartext-preis.de](http://www.klartext-preis.de)

## INFORMATIK Das ist Haydn. Ganz sicher!

### CHRISTOF WEISS

wurde 1986 in Regensburg geboren. Er studierte Physik an der Universität Würzburg sowie Komposition an der Hochschule für Musik Würzburg. Im Anschluss forschte er am Fraunhofer-Institut für Digitale Medientechnologie in Ilmenau. In seiner Doktorarbeit mit dem Titel „Computational Methods for Tonality-Based Style Analysis of Classical Music Audio Recordings“ beschäftigte er sich mit Algorithmen zur Analyse von Musikaufnahmen. Diese Technologien entwickelt er derzeit an den International Audio Laboratories Erlangen weiter.



Fotos dieses Artikels: Peter Badge



## NEUROWISSENSCHAFTEN Im Alter nichts Neues?

### TINEKE STEIGER

ist Jahrgang 1987 und wuchs in Bremen auf. Sie studierte in ihrer Heimatstadt Biologie und Neurowissenschaften und promovierte 2017 am Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf mit der Arbeit „The influence of age-dependent structural and functional brain changes on learning and memory“. Derzeit arbeitet sie als Dozentin und Neurowissenschaftlerin an der Universität zu Lübeck.



**BIOLOGIE**  
**Eine starke Allianz**

**ANJA WORRICH** kam 1987 in Forst (Lausitz) zur Welt. Sie studierte Biotechnologie in Zittau und wechselte für ihre Masterarbeit nach Leipzig an das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ). Dort schrieb sie auch ihre Doktorarbeit „Role of fungus-mediated transport mechanisms for bacterial activity under environmental stress“ und erhielt ihren Dokortitel im Fach Biochemie von der Universität Leipzig. Nach einem Jahr als Postdoktorandin am Deutschen Zentrum für Integrative Biodiversitätsforschung forscht sie nun wieder am UFZ an den räumlichen Dynamiken mikrobieller Gemeinschaften.

**GEOWISSENSCHAFTEN**

**Von Fluten, Dürren und der Hilfe aus dem All**

**MARTIN SCHRÖN** wurde 1985 in Cottbus geboren. Er studierte Physik in Heidelberg und spezialisierte sich auf die Simulation von Sternen. Zurück zu den Wurzeln ging es für ihn während der Doktorarbeit am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) in Leipzig. Mit dem Thema „Cosmic-Ray Neutron Sensing and its Applications to Soil and Land Surface Hydrology“ promovierte er 2017 an der Universität Potsdam im Fach Hydrogeologie. Ein halbes Jahr forschte Schrön an der Bristol University und führt seither seine Arbeiten am UFZ fort.



**CHEMIE**  
**Plastik vom Acker**

**JAN-GEORG ROSENBOOM** stammt aus Hamburg, wo er 1987 geboren wurde. Er studierte Chemische Verfahrenstechnik an der TU Hamburg. Er ging für ein Jahr an die University of California in Berkeley und schrieb eine Diplomarbeit an der University of Cambridge (England). An der ETH Zürich promovierte er mit der Arbeit „Polyethylene Furanoate (PEF) from Ring-Opening Polymerisation“. Dort entwickelt er derzeit zusammen mit einer Schweizer Firma Verfahren zur industriellen Umsetzung der Bioplastik-Herstellung.

**MATHEMATIK**  
**Die reine Mathematik**

**KATHARINA SCHAAR** kam 1989 in Nürnberg zur Welt. Sie studierte Mathematik an der Technischen Universität München. Dort schrieb sie am Lehrstuhl für Geometrie und Visualisierung auch ihre Doktorarbeit mit dem Titel „Grundlegende Eigenschaften von Phirotopen – Dualität, Chirotopalität, Realisierbarkeit, Euklidizität“.







von CHRISTOF WEISS

# Das ist Haydn. Ganz sicher!

Auch wenn sie ein bestimmtes Stück noch nie gehört haben, erkennen viele Musikliebhaber sofort den Komponisten.

Diese intuitiven Fähigkeiten hat ein Computer noch nicht. Immerhin: Bei der Unterscheidung musikalischer Epochen ist er schon recht gut



Peter Badger, Getty Images / sot

Ute Weber hört leidenschaftlich gerne klassische Musik. Sie liebt vor allem Orchesterwerke. Kürzlich besuchte sie jedoch einen Klavierabend. Als der Pianist am Ende die Zugabe anstimmte, wusste Ute Weber zunächst nicht, von wem das Stück stammte. Sie hatte es noch nie gehört, war aber schon nach wenigen Takten überzeugt, dass es von Joseph Haydn sein musste. „Das könnte doch auch von Mozart gewesen sein“, sagte ihr Mann später. Aber Ute Weber war sich sicher – auch wenn sie nicht sagen konnte, woran sie den Komponisten erkannt hatte. Mit ihrer Fähigkeit, die musikalische Stilistik zu erfassen und zuzuordnen, ist Frau Weber nicht allein. Viele musikalische Laien entwickeln über Jahre hinweg ein Ohr für solche Feinheiten. Dabei können sie meist keine rationalen Gründe angeben. Denn sie erkennen den Komponisten eines unbekanntes Stückes intuitiv, und nicht durch systematisches Analysieren des Notentextes.

Wir wollten wissen, ob sich diese intuitiven Fähigkeiten auch einem Computer beibringen lassen. Er sollte also lernen, Aufnahmen verschiedener Musikstile zu unterscheiden. Dabei fingen wir mit einer vergleichsweise leichten Aufgabe an – der Unterscheidung der vier Epochen Barock, Klassik, Romantik und Moderne.

Eine Herausforderung ist dabei, dass sich auch Stücke einer Epoche stark voneinander unterscheiden. Sie haben ganz unterschiedliche Melodien, Taktarten, Tempi und Tonarten. Trotz dieser Unterschiede gibt es stilistische Gemeinsamkeiten, die sich nur schwer in Worte fassen lassen. Der Computer muss also in der Lage sein, generelle Prinzipien des Musikstils zu erfassen – und diese Prinzipien auf neue Stücke zu übertragen. So wie Ute Weber. Eine solche „Transferleistung“ betrifft beispielsweise die Besetzung des Stückes. Frau Weber mag vor allem die Orchesterwerke Haydns. Sie erkannte dessen musikalische Handschrift aber auch in jenem Klavierstück. Für einen Computer ist diese Transferleistung schwierig, weil der Klang eines Orchesters sich deutlich von dem eines Flügels unterscheidet.

Damit unser Algorithmus diese Flexibilität erlernt, beruht unser Ansatz auf den harmonischen Eigenschaften der Musikstücke, die von den Tonhöhen und Akkorden sowie deren Beziehungen untereinander bestimmt sind. Um Musikaufnahmen hinsichtlich dieser Eigenschaften zu vermessen, sind Techniken der digitalen Signalverarbeitung nötig.



Ingo Knopf

Christof Weiß analysierte zunächst über hundert verschiedene Merkmale einer Musikaufnahme und speiste den Algorithmus dann mit über 1000 Trainingsbeispielen. Auf diese Weise lernte der Computer, bestimmte Eigenschaften mit dem jeweiligen Musikstil zu verknüpfen

Musik ist somit weniger komplex als die des 20. Jahrhunderts (Moderne). So sind die Tonhöhenklassen in der so genannten Zwölftonmusik alle ungefähr gleich präsent. Analysiert man den Verlauf der harmonischen Komplexität über die letzten 300 Jahre Musikgeschichte, zeigt sich um das Jahr 1900 ein sprunghafter Anstieg, der mit dem Aufkommen solcher modernen Stile erklärt werden kann.

Messbar sind auch die Häufigkeiten bestimmter Zusammenklänge. Hier kommt eine weitere Transferleistung ins Spiel: Für Ute Weber spielt es nämlich keine Rolle, in welcher Tonart das Haydn-Stück steht, um die Handschrift des Komponisten zu erkennen. Wichtig sind lediglich die Beziehungen zwischen den Tonhöhen. Damit auch unser Algorithmus den Musikstil unabhängig von der Tonart erkennen kann, erfassen wir nur die Abstände zwischen den Tonhöhen.

Alles in allem analysieren wir auf diese Weise über hundert verschiedene Merkmale einer Musikaufnahme. Von diesen Merkmalen auf den Musikstil zu schließen, ist eine überaus komplexe Aufgabe. Um diese zu bewältigen, braucht der Computer Erfahrung. Er muss – wie Ute Weber – hören, hören, hören. Wir fütterten ihn daher zunächst mit mehr als tausend „Trainingsbeispielen“, die ihm halfen, bestimmte harmonische Eigenschaften mit dem jeweiligen Musikstil zu verknüpfen. Für das Training berücksichtigten wir Klavier- und Orchesterstücke von verschiedenen Komponisten in unterschiedlichen Tonarten, Tempi und Taktarten, damit der Algorithmus am Ende die gewünschten Transferleistungen erbringen kann.

Wie gut funktioniert nun unser Algorithmus? Das testeten wir an etwa 500 neuen Stücken. Das Ergebnis: Etwa drei Viertel dieser Stücke wurden der richtigen Epoche zugeordnet.

Dabei teilt der Algorithmus die Aufnahme zunächst in zeitliche Abschnitte von etwa einer Zehntelsekunde Dauer und misst dafür jeweils die dominanten Frequenzen. Dieses Vorgehen heißt auch Spektralanalyse und ähnelt der Zerlegung des weißen Lichts in seine Spektralfarben. Die gemessenen Frequenzen werden dann musikalischen Tonhöhen zugeordnet. Zum Beispiel hat der Kammerton  $a$ , auf den Orchestermusiker ihre Instrumente stimmen, eine Grundfrequenz von etwa 440 Hertz (Schwingungen pro Sekunde).

Damit die Spektralanalyse unabhängiger von der instrumentellen Besetzung ist, werden im nächsten Schritt alle Tonhöhen mit dem Namen  $c$  – unabhängig von ihrer Lage (Oktave) – zusammengefasst. Dasselbe geschieht mit den Tonhöhen  $cis$  oder  $des$ , allen mit Namen  $d$  und so fort. Insgesamt gibt es zwölf dieser „Tonhöhenklassen“, deren jeweilige Energie der Algorithmus für jeden Abschnitt errechnet.

Auf dieser Grundlage werden nun harmonische Eigenschaften gemessen. Anhand der Verteilung der Energie auf die zwölf Tonhöhenklassen lässt sich beispielsweise die Komplexität der Harmonik abschätzen. Die Komponisten der Klassik, wie etwa Haydn, konzentrierten sich meist auf wenige Tonhöhenklassen, die zur Tonart des Stückes passen. Ihre

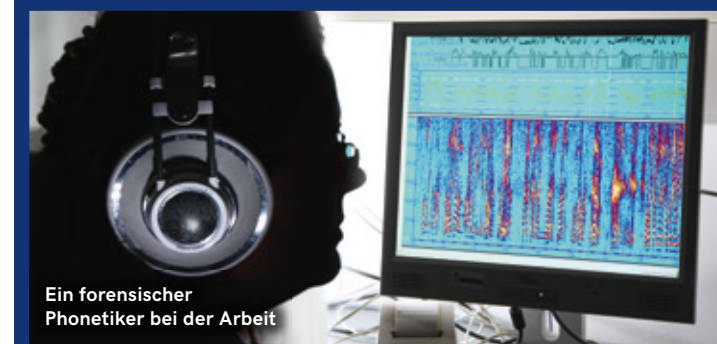
Allerdings sind solche Ergebnisse mitunter mit Vorsicht zu genießen. Ist beispielsweise auf einer Trainings-CD mit Barockmusik das typische Hintergrundrauschen einer alten, unbearbeiteten Originalaufnahme zu hören, kann der Algorithmus dieses Rauschen als Merkmal dieser Epoche verstehen. Der Algorithmus erkennt die Barockstücke von dieser CD womöglich am Rauschen, hat also keine generellen Eigenschaften des Musikstils gelernt. Barockstücke ohne Rauschen ordnet dieser Algorithmus dann falsch zu.

Solche Probleme treten besonders bei bestehenden Technologien auf, die für die Unterscheidung von Pop-, Rock- und Jazz-Aufnahmen verwendet werden. Diese Algorithmen erfassen vor allem die Klangfarbe, auf die sich das Rauschen stark auswirken kann. Unser Algorithmus lässt sich jedoch kaum davon verwirren. Sogar eine besonders schwierige Transferleistung klappt damit einigermaßen gut: Trainiert man den Algorithmus nur auf Klaviermusik kann er auch Orchesterstücke noch gut einordnen. Die harmonischen Merkmale bilden also eine gute Grundlage für die Stilerkennung.

An der Erkennung einzelner Komponisten muss jedoch noch gearbeitet werden. Bei einer Unterscheidung von insgesamt elf Komponisten erreichten wir in ersten Tests eine Trefferquote von etwa 40 Prozent. Es wird also noch eine Weile dauern, bis der Algorithmus Ute Weber schlagen kann. Doch auch die gröbere Zuordnung zu musikalischen Epochen kann überaus nützlich sein. Denn wenn Frau Weber sich im Internet Musik von Joseph Haydn herunterlädt, stöbert sie gerne in der Liste mit Aufnahmen, die andere Haydn-Liebhaber ebenfalls kauften. Natürlich findet sie hier nur die populären, von vielen Leuten gehörten Werke. Würde diese Liste von einem Algorithmus wie dem unseren erstellt, erhielte sie auch Stücke von Komponisten, die weithin unbekannt sind. Ute Weber könnte viel Neues entdecken.

## Verplappert

Unser Gehirn beeindruckt mit seiner Fähigkeit, akustische Signale zu verarbeiten. Auch das können Computer lernen – zur Freude der Polizei



Ein forensischer Phonetiker bei der Arbeit

Ein Spaziergang durch die Stadt. In den Cafés entspanntes Geplauder. Auf der Baustelle ruft der eine dem anderen etwas zu, wegen des Lärms kaum zu verstehen. Eine Straßbahn quietscht um die Ecke, an der Kreuzung hupt jemand genervt. In der Hecke schnattert eine Spatzenfamilie. Fast nirgends ist Stille, unser Trommelfell schickt Signale ans Hirn, sobald es sich um einen Millionstel Millimeter bewegt.

Denn wenn wir etwas hören, passiert zunächst nichts anderes: Die Schallquelle setzt die Luft in Bewegung. Es kommt zu winzigen Luftdruckveränderungen, die sich fortpflanzen und auf unser Trommelfell treffen. Diese 1-Cent-Stück-große Membran ist über ein filigranes System aus Knöchelchen und Innenohr mit unserem Gehirn verbunden. Erst dort wird aus dem Auf und Ab des Luftdrucks ein Geräusch, das wir eindeutig zuordnen können: der Lärm eines Presslufthammers oder ein Stück von Bach. Signalverarbeitung par excellence.

Was unser Gehirn mühelos meistert, ist für Computerprogramme eine ungemein große Herausforderung. Denn zur Analyse der Luftdruckschwankungen müssen sie pro Sekunde eines Audiosignals etwa 40000 Zahlenwerte verarbeiten. Diese gilt es mit den Werkzeugen der digitalen Signalverarbeitung so zu bearbeiten, dass sie möglichst präzise Informationen liefern.

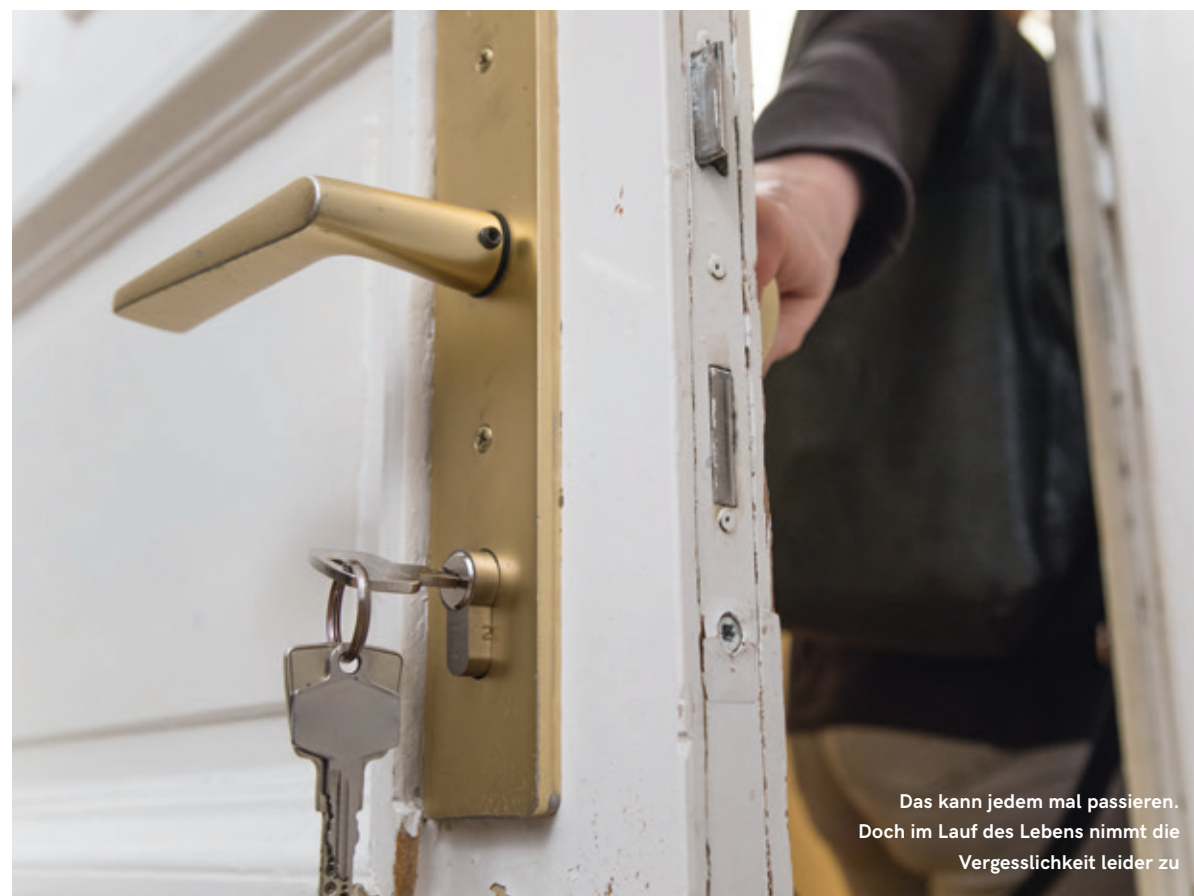
Eindrucksvolle Erfolge erzielen dabei beispielsweise die Spezialisten der Kriminalpolizei. Wenn es um die Identifizierung eines Erpressers geht, können die forensischen Phonetiker nicht nur einzelne Laute einer Bandaufnahme mit der Stimme des Verdächtigen abgleichen. Die Algorithmen sind auch in der Lage, typische Betonungen, das Timbre einer Stimme, den Dialekt oder die Sprechmelodie zu unterscheiden – unter Umständen besser als wir Menschen. Dafür reicht meist eine Vergleichsaufnahme von gerade einmal 30 Sekunden. --- JS

# Im Alter nichts Neues?

Mit den Jahren lassen Lernvermögen und Gedächtnis nach – unter anderem auch in Folge struktureller Veränderungen in zentralen Teilen des Gehirns



von TINEKE STEIGER



Das kann jedem mal passieren. Doch im Lauf des Lebens nimmt die Vergesslichkeit leider zu

**V**ermutlich kennen Sie das: Sie wollen kurz etwas aus dem Keller holen, doch schon auf der Treppe wissen Sie nicht mehr, was es war. Ein anderes Beispiel: Ihr Freund erzählt Ihnen von einem Erlebnis aus dem gemeinsamen Urlaub – und Sie selber können sich partout nicht mehr daran erinnern. Dass wir uns nicht immer an alles erinnern können, ist normal und von Person zu Person unterschiedlich. Der eine kann sich mehr merken, der andere weniger.

Einen allgemeinen Faktor gibt es allerdings: das Alter. Tatsächlich lassen die Lern- und Gedächtnisleistungen nicht nur rein subjektiv, sondern auch objektiv messbar mit den Jahren nach. Allerdings ist bisher wenig darüber bekannt, welche Veränderungen im Gehirn dieser Verschlechterung zugrunde liegen, obwohl hier doch sehr grundlegende Fähigkeiten betroffen sind. Ob wir uns nur kurzzeitig etwas merken müssen, oder ob es langfristige Erinnerungen und auch Erfahrungen sind – all dies prägt unser alltägliches Leben und nicht zuletzt auch unsere Persönlichkeit.

Wie das Lernen und Abspeichern im Gehirn funktioniert, beschreibt eine recht gut erforschte Theorie. Demnach wird eine wahrgenommene Information zunächst daraufhin überprüft, ob sie neu oder bereits bekannt ist. Diese Aufgabe übernimmt ein für das Gedächtnis sehr wichtiges Hirnareal: der Hippocampus. Erkennt dieser, dass es sich um eine neue Information handelt, schickt er ein Signal in den Bereich der Basalganglien, die im Zentrum des Gehirns liegen.

Damit nicht wahllos alles Neue in das Langzeitgedächtnis übergeht, wird hier nun überprüft, ob die eingegangene Information für unser Verhalten wichtig ist und ob sie vielleicht auch auf eine Belohnung hindeutet. Das Ergebnis melden die Basalganglien mittels eines Botenstoffs, dem Dopamin, an den Hippocampus zurück und sorgen so dafür, dass relevante Informationen besser in das Gedächtnis eingespeichert werden.

Nico Bunzeck, Leiter unseres Teams und Professor an der Universität zu Lübeck, konnte bereits zeigen, dass jenes System von Lernen und Gedächtnisbildung bei älteren Menschen offenbar nicht mehr so gut funktioniert. Uns interessiert nun die Frage nach dem Warum.

Peter Baäge; picture alliance/Christin Klose

Die Hirnaktivität lässt sich aus elektrischen Strömen ableiten. Dazu messen Elektroden die Spannungsschwankungen an der Kopfoberfläche. Das Ergebnis ist ein Elektroenzephalogramm (EEG). Um den Kontakt mit den Elektroden zu gewährleisten, spritzt Tineke Steiger ein spezielles Gel zwischen Haube und Kopfhaut



Jens Umbach

Dabei konzentrierten wir uns auf einen Punkt: Es ist nämlich bekannt, dass sich mit fortschreitendem Alter auch bei gesunden Menschen in den Basalganglien Eisenablagerungen bilden. Mit Hilfe einer speziellen, unter anderem am Wellcome Trust Centre for Neuroimaging in London entwickelten Methode der Kernspintomographie gelang es uns, diese sehr feinen Veränderungen im Gehirn zu untersuchen. Und tatsächlich fanden wir, dass die Lern- und Gedächtnisleistung der Studienteilnehmer umso schlechter war, je mehr Eisen sich in den Basalganglien abgelagert hatte.

Vermutlich stört eine übermäßige Menge des ansonsten für den Körper so wichtigen Spurenelements an dieser Stelle das Dopamin, welches ja die Information zum Hippocampus leiten soll. Zudem zeigte sich in unserer Studie auch, dass die Eisenablagerungen in einem negativen Zusammenhang mit dem sogenannten Myelin standen: Je mehr Eisen sich abgelagert hatte, desto weniger Myelin war im Bereich der Basalganglien vorhanden. Myelin umgibt die Nervenfasern und wirkt wie eine elektrische Isolierung. Ist es defekt, werden Signale ungenauer weitergeleitet. Die Informationsübertragung zum

Hippocampus funktioniert also vermutlich nicht mehr richtig.

Lässt sich das bei den älteren Teilnehmern nicht mehr so gut funktionierende System aber vielleicht anstoßen, indem man die Information, die eingespeichert werden soll, mit einer Belohnung verbindet? Denn die Basalganglien reagieren, wie oben beschrieben, stärker auf eine belohnte Information. Dabei gilt: Je größer die erwartete Belohnung, desto mehr Dopamin wird freigesetzt und desto wahrscheinlicher wird eine Information eingespeichert. Die Basalganglien reagieren dabei nicht nur auf die Information einer direkten Belohnung (zum Beispiel ein leckeres Eis), sondern auch bereits auf Hinweisreize, die eine Belohnung vorhersagen (das Klingeln des nahenden Eiswagens). Dieser Mechanismus ist von zentraler Bedeutung, denn er sorgt dafür, dass wir unsere kognitiven und körperlichen Ressourcen verstärkt für Aufgaben gebrauchen, von denen wir uns einen Nutzen erhoffen.

Dabei ist uns der Einfluss der Belohnung meist gar nicht bewusst. Verspricht man einer Testperson beispielsweise fünf Euro, wenn sie an einem Hebel zieht, greift sie völlig unnötigerweise und ohne dies selbst zu bemerken kräftiger zu, als jene, die keine Belohnung erwartet. Ob also eine Verbindung zwischen einem Hinweis und einer entsprechenden Belohnung – auch unbewusst – erlernt wurde, kann man unter anderem an einer verstärkten körperlichen Reaktion messen.

Inwiefern dieses Erlernen einer Verknüpfung zwischen einem Hinweisreiz und einer Belohnung in älteren Menschen noch funktioniert, untersuchten wir bei einem Versuch mit jungen und älteren Probanden. Die Aufgabe war denkbar einfach. Die Versuchsteilnehmer mussten einfach nur per Knopfdruck angeben, ob die auf einem Bildschirm

gezeigten Fotos in einem Gebäude oder außerhalb aufgenommen wurden. Das Entscheidende: Mit jedem Bild bekamen sie die Information, ob sie für die richtige Einordnung nur 10 Cent oder einen Euro Belohnung bekommen würden. Dabei maßen wir sowohl die Reaktionszeiten als auch – mit Hilfe der Elektroenzephalographie (EEG) – die Hirnaktivität.

Tatsächlich reagierten die jungen Versuchsteilnehmer deutlich schneller, wenn ihnen die höhere Belohnung winkte, obwohl ja nur die richtige Antwort zählte, nicht aber die Geschwindigkeit der Entscheidung belohnt wurde. In diesen Fällen zeigte sich auch eine deutliche Änderung in der Hirnaktivität. Bei den älteren Probanden waren beide Effekte, die Reaktionsgeschwindigkeit und die Hirnaktivität, hingegen nicht zu beobachten. Auf den Bildern des Kernspintomographen war schließlich zu sehen, dass dies mit entsprechend geschwächten Myelinscheiden der Basalganglien zusammenhing. Der Abbau von Myelin im hohen Alter führt also vermutlich auch dazu, dass die Basalganglien die Verbindung zwischen Hinweisreiz und Belohnung nicht richtig verarbeiten können.

Die Erkenntnisse dieser Studien fügen unserem Wissen über die biologischen Grundlagen kognitiver Veränderungen neue Aspekte hinzu und liefern somit Anhaltspunkte für weitere Forschung, die sich mit der drängenden Frage nach dem „Was tun?“ gegen den kognitiven Abbau im Alter beschäftigt. So wiesen zum Beispiel verschiedene Forscher bereits darauf hin, dass Vorfreude, Neugier und das Erkunden von Neuem das Lern- und Gedächtnissystem positiv beeinflussen können – und es dadurch vermutlich im Alter fit halten. Wie groß dieser Effekt wirklich ist und inwiefern davon auch die strukturellen Veränderungen im Gehirn beeinflusst werden, müssen weitere Studien zeigen. Der Rat, sich seine Neugier zu bewahren, aktiv zu bleiben und Neues zu wagen, ist aber ganz sicher nicht falsch.

## Neugier hält jung

Wer sich auf Dinge freut und Neues ausprobiert, trainiert seinen Dopaminhaushalt – und damit auch sein Gedächtnis

Zehn-, zwanzig- oder dreißigtausendmal am Tag werden wir mit einem Ereignis konfrontiert, müssen in einer bestimmten Situation reagieren oder eine Entscheidung treffen. An die allermeisten werden wir uns Sekunden später schon nicht mehr erinnern: Sie bremsen an der Kreuzung, hängen Ihren Mantel an den Haken und fahren den Rechner hoch.

Der Grund dafür liegt in unserem Gehirn, das permanent Wichtiges von Unwichtigem unterscheidet – und nur einen winzigen Teil der Sinneswahrnehmungen im Gedächtnis abspeichert. Entschieden wird das durch den Botenstoff Dopamin, der bei positiven aber auch negativen Erlebnissen ausgeschüttet wird und zu einer Speicherung im Gedächtnis führt.

Auch bei Neugierde scheint er eine große Rolle zu spielen. Wie dies geschieht, fanden Forscher um Matthias Gruber von der University of California in Davis mit Hilfe von Probanden heraus, indem sie ihnen Quizfragen vorlegten. Dabei sollten die Befragten vor jeder Frage sagen, wie gespannt sie auf die Antwort sind. Diese wurde ihnen 14 Sekunden später präsentiert. In dieser Wartezeit sahen sie das Porträt eines Menschen, das mit dem Quiz überhaupt nichts zu tun hatte.



**Zur Nachahmung empfohlen: An seinem 95. Geburtstag wagte Herbert Spiller aus Düsseldorf seinen ersten Fallschirmsprung**

Später fragten die Forscher, ob sich die Probanden an eben diese Gesichter erinnern können. Das Ergebnis: Je neugieriger die Probanden die Antwort auf eine spannende Frage erwarteten, umso besser konnten sie sich auch an die eingblendeten Gesichter erinnern.

Allein die Neugier führte offenbar zu einer Steigerung des Gedächtnisses – ein Effekt, der nachweislich viele Stunden anhält. Auf Computerscans ist zu sehen, wie das Gehirn bei einer spannenden Frage das Belohnungszentrum aktivierte: Das Warten auf eine spannende Antwort ging mit der Ausschüttung von Dopamin einher.

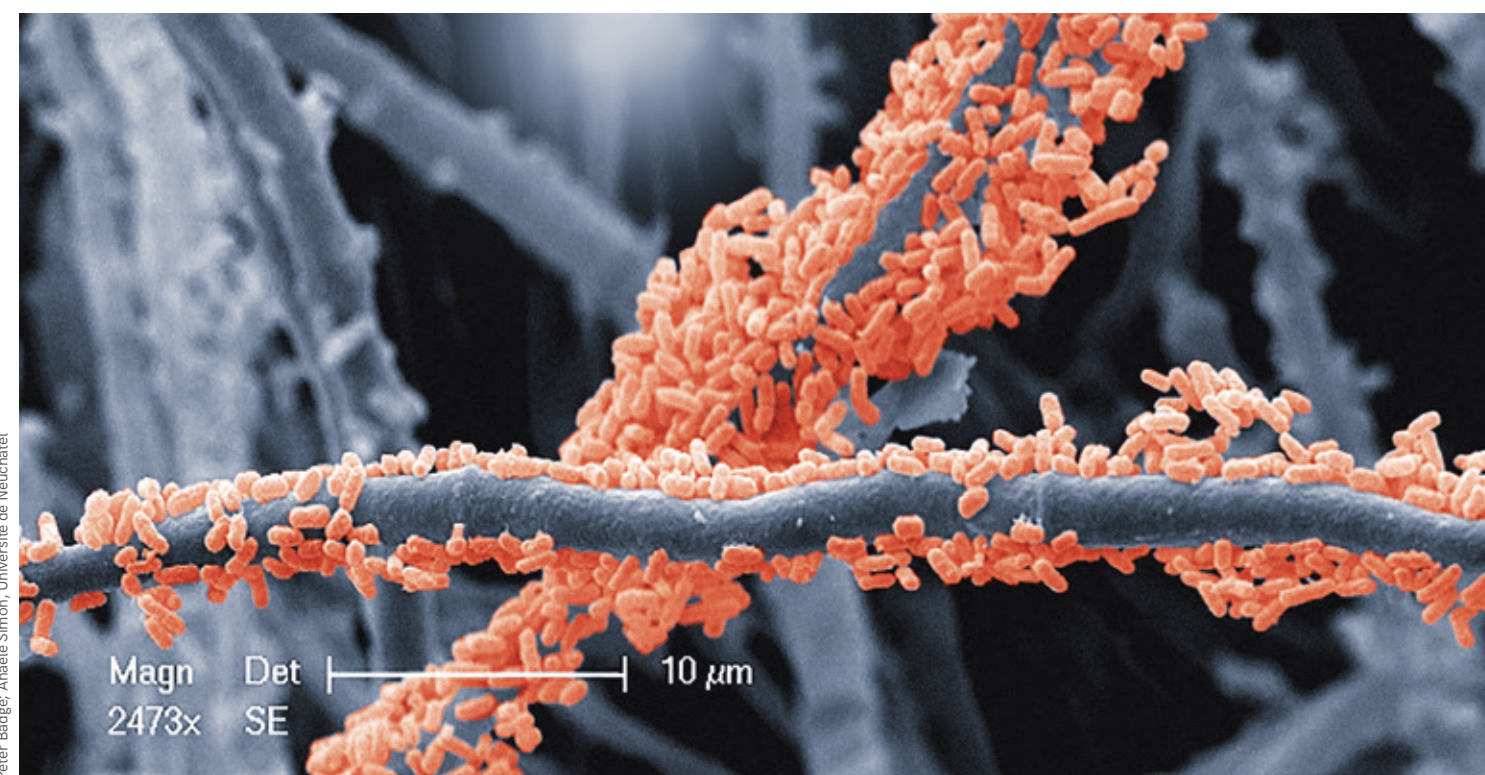
Kurzum: Wer neugierig ist, lernt und behält besser. Und: Wer neugierig ist, trainiert seinen Dopaminhaushalt und hält sein Hirn fit. Denn Langeweile und Routine sind die Rivalen des Botenstoffs. ---JS

# Eine starke Allianz

Die Sanierung alter Industriestandorte, Müllkippen und Tankstellen ist aufwändig und teuer. Dabei gibt es im Untergrund bereits eine Arbeitsgemeinschaft, die Schadstoffe unschädlich machen kann. Eine Geschichte von Pilzen und Bakterien



von ANJA WORRICH



Peter Badger; Anaële Simon, Université de Neuchâtel

Die feinen Pilzfäden sind über und über von Bakterien besiedelt (rot eingefärbt). Das Bild zeigt einen Ausschnitt von etwa 50 mal 34 Mikrometern und stammt von einem Team um Anaële Simon von der Université de Neuchâtel

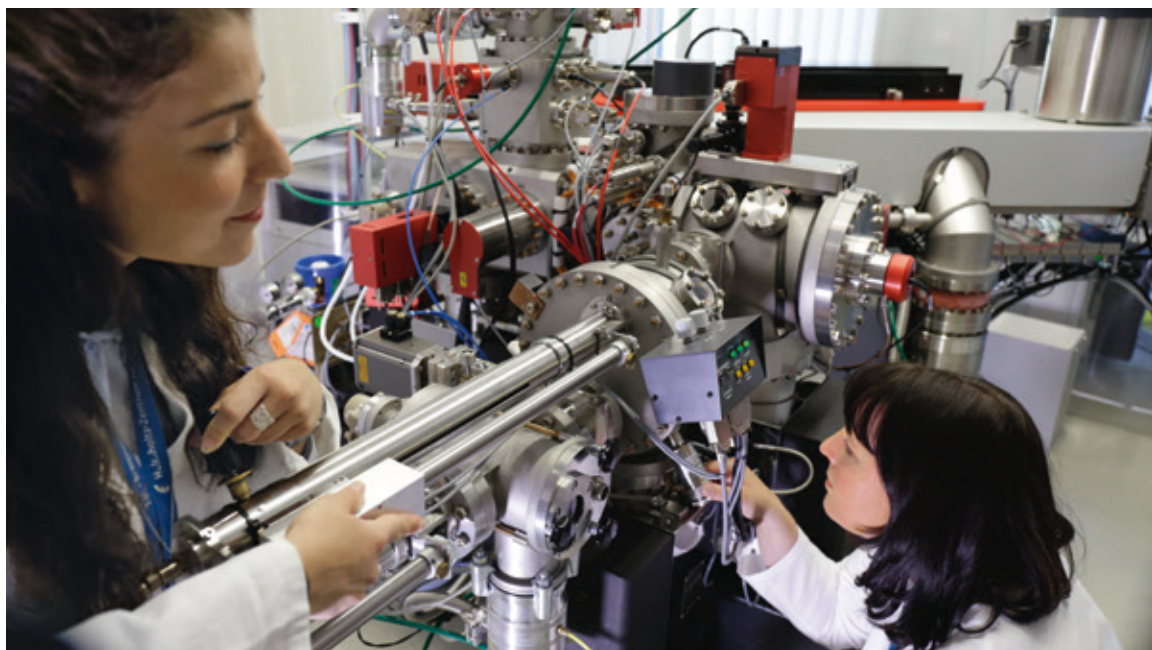
**G**lyphosat ist momentan ja irgendwie in aller Munde. Der Unkrautvernichter, der seit den 1970er Jahren weltweit in Gebrauch ist, lässt sich in vielen Nahrungsmitteln nachweisen und steht im Verdacht, Krebs auszulösen. Doch Glyphosat ist nur eine von unzähligen chemischen Substanzen, die durch uns Menschen in die Böden gelangen, wo sie von Pflanzen aufgenommen werden oder ins Grundwasser gelangen können. Neben Substanzen aus der Landwirtschaft sind dies insbesondere organische Schadstoffe wie Öle oder Lösemittel aus Tankstellen, Industriestandorten oder alten Deponien. Derzeit gibt es in Deutschland mehr als 260000 als „Altlast“ verdächtige Flächen.

Als Schadstoffe gelten Substanzen erst dann, wenn sie aufgrund ihrer Eigenschaften ab einer bestimmten Konzentration für Menschen, Tiere oder Pflanzen schädlich sind. Nur: Bei einem Großteil der heute verwendeten über 100000 Chemikalien weiß man über deren Gefährlichkeit nichts. Gesundheitliche oder ökotoxikologische Gefährdungsbeurteilungen wurden nie vorgenommen. Gewiss ist aber: In unseren Körpern lassen sich mittlerweile mehr als 300 chemische Substanzen nachweisen, die dort

eigentlich nicht hingehören. Das zeigt, wie wichtig saubere Böden sind, denn hier wächst das Getreide und weidet das Vieh.

Dass die Folgen des anhaltenden Chemikalieneintrags oft erst Jahre oder Jahrzehnte später zu spüren sind, liegt an den besonderen Eigenschaften des Bodens. Er bindet die Stoffe chemisch oder physikalisch – und zwar so lange, bis die Speicherkapazität für die jeweiligen Substanzen erschöpft ist. Zum anderen ist der Boden aber auch Lebensraum für Myriaden von Mikroorganismen, die sich von organischen Substanzen ernähren. Diese können natürlichen, aber auch nicht-natürlichen Ursprungs sein. Kurzum: Manche Schadstoffe werden im Lauf der Zeit im wahrsten Sinne des Wortes gefressen.

Allerdings sind die Schadstoffe im Boden ungleichmäßig verteilt und die Bakterien müssen sich erstmal den Weg zu ihnen bahnen. Die meisten verfügen über dünne, schraubenförmig gewundene Geißeln, die die wenige tausendstel Millimeter großen Organismen antreiben – auf diese Weise schaffen sie durchaus Wegstrecken von einigen Metern pro Tag. Schon der Urvater der Mikroskopie, Antoni van



Ingo Knopf

Leeuwenhoek, konnte das Treiben der Bakterien beobachten und beschrieb 1676 das „Umherwimmeln kleiner Kreaturen“ in einem Wassertropfen.

Doch wo kein Wasser ist, können sich diese Kreaturen nicht bewegen – und keine neuen Nahrungsquellen erschließen. Insbesondere mit Luft gefüllte Bodenporen stellen unüberwindbare Hindernisse dar. Und dennoch: Obwohl die Poren oberhalb des Grundwasserspiegels nur teilweise wassergefüllt sind, kommen Bakterien von A nach B. Ihr Trick: Sie nutzen die dünnen Zellfäden (Hyphen) von Pilzen, die im Untergrund dichte Geflechte bilden. „Diese Hyphen kann man sich wie eine Pilzautobahn vorstellen, entlang derer sich Bakterien schnell ausbreiten können“, sagt Lukas Wick, Leiter der Arbeitsgruppe Bioverfügbarkeit am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung in Leipzig. „Dabei bewegen sie sich nicht innerhalb der Hyphen, sondern in einem dünnen Wasserfilm, der diese umgibt.“

Unter dem Mikroskop kann man bestens beobachten, wie sich die unter fluoreszierendem Licht hellgrün leuchtenden Bakterien entlang der Pilzhyphen bewegen und in neue Lebensräume vordringen. Über die Zusammensetzung dieser Filme ist wenig bekannt, gewiss ist aber, dass die Bakterien hier auch Nährstoffe finden, die von außen in die dünne Wasserschicht der Hyphen diffundieren. Die Mikroben können dann dem Konzentrationsgefälle

folgend entlang der Hyphen bis zur Quelle der Nährstoffe wandern, beispielsweise die Öl- und Benzinreste unter einer alten Tankstelle.

Selbst im Extremfall vollkommener Trockenheit bewährt sich diese Pilzautobahn. Ohne Wasser fallen die Bakterien nämlich in eine Art Winterschlaf, bilden Sporen und können in dieser Form Jahrzehnte, Jahrhunderte, sogar Jahrtausende überdauern. Stoffwechselprozesse lassen sich nicht mehr nachweisen, was natürlich auch bedeutet, dass sie keine Schadstoffe mehr umsetzen.

Doch jene Pilzhyphen können auch in trockene Bereiche sprießen und dort verharrende Sporen zu neuem Leben erwecken. Unter dem Mikroskop ist deutlich zu sehen, wie das feuchte Pilzgeflecht die kleinen, rundlichen und nur etwa einen Tausendstel Millimeter großen Bakteriensporen erreicht und zu neuem Leben erweckt. Sie strecken sich, wachsen um das Zehnfache an und vermehren sich.

Das Sekundärionen-Massenspektrometer (NanoSIMS) offenbart, wie das vorstatten geht. Mit seiner Hilfe lassen sich stabile Isotope nachweisen: Atomarten eines bestimmten Gewichts, die in der Natur sehr selten vorkommen. Stellt man den Pilzen ein mit diesen Markern versetztes Nährmedium zur Verfügung, lässt sich der Transport dieses Mediums innerhalb der Pilzfäden nachvollziehen. Tatsächlich

Mit Hilfe des Sekundärionen-Massenspektrometers (NanoSIMS) konnte Anja Worrich (rechts) zeigen, wie Nährstoffe und Wasser durch die Pilzfäden transportiert werden – und die Bakterien versorgen

strömt es durch die Hyphen und – das konnten wir mit Hilfe dieser Methode nachweisen – versorgt die Bakterien über diesen Weg mit Wasser und Nährstoffen.

So ergibt sich also eine Allianz zwischen Pilzen und Bakterien, die sich für die schonende Sanierung von kontaminierten Böden eignen könnte. Heute übliche Verfahren sind technisch ungeheuer aufwändig. Häufig müssen die belasteten Areale großflächig ausgehoben werden und der verschmutzte Boden auf Temperaturen von über 500 Grad Celsius erhitzt werden, um die flüchtigen Schadstoffe auszutreiben. Bei den so genannten Bioremediationsverfahren geht es indes darum, die Natur die Arbeit machen zu lassen.

Was im gut kontrollierten Laborversuch bestens funktioniert, kann in der Natur allerdings durchaus scheitern. So ist die Zusammensetzung organischer Schadstoffe an entsprechenden Standorten meist sehr heterogen. Manche der Substanzen schmecken den Bakterien schlicht nicht, andere sind sogar giftig und bei wieder anderen entstehen beim mikrobiellen Abbau neue Verbindungen, die ihrerseits die Umwelt schädigen. Und: Mikroben können nur organische Schadstoffe verdauen. Schwermetalle etwa lassen sich mit ihrer Hilfe nicht beseitigen.

Ein weiteres Problem: Mikroorganismen sind nicht die schnellsten und brauchen deshalb unsere Unterstützung bei der Arbeit. Der Boden wird dafür zu so genannten Mieten aufgeschüttet, in denen sich die Lebensbedingungen der Mikroorganismen hinsichtlich Temperatur, Sauerstoff- und Wassergehalt optimieren lassen. In ersten Pilotanlagen geht es nun darum, auch darauf zu verzichten und stattdessen die Allianz von Pilzen und Bakterien gezielt vor Ort zu stimulieren. An ehemaligen Militärflugplätzen und Tanklagern stellen sie jetzt ihr Können unter Beweis.

## Überforderte Natur

### Wie Bakterien die Folgen der Deepwater-Horizon-Katastrophe minderten – ein bisschen jedenfalls

An jedem Tag fließen über 160000 Liter Öl in den Golf von Mexiko. Das entspricht der Ladung von etwa vier Tanklastwagen. Machen kann man daran nichts, denn die zähe schwarze Flüssigkeit tritt am Meeresboden aus natürlichen Ölquellen aus. Und zwar seit Millionen von Jahren. Rohöl ist hier auch Teil der Nahrungskette hunderter von Bakterien-, Algen- und Pilzarten.

Als am Abend des 20. April 2010 rund 80 Kilometer vor der Küste Louisianas die Bohrplattform Deepwater Horizon explodierte, strömten täglich neun Millionen Liter Rohöl ins Meer. Nach 84 Tagen waren es etwa 760 Millionen Liter – das entspricht der Ladung von fast 20000 Tanklastwagen. Die Deepwater-Horizon-Explosion führte zur schwersten Katastrophe dieser Art aller Zeiten.

Um die Bildung eines Ölteppichs zu verhindern, wurden etwa 7 Millionen Liter eines Dispersionsmittels versprüht. Das Öl bildete riesige Wolken, in denen eine deutliche höhere Bakteriendichte gemessen wurde. Einige der leichter flüchtigen Substanzen verschwanden innerhalb von Tagen, Wochen und Monaten. Ein Grund dafür: Im Golf von Mexiko gibt es bereits ein auf Rohöl spezialisiertes mikrobielles Ökosystem.

Doch allzu hohe Erwartungen wurden enttäuscht. Am Ende



**Nach der Explosion der Deepwater Horizon bildete sich ein fast 10000 Quadratkilometer großer Ölteppich**

lagen die Raten der biologischen Schadensbegrenzung unter den Erwartungen der Experten. Die meisten Schadstoffe blieben viel länger im Wasser als erwartet. So berichtete Max Grünig, Präsident des Ecologic Institute in Washington, dass mehr als sieben Jahre nach der Katastrophe in den Eiern von Pelikanen noch immer Spuren des Öls zu finden seien. Auch sei bei den Delfinen bis heute die Sterblichkeit erhöht – bei gleichzeitig niedrigeren Fortpflanzungsraten. ---JS

\* Interview im Deutschlandfunk am 28.12.2017

Getty Images/Kris Krug

# „Als Kind alles ausprobiert“

Sie leitet einen Kindergarten, er ein Max-Planck-Institut. Martina Grundmann-Ecker und Stefan Hell sprechen über das urmenschliche Interesse an der Natur, den Zweifel an Dogmen – und eine Katze auf dem Balkon



Fotos dieses Artikels: Phototree/ Patrick Kunkel

Martina Grundmann-Ecker und Stefan Hell im Gespräch mit Kilian Kirchgeßner (rechts)

*Frau Grundmann-Ecker, in Ihrem Kindergarten gibt es eine „Forscherstation“. Hier können die Kinder spielerisch Naturphänomenen auf den Grund gehen. Mit welchem Experiment können Sie uns begeistern?*

**Grundmann-Ecker (lacht):** Kinder beobachten die Welt ja noch ganz anders als wir. Für sie ist vieles neu, was uns bekannt ist. Da lassen sie Spielzeugautos eine Rampe heruntersausen und schauen, wie weit sie fliegen. Und testen, was passiert, wenn sie die Rampe steiler stellen. Solche Experimente funktionieren immer.

**Hell:** Da bin ich absolut Ihrer Meinung, mit meinen Kindern mache ich ganz ähnliche Experimente. Letztens haben wir zum Beispiel kleine Modellflugzeuge gekauft und hier und da ein bisschen an der Aerodynamik gewerkelt. Einige davon hängen bis heute in den Bäumen der Göttinger Schillerwiese. Ich muss zugeben: Die sind nicht alle von meinen Kindern da hinein gesteuert worden ...

*Welche Experimente funktionieren denn im frühen Kindesalter am besten?*

**Grundmann-Ecker:** Die Kleinen lieben alles, was mit Wasser zu tun hat. Mit einem Schlauch am Wasserhahn, in der Pfütze rummatschen.

**Hell:** Das erinnert mich an eine meiner frühesten Kindheitserinnerungen: Ich stand auf einer Brücke und beobachtete, wie sich der Bach an den Steinen staute und aufschäumte. Ich habe ihn gestaut und beobachtet, wie sich das Wasser einen neuen Weg sucht. Das faszinierte mich gewaltig. So wie die meisten Kinder.

*Haben Ihre Eltern ihr Interesse an der Natur gefördert?*

**Hell:** Sie haben meine Ausbildung immer unterstützt, ohne Frage. Aber sie hatten nicht die Zeit und die Möglichkeiten, mich in dieser Hinsicht speziell zu fördern. Dass sie mir eine Lupe oder ein Mikroskop geschenkt hätten und damit mein weiterer Weg vorgezeichnet gewesen wäre – das ist Quatsch, so war es nicht.

*Frau Grundmann-Ecker, wie reagieren die Eltern auf die intensive Beschäftigung mit den Naturwissenschaften?*

**Grundmann-Ecker:** Sie nehmen das nicht als „Physik“ oder als „Biologie“ wahr. Sie bringen ihre Kinder zu uns, und wir ermöglichen ihnen zu forschen, ohne dass das einen naturwissenschaftlichen Namen hat. Sie kriegen die Zeit, den Raum, die Materialien. Es geht einfach darum, sich mit der Umwelt auseinanderzusetzen – dieser Drang ist in den Kindern drin, und wir möchten sie darin bestärken. Wir hoffen, dass wir damit ein Samenkorn pflanzen, das später einmal aufgeht. Gab es bei Ihnen auch so ein Samenkorn, Herr Hell?

**Hell:** Ich habe als Kind immer alles Mögliche ausprobiert, aber das waren keine ausgefeilten Experimente. So war ich als Fünfjähriger fasziniert davon, wie unsere Katze den Baum hochkletterte. Sie krallte sich an der Rinde fest – und zack-zack-zack war sie oben, ohne runterzufallen. Ich habe sie dann auf das Metallgeländer unserer Terasse gestellt, um zu sehen: Kann sie sich auch ohne Festkrallen halten? Oder fällt sie runter?

*Und, ist es gutgegangen?*

**Hell:** Ja, sie schaffte das, und je öfter ich sie daraufsetzte, desto besser wurde sie. Und ja: Ich stand immer in der Nähe und fing sie, wenn es nicht klappte, auf.

**Grundmann-Ecker:** Ich beobachte immer wieder, wie unterschiedlich die Kinder sind: Manche müssen wir behutsam an das Tun heranführen, andere leben ihre Experimentierfreude ganz von selbst aus – so wie Sie.

*In Ihrem Kindergarten machen Sie schon seit 2008 solche Experimente. Die Kinder von damals sind heute längst in der Schule. Beobachten Sie, ob das Samenkorn aufgeht?*

**Grundmann-Ecker:** Tatsächlich gibt es Kinder, die in den ersten Jahren nach dem Unterricht immer noch bei uns im Kindergarten vorbeikommen und fragen, ob sie nicht dieses oder jenes Experiment bei uns ausprobieren könnten. Wichtig ist

aber, dass die Schule das Thema weiterträgt. Ich halte gerade das für so wichtig, weil die Kinder nach ihren ersten Erfolgserlebnissen im Kindergarten auch später dranbleiben.

**Herr Hell, Sie haben den Nobelpreis erhalten. Können Sie Schulkindern erklären wofür?**

**Hell:** Grundlegende Dinge kann man meistens auch einfach erklären. Ich fand heraus, dass man mit einem Lichtmikroskop Details scharf sehen kann, die kleiner sind als die Wellenlänge des Lichts. Diese Schärfegrenze lag bei 200 Millionstel Millimetern. Alles was dichter beieinander lag – zum Beispiel mit Farbstoffmolekülen markierte filigrane Strukturen von Zellen – ließ sich im Lichtmikroskop dann nicht voneinander trennen.



Meine Lösung war, die Farbstoffmoleküle nacheinander zum Leuchten zu bringen, indem ich sie unter dem Mikroskop quasi ein- und ausschalte. Ist ein Detail dunkel, kann es nicht das Signal des anderen stören und umgekehrt. Dieses Hell-Dunkel- oder An-Aus-Prinzip – das kann man auch schon Viert- oder Fünftklässlern vermitteln.

**Seit wann beschäftigen Sie sich mit dieser Frage?**

**Hell:** Ich studierte Physik, weil ich etwas Grundlegendes verstehen wollte – so wie ich als Junge diesem Wasserlauf nachgespürt hatte. In meiner Doktorarbeit entschied ich mich wegen der angeblich besseren Jobaussichten für ein angewandtes Thema – und so begann ich, unter dem Mikroskop Computerchips zu vermessen. Doch bald merkte ich: Mikroskopie an sich ist langweilig; Physik aus dem 19. Jahrhundert. Entweder ich hänge sie an den Nagel oder ich suche mir ein noch ungelöstes interessantes Problem. Die Grenze des Sichtbaren zu brechen – das war cool, weil ja im Lehrbuch steht, dass es nicht ginge. Auch das hat was mit meiner Kindheit zu tun.

**Wieso?**

**Hell:** Ich bin ja im Kommunismus groß geworden und merkte schon als Jugendlicher: Nicht alles, was vehement behauptet wird, hält einer Überprüfung stand. Und das, was gebetsmühlenartig heruntergeratscht wird, ist erst recht verdächtig. Und

bei der Auflösungsgrenze des Lichtmikroskops hatte ich einen Verdacht.

**Grundmann-Ecker:** Woher kamen denn Ihre Zweifel? Sie galten mit dieser Idee ja lange als Exot ...

**Hell:** ... oder Spinner. Ein landläufiges Zerrbild ist ja, unter Naturwissenschaftlern gebe es viele Spinner. Ich glaube das nicht: Die Natur holt jeden Spinner gnadenlos auf den Boden der Tatsachen zurück. Aber manchmal träumt auch die ganze Welt bis auf ein paar wenige, die die Dinge korrekt einschätzen. Überlegen Sie mal: Wenn wir heute auf die letzten fünfzig Jahre zurückblicken, haben wir einen ganz anderen Blick auf den Lauf der Dinge, als es die Leute damals hatten. Also kann man davon ausgehen, dass die Menschen in fünfzig Jahren viele Dinge



anders sehen werden, als wir heute. Das sollte einem zu denken geben. Als Wissenschaftler sollte man sich daher immer fragen, ob etwas, was heute gültig scheint, auch in einigen Jahrzehnten noch gültig sein wird. Wenn man begründete Zweifel daran hat, sollte man diesen Zweifeln nachgehen.

**Dieser Gang muss aber frustrierend gewesen sein: Etliche Bewerbungen um Forschungsgelder wurden abgelehnt, erst in Finnland fanden Sie dann eine Stelle an der Universität. Was haben Sie in dieser Phase über Kommunikation gelernt?**

**Hell:** Mir wurde klar, wie sehr die menschliche Wahrnehmung durch Interessen geleitet ist. Wenn ich hungrig durch die Straße gehe, sehe ich jede Dönerbude. Die Physik hatte damals kein großes Interesse für die Lichtmikroskopie, weil man dachte, dass da nichts mehr zu holen wäre. Und bei mir war die ganze Wahrnehmung darauf konzentriert, eine Lösung für dieses Auflösungsproblem zu finden. Dabei hätte ich auch falsch liegen können. Um jetzt im Bild zu bleiben: Wenn ich in einem Wohnviertel unterwegs bin, stoße ich womöglich nie auf einen Dönerladen. Aber mein Blick für das „Stadtviertel“ sagte mir, dass es kein Wohnviertel ist. Und mit Hunger im Bauch wird man auch fündig.

**Welche Rolle spielt bei Ihnen das Kommunikative, Frau Grundmann-Ecker?**

**Grundmann-Ecker:** Wir haben gerade einen Jungen aus Nigeria bei uns. Er ist seit drei Monaten in Deutschland, spricht kaum Deutsch und hat deshalb weniger Kontakte zu den anderen Kindern in seiner Gruppe. Er kann sich nicht ausdrücken, aber ist trotzdem mit Feuereifer dabei.

**Hell:** Hilft ihm dieser Eifer, in die Gruppe reinzukommen?

**Grundmann-Ecker:** Ja, unbedingt. Denn wenn sich mehrere Kinder für die gleichen Experimente interessieren, arbeiten sie völlig unbefangen zusammen. Und natürlich geht es dabei nicht ohne Kommunikation. Jedes unserer Experimente ist ja auch Teamwork – und fördert deshalb nicht nur das Verständnis von Naturphänomenen, sondern ganz konkret auch das Sprachvermögen und die Kommunikation untereinander.



**Herr Hell, Sie haben zwei Firmen gegründet, die sich mit der Entwicklung von High-Tech-Mikroskopen beschäftigen. Sprechen Sie anders über physikalische Probleme, wenn ein Kunde Sie verstehen muss?**

**Hell:** Wenn man Dinge erklärt, soll man sie so weit vereinfachen, dass Details nicht das Kernprinzip überdecken. Wichtige Details von heute sind vielleicht morgen nicht mehr wichtig, weil die Entwicklung weitergeht – aber das Kernprinzip bleibt. Wissen Sie, was mir im Lauf der Zeit klar wurde?

Die Erzieherin **Martina Grundmann-Ecker** (54) leitet den evangelischen Kindergarten in Waldangeloch in der Nähe von Heidelberg. Seit 2008 begleitet sie Kinder dabei, Naturphänomene zu beobachten und zu erforschen. Sie und ihr Team absolvieren dazu regelmäßig Fortbildungen an der Forscherstation, dem Klaus-Tschira-Kompetenzzentrum für frühe naturwissenschaftliche Bildung, das von der Klaus Tschira Stiftung gegründet wurde und von ihr getragen wird. [www.forscherstation.info](http://www.forscherstation.info)

Der Physiker **Stefan Hell** (55) wurde 2014 mit dem Chemie-Nobelpreis ausgezeichnet. Mit einer Entdeckung revolutionierte er die Mikroskopie: Er überwand die Auflösungsgrenze, die mehr als 100 Jahre lang als unverrückbar galt – dank seines Verfahrens können Wissenschaftler unter dem Lichtmikroskop beispielsweise Vorgänge in lebenden Zellen auf der sogenannten Nanoskala beobachten. Hell, der als Kind in einer deutschen Minderheit in Rumänien aufwuchs, ist Direktor am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen und am Max-Planck-Institut für medizinische Forschung in Heidelberg.

Die Fragen stellte **Kilian Kirchgeßner**

**Na?**

**Hell:** Wenn man ein Phänomen verstanden hat, kann man es allen erklären. Wenn jemand sein Forschungsgebiet nicht auf das Einfachste herunterbrechen kann, ist das so gut wie immer ein Beleg dafür, dass er es selbst (noch) nicht verstanden hat.

**Was war für Sie das größte Erfolgserlebnis?**

**Hell:** Ich habe Physik studiert, weil ich fasziniert war von dem, was die „Welt im Innersten zusammenhält“, wie es bei Goethe heißt. Es sind sehr simple Prinzipien. Diese Erkenntnis war für mich unwahrscheinlich befriedigend – und die Erkenntnis, dass manche praktischen Grenzen in Wahrheit gar keine sind.



**Grundmann-Ecker:** Wir gehen mit unseren Kindern oft in den Wald – und erleben dabei wirklich Erstaunliches. Kinder, die wenig sprechen – weil sie schüchtern sind oder die Sprache nicht beherrschen – reden dort auf einmal viel mehr und knüpfen viel ungezwungener neue Kontakte. Nirgendwo sonst können sie dieses urmenschliche Interesse an allem Neuen ausleben. Diese Erfahrungen prägen sie ein ganzes Leben lang.



# Von Fluten, Dürren und der Hilfe aus dem All

Ausgerechnet die Feuchtigkeit irdischer Böden stört Astrophysiker bei der Erforschung des Weltalls. Doch aus der Not wurde eine Tugend: Wie Sternexplosionen Bauern bei Trockenheit helfen können

Immer öfter titeln die Zeitungen „wärmster Monat“ oder „trockenster Frühling“ – stets mit dem Zusatz: „seit Beginn der Wetteraufzeichnungen“. Der Klimawandel ist längst spürbar, die Landwirte leiden darunter ganz besonders. Das gilt für Deutschland, aber auch viele andere Regionen der Welt. Häufig ist die Ernte nur zu retten, wenn die Äcker rechtzeitig bewässert werden.

Doch die Bewässerung ist aufwändig und teuer, weshalb sie möglichst effektiv eingesetzt werden muss. Kaum jemand liest deshalb die Wetterberichte so genau wie die Bauern. Doch ob das Wasser aus den Wolken oder dem Sprenger kommt, ist das eine. Das andere ist der Boden selbst, der je nach Tagesform das Wasser unterschiedlich aufnimmt, speichert und abfließen lässt. Entscheidend ist also der Wassergehalt in der Wurzelzone. Für einen Acker lässt sich dieser mit herkömmlichen Punktmessungen nicht so ohne Weiteres bestimmen oder gar vorhersagen. Denn wie feucht ein Boden ist, kann schon innerhalb von wenigen Metern variieren.

Tatsächlich lässt sich großflächige Bodenfeuchte mit Hilfe von Satellitenmessungen abschätzen, nur dringt die dabei verwendete elektromagnetische Strahlung kaum eine Handbreit tief in den Boden ein. Oft befindet sich darunter aber genügend Wasser, um Pflanzen gedeihen zu lassen. Würden Satelliten in diesem Fall Trockenheit erkennen, wäre eine künstliche Bewässerung dennoch Verschwendung. Die Frage lautet also: Wie kann man zuverlässig den mittleren Wassergehalt in der Wurzelzone einer großen Ackerfläche bestimmen?

Die Antwort steht buchstäblich in den Sternen. Denn wenn massereichen Sternen am Ende ihres Lebens der Brennstoff ausgeht, explodieren sie und entwickeln sich zu großen Beschleunigern für kleine Teilchen. Diese Protonen und Elektronen der so genannten kosmischen Strahlung verteilen sich im All gleichmäßig und treffen somit unablässig auch auf die Erdatmosphäre. Beim Zusammen-

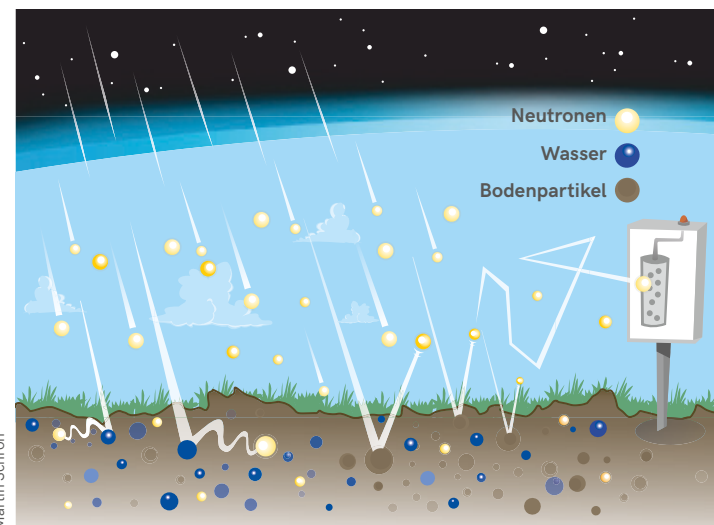


Für Landwirte ist entscheidend, wie hoch der Wassergehalt in der Wurzelzone ist. Doch der kann sich auf kleinstem Raum ändern und ist großflächig nur schwer messbar

Peter Badge; Getty Images/Rainer Dittrich



von MARTIN SCHRÖN



Martin Schrön

Die unerlässlich auf unseren Planeten strömende kosmische Strahlung erzeugt in der irdischen Atmosphäre Neutronen. Treffen diese im Boden auf die Atome der festen Bestandteile, werden sie reflektiert und können gezählt werden. Wassermoleküle hingegen absorbieren einen Großteil der Neutronenenergie. Aus dem Verhältnis der auftreffenden und reflektierten Neutronen lässt sich die Bodenfeuchte in der Wurzelzone abschätzen

Boden ableiten: Dieser ist umso trockener, je mehr Neutronen zurückgestoßen werden. Und weil Neutronen in der Luft viel Platz zum ungestörten Fliegen haben, messen wir mit unseren Detektoren automatisch ein Mischsignal aus einem Umfeld von vielen hundert Metern.

Übrigens war Astrophysikern genau dieser Effekt bisher immer ein Dorn im Auge. Denn ihnen hilft die kosmische Strahlung bei der Erforschung des Weltalls – und dabei stört die Bodenfeuchte mit ihrem Einfluss auf die Neutronenintensität. Im Jahr 2008 erkannte ein Team um Marek Zreda von der University of Arizona, dass sich aus dieser Not womöglich eine Tugend machen lässt. Dass sich nämlich aus dem Vergleich der eingehenden kosmischen Strahlung mit der reflektierten Neutronenintensität die Bodenfeuchte abschätzen lässt.

Weltweit gibt es mittlerweile hunderte entsprechender Messstationen. Gerade in abwechslungsreichem Terrain sind die Daten mitunter jedoch schwierig zu interpretieren.

Uns ging es daher zunächst darum, die physikalischen Grundlagen der Messmethode besser zu verstehen. Dafür entwickelten wir zusammen mit Markus Köhli von der Universität Heidelberg ein Computermodell, das die Physik der Bewegung und Stöße von Neutronen simuliert. Anders als bei bisherigen Studien haben wir dafür die genaue Zusammensetzung der kosmischen Strahlung berücksichtigt. Dabei zeigte sich, dass der Einflussbereich der Neutronen rund um die Messstationen herum nur etwa halb so groß ist, wie ursprünglich gedacht. Dieser reicht nicht bis 300 sondern nur bis etwa 150 Meter vom Detektor entfernt und hängt von vielen Umweltfaktoren ab. Das klingt erst einmal unspektakulär, ist für die Qualität der Messung und damit für die Praxistauglichkeit der Methode jedoch entscheidend.

stoß mit Stickstoff- und Sauerstoffatomen entstehen daraus Neutronen. Diese Teilchen haben keine elektrische Ladung und sind – das wird noch von Bedeutung sein – fast genauso „schwer“ wie Protonen.

Weil Neutronen elektrisch neutral sind, werden sie von den voluminösen und geladenen Elektronenhüllen nicht abgelenkt und fliegen daher fast ungehindert durch alle Atome hindurch. Deshalb können sie auch tief in den Boden eindringen. Gebremst werden Neutronen nur, wenn sie zufällig auf den im Vergleich zur Elektronenhülle viel kleineren Atomkern treffen.

Dass das Neutron fast genauso schwer ist wie ein Proton, macht es nun zum Helden für die Umweltforschung. Beim Zusammenstoß des Neutrons mit dem Proton, in diesem Fall dem Atomkern des Wasserstoffs, kann es seine Energie nämlich fast komplett auf das Proton übertragen – und kommt danach selber nur noch ein paar Zentimeter weit. Das Ganze ähnelt dem Geschehen auf einem Billardtisch: Trifft eine Kugel auf eine gleich schwere ruhende Kugel, überträgt die gestoßene ihre Energie weitgehend auf die getroffene. Die gestoßene wird langsamer, die getroffene rollt davon. Trifft das Neutron hingegen auf größere, deutlich schwerere Teilchen (also die Kerne aller anderen Atome), wird es reflektiert und verliert dabei kaum an Geschwindigkeit.

Neutronen, die auf den Erdboden treffen, stoßen fast nur auf schwere Atome und werden deshalb in die Luft zurück reflektiert. Zählt man diese reflektierten Neutronen, kann man daraus den Wassergehalt im

Die Signale aus der unmittelbaren Nähe zur Station beeinflussen darüber hinaus die Messung stärker als die aus größerer Entfernung. Erfolgt eine Messung beispielsweise von einem Auto aus, verfälschen die Straßen und Wege das Ergebnis, weil sie in der Regel trockener sind als die angrenzenden Äcker. Mit Hilfe von Methoden aus der Teilchenphysik ist es uns gelungen, dieses Phänomen bei der Auswertung zu berücksichtigen und die Karten der Bodenfeuchte entsprechend zu korrigieren. Landwirte in Nebraska (USA) nutzen solche Karten bereits für die gezielte Bewässerung ihrer Äcker.

Großflächige Bodenfeuchtekarten eignen sich übrigens auch für die Vorhersage von Überschwemmungen. Denn der Wassergehalt im Boden lässt Rückschlüsse auf sein Aufnahmevermögen zu. Wenn Meteorologen starke Niederschläge vorhersagen, könnten wir im Einzugsgebiet von Flüssen die Neutronenintensität messen. Ist der Boden bereits sehr feucht, fließt ein großer Teil des Regens oberflächlich ab und lässt die Flüsse über ihre Ufer treten.

Um noch größere Flächen schnell zu erkunden und zugleich die oben genannten Störungen im Nahbereich zu vermeiden, haben wir unseren Sensoren Flügel verliehen. In Kooperation mit Lutz Bannehr von der Hochschule Anhalt montierten wir unseren Detektor in einen Gyrokopter, mit dem wir aus der Luft viele hundert Hektar Land vermessen können. Wir hoffen, dass wir die mit Hilfe der Neutronen gemessene Bodenfeuchte auch für die Modellierung großräumiger Wasserkreisläufe und überregionaler Wettervorhersagen nutzbar machen können. Dabei geht es um Flächen, die so groß sind wie Länder oder Kontinente. Dazu müssen wir Modellergebnisse in ausgewählten Regionen mit konkreten Messungen abgleichen. Für uns ist die Strahlung explodierender Sterne wirklich von großem Nutzen.

# Einst ein blauer Planet

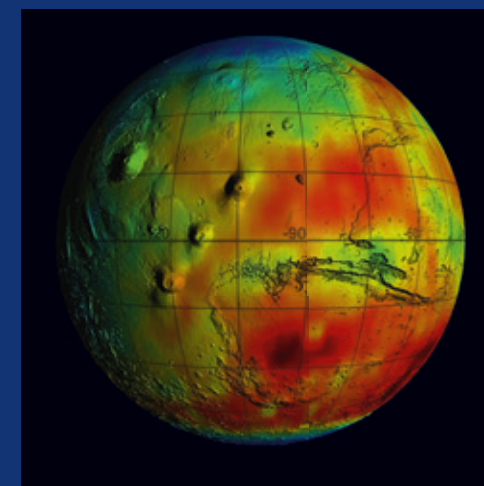
## Auf dem Mars gibt es Wasser – entdeckt wurde es mit Hilfe kosmogener Neutronen

Selten schaffen es Nachrichten auf die Titelseiten, die so viel Begeisterung auslösen wie die vom Wasser auf dem Mars. Damals, im Frühjahr 2002, war das eine weltweite Sensation.

Die Raumsonde Mars Odyssey hatte zuvor Daten zur Erde gefunkt, die bewiesen: Die oberflächennahen Bodenschichten unseres Nachbarplaneten enthalten – vor allem in den Polarregionen – bis zu 50 Prozent Wasser.

Die Daten stammen von der Neutronensonde an Bord des Satelliten. Dass diese Messungen aus einer Höhe von über 400 Kilometern überhaupt gelingen konnten, liegt an der dünnen Atmosphäre des Mars. Denn anders als auf der Erde ist sie hier für den größten Teil der kosmischen Strahlung kein Hindernis: Sie kann bis auf die Marsoberfläche vordringen, wo sie im Boden auf Atome trifft und Neutronen freisetzt.

Je nach Wassergehalt können mehr oder weniger Neutronen entkommen und fliegen nun –



Die Daten der Neutronensonden an Bord der Mars Odyssey offenbaren, dass der Wassergehalt in den obersten Schichten des Marsbodens bis zu 50 Volumenprozent beträgt (blau)

wiederum wegen der dünnen und kaum abbremsenden Atmosphäre – weitgehend ungehindert ins All zurück, wo sie auf die Detektoren der Raumsonde treffen.

Dass es auf dem Mars in der Vergangenheit Flüsse, Seen und Meere gab, daran hatte auch vor der Mars-Odyssey-Mission kaum jemand gezweifelt. Seit 2002 ist gewiss, wo zumindest ein Teil davon geblieben ist – nämlich in einer Tiefe von rund 30 bis 60 Zentimetern. Dort zeugt es von einer Zeit, als auch der rote ein blauer Planet war. --- JS

NASA / Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio

# Plastik vom Acker

Es gibt längst Kunststoffe, die nicht aus Rohöl hergestellt werden, sondern aus erneuerbaren Rohstoffen. Sie sind ökologisch oft sinnvoller und verfügen sogar über bessere Eigenschaften. Nur mit der industriellen Herstellung hapert es



von JAN-GEORG ROSENBOOM



Peter Badger, Jan-Georg Rosenboom

Stroh statt Öl: Die Folie aus Biokunststoff wurde aus hundertprozentig erneuerbaren Rohstoffen hergestellt

„Die Steinzeit ging nicht deshalb zu Ende, weil die Steine ausgingen. Und das Erdölzeitalter wird nicht zu Ende gehen, weil das Erdöl aufgebraucht ist.“ Diese optimistischen Worte stammen ausgerechnet von Scheich Ahmed Zaki Yamani, dem früheren Erdölminister Saudi Arabiens. Er ist überzeugt, dass wir lange vor dem Verbrauch der Reserven neue, bessere und vor allem auch wirtschaftlich profitable Technologien entwickeln.

Doch noch läuft die globale Wirtschaft mit Öl und dem, was sich daraus machen lässt. Von dem Alltagskunststoff PET (Polyethylenterephthalat), aus dem vor allem Textilfasern und Getränkeflaschen sind, werden jedes Jahr 60 Millionen Tonnen hergestellt – Tendenz steigend. Aus einem Liter Öl lassen sich etwa fünf Plastikflaschen produzieren.

Kunststoffe sind in unserem Alltag allgegenwärtig und es ist kaum vorstellbar, dass wir darauf in großem Maß verzichten. Sehr gut vorstellbar ist aber, dass in den Kunststoffen der Zukunft kein Rohöl mehr steckt. Besonders vielversprechend ist dabei ein Bioplastik aus hundertprozentig erneuerbaren Grundstoffen. Polyethylenfuranoat – oder kurz: PEF – lässt sich beispielsweise aus zuckerhaltigen Abfällen aus der Forst- und Landwirtschaft herstellen. Es könnte eben jenes PET ersetzen.

Was die Materialeigenschaften betrifft, wäre PEF gegenüber PET übrigens mitnichten ein Kompromiss. Im Gegenteil: Der PET-Ersatz hat nicht nur die günstigere Kohlenstoffbilanz, er ist auch stabiler. PEF-Flaschen sind also dünnwandiger und leichter. Zugleich sind sie bis zu zehnfach dichter und

Im Labor lassen sich bereits Kunststoffe aus erneuerbaren Quellen herstellen, die über bessere Eigenschaften verfügen als herkömmliche Materialien. Die Herausforderung liegt in der Produktion von Bioplastik in industriellem Maßstab



Peter Fleckenstein

können so die Kohlensäure der Cola länger halten und Säfte vor Oxidation schützen. Wegen seiner besseren Eigenschaften könnte PEF zukünftig auch höherwertige Materialien ersetzen – beispielsweise in Mehrschicht-Getränkeverpackungen, welche üblicherweise schwieriger zu recyceln sind.

Kann man die „grüne Flasche“ also bald im Supermarkt kaufen? Die Antwort hängt von Polymer-Ingenieuren, aber auch vom Kunden ab. Nachhaltig wollen viele, aber draufzahlen die wenigsten. Um PEF gegenüber PET wirtschaftlich konkurrenzfähig zu machen, spielen die Kosten bei der Herstellung des Kunststoffs eine wesentliche Rolle. Wir haben uns zwei Prozesse genauer angeschaut.

Der eine gleicht dem der PET-Herstellung. Dabei reagieren zwei „Monomere“: eine Säure und ein Alkohol. Im Fall von PEF können diese Grundstoffe vollständig aus Biomasse hergestellt werden. Was passiert dabei genau? Alle Säure- und Alkohol-Moleküle reagieren im Laufe der Zeit miteinander. Es entsteht eine kettenförmige Struktur, das Polymer. Bei jeder Reaktion von Säure und Alkohol wird ein Wasser-Molekül frei, das bei hohen Temperaturen aus dem Reaktor entfernt werden muss.

Je länger dieser Prozess läuft, umso länger werden auch diese Molekülketten. Und desto besser sind am Ende die Eigenschaften des Kunststoffs. Allerdings lässt sich das dabei freigesetzte Wasser immer schwieriger abtrennen. Denn die Ketten bilden ein immer dichteres Netzwerk, sodass die Masse honigzäh und schließlich fest wird.

Diese Art der PEF-Herstellung ist aufgrund relativ langer Reaktionszeit bei hohen Temperaturen sehr energieintensiv. Außerdem lassen sich dabei unerwünschte Nebenreaktionen und Verfärbungen des Produktes nur schwerlich vermeiden.

Wir haben daher einen neuartigen Prozess entwickelt, mit dem sich PEF in industriellem Maßstab produzieren ließe. Der basiert auf der so genannten Ring-Öffnungs-Polymerisation und enthält einen weiteren Schritt. Der Trick: Wir lassen die Monomere nicht direkt zu PEF reagieren, sondern bauen zunächst aus den Monomeren ringförmige Moleküle.

Weil dies in einem Lösungsmittel geschieht, lässt sich das dabei entstehende Wasser viel leichter abdestillieren. Innerhalb von nur vier Stunden konnten wir mehr als 95 Prozent der Monomere zu Ringen umsetzen – das ist ein wichtiger Durchbruch in Richtung industrieller Umsetzung.

Im zweiten Schritt, der eigentlichen Polymerisierung der Ringe zu PEF, entsteht nun kein Wasser mehr. Tatsächlich sind wir sogar in der Lage, durch gezielte Zugabe von geringen Wasser- oder Alkoholgengen die Länge der Molekülketten genau zu definieren. Die Eigenschaften des fertigen Produkts lassen sich somit präzise steuern: Soll der Kunststoff später zu Textilien verarbeitet werden, sollten die Ketten nur rund 100 Monomere lang sein, während Getränkeflaschen aus etwa doppelt so langen Ketten bestehen.

Und: Weil bei der eigentlichen Polymerisation nun kein Wasser mehr entsteht, ist der Herstellungsprozess viel schneller. Nach unzähligen Versuchen und Rückschlägen verstanden wir endlich, wie sich die recht widerspenstigen Ringe verhalten – und können nun in weniger als einer halben Stunde hochwertiges, langkettiges PEF herstellen. Im Rahmen des

herkömmlichen Verfahrens hätten wir dafür mehrere Tage benötigt. Mit der schnellen Synthese können wir im Übrigen auch jene Verfärbungen vermeiden.

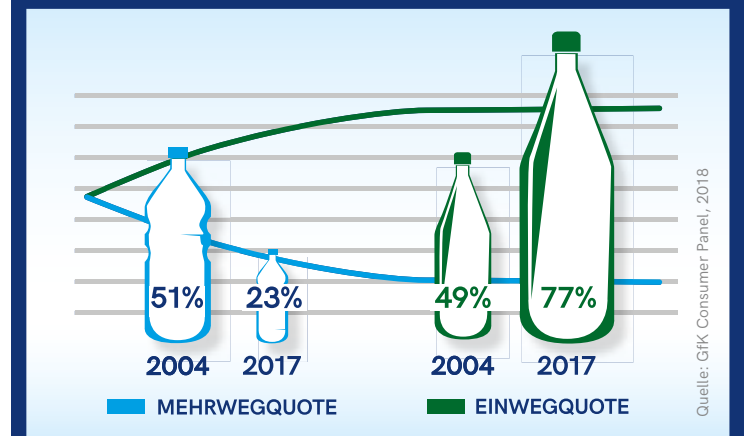
Nun garantiert der Erfolg im Labor allerdings noch lange nicht den Erfolg in der Fabrik. Was im Glaskolben bestens funktioniert, kann in den Anlagen einer Fabrik große Probleme bereiten. Simple Vorgänge wie Rühren, Heizen und Filtern werden in tonnenschweren Reaktoren zu technischen Herausforderungen. Im nächsten Schritt galt es deshalb, das Verfahren in der echten Welt zu testen. Nachdem wir den Laborprozess an die Gegebenheiten einer großtechnischen Anlage angepasst hatten, erreichten wir in den Stahlreaktoren eines Industriepartners tatsächlich die gleichen hohen Umsätze wie im Labor.

Die Untersuchungen der ersten Produkte bestätigten unsere Erwartungen: Unser PEF aus erneuerbaren Quellen ist aufgrund seiner Molekülstruktur viel stabiler und dichter als PET. Jetzt wird es darum gehen, den Prozess für eine reguläre Flaschenproduktion zu optimieren.

Auch wenn PEF gänzlich aus erneuerbaren Rohstoffen besteht, also nachhaltiger produziert werden kann: Am Müllproblem wird der Biokunststoff zunächst nicht viel ändern. Denn PEF ist, so wie PET, aufgrund seiner robusten Materialeigenschaften nicht biologisch abbaubar. Damit weniger Plastikabfälle in der Umwelt landen, sollte zum einen schlichtweg weniger verbraucht werden. Und das ist vor allem eine Frage des geschärften gesellschaftlichen Bewusstseins. Gefordert ist eine neue Form der Umweltbildung, die ihren Anfang in den Kindergärten hat. Zum anderen sind Fortschritte bei den Herstellungs- und Recyclingtechnologien nötig – vor allem in den ärmeren Regionen der Erde.

# Glas oder Plastik? Falsche Frage

Warum wir jeder Flasche ein möglichst langes Leben wünschen müssen



Die gute Nachricht: Der Anteil der Mehrwegflaschen scheint auf dem Getränkemarkt seit einigen Jahren nicht weiter zu sinken. Die schlechte: Heute wird nur noch jeder fünfte Softdrink in Mehrwegflaschen abgefüllt. Knapp 80 Prozent gehen hingegen in Einwegflaschen über den Ladentisch. Und die sind ökologische Sündenfälle. Ob aus Glas oder Plastik macht dabei in der Gesamtbilanz kaum einen Unterschied.

Denn im Hinblick auf Umweltschutz und Ressourcenschonung ist die Lebensdauer entscheidend: Glasflaschen lassen sich etwa fünfzig Mal wiederbefüllen – doppelt so oft wie im Fall der PET-Mehrwegflasche. Allerdings sind diese leichter. Bei lokalem Recycling liegt Glas vorn, bei weiteren Transportwegen weist die leichte PET-Flasche die bessere Bilanz auf.

Berücksichtigt man bei diesem Vergleich allerdings auch Flaschen aus dem neuartigen Biokunststoff PEF, schneidet die Konkurrenz aus Glas und PET hingegen deutlich schlechter ab.

So berechneten Forscher um Martin Patel von der Utrecht University, dass der Lebenszyklus einer PEF-Flasche von der Herstellung bis zur Verbrennung den Ausstoß von Treibhausgasen um die Hälfte niedriger reduziert, verglichen mit einer PET-Flasche. Weitere Vorteile: PEF ist gasdichter und leichter als PET.

Doch diese Vorteile kann PEF bisher nicht ausspielen. Der Marktanteil aller Biokunststoffe liegt in der Europäischen Union derzeit bei unter zwei Prozent. Sobald sich diese großindustriell herstellen lassen, könnte sich das jedoch rasch ändern. ---JS



Peter Badge; Getty Images/Aclic Bush

„Regina sitzt rechts von Ihnen, Leo und Hannah haben links von Ihnen Platz genommen“: In der Mathematik heißen solche relativen Ortsangaben Chirotope

von KATHARINA SCHAAR



# Die reine Mathematik

Wenn unsere Autorin gefragt wird, was sie in ihrer Doktorarbeit gemacht hat, greift sie gern zu Analogien. Denn sie beschäftigt sich mit der mathematischen Beschreibung von „Chirotopen“ und „Phirotopen“ – das sind Abstraktionen relativer Ortsangaben

**S**tellen Sie sich vor, wir treffen uns zusammen mit Freunden auf eine Tasse Cappuccino. Ihre Freundin Regina sitzt rechts von Ihnen, meine Freunde Leo und Hannah haben links von Ihnen Platz genommen. Jetzt haben Sie fast, aber nicht alle Informationen, um die Sitzordnung genau zu bestimmen. Ich müsste Ihnen noch verraten, ob sich Hannah von sich selbst aus gesehen links oder rechts von Leo befindet.

Die Abstraktion solcher Ortsangaben – in diesem Fall der Sitzordnung – nennt man in der Mathematik ein „Chirotop“. Ein Chirotop enthält relative Lageinformationen von Punkten – aber eben keine absoluten Positionen. Wenn etwa Regina mit ihrem Stuhl nach hinten rückt, ändert sich am Chirotop gar nichts.

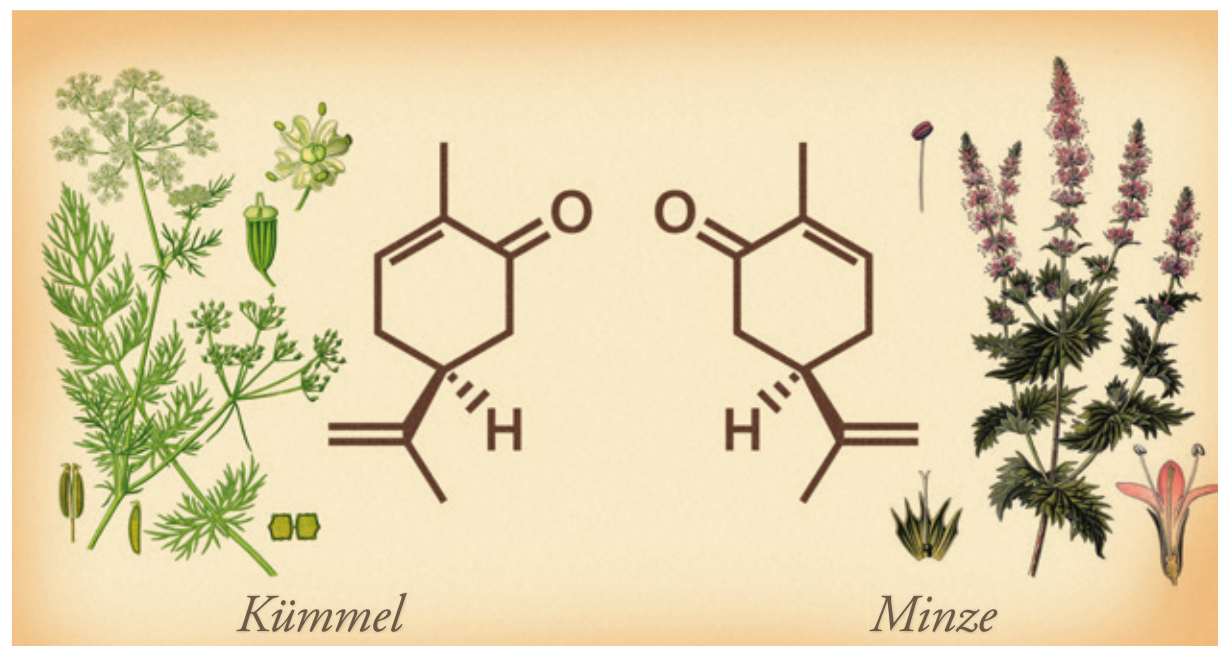
Ein Chirotop leitet sich nicht immer aus vorher bekannten Punktkonfigurationen ab. Manchmal hat man nur die abstrakten Links-/Rechtsbeziehungen gegeben und möchte dazu passende Positionen von Punkten rekonstruieren. Das wäre, als würde man vor dem Treffen jedem Gast einen Zettel geben, auf dem steht, wer links und wer rechts von ihr oder ihm sitzt. Bei Chirotopen mit vielen Punkten kann es passieren, dass die Ortsangaben widersprüchlich sind und es nicht möglich ist, Punkte zu finden, die

den Vorgaben des Chirotops entsprechen. Das würde sich dann darin äußern, dass die Sitzordnung im Café nicht aufgeht. Egal wie sehr sich alle bemühen, den richtigen Platz zu finden, am Ende gibt es immer mindestens eine oder einen, die oder der sich nicht an die Vorgaben auf dem Zettel halten kann. Herauszufinden, ob ein vorgegebenes Chirotop Widersprüche enthält, ist eine recht schwierige Aufgabe.

Grundlage eines Chirotops sind reelle Zahlen – also 0, 1, 2 und so weiter, aber auch -1 oder die Kreiszahl Pi (3,14159 ...). In manchen Fällen reichen diese Zahlen aber nicht aus, weshalb wir damit begannen, die umfangreiche Theorie der Chirotope auf so genannte komplexe Zahlen zu übertragen. Eine komplexe Zahl erhält beispielsweise, wer die Gleichung  $x^2 = -1$  zu lösen versucht – die bis ins 16. Jahrhundert als unlösbar galt. Eine komplexe Zahl sieht zum Beispiel so aus:  $3 + 2i$ . Das kleine „i“ heißt imaginäre Einheit und ist genau die Lösung unserer obigen Gleichung, das heißt:  $i^2 = -1$ .

Auch die Zahl  $5 - 0i$  ist eine komplexe Zahl, aber da 0 mal i wieder 0 ergibt, ist auch 5 eine komplexe Zahl. Anders ausgedrückt: Alle reellen Zahlen sind auch komplexe Zahlen. Die reellen Zahlen sind somit eine Teilmenge der komplexen Zahlen.

Chirotope in der Praxis: Moleküle mit der gleichen chemischen Formel sind chiral, wenn sich das Bild der einen nicht durch Drehung mit dem anderen zur Deckung bringen lässt. Auch unsere Füße sind chiral – weshalb es rechte und linke Schuhe gibt. Chirale Moleküle können ganz unterschiedliche Wirkungen haben. So duftet die linksdrehende Form der Substanz Carvon nach Kümmel, die rechtsdrehende hingegen nach Minze



Komplexe Zahlen haben einige ungewöhnliche Eigenschaften. Zum Beispiel lassen sie sich nicht anordnen. Man kann also nicht sagen, welche von zwei komplexen Zahlen die größere ist. Möchte man Chirotope auf komplexe Zahlen übertragen, hat genau das weitreichende Konsequenzen. Mathematisch gesehen ist nämlich „links von Regina“ ein Größenvergleich und Größenvergleiche gibt es ja nun nicht mehr. Im Raum komplexer Zahlen müssen also andere Positionsangaben verwendet werden.

Die komplexen Chirotope, die so genannten „Phirotope“, enthalten also keine Information über links oder rechts, sondern die Angabe eines Winkels. Eine Ortsangabe in einem Phirotop kann so formuliert werden: „Von Ihnen aus gesehen beträgt der Winkel zwischen Hannah und Leo 60 Grad“. In einem Phirotop sind alle Winkelinformationen gespeichert, die eine konkrete Situation beschreiben – also auch: „Von Regina aus gesehen beträgt der Winkel zwischen Hannah und Leo 55 Grad“ und so weiter. Das hat zur Folge, dass sich ein Phirotop im Gegensatz zum Chirotop sehr wohl ändert, wenn Regina mit ihrem Stuhl ein Stück zurückrutscht. Und: Man kann leicht herausfinden, ob ein Phirotop realisierbar ist oder nicht.

Hierfür haben wir eine „Realisierbarkeits-Formel“ bewiesen, die genau das für jedes Phirotop schnell ausrechnet. Das heißt, für fast alle Phirotope. Denn weil jede reelle Zahl auch eine komplexe Zahl ist, gilt auch: Jedes Chirotop ist auch ein Phirotop. Es gibt also „normale“, nicht-chirotopale Phirotope und solche, die außerdem Chirotope sind, also chirotopale Phirotope.

Zur Veranschaulichung stellen Sie sich eine Gruppe Menschen vor, von denen ein paar Mathematiker und Mathematikerinnen sind. Auf den ersten Blick sieht man einem Menschen (Phirotop) nicht an, ob er oder sie ein Mathematiker oder eine Mathematikerin

(Chirotop) ist. Von mir wissen Sie es ja, von Hannah und den anderen am Tisch aber nicht.

Wie bei einem Maskenball können Chirotope ihre wahre chirotopale Identität verschleiern und so tun, als wären sie ein nicht-chirotopales Phirotop. Um dieses Geheimnis für jedes Phirotop aufzudecken, entwickelten wir eine weitere Formel. Wenn wir nun auf ein uns unbekanntes Phirotop stoßen, lüften wir zunächst seinen Schleier und untersuchen, ob es sich in Wahrheit um ein Chirotop handelt. Abhängig vom Ergebnis dieser Untersuchung können wir dann prüfen, ob es realisierbar ist. Falls ein Chirotop vorliegt, wird es schwierig, die Realisierbarkeit zu entscheiden. Ist es ein nicht-chirotopales Phirotop, wenden wir einfach die Realisierbarkeits-Formel an und alles ist klar.

Dabei machten wir eine spannende Beobachtung: Wir fanden nämlich kein einziges Phirotop, das in einem offensichtlichen Widerspruch zu einem mathematischen Schließungssatz steht und deshalb unrealisierbar ist. Das sind Sätze wie etwa der so genannte Satz von Pappos: „Angenommen es liegen die drei Punkte (1, 2, 3), (4, 5, 6), (1, 5, X), (1, 6, Y), (2, 4, X), (2, 6, Z), (3, 4, Y) und (3, 5, Z) jeweils auf einer Geraden. Dann liegen automatisch auch die Punkte (X, Y, Z) auf einer Geraden.“ Dass es kein Phirotop gibt, das im Widerspruch zu diesem Satz steht, ist sehr überraschend. Die nicht realisierbaren Chirotope, die dem Schließungssatz widersprechen, dienen seit jeher als Gegenbeispiele für Theorien und Vermutungen und sind eine Quelle der Inspiration, wenn man generelle

Eigenschaften von Chirotopen untersuchen möchte. Viele spannende Effekte sieht man am klarsten an diesen nicht realisierbaren Chirotopen. Wenn unsere Vermutung stimmt, dann gibt es keine nicht-chirotopalen Phirotope, die einem Schließungssatz widersprechen.

Von den unzähligen Phirotopen sind also die meisten leicht zu bearbeiten. Nur die Chirotope zeigen sich widerspenstig. Warum das so ist und wie die beiden Welten genau zusammenhängen, bleibt vorerst noch ein Geheimnis der mathematischen Grundlagenforschung.

Und wofür ist das alles gut? Darauf könnte man mit der Geschichte des Zahlentheoretikers Godfrey Harold Hardy (1877 - 1947) antworten, der immer sehr darauf bedacht war, seine Forschung ohne jeglichen Anwendungsbezug zu betreiben. Er wollte die „reine Mathematik“ betreiben, die möglichst niemals Verwendung finden würde.

Doch heute, gut siebzig Jahre nach seinem Tod, gehören auch seine Methoden zu den Werkzeugen der Populationsgenetiker und Kryptologen, die neue Verschlüsselungsverfahren für den sicheren Datentransfer entwickeln. Astrophysiker verwenden Phirotope bei ihren Gedankenexperimenten zur Schleifenquantengravitation – einem Gegenentwurf zur Stringtheorie. Wem das zu esoterisch scheint, es geht auch alltagsnäher: Chirotope beschreiben auch, ob die Milchsäuremoleküle in Ihrem Cappuccino links- oder rechtsdrehend sind.

# Absolut klar und völlig unverständlich

## Das Dilemma der Mathematik

„Es sei  $K$  ein algebraisch abgeschlossener Körper.“ So oder so ähnlich lautet ein typischer erster Satz einer mathematischen Publikation. Wer weiß, was ein „Körper“ ist und wann dieser als „algebraisch abgeschlossen“ gilt, kann weiterlesen. Jemand, der das nicht weiß, kann die Definition nachschlagen, in der ein Begriff auf noch elementarere Begriffe zurückgeführt wird. Missverständnisse sind ausgeschlossen.



Albrecht Beutelspacher war bis 2018 Professor für Mathematik an der Universität Gießen. Er ist Gründer und Direktor des Mathematikums in Gießen und Träger des Communicator-Preises der Deutschen Forschungsgemeinschaft

Andererseits scheint Verständnis kaum möglich zu sein. Wer den ersten Satz nicht versteht, braucht gar nicht weiterzulesen, denn in den nächsten Sätzen wird vorausgesetzt, dass man mit den eben genannten Begriffen vertraut ist.

Verrückt! Die mathematische Sprache, die ein Musterbeispiel an Klarheit ist, in der Fehldeutungen unmöglich sind, in der man genau weiß, wovon man spricht – gerade diese Sprache verhindert den meisten Menschen einen Zugang.

### Warum ist das so?

**Erstens:** Es bleibt nicht beim ersten Satz. Im zweiten Satz wird das Gebiet weiter spezifiziert, und so weiter. Am Ende des ersten Abschnitts bleiben nur noch die Leser übrig, die in dem Spezialgebiet zu Hause sind.

**Zweitens:** Die Methode, auf die wir Mathematiker so stolz sind – dass

sich nämlich alles aus einfachsten Anfängen (den „Axiomen“) auf systematische Weise durch logisches Argumentieren ergibt – diese Methode entspricht nur sehr entfernt den tatsächlichen Denkprozessen. Wir denken assoziativ und sprunghaft – und wollen möglichst schnell zum Wesentlichen kommen.

**Drittens:** Keine Bilder oder falsche Bilder: Wenn in einer mathematischen Arbeit von einem „Ring“ oder „dem Geschlecht“ von Kurven zu lesen ist, dann entspricht das definitiv nicht dem, was sich der Laie darunter vorstellt.

Was tun? Kurz gesagt: Man muss versuchen, das Abstrakte wieder konkret werden zu lassen. Das könnte geschehen durch Erzählen, durch (reale und mentale) Bilder oder durch konkrete Anwendungen und Experimente. --- Albrecht Beutelspacher

# Fünf Fragen an Anja Karliczek



**Jeder zehnte Deutsche stellt die Evolutionstheorie infrage, acht Prozent bezweifeln, dass vor allem der Mensch für den Klimawandel verantwortlich ist\*. Wie kann das sein?**

Wir leben in einer komplexen Welt. Da fällt es manchen Menschen leichter, den einfachen Antworten zu glauben, als sie mit Aufwand zu widerlegen. Fake News und Verschwörungstheorien sind Frontalangriffe auf die Wissenschaft. Unser Vertrauen in die Wissenschaft können wir nur dann bewahren, wenn wir engagiert und auf der Grundlage von Fakten für diesen Fortschrittsmotor unserer Gesellschaft werben. Mir liegt das sehr am Herzen, weil wir nur so unseren nachfolgenden Generationen die Chance auf ein gutes Leben bieten können.

**Es gibt Entwicklungen – etwa im Bereich der Gentechnik –, die zentrale ethische und rechtliche Fragen berühren. Wie wollen Sie sicherstellen, dass in solchen Fällen ein gesellschaftlicher Diskurs stattfinden kann?**

Unsere offene Gesellschaft lebt davon, dass wir hart in der Sache, aber anständig im Ton um den richtigen Kurs ringen. Das gilt für alle Fragen unseres gesellschaftlichen Zusammenlebens. Gerade Wissenschaft und Politik müssen über weitreichende technologische Entwicklungen mit Bürgern auf Augenhöhe und der Basis von

\* Wissenschaft im Dialog / Kantar Emnid (2017): Wissenschaftsbarometer 2017, [www.wissenschaftsbarometer.de](http://www.wissenschaftsbarometer.de)

Anja Karliczek ist Bundesministerin für Bildung und Forschung. Seit 2013 ist sie Mitglied des Deutschen Bundestages. Von 2017 bis März 2018 war sie Parlamentarische Geschäftsführerin der CDU/CSU-Bundestagsfraktion

Fakten ins Gespräch kommen. Wir fördern diesen gesellschaftlichen Dialogprozess auf allen Ebenen und in der gesamten thematischen Breite meines Ministeriums.

**Wissenschaft ist komplex, höchst spezialisiert und oft kaum vermittelbar. Nicht alle Forscher können ihre Arbeit öffentlichkeitswirksam präsentieren. Was tun?**

Kommunikation sollte eine größere Rolle in der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses und in der Weiterbildung spielen. Wissenschaftler brauchen für den Austausch mit der Öffentlichkeit bessere Rahmenbedingungen: also mehr Zeit, Ressourcen und Anerkennung. Wissenschaftskommunikation könnte künftig noch stärker als bisher als Kernbestandteil von Forschungsprojekten finanziert und bei der Auswahl für eine Förderung berücksichtigt werden.

**Sie wollen in den kommenden Jahren deutlich mehr in Forschung und Entwicklung investieren. Was planen Sie konkret für die Verbesserung der Wissenschaftskommunikation?**

Neben verbesserten Rahmenbedingungen setze ich mich für eine Stärkung der Partizipationsmöglichkeiten von Bürgern ein. Das betrifft den Austausch zu forschungspolitischen Fragen ebenso wie die Bürgerbeteiligung an Forschungsprozessen. Hier sehe ich Potenzial im Bereich Citizen Science.

**Als Betriebswirtschaftlerin beschäftigten Sie sich einst mit der „steuerlichen Vorteilhaftigkeitsanalyse zur Auslagerung von Pensionsverpflichtungen aus Arbeitgebersicht“. Erklären Sie uns Laien kurz, warum es da ging?**

Ein wirklich spannendes Feld! Angenommen Sie wollen ein Unternehmen umstrukturieren. Dann könnte es sinnvoll sein, Pensionsverpflichtungen aus der Bilanz auszulagern. Für die Auslagerung gibt es verschiedene Modelle. Dabei werden Sie vermutlich für Ihre unternehmerische Entscheidung steuerrechtliche Auswirkungen abwägen. Dies kann das Unternehmenssteuerrecht oder das Bilanzsteuerrecht betreffen. Manche Modelle haben steuerliche Nachteile für den Arbeitnehmer, manche für den Arbeitgeber. Andere haben keine steuerlichen Nachteile, sind aber ziemlich kompliziert in der Umsetzung. In meiner Arbeit habe ich genau diese Wechselwirkungen untersucht.



**STIFTERVERBAND**  
Bildung. Wissenschaft. Innovation.

**Klaus Tschira Stiftung  
gemeinnützige GmbH**



## EINE UNI EIN BUCH

Der Stifterverband und die Klaus Tschira Stiftung schreiben in Kooperation mit dem ZEIT Verlag zum dritten Mal die Initiative „Eine Uni – ein Buch“ aus

Alle Hochschulen in Deutschland sind eingeladen, ein Buch zu bestimmen, das ein Semester lang hochschulübergreifend im Fokus von Gesprächen, Debatten und sonstigen Hochschulaktivitäten steht. Jedes Mitglied und jeder Angehörige einer staatlichen oder staatlich anerkannten Hochschule kann Initiator des Buch-Projektes sein: Professoren oder studentische Gruppen, Verwaltungsmitarbeiter oder Fakultätsleiter.

### **DIE ZEHN BESTEN AKTIONEN WERDEN MIT JE 10.000 EURO GEFÖRDERT.**

Die Projektförderung sollte mit dem Sommersemester 2019 beginnen und möglichst im Jahr 2019 umgesetzt werden; der Förderzeitraum bestimmt sich individuell nach dem Arbeitsplan des Projektes.

### **BEWERBUNGSSCHLUSS: 11. JANUAR 2019**

Detaillierte Informationen zur Initiative „Eine Uni – ein Buch“ und zur Antragstellung finden Sie unter:  
[www.stifterverband.de/eine-uni-ein-buch](http://www.stifterverband.de/eine-uni-ein-buch)

in Kooperation mit dem ZEIT Verlag

**DIE ZEIT**



»Was hast  
Du da  
eigentlich  
gemacht  
in Deiner  
Doktorarbeit?«

**Erkläre es uns,  
und gewinne den  
KlarText-Preis  
der Klaus Tschira  
Stiftung!**

Jedes Jahr sucht die Klaus Tschira Stiftung Naturwissenschaftler, Mathematiker und Informatiker, die eine sehr gute Doktorarbeit geschrieben haben und ihre Ergebnisse in einem allgemein verständlichen Artikel veranschaulichen.

Hier erfährst Du, wie Du mitmachen kannst: [www.klartext-preis.de](http://www.klartext-preis.de)

Übrigens: Christian Schiffer (31), Biochemiker und KlarText-Preisträger 2017, fand heraus, wie leicht sich menschliche Spermien täuschen lassen.