

KlarText

Preis für Wissenschaftskommunikation

Die
Beiträge der
Preisträger
2017

Anna Stöckl

**Wie sich Falter nachts
zurechtfinden**

Dominik Niopek

**Zellen steuern –
mit Licht**

Christian Mathis

**Künstliche Knorpel
als Schmiermittel**

Alexander Freytag

**Maschinen lernen
lebenslanges Lernen**

Marcel Mohr

**Formeln im Dienst
der Krebstherapie**

Christian Schiffer

**Warum die
Spermienqualität
abnimmt**

Juliane Dannberg

**Können Vulkane
Massensterben auslösen?**

Ein Magazin der

Klaus Tschira Stiftung
gemeinnützige GmbH

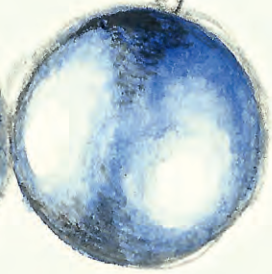


KTS



BILDUNG

FORSCHUNG



WISSENSCHAFTS-
KOMMUNIKATION

**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

**Die Geschäftsführung
der Klaus Tschira Stiftung:
Udo Tschira, Harald
Tschira und Beate Spiegel**



Liebe Leserinnen und Leser,

Wissenschaftskommunikation ist essenziell. Sie ist unentbehrlich für den Austausch von Forschern benachbarter Disziplinen. Sie ist aber auch von unschätzbarem Wert für uns alle. Denn wissenschaftliche Erkenntnisse, die in die Gesellschaft getragen und diskutiert werden, helfen bei den Entscheidungen, die uns voranbringen.

Die Klaus Tschira Stiftung setzt sich deshalb dafür ein, die Wissenschaftskommunikation zu stärken. Als eine der Vorreiterinnen in Deutschland fördert sie das Engagement von Forschern, ihre Arbeit verständlich, nachvollziehbar und spannend darzustellen.

Mit dem „Klaus Tschira Preis für verständliche Wissenschaft – KlarText!“, dem ersten eigenen Projekt der Stiftung, hat sie bereits in den 1990er Jahren Nachwuchswissenschaftler ausgezeichnet – als der Terminus „Wissenschaftskommunikation“ längst noch kein etablierter Begriff war.

Junge Forscherinnen und Forscher, die den Inhalt ihrer Doktorarbeit in einem allgemein verständlichen Artikel veranschaulichen, sind Wissenschaftskommunikatoren par excellen-

ce. Dies spiegelt sich auch im neuen, überarbeiteten Titel unseres Preises wider, der nun den Namen „KlarText – Preis für Wissenschaftskommunikation“ trägt.

Die Preisträger 2017 haben sich in ihren Doktorarbeiten mit elementaren Themen befasst – zum Beispiel mit Gesteinsbewegungen im Inneren der Erde, mit der Lernfähigkeit von Maschinen und dem schädlichen Einfluss von Umweltchemikalien auf Spermien. Mehr noch: In ihren Artikeln veranschaulichen sie das, was sie erforscht haben, wecken Neugier und Interesse.

Wir laden Sie, liebe Leserinnen und Leser, ein, sich auf den folgenden Seiten Ihr eigenes Bild zu machen.

Udo Tschira

Harald Tschira

Beate Spiegel

Fotos: Andreas Henn (Titelbild), Klaus Tschira Stiftung

Inhalt

- | | | |
|---|---|--|
| 4 Probier's mal mit Verständlichkeit
Wissenschaftler müssen mehr über ihre Arbeit reden | 18 Der Knorpel im Hydraulikzylinder
Das Knie als Vorbild für eine fast reibungslose Schmierung | 32 „Damit der Funke überspringt“
Ein Gespräch mit zwei Trägern des KlarText-Preises |
| 9 Der Weg aufs Podest
Der KlarText-Preis geht an junge Forscher, die gut kommunizieren | 22 „Erzählen, nicht quälen!“
Interview mit Wulf Schmiese, dem Redaktionsleiter des heute-journals | 34 Auf der falschen Fährte
Umwelthormone beeinflussen die Beweglichkeit von Spermien |
| 10 Mit guter Sicht durch die Nacht
Warum ein Nachtfalter besser sieht, als es seine Augen zulassen | 24 Wie Maschinen das Lernen lernen
Roboter könnten klug werden, wenn sie neugierig wären wie Kinder | 38 Auf und Ab im Erdmantel
Könnten globale Vulkanausbrüche Massensterben auslösen? |
| 14 Zellen steuern mit Licht – und Liebe
Mit Hilfe der Optogenetik lassen sich Proteine in der Zelle bewegen | 28 Berechenbarer Krebs
Mathematische Modelle helfen bei der Entwicklung besserer Therapien | 40 Der Stifter
Klaus Tschira (1940–2015) |

Das Stromnetz von Schanghai
erscheint für Außenstehende
ziemlich unverständlich.



Probier's mal mit Verständlichkeit

Das Vertrauen in Experten schwindet. Viele glauben, was in ihr Weltbild passt. Im Internet stehen „alternative Fakten“ neben fundierten wissenschaftlichen Erkenntnissen. Es ist höchste Zeit, die Wissenschaftskommunikation zu erneuern. Die Klaus Tschira Stiftung leistet dazu einen wichtigen Beitrag.

Von Hiltrud Bontrup

Wer weiß schon, dass Umweltchemikalien aus Sonnenmilch oder Kunststoffen männliche Spermien von ihrem Weg zur Eizelle abbringen? Dass menschliche Knorpel so genial funktionieren, dass Maschinenbauer sich das Prinzip abschauen? Oder dass das Hirn nachtaktiver Insekten Vorbild für die Steuerung autonomer Fahrzeuge sein könnte?

Das sind spannende Entdeckungen, die es gleichwohl auch spannend zu erzählen gilt. Aber eignen sich die wissenschaftlichen Arbeiten, die dahinter stecken, zum Partytalk? Es sind typische Beispiele von Grundlagenforschung, der Suche nach dem winzigen Steinchen im großen Mosaik. Doch eher über kurz als über lang hat auch dieses Steinchen viel mit unserem Leben zu tun. Grundlagenforschung ist nämlich mehr als die Frage nach reinem Erkenntnisgewinn. Sie ist, wie ihr Name schon sagt, die Grundlage für allen Fortschritt.

Wissenschaft schützt uns, macht uns schlauer, analysiert die Vergangenheit und führt uns in die Zukunft – klar ist das den meisten. Doch was in den Forschungsinstituten passiert, das wissen die wenigsten. Weil es nur in schwer verständlichen Fachmagazinen steht, denken die Laien. Weil die Laien es nun mal nicht verstehen, denken die Experten. Und so erfahren die Menschen nichts von den vielen kleinen und großen Durchbrüchen und dem täglichen Ringen um neue Erkenntnisse.

Die Klaus Tschira Stiftung tut was dagegen. Seit 1995 fördert sie Forschung und Wissenschaftskommunikation. Sie stärkt den Entdeckergeist schon bei Kindergartenkindern, und sie ermutigt den Hochschulnachwuchs, allgemeinverständlich von wissenschaftlichen Erfolgen und der Arbeit als Forscher zu berichten. 1997 verlieh sie erstmals den Klaus Tschira Preis für verständliche Wissenschaft an frisch Promovierte. Seit 2006 werden jährlich Bewerber ausgezeichnet, die ihre Forschungsarbeit in einem besonders gelungenen deutschsprachigen Text beschreiben: anschaulich, spannend, gut formuliert und gerne auch unterhaltsam.

Zwanzig Jahre später, also 2017, heißt der Preis „KlarText – Preis für Wissenschaftskommunikation“ und wird an sieben

junge Forscher vergeben, die 2016 in einer der Disziplinen Biologie, Chemie, Informatik, Mathematik, Neurowissenschaften oder Physik ihre Doktorarbeit abgeschlossen und ihre Ergebnisse in allgemein verständlicher Form niedergeschrieben haben. Dafür dürfen sie sich über ein Preisgeld von 5000 Euro freuen.

In dieser Runde reichten 185 Bewerber ihre Texte ein, 26 davon kamen von Jungforschern aus dem Ausland. Eine Jury aus Wissenschaftlern und Journalisten beurteilte wie immer sowohl die fachliche Leistung als auch die schreiberische Qualität – und merkte einmal mehr, wie viel Spaß die Lektüre machen kann. „Ich hatte die Endauswahl von 37 Texten für eine lange Zugreise eingepackt“, erzählt Jury-Mitglied Christina Elmer, Mitglied der Chefredaktion und Datenjournalistin bei Spiegel

Online. „Und habe die Texte hintereinanderweg gelesen. Ich mochte gar nicht aufhören, es war toll!“

Ist dieses allgemein verständliche Schreiben tatsächlich so etwas Außergewöhnliches? Leichte Wor-

**Unter seinesgleichen
plaudert man ganz
selbstverständlich über
Radionuklide, Impe-
danzen oder zweikernige
Kupferkomplexe.**

te sind doch am leichtesten zu wählen – könnte man meinen. Aber Fachsprache ist eben auch eine Fremdsprache: Je länger und tiefer jemand in sein Fachgebiet eintaucht, umso besser beherrscht er sie – irgendwann plaudert man unter seinesgleichen ganz selbstverständlich über Radionuklide, Impedanzen oder zweikernige Kupferkomplexe. „Jede Disziplin entwickelt ihr Fachchinesisch, selbst Unternehmen haben eigene Abkürzungen und Codes“, sagt Joachim Nagel, Generalbevollmächtigter der KfW-Bankengruppe, der 1998 den Klaus Tschira Preis für verständliche Wissenschaft gewonnen hat (siehe S. 32). Dass man eine eigene Sprache spricht, merkt man erst, wenn man das Umfeld wechselt. Wenn etwa die Oma eines Tages beim



Das Haus der Astronomie in Heidelberg sieht aus wie eine Spiralgalaxie. In dem Gebäude befindet sich das Zentrum für astronomische Bildungs- und Öffentlichkeitsarbeit, gegründet von der Max-Planck-Gesellschaft und der Klaus Tschira Stiftung.

Sonntagskaffee fragt: „Was machst du eigentlich in deiner Doktorarbeit?“ Dann sind leichte Worte schwer zu finden. Dann muss die Fachsprache buchstäblich übersetzt werden – wobei es allerdings immer mehr englische Begrifflichkeiten gibt, die sich mitunter gar nicht ins Deutsche übersetzen lassen. Dann gilt es: neue erfinden oder geschickt umschreiben.

Dabei sollte jeder Wissenschaftler eine allgemein verständliche Antwort auf die Frage haben: Wozu ist das gut, was du machst? Nicht nur, weil er mit seiner Arbeit einen Beitrag für die Gesellschaft leistet und zudem meist auch von ihr bezahlt wird. Sondern auch, weil Aufklärung gerade in diesen „postfaktischen“ Zeiten nützt, in denen Ungarns Ministerpräsident Viktor Orbán, aber auch der türkische Präsident Recep Tayyip Erdogan Schulen schließen und Universitäten bedrängen oder Donald Trump den Klimawandel für eine Erfindung der Chinesen hält und aus dem Pariser Klimaabkommen aussteigt.

Der internationale „March for Science“, der sich im April dieses Jahres in Bewegung setzte, war ein Aufstand tausender Wissenschaftler gegen diese Entwicklung. Seinen Ursprung hatte er in Washington D.C., wo die Forscherinnen und Forscher ge-

gen Trumps Kürzungen bei Umweltschutz und Wissenschaft protestierten. Doch die weltweite Wucht der Bewegung verweist auf ein größeres, generelles Problem: Durch die digitale Revolution stehen heute im

Erdogan und Orbán schließen Schulen, Trump glaubt, der Klimawandel sei eine chinesische Erfindung.

World Wide Web nicht-fundierte Aussagen gleichberechtigt neben Wissen, das auf dem Fundament wissenschaftlicher Arbeit ruht. Fake News finden sich in allen Natur-,

Gesellschafts- und Geisteswissenschaften und relativieren Forschungsergebnisse schon so weit, dass das Vertrauen in die Wissenschaft schwindet. Nach einer Umfrage des Instituts für Demoskopie Allensbach von 2017 geben 61 Prozent der Deutschen nicht viel auf das Urteil von Experten und stimmen der folgenden Aussage zu: „Diese sogenannten Experten sind meist nicht unabhängig. Deshalb

stehen heute im World Wide Web nicht-fundierte Aussagen gleichberechtigt neben Wissen, das auf dem Fundament wissenschaftlicher Arbeit ruht. Fake News finden sich in allen Natur-,

kann man sich auf ihr Urteil nicht verlassen“. Eine solche Sichtweise ist weit über die Wissenschaft hinaus gefährlich: Wer Fachleuten grundsätzlich misstraut, verliert auch das Vertrauen in die Demokratie.

Bemerkenswert ist, dass Wissenschaftler aus Eigeninitiative auf die Straße gingen – eine Graswurzelbewegung. Die Kommunikationsabteilungen der Hochschulen und Institute reagierten indes zögerlich. Es scheint, als müssten sie noch lernen, was viele junge

Storytelling ist das bewährte Mittel, um Fakten im Hirn des Publikums zu verankern und Vertrauen aufzubauen.

Forscher längst begriffen haben: Wissenschaftskommunikation darf nicht enden bei staatstragenden Verlautbarungen für Hochglanz- und Fachmagazine. Vielmehr ist sie Aufgabe jedes Einzelnen. Immer mehr Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler gehen raus und halten populärwissenschaftliche Vorträge, bloggen und twittern, erzählen persönliche Geschichten von Erfolgen, Misserfolgen und Erkenntnissen. So, wie schon unsere Vorfahren am Lagerfeuer Legenden mündlich weitertrugen, so, wie es Journalisten seit hunderten von Jahren machen: Storytelling ist das bewährte Mittel, um Fakten im Hirn des Publikums zu verankern und Vertrauen aufzubauen. Die Technik bleibt, nur die Kanäle müssen passen zur Kommunikation 4.0.

Das wachsende Sendungsbewusstsein junger Wissenschaftler sieht auch Jörg Sadrozinski. Er gehörte zur Jury des Klar-Text-Preises und betreute als Leiter der Deutschen Journalistenschule in München seine Studenten bei der ersten Sichtung der eingesandten Texte. Als gelungenes Beispiel für dieses Bewusstsein nennt der Juror Giulia Enders' Buch „Darm mit Charme“: „Da weist die Autorin auf einfache Art auf ein Problem hin und führt monatelang die Bestsellerlisten an.“ Natürlich haben es Grundlagenforscher in der Mathematik oder Physik da schwerer. Dass es trotzdem geht, zeigen die USA, wo Wissenschaftler schon während des Studiums lernen, wie sie sich am besten so ausdrücken, dass es auch Fachfremde verstehen. „Wissenschaftsvermittlung sollte auch in Deutschland Pflichtfach sein“, meint Sadrozinski.

Für alle, die es bis dahin freiwillig lernen wollen, hat die Klaus Tschira Stiftung 2012 gemeinsam mit dem Karlsruher Institut für Technologie das Nationale Institut für Wissenschaftskommunikation (NaWik) gegründet. Dort lernen Forscher, verständlich zu schreiben, Interviews zu geben, Social Media zu nutzen und mit Journalisten zusammenzuarbeiten. Auch Klar-Text-Bewerbern gibt die Stiftung Kriterien an die Hand: Überschrift und Vorspann sollen neugierig machen, die Gedankenführung lückenlos sein und einem roten Faden folgen, jeder Leser sollte am Ende das Gefühl haben, etwas gelernt zu haben und dies mit eigenen Worten wiedergeben können. Gehobene Umgangssprache, kurze Sätze, illustrative Vergleiche. Kurzum: eine gute Geschichte.

„Und betonen Sie, was Sie erreicht haben!“, rät Ursula Kummer künftigen Bewerbern. Die Biochemikerin ist Mitglied der



Wer immer eines der Seminare des Nationalen Instituts für Wissenschaftskommunikation (NaWik) in Karlsruhe belegte, kennt den „NaWik-Pfeil“ – und wird ihn auch nicht mehr vergessen. Mit seinen fünf Bausteinen fasst er das ganze ABC der Wissenschaftskommunikation zusammen.

Am Anfang steht das **Thema**, das ich kommunizieren will. Wichtigste Frage hier: Was ist wichtig, was kann ich weglassen? Weniger ist oft mehr! Dabei muss ich stets meine **Zielgruppe** im Blick haben. Und das **Medium**, über das ich sie erreiche: Einen Artikel in einem Magazin wie diesem muss ich anders planen als einen Vortrag in der Volkshochschule.

Je nachdem, mit wem ich es zu tun habe – Wissenschaftler oder Laien beispielsweise –, wähle ich auch den **Stil** meines Beitrags.

Mein **Ziel** erreiche ich schließlich, wenn ich meine Leser, Zuhörer oder Zuschauer einbeziehe, Diskussionen auslöse oder Emotionen wecke. Oder wenn ich es schaffe, dass mein Antrag für eine Forschungsförderung erfolgreich ist. Denn der NaWik-Pfeil gilt für jede Kommunikation, nicht nur für die populärwissenschaftliche Vermittlung.

Fachjury, als Professorin an der Universität Heidelberg simuliert sie am Computer biologische Prozesse, überprüft zum Beispiel Hypothesen zur Funktionsweise des menschlichen Stoffwechsels. Sie sei jedes Jahr erneut überrascht von der fachlichen Qualität der Arbeiten, von den originellen Ideen, auf die die jungen Forscher stolz sein dürften. Und sie wisse, wie schwer es

Mancher fürchtet, seine Arbeit zu sehr zu vereinfachen und sich vor den Kollegen zu blamieren.

manchen trotzdem falle, „ich“ zu schreiben in ihren Texten. Im Wissenschaftskontext sind Passivkonstruktionen oder das unpersönliche „man“ eher üblich: „Das ist verständlich, denn dort forschen und publizieren sie oft mit Kollegen“, sagt Kummer. „Doch bei der Darstellung ihrer ureigenen Dissertation dürfen sie auch von sich sprechen!“ Warum ein Forschungsprojekt wichtig und relevant ist, kann schließlich viel leichter erzählen,

wer auch seine Begeisterung teilt. Warum finde ich das Thema so toll? Wie kam ich auf die Idee? Gehört alles in den Text.

Das Umstellen vom Wissenschaftskontext auf ein breiteres Publikum fällt noch aus einem anderen Grund schwer: Mancher fürchtet, seine Arbeit zu sehr zu vereinfachen und sich vor den Kollegen zu blamieren. „Ihre Peer Group von der Uni müssen Sie ausblenden“, empfiehlt Jurorin Elmer. Statt zu fragen, was wohl die Kollegen denken, müsse die Frage lauten: „Wer sind meine Leser, was wissen sie?“ Da könne es durchaus helfen, in der eigenen Familie zu üben, meint Elmer. Wichtig sei, dass der Beitrag für die Zuhörer, Leser oder Zuschauer am Ende eine echte Bereicherung darstelle. Auch wenn viele Details fehlen. Das Weglassen ist die große Kunst. Wer forscht, hat so viele Fakten, Details, Bedingungen im Kopf – einfließen darf aber eben nur, was der interessierte Laie braucht, um das Ganze zu verstehen.

Unterkomplex hingegen muss es deshalb nicht sein. Nur wer beim Lesen gefordert wird, hat auch das Gefühl, etwas Neues zu lernen. Und wenn sich dann noch Humor und kleine Geschichten finden, bleibt das Gelernte sicher im Gedächtnis.



Im Rahmen des „March for Science“ demonstrierten am 22. April 2017 in rund 20 deutschen Städten etwa 37 000 Menschen für die Freiheit der Wissenschaft.

Fotos: Jörg Carstensen/dpa, Klaus Tschira Stiftung

Der Weg aufs Podest

Anfang Oktober ist es wieder so weit. Wie in jedem Jahr füllt sich die ehrwürdige Alte Aula der Universität Heidelberg mit geladenen Gästen. In der ersten Reihe sitzen sieben junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler.



Kurz vor der Verleihung des KlarText-Preises in der Alten Aula der Universität Heidelberg

Sicher sind sie ein bisschen nervös, denn der Preis, den sie gleich entgegennehmen, ist einzigartig. Wer diesen KlarText-Preis für Wissenschaftskommunikation gewinnen will, muss zwei Hürden nehmen: Gekürt werden Bewerber und Bewerberinnen, die im Vorjahr eine sehr gute Doktorarbeit verfasst haben und zudem ihre Ergebnisse in einem allgemein verständlichen Artikel in deutscher Sprache erläutern.

Der Preis wird in sieben Fachgebieten vergeben: Biologie, Chemie, Geowissenschaften (ab 2018), Informatik, Mathematik, Neurowissenschaften und Physik. Auch Bewerbungen aus angrenzenden Disziplinen sind möglich, wenn sich die eigene Forschung und der Artikel einem der Bereiche zuordnen lassen.

Übrigens: Wer mitmacht, gewinnt auf jeden Fall. Denn die Klaus Tschira Stiftung lädt alle Bewerberinnen und Bewerber – also nicht nur die Gewinner – zu einem zweitägigen Workshop „Wissenschaftskommunikation“ des Nationalen Instituts für Wissenschaftskommunikation (NaWik) nach Heidelberg ein (inklusive Übernachtung).

Wer indes am Ende zur Preisverleihung eingeladen wird – und sich auch noch über 5000 Euro Preisgeld freuen darf –, hat zunächst eine ziemlich anspruchsvolle Jury überzeugt. Im ersten Schritt, der Vorauswahl, sichten 75 Schülerinnen und Schüler der renommierten Deutschen Journalistenschule in München die eingereichten Arbeiten. Ein Drittel der Beiträge schafft diese Hürde nicht.

Die verbliebenen Artikel gehen nun in die fachliche Prüfung. Dazu wird jeder Text von zwei renommierten Wissenschaft-

lerinnen oder Wissenschaftlern aus dem jeweiligen Fachgebiet gelesen. Ihr Hauptaugenmerk liegt zunächst 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 der 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. Sie geben Rankings ab, diskutierten diese in einer mehrstündigen Jurysitzung und küren schließlich die finalen Sieger.

Für die Veröffentlichung in diesem Magazin bearbeiten die Preisträgerinnen und Preisträger ihre Texte gemeinsam mit Wissenschaftsjournalisten.

Wer sich für den KlarText-Preis 2018 bewerben will, findet alle weiteren Informationen unter:

www.klartext-preis.de

KlarText
Preis für Wissenschaftskommunikation

Mit guter Sicht durch die Nacht

Nachts sind alle Katzen grau. Warum? Weil die Lichtempfindlichkeit unseres Auges nicht ausreicht, um im Dunkeln Farben zu sehen. Der Mittlere Weinschwärmer, ein Nachtfalter, ist uns da weit voraus. Trotz seines winzigen Gehirns findet er sich im Dunkeln bestens zurecht. Von ihm könnten Ingenieure lernen, wie selbstfahrende Autos nachts ihren Weg finden.

Von Anna Stöckl

Preisträgerin im Fachgebiet Neurowissenschaften

Wow, das ist ja total spannend! möchte natürlich jeder Doktorand gerne hören, wenn er über sein Forschungsthema spricht. Stattdessen höre ich oft: „Aha, und wozu ist das gut?“ Ich habe mich mit der visuellen Informationsverarbeitung im Gehirn von Schwärmern beschäftigt, den nachtaktiven Verwandten der Schmetterlinge.

Wie Kolibris schweben diese flauschigen Falter vor Blüten in der Luft, um mit ihrem Rüssel an den Nektar zu gelangen. Über ihre Flugkünste hinaus beeindruckt sie vor allem durch ihre visuellen Fähigkeiten: Mein Studienobjekt, der Mittlere Weinschwärmer (*Deilephila elpenor*, siehe Bild Seite 12), war das erste Tier, bei dem nachgewiesen wurde, dass es nachts Farben sehen kann – auch dann, wenn die Welt für uns Menschen längst nur noch in Grautöne getaucht scheint. Der Mittlere Weinschwärmer ist damit ein einzigartiges Objekt, um die Tricks der Nachtsichtspezialisten zu untersuchen.

Warum stellt das nächtliche Sehen eigentlich eine derart große Herausforderung dar? Alle visuellen Systeme, seien es Augen oder Kameras, rekonstruieren ein Abbild der Welt, indem sie Lichtpartikel, sogenannte Photonen, erfassen. An einem sonnigen Tag ist das kein Problem, doch während einer sternklaren Nacht treffen bis zu einhundert Millio-

nen Mal weniger Photonen am Auge ein. Wenn der Photonenfluss, der am helllichten Tag auf die Fotorezeptoren (die Lichtdetektoren des Auges) trifft, dem Wasserfluss der Niagarafälle entspricht, kann man sich den Fluss im Dunkeln als leichten Nieselregen vorstellen.

Gleichwohl müssen die Fotorezeptoren daraus verlässliche Informationen erzeugen. Nachaktive Tiere haben daher im Lauf der Evolution spezielle Strategien entwickelt – extra große Linsen etwa oder eine lichtreflektierende Schicht im Augenhintergrund, die zusätzliche Photonen auf die Rezeptoren lenkt. Auch der Weinschwärmer hat sich auf diese Weise der Dunkelheit ange-

passt – allerdings so gut, dass seine Lichtempfindlichkeit nicht allein mit den bekannten Strategien erklärt werden kann. Die Weinschwärmer, so scheint es, können besser sehen, als es ihre Augen zulassen.

„Des Rätsels Lösung liegt im Gehirn“, ist mein Doktorvater Eric Warrant von der Lund University seit langem überzeugt. Seine Arbeiten zeigen, dass es Insekten theoretisch möglich ist, ihre Lichtempfindlichkeit durch geschickte Verarbeitung der Lichtsignale im Gehirn zusätzlich zu steigern. Obwohl das Hirn eines Schwärmers kleiner ist als ein Reiskorn, konzentrierte ich mich auf eben diese Struktur. Ich wollte herausfinden, ob es tatsächlich über eine spezielle visuelle Signalverarbeitung verfügt – eine Art Nachtsicht-Algorithmus, der seine Lichtempfindlichkeit steigert.

Die Signalverarbeitung erfolgt im Schwärmergehirn wie auch in unserem durch Nervenzellen, die sogenannten Neuronen. Visuelle Neuronen erhalten Informationen über Lichtsignale von den Fotorezeptoren im Auge und verarbeiten sie zu Signalen, die das weitere Verhalten des Schwärmers steuern.

Bei der Suche nach dem Nachtsicht-Algorithmus konzentrierte ich mich auf die Neuronen, die für die visuelle Flugsteuerung der Nachtfalter verantwortlich sind. Da der Weinschwärmer

Anna Stöckl

kam 1987 in Rüdesheim am Rhein zur Welt. Sie studierte Biologie in Heidelberg und hat einen Master in Neurowissenschaften der LMU-München. Ihren Dokortitel erhielt sie 2016 von der Lund University in Schweden: „Neurons against Noise: Neural adaptations for dim light vision in hawkmoths“. Mittlerweile arbeitet Stöckl an der finnischen Aalto University über die visuelle Signalverarbeitung in der Netzhaut von Mäusen.

auch bei Sternenlicht noch sicher fliegen kann, müssen diese Neuronen besonders lichtempfindlich sein. Auf einem Computerbildschirm präsentierte ich meinen Versuchsfaltern visuelle Reize, deren Intensität ich genau kontrollieren konnte. Mithilfe feinsten Glaselektroden, die ich in die Schwärmergehirne einführte, maß ich die winzigen Spannungsänderungen der Neuronen.

Dabei zeigte sich, dass die Flugsteuerungs-Neuronen im Gehirn in der Tat noch auf Signale reagierten, die einhundertmal lichtschwächer waren als die

Insektengehirne sind einzigartige Vorbilder für die Entwicklung effizienter Steuerungssysteme – etwa für selbstfahrende Autos.

schwächsten Signale, auf die die Fotorezeptoren im Auge noch verlässlich reagierten. Eine klare Bestätigung für die Existenz des Nachtsicht-Algorithmus!

Doch wie funktioniert der? Für die Antwort auf diese Frage kehren wir noch einmal zu den Grundlagen des Sehens zurück: Das visuelle System ist bei Dunkelheit umso lichtempfindlicher, je mehr der spärlich eintreffenden Lichtsignale verarbeitet werden können. Grundsätzlich sind zwei Strategien denkbar, um die Anzahl der verarbeiteten Lichtsignale zu erhöhen; um in der Analogie des Niederschlags zu bleiben: Wir können Regen sammeln, indem wir einen Eimer für ein paar Minuten unter den Ablauf eines Dachs stellen oder aber einen anderen über Stunden oder Tage auf eine Wiese. Dabei geht allerdings in dem einen wie dem anderen Fall Auflösung verloren: Wenn wir den Regen in kurzer Zeit von einem Dach auffangen, können wir nicht genau bestimmen, wo der einzelne Tropfen fiel – wir haben also eine geringere räumliche Auflösung. Im Eimer, mit dem wir über Tage Regen sammeln, fehlt uns hingegen die Information, wann genau ein Tropfen niederging.

Auch die Neuronen im Schwärmergehirn nutzen diese Prinzipien für die Verstärkung – oder „Summation“ – von

Lichtsignalen, die auf die Fotorezeptoren in ihren Facettenaugen treffen. Diese bestehen aus über zehntausend einzelnen „Ommatidien“, die das wahrgenommene Bild wie einzelne Pixel aufbauen. Der Falter bündelt die Signale von jeweils einigen dutzend dieser Ommatidien, sammelt deren Signale über einen Zeitraum von mehreren hundert Millisekunden – und verstärkt so das vorhandene Lichtsignal um mehr als das Hundertfache. So kann der Weinschwärmer auch bei Sternenlicht sehen, obwohl die einzelnen Fotorezeptoren in seinen Augen keine verlässlichen Signale mehr liefern.

Das geht natürlich auf Kosten der Auflösung. Seine tagaktiven Verwandten jedenfalls können wesentlich feinere Details und schnellere Bewegungen wahrnehmen. Doch dafür sind die tagaktiven Schwärmer eben weniger lichtempfindlich – und können nachts nicht mehr fliegen. Und diesen Vorteil nutzt der Weinschwärmer, der nachts mit weniger Konkurrenz auf Nahrungssuche gehen kann und überdies weniger Fressfeinde fürchten muss.

Das eigentlich Erstaunliche dieser Erkenntnis liegt in der Winzigkeit des Falterhirns. Mit Karacho durchs Unterholz zu fliegen, kontrolliert von einem reiskornkleinen, nur ungefähr eine Million Nervenzellen umfassenden Steuerzentrum ist eine grandiose Herausforderung.



Die prächtigen Farben des Mittleren Weinschwärmers sehen wir allenfalls mal, wenn sich der nachtaktive Falter in unsere Wohnungen verirrt.

zum Vergleich: Die Zahl der Nervenzellen im Schwärmergehirn entspricht etwa der Einwohnerzahl Kölns, während die des menschlichen Gehirns die Weltbevölkerung um mehr als das Zehnfache übertrifft.

Insektengehirne sind daher einzigartige Vorbilder für die Entwicklung effizienter Steuerungssysteme, etwa für autonome Fahr- und Flugzeuge. Auch hier müssen ähnliche Aufgaben mit vergleichsweise begrenzten Rechnerkapazitäten gemeistert werden. Ein Beispiel ist die Entwicklung von Kameras zur Steuerung selbstfahrender Autos, die ja auch nachts sicher funktionieren müssen.

Und so gibt es einen ganz praktischen Nutzen unserer Erkenntnisse: In Zusammenarbeit mit einem Automobilhersteller entwickeln Eric Warrant und Henrik Malm von der Lund University eine Kamerasoftware, die auf den visuellen Verarbeitungsstrategien nachtaktiver Tiere wie dem Weinschwärmer basiert. Diese Software soll dann die Signale herkömmlicher Kameras verarbeiten – und zwar auf ähnliche Weise, wie das winzige Hirn der Schwärmer auch das schwächste Licht noch ausreizt. Es lohnt sich also, nachts die Augen offen zu halten nach jenem Schwärmer und seine spektakulären Flugmanöver zu bestaunen. Wir werden ihm in Zukunft noch viel abschauen können. ●

Fotos: CC BY-SA 3.0/Jean Pierre Hamon, Earth Science and Remote Sensing Unit/NASA Johnson Space Centers

Das Ende der Nacht

Straßenlaternen, Leuchtreklame, Flutlichtanlagen:
Die Natur leidet unter Lichtverschmutzung.

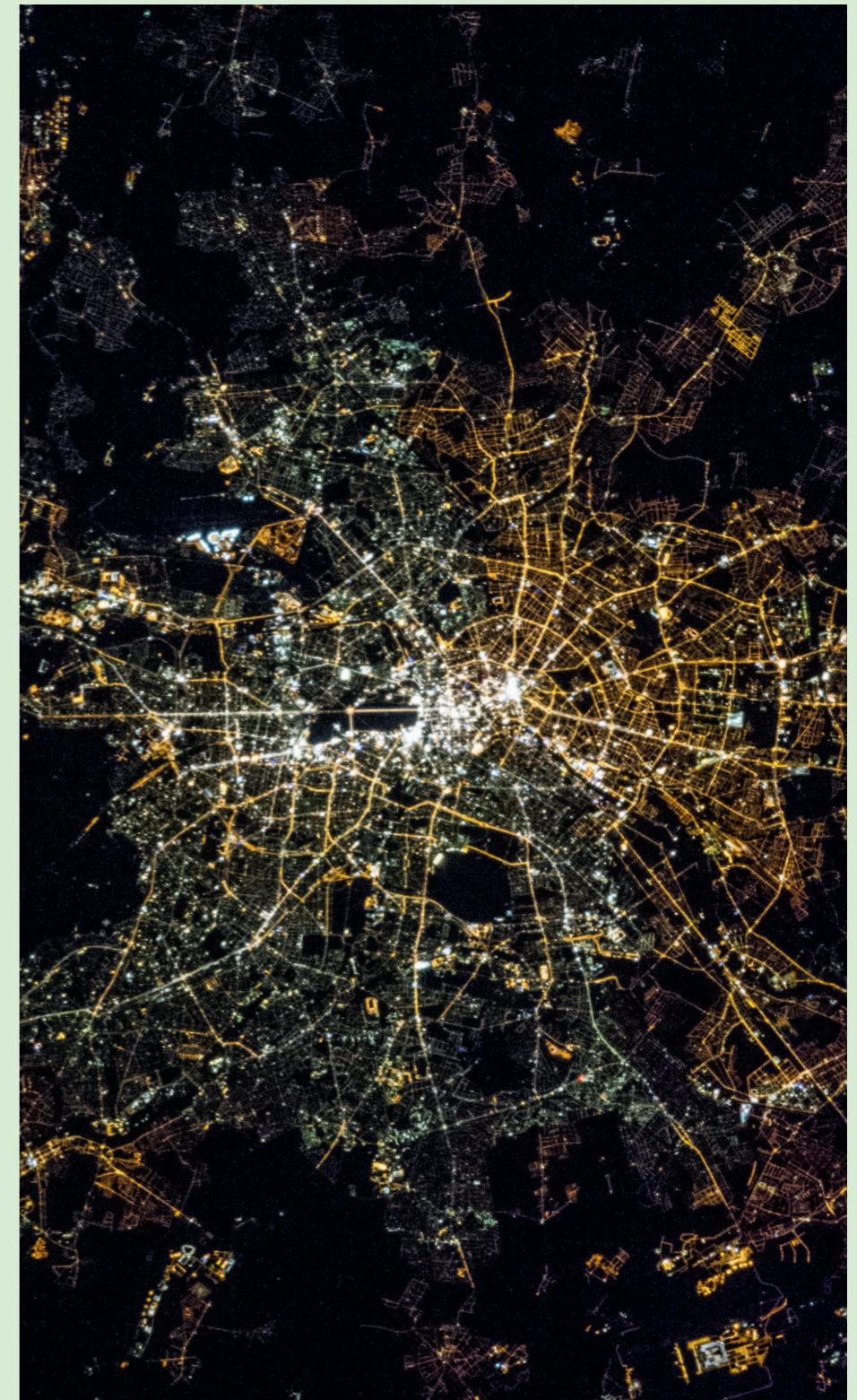
So richtig dunkel ist es nur noch im eigenen Keller. Wir machen die Nacht zum Tag, das sieht man sogar aus dem All. So offenbaren die Lichter Berlins (siehe Bild) bis heute, dass die Stadt einst geteilt war: Im Osten stehen nämlich noch viele der alten, eher gelblich leuchtenden Natriumdampflampen, im Westen hingegen die bläulichen Quecksilberdampflampen.

Doch von all dem Licht geht auch eine große Gefahr aus – nämlich für das Leben in der Natur. Zugvögel verlieren über Städten die Orientierung, manche Singvögel beginnen im Frühjahr aufgrund der Beleuchtung so früh mit dem Brutgeschäft, dass sie zu wenig Nahrung für den Nachwuchs finden. Fische meiden hell erleuchtete Brücken und sogar manche Pflanzen reagieren auf zu viel Licht in der Nacht.

Besonders leiden aber die Insekten unter der zunehmenden Lichtverschmutzung. Wenn sie, wie der Mittlere Weinschwärmer, mit so schwachen Lichtquellen wie Mond und Sterne zurechtkommen, sind sie von Straßenlampen völlig überfordert. Magisch angezogen umkreisen sie das Licht – so lange, bis sie erschöpft zugrunde gehen. Eine einzige Leuchte kann pro Nacht einige hundert Insektenleben fordern.

Auch werden sie hier besonders leicht Beute von Fledermäusen, die sich vielerorts gar nicht mehr die Mühe der Jagd in dunkler Natur machen, sondern sich am reich gedeckten Tisch der Parkleuchte bedienen – so wie die vielen Spinnen auch. Kurzum: Wenn wir die Nacht zum Tag machen, stören wir ein komplexes, für unsere Augen meist gar nicht sichtbares ökologisches Gefüge.

Nicht nur in Berlin wird sich das in Zukunft ändern. Denn vielerorts rüsten Städte und Gemeinden ihre alten Leuchten mit modernen LED-Strahlern aus. Und diese sparen nicht nur Energie, sondern wirken auch auf Insekten viel weniger anziehend. – J. Schüring



Berlin bei Nacht: Noch immer sieht man, dass die Straßenlampen im Osten der Stadt in wärmerem Gelb leuchten. Der US-Astronaut Chris Hadfield schoss dieses Bild im Jahr 2013 durch das Fenster der Internationalen Raumstation.

Zellen steuern mit Licht – und Liebe

In der noch recht jungen Disziplin der Optogenetik geht es um das An- und Abschalten bestimmter Prozesse in Zellen. Und zwar mithilfe von Licht. Dank eines neuen „Proteinschuttles“ können Proteine nun gezielt in den Zellkern gesteuert werden – und wieder hinaus.

Von **Dominik Niopek**

Preisträger im Fachgebiet Biologie

Na, spielst du wieder den DJ?“ Meine Kollegin lacht, und ich kann es verstehen. Es muss schon eigenartig anmuten, wie ich im weißen Kittel im vollkommen abgedunkelten Labor in einen Brutschrank starre – und grelle Blitze mein Gesicht in neonblaues Licht tauchen. Im Inneren des Schranks befinden sich Kulturen menschlicher Nierenzellen – sie sind es, auf die ich die Lichtblitze richte. Normalerweise reagieren solche Zellen natürlich nicht auf Beleuchtung, diese aber verfügen über künstliche lichtempfindliche Proteine.

Das Forschungsfeld, in dem ich arbeite, ist die Synthetische Biologie. Ich entwickle molekulare Werkzeuge, um Proteine zu kontrollieren und damit gezielt das Verhalten von Zellen zu steuern.

Genetisch umprogrammierte Bakterien produzieren Medikamente gegen Malaria – oder Biodiesel.

Beim Begriff „steuern“ denken die meisten an Elektronik, Maschinen und Ingenieure und weniger an Proteine, Zellen und Biologen. Tatsächlich lässt sich die Synthetische Biologie als die Ingenieursdisziplin unter den Biowissenschaften verstehen. Es geht darum, Konzepte aus dem

Maschinenbau, der Elektrotechnik und Informatik zu übernehmen, um sie auf lebende Systeme zu übertragen. Das ermöglicht einerseits ein immer detaillierteres Verständnis der komplexen Prozesse, die allem Lebenden – also selbst einfachsten Mikroorganismen – zugrunde liegen. Andererseits gibt es bereits jetzt vielfältige Anwendungen der Synthetischen Biologie. So helfen schon heute genetisch umprogrammierte Bakterien und Hefen beispielsweise bei der Herstellung von Medikamenten gegen Malaria – oder der Produktion von Biodiesel.

Aber Zellen zu steuern, ist kein einfaches Unterfangen. Wie soll man etwas lenken, das seine ganz eigenen Signale hat? Der Ingenieur benutzt hierfür einen Sender und den dazu passenden Empfänger. Die Sache mit dem Sender ist relativ einfach. Wir verwenden Licht. Es lässt sich leicht ein- und ausschalten und

Dominik Niopek

wurde 1987 in Speyer geboren. Er studierte Molekulare Biotechnologie an der Universität in Heidelberg, wo er 2016 seine Dissertation mit dem Titel „Optogenetic Control of Nucleocytoplasmic Protein Transport“ abschloss. Mittlerweile ist er Leiter der Forschungsgruppe „Synthetische Biologie“ der Universität Heidelberg.

hat keine Nebenwirkungen. Im Prinzip kommt eine einfache Taschenlampe in Frage, noch besser aber eignen sich LEDs oder Laser, die sich präzise auf einzelne Zellen ausrichten lassen. Schwieriger ist es mit dem Empfänger, der ja in der Zelle selbst sitzen muss. Er muss das Signal nicht nur auffangen, sondern es auch auf ein Protein übertragen und dessen Aktivität beeinflussen. Nur dann kann die Zelle mit dem Befehl etwas anfangen.

LOV heißt die Lösung dieses Problems. Das klingt im Englischen wie *love*, (Liebe), ist aber ein Akronym und steht für Light (Licht), Oxygen (Sauerstoff) und Voltage (Spannung), drei Reize, auf die LOV-Proteine reagieren. In seiner natürlichen Umgebung im Hafer ist das LOV-Protein Teil des Sonnenlicht-Sensors Phototropin. Bei Dunkelheit liegt das LOV-Protein als kompakte und starre Struktur vor und blockiert die Aktivität des Phototropins – wie die Sperre eines Zahnrads. Fällt jedoch blaues Licht auf den Komplex, entspannt sich die Struktur, aktiviert das Phototropin und setzt eine ganze Kaskade von Ereignissen in Gang. Die Folge: Die Haferpflanze richtet sich zur Lichtquelle aus. Das LOV-Protein ist sozusagen das Auge des Hafers.

Genau diese Aufgabe soll es auch in Zellen von Säugetieren übernehmen. Dann könnte man es mithilfe von Lichtblitzen dazu bringen, die Zelle gezielt Dinge tun zu lassen – zum Beispiel bestimmte Stoffe produzieren. Die Frage ist nur, wie man dem Protein und der Zelle beibringen soll, als neues Team zusam-

menzuwirken. Dazu muss man wissen: Was eine Zelle genau macht, hängt nicht nur davon ab, welche Proteine in ihr vorliegen, sondern mindestens ebenso davon, wo sich diese Proteine zu einem bestimmten Zeitpunkt innerhalb der Zelle befinden. So können beispielsweise Proteine, die als Genschalter fungieren, nur im Zellkern ihrer Aufgabe nachkommen, also dort, wo die Erbinformation gespeichert ist. Viele Enzymproteine arbeiten hingegen ausschließlich im Zellplasma oder in spezialisierten Zellorganellen, zum Beispiel in den „Kraftwerken der Zelle“, den Mitochondrien.

Zellen kontrollieren die Aktivität ihrer Proteine daher häufig, indem sie diese einfach an ihren Wirkungsort transportieren oder von dort entfernen. Das geht schnell und kostet weniger Ressourcen, als wenn die Proteine ständig neu synthetisiert und gleich wieder abgebaut werden müssten.

Auf der Basis dieses natürlichen Schaltprozesses wollte ich das LOV-Protein derart modifizieren, dass ich es als universellen Schalter in allen Arten von Zellen einsetzen kann. Mithilfe gentechnischer Methoden versah ich es zunächst mit einer Art Adressetikett, das dem zelleigenen Transportsystem vorgaukelt, das LOV-Protein sei eine wertvolle Fracht, die rasch in den Zellkern hinein- oder aus ebendiesem hinausbefördert werden sollte. Im Dunkeln ist dieses Etikett unsichtbar, und es passiert nichts. Erst durch Bestrahlung mit blauem Licht kommt es zum Vorschein, und der Transport kann losgehen. Hängt man ein derart modifiziertes LOV-Protein nun an beliebige zelleigene Proteine, sollte sich deren Bewegung mit blauem Licht von außen steuern lassen: ein synthetischer lichtabhängiger „Proteinshuttle“: Blaues Licht an bedeutet „Rein in den Zellkern!“, Licht aus heißt: „Raus aus dem Zellkern!“ Soweit die Theorie.

Der Praxistest erfolgte unter dem Mikroskop. Dort konnte ich die Bewegung von Proteinen in einzelnen Zellen live verfolgen. Ich koppelte das modifizierte LOV-Protein an ein sogenanntes Reporterprotein, das mir mit seinem roten Leuchten stets verrät, wo in der Zelle es sich gerade befand. Dieses Tandem führte ich in menschliche Zellen einer Kultur ein und begann mit meinen blauen Lichtblitzen. Tatsächlich bewegten sich die Protei-

ne in dem Rhythmus, den ich ihnen mit meinen LEDs vorgab. Schaltete ich das blaue Licht an, wanderte das Reporterprotein binnen weniger Sekunden vom Zellplasma in den Zellkern, bis dieser schließlich tiefrot leuchtete. Schaltete ich das Licht wieder aus, zog sich das Reporterprotein ins Zellplasma zurück. Dieser Proteinshuttle funktionierte dann nicht nur in kultivierten menschlichen Zellen, sondern auch in Hefen und sogar in lebenden Zebrafischembryonen.

Aber lässt sich mit meinem Proteinshuttle auch das Verhalten von Zellen steuern? Um diese Frage zu beantworten, ersetzte ich das rote Reporterprotein durch Genschalter, die die Zellteilung

Blaues Licht an bedeutet „Rein in den Zellkern!“, Licht aus heißt: „Raus aus dem Zellkern!“

einleiten oder bei gefährlichen Erbgutschäden, etwa infolge von radioaktiver Strahlung, aktiviert werden. Gemeinsam mit meinen Kollegen brachte ich diese Genschalter mit LOV-Zusatz erneut in menschliche Zellkulturen ein. Beleuchtete ich sie mit blauem Licht, teilten sich die Zellen oder starteten genetische Reparaturprogramme, die im Menschen einer Krebsentstehung entgegenwirken.

Der von mir entwickelte Proteinshuttle ist mittlerweile in über 20 Forschungslaboren weltweit im Einsatz. Erst vor kurzem wurde er von Nathan Sherers Forschungsgruppe am Carbone Cancer Center der University of Wisconsin (USA) verwendet, um ein wichtiges Protein des AIDS-auslösenden HI-Virus zu studieren.

Wie jedes andere Werkzeug hat aber natürlich auch mein modifiziertes LOV-Protein seine Grenzen. So eignet es sich zwar bestens für die Steuerung frei beweglicher Proteine in Zellkulturen. Hin zu einer lichtgesteuerten Krebstherapie im Menschen beispielsweise ist es aber noch ein weiter Weg. Doch weltweit tüfteln die Bio-Ingenieure längst an entsprechenden Verfahren – und die Natur hält sicherlich noch manch überraschende Lösung für sie bereit!

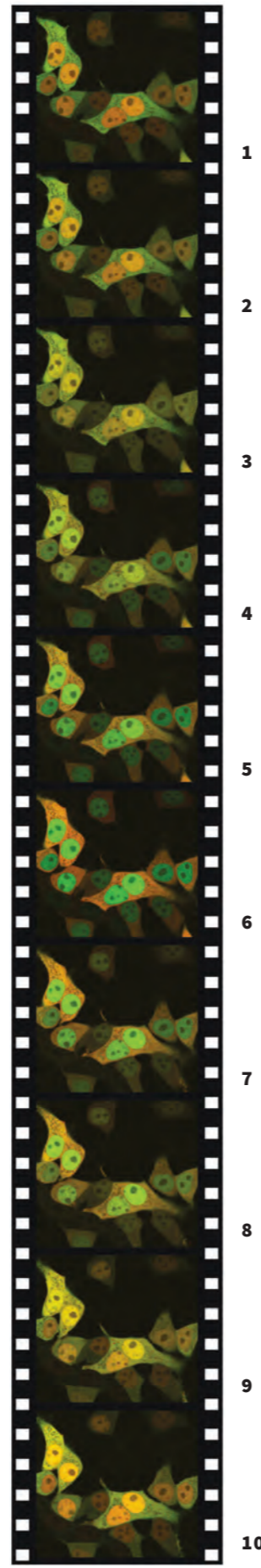
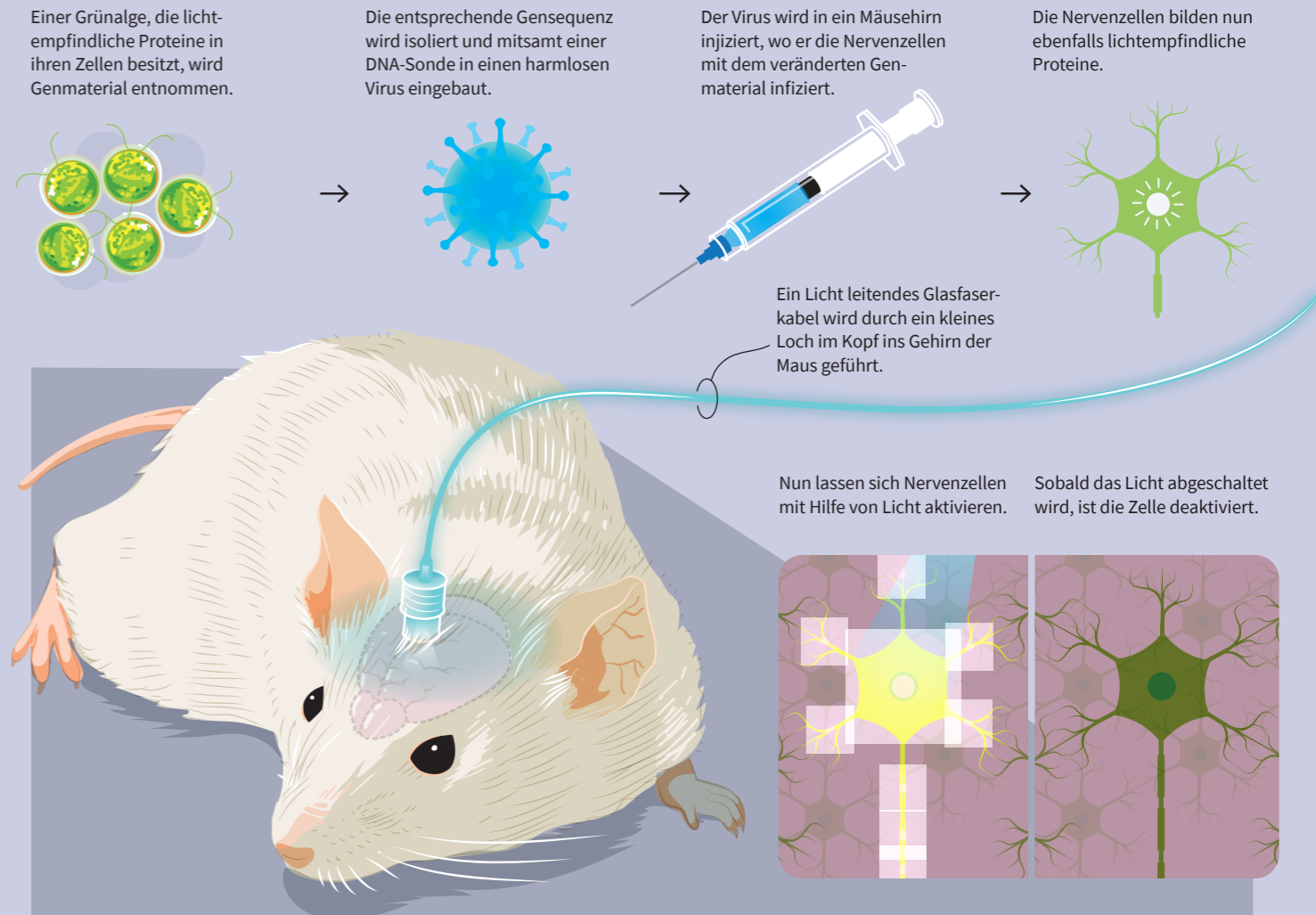


Bild (li.): Dominik Niopek; Illustration: Mario Mensch



Die ferngesteuerte Maus

Eine kurze Geschichte der Optogenetik

Algen gehören zu den ältesten Lebewesen auf der Erde – und seit Jahrmilliarden „wissen“ sie, wie sie sich zu ihrer Energiequelle, der Sonne, ausrichten. Dazu verfügen sie über bestimmte lichtempfindliche Proteine. Ein Team um Peter Hegemann von der

Berliner Humboldt-Universität hatte Ende der 1990er-Jahre die Grünalge *Chlamydomonas* erforscht und war auf sogenannte Kanal-Rhodopsine gestoßen. Diese Proteine wirken in bestimmten Zellen wie Schalter, die auf Licht reagieren.

2004 gelang es Karl Deisseroth von der Stanford University und seinem Team, das Gen dieser Algenproteine in Nervenzellen einer Maus einzubauen, sodass diese das Protein produzierten – und somit lichtempfindlich wurden. Mithilfe eines in die Hirnregion eingeführten Glasfaserkabels konnten diese Nervenzellen nun aktiviert oder deaktiviert werden. Das Ergebnis: Die Maus lief – ferngesteuert durch Lichtimpulse – im Kreis herum, stoppte und rannte wieder los. Deisseroth gilt seither als der Begründer der Optogenetik, also der Steuerung

genetisch veränderter Zellen mithilfe von Licht.

Mittlerweile ist das Verfahren weltweit verbreitet. Gleichwohl könnte die Optogenetik gerade in der Therapie psychischer Erkrankungen einmal eine große Rolle spielen. So konnten Deisseroth und sein Team bereits Mäusen die Angst vor anderen nehmen. Verhielten sie sich fremden Tieren gegenüber zunächst zögerlich, wurden sie mutig und gingen auf diese zu, sobald das Licht anging.

Da die Nervenzellen im Gehirn dafür gentechnisch verändert werden müssen, gibt es hinsichtlich eines Einsatzes beim Menschen ethische und moralische Bedenken. Die neue Methode könnte jedoch die Grundlage sein für neuartige Therapien. Wann und wie die Patienten davon profitieren, ist indes noch ungewiss. – J. Schüring

Der Knorpel im Hydraulikzylinder

Die Knorpel in unseren Gelenken gewährleisten dank eines ausgeklügelten Schmiermechanismus die leichte und schmerzfreie Bewegung. Seit langem versuchen Forscher, dieses Wundermaterial im Labor nachzubauen – und zwar nicht nur im Dienst der Medizin, sondern auch für industrielle Zwecke.

Wir sind dieser Vision einen Schritt näher gekommen.

Von Christian Mathis

Preisträger im Fachgebiet Chemie

Das ist Menschen und Maschinen gemein: Sie nutzen ab. Arthrose etwa, die Degenerierung der Knorpel in den Gelenken, ist eine typische Alterserscheinung, wenngleich sie auch schon bei jungen Patienten auftreten kann. Betroffene leiden bei jeder Bewegung unter Schmerzen, und es gibt trotz intensiver Forschung noch immer kein Mittel gegen diese degenerative Erkrankung. Für das natürliche Knorpelgewebe existiert bis

elastische Material in Millionen Jahre dauernder Evolution optimiert. Wir Menschen tüfteln immerhin seit knapp 300 Jahren an einem Ersatz. So schrieb der schottische Anatom William Hunter in seiner 1743 erschienenen Abhandlung „Zur Struktur und Erkrankung von Knorpel“ über die Folgen entzündeter Gelenke – und dass sich einmal zerstörte Knorpel nicht regenerieren. Der Grund: Das Gewebe enthält keine Blutgefäße und wird vom Körper vergleichsweise schlecht versorgt.

Heute wissen wir über die Zusammensetzung der Knorpelsubstanz fast alles.

Knorpel enthalten Millionstel von Millimeter kleinen büstenartigen Strukturen, die Flüssigkeit speichern.

heute kein gleichwertiger künstlicher Ersatz. Die Suche danach ist aber nicht nur aus medizinischer Sicht spannend. Da nämlich kein Schmiersystem der Welt so langzeitbeständig und effizient ist wie das unserer Gelenke, ist es auch für die Industrie von großem Interesse.

Knorpel ist eine biologisch und mechanisch höchst komplexe Substanz. Die Natur hat dieses biegsame und druck-

Christian Mathis

wurde 1986 im österreichischen Bregenz geboren. Er studierte Luft- und Raumfahrttechnik in Delft und Wirtschaftswissenschaften in Rotterdam. Nach Zwischenstationen in der Industrie absolvierte er sein Doktorat an der ETH Zürich zum Thema „Investigation of Fluid-Confinement in Lubricating Polymer-Brush Coatings“. Derzeit arbeitet er bei der SuSoSAG in Dübendorf, Schweiz, an der Entwicklung neuartiger Beschichtungstechnologien für die Medizintechnik.

Sehr kleine aber besonders wichtige Bausteine sind die sogenannten Proteoglykane – Millionstel von Millimeter kleinen büstenartigen Strukturen, die zwischen ihren Borsten Flüssigkeit speichern. Diese Strukturen dämpfen die auf den Knorpel wirkenden Kräfte. Wir sind bereits in der Lage, Strukturen wie jene Proteoglykane künstlich im Labor nachzubilden. Diese Polymerbürsten, wie wir sie nennen, können an Oberflächen von Bauteilen verankert werden, geeignete Flüssigkeiten aufnehmen und in sich speichern (siehe Bild Seite 20). Dabei sind bestimmte physikalische Eigenschaften der künstlichen Bürsten denen der natürlichen Proteoglykane sehr ähnlich. Beide erzeugen eine gleitfähige Oberfläche und gewährleisten so eine einzigartige Langzeitschmierung.

Im Rahmen meiner Dissertation erforschte ich die Schmiermechanismen dieser künstlichen Polymerbürsten, die hoffentlich eines Tages die Schmerzen von Arthrosepatienten lindern, aber auch den Verschleiß von Maschinenteilen reduzieren können. Dabei galt es zunächst, die Vorgänge während der Flüssigkeitsaufnahme dieser büstenartigen Materialien zu verstehen. Hierfür entwickelte ich zusammen mit den beiden Chemikern Vikrant Naik von der Abteilung Strukturbildung des Leibniz Instituts für neue Materialien in Saarbrücken

und Mohammad Divandari vom Department of Materials der ETH Zürich eine Vorrichtung, mit der sich verschiedene Flüssigkeiten über die Polymerbürsten leiten lassen. Beobachtet haben wir das mittels Infrarotspektroskopie: Werden nämlich verschiedene Flüssigkeiten von den Borsten aufgesogen oder abgestoßen, verändert sich je nach ihrer chemischen Zusammensetzung die Intensität des Lichtspektrums. So fanden wir heraus, wie diese Flüssigkeiten chemisch be-

Uns geht es vor allem um die Entwicklung künstlicher Gelenkknorpel.

schaffen sein müssen, damit sie von den Bürsten optimal aufgenommen werden. Nun ging es darum, die physikalischen Eigenschaften der vollgesogenen Bürsten zu untersuchen. Ich benutzte dazu ein sogenanntes Rasterkraftmikroskop. Dieses kann man sich wie einen

winzigen Tastfinger vorstellen, der unterschiedlich schnell auf die Oberfläche des Materials tippt, die Festigkeit des Untergrunds misst und uns auf diese Weise Informationen über dessen Dämpfungseigenschaften liefert. Diese Tastversuche erlauben es, die Eigenschaften künstlicher Polymerbürsten unterschiedlicher Borstendichte mit denen natürlicher Strukturen zu vergleichen.

Die wichtigste Erkenntnis war, dass die mechanischen Eigenschaften durch das Zusammenspiel der Polymerbürste und der eingeschlossenen Flüssigkeit geprägt sind. Der Physiker Rok Simič vom Department of Materials der ETH Zürich, der als Postdoktorand das Projekt betreut, erläutert: „Je dichter die Bürste gepackt ist, desto schwieriger ist der Strom von Flüssigkeiten. Auch die Viskosität der Flüssigkeit spielt dabei eine Rolle.“ Es musste also eine passende Kombination von Bürsten- und Flüssigkeitseigenschaften ermittelt werden, um die Langzeitschmierung zwischen zwei Oberflächen zu optimieren.

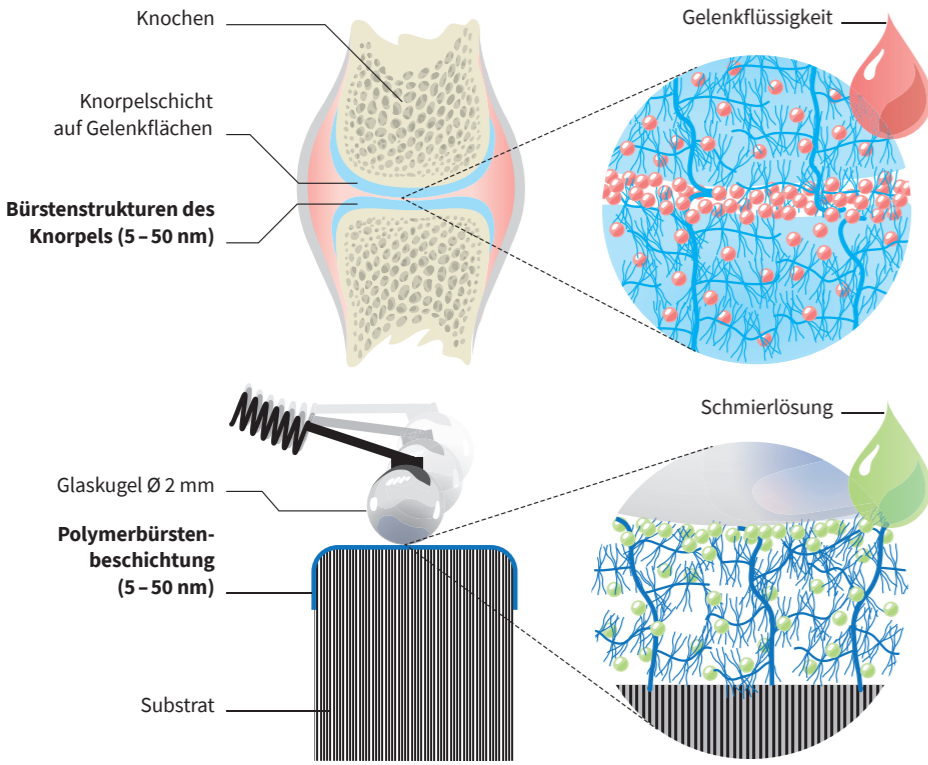
Reibungsversuche führte schon Leonardo da Vinci vor mehr als 500 Jahren durch. So, wie er eine Kiste über den Bo-

den schob und erkannte, dass er mit zunehmendem Gewicht mehr Kraft benötigte, ermittelten wir die Reibung einer von Polymerbürsten überzogenen Oberfläche in verschiedenen zusammengesetzten Flüssigkeiten. Dazu drückten wir eine zwei Millimeter große Kugel mit unterschiedlich starker Kraft gegen die geschmierte Fläche. Die Kraft, die wir aufwenden mussten, gab Aufschluss über die Gleiteigenschaften.

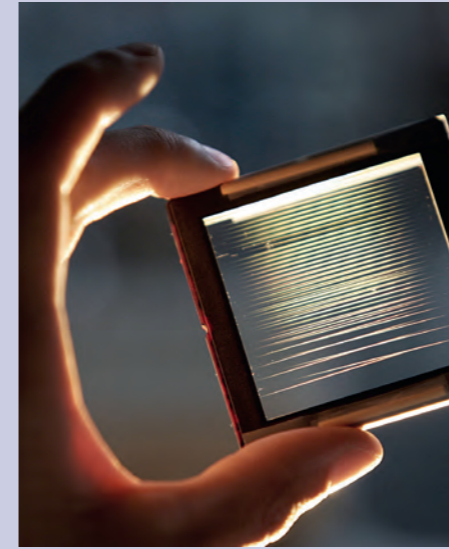
Dabei zeigte sich, dass der Grad der Reibung von der Geschwindigkeit abhängt, mit der die Flüssigkeit aus den Bürsten herausgedrückt wird. Im optimalen Fall rutscht die Kugel konstant auf einem Flüssigkeitsfilm. Wird die Flüssigkeit zu schnell aus der Bürste gedrückt, steigen die Reibungskräfte hingegen stark an. Um eine optimale Langzeitschmierung zu erreichen, müssen also die Parameter Druck, Bürstenstruktur und Beschaffenheit der Flüssigkeit aufeinander abgestimmt sein.

In unserem von der ETH Foundation und dem Europäischen Forschungsrat (ERC) geförderten Projekt geht es vor allem um die Entwicklung künstlicher Ersatzmaterialien für Gelenkknorpel. Darüber hinaus ist unser Know-how aber schon heute für die Industrie von Interesse. Dort erhofft man sich neue Möglichkeiten der Schmierung, die die Abnutzung von Kolben in Motoren oder hydraulischen Zylindern vermindert. Bis sich hier aber Bürstenschmierungen nach dem Vorbild natürlicher Knorpel durchsetzen, müssen wir es schaffen, die Hürde vom Labor in die Massenfertigung zu nehmen. Die Bürsten müssen also in großen Mengen produziert werden können, mit herkömmlichen Flüssigkeiten funktionieren und langlebig sein.

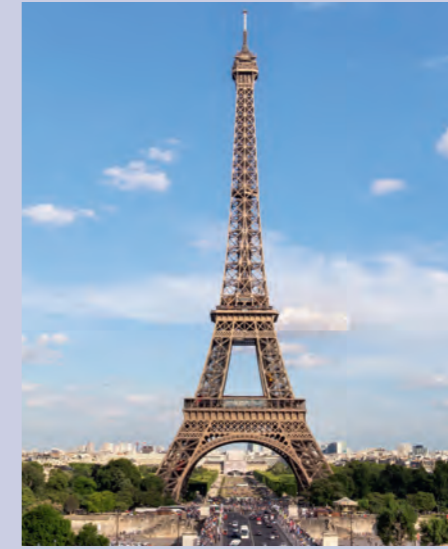
Zusammen mit der Züricher SuSoS AG konnten wir bereits mithilfe einer industriellen Beschichtungsanlage diverse Oberflächen mit diesen Polymerbürsten versehen – darunter auch den Stahl von Hydraulikzylindern, die besonders starker Abnutzung ausgesetzt sind. Wir testeten dabei verschiedene, heute schon verwendete Schmiermittel und fanden für die Hydraulikzylinder bereits die passende Kombination aus Bürsten und Schmiermittel. Tatsächlich ist der Reibungskoeffizient der beschichteten im Vergleich zu dem herkömmlicher Zylinder um den Faktor 10 verringert. ●



Der natürliche Knorpel verfügt über nanometergroße Bürstenstrukturen, die Gelenkflüssigkeit speichern. Die künstlichen Bürstenstrukturen können auf verschiedene Materialien aufgebracht werden und helfen dort, Schmiermittel zu speichern. Um Reibung und Abrieb zu vermindern, werden Druck, Bürstenstruktur und Beschaffenheit der Schmierlösung aufeinander abgestimmt.



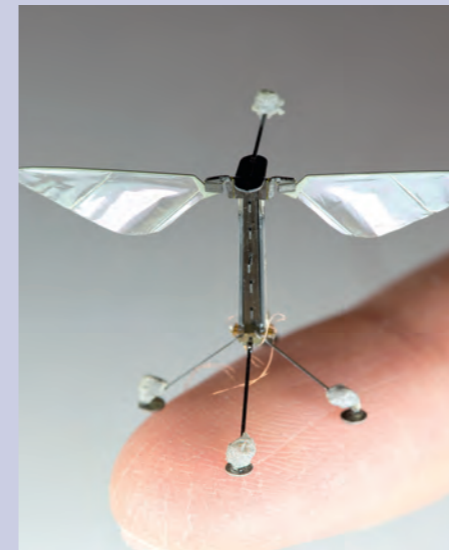
Sieht aus wie Spinnenseide, ist aber künstlich hergestellt: Der Biosteel® aus den Labors der TU München ist 25-mal belastbarer als ein vergleichbarer Stahldraht. Aus dem leichten und zähen Material kann man Wundpflaster herstellen, aber auch schusssichere Westen.



Würde man den Eiffelturm auf eine Größe von 30 Zentimeter schrumpfen, wöge er nur noch acht Gramm. Gustave Eiffels Assistent Maurice Koechlin soll sich bei der Konstruktion des Stahlturms die Leichtbaustruktur von Knochen zum Vorbild genommen haben.



Das Gecko-Tape® wurde an der Universität Kiel entwickelt. Die Folie trägt auf der Oberfläche – ähnlich wie der Fuß eines Geckos – fast 30.000 Nanohärchen pro Quadratzentimeter. Die molekularen Haftkräfte sind so stark, dass ein 20 mal 20 Zentimeter großes Stück einen Forscher hält.



„Robobee“, die an der Harvard University entwickelte Minidrohne, wird von winzigen Piezomotoren angetrieben. Sie soll einmal bei der Bestäubung von Pflanzen helfen und sich im Katastrophenschutz bewähren. Sicher interessieren sich auch die Geheimdienste dafür.



Wer die Videos dieser Roboter eines amerikanischen Rüstungskonzerns sieht, ist fasziniert – und erschrocken. Denn diese durchs Gelände rennenden „Geschöpfe“ wirken vertraut – und befremdlich zugleich. Selbst wenn sie über ein Loch stolpern, fangen sie sich mühelos.



Die Federn an den Flügelenden eines Adlers biegen sich im Flug fast senkrecht nach oben. Der Grund: So werden Luftverwirbelungen minimiert. Flugzeugkonstrukteure schauen sich das ab und erfanden die „Winglets“. Damit fliegen Flugzeuge bis zu zehn Prozent effizienter.

Illustration: Mario Mensch; Fotos: Matthias Schrader dpa/lby, Fotolia/Renar, CAU/Claudia Eulitz, Wyss Institute at Harvard University, Boston Dynamics, Fotolia/Karsten

„Erzählen, nicht quälen!“

Wie schaffen es Wissenschaftler in die Nachrichten? Wulf Schmiese, Redaktionsleiter des heute-journals im ZDF, über Marsmissionen, Hüftleiden, das richtige Timing und die Kunst des Entknotens.



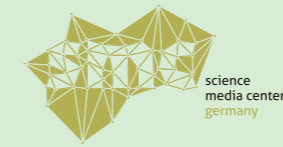
Herr Schmiese, welche Wissenschaftsnachricht hat Sie kürzlich besonders beeindruckt?

Das war die Mondmission, die wir gestern in unserer Sendung (vom 24.7.17, die Redaktion) hatten. Wir berichteten über ein Team des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, das unter anderem die Rückseite des Mondes erforschen will. Geübt wird das am Vulkan Ätna auf Sizilien. Unsere Wissenschaftsredakteurin Kristina Kajatz hat dort die Forscher interviewt, und unsere Moderatorin Marietta Slomka hat in ihrer Anmoderation eine kleine Geschichte der Mondfahrt erzählt. Das kam gut an.

Haben Sie feste Auswahlkriterien für Wissenschaftsnews?

Wir schließen kein Thema aus, nur wenn es lediglich eine ganz kleine Minderheit interessiert, machen wir es nicht. Wenn es ums Universum geht, wollen wir aber fast immer: Mondmission, Marslandung, das Rosetta-Projekt. Unser Moderator Claus Kleber hat ein Faible dafür, in seinem Büro steht das Modell einer Apollo-Rakete. Pflicht ist auch der Nobelpreis für Medizin. Physik und Chemie bringen wir, wenn ein Deutscher gewinnt. Bei ausländischen Preisträgern fragen wir uns: Kapiert man das selbst? Können wir das vermitteln? Wir haben ein heterogenes Publikum, für das wir das Ganze in eine verständliche Sprache

Fotos: Nathalie Zimmermann



Journalisten wissen auch nicht alles ...

In der Antarktis bricht ein Eisberg ab, Forscher korrigieren einen Gendefekt an menschlichen Embryonen mithilfe der Genschere CRISPR/Cas9, die USA kündigen das Klimaabkommen von Paris: Journalisten stehen täglich vor der Herausforderung, komplizierte wissenschaftliche Sachverhalte zu bewerten und einzuordnen. Das Science Media Center Germany hilft dabei, indem es in kurzer Zeit verlässliches Fachwissen und Einschätzungen von Experten liefert – und zwar kostenlos.

www.sciencemediacenter.de

übersetzen. Dabei wollen wir den Fachmann nicht langweilen, aber der Laie soll es auch verstehen.

Viele Menschen interessieren sich für Gesundheitsthemen.

Stimmt. Aber wer mehr über sein Hüftleiden erfahren will, bekommt diese Information nicht im heute-journal. Denn ihr fehlt der News-Wert, der für uns über allem steht. Grundsätzlich sind wir mit medizinischen Meldungen sehr vorsichtig, weil manche Institute sie als Durchbruch der Forschung verkaufen, als Krebsheilung oder Therapie gegen Querschnittslähmungen. Ob das stimmt, können wir ad hoc nicht einschätzen, deshalb lassen wir es von Dritten überprüfen.

Wie finden Sie Experten für Ihre Sendung?

Ein Beispiel: In den nächsten Tagen soll es um die Frage gehen, ob Kinder, die per anonymer Samenspende gezeugt wurden, ein Recht haben, ihren Vater zu kennen. Dafür brauchen wir einen Rechtsethiker, und da wir keinen kennen, müssen wir suchen. Hilfreich sind Expertendatenbanken oder das Science Media Center, die Wissenschaftler mit der entsprechenden Expertise an Journalisten vermitteln. Allerdings gibt es auch Experten, die man nicht noch einmal möchte.

Wen laden Sie kein zweites Mal ein?

Es gibt Koryphäen, die sind richtig schlecht, wenn sie eine 20-Sekunden-Antwort geben sollen. Wenn aber jemand zu lange redet und die Zeit überzieht, fliegt ein anderer Beitrag raus, der vielleicht tagesaktuell ist und 4000 Euro gekostet hat. Das können wir dem Zuschauer natürlich nicht erklären. Der sieht nur: Herr Professor nimmt sich Zeit und wird rüde unterbrochen.

Wie machen Wissenschaftler im Fernsehen eine gute Figur?

Sie sollten packend erzählen können – das ist hierzulande leider eine seltene Gabe. Wir merken das bei Straßenumfragen. In Amerika sind die Leute offen und kurzweilig, kommen auf den Punkt. Wir sind verknotet. Da kommt 'ne Kamera, und schon re-

den viele in Substantiven. Weil sie meinen, formal sein zu müssen. Und das ist auch das Grundproblem der Wissenschaftler: Sie haben Angst, den akademischen Jargon zu verlassen. Aber unsere Sprache ist viel zu gut und zu lebhaft, um in diesem Jargon stecken zu bleiben! Wir haben ein Motto beim Fernsehen: Erzählen, nicht quälen! Und für Wissenschaftler gilt: Wenn sie ihren Gegenstand verständlich darreichen, erobern sie ganz neue Welten, weil die Leute ihnen folgen. Selbst in die Mathematik.

Wie lernt man es, fürs Fernsehen zu reden?

Entknoten, entkomplizieren. Ich kam von der Zeitung zum Morgenmagazin, das war ein Kulturbruch. Anfangs habe ich versucht, viel zu viele Gedanken in meinen Moderationen unterzubringen, das ging zuweilen schief. Nicht weil die TV-Zuschauer dümmer sind als Leser, sie sind wegen der vielen Bilder nur weniger konzentriert. Deshalb muss man jeden Satz auf einen Gedanken reduzieren. Damit der Laie es versteht. Das ist Übersetzungsarbeit. Vereinfachung. Und das kann jeder lernen.

Woher kommt die 20-Sekunden-Regel?

Das ist die Spanne, die die Leute inhaltlich leicht aufnehmen können. Wir denken heute in 140-Zeichen-Rhythmen. Deshalb: Nehmen Sie die Zuhörer ernst.

Welchen Beitrag können Journalisten für die Wissenschaft leisten?

Wir geben uns Mühe, die Dinge, die wir verkünden, auch zu begreifen. Den Anspruch haben wir hier: Die Moderatoren wissen bei jeder kleinen Nachricht genau, was dahintersteckt. Dabei gibt es Themen, da denkst du erst mal: „Puh, das soll spannend sein?“ Dann entwickelt sich eine Eigendynamik und du denkst: „Wow, ja, das ist es!“ Je tiefer du gräbst, desto spannender. Doch am Ende geht es ja darum, andere teilhaben zu lassen. Das ist die Leistung, die wir als Journalisten bringen und die ein guter Wissenschaftler bringen sollte: wirklich in die Tiefe vorzudringen und dann ganz viel an die Oberfläche zu holen. Für die anderen.

Die Fragen stellte Hiltrud Bontrup

Wulf Schmiese (50)

leitet seit April 2017 die Redaktion des heute-journals beim ZDF in Mainz. Zuvor moderierte der promovierte Historiker das ZDF-Morgenmagazin und war Politischer Korrespondent der F.A.Z.





Alexander Freytag

Wie Maschinen das Lernen lernen

Kinder lernen täglich hinzu, weil sie ständig Fragen stellen und neugierig ihre Umgebung erkunden. Können auch Maschinen mit künstlicher Intelligenz auf diese Art und Weise lernen? Und falls ja, welche Schlüsselkompetenzen muss eine intelligente Maschine dafür besitzen?

Von Alexander Freytag

Preisträger im Fachgebiet Informatik

Mama, warum wird es nachts dunkel?“, „Papa, wieso hat das Zebra Streifen?“ – Eltern kennen diese Fragen und wissen, wie wichtig Neugier für die kindliche Entwicklung ist. Das zielgerichtete Erforschen von Neuem, das Stellen von Fragen und das Verarbeiten von Antworten begleiten uns aber ein Leben lang – „man lernt niemals aus“, heißt es ja zu Recht. Doch was wäre, wenn uns nicht nur unsere Kinder mit Fragen löcherten, sondern auch all die „intelligenten“ Helfer im Alltag? Wenn das Auto, der Saugroboter oder das Smartphone plötzlich anfangen zu lernen?

Zweifellos beeinflusst der technologische Fortschritt in den Forschungsbereichen des Maschinellen Lernens (ML) und der Künstlichen Intelligenz (KI) maßgeblich unsere Gesellschaft. Das vollkommen autonom fahrende Auto ist keine Zukunftsvision mehr, längst gibt es auch intelligente Programme, die Ärzten helfen, bei ihrer Diagnose die richtigen Fragen zu stellen, und wir alle haben schon mit unseren Smartphones gesprochen. Um die hohen Ansprüche an Genauigkeit und Verlässlichkeit erfüllen zu können, benötigen solche Assistenten jedoch – genau wie wir Menschen – einen möglichst großen „Erfahrungsschatz“, um daraus zu lernen.

Tatsächlich haben die derzeitigen Verfahren des Maschinellen Lernens bereits einiges mit unserem menschlichen Ge-

hirn gemeinsam. Bei unserer Geburt sind bereits alle Neuronen vorhanden. Im Zuge des Lernens werden die bestehenden Verbindungen zwischen diesen Neuronen dicker oder dünner, um Informationen effektiv verarbeiten zu können. Nach dem gleichen Prinzip werden auch die „Baupläne“ von aktuellen ML-Verfahren programmiert (zum Beispiel die „Anzahl der Neuronen“ vorgegeben), die Einstellungen für deren „Stellschrauben“ jedoch aus Trainingsdaten gelernt.

Noch ist das Lernen von Mensch und Maschine jedoch nur ansatzweise vergleichbar. Im Gegensatz zu unseren neugierigen Kindern sind die aktuellen ML-Lösungen nämlich statisch konzipiert, werden also nur einmal mit vielen Lernbeispielen „gefüttert“. Später lernen sie nichts Neues hinzu. Als Beispiel sei die Gesichtserkennung von Kameras genannt, welche einmal das Aussehen von

Gesichtern lernt und dann diesen Algorithmus immer wieder verwendet.

Im Gegensatz zu diesem statischen Design steht unsere menschliche Fähigkeit, kontinuierlich Wissen zu akkumulieren, um sich ändernden Umgebungen gerecht zu werden. Deshalb können wir in Windeseile eine Treppe hinauflaufen, im nächsten Moment einen Apfel schä-

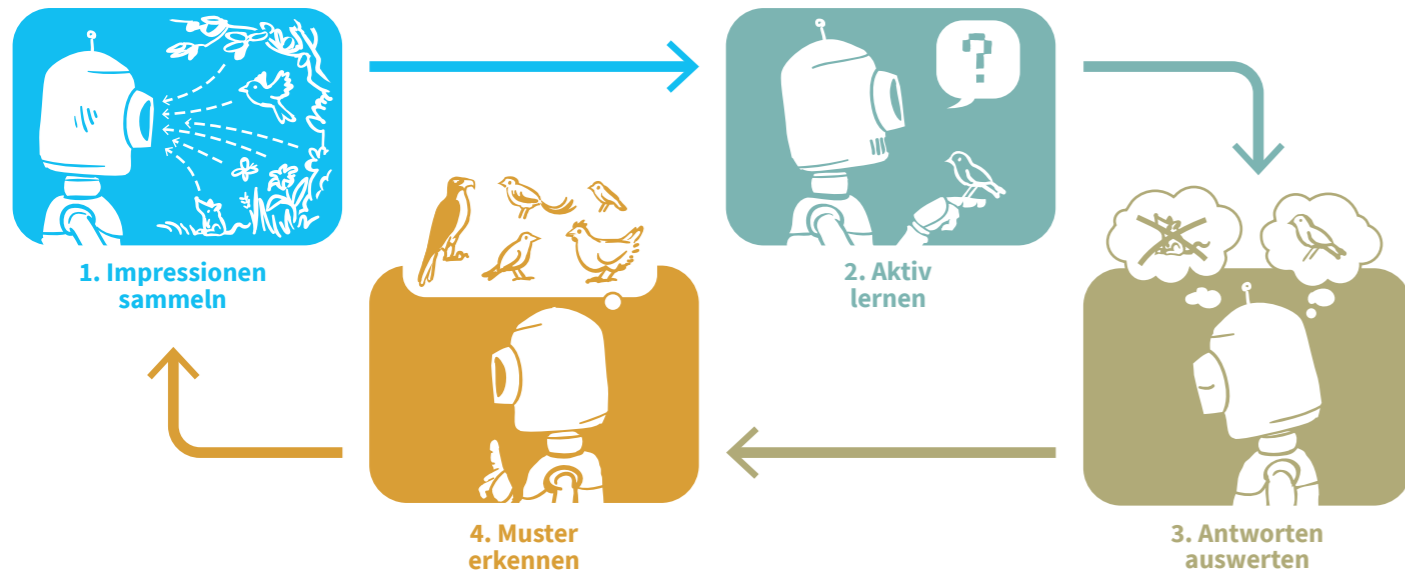
Noch ist das Lernen von Mensch und Maschine nur ansatzweise vergleichbar.

len und im Anschluss mit unserem Auto in die Stadt fahren. Und sollten wir einmal nicht weiterwissen, können wir Fragen stellen. Ein Computer, der all dies beherrscht, ist noch undenkbar. Dafür ist er in der Lage, in Millisekunden sechsstellige Zahlen zu multiplizieren.

Derzeit können wir Computer allenfalls mit einzelnen Aspekten unserer Fähigkeiten ausstatten. In meiner Dissertation wählte ich zusammen mit Kollegen der Friedrich-Schiller-Universität Jena und der University of California, Berkeley vier dieser Fähigkeiten aus: (1) die Verarbeitung von hunderttausenden Eindrücken, (2) das kontinuierliche Lernen, (3) das aktive Lernen sowie (4) das Erkennen von Mustern und Merkmalen (siehe Bild

Alexander Freytag

wuchs in Erfurt auf, wo er 1988 zur Welt kam. Er studierte Informatik in Jena und promovierte ebenda mit der Arbeit „Lifelong Learning for Visual Recognition Problems“. Seit 2016 forscht er bei der Carl Zeiss AG in Jena an der nächsten Generation intelligenter optischer Systeme.



Damit ein Roboter beispielsweise lernen kann, bestimmte Vögel zu erkennen, muss er Eindrücke sammeln, kontinuierlich neue Daten verarbeiten, Wichtiges von Unwichtigem unterscheiden, um aktiv Fragen zu stellen, und schließlich den Vogel an einzelnen Mustern identifizieren, auch wenn dieser einer von vielen ist oder nur einmal schnell durchs Blickfeld fliegt.

oben). In meiner Arbeit präsentierte ich, wie sich diese vier Aspekte ergänzen können und zusammen den „Kreislauf des lebenslangen Lernens“ ergeben.

Für die **Verarbeitung von hunderten Eindrücken**, also das Lernen aus großen Datenmengen, untersuchte ich sogenannte Gauss-Prozess-Modelle. Diese zeichnen sich durch eine Reihe von Vorteilen aus, allerdings benötigt eine Maschine vergleichsweise viel Zeit und Speicher, um alle notwendigen Operationen dieser Modelle durchzuführen. Die Folge: Speicher und Prozessoren sind selbst bei statischen Systemen rasch ausgelastet.

Ich entwickelte daher ein numerisches Verfahren, welches mit deutlich weniger Aufwand zum gleichen Ergebnis gelangt. Dadurch wird sowohl die nötige Rechenzeit als auch deren Abhängigkeit von der Datenmenge massiv reduziert. Die Lernphase dieser Modelle ist schon nach wenigen Sekunden abgeschlossen, und die Bearbeitung neuer Eindrücke kann in Millisekunden erfolgen – eine klare Zeitersparnis gegenüber der viele Minuten dauernden herkömmlichen Methode. Zudem konnte der Speicherbedarf reduziert werden, wodurch Kosten für teure High-end-Hardware unnötig wurden.

Um diese Verfahren für **kontinuierlich lernende Systeme** tatsächlich nutzen zu können, waren zusätzliche Erweiterungen nötig, damit ständig hinzukommen-

de Daten (Erfahrungen) verarbeitet werden können. Als Vorbild kann dabei der menschliche Schlaf dienen, in dem wir die Eindrücke des Tages verarbeiten und Erlebnisse in Erinnerungen umwandeln. Nun ist dies ein höchst komplexer und noch lange nicht verstandener Prozess. Deshalb entwickelten wir für verschiedene Herausforderungen unterschiedliche

Eine Maschine, die permanent nachfragt, ist unpraktikabel, eine, die sich stets auf Intuition verlässt, aber auch.

„Schlafmodi“ – und waren so in der Lage, große und wachsende Datenmengen in regelmäßigen Abständen zu verarbeiten.

Im nächsten Schritt versuchten wir uns an der Umsetzung des **aktiven Lernens**. Die Maschine soll aus großen Datensammlungen gezielt nur jene Elemente auswählen, für die eine Frage nach dem Inhalt „viel neues Wissen verspricht“. Eine solche Datensammlung kann etwa alle Eindrücke eines Tages beinhalten.

Doch diese Unterscheidung von Wichtigem und Unwichtigem, die Frage, wel-

che Informationen ich schon habe und wie ich etwas daraus mache, ist alles andere als trivial. Eine Maschine, die permanent nachfragt, ist unpraktikabel, eine, die sich stets auf Intuition verlässt, aber auch. Daher verfolgen die meisten existierenden Ansätze entweder Heuristiken, das heißt sie kommen mit begrenztem Wissen zu einer mehr oder weniger plausiblen Lösung. Oder sie „denken enorm lange nach“, bevor sie eine Frage stellen.

Heuristiken haben den Nachteil, dass die Lösung eben doch nicht immer die richtige ist und die Maschine in die falsche Richtung „denkt“ und fragt. Ein zu langes Nachdenken hingegen macht einen Dialog unmöglich. In meiner Promotion entwickelte ich daher neue Verfahren, welche schnell berechenbar sind (also eine schnelle Frage-Antwort-Zeit zulassen) und trotzdem eine theoretische Verbindung zur erwarteten Informationsmaximierung aufweisen.

Mit den bisher vorgestellten „Fähigkeiten“ können Maschinen mit großen Datenmengen umgehen, neu hinzukommende Eindrücke verarbeiten und gegebenenfalls aktiv nach deren Inhalt fragen. Aber wie kann eine Maschine feststellen, was ein neues Objekt einzigartig macht, um es später wiederzuerkennen? Unseren Kindern geben wir häufig Hilfestellungen, wie etwa „Das ist eine Giraffe – sie hat einen langen Hals

und ist gefleckt“. Wir geben also nicht nur die Antwort auf die Frage „Was ist das?“, sondern begründen unsere Antwort mit Entscheidungshilfen.

Es ist jedoch alles andere als einfach, solche Hinweise auch einer Maschine verständlich zu erklären. Ein Ausweg kann daher sein, dass die Maschine visuelle Besonderheiten von neuen Objekten automatisch erkennt. Im letzten Beitrag meiner Arbeit entwickelte ich ein solches Verfahren, mit dem intelligente Maschinen Objekte anhand relevanter **Muster und Merkmale erkennen** und diese Merkmale bei Bedarf sogar automatisiert ergänzen. Besonders in Szenarien der automatisierten Tierbeobachtung mit Kamerafallen haben diese Techniken großes Potenzial, um etwa Vogelarten zu unterscheiden und Statistiken über deren Lebensräume zu erstellen.

Die Kombination der hier beschriebenen „Fähigkeiten“ könnte zukünftig die Grundlage intelligenter Maschinen sein, die im Kreislauf des lebenslangen Lernens stetig besser werden: Impressionen wahrnehmen – Fragen stellen – Antworten auswerten – Wissen aktualisieren – Impressionen wahrnehmen – und so weiter. Die Einsatzmöglichkeiten sind nahezu unbegrenzt: von autonomen lernenden Fahrzeugen über intelligente Haustierroboter bis hin zu lernenden Maschinen, die das Weltall erforschen. Wir dürfen gespannt sein, welche Anwendungen wir in den nächsten Jahren und Jahrzehnten erleben werden.

Und noch etwas ist völlig unklar. Wenn es wirklich einmal Maschinen geben sollte, die wie wir lernen und eigenmächtig Schlüsse ziehen, stellen sich völlig neue ethische Fragen. Wer haftet, wenn ein Computer falsche Entscheidungen trifft? Kann er überhaupt nach moralischen Kriterien handeln? Was passiert, wenn wir die Fragen der Maschine so beantworten, dass sie sich gegen Mitmenschen richtet? Am Ende müssen wir überlegen, ob lernende Systeme eine eigene Rechtsprechung benötigen. Das alles hört sich momentan noch an wie Science-Fiction. Doch im Rahmen meiner Doktorarbeit konnte ich zeigen, dass einzelne Aspekte unserer Art des lebenslangen Lernens für Maschinen durchaus sowohl theoretisch als auch praktisch realisierbar sind. Wie wir mit diesem Wissen umgehen, werden wir erst lernen müssen.

Die dritte Blüte

Evolution der künstlichen Intelligenz

Seit Jahrhunderten versuchen Menschen, künstliches Leben zu schaffen. Im Barock gab es Puppen, die Liebesbriefe schrieben; 1738 baute der französische Erfinder Jacques de Vaucanson eine mechanische Ente, die, so schien es, Körner fressen und verdauen konnte.

Im 20. Jahrhundert rückte das Gehirn ins Blickfeld. Allmählich begann man zu verstehen, dass das Denken auf elektrischen Impulsen beruht. Das Gehirn, nichts als ein elektrischer Rechner?

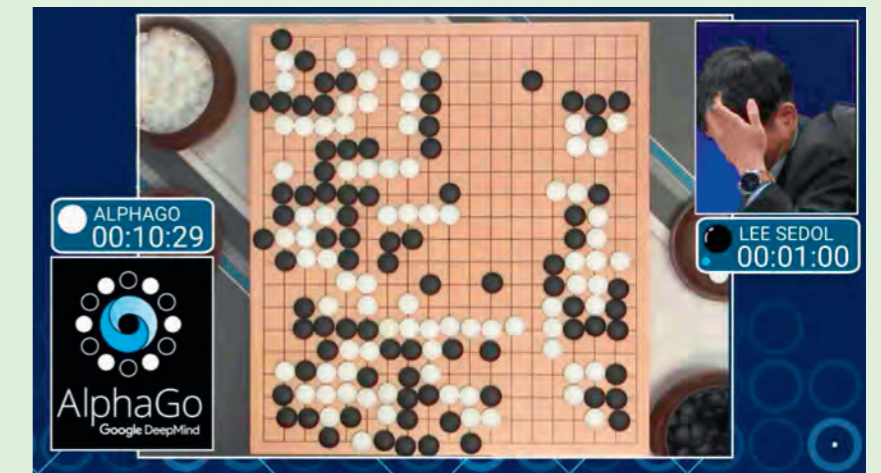
1958 entwarf Frank Rosenblatt das Perceptron, ein erstes „neuronales Netz“, ein lernfähiges Netzwerk mit Nerven aus Draht. Doch selbst die größten „Elektronengehirne“ der 1960er- und 1970er-Jahre konnten kaum runde von eckigen Bauklötzen unterscheiden. Erst die rasant wachsende Mathematik stellte zahlreiche neue Methoden zur Verfügung, mit denen sich ebenfalls so etwas wie intelligentes Verhalten simulieren lässt. Dafür reicht es, wenn Algorithmen aus der Vergangenheit lernen, in Zukunft Daten korrekt zu klassifizieren – und womöglich die Entscheidungen mit der Zeit anpas-

sen, so dass die Fehler immer weniger werden.

Gleichzeitig wurden Rechenleistung und Speicherplatz immer billiger – und die neuronalen Netze wieder aus den Schubladen geholt. Ende der 1980er-Jahre entwickelte der Informatiker Yann LeCun sie weiter: Mit seinen neuartigen Methoden begannen Computer Ende der 1990er-Jahre damit, Handschriften auf Briefumschlägen zu erkennen.

Doch während Hard- und Software exponentiell leistungsfähiger wurden, tauchte ein neues Problem auf: „Rohstoffknappheit“. Um zu lernen, Gesichter oder Zahlen von Buchstaben zu unterscheiden, brauchen die neuronalen Netze tausende Fotos. Die Algorithmen hungerten nach Daten, die erst das Internet in Hülle und Fülle lieferte.

Heute erleben wir die dritte Blüte der künstlichen Intelligenz, angetrieben durch Rechenleistung, schnelle Algorithmen und vor allem: klassifizierte Daten. Kein Wunder, dass Konzerne wie Apple und Google – Hüter gigantischer Datenschätze – treibende Kräfte beim Wachstum der künstlichen Intelligenz sind. – A. Loos



Lee Sedol gab alles – und schließlich auf. Gegen AlphaGo, Googles Computer-Go-Programm auf der Basis neuronaler Netze, hatte der Weltklassespieler 2015 keine Chance.

Berechenbarer Krebs

Was nach der Diagnose „Krebs“ folgt, ist von vielen Faktoren abhängig. Wenn es um den weiteren Verlauf der Erkrankung geht, kann Mathematik helfen. Ihre Anwendung in der Medizin eröffnet völlig neue Möglichkeiten – mit unmittelbaren Vorteilen für Patienten.

Von Marcel Mohr

Preisträger im Fachgebiet Mathematik

Herr H. (55) ist auf dem Weg ins Universitätsklinikum Heidelberg. Vor einem Jahr wurde bei ihm ein Asymptomatisches Multiples Myelom diagnostiziert – eine Krebserkrankung des blutbildenden Systems, die keine Symptome zeigt. Dem entsprechend gut geht es auch Herrn H. Doch muss er stets mit der Angst leben, dass sich das plötzlich ändert. Treten erst einmal Symptome auf, ist eine Behandlung der Erkrankung – dann Multiples Myelom genannt – mit einer Chemotherapie meist unumgänglich. Und deren langfristiger Erfolg ist kaum vorhersehbar. Herr H. ist verunsichert. Auch seine Ärztin würde sich eine präzisere Prognose wünschen, um bessere Therapien anzubieten, die im besten Fall das Fortschreiten zum Multiplen Myelom verhindern.

Derzeit wird eine Therapie in der Regel erst dann eingeleitet, wenn sich erste Symptome zeigen. Eine entscheidende Frage ist, inwiefern sich das Risiko für den Ausbruch der Krankheit berechnen lässt. Für ihre Beantwortung muss man die zeitliche Entwicklung der Tumormasse, also ihre Dynamik, verstehen.

Um das Ausmaß der Erkrankung von Herrn H. abschätzen zu können, nimmt seine Ärztin ihm regelmäßig Blut ab und untersucht dieses auf erhöhte Antikörperwerte. Antikörper stellen einen wesentlichen Bestandteil des Immunsystems dar. Sie zirkulieren im Körper, erkennen und binden Viren oder Bakterien, die dann von Zellen des Immunsystems eliminiert werden.

Die Gefahr steckt jedoch nicht in den Antikörpern selbst, sondern vielmehr in den Zellen, von denen diese produziert werden. Diese Zellen heißen Plasmazellen und befinden sich im Knochenmark, wo sie in den „Nischen“ vor allem eines produzieren: Antikörper. Bei diesen Nischen handelt es sich um spezielle „Ökosysteme“ im Knochenmark, die das Überleben der Plasmazellen garantieren.

Bei Herrn H. befinden sich im Knochenmark aber neben den gesunden

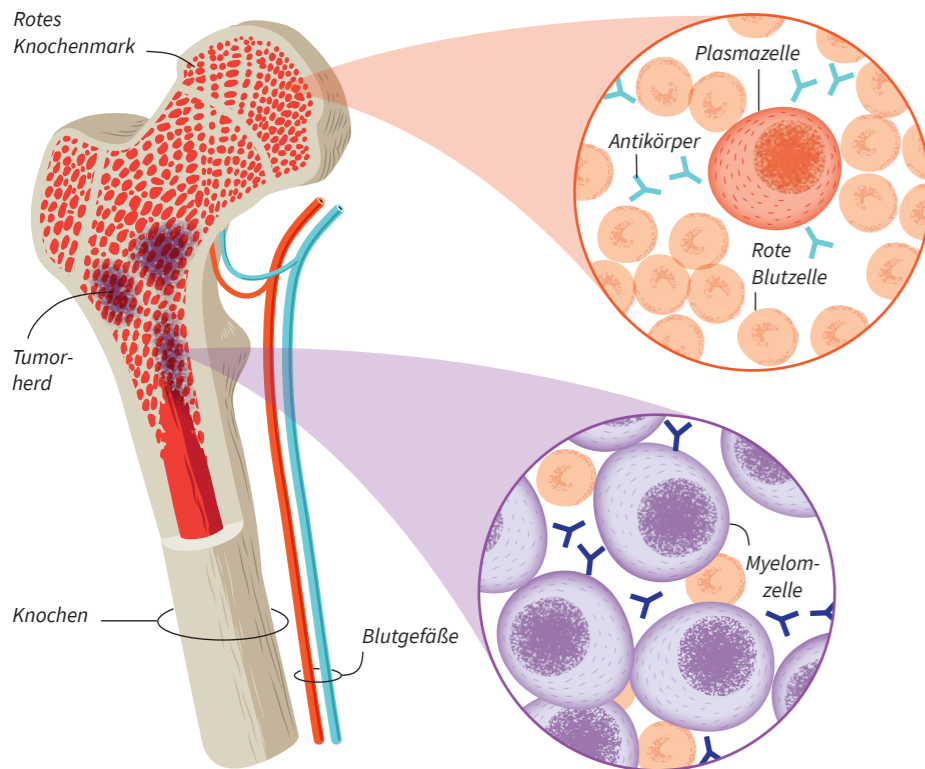
Plasmazellen auch maligne, also bösartige Plasmazellen. Diese unterscheiden sich in zweierlei Hinsicht von ihren gesunden Pendanten: Zum einen können sich maligne Plasmazellen teilen. Das heißt, eine maligne Plasmazelle kann eine immense Anzahl an gleichartigen Tochterzellen generieren – die Anzahl gesunder Plasmazellen bleibt dagegen im Verlauf eines Menschenlebens in etwa konstant. Zum anderen produzieren maligne Plasmazellen funktionslose Antikörper, die man im Blut nachweisen kann. Ihre Anzahl ist ein wichtiger Indikator, der auf die Zahl der malignen Plasmazellen im Knochenmark schließen lässt (siehe Bild Seite 30).

Fatalerweise verdrängen die malignen Plasmazellen die gesunden von ihren überlebenswichtigen Nischenplätzen im Knochenmark. Sie verursachen aber auch an anderen Stellen Schäden, beispielsweise im blutbildenden System, was zu Blutarmut führen kann. Auch können sie die Knochensubstanz schädigen. Dies sind typische Symptome des Multiplen Myeloms.

Die erhöhten Antikörperwerte im Blut von Herrn H. weisen darauf hin, dass sich im Knochenmark bereits maligne Plasmazellen befinden. Ihre Zahl ist aber noch zu gering, als dass sie seinem Körper schaden können. Nun aber zeigt der

Marcel Mohr

stammt aus Gießen, wo er 1986 zur Welt kam. Der Mathematiker studierte in Gießen und München. Seine Doktorarbeit schrieb er an der Universität Heidelberg: „Mathematical modelling of plasma cell dynamics in multiple myeloma“. Seit 2016 arbeitet Mohr dort und am Universitätsklinikum Heidelberg an der Anwendung mathematischer Modelle in der Medizin und den Biowissenschaften.



Im roten Knochenmark wird der größte Teil unseres Bluts gebildet. Dazu gehören auch die Plasmazellen, die beim Kontakt mit einem Erreger Antikörper produzieren, die diesen zerstören (oben). Bei dem Multiplen Myelom handelt es sich um eine Krebsform, die diese Blutbildung stört, indem sie krankhaft veränderte Plasmazellen im Übermaß erzeugt. Sie reichern sich im Knochenmark an, behindern die normale Blut- und Antikörperbildung und führen zur Auflösung des Knochens. Zudem produzieren sie veränderte Antikörper, was zur Folge hat, dass im Verlauf auch die Nieren geschädigt werden (unten).

aktuelle Blutwert einen leichten Anstieg der Antikörper, also eine Erhöhung der Anzahl maligner Plasmazellen durch Zellteilung. Herr H. fragt sich, wie schnell diese Zellteilung wohl in seinem Körper geschehen mag und ob er in naher Zukunft mit Symptomen und damit einer Chemotherapie rechnen muss.

Um diese Frage besser beantworten zu können, habe ich mithilfe eines mathematischen Modells – des „exponentiellen Wachstumsmodells“ – die zeitliche Entwicklung der Anzahl maligner Plasmazellen beschrieben. Es basiert auf der Annahme, dass sich die Zahl der Zellen von Herrn H. proportional zum aktuellen Zellbestand entwickelt.

Der Vorteil dieses Modells ist: Es gibt lediglich einen Parameter, nämlich die Wachstumsrate der malignen Zellpopulation. Ist diese Rate bekannt, so lässt sich die zeitliche Entwicklung maligner Zellen abschätzen. Insbesondere lässt sich damit eine sehr anschauliche Größe berechnen, nämlich die Verdopplungszeit.

Sie gibt diejenige Zeit an, die für eine Verdopplung der Anzahl maligner Plasmazellen notwendig ist. Um die Verdopp-

Hier zeigt sich die Stärke der Symbiose von Mathematik und Biologie, denn vergleichbare Erkenntnisse hätten durch biologische Experimente allein nicht gewonnen werden können.

lungszeit der malignen Plasmazellen im Knochenmark von Herrn H. zu berechnen, muss der Wert der Wachstumsrate derart bestimmt werden, dass das Modell

am besten die tatsächliche, mithilfe der Blutprobe von Herrn H. bestimmte Zellanzahl widerspiegelt. Ein Verfahren der mathematischen Optimierung, auch Parameterschätzung genannt, ermöglicht schließlich die Bestimmung des unbekanntes Wertes. Damit lässt sich nun die zukünftige Entwicklung der malignen Zellzahl im Knochenmark von Herrn H. prognostizieren.

Mithilfe des exponentiellen Modells konnte ich auf der Basis der Daten von über 500 Patienten – darunter auch Herr H. – die Verdopplungszeiten der malignen Plasmazellen bestimmen. So war es möglich, die Patienten in vier Gruppen unterschiedlicher Verdopplungszeiten zu kategorisieren, die von „sehr langsames Wachstum“ (mit Verdopplungszeiten von mehr als 16 Jahren) bis zu „sehr schnelles Wachstum“ (mit Verdopplungszeiten zwischen null und zwei Jahren) reichen. Da für jeden Patienten – im Unterschied zu Herrn H. – außerdem bekannt war, ob dieser innerhalb einer bestimmten Zeitspanne Symptome entwickelte, konnten diese Gruppen mit unterschiedlichen Progressionswahrscheinlichkeiten assoziiert werden. Vereinfacht ausgedrückt: Die Verdopplungszeit ermöglicht es, das Risiko des Fortschreitens zum Multiplen Myelom anzugeben. Zwar wird sie aktuell noch nicht als klinischer Parameter herangezogen, bietet aber das Potenzial, die offiziellen Diagnosekriterien des Multiplen Myeloms um eine leicht zu ermittelnde Größe zu erweitern.

Herr H. ist erleichtert. Die Auswertung der Verdopplungszeit ergab, dass seine Krebszellen sehr langsam wachsen. Würden sie sehr schnell wachsen, wäre er vermutlich spätestens in fünf Jahren ein symptomatischer Patient. Eine vorzeitige Therapie könnte in diesem Fall das Fortschreiten zum Multiplen Myelom zumindest verlangsamen. Bei der derzeitigen Verdopplungszeit liegt sein Risiko, in den nächsten Jahren Symptome zu entwickeln, jedoch lediglich bei 20 Prozent. Sowohl Herr H. als auch seine Ärztin können optimistisch in die Zukunft blicken.

Ein mathematisches Modell ist stets eine Vereinfachung der Realität. Fußt ein Modell auf vielen Annahmen, wird es schnell zu komplex und damit nicht handhabbar. Werden hingegen nur wenige oder unspezifische Annahmen getro-

fen, weicht es zu sehr von der Realität ab. Das exponentielle Modell ist eines der einfachsten Wachstumsmodelle. Doch ist das Wachstum der malignen Plasmazellen wirklich exponentiell? Kritik ist insofern gerechtfertigt, als dieses Modell weder Wechselwirkungen bösartiger mit gesunden Plasmazellen noch die Eigenschaften der Nische – jenes Ökosystems der Plasmazellen, welches deren Überleben garantiert – berücksichtigt.

Ich habe im Rahmen meiner Dissertation unter der Betreuung von Anna Marciniak-Czochra (siehe Interview) und

in Zusammenarbeit mit den Medizinern Dirk Hose und Anja Seckinger vom Labor für Myelomforschung des Universitätsklinikums Heidelberg Wachstumsmodelle entwickelt, die genau diese Bestandteile mitberücksichtigen und komplexer als das exponentielle Modell sind.

Eine Überprüfung der Modelle mit realen Patientendaten und mithilfe des Computers ergab, dass sie die zeitliche Änderung der Zellanzahl sehr genau beschreiben. So konnten wir das Wachstum maligner Plasmazellerkrankungen quantitativ beschreiben und sogar den Beginn

der malignen Zellentwicklung rekonstruieren – einen Zeitpunkt, an dem Herr H. noch nicht daran dachte, ins Krankenhaus zu gehen.

Hier zeigt sich die Stärke der Symbiose von Mathematik und Biologie, denn vergleichbare Erkenntnisse hätten durch biologische Experimente allein nicht gewonnen werden können. Das Wissen über die Entstehung und Entwicklung bösartiger Erkrankungen macht selbige nicht nur berechenbar, sondern weist auch den Weg für neue, patientenspezifische Therapieansätze.

„Wir müssen eine neue Mathematik entwickeln“

Ein Gespräch mit Anna Marciniak-Czochra, die mit ihren Rechenmodellen Ärzten bei der Therapie von Krebspatienten helfen will.



Anna Marciniak-Czochra ist Professorin am Institut für Angewandte Mathematik der Universität Heidelberg – und betreute die Doktorarbeit von Marcel Mohr.

Können Sie ein Beispiel aus Ihrer Arbeit nennen?

Wir modellieren seit über zehn Jahren verschiedene Leukämien. Das geschieht in enger Kooperation mit dem Universitätsklinikum Heidelberg und auf der Basis individueller Patientendaten. Zu Beginn studierten wir die Entwicklung gesunder Stammzellen, inzwischen modellieren wir die Störung dieses Prozesses durch verschiedene Mutationen.

Und warum gerade Leukämien?

Leukämien sind Krebserkrankungen, deren jeweiliger Verlauf quantitativ gut erfasst werden kann – beispielsweise, indem man die Anzahl der verschiedenen Blutkörperchen bei jeder Blutuntersuchung ermittelt. Deshalb eignen sie sich besonders gut für die mathematische Modellierung.

Was machen Sie dann mit diesem Modell?

Wir können mittlerweile die tatsächlichen Krankheitsverläufe bei Patienten nachzeichnen. Der nächste Schritt wäre nun, auf der Basis dieser Daten einen individuellen Rückfallzeitpunkt vorherzusagen. So könnten wir den Ärzten bestimmte Zeitabstände empfehlen, in denen ein bestimmter Patient erneut untersucht werden sollte.

Bislang geben Sie aber noch keine Behandlungsempfehlungen.

Nein, aber unsere Modelle in der Hämatologie sind schon derart gut entwickelt, dass es in wenigen Jahren so weit sein wird. In den USA spielt die Optimierung der Krebsbehandlung durch mathematische Modelle bereits jetzt eine wichtige Rolle. Ich möchte hier jedoch einem Missverständnis vorbeugen: Diese Modelle können die ärztliche Entscheidung natürlich nicht ersetzen, sie können Ärzten aber dabei helfen, möglichst gute Entscheidungen zu treffen.

Wo liegt die Herausforderung bei der Erstellung dieser Modelle?

Für solche medizinischen Fragen müssen wir ein Stück weit eine neue Mathematik entwickeln – das ist eine große Herausforderung, macht diese Arbeit aber auch so interessant. Mein eigener Schwerpunkt ist ja die Analysis, für diese Fragen arbeiten wir auch mit Statistikern zusammen und mit Arbeitsgruppen für Numerische Mathematik. Darüber hinaus gibt es noch weitere Kooperationen mit anderen Feldern der Mathematik. Und natürlich auch mit den Biologen und Medizinern. Ich sage meinen Studenten immer: Es ist nicht gut, wenn ihr allzu spezialisiert seid!

Die Fragen stellte Susanne Dambeck

„Damit der Funke überspringt“

Joachim Nagel gehörte zu den ersten Gewinnern des KlarText-Preises, Christiane Heinicke bekam ihn 2013. Hier erzählen die beiden, warum ehrliches Feedback hilft und was ein guter Vortrag braucht.



Joachim Nagel (51) ist Generalbevollmächtigter der KfW-Bankengruppe in Frankfurt, im November 2017 wird er Vorstand. Der Volkswirt hat in Karlsruhe studiert und 1998 den Klaus Tschira Preis für Wissenschaftskommunikation gewonnen. Von 1999 bis 2016 machte er Karriere bei der Deutschen Bundesbank, wo er zuletzt im Vorstand saß. Bei der KfW ist er fürs Auslandsgeschäft zuständig. Die Bankengruppe fördert Hausbau, Energieeffizienz, Unternehmen und Gründer sowie Entwicklungsprojekte im Ausland.

Frau Heinicke, Herr Nagel, worum ging es in Ihren Doktorarbeiten?

Heinicke: Bei mir ging es darum, die Strömung von Metallschmelzen zu messen. Wenn man zum Beispiel Stahl durch ein Rohr gießt, kann er sich an den Rändern absetzen und das Rohr verstopfen. Das ist sehr teuer und auch gefährlich. Ich habe ein Verfahren entwickelt, mit dem man mithilfe von Magnetfeldern die Strömung von außen messen und kleine Verklumpungen rechtzeitig finden kann.

Nagel: Ich habe die Steuerpolitik in den USA unter Präsident Ronald Reagan untersucht. Und ich hätte nie gedacht, dass das Thema mal wieder so en vogue sein würde. Erst kürzlich habe ich einen Vortrag darüber gehalten, und ich wäre ganz froh, wenn Donald Trump meine Doktorarbeit lesen würde.

Was könnte Trump von Ihrer Arbeit lernen?

Nagel: Reagans Strategie ging davon aus, dass der Mensch anreizgetrieben ist. Wenn man ihn steuerlich entlastet, ist er bereit, mehr zu tun. Das kurbelt das Wirtschaftswachstum an. Das will auch Trump, nur hat es schon bei Reagan nicht funktioniert.

Anfangs wurde der Preis auch in den Wirtschaftswissenschaften verliehen. Diese sind nun nicht mehr vertreten.

Nagel: Das finde ich schade. Die meisten Menschen wissen mehr über Autos als über Altersversorgung, und meiner Meinung nach trägt die Wissenschaft mit dazu bei, weil sie bestimmte Themen nicht in eine verständliche Sprache übersetzt. Ronald Reagan hatte auch keine Ahnung von Steuerpolitik, aber es gibt da eine Anekdote, die Napkin-Story. Reagan traf sich in einem Restaurant mit dem Ökonom Arthur Laffer, der malte ihm eine Steuerkurve auf die Serviette und erklärte ihm seine Strategie. Und Reagan wusste sofort, was gemeint war. Er hatte in den 1940er-Jahren viele B-Movies gedreht, aber nie mehr als vier pro Jahr, denn die Gage für den fünften hätte der

Fotos: Nathalie Zimmermann

Staat ihm voll wegbesteuert. Solche Anekdoten baue ich gern in meine Vorträge ein, die machen das Ganze anschaulich.

Heinicke: Leider tun das nur wenige. Bei Fachkonferenzen reden viele in unglaublich komplizierten Formeln. Keiner versteht es, aber keiner gibt es zu. Will ja keiner dumm dastehen.

Nicht einmal die Fachkollegen verstehen den Vortrag?

Heinicke: Ich wette, dass bei einem schlechten Konferenzvortrag mindestens zwei Drittel der engen Kollegen nicht genau verstehen, worum es geht. Am beliebtesten sind immer die Vorträge, die man versteht, auch wenn sie fachlich nicht die tollsten sind.

Nagel: Jede Disziplin hat ein Fachchinesisch entwickelt. Wir Banker reden bei Geld immer von Liquidität. Doch mit dem Wort hängt man bei einem Vortrag schon die ersten Zuhörer ab.

Heinicke: Wenn man ständig mit Fachkollegen zusammenhängt, neigt man einfach dazu, sich auf sehr hohem Niveau zu unterhalten. Ich muss meinen Kollegen nicht erklären, was die Navier-Stokes-Gleichungen sind. Doch wenn ich mit meiner Oma spreche, muss ich das natürlich übersetzen. Vor allem darf ich viel weniger voraussetzen.

Worauf achten Sie, wenn Sie Vorträge halten?

Nagel: Ich trage immer frei vor und baue Anekdoten ein, das ist ein bisschen lebendiger. Wenn man abliest, setzt irgendwann die Monotonie ein.

Heinicke: Nur wenn ein Vortrag perfekt getimt sein muss, formuliere ich ihn vorher aus und lerne ihn auswendig. Aber selbst dann improvisiere ich hier und da.

Haben Sie im Studium schon allgemeinverständliche Artikel geschrieben?

Heinicke: Ich schon. Das war eine spannende Herausforderung. Normalerweise denke ich in kleinen Details, und das wieder aufs große Ganze runterzubereiten, das kostet am meisten Arbeit.

Konnten Sie das Erklären mit Familie oder Freunden üben?

Heinicke: Ich habe den ersten Entwurf meiner Familie gegeben. Die fand ihn furchtbar schlecht. Der Kommentar lautete: Versteh ich nicht. Ich habe ihn noch dreimal überarbeitet.

Nagel: So ein Schreibprozess hat immer Höhen und Tiefen. Und wenn man viel Herzblut reingesteckt hat, erwartet man, dass jemand sagt: „Hey, super!“ Wenn das nicht kommt, tut es weh. Daran kann ich mich auch erinnern.

Heinicke: Mir ist so ein ehrliches Feedback lieber als ein „Ist ganz nett“, und dann reiche ich den Text ein und er hat nicht mal eine Chance.

Inwiefern hat Ihnen der KlarText-Preis geholfen?

Nagel: Mir hat er sehr geholfen – Dank an die Klaus Tschira Stiftung. Ich werde immer wieder darauf angesprochen, selbst nach 20 Jahren noch. Und man nimmt auch die Botschaft mit, komplexe Themen einem breiten Publikum zu vermitteln. Ich finde, die Wissenschaft muss raus aus ihrem Elfenbeinturm. Sie leistet – oft mit Steuergeldern – einen gesellschaftlichen Beitrag, der muss auch vermittelbar sein. Zum Glück gibt es immer mehr Forscher, die sich darum bemühen.

Frau Heinicke, Sie gehören zu diesen Forschern und haben ein Buch über Ihre simulierte Marsmission geschrieben. Half Ihnen der Preis dabei?

Heinicke: Auf jeden Fall! Da wächst ja auch eine Erwartungshaltung beim Publikum: Frau Heinicke hat einen Preis für verständliche Wissenschaft bekommen, dann wird sie wohl auch ein gutes Buch schreiben können.

Was raten Sie jungen Wissenschaftlern?

Heinicke: Früh anfangen mit dem Vortragen und Schreiben. Viel üben. Und menschliche Geschichten einbauen. Gerade im technischen Bereich ist das schwierig, aber es zahlt sich aus. Weil es den Zuhörern dann leichter fällt, einen Bezug zu ihrem Leben herzustellen.

Nagel: Ich würde sagen, wenn du etwas mit echtem Spaß und echter Freude tust, dann merken das auch andere. Dann springt der Funke über.

Die Fragen stellte Hiltrud Bontrup



Christiane Heinicke (31)

ist Geophysikerin. Sie studierte an der Technischen Universität Ilmenau und machte ihren Master in Schweden. Im Rahmen des HI-SEAS-Projekts auf Hawaii simulierte sie ein Jahr lang mit fünf weiteren Wissenschaftlern das Leben auf dem Mars. Heinicke hat über ihre Erlebnisse gebloggt und ein Buch geschrieben. Derzeit entwickelt sie am Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM) in Bremen ein Habitat, das mit geschlossenen Luft- und Wasserkreisläufen für den Aufenthalt auf Mars und Mond geeignet ist.

Auf der falschen Fährte

Kommunikation ist der Schlüssel zum Erfolg – auch bei der Fortpflanzung: Nur wenn Spermien die chemischen Signale der Eizelle richtig interpretieren, schaffen sie die beschwerliche Reise durch den Genitaltrakt der Frau. Doch Chemikalien, denen wir im Alltag ausgesetzt sind, können die Sensoren der Spermien gehörig stören.

Von **Christian Schiffer**

Preisträger im Fachgebiet Biologie

Viele tausend Paare suchen jährlich ärztlichen Rat, weil ihr Kinderwunsch unerfüllt bleibt. Auch wenn sich mittlerweile viele Fruchtbarkeitsstörungen mithilfe der Reproduktionsmedizin überwinden lassen, bleiben die eigentlichen Ursachen oft rätselhaft. Forscher vermuten, dass Störungen im hormonellen Botenstoffsystem von Zellen dabei eine Rolle spielen. Dabei geht es um die chemische Kommunikation zwischen der reifen Eizelle im hinteren Teil des Eileiters und den orientierungslosen Spermien, die darauf warten, dass die Eizelle ihnen den Weg weist.

Dazu schütten sogenannte Kumuluszellen, die die Eizelle wolkenartig einhüllen, einen Hormon-Cocktail in die Eileiterflüssigkeit aus – ein Hauptbestandteil ist das Sexualhormon Progesteron. Spermien besitzen in der Membran ihres Schwanzes einen speziellen Sensor dafür. Bei diesem „CatSper“ (Cation Channel of Sperm) genannten Protein handelt es sich um einen sogenannten Ionenkanal, der als molekulare Schleuse den Fluss von Kalziumionen von außen in das Spermium hinein kontrolliert. Sobald Progesteron den CatSper-Kanal aktiviert, lässt dieser innerhalb von Millisekunden Kalziumionen ins Spermium einströmen. Die Folge: Das Schwimmverhalten der Spermien verändert sich derart, dass

diese der Progesteronfährte bis zur Eizelle folgen.

Neben dieser Wirkung als „Lockstoff“ hat Progesteron noch weitere Einflüsse auf die Spermien. In unmittelbarer Nähe zur Eizelle, dort, wo die Konzentration des Hormons am höchsten ist, fordert es – gemeinsam mit anderen Botenstoffen – die Spermien zu einem letzten Kraftakt heraus: Sie beginnen nun besonders kraftvoll mit dem Schwanz zu schlagen und setzen zu dem als „hyperaktiv“ bezeichneten Schwimmstil an. Er ist notwendig, um sich in der zähen Schutzhülle

des Eis zu bewegen. Sobald sie das Ei erreicht haben, wird zudem die Freisetzung von Verdauungsenzymen aus dem Spermienkopf ausgelöst. Beide Vorgänge sind die Voraussetzung dafür, dass das Spermium die zähe Schutzhülle der Eizelle durchdringen und diese dann befruchten kann. Jener CatSper-Kanal ist für diese hormonelle Kommunikation zwischen Eizelle und Spermien absolut entscheidend – fehlt er oder funktioniert er nicht, ist der Mann zeugungsunfähig.

Gerade hormonelle Kommunikationswege sind allerdings anfällig für diverse Störungen. Seit über 50 Jahren weiß man bereits, dass sie von bestimmten Chemikalien beeinflusst werden können. Sogenannte endokrine Disruptoren (Endocrine Disrupting Chemicals: EDCs) können die Wirkung natürlicher Hormone auf Zellen imitieren. Das Pestizid DDT ist ein prominenter Vertreter dieser Störer des Hormonsystems: Die Wunderwaffe gegen Insekten führte nach dem Zweiten Weltkrieg beinahe zur Ausrottung des Weißkopfseeadlers in den USA. Das Insektizid war in die Nahrungskette gelangt und hatte unter anderem dazu geführt, dass die Schalen der Adlereier im Horst zerbrachen. Ein Beispiel für die tragischen Folgen für den Menschen ist das werdenden Müttern verabreichte Medikament Diethylstilbestrol, kurz DES, welches bis in die 1970er-Jahre hinein

Christian Schiffer

kommt aus Grevenbroich, wo er 1987 geboren wurde. Er studierte Biochemie in Düsseldorf und wechselte für seine Masterarbeit nach Bonn zum Forschungszentrum caesar der Max-Planck-Gesellschaft. Seinen Dokortitel erhielt er im Fach Chemie von der Universität zu Köln für die Arbeit „Wirkung von Umweltchemikalien und Progesteron auf menschliche Spermien“. Seit 2016 arbeitet Schiffer am Centrum für Reproduktionsmedizin und Andrologie des Universitätsklinikums Münster.

Foto: Ute Friederike Schernau

durch seine unentdeckte hormonähnliche Wirkung tausendfach zu gravierenden Schwangerschaftskomplikationen führte.

EDCs sind heute in der Umwelt allgegenwärtig – etwa in Gestalt von Pestizidrückständen in Lebensmitteln. Chemikalien, die als EDCs wirken können, werden aber manchen Produkten wegen ihrer besonderen Eigenschaften auch gezielt

Diese Störer des Hormonsystems sind heute in der Umwelt allgegenwärtig.

zugesetzt – etwa als Konservierungsstoffe in Lebensmitteln, Weichmacher in Kunststoffen oder als Zusätze in Futtermitteln für die Tiermast. Die von diesen Substanzen verursachten hormonellen Ungleichgewichte könnten auch die Fruchtbarkeit beeinträchtigen – jedenfalls lassen einige medizinische Studien den Verdacht aufkommen, dass eine erhöhte Belastung durch EDCs zum Beispiel mit genitalen Fehlbildungen oder einer reduzierten Spermienproduktion in Verbindung stehen könnte. Daher habe ich mich dieser weitgehend unerforschten Frage gestellt: Wie reagieren menschliche Spermien auf EDCs?

Dazu habe ich zunächst die hundert am weitesten verbreiteten EDCs daraufhin durchmustert, ob sie in den Kalziumhaushalt menschlicher Spermien eingreifen. Die Spermien wurden mit einem Indikatorfarbstoff beladen, der Änderungen des Kalziumgehalts im Spermium optisch messbar macht. Viele Chemikalien, darunter auch der besonders bedenkliche Kunststoffweichmacher Bisphenol

A, zeigten keine Wirkung. Aber: Rund ein Drittel jener 100 Chemikalien löste tatsächlich einen Kalziumstrom in die Spermien aus.

Neben UV-Blockern wie Enzacamen (4-MBC), das in Sonnenschutzmitteln und Kosmetika enthalten ist, gehören der Kunststoffweichmacher Dibutylphthalat, das Mastmittel α -Zearalenol oder das antimikrobielle Triclosan in mancher Zahnpasta zu den „aktiven“ EDCs – einer überaus heterogenen Gruppe von Chemikalien im Hinblick auf ihre chemischen Eigenschaften und die Pfade, über die sie von uns aufgenommen werden.

Nun galt es zu überprüfen, ob der EDC-vermittelte Kalziumstrom tatsächlich über den Ionenkanal CatSper erfolgt oder ob womöglich ein anderer Mechanismus dahintersteckt. Dazu haben wir, ganz ähnlich wie bei der Erstellung eines Elektrokardiogramms, die winzigen, charakteristischen Ströme gemessen, die durch CatSper fließen. Und tatsächlich zeigte sich dabei: Die von uns analysierten EDCs öffnen den CatSper-Kanal genauso wie das natürliche Hormon Progesteron.

Noch besorgniserregender ist aber, dass EDCs die Spermien zusätzlich „blind“ für das natürliche Progesteron machen. Der UV-Blocker 4-MBC beispielsweise reduziert die Progesteronempfindlichkeit der Spermien um etwa 50 Prozent. Damit war klar: Mit der Hypothese, auf der das Projekt gegründet worden war, hatten wir ins Schwarze getroffen. Aber verblüfft – und auch ein wenig bedrückt – waren wir trotzdem, als wir uns dieser klaren und eindeutigen Datenbasis gegenübersehen.

Um die Wirkung der EDCs noch genauer zu verstehen, habe ich deren Einfluss auf das Schwimmverhalten der Spermien untersucht. Das Schlagmuster

des Spermischwanzes lässt sich mit einer Kamera aufzeichnen und analysieren. Unter Ruhebedingungen ist es gleichmäßig und symmetrisch. Gibt man aber den UV-Blocker 4-MBC zu, nimmt die Schlagfrequenz deutlich ab und das Schlagmuster wird asymmetrisch (siehe Bild unten). Dieses Schwimmen ähnelt jener „hyperaktiven“ Fortbewegung, wie sie nach der Stimulation durch das natürliche Hormon Progesteron beobachtet wird. Auch die Freisetzung des Enzym-Cocktails, der dem Spermium hilft, zur Eizelle vorzudringen, wird von den EDCs ausgelöst.

Damit liegt die Frage auf der Hand, welche Folgen dies nun für die Fortpflanzung haben könnte. Im Gegensatz zu dem natürlichen Progesteron sind die EDCs nicht nur in der Nähe der Eizelle zu finden, sondern kommen überall vor.

Als wir uns dieser eindeutigen Datenbasis gegenübersehen, waren wir verblüfft – und auch ein wenig bedrückt.

Und das könnte fatale Konsequenzen haben. Denn der Enzymvorrat eines jeden Spermiums kann nur einmal freigesetzt werden. Wenn also die Spermien durch die EDCs schon verfrüht zur Ausschüttung angeregt werden, bleiben sie womöglich in der Eihülle stecken. Wenn sie denn überhaupt ankommen: Lösen EDCs die hyperaktive und Kräfte zehrende Bewegung nämlich bereits weit entfernt von der Eizelle aus, bleiben die Spermien womöglich auf der Strecke. Hyperaktive Spermien können sich zwar innerhalb

der zähen Schutzhüllen des Eis fortbewegen, beim Langstreckenschwimmen durch den Eileiter aber versagen sie.

„Alle Dinge sind Gift, und nichts ist ohne Gift; allein die Dosis macht, dass ein Ding kein Gift sei“ – der Grundsatz des Paracelsus gilt natürlich auch in diesem Fall. Tatsächlich nehmen wir täglich nur Spuren dieser Substanzen auf, sodass in der Fachwelt heftig debattiert wird, ob solche Mengen überhaupt eine Gefahr für unser Hormonsystem darstellen und ob die Erkenntnisse aus Laborversuchen auf das reale Leben übertragbar sind.

Ich habe daher die Dosisbereiche bestimmt, in denen die EDCs auf Spermien wirken – mit ernüchterndem Resultat: Manche EDCs haben eine Wirkung auf Spermien in Dosisbereichen, wie man sie tatsächlich auch im menschlichen Körper nachgewiesen hat. Unter Umständen könnten also bereits einzelne EDCs in den sehr geringen Konzentrationen, in denen sie im Körper vorkommen können, Spermien von ihrem Weg zur Eizelle abbringen.

Im Alltag sind wir allerdings vielen verschiedenen EDCs gleichzeitig ausgesetzt. Ich konnte zeigen, dass sich in „EDC-Cocktails“ die Wirkungen der einzelnen Substanzen addieren und zu einer Aktivierung des Ionenkanals der Spermien führen. Dieses Zusammenspiel verschiedener EDCs ist von großer Bedeutung: Selbst wenn es für einzelne Stoffe „sichere Grenzwerte“ gäbe, könnten sie in der Summe mit anderen EDCs trotzdem fatale Folgen haben. Für die Erarbeitung zukünftiger Richtlinien ist dieses Ergebnis sehr wichtig: Anstatt Grenzwerte für einzelne Chemikalien zu bestimmen, wie es heute gängige Praxis ist, sollten neue Normen auch die Wirkungen mehrerer Substanzen berücksichtigen. ●

Hindernislauf über 20 Zentimeter

Das Wunder des Lebens beginnt mit einem Kampf ums Überleben. Von den rund 300 Millionen Spermien, die sich auf den gut 20 Zentimeter langen Weg zur reifen Eizelle machen, schaffen es höchstens ein paar hundert bis in den Eileiter. Der größte Teil der Samenzellen stirbt noch in der Scheide ab.

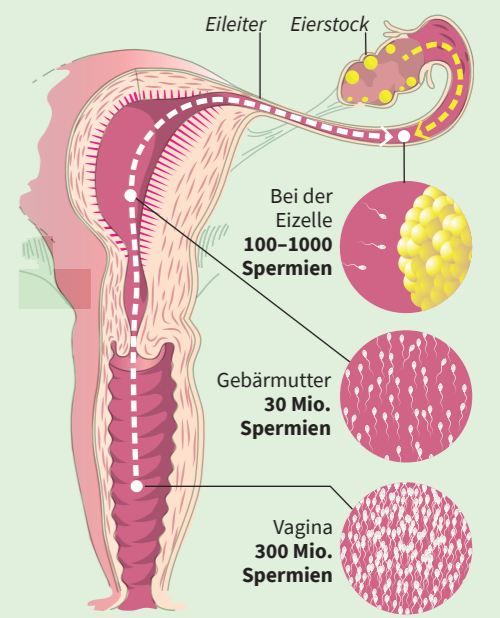
Die, die es von dort bis in die Gebärmutter schaffen, müssen die nächste Hürde nehmen. Nur in der Zeit um den Eisprung geht es hier überhaupt weiter – dann löst sich ein Schleimpfropfen, der den Muttermund sonst verschließt, und gibt den Weg frei. Aber auch hier ist für viele Spermien Schluss.

Während der kurzen Zeit der Empfängnisbereitschaft bietet der ansonsten undurchdringliche Zervixschleim den Überlebenden nun alles, was sie brauchen. Er nährt sie mit speziellen Zuckerstoffen, hält sie beweglich und weist ihnen mittels verschiedener Signale den Weg zum Ei. Die schnellsten Spermien schaffen die Strecke in einer Dreiviertelstunde, die letzten trudeln nach etwa zwölf Stunden ein.

Doch auch jetzt, wenige Millimeter vor dem Ei, ist noch nichts entschieden. Die Wahrscheinlichkeit, dass am Ende ein Spermium das Rennen macht, die Hülle der reifen Eizelle durchdringt und mit ihrem Kern verschmilzt, liegt pro Zyklus je nach Alter, Lebensumständen und Veranlagung bestenfalls bei 25 Prozent.

Wenn es aber auch nach vielen Versuchen nicht klappen will, ist Mann oder Frau womöglich unfruchtbar – in etwa der Hälfte dieser Fälle liegt die Ursache bei ihm. Mittlerweile deutet vieles darauf hin, dass Umweltfaktoren einen maßgeblichen Einfluss auf die in den Industrienationen steigende Zahl zeugungsunfähiger Männer haben.

So fand ein Team um Matthieu Rolland vom Institut de Veille Sanitaire in Paris-Saint Maurice 2013 heraus, dass die Gesamtzahl der Sper-



Von den über 300 Millionen Spermien schaffen es lediglich etwa zehn Prozent bis in die Gebärmutter. Ein paar hundert erreichen schließlich den Eileiter. Am Ende befruchtet aber nur ein einziges von ihnen die Eizelle.

mien und die Zahl der normal (also nicht miss-)gebildeten Spermien bei über 26.000 französischen Männern in dem Zeitraum von 1989 bis 2005 um jeweils ein Drittel zurückgingen. 2017 meldete ein Team um Hagai Levine von der Hebrew University in Jerusalem, dass die Konzentration von Spermien pro Milliliter Sperma bei Männern aus Nordamerika, Europa, Australien und Neuseeland zwischen 1973 und 2011 um mehr als 50 Prozent sank.

Wenngleich die Spermienzahl allein nichts über die Fertilität aussagt, vermuten viele Wissenschaftler, dass für diesen Rückgang auch der zunehmende Einfluss jener endokrinen Disruptoren verantwortlich ist, die in Lebensmitteln, Plastik, Textilien, Kosmetika und vielen anderen Dingen vorkommen. – J. Schüring



Schlagmuster des Schwanzes ein- und desselben Spermiums, entstanden durch Überlagerungen der Aufnahmen einer Hochgeschwindigkeitskamera (250 Bilder pro Sekunde). Links ist das typisch symmetrische, normale Schlagmuster zu sehen. Nach der Zugabe des UV-Blockers 4-MBC wird die Bewegung asymmetrisch (rechts).

Bilder (li.): aus: Schiffer et al. (2014): Direct action of endocrine disrupting chemicals on human sperm. EMBO Reports 15(7), 758-765; Illustration: Mario Mensch

Auf und Ab im Erdmantel

Das Erdinnere ist ständig in Bewegung. Heißes Gestein steigt auf und führt zu heftigen Vulkanausbrüchen. Neu entwickelte Computermodelle zeigen, in welchen Fällen diese Naturkatastrophen besonders verheerend sind – und sogar das Leben auf der Erde bedrohen können.

Von **Juliane Dannberg**

Preisträgerin im Fachgebiet Physik

Wer in einem Naturkundemuseum schon mal ein Dinosaurierskelett betrachtet hat, weiß, welche Faszination diese majestätischen Wesen auf uns ausüben können. Warum diese riesigen Tiere einst ausstarben, bleibt bis heute eine spannende Frage. Viele Forscher gehen davon aus, dass ein gut zehn Kilometer großer Meteorit dafür verantwortlich war. Er schlug vor 66 Millionen Jahren auf der mexikanischen Halbinsel Yukatan ein und führte weltweit zu drastischen Klimaveränderungen. Doch jene Zeit war auch geprägt von weltweit heftiger Vulkanaktivität, die mehrere hunderttausend Jahre andauerte. Auch sie machte die Erde zu einem lebensfeindlichen Ort.

Eines jedenfalls ist gewiss: Damals, an der Grenze zwischen Kreide und Tertiär, wurden innerhalb kurzer Zeit fast drei Viertel aller Tier- und Pflanzenarten ausgelöscht. Im Rahmen meiner Doktorarbeit interessierte ich mich für die Frage, ob der weltweite Vulkanismus tatsächlich auch allein für das Massensterben verantwortlich gewesen sein könnte.

Seinen Ursprung hat der Vulkanismus in dem etwa 2900 Kilometer mächtigen Erdmantel, der unterhalb der nur wenige dutzend Kilometer dicken Erdkruste liegt. Beide Schichten bestehen augenscheinlich aus festem Gestein. Aufgrund

des hohen Drucks und der hohen Temperaturen in einigen dutzend Kilometern Tiefe verhält der Erdmantel sich auf Zeitskalen von Jahrtausenden aber wie ein sehr zähflüssiger Sirup. Er grenzt in der Tiefe an den Erdkern, der die Gesteinsmassen des unteren Mantels aufheizt, sodass sich diese ausdehnen und in der Folge aufgrund ihrer geringen Dichte nach oben steigen. An anderer Stelle sinkt kälteres, dichteres Gestein in die Tiefe. Im Erdmantel gibt es daher einen Kreislauf aus auf- und absteigenden Gesteinsmassen – das funktioniert wie in einer Lavalampe, nur eben in geologischen Zeiträumen (siehe Kasten Seite 41).

Juliane Dannberg

ist Jahrgang 1988 und stammt aus Jena. Die Geophysikerin studierte in ihrer Heimatstadt und promovierte 2016 am GeoForschungs-Zentrum in Potsdam mit der Arbeit „Dynamics of mantle plumes: Linking scales and coupling physics“. Im Anschluss daran ging sie in die USA. Derzeit arbeitet sie als Postdoctoral Fellow an der Colorado State University in Fort Collins über die Modellierung von Prozessen im Erdmantel.

Wenn heißes Gestein aufsteigt, sinkt auch der Druck der Umgebung. Die Folge: Es beginnt zu schmelzen und kann schließlich die Erdoberfläche erreichen. Aus der Erdgeschichte wissen wir, dass

Der Erdmantel funktioniert wie eine Lavalampe.

einige besonders heftige Phasen gehäufte Vulkaneruptionen zeitgleich mit massenhaftem Artensterben stattfanden – so geschehen auch vor 65 Millionen Jahren, als die Dinosaurier verschwanden. Damals wurden ungeheure Mengen von Asche und Gasen wie Kohlenstoffdioxid oder Chlorwasserstoff freigesetzt, die das Klima der Erde nachhaltig veränderten.

Allerdings kommt es dabei auf die Art des aufsteigenden und schmelzenden Gesteins an. Peridotit etwa, der Hauptbestandteil des Erdmantels, schmilzt erst bei sehr hohen Temperaturen und setzt beim Schmelzen vergleichsweise wenig klimawirksames Gas frei. Ein anderes Gestein, der Pyroxenit, schmilzt hingegen schon bei relativ niedrigen Temperaturen, sodass das Volumen des Magmas steigt.

Juliane Dannberg

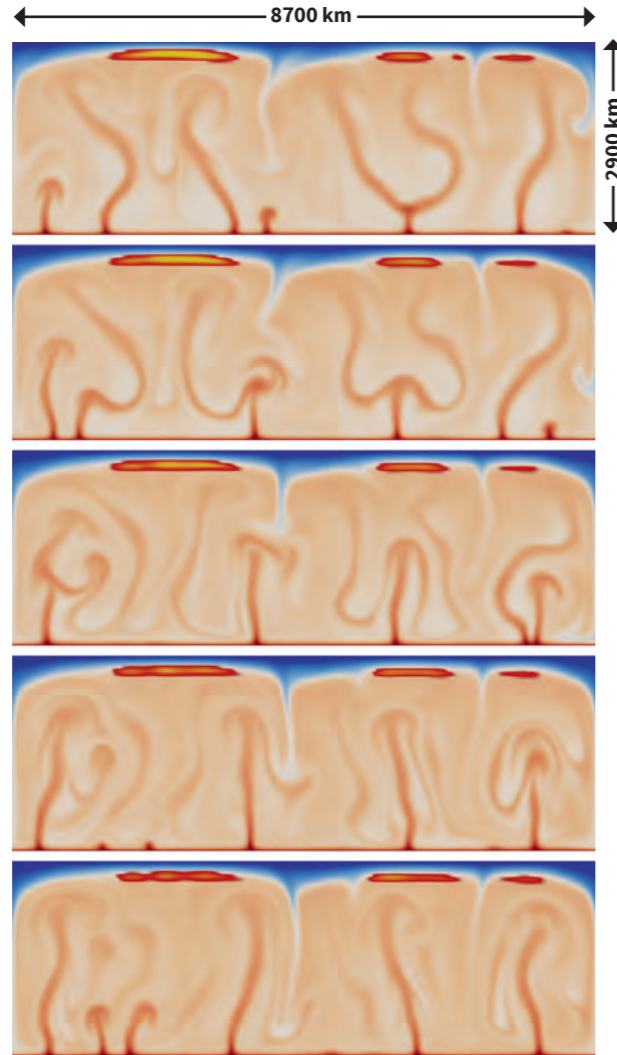
Andererseits hat der Pyroxenit eine hohe Dichte und verringert deshalb die Geschwindigkeit der nach oben drängenden Gesteinsmassen. Diese sogenannten Plumes, pilzförmig aufsteigende heiße Gesteinsströme, kann man sich vorstellen wie einen Heißluftballon: Die Luft im Ballon – also die Gesteinsmasse im Erdinneren – wird erwärmt und steigt aufgrund ihrer geringeren Dichte auf. Durch den Korb und die Insassen darin wird der Ballon aber schwerer, und ab einem bestimmten Gewicht steigt er einfach nicht mehr weiter nach oben.

Übertragen auf den Erdmantel stellt sich die Frage, wie viel Pyroxenit in diesen Plumes so weit aufsteigen kann, dass er die festen Gesteinsschichten durchbrechen kann – und ob die von den Vulkanen weltweit freigesetzten Gasmengen ausreichen, um ein Massensterben auszulösen.

Im Rahmen meiner Doktorarbeit erstellte ich Computermodelle, mit denen ich die Bewegungen unterschiedlich zusammengesetzter Gesteinsmassen im Erdinneren nachvollziehen kann. Die grundlegenden Gleichungen, die diese von Dichteunterschieden angetriebenen Bewegungen beschreiben, sind zwar schon seit den 1950er-Jahren bekannt, aber erst durch die zunehmende Rechenleistung von Computern in den letzten Jahrzehnten kann man diese Gleichungen auch lösen. Schwierig war auch die Bestimmung der Antriebskraft in den Gleichungen, also welche Dichte Gesteine verschiedener chemischer Zusammensetzung bei den im Erdinneren herrschenden Temperaturen und Drücken haben – schließlich reicht das tiefs-

Das feste Gestein des Erdmantels bewegt sich wenige Zentimeter im Jahr.

te jemals gebohrte Loch, in dem solche Parameter gemessen werden können, gerade einmal zwölf Kilometer tief. Die Mantelströme haben ihren Ursprung aber in einigen tausend Kilometern Tiefe. Allein die Temperaturen ändern sich während ihres Aufstiegs um mehrere tausend Grad Celsius.



So sehen beispielhaft die auf- und absteigenden Mantelströme (Plumes) in der Computersimulation aus. Die Bewegungen ähneln ein bisschen dem Auf und Ab der Tropfen in einer Lava-lampe. Zwischen den einzelnen Bildern liegt ein Zeitraum von jeweils fünf Millionen Jahren. Die kalten Gesteinsschichten der festen Lithosphäre sind blau eingefärbt, in den linsenförmigen gelben und roten Bereichen schmilzt das Gestein.

Mittlerweile sind Forscher aber in der Lage, diese extremen Bedingungen im Labor zu simulieren, sodass wir über die physikalischen und chemischen Zustände im Erdinneren recht gut Bescheid wissen. Während in bisherigen Modellen oft konstante Werte oder einfache Näherungen für die Gesteinsdichte verwendet wurden, habe ich die Ergebnisse dieser Experimente in meine Simulationen mit einfließen lassen. Dabei fand ich heraus, dass das aufsteigende Gestein einen Anteil von bis zu 15 Prozent Pyroxenit nach oben tragen kann – mit der Folge, dass das Volumen des Magmas wesentlich größer ist als beim Aufschmelzen des „normalen“ Mantelgesteins.

Für das Ausbrechen der Vulkane ist aber nicht nur entscheidend, wie viel Magma entsteht, sondern auch, wie es sich bewegt. Dies ist ein weitaus schwierigeres Problem, weil das Magma innerhalb der Lithosphäre in Kanälen von wenigen Kilometern Breite und mit Ge-

schwindigkeiten von mehreren Metern pro Jahr aufsteigt. Im Vergleich dazu ist der Erdmantel mehrere tausend Kilometer groß und das feste Gestein kommt nur wenige Zentimeter im Jahr voran. Es ist also eine Herausforderung, beide Prozesse zusammen in einem Modell zu betrachten.

Um die Bewegungen im Erdmantel abzubilden, habe ich den modellierten Bereich mithilfe eines virtuellen Gitters unterteilt. Das Ganze ähnelt dem Aufbau eines Digitalfotos. Während die einzelnen Pixel Informationen über Helligkeit und Farbe enthalten, berechnet der Computer für die einzelnen Zellen meines Modells Parameter wie Temperatur, Druck, chemische Zusammensetzung und Aufstiegsgeschwindigkeit des Plumes.

Um in der Analogie zum Foto zu bleiben: Wer seine Freunde vor einer Bergkulisse abbilden möchte, kann entweder ein Panoramabild oder ein Porträt auf-

nehmen. Beim Panoramabild sieht der Betrachter, wo die Freunde stehen, kann aber die Gesichter nicht mehr im Detail erkennen. Bei dem Porträt hingegen sieht man zwar das Gesicht klar und deutlich, aber nicht mehr den ganzen Hintergrund.

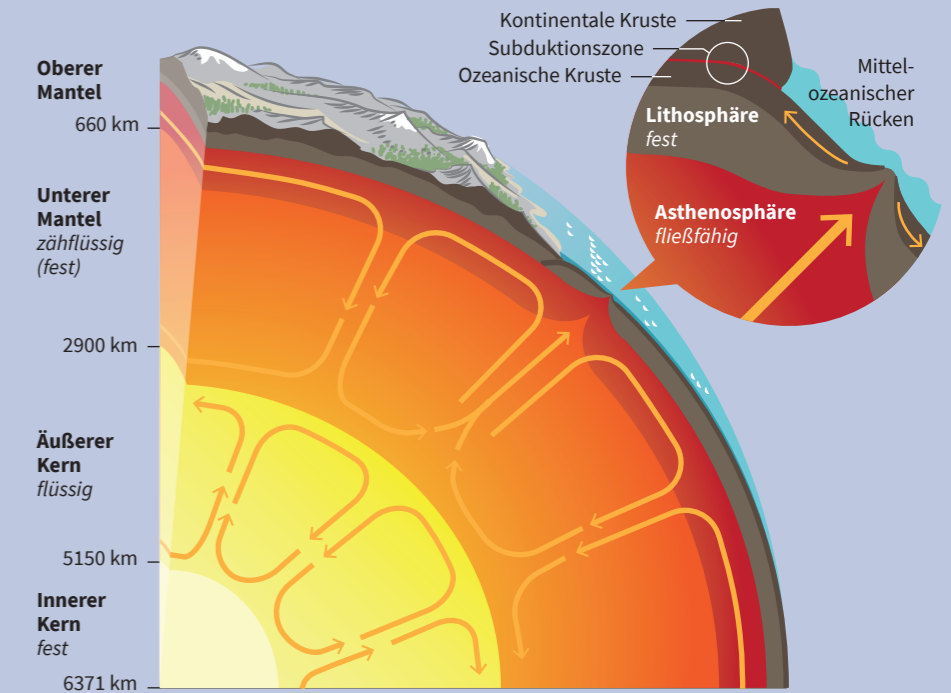
Um dieses Problem in meinem Modell zu lösen, benutzte ich eine spezielle Methode, die „adaptive Gitterverfeinerung“. In den Bereichen der Simulation, in denen Magma entsteht und sich auf kleinen Skalen bewegt, verwende ich eine höhere Auflösung. In anderen Bereichen hingegen, in denen die Bewegungen großräumig und langsam vonstatten gehen, reicht eine niedrigere Auflösung aus. Für unser Foto würde das heißen, dass das Gesicht der Person mit einer höheren Pixeldichte abgedeckt ist, während beispielsweise für den Himmel im Hintergrund die Abstände zwischen den Pixeln größer sein können.

Mithilfe dieser neu entwickelten mathematischen Methode war ich in der Lage, die Wechselwirkungen zwischen Festgestein und Schmelze zu untersuchen. Dabei konnte ich modellieren, wie das Gestein in großer Tiefe schmilzt und bis an die Untergrenze der tektonischen Platten aufsteigt, sich dort abkühlt und erstarrt – und wieder absinkt. Dabei reißt es auch Teile der tektonischen Platte mit abwärts und erodiert sie von unten.

An den so entstandenen Schwachstellen können Platten leichter auseinanderbrechen, wie es beispielsweise vor 130 Millionen Jahren geschah, als sich Afrika und Südamerika voneinander lösten und der Südatlantik entstand. Außerdem kann an der dünneren Stelle der Platte heißes Gestein aus dem Erdmantel weiter nach oben steigen, wodurch aufgrund der fortschreitenden Druckentlastung mehr Magma entsteht und die Vulkanausbrüche an der Erdoberfläche heftiger werden.

Und die Dinosaurier? Tatsächlich konnte ich aus der Kombination dieser beiden Prozesse – dem Aufschmelzen hoher Pyroxenitanteile und der Destabilisierung der tektonischen Platte – abschätzen, dass der globale Vulkanismus gegen Ende der Kreidezeit durchaus die Ausmaße hatte, ein weltweites Massensterben auszulösen. Insofern hätte es jenes Meteoriteneinschlags wohl gar nicht bedurft. ●

Bild (li.): Juliane Dannberg; Illustration: Mario Mensch



Ein Blick ins Erdinnere

Mancher Geologieprofessor kommt mit einem gekochten Ei in die Anfängervorlesung. Es ist ein einigermaßen maßstabsgerechtes Modell der Erde, die von außen nach innen aus Erkruste (Schale), Erdmantel (Eiweiß) und Erdkern (Dotter) besteht. Die Dicke der Erdkruste variiert zwischen fünf Kilometern unter den Ozeanen und 70 Kilometern unter dem Himalaya. Das tiefste, je von Menschen gebohrte Loch wurde auf der russischen Kola-Halbinsel gebohrt – und hat die Erdkruste nur angekratzt. Dass Forscher dennoch wissen, wie unser Planet im Inneren aufgebaut ist, verdanken sie vor allem den Erdbeben – weltweit sind es täglich an die 9000 Erschütterungen, von denen die meisten aber nur von empfindlichen Geräten registriert werden.

Bebt die Erde an einem Ort, laufen die Erdbebenwellen durch das Erdinnere und können von einem Seismografen in vielen tausend Kilometern Entfernung registriert werden. Diese Erdbebenwellen bewegen sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durch feste, weiche und flüssige Bereiche. Sie werden an Grenzflächen abgelenkt, reflektiert oder verschluckt. Aus den Ankunftszeiten der Erdbebenwellen

am Seismografen lassen sich die Positionen von Grenzflächen im Erdinneren rekonstruieren.

Aufgrund der hier herrschenden Druck- und Temperaturverhältnisse verhält sich das Gestein des Erdmantels über Zeiträume von Jahrtausenden zähflüssig. Die aufsteigenden und wieder absinkenden Gesteinsströme sind Teil der plattentektonischen Prozesse. Dabei verschieben sich die Platten der Lithosphäre, tauchen in den Erdmantel, während an anderer Stelle flüssiges Gestein aufsteigt und neue Erdkruste bildet.

An seiner Unterseite grenzt der Erdmantel an den Erdkern, der überwiegend aus Eisen- und Nickelverbindungen besteht und so eine deutlich höhere Dichte aufweist. Der Äußere Erdkern reicht bis in eine Tiefe von etwa 5200 Kilometern – bei Temperaturen von etwa 5000 Grad Celsius ist er fast so flüssig wie Wasser. Die Strömungen der eisenreichen Flüssigkeit aus tiefer liegenden heißeren Bereichen zu weiter außen liegenden, weniger heißen Bereichen erzeugen das Erdmagnetfeld. Darunter befindet sich der Innere Kern, der ähnlich zusammengesetzt ist wie der Äußere, aufgrund des hohen Drucks von über 350 Gigapascal jedoch fest ist. – J. Schüring

Klaus Tschira

(1940–2015)

Von Asteroiden bis Zwiebelsuppe: Die Geheimnisse des Alls faszinierten den Physiker genau so wie die rustikale Küche. Seine Stiftung arbeitet auch über seinen Tod hinaus an der Schnittstelle von Forschung und Öffentlichkeit.
Ein Porträt des bodenständigen Höhenfliegers.

Von Hiltrud Bontrup

Was du deiner Großmutter nicht erklären kannst, hast du wohl selbst nicht verstanden.“ – Klaus Tschira liebte diesen Spruch. Ursprünglich stammt er von dem Medizin-Nobelpreisträger Günter Blobel, doch Tschira zitierte ihn gern. Er wurde zum Credo seiner Arbeit: Wissenschaft verständlich machen, Menschen für die Forschung begeistern. Mit diesem Ziel gründete er 1995 die Klaus Tschira Stiftung und 1997 den Preis für verständliche Wissenschaft, kurz KlarText!.

Seine Begeisterung für das Universum führte ihn zunächst zum Physikstudium nach Karlsruhe. Nach ersten Berufsjahren bei IBM gründete er 1972 zusammen mit Hans-Werner Hector, Dietmar Hopp, Hasso Plattner und Claus Wellenreuther jenes Unternehmen, das später als SAP zu einem der weltweit größten Konzerne für Unternehmenssoftware aufstieg. Bewegte Jahre, in denen er viel arbeitete, viel von der Welt sah und sehr vermögend wurde. 1998 wechselte er in den Aufsichtsrat und widmete sich verstärkt seiner Stiftung.

Die Klaus Tschira Stiftung ist eine der großen gemeinnützigen Stiftungen Europas aus privaten Mitteln. Sie fördert Projekte im Bereich der Naturwissenschaften, Mathematik und Informatik. Tschira gründete unter anderem das Heidelberger Institut für Theoretische Studien und – gemeinsam mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – das Nationale Institut für Wissenschaftskommunikation in Karlsruhe. Nicht mehr erleben durfte er die Eröffnung des von ihm mit ins Leben gerufenen Science Media Center Germany in Köln. Für sein Wirken wurde er vielfach ausgezeichnet, mit dem Stifterpreis, der Leibniz-Medaille, Bundesverdienstkreuzen und Ehrendoktorwürden.

Bescheiden blieb er trotzdem. Auf Titel bestand der Freiburger nie, dass man ihn in der Schule „Planetenheini“ genannt hatte, erzählte er oft und gern. Stets blieb er bodenständig, sein Vermögen kommentierte er gerne mit dem Satz: „Ich kann mir die Wurst auch nur doppelt aufs Brot legen.“ Legendar wurde seine Sammlung von Themen-Krawatten, in der es neben der schwarz-rot-goldenen für staatstragende Anlässe auch welche mit Lorient-Motiven und eine mit Spiralgalaxien gab – die trug




er zur Einweihung des Hauses der Astronomie in Heidelberg. Ein wunderschöner Bau ohne rechte Winkel, den er mit viel architektonischem Sachverstand mitplante – und der eben einer Spiralgalaxie nachempfunden ist (siehe Bild S. 6).

In der Villa Bosch in Heidelberg, wo die Stiftung ihren Sitz hat, sah man den Chef oft im T-Shirt mit dem Stiftungs-Logo auf dem Rücken. Beim Wissenschaftsfest war er – mit einer „Explore Science“-Kappe auf dem Kopf – meist im Wettbewerbszelt anzutreffen. Dort, wo Jugendliche vorführten, was sie in monatelanger Tüftelei herausgefunden hatten.

Hierarchien und Grenzen gab es in Tschiras Denken nicht. Wenn er mit den Gedanken in fernen Galaxien war, stand er mit beiden Beinen auf dem Boden. Gerne in seiner Küche, wo er seine Frau mit bester Hausmannskost beglückte. Das Buch „Schlau kochen“ der Edition Klaus Tschira Stiftung enthält neben Rezepten auch Interessantes rund um die chemisch-physikalischen Vorgänge beim Kochen.

Am 31. März 2015 ist Klaus Tschira im Alter von 74 Jahren unerwartet gestorben. Sein Vermächtnis lebt in seiner Stiftung und ihren Projekten fort. ●



Wissenschaft in
einer Sprache,
die jeder versteht.

NaWik

Nationales Institut für
Wissenschaftskommunikation

Wissenschaft.
Verständlich.

SCHREIBSEMINAR KOMPAKT

NÄCHSTE ORTE UND TERMINE:

Münster, 07. November 2017

Göttingen, 14. November 2017

Leipzig, 05. Dezember 2017

Heidelberg, 12. Dezember 2017

In den Seminaren des NaWik lernen Wissenschaftler und Kommunikatoren, komplexe Inhalte verständlich und zielgruppenorientiert zu kommunizieren. Das Seminarportfolio reicht von Schreibseminaren über Interviewtrainings bis hin zu Social-Media-Kursen.

Für einzelne Interessierte bietet das NaWik in loser Folge laufend Seminare an unterschiedlichen Standorten an. Diese Angebote finden Sie unter:

www.nawik.de/offene-seminare

Für Institute und Arbeitsgruppen bietet das NaWik jederzeit buchbare Seminarprogramme nach Maß – am jeweiligen Standort oder am Stammsitz in Karlsruhe. Diese Angebote finden Sie unter: www.nawik.de/seminare

*Die Klaus Tschira Stiftung ermöglicht KlarText-Teilnehmern den Besuch eines exklusiven NaWik-Workshops.
Das NaWik ist ein Institut der Klaus Tschira Stiftung und des Karlsruher Instituts für Technologie.*

Impressum

HERAUSGEBER Klaus Tschira Stiftung gemeinnützige GmbH, Villa Bosch, Schloss-Wolfsbrunnenweg 33, 69118 Heidelberg, www.klaus-tschira-stiftung.de
GESCHÄFTSFÜHRUNG Beate Spiegel, Harald Tschira, Udo Tschira **PROJEKTLEITUNG** Renate Ries, Agnes Schulze **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 **BILDREDAKTION** Beatrice Jansen **GRAFIK** Mirko Merkel, Susanne Kluge **KORREKTORAT** Julia Kühn **HERSTELLUNG** Dirk Woschei
DRUCK Mohn Media Mohndruck GmbH **VERTRIEB** Das Magazin liegt am 5.10.2017 der Wochenzeitung DIE ZEIT bei.



KlarText

Preis für Wissenschaftskommunikation

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

**Erzähle 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 populärwissenschaftlichen Artikel veranschaulichen.

Hier erfährst Du, wie Du mitmachen kannst: www.klartext-preis.de

Übrigens: Lena Veit (32), Neurobiologin und KlarText-Preisträgerin 2016, fand heraus, dass Krähen ähnlich denken wie Affen.