

plus

bild der wissenschaft



Klaus Tschira Preis

für verständliche
Wissenschaft

Die Preisträger 2016

KlarText!
KlarText!
KlarText!
KlarText!



Eine Sonderpublikation in Zusammenarbeit mit der
Klaus Tschira Stiftung gGmbH



KTS

Zielsicher in der Wissenschaftskommunikation unterwegs

NaWik

Wissenschaft. Verständlich.



Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation

www.nawik.de

Eine Gründung der Klaus Tschira Stiftung und des Karlsruher Instituts für Technologie

Editorial

INHALT

Foto: Wolfram Scheible



Dr. Alexander Mäder, Chefredakteur

Keine Angst vor den ganz großen Fragen

Die Doktorarbeit ist das Gesellenstück der Wissenschaft: Mit ihr beweisen die Kandidaten, dass sie auch ohne Anleitung forschen können. Aber im Unterschied zum Handwerk genügt es in der Wissenschaft nicht, fleißig und sauber zu arbeiten. Wer „nur“ die Fachliteratur kennt und alle nötigen Experimente korrekt auswertet, hinterlässt bei seinen Gutachtern und Kollegen noch keinen bleibenden Eindruck. Man braucht schon eine pfiffige Idee und ein aufsehenerregendes Ergebnis für die Karriere. Unter diesem Druck standen die sechs Forscherinnen und Forscher, die sich Ihnen auf den folgenden Seiten vorstellen, und sie haben die Prüfung mit Bravour gemeistert.

Davon können Sie, liebe Leserinnen und Leser, sich selbst ein Bild machen. Denn auch das unterscheidet die sechs Doktoranden von anderen: Sie haben Ideen, um ihre Ergebnisse verständlich und unterhaltsam zu erklären. So lernen Sie die Mathematikerin Ágnes Cseh kennen, die nach dem besten Weg fahndet, den Heiratsmarkt zu organisieren. Das Heiraten dient ihr dabei nur als Metapher. Tatsächlich geht es darum, Bewerber und Studienplätze optimal zu verkuppeln – oder Kunden und Händler. Die Informatikerin Jiehua Chen fragt wiederum, ob die Wahl von Berlin als Hauptstadt auch anders hätte ausgehen können, wenn der Bundestag vor 25 Jahren in einer anderen Reihenfolge über die Anträge abgestimmt hätte. Auch Chen hat größere Anwendungen im Blick: etwa die Rankings bei Online-Empfehlungsdiensten, wenn die Bewertungen vieler Nutzer einfließen.

Falls Sie denken, dass Doktoranden bloß Detailprobleme bearbeiten, dann werden Sie sich wundern, wenn Sie die Artikel in diesem *bdw plus*-Heft lesen. Die Gewinner des diesjährigen Klaus Tschira Preises für verständliche Wissenschaft machen deutlich, dass ihre Arbeit der Allgemeinheit nützt. Der Neurowissenschaftler Benjamin Gaub hat zum Beispiel die lichtempfindlichen Zellen der Netzhaut untersucht, um eine Therapie für Blinde zu entwickeln, und dann auch noch ein Gerät gebaut, das es Blinden erlaubt, sich mit Ultraschall zu orientieren. Und der Chemiker Martin Brüggemann hat eine Methode entwickelt, mit der man besonders feinen Feinstaub nicht nur registrieren, sondern auch chemisch analysieren kann. Das wird die Forschung voranbringen, denn bisher ist es sehr schwierig, die Wirkungen der verschiedenen Partikel zu ermitteln.

Auch vor den ganz großen Fragen machen die Preisträger nicht halt. So fragt der Physiker Martin Pitzer, warum in der Natur nur Biomoleküle einer bestimmten Form vorkommen und nicht auch ihre spiegelbildlich aufgebauten Varianten. Und die Neurowissenschaftlerin Lena Veit untersucht die Gehirne intelligenter Rabenvögel nicht zuletzt, um herauszufinden, was den menschlichen Geist heraushebt.

Die Promotion macht den jungen Wissenschaftler noch nicht zum Meister; bis zur unbefristeten Stelle ist es ein langer Weg. Das hat sich in den 100 Jahren seit Max Webers Rede zur „Wissenschaft als Beruf“ nicht verändert. Weber warnte die Studenten seiner Zeit, dass die wissenschaftliche Karriere „ein wildes Hasard“ sei, das man nicht leichtfertig eingehen solle. Und es freut mich daher besonders, dass alle Preisträger nach ihrer Promotion gute Stellen als Postdocs gefunden haben. Ich wünsche ihnen alles Gute und Ihnen, liebe Leserinnen und Leser, eine anregende Lektüre!

- 4 Wenn blinde Menschen „sehen“ lernen**
Benjamin Gaub, Neurowissenschaften
- 8 Ein Handabdruck der Moleküle**
Martin Pitzer, Physik
- 12 Wer hat an der Wahl gedreht?**
Jiehua Chen, Informatik
- 16 Da liegt was in der Luft ...**
Martin Brüggemann, Chemie
- 20 Heiraten nach Plan**
Ágnes Cseh, Mathematik
- 24 Spatzenhirn oder gefiederter Affe?**
Lena Veit, Neurowissenschaften
- 28 Echten und falschen Schätzen auf der Spur**
Wie modernste Methoden die Archäologie voranbringen
- 34 „Schlau stiften“ für das Abenteuer Wissen**
Die Edition Klaus Tschira Stiftung
- 35 Impressum**

Wenn blinde Menschen „sehen“ lernen

Sehen ist für uns von ganz besonderer Bedeutung. Millionen blinder Menschen leben allerdings Tag für Tag in „Dunkelheit“, mit wenig Hoffnung auf Heilung. Im Rahmen meiner Doktorarbeit habe ich deshalb zwei Therapieansätze erforscht: die Navigation mit Echoortung und die genetische Neuprogrammierung von Nervenzellen.

von Benjamin Gaub

Daniel Kish ist vollständig blind. Noch bevor er zwei Jahre alt wurde, mussten Ärzte ihm wegen einer Krebserkrankung beide Augen entfernen. Heute sieht man den mittlerweile 50-Jährigen auf seinem Fahrrad im Straßenverkehr oder sogar beim Mountainbiking. Dabei hat er keinerlei Probleme Hindernisse zu umfahren oder sich in der Wildnis zu orientieren. Wie macht er das? Die Antwort ist so einfach wie erstaunlich: Er navigiert mit Hilfe von Echoortung. Das kennt man vielleicht von Fledermäusen. Diese nutzen Echoortung, um ihre nur wenige Zentimeter große Beute aus der Luft zu fangen. Kish, den seine Freunde auch „Bat-Man“ nennen, schnalzt mit der Zunge, um Schallwellen zu erzeugen. Treffen die Wellen auf ein Hindernis, werden sie von diesem reflektiert. Anhand des Echos macht Kish sich ein räumliches „Bild“ der Umgebung, die Entfernung zu einem Hindernis kann er durch die Laufzeit der Schallwellen ermitteln. Ebenso kann er mit den Klick-Echos die Richtung sowie die Größe von Hindernissen abschätzen. Echolot- und Radartechnik, wie man sie von U-Booten und Flugzeugen kennt, basieren auf demselben Prinzip.

Erfahrene Nutzer der Echoortung wie Daniel Kish sind für Neurowissenschaftler extrem interessant: Obwohl sie das Signal mit dem Gehörsinn detektieren,

verarbeiten sie die Information mit dem Teil des Gehirns, der für das Sehen verantwortlich ist. Dadurch entsteht bei ihnen ein Sinneseindruck, der eher einem Bild als einem Geräusch gleicht. Die „Fledermaus“-Menschen „sehen“ damit die Umwelt gewissermaßen über das Gehör. Allerdings hat sich die Echoortung noch nicht so schnell verbreitet, wie man denken oder hoffen könnte. Dies liegt zum Teil an den Limitierungen dieser Technik. Fledermäuse können Frequenz und Länge ihrer Ortrungsrufe modulieren und dadurch die Laute je nach Bedarf anpassen. Blinde Menschen jedoch haben keine speziell ausgebildeten Organe zur Erzeugung hochfrequenter Schallwellen. Mit Zungenklicks kann man nur einen einfachen Ton und keine komplexen Frequenzmuster erzeugen. Zudem kann es schwierig sein, die eigenen Echos bei lauter Geräuschkulisse zu hören, zum Beispiel im Lärm einer Stadt. Diese Probleme können mit einem einfachen Trick umgangen werden: mit Ultraschall. Bessere Reflektions-eigenschaften und geringer Nachhall ermöglichen eine weitaus höhere räumliche Auflösung der Echosignale. Außerdem ist unsere Umwelt im Ultraschallbereich sehr leise, daher sind bei diesen Frequenzen keine Störsignale zu erwarten. Leider können Menschen solch hochfrequente Schallwellen weder hören noch produzieren. Es ist jedoch mit geeigneter Technik

möglich, Ultraschallwellen zu senden und deren Echos durch Frequenzhalbierung in hörbare Signale zu übersetzen.

Könnten blinde Menschen mit Ultraschall ein besseres räumliches „Sehen“ entwickeln? Um diese Frage zu beantworten, habe ich an der University of California in Berkeley eine Studenteninitiative gegründet und zusammen mit einer Gruppe Studierender aus verschiedenen Fachbereichen einen Prototypen entwickelt: das „Sonic Eye“ (das akustische Auge). Unser

DR. BENJAMIN GAUB

1986 geboren in München

2005 Abitur in Miesbach

2005 bis 2008 Bachelorstudium der Chemie und Biochemie an der LMU München

2009 bis 2015 Promotionsstudium an der University of California in Berkeley im Department für Neurowissenschaften

15.05.2015 Promotion zum Dr. phil. nat.

Seit 2015 Postdoktorand an der ETH Zürich

Info: www.silva.bsse.ethz.ch/biophysics

Kontakt: benjamin.gaub@bsse.ethz.ch

„Sehen durch Hören“ – mit etwas Training können sich blinde Menschen gut im Raum orientieren.

Fotos: Robert Huber für bdpw

EIN ERFOLGREICHER ERFINDER

Benjamin Gaub im bdw-Gespräch

Wie kamen Sie auf das Thema Blindheit?

Das kommt daher, dass mich insbesondere zwei Bereiche faszinieren. Das eine sind die Sinnesorgane des Menschen und die Frage, wie das Gehirn die komplexen Eindrücke der Welt aufnimmt und verarbeitet. Das andere ist die Wiederherstellung dieser Sinne durch die Medizin. Wenn man versucht, ein sensorisches System zu reparieren, dann müssen die Grundlagen dazu schon relativ gut erforscht sein, und genau das ist beim Sehsinn der Fall.

Wie geht es mit der Gentherapie zur Behandlung von Blindheit weiter, die Sie entwickelt haben?

Die Lizenzen für das Patent wurden gerade von einer Firma aus Amerika gekauft. Sie werden versuchen, unseren Therapieansatz auf den Markt zu bringen. Was ich an Mäusen erforscht habe, wird in den nächsten Jahren in Rahmen von klinischen Studien am Menschen getestet. Mit ein bisschen Glück könnte meine Forschung dann dazu beigetragen haben, dass manche Menschen wirklich wieder sehen könnten. Das würde mich von ganzem Herzen freuen.

Sie haben an der Berkeley University in San Francisco promoviert. Warum sind Sie nicht in den USA geblieben?

Mich hat es einfach wieder zurück nach Europa gezogen. Hier sind meine Wurzeln. Außerdem hat mich die Schweiz mit tollen Stellenangeboten gelockt und ich hatte mal wieder Lust auf einen Tapetenwechsel. Solange ich jung und mobil bin, will ich noch einiges kennenlernen. Ich kann mir aber auch gut vorstellen, später zurück nach Kalifornien zu gehen, denn wie die Eagles in ihrem Song „Hotel California“ treffend feststellen: „you can check out anytime you like, but you can never leave“.

Prototyp sendet Ultraschallwellen über Lautsprecher aus. Die reflektierten Signale werden von zwei Mikrofonen, je eines links und rechts am Kopf, aufgenommen und in hörbare Frequenzen übersetzt. Mit speziellen Kopfhörern können die Nutzerinnen und Nutzer diese niedrigeren Frequenzen hören, ohne dass dabei die Umgebungsgeräusche überdeckt werden. Anfänglich navigierte ich mit verbundenen Augen über den Campus, um die Funktion des „Sonic Eye“ selbst zu testen. Später habe ich sehende Probanden den Prototyp im stationären Einsatz testen lassen. Die Resultate waren verblüffend: Ungeübte Testpersonen konnten die relative Position von Objekten sowie ihre laterale Position und Distanz problemlos bestimmen. Die Höhe zu bestimmen ist hingegen etwas schwieriger und erfordert rund 20 Übungsstunden mit dem „Sonic Eye“. Menschen haben also einen Sinn für Echoortung, der aber meistens durch das Sehen überdeckt wird. Blinde Menschen können sehr wahrscheinlich aufgrund ihres sensitiveren Hörsinnes noch mehr Informationen aus den Echos extrahieren und zum Beispiel Materialeigenschaften oder Oberflächenstrukturen akustisch bestimmen.

Mittlerweile ist unser „Sonic Eye“ zu einem „Shooting Star“ geworden. Wir haben den Prototyp auf zahlreichen öffentlichen Universitätsveranstaltungen und auf einer Erfindermesse vorgestellt, der „Maker Fair“ in San Francisco. Zudem nahm unser Team an einem Businessplan-Wettbewerb teil und erhielt finanzielle Unterstützung zur weiteren Entwicklung und Anwendung. Derzeit fokussieren wir uns darauf, den Prototyp zu miniaturisieren und benutzerfreundlicher zu gestalten, damit blinde Probanden in naher Zukunft unser neues „mini Sonic Eye“ testen können.

Chancen der Gentherapie

Das „Sonic Eye“ ist ein gutes Hilfsmittel für Menschen, die blind geboren und in deren Gehirn die für das Sehen notwendigen Strukturen und Verbindungen nicht geprägt worden sind. Erblindet ein Mensch jedoch erst im Laufe seines Lebens, gibt es die Möglichkeit den Sehsinn tatsächlich wiederherzustellen – zumindest in begrenztem Maße. Dies wurde vor kurzem mit Hilfe von Neuroprothesen demonstriert, deren Einsatz jedoch kostenaufwendig und sehr invasiv ist. Zu-

dem ermöglichen die Prothesen nur eine geringe Bildauflösung, die etwa der einer Digitalkamera mit 60 Pixeln entspricht. Ein gesundes menschliches Auge hingegen hat mehrere Millionen Pixel. Ich wollte daher einen biologischen Therapieansatz entwickeln mit dem Ziel, die Nervenzellen blinder Augen in licht-sensitive „Pixel“ zu verwandeln.

Der Verlauf und die Art der Erblindung spielt eine entscheidende Rolle bei der Wahl der Therapie. Patienten mit Retinitis Pigmentosa haben Gendefekte, welche die lichtsensitiven Fotorezeptorzellen der Retina (Netzhaut des Auges) absterben lassen. Ohne Fotorezeptoren kann das Auge weder visuelle Signale empfangen noch weiterleiten, der Rest des visuellen Systems bleibt jedoch zum größten Teil intakt. Das bietet die Chance, molekulare Lichtschalter in den verbliebenen Nervenzellen der Retina zu installieren und dadurch die Lichtempfindlichkeit im Auge wiederherzustellen. Um diesen Ansatz zur biologischen Heilung testen zu können, fertigte ich im Rahmen meiner Doktorarbeit zunächst spezielle molekulare Werkzeuge an. Ich konstruierte fotochemische Lichtschalter, welche die Proteine in Nervenzellen durch Licht aktivieren können. Um diese Lichtschalter in

dem Erbgut der Zielzellen zu übertragen, entwickelte ich für Menschen harmlose therapeutische Viren. Sie sind quasi wie Postboten und bringen die Bauanleitung für die Lichtschalter zu den Nervenzellen. Die Zellen der Retina sind extrem langlebig, deshalb genügt eine einmalige genetische Neuprogrammierung. Die im Laufe der Zeit beschädigten Lichtschalter können allerdings im Bedarfsfall leicht erneuert werden. Durch das Zusammenspiel von Fotochemie und Gentherapie ist eine präzise und optimale Anpassung der Therapie an die individuellen Bedürfnisse der Patientinnen und Patienten einfach zu realisieren.

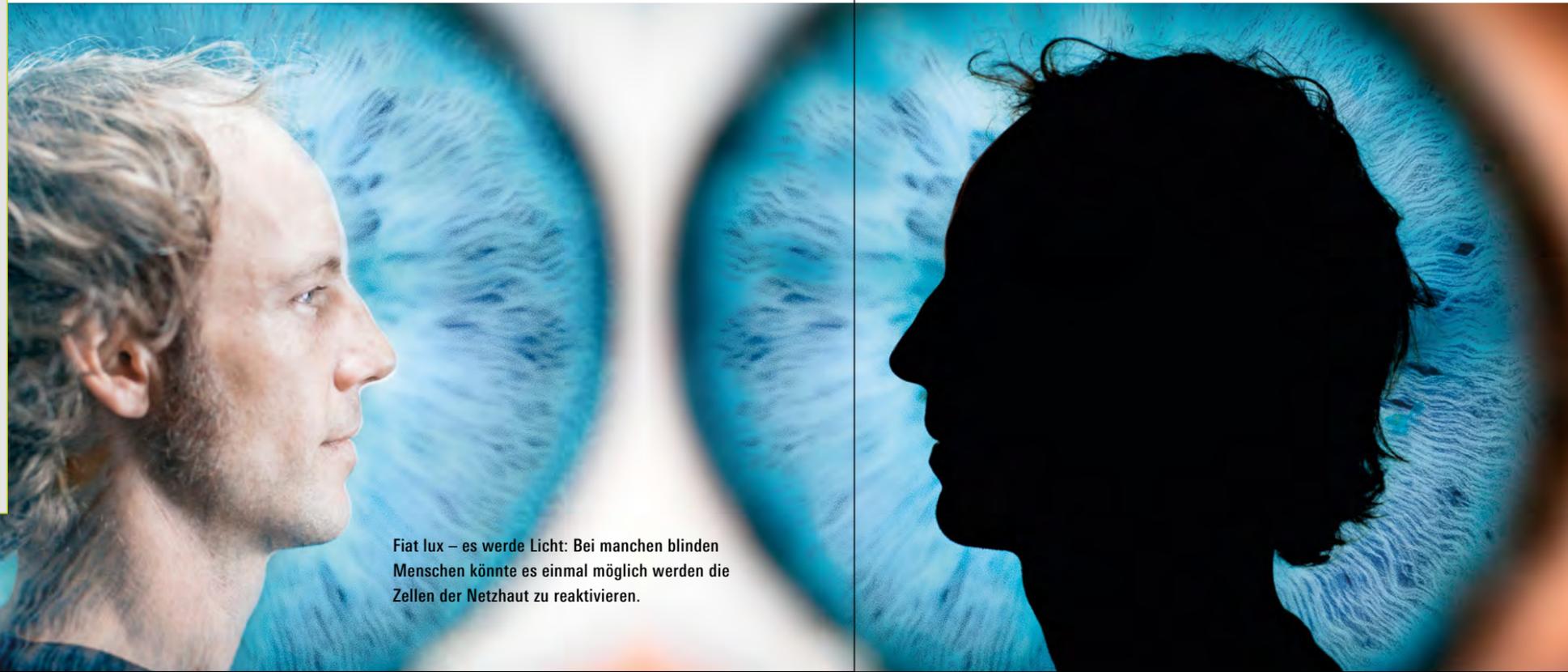
Meinen Therapieansatz konnte ich selbstverständlich nicht direkt an Patienten testen und wählte deshalb blinde Mäuse für meine Experimente, die ebenfalls an Retinitis Pigmentosa erkrankt waren. Ich behandelte die Mäuse mit den therapeutischen Viren und machte dabei eine Reihe interessanter Entdeckungen. Die Retinae der blinden Mäuse konnten die neuen Lichtschalter integrieren und waren danach wieder lichtempfindlich. Zudem antwortete der visuelle Teil des Gehirns auf die Lichtsignale: Die Nervenbahnen vom Auge zum neuronalen Kortex schienen also die Lichtsignale zu

Das „Sonic Eye“ vermittelt Orientierung durch Geräusche. Benjamin Gaub hat seine Entwicklung selbst getestet.

Foto: Sarah Hillenbrand

leiten. Anhand visueller Tests konnte ich zudem zeigen, dass die vorher erblindeten und von mir behandelten Mäuse Lichtsignale und bewegte Muster wieder verarbeiten und verstehen konnten, und zwar beinahe so gut wie gesunde Mäuse. Die blinden Mäuse lernten also wieder Sehen!

In meiner Dissertation habe ich zwei komplementäre Ansätze zur Therapie blinder Menschen erforscht. Echoortung ist speziell für Menschen geeignet, die blind geboren wurden oder früh erblindet sind. Das „Sonic Eye“ bedarf keinerlei operativen Eingriffs und unterliegt deshalb auch keiner strikten medizinischen Regulation. Es ersetzt allerdings auch nicht den Sehsinn, sondern dient als Navigationshilfe. Gentherapie hingegen ist ein biologischer Ansatz zur Heilung erblindeter Menschen und könnte in absehbarer Zukunft den Sehsinn zumindest in rudimentärer Form wiederherstellen. Meine Resultate zeigen, dass dies bei blinden Mäusen in der Tat möglich ist, auch wenn es wohl noch einige Jahre dauern wird, bis die Gentherapie im Rahmen einer klinischen Studie an blinden Menschen getestet werden kann. Bis dahin ist es durchaus sinnvoll, die Entwicklung nicht-invasiver Hilfsmittel für Blinde voranzutreiben. Die technische Realisierung des „Sonic Eye“ ist deshalb bereits im Gange. ●



Fiat lux – es werde Licht: Bei manchen blinden Menschen könnte es einmal möglich werden die Zellen der Netzhaut zu reaktivieren.

Ein Handabdruck der Moleküle

Wie unsere Hände gibt es auch viele Moleküle in einer rechten und einer linken Variante. Bisher war es äußerst schwierig, die Händigkeit eines Moleküls direkt zu bestimmen. Eine neue Technik aus der Physik kann sie nun sichtbar machen.

von Martin Pitzer

Stellen Sie sich vor, Sie reichen auf einer Party oder bei einem Geschäfts-termin zur Begrüßung ausnahmsweise einmal die linke Hand anstatt der rechten – die Irritationen werden vermutlich nicht ausbleiben. Obwohl rechte und linke Hand gleich aufgebaut sind, sind sie Spiegelbilder voneinander und nicht identisch. Ohne dass wir es merken, treten in unserem Stoffwechsel ähnliche Situationen auf: Viele Moleküle in unserem Körper besitzen ebenfalls eine bestimmte „Händigkeit“ und können nur mit dem entsprechenden Partner richtig wechselwirken und ihre Funktion erfüllen. Dies lässt sich mit der geometrischen Struktur dieser Moleküle erklären: Da sie aus vielen Atomen zusammengesetzt sind, können Moleküle sehr komplexe Formen annehmen. Im Chemieunterricht werden zur Veranschaulichung dieser Strukturen Modelle mit Kugeln (für die Atome) und Stäben (für die chemischen Bindungen) verwendet. Wenn man mit diesen Modellen hantiert, kann man erkennen, dass sich aus den gleichen Atomen verschiedene Strukturen, sogenannte Isomere, bauen lassen. Ein Beispiel für diese Isomerie sind Moleküle, die wie unsere Hände als Bild und Spiegelbild auftreten – scheinbar gleich, und doch nicht durch Drehen und Verschieben deckungsgleich zu machen. Nach dem griechischen Wort für „Hand“ werden solche Moleküle „chiral“ genannt.

Fotos: Tim Wegner für bbw

Glücklicherweise kommen in der Natur nur Moleküle mit zueinander passender Händigkeit vor, sodass die biologischen Prozesse meist reibungslos ablaufen können. Anders sieht es bei Stoffen aus, die im Labor hergestellt werden, insbesondere bei künstlich synthetisierten Medikamenten. Hier werden oft beide molekularen Hände hergestellt, obwohl nur eine der beiden tatsächlich als pharmazeutischer Wirkstoff fungiert und die Einnahme des spiegelbildlichen Moleküls wirkungslos oder sogar schädlich sein kann.

Es besteht also großes Interesse daran, die Händigkeit von Molekülen zu bestimmen, um beispielsweise die nicht benötigte Variante herauszufiltern. In den letzten Jahren und Jahrzehnten sind deshalb zahlreiche Methoden entwickelt worden, um diese Ziele zu erreichen.

Eine besondere Schwierigkeit hierbei ist allerdings, die mikroskopische Händigkeit des einzelnen Moleküls – die Anordnung der Kugeln und Stäbe – zu bestimmen. Denn meistens misst man im Labor Eigenschaften, die durch die Mittelung über eine unvorstellbar große Anzahl an Molekülen zustande kommen. Die Verknüpfung mit der mikroskopischen Struktur der einzelnen Moleküle erfordert entweder komplizierte Berechnungen oder die Reaktion mit Referenzsubstanzen, bei denen die Händigkeit bereits bekannt ist.

Das Ziel meiner Dissertation war es, mit einer neuen Technik aus der Atomphysik einen direkten Handabdruck der Moleküle zu finden. Bei dieser Technik, dem sogenannten Reaktionsmikroskop, wird ein gasförmiger Strahl aus isolierten Molekülen erzeugt und in eine Experimentierkammer mit extrem gutem Vakuum geleitet. Dort findet die Reaktion mit einem sehr kurzen und sehr intensiven Laserpuls statt, der bewirkt, dass das Molekül auseinanderbricht. Die Fragmente werden

DR. MARTIN PITZER

1984 geboren in Freiburg

2004 Abitur in Tauberbischofsheim

2005 bis 2011 Diplomstudium der Physik am Karlsruher Institut für Technologie

2011 bis 2015 Promotionsstudium an der Universität Frankfurt im Fachbereich Physik

11.05.2015 Promotion zum Dr. phil. nat.

Seit 2015 Nachwuchsgruppenleiter am Institut für Physik der Universität Kassel

Info: www.uni-kassel.de/go/pitzer

Kontakt: martin.pitzer@uni-kassel.de

Eines der einfachsten Moleküle, das in spiegelbildlichen Varianten auftreten kann, ist das Bromchlorfluormethan. Es besteht aus den fünf Atomen Kohlenstoff, Brom, Chlor, Fluor und Wasserstoff.

DER SPEZIAL-ANALYTIKER

Martin Pitzer im bdw-Gespräch

Sie untersuchen Moleküle, die in einer links- und einer rechts-händigen Variante auftreten. Welchen Unterschied macht das?

Zu vielen Molekülen in unserem Körper gibt es ein spiegelbildliches Pendant, so wie die rechte Hand ein Spiegelbild der linken ist. Die biologischen Prozesse kann man sich oft als molekularen Handschlag vorstellen: Wenn die beiden Hände zusammenpassen, kann eine Reaktion stattfinden. Ein Molekül mit einer falschen Händigkeit kann dagegen an einer anderen Stelle andocken und dadurch negative Folgen haben. Deshalb habe ich ein Verfahren entwickelt, mit dem man die Händigkeit der Moleküle – etwa in einem Medikament – feststellen kann.

Wie lange wird es dauern, bis Ihr Analyseverfahren in der Pharmazie zum Einsatz kommen kann?

Einfache Moleküle sollte man damit innerhalb der nächsten fünf Jahre gut analysieren können. In dieser Zeit müsste sich nachweisen lassen, dass man die Händigkeit von biologisch relevanten Molekülen im Labor bestimmen kann. Dann lässt sich die Methode auch in der Pharmazie verwenden. Sie hat allerdings Grenzen: Sehr komplexe Moleküle lassen sich so noch nicht bestimmen.

Sie schreiben, dass die Händigkeit bereits seit Jahrzehnten erforscht wird. Wieso haben Sie sich dennoch mit dem Thema befasst?

In der Chemie möchte man die Händigkeit pragmatisch bestimmen, also ohne viel Theorie und umfassende Berechnungen. Das ist jetzt möglich geworden: Die Zeit war einfach reif, um Methoden aus der Physik auf dieses Problem anzuwenden.

Ein Schuss mit dem Laser lässt das Molekül explodieren. Aus den Bruchstücken kann Martin Pitzer am Computer rekonstruieren, welche der beiden spiegelbildlichen Varianten vorlag.

dann von speziellen Messinstrumenten detektiert. „Diese Methode ermöglicht es, pro Laserpuls nur ein einziges Molekül zu treffen und seine Eigenschaften zu untersuchen“, erläutert Professor Reinhard Dörner, maßgeblich an der Entwicklung des Reaktionsmikroskops beteiligt und Erstgutachter meiner Dissertation. „Eine große Herausforderung besteht allerdings darin, die Fragmentation eines komplexeren Moleküls in seine einzelnen Bestandteile zu erreichen, diese vollständig zu detektieren und ihre Eigenschaften korrekt zu analysieren.“

Genau dies war jedoch nötig für meinen Ansatz, die Händigkeit von Molekülen zu bestimmen: Um die rechtshändige Struktur von der linkshändigen zu unterscheiden, so die Idee, könnte man das Molekül durch die Wechselwirkung mit dem Laserstrahl „explodieren“ lassen und Flugrichtung sowie -geschwindigkeit der verschiedenen Atome, aus denen das Molekül aufgebaut war, messen. Mit diesen Informationen hoffte ich, bestimmen zu können, welche der beiden Strukturen vor der Explosion vorlag – so wie man zumindest prinzipiell aus dem Funkenregen eines Feuerwerkskörpers auf seinen Aufbau zurückschließen kann. Wie dieser lassen sich auch die Moleküle nach der Untersuchung nicht weiterverwenden; die Methode eignet sich also nicht zur Trennung und weite-

ren Verwendung der Moleküle, sondern nur zur stichprobenartigen Analyse einer Substanz.

Das Molekül fliegt auseinander

Um herauszufinden, ob sich diese Idee umsetzen lässt, wählte ich eines der einfachsten Moleküle, das als links- und rechtshändige Struktur auftreten kann. Bromchlorfluormethan besteht aus einem Kohlenstoffatom als Zentrum, an dem vier weitere einzelne Atome hängen: Brom, Chlor, Fluor und Wasserstoff. Wenn zwei dieser vier Bindungsarme miteinander vertauscht werden, wird das Molekül in sein Spiegelbild überführt. Mehr Anordnungsmöglichkeiten gibt es nicht, denn weitere Vertauschungen der Bindungsarme lassen sich immer auf die Drehung einer der beiden Strukturen zurückführen.

Mit einem selbst geschriebenen Computerprogramm simulierte ich zunächst, wie das Molekül nach der Reaktion mit dem Laserpuls auseinanderfliegt. Damit konnte ich überprüfen, ob die obige Annahme, dass die Flugrichtungen der Atome ihre ursprüngliche Anordnung widerspiegeln, für dieses Molekül zutrifft. Die Ergebnisse zeigten, dass die Hypothese korrekt ist, und verriet, welche Einstellungen ich an der Apparatur vornehmen musste, um mit ihr einen Handabdruck der Moleküle zu sehen.

Dieser ist übrigens auch dann eindeutig bestimmbar, wenn die Moleküle in der Apparatur gar nicht gleich ausgerichtet, sondern beliebig orientiert sind. Sobald genügend Fragmente gemessen werden, kann man die Händigkeit des Moleküls unabhängig von seiner Orientierung im Raum herausfinden – schließlich können wir anhand der Anordnung der Finger und der Handfläche auch bei beliebigen Verrenkungen der Arme stets die rechte Hand von der linken unterscheiden.

Bevor ich die Unterscheidung auch experimentell zeigen konnte, galt es noch einige Hürden zu überwinden. So musste ich zuerst weitere Versuchsbedingungen, beispielsweise die benötigte Intensität der Laserpulse und die optimale Dichte des Molekülstrahls, herausfinden. Nach einigen Messreihen war die gesuchte Molekülexplosion in den Daten zu erkennen, und eine genaue Analyse ergab, dass die Händigkeit der Moleküle eindeutig bestimmt werden konnte. Da eine chemische Trennung in rechte und linke Moleküle bei der verwendeten Substanz sehr schwierig ist, hatte ich eine Mischung mit der gleichen Anzahl an rechts- und links-händigen Molekülen verwendet – und diese Anteile auch in den Messergebnissen gefunden.

Damit war klar, dass das Reaktionsmikroskop den Handabdruck einzelner Moleküle sichtbar machen kann – allerdings hatte ich ein vergleichsweise einfaches Molekül untersucht. Je komplexer die Strukturen werden, desto schwieriger ist es, alle einzelnen Atome zu detektieren und ihre Flugbahnen zu analysieren. Mit weiteren Messungen an meinem Beispielmolekül konnte ich zeigen, dass dies glücklicherweise gar nicht nötig ist: Selbst wenn man eine unvollständige Explosion herbeiführt, bei der zwei der fünf Atome aneinander gebunden bleiben, liefert die Methode noch einen zuverlässigen molekularen Handabdruck.

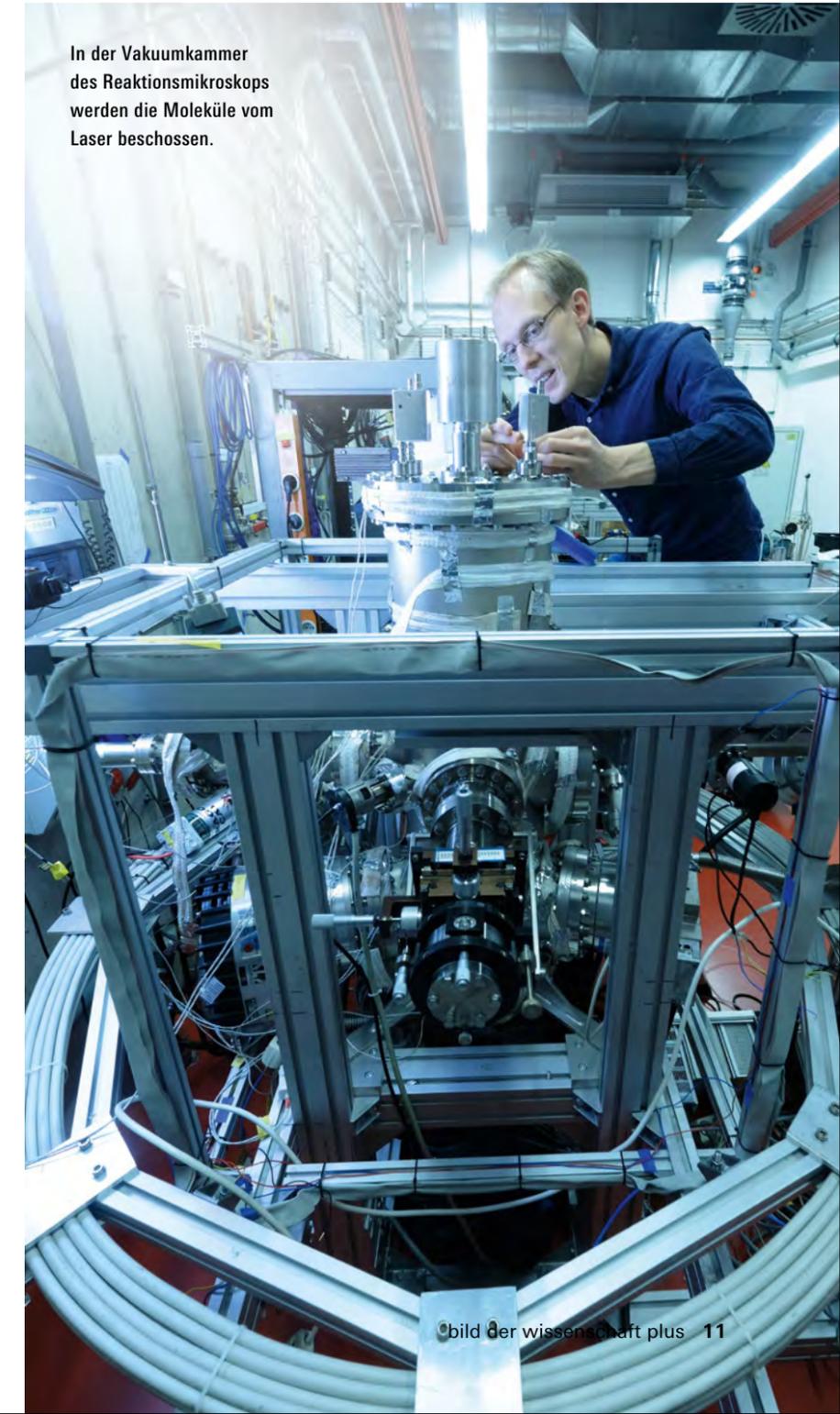
Trotz dieser Erfolge: Um das Verfahren für die Analyse in der Pharmazie nutzen zu können, sind noch einige Schritte nötig; insbesondere muss es nach und nach auf größere Moleküle ausgeweitet werden. Doch nicht nur für die Anwendung in der Diagnose ist die Methode interessant. Weil in der Natur fast alle Moleküle nur in einer Händigkeit auftre-

ten, kann man sich fragen: Ist es Zufall, dass wir und alle anderen Lebewesen genau aus diesen Bausteinen bestehen und nicht aus den Spiegelbildern? Oder gibt es eine tiefer liegende Ursache, die bisher noch niemand identifizieren konnte? Der präzise Handabdruck der Moleküle, den wir mit unserer Methode messen, kann

in Zukunft helfen, diesem Geheimnis auf den Grund zu gehen.

Eine Frage allerdings wird die Physik kaum beantworten können: Warum die Menschen in allen Kulturen überwiegend Rechtshänder sind und es sich deshalb eingebürgert hat, sein Gegenüber mit der rechten Hand zu begrüßen. ●

In der Vakuumkammer des Reaktionsmikroskops werden die Moleküle vom Laser beschossen.



Wer hat an der Wahl gedreht?

Ein fiktiver Zeitungsartikel: „Bonn, 21. Juni 1991. Berlin wird der künftige Parlaments- und Regierungssitz. Das hat der Bundestag gestern entschieden. Wie sich aus den namentlichen Abstimmungslisten ergibt, hätte ebenso gut Bonn gewinnen können. War die Wahl manipuliert? Und war das Schicksal Bonns auf Gedeih und Verderb dem Ältestenrat ausgeliefert, der die Reihenfolge der abzustimmenden Anträge festlegte?“

von Jiehua Chen

Der Mauerfall 1989 war ein großer Moment. Unmittelbar danach begann die Debatte über den Sitz von Parlament und Regierung. Schließlich wurde der Streit mit einer Abstimmung im Bundestag beendet. Dabei standen drei Alternativen zur Wahl: Parlament in Berlin und Regierung in

Bonn (die sogenannte Konsenslösung), beides in Berlin, oder beides in Bonn. Für die Abstimmung wurde ein sequentielles Verfahren verwendet, bei dem über die Alternativen in einer festgelegten Reihenfolge nacheinander abgestimmt wird. Die erste Alternative, die mehr Ja- als Nein-Stimmen erhält, ist der Gewinner.

Der Ältestenrat entschied, zuerst über die Konsenslösung abzustimmen; hätten mehr Abgeordnete dafür als dagegen gestimmt, dann wäre sie angenommen worden, und es hätte keine weitere Abstimmung mehr gegeben. Anderenfalls sollte eine Entscheidung zwischen Berlin und Bonn fallen.

Fotos: Diemar Gust für baw

Berlin – oder doch lieber Bonn? Dass das Parlament in den Reichstag zieht, war nach der Wiedervereinigung umstritten.

DR. JIEHUA CHEN

1984 geboren in Shenzhen (China)

2002 Schulabschluss in Shenzhen

2002 bis 2004 Informatikstudium an der Universität Shenzhen

2005 bis 2010 Diplomstudium der Informatik an der TU Berlin

2011 bis 2015 Promotionsstudium an der TU Berlin im Fachgebiet Algorithmik und Komplexitätstheorie

18.12.2015 Promotion zum Dr. rer. nat.

Seit 2014 Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der TU Berlin im Fachgebiet Algorithmik und Komplexitätstheorie

Info: www.user.tu-berlin.de/jchen

Kontakt: jiehua.chen@tu-berlin.de

EINE NEUE ART DER WAHLPRÜFUNG

Jiehua Chen im bdw-Gespräch

Woher kommt Ihr Interesse für die deutsche Politik und insbesondere für Wahlen?

Wahlen finde ich interessant, weil sie versuchen, aus den unterschiedlichen Meinungen vieler Menschen einen Konsens zu bilden. Mich interessieren die vielfältigen Möglichkeiten der Konsensbildung und deren Vor- und Nachteile. Das Wahlverfahren, das in der Hauptstadtabstimmung von 1991 verwendet wurde, interessiert mich sehr, weil es in vielen Ländern eingesetzt wird und weil effizient berechnet werden kann, wer gewinnt und ob eine Manipulation möglich ist.

Hat Ihre Rechenmethode das Potenzial, Wahlen fairer zu gestalten?

Ich denke schon. Ich hoffe, dass meine Algorithmen zu diesem Zweck eingesetzt werden können. Deshalb habe ich sie frei zugänglich zur Verfügung gestellt.

Sie haben sowohl in Ihrer Heimat China als auch in Deutschland studiert. Welche Unterschiede sind Ihnen dabei aufgefallen?

Mir ist aufgefallen, dass in China eher auswendig und alleine gelernt wird. In Deutschland hingegen setzt man sich auch kritisch mit Themen auseinander und arbeitet mehr im Team. Außerdem hat man hier die Möglichkeit, sich aktiver am Studium zu beteiligen, zum Beispiel durch Übungen oder Seminare. In China muss man gegen Ende des Informatik-Studiums ein Praktikum in einer Firma machen, das gab es an der TU Berlin zum Beispiel nicht.

Das historische Ergebnis war, dass die Konsenslösung die Mehrheit deutlich verfehlte. Weniger als ein Drittel (147 gegenüber 489) der Abgeordneten stimmte mit Ja. Anschließend wurde Berlin mit knapper Mehrheit (338 Stimmen gegenüber 320 für Bonn) zum Gewinner gekürt.

Geschick ausgewählt

Die Entscheidung war gefallen, sorgt aber immer noch für Diskussionen. Eine natürliche Frage ist zum Beispiel, ob Bonn hätte gewinnen können, wenn die Abstimmungsreihenfolge anders gewesen wäre. Um diese Frage beantworten zu können, muss man wissen, wie die Abgeordneten in diesem Fall abgestimmt hätten. Dies hatte schon 1993 Wolfgang Leininger in einem Beitrag zur Zeitschrift Finanzarchiv untersucht. Er rekonstruierte für jeden der 658 Abgeordneten, was seine liebste, zweitliebste und drittliebste Alternative war. Daraus lässt sich ablesen, dass Bonn gewonnen hätte, wenn man zuerst über Berlin anstatt über die Konsenslösung abgestimmt hätte. Die Abstimmungsreihenfolge war also von entscheidender Bedeutung. Aber wie findet man eine geeignete Reihenfolge um eine Wunschalternative gewinnen zu lassen? Und kann eigentlich jede Alternative gewinnen?

Diese beiden Fragen haben ihren Ursprung in der Politikwissenschaft. Für die Lösung, die ich im Rahmen meiner Forschung entwickelt habe, benötigte ich jedoch Methoden der theoretischen Informatik und der Mathematik. Wie ich bald herausfand, ist das Problem nicht neu: Schon 1977 fragte Nicholas Miller

im American Journal of Political Science, welche Alternativen beim sequentiellen Wahlverfahren durch eine geeignete Abstimmungsreihenfolge gewinnen können. Allerdings konnte er nicht alle solche Alternativen identifizieren, so dass das Problem seitdem ungelöst war.

Für die Hauptstadtwahl lässt sich die Antwort noch einfach finden, indem man alle möglichen Reihenfolgen für die Abstimmung durchprobiert. Bei drei Alternativen ist das leicht möglich, da es nur sechs verschiedene Reihenfolgen gibt. In Wahlen mit zehn oder mehr Alternativen existieren aber schon Millionen von möglichen Anordnungen, und einfaches Probieren dauert viel zu lange.

Muss man nun alle Reihenfolgen ausprobieren oder gibt es eine einfachere Lösung? Ich habe dazu folgendes beobachtet: Wenn überhaupt eine Reihenfolge existiert, durch die die Wunschalternative gewinnt, dann existiert auch eine Reihenfolge, in der sie als letzte steht und gewinnt. Daraus entwickelte ich die Idee, die Reihenfolge von hinten nach vorne aufzubauen. Zuletzt müsste über unsere Wunschalternative abgestimmt werden. Aber wo reiht man die anderen Alternativen ein? Bei genauem Betrachten der Struktur der Wahl erkannte ich, dass nicht alle Alternativen gleich wichtig für die Reihenfolge sind. Gefährlich sind die Konkurrenzalternativen, die jeweils von der Mehrheit der Wähler gegenüber der Wunschalternative bevorzugt werden. Sie dürfen nicht unmittelbar vor der Gewünschten eingereiht werden, da sonst ein Gewinner gefunden wird, bevor über die Wunschalternative abgestimmt werden kann. Zu diesem Zweck fügt man zunächst die ungefährlichen Alternativen unmittelbar vor der Gewünschten ein. Die Reihenfolge der gefährlichen Konkurrenzalternativen wird wie folgt festgelegt: Man wählt zunächst eine Konkurrenzalternative aus, die nicht gewinnt, wenn man sie gegen die schon einsortierten Alternativen zur Abstimmung stellt; falls es eine solche Alternative nicht gibt, dann bricht man ab und weiß, dass die Wunschalternative keinesfalls gewinnen kann. Ansonsten fügt man die ausgewählte Alternative vorn ein und wiederholt diesen Prozess, bis alle Konkurrenzalternativen einsortiert sind. Das Endergebnis (falls nicht vorzeitig abgebrochen wurde) ist eine Abstimmungs-



Jiehua Chen untersucht, unter welchen Bedingungen die Alternative A bei einer Abstimmung die Alternative B schlägt.



Bei vielen Abstimmungen und Rankings in digitalen Medien sind Großrechner nötig, um Manipulationen zu entdecken.

reihenfolge, die die Wunschalternative zum Gewinner macht. Durch den Ansatz, die Reihenfolge rückwärts und nicht vorwärts zu konstruieren, ist es mir gelungen, eine beweisbar korrekte Lösung zu finden und damit nach fast 40 Jahren Millers offene Frage zu beantworten.

Einigung unter Freunden

Parlamentarische Abstimmungen spielen im Alltag der meisten Menschen nur selten eine Rolle. Wahlen im weiteren Sinne tauchen aber immer dann auf, wenn eine kollektive Entscheidung getroffen oder ein Konsens gefunden werden muss. Wenn man sich zum Beispiel mit Freunden auf eine Zeit für einen gemeinsamen Kinobesuch einigen will, oder wenn die Personalabteilung einer Firma den besten unter hunderten von Bewerbern aussuchen soll, dann ist eine Wahl notwendig. Eine wichtige Rolle spielt das Wahlverfahren, das festlegt, nach welchem Schema aus den einzelnen Stimmen ein oder mehrere Gewinner ausgewählt werden. Wahlen waren schon immer wichtig, haben aber im Internetzeitalter noch einmal stark an Bedeutung gewonnen. Sie spielen eine tragende Rolle beispielsweise in Metasuchmaschinen, die aus den Ergebnissen mehrerer Suchmaschinen wie Google oder Yahoo zu einem bestimmten Suchbegriff eine kombinierte Reihenfolge der gefundenen Webseiten bil-

den. Weitere häufige Anwendungen sind Umfragen wie zum Beispiel nach der besten Universität Deutschlands oder Empfehlungsdienste von Büchern oder Videos im Online-Handel. Solche Empfehlungsdienste bieten, basierend auf Bewertungen durch andere Kunden, aus einer großen Menge an Produkten einen individuell passenden Vorschlag an.

Wie das Beispiel der Hauptstadtwahl gezeigt hat, sind Wahlen manipulierbar. Bei automatisierten Wahlen, in denen Computerprogramme die Stimmabgaben sammeln und die Gewinner berechnen, droht automatisierte Manipulation. Es ist also wichtig zu wissen, ob und mit welchem Zeitaufwand eine Manipulation überhaupt möglich ist. Eins der Hauptthemen meiner Forschungsarbeit ist die Bestimmung der Rechenzeit zur Auffindung einer Wahlmanipulation.

Wahlen können auf viele verschiedene Weisen manipuliert werden. Beispielsweise können Wähler strategisch, das heißt entgegen ihrer eigentlichen Überzeugung abstimmen, um ein für sie besseres Endergebnis zu erreichen. Bei der Hauptstadtabstimmung könnte das zum Beispiel bedeuten, dass Abgeordnete, die eigentlich Bonn als alleinige Hauptstadt befürworten, in der ersten Runde für die Konsenslösung stimmen, da sie ahnen, dass Bonn in der zweiten Runde gegen Berlin verlieren würde. Eine weitere Form der Manipulation ist die sogenann-

te konstruktive Bestechung, bei der man Wähler etwa durch ein Bestechungsgeld dazu bringt, ihre Stimmabgabe so zu ändern, dass eine Wunschalternative gewinnt, wobei man ein begrenztes Budget zur Verfügung hat.

Diese beiden und noch weitere Formen der Manipulation habe ich im Rahmen meiner Promotion untersucht. In vielen Fällen konnte ich obere und untere Schranken der benötigten Rechenzeit zur Entdeckung einer möglichen Manipulation bestimmen: Manche Wahlmanipulationen sind vom Rechenaufwand her ähnlich leicht wie die Wahlleitermanipulation bei der Hauptstadtwahl, während manche anderen nach unserem heutigen Wissen wahrscheinlich nicht schnell zu berechnen sind. Letzteres ist durchaus wünschenswert, da es bedeutet, dass das entsprechende Wahlverfahren schwer zu manipulieren ist.

Um zum Abschluss noch einmal auf die ursprüngliche Frage zurückzukommen: War die Hauptstadtwahl tatsächlich manipuliert? Das können nur die damaligen Mitglieder des Ältestenrates des Bundestages beantworten, die die Reihenfolge der Abstimmung festgelegt haben. Alles, was ich gezeigt habe, ist, dass eine Manipulation möglich war und nicht besonders schwierig gewesen wäre. Das gilt übrigens für alle Abstimmungen, die das beschriebene Verfahren verwenden, auch bei mehr als drei Alternativen.

Da liegt was in der Luft ...

Aerosolpartikel – häufig auch als Feinstaub bezeichnet – sind kleinste Schwebstoffe in der Luft und kommen in der gesamten Atmosphäre der Erde vor. Sie beeinflussen die Luftqualität vor Ort, aber auch die Wolkenbildung und sogar den Treibhauseffekt. Doch wie entstehen diese luftgetragenen Nanopartikel und woraus bestehen sie?

von Martin Brüggemann

Was verbinden Sie mit dem Wort Feinstaub? Spätestens seit der Einführung der Umweltplaketten für Fahrzeuge im Jahr 2008 und den damit verbundenen Grenzwerten für die städtischen Umweltzonen, taucht das Wort regelmäßig in den Medien auf. Meistens, weil die zulässigen Grenzwerte wieder einmal überschritten wurden. Typischerweise erwecken diese Meldungen den Eindruck, dass Feinstaub ein rein menschengemachtes Phänomen sei. Dabei wird häufig vergessen, dass die Natur ebenfalls Feinstaub produziert – und zwar etwa zehn Mal so viel wie die gesamte Menschheit! Ist das alles also nur mediale Panikmache?

Um diese Frage zu beantworten, muss man wissen, dass sich die produzierten Schwebstoffe in ihren chemischen und physikalischen Eigenschaften enorm unterscheiden – und damit auch in ihrer Toxizität für den Menschen. Tatsächlich sterben weltweit jedes Jahr über drei Millionen Menschen an den Folgen von Feinstaub. Doch wie können wir zwischen menschengemachten und natürlichen Partikeln unterscheiden, sprich die Partikel auf ihre chemische Zusammensetzung

untersuchen? Mit diesem Thema habe ich mich in meiner Promotion beschäftigt und eine Methode entwickelt, welche eine sehr schnelle Analyse von Aerosolpartikeln, also Feinstaub, ermöglicht.

Bereits um 1500 beschrieb Leonardo da Vinci in seinen Anleitungen zur Malerei, dass feinste Partikel in der Luft die Sicht trüben und die Farbe entfernter Objekte ändern. Dieser bläuliche Dunst der Luft, der heute in der Kunst als Farbperspektive bekannt ist, lässt sich insbesondere an heißen Sommertagen über großen Waldregionen beobachten und beeinflusste weltweit die Namensgebung von bewaldeten Bergregionen: So lassen sich *Blue Mountains*, *Blue Ridges* oder *Smoky Mountains* in Indien, Jamaica, Australien oder gleich mehrfach in den Vereinigten Staaten finden. Doch auch über sehr dicht besiedelten Gebieten lässt sich dieses, als Los Angeles-Smog bekannte Phänomen an sonnigen Tagen beobachten. Es kann die städtische Luftqualität deutlich beeinträchtigen.

Im Gegensatz zu Schwebstoffen wie Pollen oder Rußpartikeln entstehen die für den Dunst verantwortlichen Feinstaubpartikel aus gasförmigen Substan-

zen direkt in der Luft. Bei natürlichen Aerosolen sind diese Vorläufer-Gase häufig sogenannte Terpene, die unter anderem Wäldern ihren typischen Geruch geben. Reagieren diese Terpene nun zum Beispiel mit Ozon in der Luft, bilden sich neue, schwerflüchtige Verbindungen. Die neuen Verbindungen kondensieren dann entweder auf bereits vorhandenen Partikeln oder bilden durch Zusammenlagerungen sogar neue Partikel in der Luft. Während Pollen oder Rußpartikel häufig noch mit bloßem Auge zu erkennen sind, lassen sich diese Partikel nicht mehr ausmachen, da die Durchmesser nur noch zwischen einem millionstel und einigen milliardstel Metern liegen. Gerade diese kleinsten Partikel stellen für die menschliche Gesundheit aber eine besondere Gefahr dar, da sie sehr tief in die Lunge vordringen und dort sogar ins Blut aufgenommen werden können. Des Weiteren haben diese feinsten Schwebstoffe große Bedeutung für klimatische Prozesse, da sie das Sonnenlicht reflektieren oder auch die Anzahl und Lebensdauer von Wolken beeinflussen können. Im Fokus meiner Promotion stand daher besonders diese Klasse von kleinsten Aerosolpartikeln.

Fotos: Thomas Klimk für bdw

Auch Wälder produzieren Feinstaub. Aus der Ferne sieht man ihn oft als Dunst. In der Nähe kann man die Gase, aus denen er sich bildet, riechen.

DR. MARTIN BRÜGGEMANN

1985 geboren in Attendorf

2005 Abitur in Schmallenberg

2006 bis 2011 Diplomstudium der Chemie an der Universität Münster

2012 bis 2015 Promotionsstudium an der Universität Mainz am Institut für Anorganische und Analytische Chemie und dem Max Planck Graduate Center

06.11.2015 Promotion zum Dr. rer. nat.

Seit 2016 Postdoktorand beim Centre National de la Recherche Scientifique am Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon (Frankreich)

Infos: www.ak-hoffmann.chemie.uni-mainz.de

Kontakt: martin.brueggemann@ircelyon.univ-lyon1.fr



FEINSTEN PARTIKELN AUF DER SPUR

Martin Brüggemann im bdw-Gespräch

Sie haben sich mit Feinstaub in Städten und der Natur beschäftigt. Inwieweit könnten Ihre Forschungsergebnisse helfen, Feinstaub zu vermeiden?

Durch die Messmethode allein lässt sich Feinstaub natürlich nicht vermeiden. Detaillierte Daten sind jedoch wichtig, um angemessene Maßnahmen treffen zu können – und auch, um das Bewusstsein für die Schädlichkeit bestimmter Partikel zu erhöhen. Am Ende sind vor allem die Politik und die Bevölkerung gefragt. Sie müssen geeignete Lösungen finden.

Wie viel würde es kosten, Ihre Technik großflächig bei Feinstaub-Messungen einzusetzen?

Das lässt sich zum jetzigen Zeitpunkt schwer abschätzen. Das Ziel meiner Arbeit war zunächst, einen Prototyp zu entwickeln und in ersten Feldstudien zu testen. Bis zu einem routinemäßigen und automatisierten Einsatz der Technik wird es daher wohl noch dauern. Das wäre es jedoch wert, da städtische Luftverschmutzung und Klimawandel zu unseren drängendsten Problemen gehören.

Während Ihrer Promotionszeit haben Sie an internationalen Konferenzen und Summer Schools teilgenommen. Was haben Sie auf diesen Reisen gelernt?

Der Austausch mit Wissenschaftlern aus verschiedenen Regionen der Erde hat mir gezeigt, wie komplex und global Phänomene wie Feinstaub und Klimawandel sind. Diese Probleme lösen wir nur im Dialog. Es war für mich persönlich bereichernd zu sehen, wie unterschiedlich verschiedene Kulturen an wissenschaftliche Fragen herangehen. Manche arbeiten sehr frei, andere stehen in strengen Hierarchien – exzellent geforscht wird aber überall.

Wenn man wüsste, woraus der Feinstaub besteht, würde man vielleicht mehr dagegen unternehmen, meint Martin Brüggemann.

Leider bedeutet die geringe Größe der Partikel auch, dass die Menge an messbaren Substanzen stark begrenzt ist. Hinzu kommt, dass die Verbindungen nicht rein, sondern in einem Gemisch mit bis zu hunderttausend anderen Substanzen vorliegen und sich die Zusammensetzung innerhalb kürzester Zeit ändern kann. Häufig liegt die Konzentration einer einzelnen Verbindung nur bei einigen Nanogramm pro Kubikmeter Luft, was etwa einem Gramm in hunderttausend großen Heißluftballons entspricht. Natürlich ist es weder möglich noch sinnvoll, eine so große Menge Luft auf deren Aerosolpartikel zu untersuchen. Daher sind sehr empfindliche und nachweisstarke Verfahren nötig, mit denen auch noch kleinste Mengen einer Verbindung in wenigen Litern Luft nachzuweisen und zu identifizieren sind.

Eine Waage für Moleküle

Eine weit verbreitete Technik, die für ihre Empfindlichkeit und ihr Nachweisvermögen in vielen wissenschaftlichen Bereichen geschätzt wird, ist die Massenspektrometrie, welche auch ich während meiner Forschungsarbeiten nutzte. Mithilfe dieses Verfahrens ist es möglich, die Masse einzelner Moleküle zu bestimmen – diese also sehr genau zu „wiegen“. Anschließend

können dann über die ermittelte Masse Rückschlüsse auf die chemische Gestalt der gemessenen Verbindungen gezogen und diese identifiziert werden. Voraussetzung für den Einsatz dieser Technik ist jedoch, dass die zu untersuchenden Substanzen erstens gasförmig sind und zweitens eine elektrische Ladung tragen. Während sich viele Substanzen durch einfaches Aufheizen verdampfen lassen und so in ein Gas umgewandelt werden können, stellt die zweite Bedingung schon eine größere Herausforderung dar. Um den verdampften Molekülen eine Ladung zu geben, der Chemiker spricht hier von Ionisierung, wird häufig ein Strahl aus Elektronen auf die entstehende Gaswolke gelenkt. Zwar ist diese Art der Ionisierung sehr effizient und universell einsetzbar, leider führt sie aber auch dazu, dass fragile Moleküle in viele kleine Teile zerfallen. Eine eindeutige Identifikation ist daher nur für wenige Verbindungen möglich, und nur durch komplizierte mathematische Verfahren können gemessene Molekülfragmente später noch bestimmten Substanzklassen zugeordnet werden. Um diese Schwierigkeit zu umgehen, entwickelte ich während meiner Untersuchungen ein Verfahren, das eine sehr sanfte und trotzdem universelle Erzeugung von geladenen Molekülen aus Aerosolpartikeln erlaubt, und kombinierte dieses mit der Massenspektrometrie.

Das von mir entwickelte Verfahren ähnelt dem Aufbau einer kleinen Leuchtstoffröhre. Das Ziel war jedoch nicht die Beleuchtung eines Raumes, sondern die Erzeugung von energiereichen Heliumatomen. Zwischen zwei Elektroden, welche von Helium umgeben sind, wird dazu eine Hochspannung angelegt und so ein Helium-Plasma erzeugt. Im Gegensatz zu einer Leuchtstoffröhre besitzt eine der beiden Elektroden nun eine kleine Öffnung in der Mitte, durch die das Helium, und damit auch energiereiche Heliumatome, aus der Entladungsregion entweichen können. Um das Plasma aufrechtzuerhalten, wird von der anderen Seite ständig neues Helium zugeführt. Da Heliumatome sehr viel Energie speichern und diese auf andere Moleküle übertragen können, kommt es schließlich zur Ionisierung der Luft vor der Ausgangselektrode. Durch die Hitze des Plasmas heizen sich außerdem das entweichende Helium und damit diese Ionisierungsregion auf, sodass in der Luft enthaltene Partikel sofort verdampfen. Auf diese Weise werden die beiden für die Massenspektrometrie

nötigen Bedingungen gleichzeitig und für eine Vielzahl von Substanzen erfüllt. Nun platzierte ich diesen Aufbau unmittelbar vor dem Einlass eines Massenspektrometers und leitete die zu untersuchende Luft mit den enthaltenen Feinstaubpartikeln durch die Ionisierungsregion.

In verschiedenen Experimenten konnte ich so zeigen, dass eine schnelle und einfache Untersuchung von Feinstaubpartikeln auf deren chemische Zusammensetzung möglich ist. Dazu führte ich, neben umfangreichen Laborstudien, auch Messungen im bayrischen Fichtelgebirge durch, um Aerosole unter realistischen Bedingungen zu untersuchen. Dort konnte ich unter anderem nachweisen, dass die Wälder natürlichen Feinstaub bilden. Allerdings konnte ich auch zeigen, dass Abgase von Verkehr und Industrie die Partikelbildung beeinflussen und neuartige, schwefelhaltige Verbindungen im Aerosol entstehen. Menschgemachte Abgase und natürliche Aerosole reagieren hier also miteinander und verändern gegenseitig ihre chemischen und physikalischen Eigenschaften.

Die Messungen zeigen somit, dass eine eindeutige Zuordnung von natürlichen und menschengemachten Partikeln durch die gegenseitige Beeinflussung häufig nicht möglich ist. Selbst wenn ein großer Teil der Partikel also natürlichen Ursprungs sein kann, bleiben die anfänglichen Substanzen nicht erhalten, sondern werden zu neuen Verbindungen umgewandelt, deren Folgen für die menschliche Gesundheit bisher nicht bekannt sind. Diskussionen um Feinstaub und dessen Auswirkungen auf Mensch und Natur sind daher wohl doch nicht bloß mediale Panikmache. Leider sind routinemäßige Feinstaub-Messungen bisher häufig auf das Gewicht der Partikel beschränkt, obwohl dieses kaum etwas über Herkunft und Auswirkungen der Partikel verrät. Für die Zukunft würde ich mir daher wünschen, dass Techniken wie die von mir entwickelte vermehrt bei solchen Messungen zum Einsatz kämen, um eine routinemäßige und dennoch detaillierte Untersuchung von Feinstaub zu erlauben.



Das Instrument zur Feinstaub-Analyse erinnert an eine Leuchtstoffröhre.

Heiraten nach Plan

Schmetterlinge im Bauch, Herzrasen und schweißnasse Hände... doch ist er wirklich der Richtige? Die Mathematikerin setzt sich an den Computer und rechnet es schnell aus. Nebenbei gewinnt sie wichtige Erkenntnisse, die auf viele andere Bereiche des Lebens anwendbar sind, wie zum Beispiel Job-Bewerbungen.

von Ágnes Cseh

Mathematik taucht an den verschiedensten Stellen unseres Alltagslebens auf: Logistik, Busfahrpläne, Fußballmeisterschaften, Fluchtwege und vieles mehr werden mithilfe mathematischer Modelle geplant. Können wir auch die Partnersuche mit Zahlen und Formeln beschreiben? In meiner Doktorarbeit beschäftigte ich mich mit dem „Problem der stabilen Ehe“, das seit über 50 Jahren ein wichtiger Forschungsschwerpunkt ist. 2012 wurden Alvin Roth und Lloyd Shapley für ihre Resultate auf diesem Gebiet mit dem Alfred-Nobel-Gedächtnispreis für Wirtschaftswissenschaften ausgezeichnet. Was ist das für ein mathematisches Modell, das in der Wirtschaft vielfach angewandt wird und sich anhand von Liebesbeziehungen veranschaulichen lässt?

Stellen Sie sich je eine Gruppe von Frauen und Männern vor, die der Einfachheit halber als heterosexuell angenommen werden. Jeder Beteiligte stellt nun eine Liste auf: Der erste Mensch ist seine große Liebe, der zweite ist seine zweitbeste Option und so weiter. Wir möchten diese Personen so verkuppeln, dass ihre Ehen die Zeit überdauern. Instabilität wird dabei von zwei Personen verursacht, die nicht miteinander verheiratet sind, den jeweils anderen aber ihrem Ehepartner oder ihrem Single-Dasein vorziehen. In einer stabilen Paarung sind die

Personen alle so verheiratet, dass es keine derartigen Paare gibt.

David Gale und Lloyd Shapley haben bewiesen, dass eine stabile Paarung immer existiert und mit einem einfachen Verfahren gefunden werden kann. Dieses Verfahren – wir Mathematiker nennen die Verfahren Algorithmen – funktioniert etwa so wie eine altmodische Verlobung. Jeder Mann macht der ersten Frau auf seiner Liste einen Heiratsantrag. Jede Frau, der mindestens ein Antrag gemacht worden ist, nimmt das beste Angebot sehr vorsichtig und nur vorübergehend an und weist alle anderen Männer zurück. Einige Paare sind jetzt also zusammen, aber noch nicht verheiratet. In der zweiten Runde sind die noch nicht erhörten Männer wieder an der Reihe: Sie unterbreiten der zweiten Frau auf ihrer Liste ein Angebot. Danach dürfen die Frauen sich wieder überlegen, ob ihnen einer der neuen Anträge besser gefällt als der alte. Nimmt eine bereits liierte Frau einen neuen Antrag an, löst sie damit ihre vorherige Beziehung. Der Algorithmus läuft weiter, bis jeder Mann liiert ist oder von allen Frauen auf seiner Liste zurückgewiesen wurde.

Die resultierende Paarung ist nicht nur stabil, sondern auch die beste stabile Paarung für die Männer – und gleichzeitig die schlechteste für die Frauen. Denn während die Männer ihre Vorlieben aktiv geäußert haben, mussten die Frauen die

Fotos: Ronald Frommann für bpb

Auch große Gefühle lassen sich mathematisch ausdrücken.

DR. ÁGNES CSEH

1988 geboren in Szolnok (Ungarn)

2007 Abitur in Szolnok

2007 bis 2010 Bachelorstudium der Mathematik an der Technischen und Wirtschaftswissenschaftlichen Universität Budapest

2010 bis 2012 Masterstudium der Mathematik an der TU Berlin

2012 bis 2015 Promotionsstudium an der TU Berlin im Fachbereich Mathematik

07.12.2015 Promotion zum Dr. rer. nat.

2016 Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Universität Reykjavik (Island) bis August und seitdem Postdoktorandin an der Ungarischen Akademie der Wissenschaften in Budapest

Info: <https://sites.google.com/csehagnes88>

Kontakt: cseh@ru.is

ganze Zeit auf Angebote warten. Also zum Mitschreiben: Je aktiver man während des Datingprozesses ist, desto besser ist der Partner, den man kriegt. Und das stammt nicht aus dem Regal für Ratgeberliteratur, sondern ist mathematisch bewiesen.

Nun lassen Gefühle sich nicht so einfach als geordnete Listen abbilden, noch dazu will vermutlich niemand die Partnersuche automatisieren. Stabile Ehen dienen vielmehr als eine Metapher für das Grund-

konzept der Stabilität, und die Aussagen zum Thema „Heiraten“ sind nicht allzu wörtlich zu nehmen. Das Konzept kommt allerdings bereits seit über 60 Jahren bei der Einstellung von Assistenzärzten zum Einsatz. Dabei spielen die offenen Stellen in Krankenhäusern die Rolle der Frauen, die Gruppe der Männer besteht aus den Bewerbern. Ziel ist es, eine Zuordnung zu finden, bei der jeder Bewerber mit dem für ihn besten Krankenhaus gepaart wird, das die offene Stelle mit keinem besseren Bewerber besetzen konnte. Die breite Palette praktischer Einsatzfelder umfasst auch Zulassungsentscheidungen von Universitäten und Gymnasien, Paarungen bei Sportmeisterschaften, Lebendniere Spenden, Online-Auktionen und Verteilung von Wohnheimplätzen.

Wenn sich Vorlieben ändern

Bei Anwendungen sieht man sofort, dass die Effizienz des Paarungsalgorithmus unerlässlich ist: Er muss schnell ablaufen, auch wenn es sehr viele Teilnehmer gibt. In den USA werden zum Beispiel jedes Jahr über 40 000 Assistenzärzte Krankenhäusern zugeordnet. Der Algorithmus

sollte außerdem auch an mögliche Erweiterungen des Problems angepasst werden können.

In meiner Dissertation diskutiere ich zahlreiche Erweiterungen des Problems, eine davon bezieht sich auf sich ändernde Vorlieben. Der oben beschriebene Algorithmus basiert auf der Annahme, dass keine Person hinzukommt und dass jeder seiner ursprünglichen Liste treu bleibt. Die Wirklichkeit aber ist anders: Es wird immer einen Assistenzarzt geben, der seine Vorlieben nachträglich ändert. Schon die kleinste Änderung kann großes Chaos auslösen, weil durch die Änderung „Seitensprünge“ attraktiv werden und weitere nach sich ziehen würden. Mit anderen Worten: Auch die Mitbewerber würden dann ihre Stelle gegen eine bessere Option eintauschen wollen. Wann und wie endet diese Lawine? Ich habe gezeigt, dass die Teilnehmer mit großer Wahrscheinlichkeit sehr schnell wieder von alleine eine stabile Paarung finden, sogar unter viel komplizierteren, lebensnahen Bedingungen, zum Beispiel wenn große Krankenhäuser sehr viele offene Stellen anbieten. Das Prinzip lässt sich auch auf andere Situationen übertragen, in denen die Teilnehmer sich

DIE SUCHE NACH DEM BESTEN PARTNER

Ágnes Cseh im bdw-Gespräch

Sie schreiben: „Der richtige Weg ist, auf das Herz zu hören.“ Heißt das nicht automatisch, dass sich eben nicht berechnen lässt, welche Liebesverbindung die stabilste ist?

Mit der Mathematik lässt sich beweisen, dass man keine hochkomplizierte Rechenkerei braucht, um den besten Partner zu finden. Aber es ist doch beruhigend zu wissen, dass man theoretisch berechnen kann, welche Paare voraussichtlich zusammen alt werden.

Wird Ihr Forschungsergebnis schon in der Praxis angewendet?

Nein, zurzeit noch nicht. Allerdings finde ich, dass es sehr großes Potenzial hat, besonders wenn man das mathematische Modell auf Netzwerke überträgt. Zulieferungsketten sind da ein gutes Beispiel: Hier gibt es viele unterschiedliche Kombinationsmöglichkeiten von Zulieferern. Die Suche nach der besten Kombination lässt sich gut modellieren – so wie die Suche nach dem besten Partner.

Sie haben bereits an einigen Science Slams teilgenommen. Was macht Ihnen daran am meisten Spaß?

Es freut mich immer sehr zu sehen, dass ich Leute für mein Thema begeistern kann und sie dabei etwas lernen. Und das trotz der kurzen Zeit von nur fünf bis sieben Minuten.



Ob Liebe oder Stellenbesetzungen – aus mathematischer Sicht finden zwei Partner zusammen.

Kennenlernen an der Hochschule oder am Arbeitsplatz: Die Mathematikerin empfiehlt, aktiv zu werden, um die Chancen auf den besten Partner zu erhöhen.



dann schnell wieder stabilisieren, wie zum Beispiel Spielertransfers in der Fußballbundesliga oder, etwas bodenständiger gedacht, die Zimmerpartnerwahl in Wohnheimen.

Während eines längeren Forschungsaufenthaltes in Indien fiel mir auf, dass der westliche Blick auf arrangierte Ehen sehr eingengt ist. Viele Betroffene sind der Meinung, dass arrangierte Ehen oft Erfolgsgeschichten sind. Als Forscherin stabiler Paarungen musste ich mir das Thema natürlich mal ganz mathematisch anschauen. Das ursprüngliche Modell lässt sich leicht erweitern, um den Willen der Eltern zu modellieren. Die jungen Männer und Frauen bilden das oben beschriebene Modell. Selbstverständlich haben sie alle ihre eigenen Vorlieben, aber der Wille ihrer Eltern mag davon so verschieden sein wie Tag und Nacht. Strenge Eltern bestimmen ein Paar, und die etwas nachsichtigeren Eltern schließen nur einige Partner aus. Das Ziel ist nun eine Paarung zu finden, die einerseits stabil ist bezüglich der Listen der Jugendlichen, andererseits alle erzwungenen Paare enthält und alle verbotenen Paare vermeidet. Dadurch würden sowohl Eltern als auch ihre Kinder glücklich gemacht, und Untreue wäre auch ausgeschlossen. In der Krankenhaus-Anwendung entspräche eine arrangierte Ehe dem Szenario, dass ein Krankenhausleiter unbedingt einen bestimmten Bewerber einstellen will, auch wenn er zu den schwächeren Kandidaten gehört.

Man kann leicht sehen, dass sich die Wünsche der Eltern und das Streben nach Stabilität nicht immer unter einen Hut bringen lassen. Zum Beispiel macht ein verbotenes Liebespaar, in dem beide jeweils der Traumpartner des anderen sind, alle erlaubten Paarungen instabil. Deshalb stellte ich sofort die nächste Frage: Wie findet man eine erlaubte Paarung, in

der die Anzahl der potenziellen Affären so niedrig wie möglich ist? Es stellte sich heraus, dass das Berechnen einer solchen Paarung mindestens so schwer ist wie das Lösen der unter Informatikern berühmten NP-schweren Probleme. Trotz jahrzehntelanger intensiver Bemühungen hat noch niemand einen schnellen Algorithmus für ein solches Problem gefunden. Für die Antwort auf die Frage, ob dies überhaupt möglich ist, ist ein Millionen-Betrag ausgelobt. Es steht also zu vermuten, dass auch mit dem schnellsten Rechner der Welt keine gute arrangierte Paarung gefunden werden kann. Erzwungene und verbotene Paare sorgen also in allen Anwendungsgebieten dafür, dass das Problem nicht mehr schnell lösbar ist. Was sollte fortschrittsfeindliche Eltern von Ehestiftung und Krankenhausleiter von Ergebnismanipulation abschrecken, wenn nicht dieses Resultat?

Für manche komplexen Probleme sind die bisherigen Zuweisungsmodelle nicht ausreichend. Um zum Beispiel Zulieferketten großer Firmen zu modellieren, brauchen wir einen stabilen Warenfluss über mehrere Händler. Jeder Händler hat dabei Vorlieben bei seinen möglichen Geschäften. Für solche Modelle habe ich den oben beschriebenen Verlobungsalgorithmus verallgemeinert und den Fall erzwungener und verbotener geschäftlicher

Beziehungen im Detail studiert. Dadurch habe ich die Tür zu weiteren Anwendungsgebieten geöffnet, wo das Stabilitätskonzept noch nicht eingesetzt werden konnte.

Die von mir entwickelten Modelle können auf Vorliebenänderungen schnell reagieren und komplexe Geschäftsnetzwerke modellieren. Des Weiteren habe ich gezeigt, dass Ergebnismanipulation in der Form von erzwungenen und verbotenen Paaren kaum durchführbar ist. Die größte Stärke dieser Resultate liegt darin, dass sie in allen Anwendungsgebieten der Stabilität universal einsetzbar sind. Aus meiner Forschung lässt sich nebenbei folgern, dass eine Trennung nicht das Ende der Welt bedeutet, eine arrangierte Ehe aber eher keine gute Idee ist. Letztendlich kriegt man immer denselben Ratschlag von der Mathematik: Der richtige Weg ist, auf das Herz zu hören. Steckt in der eiskalten Mathematik also doch ein ganz sanfter Kern, wenn man sie nur aus der Nähe betrachtet?

Spatzenhirn oder gefiederter Affe?

Krähen sind für ihr schlaues Verhalten bekannt. Die raffinierten Rabenvögel verhalten sich so flexibel und komplex wie unsere nächsten Verwandten im Tierreich, obwohl sie keine Großhirnrinde besitzen. Deshalb können wir von ihnen eine Menge lernen – auch über die Funktion unseres eigenen Gehirns.

von Lena Veit

Elstern erkennen sich im Spiegel, Krähen benutzen ausgetüftelte Werkzeuge aus Stöckchen, Raben versetzen sich sogar in die Lage von Artgenossen – Rabenvögel fallen immer wieder durch scheinbar unglaubliche kognitive Leistungen auf.

Doch was geht im Kopf einer Krähe vor, wenn sie solche Aufgaben meistert? Die Einzelzelleableitung mit haarfeinen Mikroelektroden erlaubt uns, winzige Spannungsunterschiede im Gehirn aufzuzeichnen: die Aktionspotenziale, mit denen die Nervenzellen kommunizieren. So kann man einzelne Nervenzellen bei der Arbeit belauschen und damit genau die Prozesse beobachten, die diese Intelligenzleistungen hervorbringen.

So spannend es zunächst klingt, die Aktivität einzelner Nervenzellen zum Beispiel beim Werkzeuggebrauch oder während der Interaktion einer Krähe mit ihren Artgenossen aufzuzeichnen – für die neurophysiologische Ableitung braucht man vor allem zwei Dinge: eine kontrollierte Umgebung und sehr viele Wiederholungen. Damit wir die Aktivität der Nervenzellen bestimmten Reizen, Verhaltensweisen oder sogar Denkpro-

zessen zuschreiben können, müssen wir wissen, welche Sinneseindrücke in jedem Moment auf das Tier einwirken, wie es sich bewegt, und welches Wissen über die Umwelt die neuronale Aktivität beeinflussen könnte. Und um zu prüfen, wie verlässlich das Verhalten mit einem neuronalen Aktivierungsmuster zusammenhängt, müssen wir das gleiche Verhalten immer wieder unter möglichst gleichen Bedingungen beobachten.

Für meine Doktorarbeit beschränkte ich mich deshalb auf eine essentielle Grundlage vieler der spannenden Verhaltensleistungen: die kognitive Flexibilität. So wie man durch das Auswendiglernen eines Gedichts nicht gleich zum großen Poeten wird, muss ein noch so kompliziertes Tierverhalten nicht unbedingt ein Zeichen besonderer Intelligenz sein, wenn es in jeder Situation immer gleich abgespult wird. Viele Verhaltensleistungen der Rabenvögel sind dagegen flexibel: Krähen verstehen, welche Kausalzusammenhänge ihrem Werkzeuggebrauch zu Grunde liegen. Sie wählen nicht immer das längste Stöckchen aus, sondern genau das, welches für die jeweilige Aufgabe benötigt wird. Genauso verteilen Raben oder Hä-

Fotos: Jay Watson für bfw



Nach der Promotion musste sich Lena Veit von ihren Versuchstieren verabschieden. Für unser Bild hat sie sich Vertreter aus Plastik besorgt.

DR. LENA VEIT

1984 geboren in Starnberg

2004 Abitur in Wasserburg am Inn

2005 bis 2008 Bachelor-Studium der Bioinformatik an der Universität Tübingen

2008 bis 2010 Master-Studium der Neuro- und Verhaltenswissenschaften an der International Max Planck Research School in Tübingen

2010 bis 2015 Promotionsstudium an der Universität Tübingen am Institut für Neurobiologie

29.07.2015 Promotion zum Dr. rer. nat.

Seit 2016 Postdoktorandin an der University of California in San Francisco

Infos: <http://profiles.ucsf.edu/lena.veit>

Kontakt: lena.veit@ucsf.edu

**DIE VOGEL-
FLÜSTERIN**

Lena Veit im bdw-Gespräch

Für Ihre Doktorarbeit haben Sie Krähen von Hand aufgezogen. Sind diese Ihnen dabei ans Herz gewachsen?

Natürlich. Wenn man, wie ich, mehrere Jahre lang täglich mit denselben zwei Vögeln arbeitet, baut man eine besondere Beziehung zu ihnen auf. Es war einer der schönsten Aspekte meiner Arbeit, diese faszinierenden Tiere aus nächster Nähe kennenlernen zu dürfen.

Sie gehören zu den Gründungsmitgliedern des Vereins Pro-Test Deutschland, der über den Nutzen von Tierversuchen in der Wissenschaft informiert. Wie kam es dazu?

Im Internet stößt man schnell auf voreingenommene Positionen und Seiten, die mit halbweisen, verzerrten oder gar falschen Informationen Stimmung machen. Meine Kollegen und ich haben in der öffentlichen Debatte vor allem Sachlichkeit und eine wahrheitsgetreue Informationsquelle vermisst. Auf www.pro-test-deutschland.de und in den sozialen Medien versuchen wir, verständliche Informationen bereitzustellen, Missverständnisse aufzuklären und häufige Fragen zu beantworten. Wir wollen über das Thema Tierversuche offen und informiert miteinander reden und freuen uns immer über weitere Fragen – und natürlich über Leute, die mitmachen wollen!

Kann man aus Ihrem Forschungsergebnis Rückschlüsse auf die menschliche Intelligenz ziehen?

Unsere Gehirne ähneln denen anderer Primaten sehr. Aber intelligente Vögel erbringen mit viel kleineren und anders aufgebauten Gehirnen ähnliche kognitive Leistungen wie Affen. Für manche intelligente Verhaltensweise ist unsere Großhirnrinde also keine notwendige Bedingung.



Unter dem Mikroskop werden die haarfeinen Elektroden bearbeitet, mit denen man die Aktivität der Nervenzellen misst.

her ihre Futterverstecke nicht ständig um, sondern nur dann, wenn sie beim Verstecken beobachtet wurden. Die Tiere können ihr Verhalten der Situation anpassen.

Für unser Experiment untersuchte ich diese Flexibilität mit einer Regelaufgabe, bei der die Regeln "gleich" und "ungleich" im ständigen Wechsel angewendet werden mussten. Zunächst zog ich zwei Krähen von Hand auf und brachte ihnen bei, Bilder auf einem Touchscreen anzupicken. Als Belohnung gab es Mehlwürmer. Dann mussten sie sich die Bilder merken; die Belohnung gab es nur, wenn sie das vorher gesehene Merkbild aus einer Auswahl von zwei Bildern mit dem Schnabel wählten. Doch eines Tages funktionierte diese Strategie nicht mehr: Nun gab es die Belohnung genau dann, wenn sie das jeweils andere Bild anpickten. Die Krähen kamen schnell auf die neue "ungleich"-Regel und passten sich an. Ich konfrontierte sie immer häufiger mit dem Regelwechsel, bis sie irgendwann merkten, was die farbigen Symbole oder Töne bedeuten, die die aktuelle Regel anzeigen. Nun konnte ich die Regeln beliebig oft wechseln und die Krähen lösten nahezu jeden Versuchsdurchlauf richtig. Sie mussten also blitzschnell umschalten und für ein und dasselbe Merkbild unterschiedliche Aufgaben ausführen.

Das ist eine Aufgabe, die auch uns Menschen nicht immer leicht fällt. Insbesondere Patienten, die eine Schädigung des Präfrontalkortex erlitten haben, können Regeln nicht ständig wechseln. Dieses Gehirnareal ist für viele unserer geistigen Fähigkeiten wie Planung und

strategische Entscheidungen verantwortlich. Vögel haben jedoch keinen Präfrontalkortex, denn ihr Vorderhirn ist grundlegend anders aufgebaut. Das liegt an der unabhängigen Vergrößerung des Gehirns, die Vögel und Säugetiere in einer mehr als 300 Millionen Jahre dauernden getrennten Evolutionsgeschichte erfahren haben. Während unsere Großhirnrinde eine auffällig geschichtete Struktur hat, sind die Nervenzellen im Vogelgehirn gleichmäßig verteilt oder in Kernen kondensiert. Die Kognitionspsychologin Nicky Clayton, die das Sozialverhalten von Hähnen untersucht, vergleicht das Vogelgehirn eher mit Fruchtebrot – im Gegensatz zur geschichteten Torte der Säugetiere.

Eine Revolution im Denken

Dieser scheinbaren Unordnung im Vogelgehirn traute man lange Zeit nicht viel zu: Anatomen gingen davon aus, dass Vögeln der Teil des Gehirns fast komplett fehlt, der bei uns die Großhirnrinde ausmacht, und dass sie deshalb nur zu einfachem, instinktgesteuertem Verhalten in der Lage sind. Parallel zu den Erkenntnissen über die ganz und gar nicht einfachen Verhaltensweisen der Vögel gab es in den letzten Jahren eine Revolution in unserem Denken über das Vogelgehirn. Die gefiederten Enkel der Dinosaurier haben Gehirne, die denen der Säugetiere in nichts nachstehen, das Vorderhirn sieht nur anders aus. Und offensichtlich können diese anatomisch anders aufgebauten Gehirne auch ähnliche Aufgaben meistern – von wegen Spatzenhirn!

Doch was bedeutet der unterschiedliche anatomische Aufbau für die Arbeitsweise der Nervenzellen? Ich beobachtete im Gehirn der Krähen Nervenzellen, die die Verhaltensregel anzeigten: Manche Zellen erhöhten ihre Aktivität nur bei der Aufgabe "gleich", andere bei "ungleich". Dabei spielte es keine Rolle, ob ich die Aufgabe mit einem farbigen Symbol oder einem Ton anzeigte, denn diese Nervenzellen spiegelten nur die Verhaltensstrategie wider und nicht die sensorischen Eigenschaften des Hinweisreizes. Besonders eindrucksvoll wurde das deutlich, wenn die Krähe einen Fehler machte: Anhand des Aktivierungsmusters der Regelzellen konnte ich das meistens schon sagen, bevor die Krähe das falsche Bild anpickte. Außerdem war es den Zellen egal, auf welche Merkbilder die Regeln angewendet wurden. Sie kodierten das allgemeine Prinzip "gleich/ungleich" und konnten es auf beliebige Bilder anwenden, selbst wenn der Vogel sie noch nie zuvor gesehen hatte. Diese Nervenzellen repräsentieren also die aktuellen Spielregeln auf einem sehr abstrakten Niveau.

Zellen dieser Art waren bisher nur aus dem Präfrontalkortex der Affen bekannt, mein Doktorvater Prof. Andreas Nieder hat sie dort zum Beispiel bei der Anwendung abstrakter "größer/kleiner" Regeln gefunden. Im Krähengehirn fanden wir

die Regelzellen im Gebiet Nidopallium caudolaterale, das dem Präfrontalkortex in vielen wichtigen Eigenschaften ähnelt. Diese beiden Hirnareale, die entscheidend für intelligentes Verhalten sind, haben sich bei Säugetieren und Vögeln aus einer anderen Ursprungsstruktur unabhängig voneinander entwickelt, besonders stark bei Affen und Rabenvögeln. Krähen und Affen teilen also eine hirnhysiologische Grundlage für abstrakte Entscheidungen, jedoch nicht das Gehirngebiet, in dem diese Entscheidungen verarbeitet werden. Das bedeutet, dass die Art, wie die Nervenzellen die abstrakten Regeln kodieren, unabhängig voneinander entstanden sein muss. Man nennt das konvergente Evolution.

Diese Situation kann man mit den Flügeln der Vögel und Fledermäuse vergleichen: Beide stammen von Vorderextremitäten ab. Ebenso finden sich bei allen Wirbeltieren fünf Hirnteile gleichen Ursprungs. Aber die funktionelle Form der Flügel haben Vögel und Fledermäuse unabhängig voneinander "erfunden", so wie sich die Arbeitsweise der Hirngebiete für komplexe kognitive Aufgaben unabhängig voneinander aus der gemeinsamen Gesamtstruktur herausgebildet hat. Das ähnliche Aussehen des konvergent entwickelten Flugapparats ist eine Konsequenz der Ansprüche, die das Fliegen an die Flügel stellt. Ähnlich wie wir durch

den Vergleich der Flügel von Vögeln und Fledermäusen allgemeine Rahmenbedingungen und Prinzipien, wie z.B. den Auftrieb, besser erkennen können, so können wir hoffentlich durch den Vergleich der unabhängig entstandenen Gehirnareale von Vögeln und Säugetieren mehr über allgemeine Funktionsprinzipien des Gehirns lernen.

Wir können also verstehen, welche Eigenschaften unseres Gehirns absolut notwendig sind, um intelligentes Verhalten hervorzubringen – und welche eher zufällige Erfindungen der Evolution sind, die auch anders hätten gelöst werden können. So betrachtet könnte man sagen, dass es sich bei der aufwändig geschichteten und gefalteten Struktur unserer Großhirnrinde um so etwas wie Federn handelt: Eine komplexe, vielleicht sogar schöne Lösung, die die Evolution gefunden hat – aber eben nicht die einzige Möglichkeit, um flexibles Verhalten hervorzubringen. Dagegen sind die ähnlichen neuronalen Verarbeitungsmuster, die flexiblen Denkprozessen zugrunde liegen, bei Krähen und Affen durch konvergente Evolution unabhängig voneinander entstanden. Das bedeutet, dass es sich bei den Regelzellen um ein Verarbeitungsmuster handelt, das sich im Laufe der Evolution immer wieder bewährt hat. Wahrscheinlich hilft die hohe Abstraktionsstufe intelligenter Gehirnen, sich flexibel anzupassen und immer wieder neue Aufgaben zu lösen. ●



Im neuen Labor an der University of California untersucht Lena Veit, was sich im Gehirn ändert, wenn Zebrafinken ihren Gesang lernen.

Echten und falschen Schätzen auf der Spur

Ob Gold, Holz, Knochen oder Keramik: wie Detektive gehen Archäometriker geheimnisvollen Funden auf den Grund. In Mannheim arbeitet das einzigartige Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie – mit Hightech bis unters Dach.

von Cornelia Varwig

Im Schloss Hohenheim im Süden von Stuttgart schlummert ein Schatz. Nicht aus Gold, sondern aus Holz. Für Forscher ist er jedoch wesentlich wertvoller als jedes Edelmetall, denn mit dem Holz können sie 12500 Jahre in die Vergangenheit schauen. Die Jahrringe der hier gelagerten Bohrkerne, Balken und Holzscheiben von ganzen Bäumen bilden einen Kalender, der nicht nur historische Umwelt- und Klimaverhältnisse zeigt, sondern mit dem sich auch Holz datieren lässt – aufs Jahr genau, unter besonders günsti-

gen Voraussetzungen sogar jahreszeitlich genau. So konnte mit ihnen etwa das Alter der steinzeitlichen Pfahlbauten am Bodensee bestimmt werden und auch das der keltischen Heuneburg an der Donau.

Der Jahrringkalender der Universität Hohenheim ist etwas ganz Besonderes: Er ist lückenlos und einer der renommiertesten und längsten der Welt. Nachdem er zuletzt einige Zeit im Dornröschenschlaf gelegen hatte, sind Wissenschaftler des Curt-Engelhorn-Zentrums (CEZ) Archäometrie in Mannheim nun zusam-

men mit den Kollegen der Universität Hohenheim dabei, ihn aufzuwecken und wieder nutzbar zu machen. Innerhalb der nächsten zwei Jahre soll das wertvolle Holzarchiv nach Mannheim umziehen. Ein Labor für Dendrochronologie, also Jahrringanalysen zur Altersbestimmung von Holz und für Aussagen zu Klima- und Umweltbedingungen, ist bereits eingerichtet, das von dem ausgewiesenen Experten Thorsten Westphal betrieben wird.

„Zunächst muss alles digital inventarisiert werden und das ist sehr aufwen-

Fotos: Tim Wegner für bfw

dig – schließlich handelt es sich um rund 50000 Proben“, erklärt Ernst Pernicka, der Leiter des Archäometrie-Zentrums. Später soll das Archiv dann auch für alle Fachkollegen zugänglich sein. Die Mannheimer haben im letzten Jahr bereits mehrere Treffen mitteleuropäischer Dendrochronologen initiiert, um den Austausch zu fördern. „Netzwerken statt konkurrieren“ lautet das Motto. „Nur durch die Zusammenarbeit möglichst zahlreicher Laboratorien können verlässliche mehrtausendjährige Rekonstruktionen der Wechselwirkungen von Klima, Umwelt und Mensch bewerkstelligt werden“, sagt Westphal.

Das Dendro-Labor ist nur die jüngste Erweiterung des CEZ, die dank der Unterstützung der Klaus Tschira Stiftung möglich geworden ist. Vor sechs Jahren hatte die Stiftung bereits ein Labor für Altersbestimmung finanziert, das den Namen des Stifters trägt: Klaus-Tschira-Archäometrie-Zentrum. Es gehört zum CEZ und ist nur wenige Meter davon im Museum „Bassermannhaus für Musik und Kunst“ untergebracht. Zur Laborausstattung gehört das MICADAS (Mini Carbon Dating System), ein kompaktes Beschleuniger-Massenspektrometer, mit dem das Alter von organischen Materialien wie Knochen, Zähnen, Holz, Pflan-

Mit kritischem Blick mustert Ernst Pernicka eine alte Goldmünze. Röntgenstrahlen werden ihm genau sagen, woraus sie besteht.

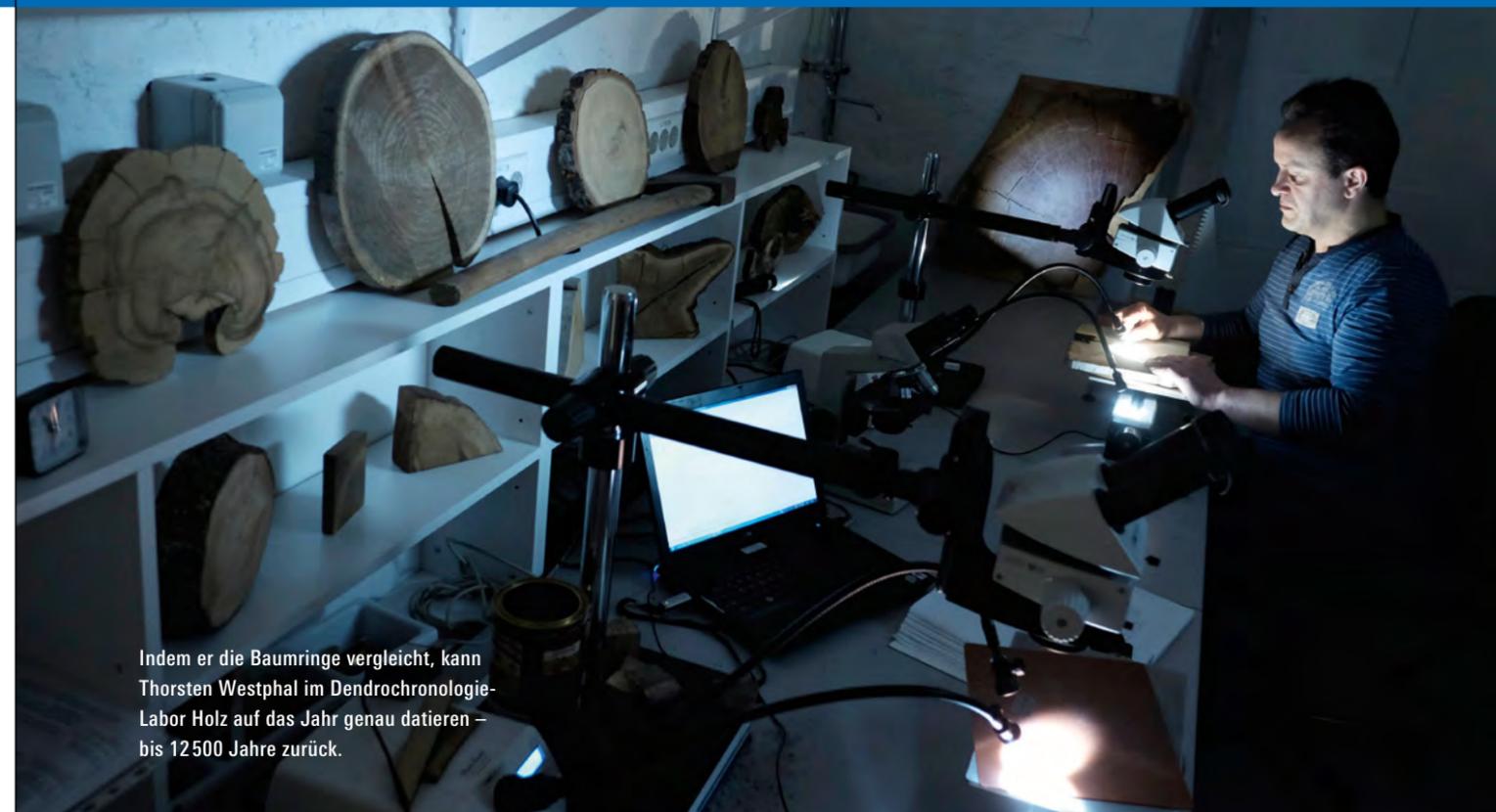
zenresten und Textilien bestimmt werden kann. Für diese sogenannte ¹⁴C-Datierung benötigt das Hightech-Gerät nur wenige Milligramm der Probe, um den Gehalt an radioaktivem Kohlenstoff ¹⁴C zu messen. Mit der Lumineszenz-Datierung können die Forscher zudem das Alter von Sedimenten, Gesteinsoberflächen

und gebrannten Objekten wie Keramik, Porzellan und Ziegeln bestimmen.

Solche modernen Techniken sind – ergänzend zu den traditionellen Methoden von Ausgräbern – aus der Archäologie nicht mehr wegzudenken. „Man darf dabei nie vergessen: Was wir in der Archäometrie machen, reagiert auf Frage-

stellungen aus der Archäologie. Das ist kein Selbstzweck“, betont Ernst Pernicka, der schon seit Beginn seiner Karriere ein Wandler zwischen den wissenschaftlichen Welten ist. Der 66-jährige gebürtige Wiener studierte Chemie und arbeitete lange im Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg. Damals entwickelte er bereits

METHODE	WIE FUNKTIONIERT'S?	WAS BRINGT'S?	GEEIGNET FÜR
Röntgenfluoreszenz-Spektrometrie	Bei dem zerstörungsfreien Verfahren wird Material mit Röntgenstrahlen angeregt, woraufhin dieses selbst Röntgenstrahlung aussendet. Dieses Fluoreszenzlicht ist materialspezifisch, so dass man daran die Zusammensetzung des Materials bestimmen kann.	Zusammensetzung Echtheitstest	Alle Materialien, insbesondere anorganische, wie Metalle, Erze, Keramik und Glas
Laserablation	Ein dünner Laserstrahl wird auf ein Objekt gelenkt und verdampft dort eine mit dem bloßen Auge nicht sichtbare Menge des Materials. Dabei entstehen Partikel, die in einem Massenspektrometer (siehe unten) bestimmt werden können.	Schonende Probennahme	Vorwiegend anorganische Materialien
Isotopenanalyse	Isotope sind verschiedene Atomsorten des gleichen Elements, die sich in der Zahl der Neutronen unterscheiden. Mit dem Massenspektrometer wird ihre Verteilung in der Probe bestimmt und anschließend mit der natürlichen Verteilung in einer bestimmten Region verglichen.	Herkunft von Rohstoffen	Knochen und Zähne (über Stickstoff- und Strontium-Isotope) Metalle, Glas (über Blei-Isotope), Eisen (über Osmium-Isotope), Zinn
Massenspektrometrie	Mit dem Massenspektrometer lässt sich die chemische Zusammensetzung eines Materials ermitteln. Dazu wird das Material ionisiert, also in elektrisch geladene Teilchen umgewandelt. Dann werden diese nach dem Verhältnis ihrer Masse zu ihrer Ladung sortiert.	Herkunft von Rohstoffen, Migration und Ernährung von Mensch und Tier	Organische und anorganische Materialien
¹⁴ C- oder Radio-karbon-Datierung	Anhand der Menge der radioaktiven Kohlenstoffatome ¹⁴ C in einer Probe organischen Materials lässt sich ihr Alter ermitteln: Je älter, umso mehr Atome sind bereits zu Stickstoff ¹⁴ N zerfallen. Das geht bis rund 45 000 Jahre zurück.	Isotopen- zusammensetzung, Altersbestimmung	Organisches Material wie Knochen, Zähne, Pflanzenreste, Textilien
Lumineszenz-Datierung	Mineralien speichern die Energie, die beim Zerfall von natürlich vorkommenden radioaktiven Elementen entsteht. Die Energie wird als Licht freigesetzt, wenn das Mineral mit Licht oder durch Wärme stimuliert wird. Bei gebrannten Objekten datiert man den Zeitpunkt des letzten Brennens, bei Sedimenten den der Ablagerung oder Überdeckung.	Altersbestimmung	Gebrannte Objekte wie Keramik, Porzellan, Ziegel und Sedimente
Dendrochronologie	Die Methode ermöglicht die jahrgenaue Datierung von hölzernen Objekten. Sie macht sich die unterschiedliche Breite der Jahrringe von Bäumen aufgrund schwankender Wachstumsbedingungen zunutze. Durch die Überlagerung der Ringmuster vieler Bäume und ihren überlappenden Lebenszeiten reicht die Datierung rund 12 500 Jahre zurück – und wird derzeit bis 14 500 Jahre ergänzt.	Altersbestimmung, Aussagen zu Wechsel- wirkungen zwischen Klima, Umwelt und Mensch	Holz



Indem er die Baumringe vergleicht, kann Thorsten Westphal im Dendrochronologie-Labor Holz auf das Jahr genau datieren – bis 12 500 Jahre zurück.

Methoden zur Herkunftsbestimmung und Datierung. An der TU Bergakademie in Freiberg baute er ab 1997 als Pionier das Fach der Archäometallurgie und Archäometrie auf, 2004 wechselte er an die Universität Tübingen. Fortwährend hatte er gegen Widerstände und Zweifler zu kämpfen, die etwa in den neuen Methoden eine Bedrohung der bisherigen Archäologie sahen. „Mittlerweile erkennen die meisten Archäologen aber ihren Vorteil an“, so Pernicka.

Sein Hauptsitz ist inzwischen Mannheim, doch seine Arbeit treibt ihn nach wie vor um den Globus: Zum Bioarchäologie-Treffen nach Berlin, zur Erkundung einer Goldmine nach Bulgarien, zur Probenahme nach Westchina, ganz zu schweigen von Vorträgen und Workshops, die er hält, um seine einmaligen Kenntnisse über die Archäometrie weiterzugeben, heute in Mainz, morgen in London. An der Universität Heidelberg hat er zudem seit 2014 die Klaus-Tschira-Stiftungsprofessur für Archäometrie inne.

„Interdisziplinarität ist überall gewollt, aber wenn es um die Finanzierung geht, sitzt man häufig zwischen den Stühlen“, weiß Pernicka aus Erfahrung und ist

daher besonders dankbar für die großzügige Finanzierung durch verschiedene Stiftungen und Fördereinrichtungen.

Die Klaus Tschira Stiftung verfolgt mit der Unterstützung der Archäometrie eines ihrer zentralen Förderziele, nämlich die Stärkung der Naturwissenschaften und ihre Einbindung in die Gesellschaft. In wohl kaum einem anderen Feld wird so deutlich, was naturwissenschaftlich-technisches Know-how direkt für den kulturellen und historischen Erkenntnisgewinn leisten kann.

In Deutschlands größtem Archäometrie-Zentrum in Mannheim wird aber nicht nur datiert. Die Forscher nehmen hier auch Objekte unter die Lupe, um deren Herkunft und Echtheit zu bestimmen. Regelmäßig hält Ernst Pernicka echte Schätze in den Händen – oder unechte? Das entscheidet sich nach der Analyse. „Wir haben eine weltweit einzigartige Methode entwickelt, mit der wir feststellen können, ob bestimmte Buntmetalle älter sind als 100 Jahre oder jünger“, sagt Pernicka. Das entscheidende Kriterium dafür ist die Radioaktivität des in der Natur vorkommenden Blei-Isotops ²¹⁰Pb. „Das bedeutet, wir können Fälschungen

eindeutig identifizieren, aber keine Echtheit bestätigen.“

Zuletzt hatte es der Experte mit einem prominenten Fall zu tun: dem Goldschatz von Bernstorf. Es war eine Sensation, als Hobbyarchäologen Ende der 1990er-Jahre den Goldschmuck sowie Bernstein in der Nähe einer bronzezeitlichen Befestigung in der bayerischen Gemeinde Kranzberg fanden. Zweifel an der Echtheit des Fundes bestanden bereits, doch erst vor drei Jahren erhielt Ernst Pernicka das Gold zur Untersuchung. Ergebnis: 99,99-prozentiges Reinstgold. Das spricht laut Pernicka gegen einen Schatz aus der Bronzezeit, denn damals waren die Menschen noch nicht in der Lage, so reines Gold herzustellen. Älteres Gold enthält immer Anteile von Kupfer und Silber. Auch andere Indizien sprechen dafür, dass Betrüger am Werk waren: In der Erdummantelung steckte etwa eine Tannennadel, deren Datierung zweifelsfrei ergab, dass sie modern ist.

Dennoch halten beteiligte Forscher und Politiker an Argumenten für die Echtheit des Goldes fest – etwa, dass die Technik der Zementation, die zur Trennung von Gold und Silber nötig ist, schon

in der Antike bekannt war. „Es gibt einen großen Kreis von Personen, der die Fälschung nicht anerkennen will“, sagt Pernicka. Immerhin gehe es um ihr wissenschaftliches Renommee. „Zudem ist aufgrund des Fundes ein eigenes Museum in der Marktgemeinde gebaut worden.“

Inzwischen wurden die Funde für eine Schiedsanalyse an die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung in Berlin übergeben. Die Ergebnisse sollen erst Ende des Jahres veröffentlicht werden (Stand bei Redaktionsschluss).

Der Konflikt wäre gar nicht erst entstanden, wenn man in der Lage wäre, Metall direkt zu datieren. Bisher ist das nicht möglich. Doch ein Team im Mannheimer Archäometrie-Zentrum arbeitet derzeit genau daran – und gelingen könnte es ausgerechnet bei Gold. Pernicka erklärt: „Wir machen uns die Tatsache zunutze, dass Gold die Elemente Uran und Thorium enthält, wenn auch nur in sehr geringer Konzentration. Die beiden produzieren beim radioaktiven Zerfall das Edelgas Helium, das sehr flüchtig ist. Gold hat jedoch die außergewöhnliche Eigenschaft, das Helium in kristalliner Form zu speichern.“ Wenn Gold zur

Bearbeitung das erste Mal geschmolzen wird, entweicht das geologisch enthaltene Helium. Und je mehr des Edelgases seither neu gebildet wurde, umso älter ist das Gold. „Das ist allerdings an der Grenze des physikalisch Messbaren.“

Woher stammt das Gold?

Dem Mannheimer Team und einer privaten Stiftung, die selbst viele Goldobjekte besitzt, ist es einen Versuch wert: Nach dreijährigen Erfahrungen und einer völligen Neukonzeption des Projekts wurde kürzlich ein neues Helium-Massenspektrometer angeschafft, das jetzt in der Testphase ist. „In wenigen Monaten wissen wir, ob es funktioniert“, freut sich Pernicka. Der einzige Haken an der Sache: Für die Methode wird eine Probenmenge von 20 Milligramm benötigt. „Das ist bei einem Ehering schon viel.“ So ist das Team dabei, ein Verfahren zu entwickeln, bei dem kleine Objekte als Ganzes erhitzt werden können. „Das ist alles noch im Entwicklungsstadium, aber kein Wolkenkuckucksheim“, ist Pernicka überzeugt.

Bei der Herkunftsbestimmung von Gold sind die Mannheimer schon deut-

lich weiter. Aufschlussreich für die Herkunft sind dabei die im Edelmetall enthaltenen Spurenelemente. Deren Muster gleichen die Wissenschaftler mit natürlichen Goldvorkommen ab.

Um dem Gold möglichst zerstörungsfrei seine Bestandteile zu entlocken, kombinieren die Forscher die sogenannte Laserablation mit der Massenspektroskopie. Während Letztere die Zusammensetzung sehr genau misst, ermöglicht die Laserablation eine nahezu zerstörungsfreie Probenahme – denn vom Gold möchte man ja so wenig wie möglich verlieren. „Das funktioniert so, dass wir mit einem Laserstrahl mit gerade einmal 0,05 Millimetern Durchmesser, der Dicke eines Haares, von der Oberfläche eine minimale Probe verdampfen. Dabei entsteht ein Aerosol, also eine Menge kleiner Staubteilchen, die wir dann analysieren“, erklärt Pernicka. „Mit bloßem Auge sieht man das nicht.“

Mit diesem Verfahren konnte 2014 gezeigt werden, dass das Gold der berühmten Himmelscheibe von Nebra wahrscheinlich aus der Region Cornwall stammt. Und ebenso, dass das älteste Gold der Menschheit im bulgarischen Varna ein „lokales Gewächs“ ist. Als

Zwei Mitarbeiter bereiten im Klaus-Tschira-Archäometrie-Zentrum Proben für die Kohlenstoff-Datierung nach der ¹⁴C-Methode vor.



Ronny Friedrich benötigt für den Teilchenbeschleuniger im MICADAS-Labor nur winzige Proben, um aus dem Kohlenstoff das Alter zu ermitteln.

DAS CURT-ENGELHORN-ZENTRUM (CEZ) ARCHÄOMETRIE

Im Jahr 2004 wurde das Curt-Engelhorn-Zentrum (CEZ) Archäometrie als gemeinnützige GmbH in Mannheim gegründet. Sein Zweck ist die naturwissenschaftliche Untersuchung von archäologischen und historischen Kulturgütern. Als Ergänzung zu traditionellen Methoden der Archäologie ermöglicht die Archäometrie weitreichende Erkenntnisse etwa über historische Lebensweisen, Handel oder Migration.

Das CEZ ist zugleich Forschungsinstitut und Dienstleistungsanbieter. Etwa zur Hälfte wird die Forschung aus Drittmitteln finanziert. Unterstützung bieten vor allem die Klaus Tschira Stiftung und die Curt-Engelhorn-Stiftung. Etwa ein Viertel der Einnahmen stammt von privaten Auftraggebern. Eine enge Verbindung besteht zu den in direkter Nachbarschaft gelegenen Reiss-Engelhorn-Museen.

Der wissenschaftliche Leiter des Zentrums ist seit Beginn Ernst Pernicka, Klaus-Tschira-Stiftungsprofessor für Archäometrie an der Universität Heidelberg. Er beschäftigt knapp 20 Mitarbeiter und einige Doktoranden.

Im Zentrum der Arbeit steht die Bestimmung von Alter, Herkunft und Echtheit verschiedenster Materialien. Untersucht werden Organisches wie Knochen, Zähne, Pflanzenreste und Textilien sowie Anorganisches, also etwa Metalle, Keramik, Porzellan und Glas.

Für die Analysen werden hochmoderne Technik und komplexe Methoden eingesetzt, von denen das CEZ viele selbst entwickelt. Im Jahr 2010 wurde das Institut um das Klaus-Tschira-Zentrum ergänzt, in dem Datierungen mit Radiokarbon- und Lumineszenz-Methoden sowie der Dendrochronologie durchgeführt werden.

www.cez-archaeometrie.de

nächstes steht die Herkunft des Goldes von Mykene auf Pernickas Prüfliste.

Methodisch sind die Forscher sogar schon wieder einen Schritt weiter: Mittlerweile erproben sie eine mobile Lasereinheit, mit der sie zum Beispiel auch in Museen gehen können. „Wir haben das schon einmal testweise im Puschkin-Museum in Moskau gemacht, wo ja – wie es politisch korrekt heißt – kriegsbedingt verlagertes deutsches Kulturgut lagert, das nicht ausgeführt werden kann“, so Pernicka. Es hänge jetzt nur noch von der Bewilligung eines Projektantrags ab, ob sie solch ein mobiles Gerät vom Kooperationspartner ETH Zürich kaufen können, um es dann selbst weiterzuentwickeln.

Und die Herkunft noch eines anderen Materials treibt Ernst Pernicka um. Er fragt sich, woher die Europäer der Bronzezeit das ganze Zinn hatten, aus dem sie zusammen mit Kupfer Bronze herstellen. Das Rätselhafte: „Zinn findet man, anders als Kupfer, in Europa nur in wenigen Lagerstätten.“ Die größte liegt in Cornwall, die zweitgrößte im Erzgebirge, die drittgrößte in Nordwestspanien. „Im ganzen Mittelmeerraum haben wir sonst kein Zinn, das heißt die Palastkulturen in Griechenland müssen das Zinn von irgendwoher beschafft haben, und es wäre ganz interessant zu wissen, woher“, findet Pernicka. Hier verspricht die äußerst komplexe Methode der Isotopenverhält-

nisanalyse der Lösung näherzukommen. Denn die Isotopenverhältnisse von Elementen unterscheiden sich je nach geologischer Region.

Die gute Nachricht ist: Die Forscher können bereits zwischen Zinn aus dem Erzgebirge und Zinn aus Cornwall unterscheiden. Erprobt wurde das unter anderem an der Himmelscheibe von Nebra, deren Zinn ebenfalls aus Cornwall stammt, obwohl sie nur 80 Kilometer vom Erzgebirge entfernt gefunden wurde. Aufgrund dieser Erkenntnis gelang es Ernst Pernicka, eine mit 2,5 Millionen Euro ausgestattete Förderung des European Research Council einzuwerben, mit der er seine Zinn-Suche noch bis 2018 fortsetzen kann.

Die schlechte Nachricht ist nun: Je mehr Objekte das Team analysiert, desto unklarer wird der Befund. Das heißt, der Unterschied zwischen den Zinn-Isotopenverhältnissen in Cornwall und denen im Erzgebirge ist nicht mehr so groß wie am Anfang und es gibt immer mehr Überschneidungen. „Wir haben rund 70 Proben aus Cornwall gemessen und jetzt kommen nochmal 40 aus dem Erzgebirge dran. Ich hoffe nun inständig, dass sich die Ergebnisse von dort nicht weiter ausdehnen und wir dann nicht mehr unterscheiden können“, sagt Pernicka. Doch er bleibt zuversichtlich. Das sei eben Risikoforschung, für die man im Vorfeld keine wirkliche Detailplanung machen könne.

„Schlau stiften“ für das Abenteuer Wissen

Mit ihrer Reihe „Schlaue Bücher“ publiziert die Edition Klaus Tschira Stiftung Entdeckerbücher für Kinder, Jugendliche und die ganze Familie. In Kürze erscheint das vierte Buch der Edition, das sich mit dem Erfinden beschäftigt.

von Kirsten Baumbusch

Zzzisch – eine ziemlich ungewöhnliche Flugscheibe durchschneidet die Luft am Rheinufer bei Speyer. Fotosession für das jüngste Werk der Edition Klaus Tschira Stiftung: der imposante Dom im Hintergrund, der Strand davor, pfiffige Teenies, die sich ein selbst gebasteltes Frisbee aus Schwimmbadnudel und T-Shirt zuwerfen, bilden eine treffliche Szenerie. „Schlau tüfteln“ heißt das Buch, für das hier professionelle Bilder entstehen.

„Unsere Bücher sollen Lust darauf machen, etwas Neues zu entdecken und Din-

ge auszuprobieren“, beschreibt die Geschäftsführerin der Klaus Tschira Stiftung, Beate Spiegel, warum die Edition zum Stiftungszweck passt wie der berühmte Topf auf den Deckel. Junge Menschen neugierig machen auf ihre Umwelt und sie zum Forschen anregen – dieser Aufgabe hat sich die Klaus Tschira Stiftung (KTS) verschrieben. Ob „Schlau kochen“, „Schlau gärteln“ oder „Schlau bauen“ – so die Titel der seit 2009 erschienenen Bücher für Kinder, Jugendliche und die ganze Familie – allesamt zeichnet sie eine andere Art der Wissensvermittlung aus.

Mit den schlaun Büchern lernen Familien gemeinsam zu kochen und begreifen dabei chemische Vorgänge, sie bauen gemeinsam Möbel und verstehen physikalische Gesetze oder sie begreifen beim Gärtnern die Biologie dessen, was da grünt und sprießt. Dieser Funke sprang und springt auf Tausende von begeisterten Leserinnen und Lesern über.

„Es gibt so unendlich viel zu erzählen vom Abenteuer Wissen“, schwärmt Verlagsleiterin Angela Thomaschik, in deren Umschau Verlag die Schlaue-Bücher erscheinen. Und tatsächlich, auch das jüngste Werk „Schlau tüfteln“, das in bewährter Zusammenarbeit mit dem Grazer Kindermuseum „FRida & freD“ entsteht, zeigt nicht nur erstaunliche Erfindungen, sondern kitzelt überdies die Entdeckerfreude heraus.

Staunen gehört beim Thema Erfindungen dazu. Ob Kartoffelchips, Konfetti oder Luftschlangen, Billy-Regal, Staubsauger, Teebeutel, Reißverschluss oder Auto; all dies ist irgendwann einmal von cleveren Tüftlerinnen und Tüftlern erfunden worden. „Oft war auch der Zufall im Spiel“, weiß Angela Thomaschik, „aber den gilt es ja erst einmal als solchen wahrzunehmen.“ Genau hier, so fährt die Verlagsleiterin fort, haben neugieriger Erfindergeist und bahnbrechende Wissenschaft ihren gemeinsamen Kern: nicht mehr vom Gleichen in eingefahrenen Gleisen zu produzieren, sondern neue Wege zu gehen.

Foto: Maria Brinkop



Test am Rhein: Zwei Jugendliche lassen ihr selbst gebautes Frisbee fliegen.



Die vier „Schlaue Bücher“ der Edition Klaus Tschira Stiftung machen Lust darauf, etwas auszuprobieren.

Das gelang auch dem Team des Umschau Verlags in Kooperation mit der Stiftung. „Schlau kochen“, der 250 Seiten starke Erstling, knüpfte an zwei Leidenschaften des im letzten Jahr verstorbenen Stifters Klaus Tschira an: das Kochen und seine lebenslange Passion, Wissenschaft verständlich zu machen. Die rund 90 Rezepte – Schritt für Schritt zum Nachkochen – sind umrahmt von unterhaltsamen Erklärungen, was beispielsweise das Sauerkraut so sauer macht oder wie man herausfindet, ob ein Ei noch frisch ist. Auszeichnungen ließen nicht auf sich warten. Die Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung kürte „Schlau kochen“ zum Liebling des Jahres. Der Bundesverband Deutscher Stiftungen verlieh den Kompass-Preis für gute Stiftungskommunikation.

Von der Natur inspiriert wurde auch „Schlau bauen“, das Architekturbuch für kleine und große Handwerker. Mit 15 spannenden Aktionen vom Marshmallow-Turm über das Papprollen-Regal bis zum Baumhaus wird jeder zum Baumeister. Möglich machen das fotografierte Schritt-

für-Schritt Anleitungen. Erklärt wird außerdem, mit welchen Techniken Biene, Maulwurf oder Eisbär ihr Zuhause bauen und wie das den Menschen inspiriert. Das wiederum passt hervorragend zur Stiftung. Hatte Klaus Tschira doch ein ausgesprochenes Faible für Architektur, die Bauprinzipien der Natur aufgreift. „Beispielsweise ähnelt das von der KTS gebaute Haus der Astronomie einer Spiral-Galaxie“, erklärt Beate Spiegel.

„Spüren, wo überall die Naturwissenschaften eine Rolle spielen, und sich einfach einmal etwas trauen“, das wünscht sich Mara Knapp, die für die KTS die Edition betreut. Das gilt nicht nur für das Ausprobieren und Entdecken zu Hause. Themen aus dem „Schlau bauen“-Buch konnten Kinder und Familien bereits in einer interaktiven Ausstellung des Grazer Kindermuseums erleben, die von der KTS auch nach Mannheim geholt wurde. Auch die Grazer Ausstellung zu „Schlau tüfteln“ soll auf Betreiben der Stiftung 2017 in Mannheim gezeigt werden – passend zum dortigen Jubiläum „200 Jahre Fahrrad“.

Neu ist bei „Schlau tüfteln“ indes, dass es für die Kinder, die noch nicht lesen können, ein Bilderbuch geben wird. Hauptdarsteller ist eine ziemlich originelle Mäusetruppe, die mit gewitztem Erfindergeist eine Party veranstalten will. Die Liebe zum Detail und die Kreativität haben sich dabei bis in die Sprache vorgewagt. Da wird „mausetüftelt“ und „mausetobt“ und es muss „mausgemistet“ werden.

Eines springt beim Durchblättern der liebevoll gestalteten Edition ins Auge: Die „Schlaue Bücher“ werden von Menschen mit Herzblut gemacht. Und so natürlich, wie die Klaus Tschira Stiftung ihre Projekte sich entwickeln und gedeihen lässt, dürfte auch in Sachen Edition noch einiges an Potenzialentfaltung zu erwarten sein. „Schlau stiften“ eben. ●

Fotos: Umschau Verlag

IMPRESSUM

Klaus Tschira Preis für verständliche Wissenschaft
Eine Sonderpublikation von bild der wissenschaft in Zusammenarbeit mit der Klaus Tschira Stiftung

ERSCHEINUNGSTERMIN: Oktober 2016
HERAUSGEBERIN: Katja Kohlhammer
VERLAG: Konradin Medien GmbH
Ernst-Mey-Straße 8
70771 Leinfelden-Echterdingen

GESCHÄFTSFÜHRER: Peter Dilger
CHEFREDAKTEUR: Dr. Alexander Mäder
MITARBEIT: Meike Seibert
GRAFISCHE GESTALTUNG UND TITELBILD:
Ricardo Martins (Hintergrund Fotolia.com)
BILDREDAKTION: Ruth Rehbock
REDAKTION KLAUS TSCHIRA STIFTUNG:
Renate Ries, Agnes Schulze
VERTRIEB: Kosta Poulos

DRUCK: Konradin Druck GmbH
Kohlhammerstr. 1–15
70771 Leinfelden-Echterdingen

Weitere Exemplare können Sie anfordern bei:
Klaus Tschira Stiftung gGmbH
Villa Bosch, Schloss-Wolfsbrunnengasse 33
69118 Heidelberg
www.klaus-tschira-preis.info

Einsendeschluss: 28. Februar 2017

2017

KlarText!
KlarText!
KlarText!
KlarText!

Klaus Tschira Preis
für verständliche
Wissenschaft

Machen Sie Ihre Forschung sichtbar!

Bewerben Sie sich um den Klaus Tschira Preis für verständliche Wissenschaft!

Jedes Jahr zeichnet die Klaus Tschira Stiftung Wissenschaftler aus, die die Ergebnisse ihrer herausragenden Dissertation in einem Artikel erklären – verständlich, spannend, anschaulich.

Teilnahmebedingungen

- Promotion 2016 in Biologie, Chemie, Informatik, Mathematik, Neurowissenschaften, Physik oder einem angrenzenden Fachgebiet
- Herausragende Forschungsergebnisse
- Ein allgemein verständlicher Textbeitrag über die eigene Forschungsarbeit
- Bewerbungsschluss: 28. Februar 2017

Jeder gewinnt!

- Jeder Teilnehmer: zweitägiger Workshop Wissenschaftskommunikation (kostenfreie Fortbildung)
- Gewinner: 5.000 Euro Geldpreis in jedem der sechs Fachgebiete und Publikation der Siegerbeiträge in einer Sonderveröffentlichung