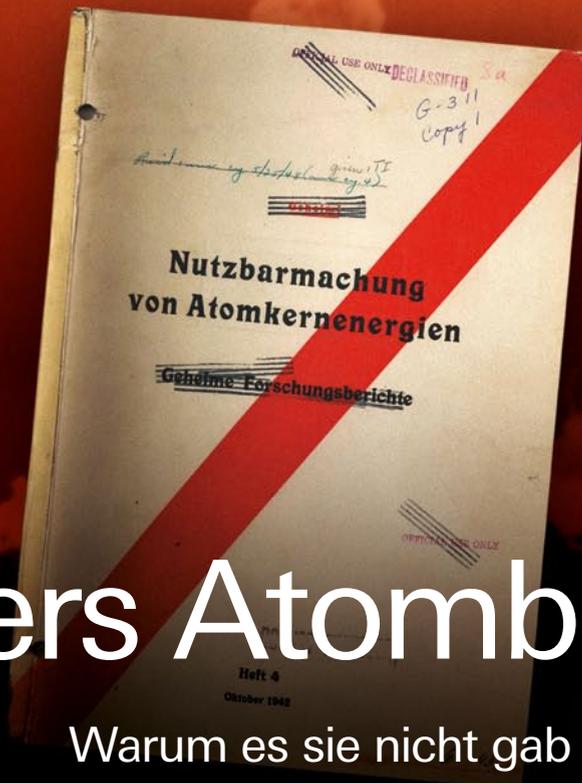


# Spektrum

der Wissenschaft



## Hitlers Atombombe

Warum es sie nicht gab –  
ein Kernphysiker bewertet die Quellen neu

- GLYPHATISCHES SYSTEM** So entsorgt unser Gehirn seine Abfälle
- ROSETTA** Die Bilanz einer erfolgreichen Kometen-Mission
- MATHEMATIK** Computer sollen die Grundlagen der Disziplin neu definieren

# KOMPAKT THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Ob A wie Astronomie oder Z wie Zellbiologie: Unsere **Spektrum KOMPAKT**-Digitalpublikationen stellen Ihnen alle wichtigen Fakten zu ausgesuchten Themen als PDF-Download zur Verfügung – schnell, verständlich und informativ!

€ 4,99  
je Ausgabe



Bestellmöglichkeit und weitere Ausgaben:

[www.spektrum.de/kompakt](http://www.spektrum.de/kompakt)



# EDITORIAL

## NEUE BLICKE AUF DIE VERGANGENHEIT

Von Hartwig Hanser, Redaktionsleiter  
hanser@spektrum.de

▶ Hätten die Nazis eine Atombombe bauen können? Ich erinnere mich noch gut daran, wie ich mich als Jugendlicher für diese Frage interessierte und auch jene Haigerlocher Anlage besichtigte, in der die Forscher des »Uranvereins« 1945 ihre letzten Experimente durchführten. Von damals blieb mir im Gedächtnis, eine »deutsche Atombombe« wäre durchaus realisierbar gewesen. Später irritierte mich, wie solche Aussagen oft zwischen demonstrativer Erleichterung und heimlichem Stolz über die Weltklasse deutscher Wissenschaft changierten.

Tatsächlich war es über Jahrzehnte eine dominierende Ansicht in der Wissenschaftsgeschichte, die im »Dritten Reich« verbliebenen Physiker hätten schon gewusst, wie man eine Bombe baut, aber die Umsetzung sei an der Machbarkeit gescheitert. So hätten etwa die Ressourcen während des Kriegs nicht für ein solch gigantisches Projekt gereicht.

Jetzt räumt Manfred Popp, ein führender Kernphysiker und der langjährige Vorstandsvorsitzende des Forschungszentrums Karlsruhe (heute Teil des Karlsruher Instituts für Technologie, KIT), mit dieser Sichtweise auf. Sein gründliches Studium aller verfügbaren Unterlagen und Dokumente lässt nur einen Schluss zu: Die Physiker um Nobelpreisträger Werner Heisenberg hatten keinen Schimmer. Vor allem erkannten sie nicht den entscheidenden Unterschied zwischen einem explodierenden Kernreaktor und einer echten Bombe mit maximaler Sprengkraft, der mir als Nichtphysiker zugegebenermaßen bisher auch nicht geläufig war. Ab S. 12 können Sie den spannenden Bericht unseres Autors lesen – und falls nötig diese Wissenslücke ebenfalls schließen.

Noch viel weiter zurück in die Geschichte führt uns der Artikel ab S. 66. Er zieht ein Fazit der kürzlich abgeschlossenen archäologischen Grabungen an einem Ruinenhügel nahe den Dardanellen in der heutigen Westtürkei. Dort soll das legendäre Troja gelegen haben, das Homer in seinen Epen besang. Die Archäologen haben fast drei Jahrzehnte lang eine beeindruckende Menge an Informationen zusammengetragen und dabei überraschende Erkenntnisse über die Region und die unruhige Zeit um 1200 v. Chr. gewonnen. Was genau das Troja Homers war und ob es dieses historisch überhaupt gab, wissen sie allerdings immer noch nicht.

Herzlich, Ihr



### NEU AM KIOSK AB 25. 11.!

Wie Astronomen den letzten Geheimnissen unseres Sonnensystems auf die Spur kommen, lesen Sie in unserem **Spektrum Spezial Physik – Mathematik – Technik 4/2016**.

### AUTOREN DIESER AUSGABE

J. ADAM FENSTER, UNIVERSITY OF ROCHESTER



### MAIKEN NEDERGAARD STEVEN A. GOLDMAN

Die beiden Forscher haben im Gehirn ein bisher unbekanntes Leitungssystem entdeckt, das dort die zelluläre Müllabfuhr übernimmt (S. 34).



### GERHARD SCHWEHM

Der Kometenexperte und frühere Leiter der kürzlich zu Ende gegangenen Rosetta-Mission blickt auf das erfolgreiche internationale Großprojekt zurück (S. 52).



### ERNST PERNICKA

30 Jahre lang erforschte ein internationales Archäologenteam die Ruinen Trojas. Ab S. 66 fasst Grabungsleiter Pernicka gemeinsam mit zwei Mitarbeitern die Ergebnisse zusammen.

## 3 EDITORIAL

## 6 SPEKTROGRAMM

Moleküle im Sternenfeuer

Viele neue Mondkrater

Eizellen aus der Petrischale

Abgetauchte Erdkruste

Weniger Methan durch Rotalgen

Querschnittgelähmter fühlt dank Hirnchips

Ältestes Lautbildungsorgan bei Vögeln

## 22 FORSCHUNG AKTUELL

### Nobelpreis für Chemie

Maschinen aus einzelnen Molekülen

### Nobelpreis für Physiologie oder Medizin

Abfallcontainer für den zellulären Recyclinghof

### Nobelpreis für Physik

Seltsame Zustände in flacher Materie

### Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften

Was ist ein guter Vertrag?

## 33 SPRINGERS EINWÜRFE

### Wer ist wirklich willkommen?

Wie die Menschen mit dem Flüchtlingsstrom nach Europa fertigwerden

## 40 ZEITREISE

Vom Post-U-Boot zur künstlichen Sonne

## 41 FREISTETTERS FORMELWELT

### Die Suche nach der Weltformel

Was steckt hinter der »Theorie von Allem«?

## 12 TITELTHEMA

### STÖRFALL DER WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Warum wurden im »Dritten Reich« keine Nuklearwaffen entwickelt, obwohl Deutschland bis zum Zweiten Weltkrieg in der Kernphysik führend war? In den Geschichtsbüchern steht: Das Wissen war vorhanden, allein die Mittel fehlten. Doch Originaldokumente legen einen anderen Schluss nahe.

Von Manfred Popp

## 34 NEUROBIOLOGIE NÄCHTLICHE GEHIRNWÄSCHE

Unser Denkorgan beseitigt mit einem bislang unbekanntem Entsorgungssystem schädliche Abfallstoffe – und zwar vor allem während des Schlafs.

Von Maiken Nedergaard und Steven A. Goldman

## 42 NATURSCHUTZ WIE VIELE TIGER GIBT ES NOCH?



Die Anzahl der letzten Tiger wird oft zu hoch geschätzt.

Wie sich ihr Bestand erholen könnte, zeigen Forschungen in Indien.

Von K. Ullas Karanth

## 52 ASTRONOMIE ZU BESUCH BEI EINEM KOMETEN

Die durch die Rosetta-Mission gewonnenen Erkenntnisse über das frühe Sonnensystem werden die Forscher noch eine Weile beschäftigen.

Von Gerhard Schwehm

## 60 MATHEMATIK WERDEN COMPUTER DAS WESEN DER MATHEMATIK VERÄNDERN?

Vladimir Voevodsky unternimmt eine Neufundierung der gesamten Mathematik mit dem Ziel, sie dem Computerbeweis zugänglich zu machen.

Von Kevin Hartnett

## 66 BRONZEZEIT DIE ERFORSCHUNG TROJAS – EIN FAZIT

Knapp 150 Jahre nach Schliemann konstatieren Tübinger Archäologen: Troja war ein regionales Zentrum – und überstand manche Eroberung.

Von Ernst Pernicka, Peter Jablonka und Magda Pieniżek

## 76 KOMMENTAR WAR TROJA DIE HAUPTSTADT DER SEEVÖLKER?

Laut einer kühnen These haben die Archäologen bislang einen ganzen Kulturkreis übersehen. Wer waren die »Luwier« wirklich?

Von Luise Loges

## 78 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN DIE LÖSUNG DES 27-DAMEN-PROBLEMS

Neuer Weltrekord: Es gibt 234 907 967 154 122 528 Anordnungen von Damen, die sich auf einem 27-27-Schachbrett nicht gegenseitig bedrohen.

Von Christoph Pöppe

## 82 IMAGINATION BUCHSTABEN, BEGEHREN UND TOD

**Serie: Magie der Schrift (Teil 4)** Im Mittelalter war die Lust am Text eng verbunden mit der Lust an dem Objekt, auf dem er geschrieben war. Und diesem wurde nicht selten magische Wirkung beigemessen.

Von Ludger Lieb



12

TITELTHEMA  
HITLERS NICHT  
VORHANDENE  
ATOMBOMBE



34

NEUROBIOLOGIE  
NÄCHTLICHE  
GEHIRNWÄSCHE



52

ASTRONOMIE  
ZU BESUCH  
BEI EINEM KOMETEN



66

BRONZEZEIT  
DIE ERFORSCHUNG  
TROJAS – EIN FAZIT

48 SCHLICHTING!

**Wassertropfen  
auf der Rennbahn**

Eine heiße Platte mit  
passendem Profil lässt  
Tropfen umherflitzen

86 REZENSIONEN

u. a. **mit Helmut Satz:** Kos-  
mische Dämmerung

**Lutz Berger:**  
Die Entstehung des Islam

**Oliver Götze,  
Lieselotte Kugler (Hg.):**  
Göttlich, Golden, Genial

**Yael Adler:** Haut nah

**Ulrich Eberl:**  
Smarte Maschinen

94 LESERBRIEFE

96 FUTUR III

**In der Glaszphäre**  
Die Welt ist einfach zu  
schön, um wahr zu sein

97 IMPRESSUM

98 VORSCHAU

Titelbild: Getty Images / ClassicStock /  
H. Armstrong Roberts (Atompilz);  
Deutsches Museum (Akte)



Alle Artikel auch digital  
auf **Spektrum.de**

Auf **Spektrum.de** berichten  
unsere Redakteure täglich  
aus der Wissenschaft: fundiert,  
aktuell, exklusiv.

# SPEKTROGRAMM

---



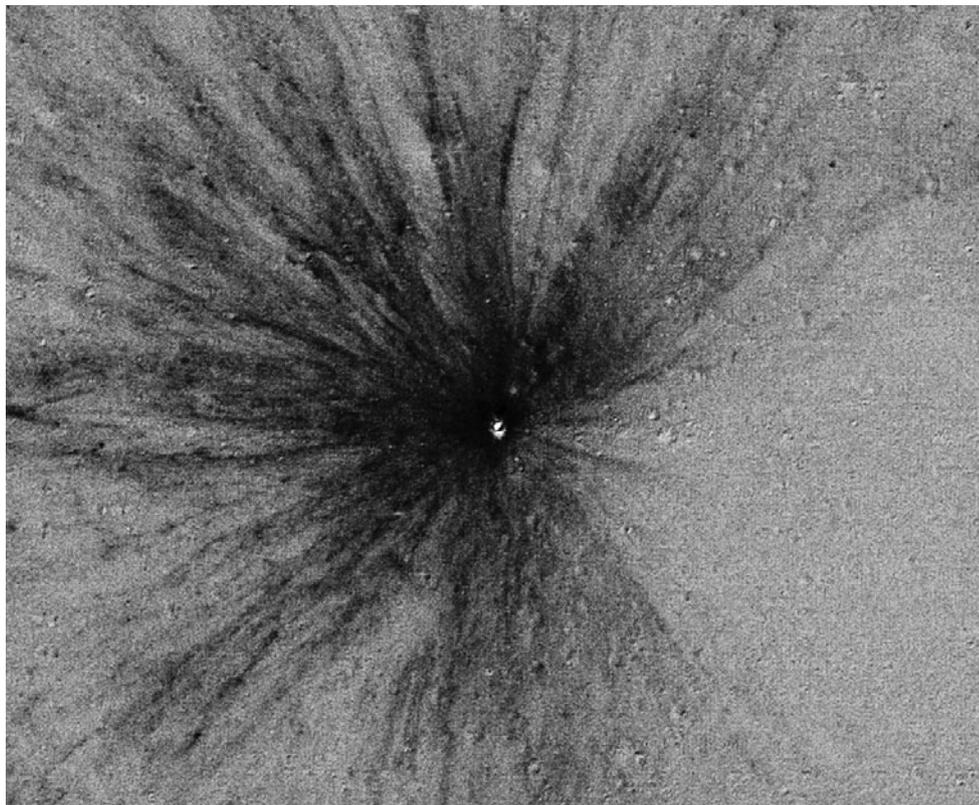


## MOLEKÜLE IM STERNENFEUER

▶ Ultraviolette Strahlung spielt bei chemischen Reaktionen im All eine größere Rolle als vermutet. Mit dem Spektrometer des Herschel-Weltraumteleskops haben Astronomen Kohlenstoffverbindungen in heißen Bereichen des Orionnebels untersucht, wo viele neue Sterne entstehen (im Bild weißblau; rote Filamente sind kälteres Gas). Unter anderem betrachteten sie  $\text{CH}^+$ , eine Ausgangssubstanz für komplexere organische Stoffe. Offenbar bildet sich das Molekülion kaum durch Stoßwellen, obwohl solche Ereignisse bislang als die wichtigsten Quellen galten. Stattdessen entsteht es vor allem durch das intensive Licht junger Sterne.

*arXiv:1604.05805, 2016*

SPYERER, E. J. ET AL. – QUANTIFYING CRATER PRODUCTION AND REGULITH OVERTURN ON THE MOON WITH TEMPORAL IMAGING. IN: NATURE 538, S. 215–218, 2016, FIG. 3B



**Dieser Mondkrater entstand zwischen Oktober 2012 und April 2013. Obwohl nur 12 Meter im Durchmesser (heller Punkt, Bildmitte), erstreckt sich sein Auswurf (dunkles Material) hunderte Meter weit. Das abgebildete Areal ist insgesamt 1300 Meter breit.**

## ASTRONOMIE VIELE NEUE MONDKRATER

Die Mondoberfläche ist einem weit stärkeren Bombardement ausgesetzt als bisher angenommen. Es schlugen dermaßen viele Meteoroiden auf dem Erdtrabanten ein, dass sie die oberen zwei Zentimeter seines Regoliths, der Schicht aus lockerem Material, das ihn bedeckt, etwa alle 80 000 Jahre umpflügen statt alle 10 Millionen Jahre wie zuvor geschätzt. Dies geht aus Aufnahmen der Mondoberfläche hervor, welche die NASA-Sonde Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) über Jahre aufgenommen hat.

Astronomen um Emerson Speyerer von der Arizona State University haben entsprechende Fotos analysiert. Sie verglichen jeweils zwei Aufnahmen desselben Areals auf dem Mond, die der LRO im Abstand von mehreren Monaten einfing, und zwar unter vergleichbaren Beleuchtungsbedingungen. Insgesamt wertete das Team gut 14 000 Bildpaare aus, die zusammen etwa sieben Prozent der Mondoberfläche abdecken.

Zur Überraschung der Forscher zeigte sich dabei, dass im betrachteten Zeitraum 222 neue Krater mit Durchmessern von zehn Metern oder mehr entstanden waren – 33 Prozent mehr, als gängige Modelle

vorhergesagt hatten. Die Fotos lassen erkennen, dass oft noch dutzende Kilometer vom eigentlichen Einschlag entfernt aufgewirbeltes Material niedergeht. Als Astronaut auf der Mondoberfläche laufe man weniger Gefahr, von Meteoroiden getroffen werden, als vielmehr von ausgeschleuderten Sekundärbrocken, sagte Speyerer im Interview.

Auch auf die Erde prasseln ständig kosmische Projektile ein, allerdings dringen nur wenige bis zum Boden vor – die meisten verglühen in der Atmosphäre. Von denen, die es auf die Oberfläche schaffen, verschwindet zudem ein Großteil in den Ozeanen.

*Nature 538, S. 215–218, 2016*

## REPRODUKTION EIZELLEN AUS DER PETRISCHALE

Japanische Forscher haben fruchtbare Eizellen von Mäusen komplett in der Petrischale hergestellt. Dabei ist es ihnen erstmals gelungen, so genannte Urkeimzellen (Vorläufer von Eizellen und Spermien) außerhalb des Organismus zu Eizellen reifen zu lassen.

Katsuhiko Hayashi von der Kyushu University (Japan) und seine Kollegen entnahmen zunächst Bindegewebszellen aus den Schwanzspitzen von Mäusen und wandelten sie in induzierte pluripotente Stammzellen (iPSC) um, die sich in jeden Zelltyp des Organismus ausdifferenzieren können. Die iPSC wiederum programmierten sie zu »urkeimzellähnlichen« Zellen um. Es war schon zuvor möglich gewesen, diese kontrolliert zu Eizellen heranreifen zu lassen. Allerdings mussten die Urkeimzellen hierfür in Eierstöcke von Mäusen verpflanzt werden.

Hayashi und seine Kollegen sind darauf nicht mehr angewiesen; sie führen den gesamten Prozess außerhalb des Organismus durch. Das gelingt ihnen, indem sie die urkeimzellähnlichen Zellen zusammen mit Eierstockzellen kultivieren, die sie zuvor weiblichen Mäusen entnommen haben. Dadurch imitieren sie die Bedingungen während der natürlichen Eizellreifung. Diese Methode bringt funktionsfähige Eizellen hervor, wie deren anschließende künstliche Befruchtung beweist: Aus etwa drei Prozent der Zellen

entsteht dabei lebensfähiger Nachwuchs. Kürzlich war es einer anderen Arbeitsgruppe bereits gelungen, künstliche Mäusespermien zu züchten (**Spektrum** 7/2016, S. 16).

Inwieweit sich die Methode auf den Menschen übertragen lässt, ist noch offen. Eizellen aus Bindegewebszellen von Erwachsenen zu produzieren, könnte die Reproduktionsmedizin revolutionieren.

*Nature* 10.1038/nature20104, 2016

## PLATTENTEKTONIK ABGETAUCHTE ERDKRUSTE

▶ Vor 40 bis 50 Millionen Jahren kollidierten die Indische und die Eurasische Platte. Seither schiebt sich die erste immer weiter in die zweite hinein – bis heute um rund 2000 Kilometer – und türmt dabei die Gebirge Süd- und Zentralasiens auf, darunter mit

dem bis zu 8848 Meter hohen Himalaja die gewaltigsten Gebirgsformationen unseres Planeten. Geowissenschaftler um Miquela Ingalls von der University of Chicago haben nun Hinweise darauf gefunden, dass bei dieser Plattenkollision ein beträchtliches Volumen an kontinentaler Erdkruste in den Erdmantel gedrückt wurde, was bisherigen Thesen zur Plattentektonik zuwiderläuft.

Kontinentale Erdkruste besitzt eine geringere Dichte als ozeanische, hat also ein stärkeres Bestreben als diese, bei den Bewegungen innerhalb der Erdkruste oben zu »schwimmen«. Trifft sie in einer Subduktionszone auf ozeanische Kruste, überfährt sie diese und presst sie hinab in den Erdmantel. Kollidieren hingegen zwei Landmassen und trifft dabei kontinentale auf kontinentale Kruste,



FOTOLIA / SHERIJACA

Rinderherden sind in Australien für rund ein Zehntel der Treibhausgasemissionen verantwortlich.

## LANDWIRTSCHAFT WENIGER METHAN DURCH ROTALGEN

▶ Methan in der Erdatmosphäre trägt mit etwa 20 Prozent zum anthropogenen Treibhauseffekt bei. Es entsteht massenhaft in der Nutztierhaltung. Rinder, Schafe und Ziegen setzen es frei, wenn sie pflanzliches Material verdauen und dabei aufstoßen. In Australien etwa ist Methan aus Rindermägen und -därmen für schätzungsweise 10 Prozent der Treibhausgasemissionen verantwortlich.

Forscher um Robert Kinley von der australischen James Cook University schlagen jetzt eine ungewöhnliche Methode vor, um die Methanemissionen von Rindern zu drosseln. Indem man das Futter der Tiere mit bestimmten Rotalgen anreichert, könne man die Freisetzung des Klimagases drastisch reduzieren, schreiben sie.

Kinley und sein Team entnahmen Verdauungssaft aus dem Pansen von Rindern und ließen ihn unter kontrollierten Laborbedingungen bei 39 Grad Celsius auf Rhodes-Gras (*Chloris gayana*) einwirken, das die Tiere

üblicherweise in großen Mengen fressen. Außerdem gaben sie verschiedene Mengen an Rotalgen der Spezies *Asparagopsis taxiformis* hinzu. Nach Inkubationszeiten zwischen 12 und 72 Stunden untersuchten die Forscher, welche Stoffwechselprodukte – darunter Methan – jeweils entstanden waren.

Der Anteil von *A. taxiformis* am zu verdauenden Substrat bei unter einem Prozent, hatte das kaum Auswirkungen auf die Methanbildung. Zwei oder mehr Prozent hingegen unterbanden die Produktion des Gases beinahe vollständig. Ein Anteil von bis zu fünf Prozent beeinträchtigte die Verdauung dabei nicht, zehn Prozent allerdings reduzierten den Stoffumsatz deutlich.

Ob *A. taxiformis* als Futterzusatz tatsächlich helfen kann, die Methanemissionen von Rindern herabzusetzen, müssen jetzt Versuche an lebenden Tieren zeigen. Falls ja, müssten die Rotalgen in sehr großen Mengen geerntet und zu den Rindern gebracht werden, um in der weltweiten Massentierhaltung wahrnehmbare Effekte zu bewirken.

*Anim. Prod. Sci.* 56, S. 282–289, 2016



Ein Forscher führt sensorische Tests mit dem 28-jährigen gelähmten Patienten durch.

UPMC / UNIVERSITY OF PITTSBURGH SCHOOLS OF THE HEALTH SCIENCES

## MEDIZIN QUERSCHNITTGELÄHMTER FÜHLT DANK HIRNCHIPS

Bei Querschnittgelähmten sind die Verbindungen zwischen Gehirn und Nervenzellen in anderen Regionen des Organismus unterbrochen. Die Betroffenen können deshalb Körperteile nicht mehr bewegen und oft auch nicht mehr spüren. Mit einem Gehirnimplantat haben es Wissenschaftler einem Querschnittgelähmten nun erstmals ermöglicht, Berührungen der Finger wahrzunehmen – allerdings nicht seiner eigenen.

Das Team um Robert Gaunt von der University of Pittsburgh implantierte einem 28-jährigen Mann, der seit einem Unfall im Jahr 2004 von der Brust abwärts gelähmt ist, mehrere Elektrodenchips in jene Hirnregion, die für die Wahrnehmung der Finger zuständig ist. Die

jeweils etwa knopfgroßen Chips verkabelten sie mit einer Roboterhand, die bei Berührungen elektrische Impulse erzeugt. Wenn diese Signale nun über die Chips ins Gehirn einlaufen, fühlt es sich für den Patienten so an, als würden seine eigenen Finger angefasst. Er spürt sogar den Druck der Berührung.

Mit entsprechenden Hirnimplantaten, so genannten Gehirn-Computer-Schnittstellen, können Gelähmte bereits seit einiger Zeit Bewegungen steuern – sowohl von Roboterarmen als auch von eigenen Gliedmaßen. Die Impulsleitung verläuft dabei allerdings in die entgegengesetzte Richtung, also vom Gehirn zur Extremität. Indem die neue Methode jetzt auch taktile Rückmeldungen ans Gehirn erlaubt, verheißt sie große Verbesserungen in der Behandlung Querschnittgelähmter – und ist auch ein Schritt in Richtung nervengesteuerter, fühlender Prothesen.

*Sci. Transl. Med. 8, 361ra141, 2016*

geschieht das nicht, nahmen Geologen bisher an. In diesem Fall verforme sich das Krustenmaterial zwar und türme dabei unter anderem Gebirge auf, tauche aber nicht in die Tiefe ab.

Das scheint auf den Zusammenprall zwischen Indischer und Eurasischer Platte jedoch nicht zuzutreffen, wie Ingalls und ihre Kollegen anhand von Computermodellen festgestellt haben. Sie versuchten damit die Gesamtmasse der an dem Ereignis beteiligten kontinentalen Kruste vor, während und nach dem Höhepunkt der Kollision zu ermitteln. Demnach verschwanden bei dem Zusammenstoß schätzungsweise 500 Billionen Tonnen Gestein im Erdmantel, entsprechend etwa 50 Prozent der anfangs vorhandenen kontinentalen Kruste Indiens und Eurasiens.

Ein Teil des abgetauchten Materials sei in der Zwischenzeit über Vulkanismus wieder nach oben befördert worden, äußerten die Wissenschaftler. Das erkläre, warum sich geochemische Signaturen kontinentaler Gesteine in ozeanischen Krustenabschnitten oder auf abgelegenen Vulkaninseln finden.

*Nat. Geosci.* 10.1038/ngeo2806, 2016



NICOLE FULLER / SKOVO ART FOR UTA AUSTIN (AUSCHNITT)

**Vegavis iaai (Rekonstruktion) mit dem vermuteten Sitz des Stimmkopfs.**

## PALÄOBIOLOGIE ÄLTESTES LAUT- BILDUNGSORGAN BEI VÖGELN

► Forscher haben in Vogelfossilien, die knapp 70 Millionen Jahre alt sind, die Überreste eines Stimmkopfs (Syrinx) entdeckt. Demzufolge besaßen bereits Vögel der späten Kreidezeit dieses Lautbildungsorgan.

Der Stimmkopf sitzt bei den meisten heutigen Arten dort, wo sich die Luftröhre in die zwei Hauptbronchien aufspaltet – also nah am Herz. Er besteht aus mineralisierten Geweberingen und knöchernen Stegen, zwischen denen Membranen aufgespannt sind. Wenn der Vogel auf bestimmte Weise ausatmet, geraten die

Membranen in Schwingung und erzeugen Laute. Mit seinen Muskeln kann das Tier diese Schwingungen beeinflussen und so den arttypischen Gesang hervorbringen.

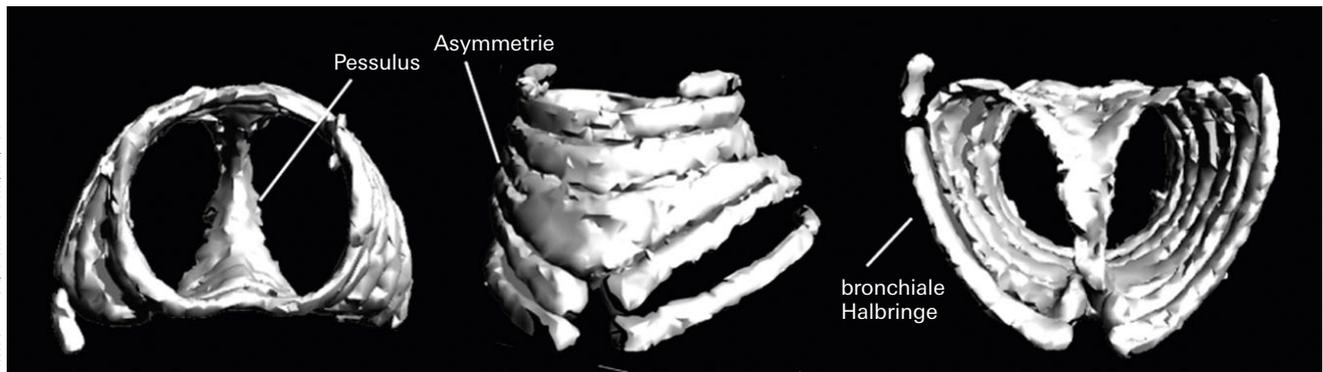
Fossile Rudimente von Stimmköpfen fand man bislang nur in Vogelüberresten aus den zurückliegenden 2,5 Millionen Jahren. Ein Team um Julia Clarke von der University of Texas in Austin hat solche Gebilde nun in versteinerten Vogelknochen aus der späten Kreidezeit entdeckt, die 66 bis 69 Millionen Jahre alt sind und aus Sedimenten der antarktischen Vega-Insel geborgen wurden. Die Fossilien stammen von einem *Vegavis iaai*, einem ausgestorbenen Gänsevogel und nahen Verwandten heutiger Enten und Gänse.

Mit Hilfe von Computertomografieaufnahmen rekonstruierten die Forscher, wie der Stimmkopf von *Vegavis iaai* im lebenden Tier aussah. Demnach war er sehr ähnlich aufgebaut wie bei gegenwärtigen Vögeln, mit mineralisierten Ringen und einem knöchernen Steg (Pessulus) an der Verzweigung der Hauptbronchien. *Vegavis iaai* könnte ein ähnlich schallendes »Honken« von sich gegeben haben wie heutige Gänse.

Stimmkopfrelikte sind bislang nicht in Fossilien von Dinosaurierverwandten der damaligen Vögel gefunden worden. Die Forscher vermuten daher, dass sich dieses Lauterzeugungsorgan evolutionär nur in der Klasse der Vögel entwickelte, und zwar erst relativ spät. Die Nichtvogeldinosaurier waren demnach zwar häufig befiedert, brachten aber keine vogelähnlichen Laute hervor; stattdessen knurrten, zischten oder bellten sie wahrscheinlich.

*Nature* 10.1038/nature19852, 2016

**Rekonstruierter Stimmkopf, gefunden in versteinerten Knochen des Gänsevogels *Vegavis iaai*. Ein knöcherner Steg (Pessulus) saß wohl wie bei heutigen Vögeln dort, wo sich die Luftröhre verzweigte. Ober- und unterhalb von ihm waren die Atemwege von mineralisierten, asymmetrisch angeordneten Ringen umgeben, die Schall erzeugende Membranen aufspannten.**



CLARKE, J. A. ET AL.: FOSSIL EVIDENCE OF THE AVIAN VOICE ORGAN FROM THE MESSOZOIC. IN: NATURE. 10.1038/NATURE19852, 2016, FIG. 2

# HITLERS ATOMBOMBE STÖRFALL DER WISSEN- SCHAFTSGESCHICHTE

**Warum wurden im NS-Staat keine Nuklearwaffen entwickelt, obwohl Deutschland bis mindestens 1933 in der Kernphysik führend war? In den Geschichtsbüchern steht: Das Wissen war vorhanden, allein die Mittel fehlten. Doch die Originaldokumente legen einen anderen Schluss nahe.**



**Manfred Popp** ist Kernphysiker und ein erfahrener Wissenschaftsmanager. Von 1976 bis 1987 leitete er die Unterabteilung Energieforschung des Bonner Forschungsministeriums und war von 1991 bis 2006 Vorstandsvorsitzender des Forschungszentrums Karlsruhe.

» [spektrum.de/artikel/1427403](http://spektrum.de/artikel/1427403)

► Dass Adolf Hitler bei all dem Tod und Verderben, das er über Millionen von Menschen gebracht hat, nicht auch noch über Atomwaffen verfügen konnte, ist ein Lichtblick im dunkelsten Kapitel der deutschen Geschichte – und ein Rätsel, das Historiker und Physiker seit mehr als 70 Jahren immer wieder zu lösen versucht haben.

Über Jahrzehnte befassten sich fast ausschließlich amerikanische und britische Historiker mit der Geschichte des »Uranvereins« – so wurde die Gruppe aus weniger als 100 Wissenschaftlern um den Physiker Werner Heisenberg

informell genannt. Die deutschen Geschichtsforscher mussten nach dem Krieg weitaus schlimmere Ereignisse aufarbeiten. Den Historikern der Alliierten stellte sich indes ebenfalls heikle Frage. Ihre Wissenschaftler hatten hoch motiviert an der Entwicklung der Atombombe gearbeitet, weil sie ihren deutschen Kollegen zuvorkommen wollten. Doch tatsächlich gab es das postulierte Wettrennen nie. Warum aber hatten ihre Physiker in einer Demokratie, die ihnen die Freiheit ließ, Nein zu sagen, die Bombe gebaut, während die deutschen – oft ihre ehemaligen Lehrer, Schüler oder Kommilitonen – selbst unter der unmenschlichsten Diktatur nur an der Entwicklung eines Kernreaktors arbeiteten?

Seit mehr als einem Vierteljahrhundert steht dazu in den Geschichtsbüchern, die deutschen Wissenschaftler hätten gewusst, wie eine Atombombe konstruiert werden muss. Wie der gigantische Aufwand des »Manhattan-Projekts« der USA aber zeige, habe deren Entwicklung die Möglichkeiten des »Dritten Reichs« überfordert, insbesondere unter Kriegsbedingungen. Damit folgt die Geschichtsschreibung dem Urteil des US-Historikers Mark Walker, dessen Werke als beste Darstellung der Arbeit des Uranvereins gelten. Seine Nachricht war für die Alliierten tröstlich: Das Wettrennen schien lediglich aus ökonomischen Gründen ausgefallen zu sein.

Walker und seine Historikerkollegen hielten für den Bau einer Atombombe zwei Kenntnisse für entscheidend: einerseits das Wissen über das richtige Grundprinzip der Bombe, nämlich die Spaltung der Atomkerne von Uran-235 oder Plutonium-239 durch schnelle Neutronen. Andererseits war die Schlüsselfrage für sie die Berechnung der »kritischen

## AUF EINEN BLICK DAS PHANTOM DER BOMBE

- 1** Im Zweiten Weltkrieg begannen die USA ein aufwändiges Atomwaffenprojekt, weil sie sich in einem Wettrennen mit Nazideutschland wähten. Tatsächlich arbeitete hier zu Lande jedoch niemand an einer nuklearen Bombe.
- 2** Heute herrscht die Ansicht vor, die deutschen Physiker hätten das technische Prinzip der Atombombe gekannt, aber die aufwändige Konstruktion hätte das »Dritte Reich« im laufenden Krieg überfordert.
- 3** Analysen der Originalquellen zeigen: Historiker haben physikalische Zusammenhänge missachtet. Bis zum Kriegsende waren den deutschen Forschern wesentliche Grundlagen gar nicht klar.

~~OFFICIAL USE ONLY~~ **DECLASSIFIED**

8a  
G-3  
Copy

*Reid, ... 5/25/48 (and ... 4) ...*

~~Geheim~~

# Nutzbarmachung von Atomkernenergien

~~Geheime Forschungsberichte~~

~~OFFICIAL USE ONLY~~

DO NOT PHOTOCOPY

**Heft 4**

**Oktober 1942**

Anlage zu Bb. Nr. 6 / 43 g. Wa

DEUTSCHES MUSEUM

In »geheimen Forschungsberichten« informierten die Physiker um Werner Heisenberg und Otto Hahn ab 1939 das Heereswaffenamt, nach 1942 den Reichsforschungsrat, über den Stand ihrer Arbeit.

Masse«, jener Mindestmenge an Spaltstoff, in der eine Kettenreaktion ablaufen kann. Wie unzureichend dieser Ansatz ist, illustriert ein Vergleich aus der Leichtathletik: Beim Hochsprung ist es zweifellos wichtig, die Höhe zu kennen, auf der die Latte liegt – analog zum Wert der kritischen Masse. Aber ob man darüberspringen kann, ist eine andere Frage.

Der Autor Bruce C. Reed (»The Physics of the Manhattan Project«, 2015) hat die Berechnung der kritischen Masse als eine der einfachsten Aufgaben bei der Entwicklung einer Atombombe bezeichnet. Eine kritische Masse ist noch lange keine Bombe. Wenn sie unkontrolliert zusammengebracht wird – das ist seit Kriegsende oft in verschiedenen Laboren aus Versehen passiert –, dann zerlegt sie sich durch die dabei entstehende Wärme sofort von selbst, meist ohne große Schäden anzurichten. Die Strahlung kann jedoch in der Nähe tödlich sein.

Die heute verbreiteten Kenntnisse des richtigen Bombenprinzips und der kritischen Masse reichen glücklicherweise nicht aus, um eine Atombombe herzustellen. Denn es ist zum einen höchst aufwändig, das spaltbare Material zu gewinnen, und zum anderen anspruchsvoll, in einer Bombe einen nennenswerten Teil davon zu spalten. (Im Kasten »Die Physik der Atombombe« wird das kurz erläutert. Obwohl das deutsche Kerntechnikprogramm, das ich elf Jahre geleitet habe, ziviler Natur war, musste ich mich wegen der Möglichkeiten des Missbrauchs von Materialien und Tech-

nologien für den Bau von Atomwaffen intensiv mit der Physik der Bombe befassen.) Um im Bild zu bleiben: Die Latte Walkers und anderer Historiker für die Fähigkeit, eine Bombe zu bauen, liegt zu niedrig.

### Zwei Fächer mit unterschiedlicher Denkweise

Wer Wissenschaftsgeschichte der Physik betreibt, muss die angeblich so unvereinbaren Kulturen der Geistes- und der Naturwissenschaften verbinden und sollte die Denkweise der beiden Forschungsbereiche verinnerlichen. Während historische Quellen selten widerspruchsfrei sind, machen selbst kleinste Diskrepanzen eine physikalische Theorie wertlos. Die Interpretationsspielräume sind in beiden Fächern höchst unterschiedlich. Aber die naturwissenschaftlichen Aspekte müssen möglichst früh berücksichtigt werden, denn die Integration der Ergebnisse in die Geschichtsschreibung ist ohnehin Sache der Historiker. In seiner Arbeit über die Geschichte der Kaiser-Wilhelm-Institute für Physik und Chemie aus dem Jahr 2005 erwähnt Walker jedoch in einem Überblick über die wichtigen Veröffentlichungen zum Uranverein keine, die von Physikern verfasst wurde. Bei der Beschreibung der Geschichte von »Hitlers Bombe« sind physikalische Gesetzmäßigkeiten und Erläuterungen oft unter den Tisch gefallen. So oft, dass ein Zerrbild entstanden ist, das dringend der Korrektur bedarf. Dabei war die zu geringe Anforderung für die Kenntnisse über den Bombenbau nur einer von mehreren Fehlern.

## Die Physik der Atombombe

Das Prinzip von Atombomben beruht auf der enormen Energie, die frei wird, wenn ein schwerer Atomkern in mehrere leichtere zerfällt. Beschießt man ihn mit Neutronen, kann man diesen Prozess gezielt auslösen. Für die technische Nutzung der Kernspaltung kam zunächst nur Uran-235 in Betracht (der Name bedeutet, dass dieses »Isotop« des Elements Uran 235 Kernbausteine enthält, 92 Protonen und 143 Neutronen). Es kommt nur zu 0,7 Prozent in Natururan vor, das vor allem aus dem Uran-238 (mit drei Neutronen mehr) besteht. Für Kernwaffen muss Uran-235 durch physikalische Verfahren auf einen Anteil von typischerweise 93 Prozent »angereichert« werden.

Bei der Spaltung von Uran-235 werden im Mittel 2,5 schnelle Neutronen frei, von denen jedes wieder andere Kerne spalten kann. Dadurch

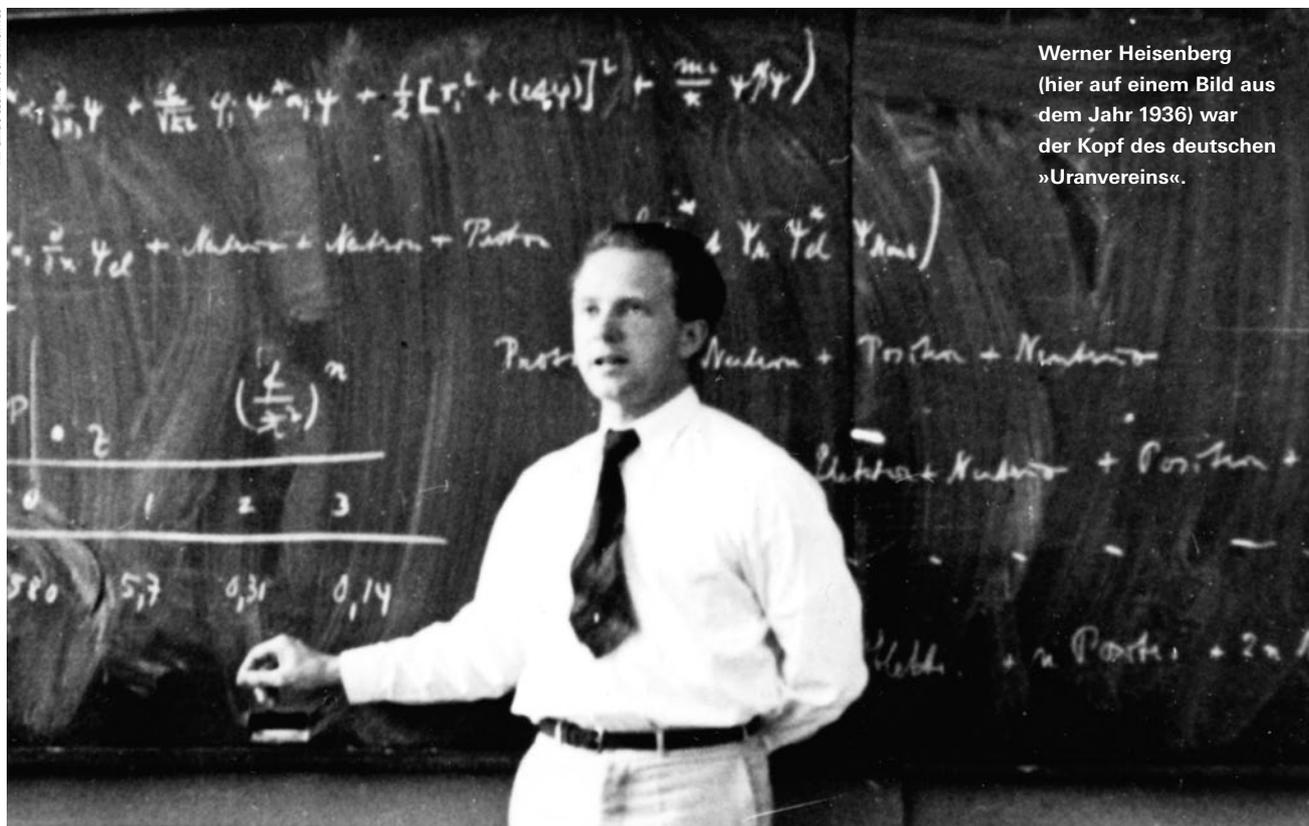
kann es zu einer Kettenreaktion kommen, wenn das Volumen des spaltbaren Materials so groß ist, dass nicht zu viele der Neutronen nach außen verloren gehen; diese Mindestmenge ist die »kritische Masse«.

Die Spaltung von Uran-235 ist umso effektiver, je langsamer die Neutronen sind; in Atomreaktoren bremst sie ein »Moderator« (meist Wasser) auf Umgebungstemperatur ab. Man spricht deshalb von thermischen Neutronen. Ein Konkurrenzprozess ist der Einfang von Neutronen durch Uran-238. Dabei entsteht ein neues Element, Plutonium, das leichter spaltbar ist als Uran-235, also eine geringere kritische Masse erfordert. Als Nebenprodukt der Prozesse im Reaktor ist es sehr viel preiswerter herzustellen.

Eine Atombombe funktioniert fundamental anders als ein Reaktor.

Insbesondere darf sie keinen Moderator enthalten. Das entscheidende physikalische Problem ist, im etwa gleichen Volumen einer konventionellen Bombe eine millionenfach höhere Energie aufzubauen. Nur dann ist die Explosion auch entsprechend stärker. Dazu muss das Material viele Millionen Grad Celsius heiß werden. Aber oberhalb von rund 3000 Grad Celsius wird die ganze Bombe gasförmig und beginnt sich auszudehnen; mit abnehmender Dichte reißt die Kettenreaktion sofort ab. Der Prozess der Aufheizung muss also abgeschlossen sein, bevor sich die Atome nennenswert in Bewegung setzen. Mit thermischen Neutronen wie in einem Reaktor kann das nicht gelingen, weil sie ja nicht schneller sind als ihre Umgebung.

Die Neutronen aus dem Zerfall des Uran-235 müssen in einer Bombe



Werner Heisenberg  
(hier auf einem Bild aus  
dem Jahr 1936) war  
der Kopf des deutschen  
»Uranvereins«.

daher direkt und ohne Abbremsung weitere Kerne spalten. Allerdings ist dann der »Wirkungsquerschnitt«, ein Maß für die Wahrscheinlichkeit dieses Prozesses, etwa 500-mal kleiner. Deswegen läuft der Vorgang immer noch nicht rasch genug ab, um den gesamten verfügbaren Brennstoff zu spalten. Denn die Freisetzung der Energie durch die Kettenreaktion braucht ihre Zeit.

Ein Kilogramm Uran-235 enthält  $10^{24}$  Kerne. Wenn jeweils zwei Neutronen neue Spaltungen auslösen, dann bedarf es zu dessen vollständiger Umwandlung 80 Neutronengenerationen ( $10^{24} = 2^{80}$ ). Ein schnelles Neutron legt im Durchschnitt bis zur nächsten Spaltung 17 Zentimeter zurück. Für diese »freie Weglänge« benötigt es zehn Nanosekunden. Nach 80 Generationen ist also fast eine Mikrosekunde vergangen. In dieser Zeitspanne erfolgt aber bereits die thermische Ausdehnung. Die

Bombe explodiert schon, wenn erst ein kleiner Teil des Materials gespalten wurde – die über Hiroshima abgeworfene bereits nach der Spaltung von nur einem Prozent der enthaltenen 64 Kilogramm Uran-235.

Und selbst diese geringe Effizienz ist nur zu erzielen, wenn ein Neutron die Bombe genau in dem Moment zündet, bei dem die größtmögliche kritische Masse zusammengebracht wurde. In der Hiroshima-Bombe hat eine Kanone zwei unterkritische Massen mit einer Geschwindigkeit von 300 Metern pro Sekunde zusammengeschossen. Dabei vergingen 0,2 Millisekunden zwischen dem Erreichen der so genannten »ersten Kritikalität«, bei der bereits eine Kettenreaktion ablaufen kann, und dem Maximum der Kritikalität, bei dem die Bombe am effizientesten zündet. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Bombe während dieser Zeitspanne durch zufällig eintreffende Neu-

tronen aus der Umgebung oder aus dem Zerfall des Urans zu früh gezündet wurde und mit wenig Wirkung verpuffte, lag bei 1,7 Prozent.

Bei einer ebenso gebauten Plutoniumbombe jedoch läge dieser Wert nahe 100 Prozent, weil im Reaktor neben dem gewünschten Brennstoff Plutonium-239 immer auch ein weiteres Isotop dieses Elements entsteht, Plutonium-240. Wegen seiner relativ hohen Wahrscheinlichkeit für Spontanspaltung emittiert es Neutronen. Deshalb muss die Kritikalität sehr viel schneller erreicht werden; dies gelingt durch Implosion einer Hohlkugel aus Plutonium, welche die Dichte des Spaltstoffs auf das Drei- bis Fünffache steigert. Die Frage, wie groß der Anteil von Plutonium-240 in einer effizienten Bombe sein darf, ist wichtig, um die Gefahr einer missbräuchlichen Verwendung von Plutonium aus zivilen Reaktoren zu beurteilen.

War wenigstens dieser Mindestanspruch für den möglichen Bau einer Bombe im »Dritten Reich« erfüllt? Um die kritische Masse zu bestimmen, muss man die relevanten »Wirkungsquerschnitte« kennen. Sie beschreiben die Wahrscheinlichkeit, dass ein Neutron einen Atomkern spaltet oder daran gestreut wird. Darüber hinaus braucht man natürlich eine Theorie der Bombe, um eine Berechnung durchführen zu können. Heute kann man die kritische Masse mit Computern numerisch sehr genau ermitteln. Während des Kriegs war das aber noch nicht möglich. Damals waren zahlreiche vereinfachende Annahmen nötig, deren Einfluss anschließend abgeschätzt werden musste. Das führte zu einer großen Ungenauigkeit.

Anfang 1942 wurde die kritische Masse einer Uran-235-Bombe im Manhattan-Projekt deshalb mit der großen Spanne von 2 bis 100 Kilogramm angegeben. Selbst mit den nahezu unbegrenzten Möglichkeiten in den USA lagen Ende 1943 die Ergebnisse bei 60 Kilogramm, immer noch weit

über dem richtigen Wert von 46 Kilogramm. Wegen der rechnerischen Probleme wurde die kritische Masse in den zentralen Laboren in Los Alamos unter Lebensgefahr experimentell bestimmt. In den Dokumenten des Uranvereins finden sich keine Spuren einer versuchten Berechnung der kritischen Masse einer Bombe, die mit schnellen Neutronen arbeitet.

Das erste Buch über den Uranverein hat bereits 1947 der in den Niederlanden geborene Physiker Samuel Goudsmit vorgelegt. Er war wissenschaftlicher Leiter der »Alsos-Mission«, einer Sondereinheit der US Army, die mit der vorersten Front die deutschen Kernforschungseinrichtungen besetzt, die Materialien und Dokumente sichergestellt und die Wissenschaftler festgenommen und befragt hatte. Die von Goudsmit gesammelten »Geheimberichte« des Uranvereins wurden danach viele Jahre unter Verschluss gehalten. Der in die Schweiz emigrierte Publizist Robert Jungk (»Heller als tausend Sonnen«, 1956) und der Brite David Irving (»Der

**Während des Zweiten Weltkriegs entstand in einem Felsenkeller im hohenzollerischen Haigerloch ein Versuchsreaktor. Deutsche Physiker wollten hier die nukleare Kettenreaktion erzeugen, was jedoch aus Mangel an Uran und schwerem Wasser misslang. Auf dem Foto demontieren Mitglieder der amerikanischen »Alsos«-Truppe nach Kriegsende die Anlage.**



ATOMKELLER-MUSEUM, HAIGERLOCH. MIT FRIEDL. GEN. VON LEGIUNUS FECHTER

Traum von der deutschen Atombombe«, 1967) mussten sich deshalb auf Interviews mit Zeitzeugen stützen.

Der erste Historiker, der die Geheimberichte auswerten konnte, war Mark Walker. Dazu besuchte er auch das Kernforschungszentrum Karlsruhe, dem als Nachfolgeorganisation des Uranvereins die Alsos-Dokumente in den 1970er Jahren von den USA zurückgegeben worden waren. 1990 veröffentlichte Walker seine Doktorarbeit (»Die Uranmaschine – Mythos und Wirklichkeit der deutschen Atombombe«). Sein Resümee war, ebenso in vielen weiteren Veröffentlichungen, die deutschen Physiker hätten »eindeutig das Prinzip zur Herstellung nuklearer Sprengstoffe wie auch die Funktion von Kernwaffen verstanden«. Die Atombombe sei vor allem aus wirtschaftlichen Gründen nicht entwickelt worden.

### Sehr unterschiedliche Deutungen aus nahezu den gleichen Quellen

Danach erschienen zwei in ihren Schlussfolgerungen extrem unterschiedliche, jedoch gleichermaßen sorgfältig recherchierte Bücher US-amerikanischer Historiker: Thomas Powers porträtierte Heisenberg als Held des Widerstands (»Heisenbergs Krieg«, 1993); er habe trotz Kenntnis der richtigen Werte die kritische Masse unerreichbar hoch erscheinen lassen. Für Paul L. Rose dagegen war Heisenberg ein unfähiger Nazi, der die Bombe entwickeln wollte, allerdings scheiterte (»Heisenberg und das Atombombenprojekt der Nazis«, 2001).

Als Physiker wundert man sich, dass es möglich war, zwei so unterschiedliche Deutungen aus nahezu den gleichen Quellen herzuleiten. Beide waren nicht unplausibel, haben sich aber gewissermaßen kompensiert. Darum erschien Walkers Analyse wohl als neutraler Mittelweg.

Daneben gibt es Erinnerungen beteiligter Wissenschaftler und kurze Beiträge über den Uranverein von amerikanischen und deutschen Physikern. Erst 2005 erschien ein Buch eines deutschen Historikers: Rainer Karlsch (»Hitlers Bombe«) beschrieb die Arbeit des Uranvereins korrekter als Walker. Doch er behauptete, in der Endphase des Kriegs seien vom Heereswaffenamt Fusionsbomben als kleine taktische Atomwaffen entwickelt und erprobt worden. Die Belege für einen Erfolg solcher Arbeiten hielten Nachprüfungen nicht stand.

Wie fremd den Historikern unter den Autoren die Welt der Physik war, zeigt besonders deutlich, dass Rose und Karlsch davon überzeugt waren und Walker es immerhin für möglich hielt, die deutschen Wissenschaftler hätten die kritische Masse einer Plutoniumbombe berechnet. Sie hatten fast gleichzeitig mit den alliierten Physikern herausgefunden, dass ein neues »Element 94« während des Betriebs eines Reaktors entstehen müsste, und aus Niels Bohrs Theorie geschlossen, es müsse leichter spaltbar sein als Uran-235. Es wurde 1941 in den USA nachgewiesen und Plutonium getauft, aber das erfuhren sie erst 1946. Noch nicht einmal die Reaktorexperimente, an denen sie arbeiteten, hätte Element 94 produzieren können, sondern nur ein Energie liefernder Reaktor – ihr fernes Ziel.

Der US-Physiker Jeremy Bernstein, der viele Veröffentlichungen über das deutsche Uranprojekt geschrieben hat,

wunderte sich, dass sie nicht ebenso wie die amerikanischen Forscher einige Mikrogramm Plutonium in einem »Zyklotron« erzeugt und anschließend untersucht haben. Dabei handelt es sich um einen Kreisbeschleuniger für Teilchen, ein wichtiges Instrument für die Kernphysik, das in den 1930er Jahren in vielen Ländern gebaut worden war. Doch in Deutschland fehlte ein solches Gerät bis Ende 1944. Man hätte aber die beiden in den Hauptstädten der besetzten Länder Dänemark und Frankreich vorhandenen, allerdings sehr kleinen Zyklotrone dafür beschlagnahmen können. Solche Versuche unterblieben jedoch. Die deutschen Wissenschaftler kannten keine Eigenschaften des von ihnen postulierten Elements. Sie konnten beim besten Willen nichts ausgerechnet haben.

Bei der Uranbombe war die Lage ähnlich. Nur die für den Reaktor wichtigen Wirkungsquerschnitte vermochten die deutschen Physiker an Natururan zu bestimmen. Da, wie Niels Bohr herausgefunden hatte, durch Bestrahlung mit langsamen (»thermischen«) Neutronen das Uran-238 nicht spaltbar ist, beobachtete man dabei die Reaktion des seltenen Uran-235. Bei der Bestrahlung mit schnellen Neutronen überdeckte die Reaktion des Uran-238 den kleinen

## Die deutschen Physiker kannten die Wirkungsquerschnitte nicht und nutzten auch keine Möglichkeiten, sie zu bestimmen

Beitrag des Uran-235. Dessen für die Bombe wichtigen Wert hätten sie auf diese Weise nur messen können, wenn ihre Arbeit an der Isotopentrennung so weit gediehen gewesen wäre, dass sie Proben mit hoch angereichertem Uran-235 herstellen konnten. Aber das war nicht der Fall.

Doch es hätte auch hier einen anderen Weg gegeben. Josef Mattauch, Nachfolger der 1938 emigrierten Lise Meitner am Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie, war ein Spezialist für die Massenspektrometrie von Isotopen. Er hätte einige Mikrogramm reines Uran-235 abtrennen können. Anschließend hätten in einem der Zyklotrone in Kopenhagen oder Paris die Wirkungsquerschnitte bestimmt werden können. Beides unterblieb. Die in den USA gemessenen Werte waren in Deutschland unbekannt, da sie erst nach Kriegsende veröffentlicht wurden.

Walker und die anderen Historiker haben weder registriert, dass die deutschen Physiker die Wirkungsquerschnitte für die Uran- und die Plutoniumbombe nicht kannten, noch, dass sie die Möglichkeit zu ihrer Bestimmung hatten, aber nicht nutzten. Trotzdem haben sie angenommen, sie hätten die kritische Masse irgendwie ausgerechnet.

Wie steht es mit der anderen Grundvoraussetzung für die Konstruktion der Bombe, nämlich der Kenntnis des Prinzips ihrer Wirkungsweise? Antworten darauf liefern die »Geheimberichte«. Die Wissenschaftler des Uranvereins richteten sie an ihren Auftraggeber, bis Anfang 1942 das Heereswaffenamt, danach den Reichsforschungsrat. In Kopien dienten sie

aber auch der Information innerhalb des Uranvereins. Sie wurden auf Schreibmaschinen mit zahlreichen Durchschlägen getippt, Abbildungen und Formeln mussten die Autoren von Hand eintragen. Auffallend ist, dass sich nur ganz wenige Dokumente überhaupt mit der Bombe befassen.

In Heisenbergs erster Ausarbeitung über die Kernenergie vom Dezember 1939 findet sich in der Zusammenfassung nur ein Satz über die Bombe: Die Anreicherung von Uran-235, die es erlaube, sehr kompakte Reaktoren zu bauen, sei auch die einzige Methode, einen Sprengstoff herzustellen, dessen Explosivkraft die herkömmlicher Sprengmaterialien um mehrere Zehnerpotenzen übertreffe. Zuvor hatte er abgeschätzt, dass man für eine solche Reaktor-bombe mindestens etliche Kilogramm, vielleicht sehr viel mehr fast reines Uran-235 herstellen müsse – ein »hor-

## Reaktor und Bombe sollten nicht nur nach dem gleichen Prinzip arbeiten, sondern sogar die gleiche Form haben

render« Aufwand, weil man Isotope bisher nur im Maßstab von Mikrogrammen abtrennen konnte. Die Bombe erschien möglich, jedoch unerreichbar. Im ausführlichen Teil seines Berichts schildert er die Explosion. Die dort angegebene Energie der Neutronen (300 Elektronvolt) ist aber um vier Größenordnungen geringer als die der tatsächlich erforderlichen schnellen Neutronen. Goudsmit, Bernstein, Rose und Karlsch haben bemerkt, dass diese Bombe nicht stärker wäre als eine konventionelle. Walker beruft sich dagegen allein auf den Satz in der Zusammenfassung, der so klingt, als ob das Prinzip der Bombe bekannt sei.

Der Ansatz, bei der Bombe wie schon beim Reaktor an thermische Neutronen zu denken, war kernphysikalisch durchaus sinnvoll. Enrico Fermi hatte nämlich 1934 entdeckt: Neutronen lösen meist umso wirksamer Kernreaktionen aus, je geringer ihre Energie ist. Dass man für eine Bombe schnelle Neutronen verwenden muss – trotz ihres unbekanntes, nach theoretischen Erkenntnissen aber sehr kleinen Wirkungsquerschnitts –, ergibt sich erst, wenn man die Thermodynamik der Explosion studiert.

Heisenbergs Doktorand Paul Müller hat die kernphysikalischen Parameter für eine nukleare Explosion genauer berechnet. Als Ergebnis für relativ langsame Neutronen (25 Elektronvolt) ermittelte er eine notwendige Anreicherung des Uran-235 auf knapp 70 Prozent und einen großen Bedarf an einem Moderator. Das erste Ergebnis ist scheinbar richtig, ein solcher Anreicherungsgrad ist für Uranbomben tatsächlich ausreichend. Aber das zweite Resultat entwertet es: Ein Moderator ist Gift für die Bombe. Wieder haben Rose und Karlsch den Fehler bemerkt. Walker hingegen hat Müllers Bericht, den einzigen, der sich ausschließlich mit nuklearen Sprengstoffen befasst, nicht beachtet.

Eine dritte Bestätigung des falschen Grundverständnisses liefert ein Brief an das Reichspatentamt, den Karl Wirtz 1941

verfasst hat. Er war ein wichtiger Mitarbeiter Heisenbergs, der ab 1957 den zuvor im Krieg gescheiterten Bau eines Reaktors im Kernforschungszentrum Karlsruhe umsetzte. Wirtz beschreibt eine wenige Millimeter dünne Platte aus Uran-235 von einem Quadratmeter Größe, die an beiden Seiten von einem Moderator umgeben ist; sie könne entweder eine nahezu unerschöpfliche Wärmequelle darstellen oder mit extremer Gewalt explodieren. Reaktor und Bombe sollten also nicht nur nach dem gleichen Prinzip arbeiten, sondern sogar die gleiche Form haben. Diesen Brief hat Karlsch erst nach 1990 in einem Moskauer Archiv gefunden. Aber Walker berücksichtigte ihn nicht, als auch er für seine Arbeit über die Geschichte der Institute Heisenbergs und Hahns die nach Russland gelangten Dokumente auswertete.

### Eine passende Zahlenspanne schien die Kenntnis über die kritische Masse zu belegen

Ein weiterer Fehler hat die Geschichtsschreibung besonders nachhaltig geprägt. Ein ausführlicher Bericht des Heereswaffenamts über die erzielten Ergebnisse wurde 1942 für eine Konferenz erstellt, in der angesichts der verschlechterten Lage an den Kriegsfrenten die weitere Förderung überprüft werden sollte. Dieses Dokument ist außerordentlich wertvoll, da es amtlich und vollständig den Wissensstand des Uranvereins beschreibt. Lange war es verschollen, bis Walker ein Exemplar bei Erich Bagge entdeckt hat, der im Uranverein an der Isotopentrennung gearbeitet hatte. Erneut fand Walker hier einen Satz, der die Kenntnis über die kritische Masse einer Bombe zu belegen schien: Für eine Explosion müsse man 10 bis 100 Kilogramm Uran-235 oder Element 94 an einem Ort vereinigen. Das stimmte in verblüffender Weise mit der Spanne überein, die gleichzeitig in den USA mit 2 bis 100 Kilogramm angegeben wurde.

Die physikalischen Erläuterungen im ausführlichen Berichtsteil enthalten jedoch eindeutige Beweise für die immer noch falschen Vorstellungen vom Funktionsprinzip der Bombe. Schon im Inhaltsverzeichnis erscheint sie wieder bloß als Sonderfall des Reaktors. Später werden als Vorgänge, die Neutronen erzeugen, nur die beiden für den Reaktor wichtigen genannt; die Spaltung von Uran-235 mit schnellen Neutronen wird nicht erwähnt. Die Aussagen zur Bombe beruhen allein auf den Arbeiten von Heisenberg und Müller aus den Jahren 1939 und 1940. Diese klaren Belege für die fehlende Erkenntnis, dass eine Bombe einzig mit schnellen Neutronen funktionieren kann, wurden bisher übersehen.

Da der Bericht so schwer zugänglich war, verließen sich viele andere Autoren auf Walkers Interpretation. Nur Rose und Karlsch haben anhand des Originals den Fehler bemerkt, aber unverständlicherweise angenommen, die Zahlenspanne bezöge sich auf eine anders funktionierende Plutoniumbombe. Mehr als ein Vierteljahrhundert lang galt die Mitteilung des Heereswaffenamts in Walkers Interpretation als Beweis für die ausreichende Kenntnis über die Bombe. Dabei störte es auch nicht, dass die Berechnung als einzige im Bericht nicht belegt wird: »Es ist unwichtig, wer die Abschätzung machte und wie sie gemacht wurde«, so Walker. Für Bernstein dagegen, der den Bericht ebenfalls nur in Walkers Interpretation kannte, blieb die Zahlenangabe »ein Rätsel«.

Es ist verwunderlich, dass Walkers Fehler bis jetzt unentdeckt blieb. Denn wenn man etwas von Kerntechnik versteht, lässt sich die Bedeutung der Spanne von 10 bis 100 Kilogramm leicht erklären. Sie passt gut zu dem, was Heisenberg beschrieben hat, nämlich einem Reaktor aus hoch angereichertem Uran-235 mit einem Moderator. Nach diesem Prinzip wurden bisher weltweit etwa 150 Forschungsreaktoren gebaut. Deren Brennelemente enthalten im Durchschnitt zehn Kilogramm, in Reaktoren mit größerer Leistung auch mehr als 50 Kilogramm hoch angereichertes Uran-235. Wie eine Atombombe können sie freilich nicht explodieren. Die Zahlenspanne könnte Wirtz für seinen Brief an das Patentamt berechnet haben. Wegen der extrem hohen Dichte des Urans beträgt die Masse einer einen Quadratmeter großen Platte bei einer Stärke von 0,5 bis 5 Millimetern tatsächlich 10 bis 100 Kilogramm. Die deutschen Physiker hatten also die kritische Masse eines Reaktors berechnet. Das konnten sie, weil sie dafür eine Theorie entwickelt hatten und die Wirkungsquerschnitte kannten. Und sie glaubten, mit hoch angereichertem Uran würde ein solcher Reaktor zu einer Atombombe.

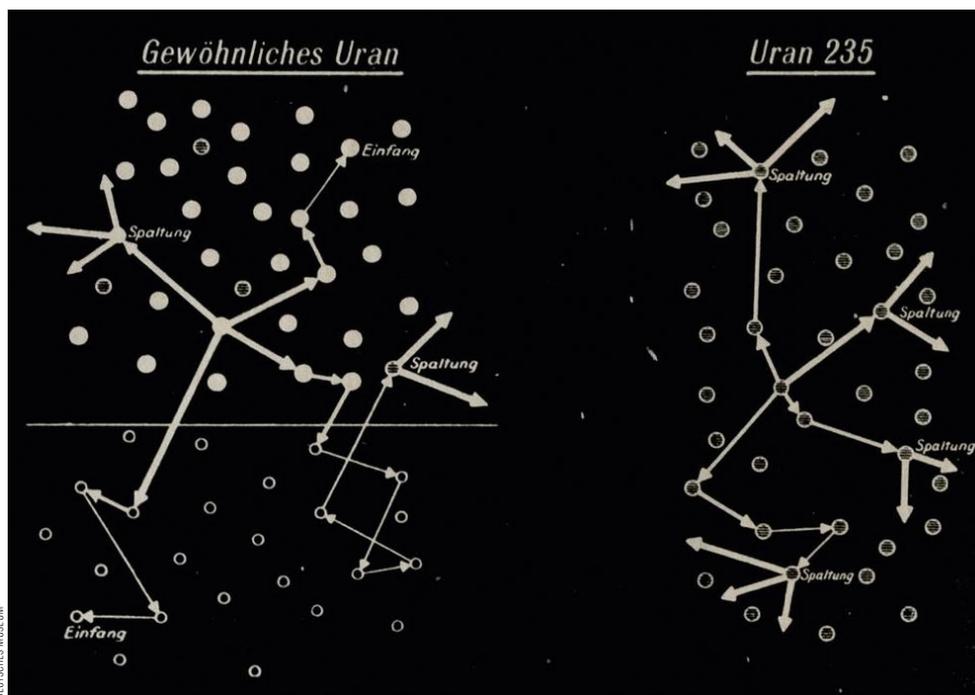
### Heisenberg gelangte zu neuen Einsichten – aber behielt sie für sich

Mit dieser Feststellung kann man auch die unbestätigten, sich zäh haltenden Behauptungen aus der Nachkriegszeit erklären, Heisenberg habe während des Kriegs von einer kritischen Masse von 50 Kilogramm gesprochen; in einer Konferenz mit Rüstungsminister Albert Speer soll er die Größe der Bombe mit einer Ananas verglichen haben (das entspräche etwa 25 Kilogramm). Diese Zahlenangaben passen in die Bandbreite, die der Bericht des Heereswaffenamts nennt, allerdings für die technisch unmögliche Reaktor-bombe. Es ist für die Geschichtsschreibung also durch-

aus bedeutsam, herauszufinden, wer die Abschätzung machte und wie sie vorgenommen wurde – sonst läuft man Gefahr, sich von einer zufälligen Koinzidenz der Zahlen blenden zu lassen.

Aber Heisenberg war ein zu guter Physiker, um dauerhaft im Irrtum zu verharren. Auf der Konferenz im Februar 1942 zeigte er in seinem Einführungsvortrag eine schematische Darstellung der Vorgänge bei den Spaltungsreaktionen in Natururan und in reinem Uran-235 (siehe Abbildung unten) – und dort fehlt zum ersten Mal der Moderator. Es scheint also, als sei nun das richtige Prinzip der Bombe gemeint, aber im Text ist von der Spaltung mit schnellen Neutronen nicht die Rede. Nach dem Krieg hat Heisenberg behauptet, schon immer gewusst zu haben, dass die Bombe nur mit schnellen Neutronen möglich ist. Vielleicht hatte er die Grafik bloß gezeigt, um diese Aussage später untermauern zu können. Bis zum Kriegsende hat er diese neue Einsicht jedoch nirgends erwähnt. Seinen Fehler mit der Reaktor-bombe hat er später nie zugegeben. Walker hat die Abbildung als Beweis für das Wissen über das richtige Prinzip der Bombe überbewertet: Heisenberg war nicht am Ziel, sondern endlich am Startpunkt für ein Verständnis der Bombenphysik angekommen, der in den USA schon Anfang 1940 erreicht war. Und er hat keinen weiteren Schritt getan.

Selbst der dritte und letzte Leiter des Uranprojekts, Walter Gerlach, kannte Heisenbergs neue Gedanken nicht. Das belegt sein Brief vom November 1944, in dem er auf den Vorwurf antwortet, der Uranverein arbeite zu wenig an kleinen Atombomben, die von Raketen getragen werden könnten: Leider sei die »stürmische Vermehrung« der Neutronen nur in Anordnungen mit vielen Tonnen von Uran und Moderator möglich. Goudsmit hatte den Brief 1947 als Beweis für das bis Kriegsende untaugliche Konzept der Bombe als Faksimile veröffentlicht. Aber Walker behauptete,



Heisenbergs Originalzeichnung von 1942: Links skizzierte er das Geschehen in einem Reaktor, rechts in einer Atombombe. Im Reaktor kann ein schnelles Neutron an Uran-238-Kernen (gefüllte Kreise) streuen oder diese spalten, oder es gelangt in den Moderator (kleine leere Kreise), kehrt als thermisches Neutron zurück und spaltet einen Uran-235-Kern (große leere Kreise). In der Bombe mit reinem Uran-235 hingegen werden neue Spaltungen direkt ausgelöst.

Gerlach habe Reaktorexperimente beschrieben. Das ist nicht nur wegen des Kontextes des Briefs, der Frage nach der Bombe, widersinnig: Von einem Reaktorexperiment wäre nach einer »stürmischen Vermehrung« der Neutronen nicht viel übrig geblieben.

Meine Analyse der Dokumente gibt Goudsmit Recht, der schon 1947 resümiert hatte, dass die deutschen Wissenschaftler den Unterschied zwischen Reaktor und Bombe nicht verstanden hatten. Goudsmit war für diese Bewertung prädestiniert: Er war selbst Kernphysiker, vor dem Krieg mit Heisenberg befreundet und sprach fließend Deutsch. Sein Verhältnis zu den Deutschen war nach dem Krieg schwer belastet, da seine Eltern in Auschwitz ermordet worden waren. Er kannte die Dokumente, die er gesammelt hatte, und konnte sie fachlich korrekt bewerten. Er hatte zudem viele deutsche Labore gesehen und die festgenommenen Wissenschaftler selbst verhört.

Die Rückbesinnung auf Goudsmits Urteil hat auch den Vorteil, nun alle Erkenntnisse konsistent zu machen. So ist jetzt klar, warum die deutschen Wissenschaftler nicht versuchten, die Wirkungsquerschnitte für die Spaltung durch schnelle Neutronen mit einem Zyklotron zu bestimmen: Sie wussten nicht, dass sie für die Bombe wichtig waren.

#### **Belauschte Gespräche nach Kriegsende untermauern die Analyse**

Es ist ein einzigartiger Glücksfall, das Ergebnis der Analyse der Dokumente durch eine weitere Quelle prüfen zu können: Nach dem Krieg waren die wichtigsten Mitglieder des Uranvereins ab Anfang Juli 1945 sechs Monate auf dem englischen Landsitz Farm Hall interniert. Das Haus war verwandt, und alle Gespräche wurden aufgezeichnet. Daraus entstand ein teilweise wörtliches, teilweise zusammenfassendes Protokoll in englischer Sprache, das 1992 veröffentlicht wurde. Es erlaubt uns, heute noch – quasi live – mitzuerleben, wie die deutschen Wissenschaftler auf die Nachricht vom Abwurf der Atombombe auf Hiroshima reagierten. Einige sind erleichtert, dass sie die Bombe nicht gebaut hatten, andere bestürzt, dass die weltweite Führungsrolle der deutschen Kernphysik verloren war. Während der folgenden Tage versuchen sie erregt, das Funktionsprinzip der Bombe zu verstehen.

Bernstein staunte über den geringen intellektuellen Gehalt der Diskussion: Die Mitglieder des Uranvereins hatten bisher offensichtlich keine Ahnung von der Bombe. Von Hahn befragt, bekennt Heisenberg, die kritische Masse nie berechnet zu haben – was er noch in Farm Hall nachholte. Beim ersten Versuch macht er schwere Fehler und erhält als Ergebnis eine kritische Masse von einer Tonne Uran-235. Dabei verkalkuliert er sich sogar bei der einfachen Aufgabe, das Volumen der Urankugel aus ihrem Radius zu ermitteln. Eigentlich hätte sein Ergebnis sogar 13 Tonnen lauten müssen. Die beiden größten Atombombenexperten jener Zeit – Edward Teller, der oft als Vater der Wasserstoffbombe bezeichnet wird, und Hans Bethe, der Leiter der Theorieabteilung für Bombenphysik im Manhattan-Projekt – haben aus dem Protokoll geschlossen, dass Heisenberg die Berechnung tatsächlich erstmals versuchte. Er beging typische

Anfängerfehler, die auch ihnen unterlaufen waren. Bernstein war überzeugt: Keinem Wissenschaftler würden solche Schnitzer ein zweites Mal passieren. Das anschließende Rätselraten der Physiker über den Wirkungsquerschnitt für die Spaltung von Uran-235 mit schnellen Neutronen, das im Protokoll Seiten füllt, bestätigt ihre Unkenntnis.

Eine Woche später hält Heisenberg einen eindrucksvollen Seminarvortrag über die Physik der Bombe. Er hatte erstaunliche Fortschritte gemacht und viele wesentliche Aspekte richtig erkannt. Dazu gehörte ebenfalls das Problem der Effizienz der Bombe, wengleich er es immer noch unterschätzte. Dieses Wissen, das oft als Beleg für die richtigen Vorstellungen der deutschen Physiker über die Bombe bewertet wurde, ist eindeutig erst nach dem Krieg – und in Kenntnis wichtiger Fakten über die Hiroshima-Bombe – entstanden.

Die Farm-Hall-Protokolle untermauern das Ergebnis der Analyse der Dokumente: Den Mitgliedern des Uranvereins war die Funktionsweise einer nuklearen Explosion fremd. Heisenbergs Anfängerfehler belegen, dass er sie noch nie

## **Alle Verantwortlichen wollten ein Großprojekt vermeiden – mit einer erreichbaren Bombe wäre es beschlossen worden**

durchgerechnet hatte. Sein Seminarvortrag wiederum zeigt, dass ihm eine Woche genügte, um ein Grundverständnis der Physik der Bombe zu erlangen. Das ist der Gegenbeweis sowohl zu Roses Behauptung, er sei dazu nicht fähig gewesen, wie auch zu Powers Theorie, er habe es schon früher gewusst. Nach dieser Feststellung drängt sich allerdings der Umkehrschluss auf, den keiner der Historiker gezogen hat: Offenbar hat Heisenberg während des Kriegs nicht einmal eine Woche lang ernsthaft über die Physik der Bombe nachgedacht.

30 bis 40 Jahre nach dem Krieg war ich als Leiter des bundesdeutschen Kerntechnikprogramms in gewisser Weise ein Nachfolger Gerlachs. Deshalb ist mir auch etwas sehr Ungewöhnliches an der Arbeitsweise des Uranvereins aufgefallen. Wenn man technologisches Neuland betritt, ist es sinnvoll, anfangs mehrere alternative Lösungen zu verfolgen. Mit fortschreitender Zeit sollten aber die personellen und finanziellen Ressourcen auf die erfolgversprechenderen übertragen werden, bis sich zuletzt alle Kraft auf die aussichtsreichste Strategie konzentriert. Beim Uranverein geschah das Gegenteil: Die Zahl der Reaktorexperimente und der untersuchten Verfahren für die Isotopentrennung nahm mit den Jahren zu. Die Historiker vermuteten dahinter Führungsschwäche. Aber da eine Fokussierung nicht ein einziges Mal versucht wurde, liegt vielmehr der Schluss nahe: Dieses Projekt war nicht ernsthaft erfolgsorientiert. Viele Wissenschaftler fürchteten, dass sie im Fall der Einstellung ihres Vorhabens nicht zu einem anderen wechseln, sondern an die Front beordert würden.

Für all die verstreut arbeitenden Grüppchen waren ihre Teilprojekte eine Lebensversicherung. Während Millionen von Menschen an den Fronten des Kriegs fielen, durch Bombardierungen in den Städten umkamen und in Vernichtungslagern ermordet wurden, konnten sie bis zuletzt in ihren 1944 in die Provinz verlagerten Instituten weitgehend frei forschen. So lächerlich gering die personelle und finanzielle Ausstattung gemessen an der Aufgabe auch war, sie hatten viel mehr Geld zur Verfügung als in den 30 Jahren zuvor, die durch den Ersten Weltkrieg und die Wirtschaftskrise gekennzeichnet gewesen waren. Ein zentralisiertes Großprojekt hätte diese Idylle zerstört – und wäre lebensgefährlich gewesen. Sogar der erste Programmleiter Abraham Esau hatte seine Kollegen gewarnt, zu viel über die Atombombe zu reden: Wenn »es möglich ist, eine Atombombe zu bauen, dann werden Sie alle zur Arbeit herangezogen. Doch wenn zwei Jahre später noch immer keine Bombe existiert, dann sind Sie verloren.« Alle, die Wissenschaftler wie die staatlich Verantwortlichen, fürchteten deshalb ein Großprojekt. Es wäre aber sehr wahrscheinlich beschlossen worden, wenn die Bombe in Reichweite gekommen wäre. So war es besser, sich nicht mit ihrer Physik zu beschäftigen.

### **Man kann nur verschweigen, was man nicht weiß**

Für Heisenberg galt das besonders. Im Juli 1937 war er im SS-Kampfblatt »Das schwarze Korps« als »weißer Jude« denunziert worden, weil er Relativitätstheorie und Quantenphysik unterstützte, die in den Augen der Nationalsozialisten »undeutsch« waren. Dieser Vorwurf hätte Internierung und Tod in einem Konzentrationslager bedeuten können. Heisenberg bewirkte jedoch eine Untersuchung durch den »Reichsführer SS«, Heinrich Himmler. Sie nahm ein ganzes Jahr in Anspruch. Wieder und wieder wurde er verhört. Wahrscheinlich ist seine Rettung dem Einsatz seines Kollegen Ludwig Prandtl zu verdanken, der als Leiter des Kaiser-Wilhelm-Instituts für Strömungsforschung wichtig für die Aufrüstung der Luftwaffe war. In dieser Zeit muss Heisenberg klar geworden sein: Man konnte diesem totalitären Regime nur verschweigen, was man nicht wusste. Dass er nie herausgefunden hatte, wie die Bombe funktioniert, war nicht Unfähigkeit, sondern Klugheit.

Das klärt am Ende vielleicht eine weitere Frage, die sich mancher Naturwissenschaftler stellen dürfte: Selbst wenn die Beschäftigung mit der Bombe Zeitverschwendung gewesen wäre, weil sie auf absehbare Zeit unerreichbar war – hätte die deutschen Physiker ihre sonst so ausgeprägte Neugier nicht dazu drängen müssen, herauszufinden, welche extremen Vorgänge sich in solch einer Höllenmaschine abspielen? Offenbar war ihre Angst größer als ihre Neugier.

Durch die Vernachlässigung oder Verkennung physikalischer Gesetzmäßigkeiten hat sich in der Geschichtsschreibung eine dicke Schicht von Fehlern über den Fakten ausgebreitet – und das, obwohl mehrere amerikanische und deutsche Physiker viele Unkorrektheiten benannt haben, darunter die besten Kenner der Physik der Bombe. Ihrer Anerkennung stand bisher der vermeintliche Beweis über das Wissen über die kritische Masse der Bombe entgegen,

den Walker dem Bericht des Heereswaffenamts entnommen hatte. Nun ist klar, dass auch dieser letzte, bislang unwidersprochene Beleg für Walkers Deutung eine Fehlinterpretation war. Damit ist eine Neubewertung erforderlich. Dabei sollte die Geschichtsschreibung künftig zwingende Ableitungen, was damals möglich oder unmöglich war, berücksichtigen und bei der Interpretation des physikalischen Inhalts der Dokumente die Fachkunde von Naturwissenschaftlern nutzen.

Das Fazit meiner Analyse lautet: Die deutschen Wissenschaftler wussten im »Dritten Reich« nicht, wie eine Atombombe konstruiert werden muss. Sie haben nicht an der Physik der Bombe gearbeitet und keine Schritte unternommen, sie zu bauen. Zwar wäre der Reaktor, den sie erfolglos zu entwickeln versuchten, technisch eine Voraussetzung für eine Plutoniumbombe gewesen, aber ohne Einsicht in die Physik der Bombe war er ein ziviles Ziel – abgesehen von der Möglichkeit, ihn möglicherweise zum Antrieb von Kriegsschiffen einzusetzen.

Es waren nicht ökonomische Grenzen, die verhinderten, dass Hitler in den Besitz von Atomwaffen gelangte; jedenfalls sind die deutschen Physiker nie auch nur in deren Nähe gekommen. Der wichtigste Grund war die Angst vor dem nationalsozialistischen Regime. Schon Goudsmit hatte geschrieben, dass »Wissenschaft unter dem Faschismus nie ein Äquivalent der Wissenschaft in einer Demokratie war«.

Ob Mitglieder des Uranvereins moralische Bedenken hatten, eine Atombombe für Hitler zu bauen, können wir den Quellen nicht entnehmen. Aber sie haben, wie die Farm-Hall-Protokolle belegen, eine gemeinsame Lesart ihrer Geschichte entwickelt: Sie hätten sehr wohl gewusst, wie eine Atombombe gebaut werden könnte; dies sei unter den damaligen Bedingungen jedoch schlicht nicht möglich gewesen. Sie haben also selbst zu Walkers Interpretation beigetragen. Auch ihnen schien es wohl im Blick auf denkbare Vorwürfe im Nachkriegsdeutschland angenehmer zu sein, die »Wunderwaffe« wäre nur aus ökonomischen Gründen ausgeblieben. Tatsächlich haben sie einen großen Bogen um die Bombe gemacht. Es ist ein tröstlicher Gedanke, dass dem nationalsozialistischen Regime gerade wegen seiner Unmenschlichkeit diese Waffe verwehrt blieb. Unter einer demokratischen Regierung hätten einige der Physiker möglicherweise ebenso eifrig an der Entwicklung der Bombe gearbeitet wie ihre Kollegen in den USA. Andere waren erleichtert, dass ihnen das erspart geblieben war. Für sie hat Otto Hahn das Schlusswort gesprochen: »Ich danke Gott auf den Knien, daß wir die Uranbombe nicht gemacht haben.« ◀

### QUELLEN

**Bernstein, J.:** Hitlers Uranium Club. Copernicus, New York 2001

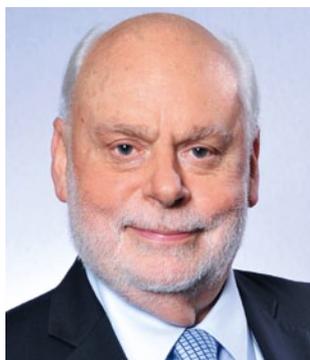
**Popp, M.:** Misinterpreted Documents and Ignored Physical Facts: The History of »Hitler's Atomic Bomb« Needs to be Corrected. In: Berichte zur Wissenschaftsgeschichte 39, S. 265–282, 2016

**Reed, B. C.:** The Physics of the Manhattan Project. Springer, Heidelberg 2015

**Walker, M.:** Die Uranmaschine – Mythos und Wirklichkeit der deutschen Atombombe. Siedler, Berlin 1990



UNIVERSITY OF GRONINGEN



NORTHWESTERN UNIVERSITY



UNIVERSITÉ DE STRASBOURG, CNRS

Bernard (»Ben«) Feringa (links), geboren 1951 in Barger-Compascuum (Niederlande), arbeitet an der Universität Groningen, Sir James Fraser Stoddart (Mitte), geboren 1942 in Edinburgh, an der Northwestern University in Evanston (Illinois), Jean-Pierre Sauvage, geboren 1944 in Paris, in Straßburg (Emeritierung 2009).

## NOBELPREIS FÜR CHEMIE MASCHINEN AUS EINZELNEN MOLEKÜLEN

Jean-Pierre Sauvage, J. Fraser Stoddart und Bernard L. Feringa werden für die Konstruktion molekularer Maschinen geehrt – vielleicht der Beginn einer neuen technologischen Ära.

Ben Feringa hat das Rad neu erfunden. Im Jahr 2011 präsentierte er ein nur wenige Nanometer großes »Auto«, das aus einem einzelnen Molekül bestand. Angetrieben von Stromstößen aus einem Rastertunnelmikroskop rollte es auf vier molekularen »Rädern« über eine Metalloberfläche. Das Konstrukt mag wie eine Spielerei anmuten, aber es markiert in den Augen vieler Fachleute eine technische Zeitenwende von ähnlicher Bedeutung wie die frühen Computer. Es handelt sich um eine der ersten molekularen Maschinen. Moleküle, die ihre räumliche Gestalt ändern und dadurch Entscheidendes bewirken, gab es bisher nur in lebenden Zellen, während die Chemiker die Form ihrer Produkte nicht zielgerichtet verändern konnten. Nun gerät die Sache in Bewegung.

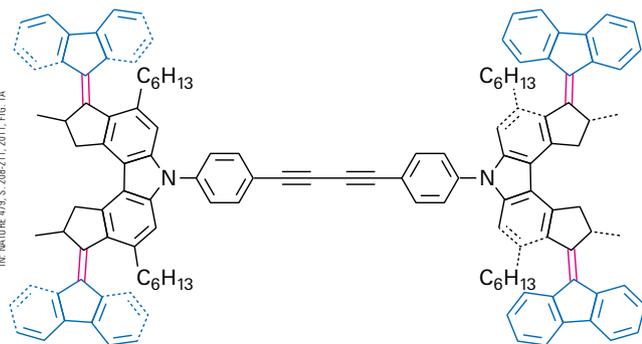
Das Prinzip des Nanoantriebs hatte Feringa schon mehr als ein Jahrzehnt zuvor demonstriert: 1999 entwickelte er ein unscheinbares Molekül aus zwei Dreiringen, die über eine Doppelbindung verbunden sind. Dessen revolutionäre Eigenschaften: Es ist so konstruiert, dass die beiden Dreiringe um die verbindende Doppelbindung rotieren, wenn man Energie

zuführt – und zwar ausschließlich in eine Richtung. Feringas Maschine, die später in vierfacher Ausfertigung sein molekulares Auto antrieb, war der erste molekulare Motor von Menschenhand mit einer rotierenden Welle (Bild unten).

Ungefähr zur gleichen Zeit forschten Jean-Pierre Sauvage und J. Fraser Stoddart an Konstruktionen, die auf einem völlig anderen Prinzip basierten: der topologischen Verstrickung. Gemeint sind damit zum Beispiel zwei ineinanderhängende Ringmoleküle. Die Partner sind nicht chemisch aneinander gebunden, sondern aus mechanischen Gründen unzertrennlich, aber gleichwohl eingeschränkt gegeneinander beweglich.

Schon vor Jahrzehnten versuchten sich Chemiker an der Synthese solcher Doppelringe. Doch erst Jean-Pierre Sauvage fand einen brauchbaren Weg, diese so genannten Catenane (»Kettenmoleküle«) herzustellen. Den Durchbruch brachte die Kombination von organischen Molekülen und Metallatomen. Letztere gehen mit vier oder gar sechs elektronenreichen Atomen wie Stickstoff oder Sauerstoff in den Molekülen Komplexbindungen ein und zwingen ihnen dabei eine

SPECTRUM DER WISSENSCHAFT NACH KUBERNAK, T., ELECTRICALLY DRIVEN DIRECTIONAL MOTION OF A FOUR-WHEELED MOLECULE ON A METAL SURFACE. IN: NATURE 479, S. 208-211, 2011, FIG. 1A



### Der Reaktionszyklus, der Feringas Auto antreibt

Durch eine elektrische Anregung lagert sich die Doppelbindung (rot) um, und das aus einem Dreiring bestehende »Rad« (blau) rotiert um die Bindungsachse. Die neue Konfiguration steht unter Spannung und verändert sich durch Wärme so, dass sie sich bei der nächsten Umlagerung der Doppelbindung nicht zurück, sondern nur weiterdrehen kann. Eine Wiederholung dieser Schritte vervollständigt die Drehung um 360 Grad.



präzise räumliche Anordnung auf. Sauvage nutzte einen Kupferkomplex, um ein bogenförmiges Molekül halb durch einen Ring zu fädeln und dort in der richtigen Position festzuhalten, bis er den Bogen zu einem zweiten Ring geschlossen hatte.

Auch Stoddart verstrickte Moleküle topologisch, allerdings auf zweifach andere Weise. Zum einen brauchte er keine Metallatome. Um seine Moleküle in Position zu halten, versah er sie mit elektronenreichen und elektronenarmen chemischen Gruppen, die sich dank ihrer entgegengesetzten Ladungen elektrostatisch anziehen. Zum anderen fädelte er ein stabförmiges Molekül durch einen Ring und hinderte es dann am Herausrutschen, indem er an beiden Enden große Molekülteile ankoppelte.

Die ineinander verschlungenen Moleküle von Stoddart und Sauvage erfüllen eine wichtige Anforderung an eine molekulare Maschine: Ihre Teile hängen zwar zusammen, sind aber gleichzeitig gegeneinander beweglich. Doch das allein reicht noch nicht aus. Eine Maschine muss auch etwas tun – so wie der rotierende Motor von Feringa. Im Jahr 1994 gelang es dann beiden Wissenschaftlern unabhängig voneinander, ihre Molekülkonstrukte von außen in Bewegung zu versetzen.

Das Prinzip ist in beiden Fällen dasselbe. Je nachdem, ob man Teilen des Moleküls ein Elektron entzieht oder zuführt –

sie oxidiert oder reduziert –, wechseln sie vorhersagbar immer wieder zwischen zwei möglichen Positionen. In Stoddarts Stab-Ring-Kombination (einem »Rotaxan«) sind auf dem Stab zwei chemische Bausteine eingebaut, von

denen je nach Oxidationszustand der eine oder der andere den Ring stärker anzieht. Dieser wechselt daher zwischen beiden Positionen hin und her, sowie man die Elektronen fließen lässt. Auf Stoddarts schaltbaren Rotaxanen basieren heute die meisten molekularen Maschinen.

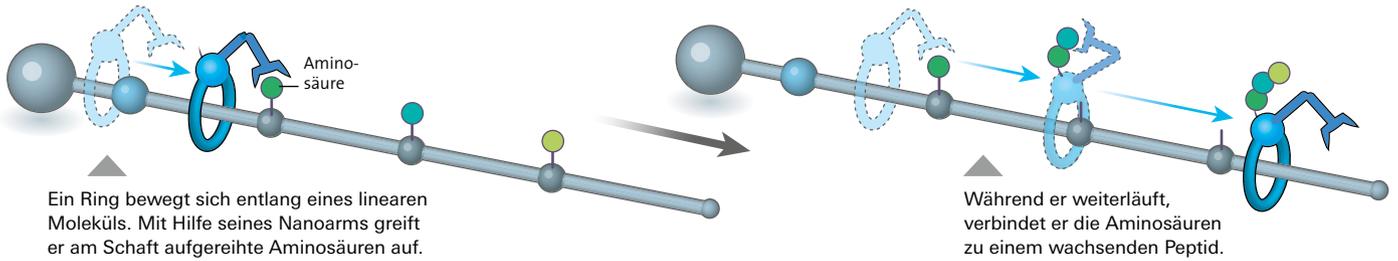
Sauvages Catenan dagegen enthält einen Ring, der an zwei verschiedenen Stellen einen Komplex mit dem zentralen Kupferatom bilden kann. Eine dieser funktionellen Gruppen bevorzugt einfach positiv geladenes Kupfer, die andere bindet das Metall erst, wenn es ein weiteres Elektron verliert. Auch hier wechseln die Komponenten die Orientierung zueinander, sobald ein Elektron abgezogen oder zugeführt wird.

#### Von einfachen zu komplizierten Maschinen

Seit diesen schlichten Anfängen waren die topologischen Chemiker nicht untätig. Die verschlungenen Moleküle sind immer komplexer geworden, nehmen immer mehr Eigenschaften echter Maschinen an und ähneln zuweilen auch beweglichen Molekülen, die in der Natur vorkommen. So präsentierte Sauvage einen »molekularen Fahrstuhl« – ein Molekül, das sich durch Anregung von außen ein Stück

## Molekulares Fließband

NIK SPENCER / NATURE; PELOW, M.: MARCH OF THE MACHINES. IN: NATURE 525, S. 18-21, 2015; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



**Eine Maschine mit einem Arm in Nanogröße kann Aminosäuren zu einem Peptid verbinden.**

über seine Unterlage erhebt – sowie eine Doppelstruktur, die sich auf chemische Reize hin um zwei Nanometer zusammenzieht und wieder entspannt wie eine Muskelfaser.

Feringa wiederum demonstrierte 2006, wie Nanomotoren einen 10 000-mal so großen Glasstab zur Rotation bringen können.

Die Vielfalt der Motoren nimmt heute beständig zu, denn die drei Preisträger haben nicht einfach nur molekulare Maschinen gebaut, sondern die Grundprinzipien hinter ihrer Konstruktion entschlüsselt. Inzwischen gibt es schaltbare Katalysatoren, molekulare Fließbänder und Pumpen, die auf den Arbeiten der Laureaten basieren. Der Kreativität scheinen keine Grenzen gesetzt.

»Wenn man Bewegung kontrollieren kann, dann kann man alle Arten von dynamischen Maschinen bauen«, erklärte Feringa anlässlich der Preisverleihung. Die Möglichkeiten seien endlos – von Nanorobotern, die Krebs bekämpfen, bis hin zu Materialien, die komplett aus winzigen Maschinen aufgebaut sind. Das Nanoauto allerdings zeigt vor allem, wie weit der Weg dorthin derzeit noch ist. Und nicht zuletzt ist unklar, wo er hinführen wird, technisch ebenso wie gesellschaftlich.

Ungeachtet dieser Erfolge – oder gar ihretwegen – werden einige Fachleute ungeduldig, nicht zuletzt Feringa selbst, der fürchtet, die Community könnte sich verzetteln: »Inzwischen wurden 50 oder 60 verschiedene Motoren

entwickelt«, erklärte er 2015 gegenüber »Nature«. »Jetzt sollten wir über ihren Einsatz nachdenken, anstatt immer neue zu konstruieren.«

Molekulare Maschinen praktisch zu nutzen, gestaltet sich nach wie vor schwierig. Zum einen ist die Frage nach dem geeigneten Antrieb noch nicht so recht geklärt. Feringas Auto jedenfalls fährt nur mit Hilfe eines Rastertunnelmikroskops; eine 2006 von ihm konstruierte Maschine braucht Licht und ein Flüssigkristallbad. Andere Maschinen müssen ständig hin- und hergeschaltet werden, was bei vielen Anwendungen schnell unpraktisch wird. So würde es sich anbieten, die beweglichen Moleküle in großen Mengen in den Blutkreislauf zu spritzen, damit sie dort Gutes tun – wenn man ihnen an ihrem Wirkungsort gezielt Elektronen zuführen und wieder wegnehmen könnte.

Zum anderen ist noch weniger klar, wie man molekulare Maschinen überhaupt dazu bringt, irgendetwas Sinnvolles zu tun. Die Konstruktionen sind so klein, dass sich Millionen von ihnen koordiniert zusammenschließen müssten, um zum Beispiel eine Krebszelle zu töten. Wie steuert man eine Nanomaschine? Wie bringt man eine Million von ihnen zu gemeinsamer Aktion?

Das Nobelkomitee gibt sich da optimistisch. Die drei Wissenschaftler hätten das Feld auf einen Stand gebracht, der dem Bau von Motoren in den 1830er Jahren entspreche, hieß es zur Verleihung. Damals seien die technischen Geräte noch eher eine Kuriosität gewesen, und niemand hätte sich die revolutionierende Kraft ihrer Anwendungen ausmalen können.

Auch Nobelpreisträger Ben Feringa lässt sich von den vielen offenen Fragen die Laune nicht verderben, im Gegenteil: »Wir stehen jetzt vor der gleichen Herausforderung wie die Gebrüder Wright, nachdem sie das erste Mal erfolgreich geflogen sind. Man hat sie gefragt: ›Wozu brauchen wir so eine Flugmaschine?‹ – und heute sitzen wir in einer 747 oder einem Airbus.« ◀

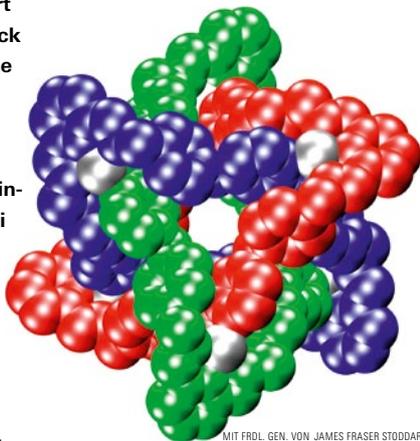
Lars Fischer ist Onlineredakteur bei Spektrum in Heidelberg.

### QUELLEN

**Kudernac, T. et al.:** Electrically Driven Directional Motion of a Four-Wheeled Molecule on a Metal Surface. In: Nature 479, S. 208–211, 2011

**Peelow, M.:** March of the Machines. In: Nature 525, S. 18–21, 2015

**James Fraser Stoddart brachte das Kunststück fertig, drei ringförmige Moleküle zu »borromäischen Ringen« zu verkoppeln: Das ist jene spezielle Verschlingung dreier Ringe, bei der durch Zerschneiden eines Rings die beiden anderen von einander frei werden. Zinkatome (silberne Kugeln) bringen die Konstruktion in Form.**





MIT FROL. GEN. DES TOKYO INSTITUTE OF TECHNOLOGY

**Yoshinori Ohsumi wurde 1945 in Fukuoka, Japan, geboren. Er forscht heute an der Technischen Hochschule Tokio.**

## NOBELPREIS FÜR PHYSIOLOGIE ODER MEDIZIN **ABFALLCONTAINER FÜR DEN ZELLULÄREN RECYCLINGHOF**

**Der Zellbiologe Yoshinori Ohsumi hat in langjähriger systematischer Forschungsarbeit aufgeklärt, wie Zellen Material beseitigen, das sie krank macht, kaputt ist oder recycelt werden kann.**

Im Lauf ihres Lebens kommt so einiges in Zellen zusammen, das entsorgt werden muss: etwa defekte Organellen und Proteinkomplexe oder eingedrungene Bakterien und Viren. Manchmal benötigt eine Zelle auch kurzfristig Bausteine zum Reparieren ihrer Strukturen oder schlicht Treibstoff, der Energie liefert. Kurzum – sie braucht so etwas wie Recyclingcenter, die Unerwünschtes zerlegen und benötigtes Material zur Verfügung stellen. Diese Recyclingcenter gibt es: Lysosomen, bläschenartige Zellorganellen mit speziellen Verdauungsenzymen, die Krankheitserreger und schadhafte oder nicht mehr benötigte

Zellbestandteile auflösen. Entdeckt hat sie der Belgier Christian de Duve in den 1950er Jahren, wofür er 1974 den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin erhielt.

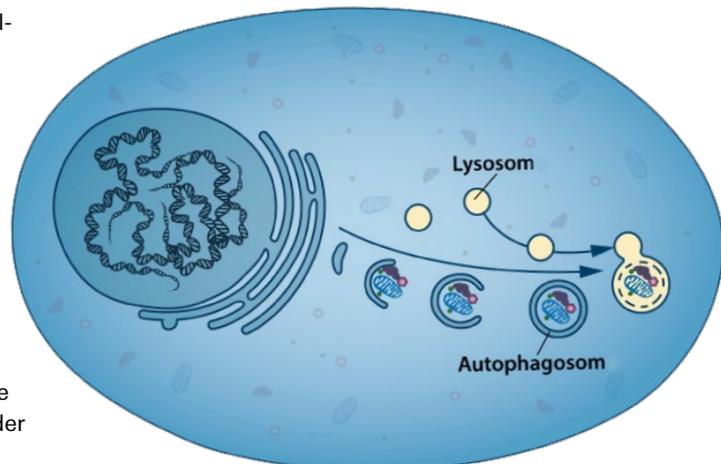
De Duve hatte sich aber auch schon dafür interessiert, wie die Zellen eigentlich den auszusortierenden Müll erkennen. Gemeinsam mit anderen Forschern stellte er fest, dass sie auf Stress wie Nährstoffmangel oder Giftstoffe reagieren, indem sie einen anderen Typ von Membranbläschen ausbilden. Die enthalten zwar keine Enzyme, sammeln aber offenbar Zellmaterial ein und transportieren es zu den Lysosomen. De Duve prägte dafür 1963 den Begriff Autophagie (vom griechischen Begriff für »sich selbst verspeisen«); entsprechend erhielten die Vesikel den Namen Autophagosomen. Wie dieser Prozess jedoch gesteuert wird und was ihn genau auslöst, ließ sich nicht recht erforschen – die dynamischen Membranbläschen entstanden und verschwanden wieder einfach zu schnell. Heute wissen wir, dass Autophagosomen nur rund eine Viertelstunde existieren, bevor sie mit einem Lysosom verschmelzen.

Daher blieben die Details der Autophagie unbekannt, bis 1988 der japanische Zellbiologe Yoshinori Ohsumi in seinem frisch gegründeten eigenen Labor an der Universität Tokio auf den Plan trat. Mit einer Reihe von durchdachten Experimenten arbeitete er nach und nach heraus, wie Zellen beim Verdauen eigener Bestandteile vorgehen und weshalb dies auch darüber entscheidet, ob sie richtig funktionieren oder aber vorzeitig altern, krank werden oder ganz ausfallen. Jetzt ist Yoshinori Ohsumi für seine Aufklärungsarbeit am Autophagosom mit dem Nobelpreis für Physiologie oder Medizin 2016 ausgezeichnet worden.

Als Modellorganismus für seine Experimente hatte sich Ohsumi die bekannte Bäcker- und Brauerhefe *Saccharomyces cerevisiae* ausgesucht. In deren winzigen Zellen waren die noch kleineren Autophagosomen allerdings schwer zu erkennen, weshalb er einen genialen Trick entwickelte, um nachzuweisen, dass Autophagie in diesen Zellen überhaupt vorkommt. Da in Hefepilzen ein vergleichsweise großes Bläschen namens Vakuole die Rolle des Lysosoms über-

### Autophagosomen bringen Zellmüll zum Entsorgungszentrum Lysosom

Das Autophagosom ist ein Bläschen aus zwei Doppelmembranen, in dessen Innerem zu entsorgende Zellbestandteile eingeschlossen sind. Die äußere Membran des Autophagosoms fusioniert dann mit einem Lysosom, und anschließend bauen die in Letzterem enthaltenen Enzyme die innere Membran und die eingeschlossenen Zellabfälle ab. Noch immer ist nicht ganz klar, wie sich die Abfallentsorgerbläschen aus den Membransystemen des endoplasmatischen Retikulums heraus organisieren – jedenfalls ist der Mechanismus aber durch verschiedene Gene streng reguliert, die sich im Lauf der Evolution kaum verändert haben. Die Autophagosom-Gene unterscheiden sich daher von der Hefe bis zum Menschen kaum.



MATTIAS KARLEN / THE NOBEL ASSEMBLY AT KAROLINSKA INSTITUTET 2016 / NOBELPRIZE.ORG

nimmt, sollten die Autophagosomen den Zellmüll dort abladen. Blockiert man aber den Abbau des Abfalls in der Vakuole, dann müssten dort bald immer größere Müllberge im Lichtmikroskop sichtbar werden. Daran könnte man indirekt ablesen, wie effizient die Entsorgung der Autophagosomen vor den Türen der Vakuole arbeitet.

Daher züchtete Ohsumi Hefen, denen bestimmte Verdauungsenzyme in den Vakuolen fehlten, und zwar die Proteinase A, die Proteinase B und die Carboxypeptidase, die normalerweise in den Vakuolen von Hefezellen zellulären Müll zerlegen. Bei diesen modifizierten Hefezellen stimulierte er dann Autophagie, indem er sie auf Diät setzte. Tatsächlich sammelten sich innerhalb weniger Stunden in ihren Vakuolen gut erkennbar Autophagosomen an. Damit hatte Ohsumi nicht nur Autophagie nachgewiesen, sondern auch eine Methode entwickelt, um herauszufinden, unter welchen Bedingungen die Autophagosomen ihren Job machen – oder nicht. Denn Mutanten mit fehlerhaften Autophagosom-Genen verraten sich in solchen Experimenten durch nicht zugemüllte Vakuolen sowie andere Defekte, etwa eine kürzere Lebensdauer.

Entsprechend löste Ohsumi nun in seinen speziellen Hefezellen zufällige Mutationen aus und beobachtete deren Auswirkungen auf die Vakuolen. Auf diese Weise identifizierte er insgesamt 15 Gene, die für die Aktivierung der Autophagie notwendig sind, und nannte sie APG 1 bis 15. Daraufhin begann er die Funktionen der entsprechenden Proteine zu untersuchen, die jeweils an verschiedenen Stadien der Bildung von Autophagosomen mitwirken. Damit gelang es Ohsumi zusammen mit verschiedenen Kollegen, sämtliche wichtigen Mitspieler einer Kaskade von hintereinandergeschalteten Prozessen auszumachen, die am Autophagiegeschehen beteiligt sind. Andere Experimente bestätigten, dass die Autophagosomen zum Beispiel bei akutem Nährstoffmangel buchstäblich anfangen, ihre Mut-

terzelle aufzuessen, und dass sie bei Stress oder unter der Einwirkung von Giftstoffen deutlich aktiver werden. Zudem fanden sich diese zellulären Müllcontainer in so unterschiedlichen Organismen wie Insekten, Fröschen und Menschen sowie in Amöben, Algen oder Geißeltierchen.

Bald zeigte sich: In Hefezellen sind bei der Autophagie sehr ähnliche Gene beteiligt wie bei den anderen Organismen bis hin zum Menschen. Ohsumi und seine Kollegen haben auch als Erste die entsprechenden Erbfaktoren bei Säugetieren identifiziert. Nun war es ihnen und anderen Teams möglich zu untersuchen, welche Folgen Defekte an einzelnen Autophagie-Genen bei höheren Organismen haben. Oft äußern sich diese Mutationen dramatisch; so sterben etwa Mäuse mit ausgeschaltetem Atg5-Gen nach der Geburt, da sie nicht mit dem Nahrungsmangel vor dem ersten Säugen zurechtkommen.

Inzwischen ist klar, dass Autophagie nicht nur in Stressphasen, sondern ständig abläuft. So spielt sie bereits während der Zelldifferenzierung und des Heranwachsens eines Embryos eine wichtige Rolle. Zentral und zunehmend medizinisch bedeutsam ist allerdings ihre Aufgabe als Schaltstelle der zellulären Abfallwirtschaft: Zeigt diese Schwächen – etwa im Alter –, fördert das die Entstehung verschiedener Leiden wie etwa der parkinsonschen Erkrankung, Typ-2-Diabetes oder Krebs. So nahm das Interesse an dem Forschungsgebiet schlagartig zu, als 1999 Beth Levine, jetzt am University of Texas Southwestern Medical Center in Dallas, und ihre Mitarbeiter nachwiesen, dass ein Autophagie-Gen bei Säugern Tumorwachstum unterdrücken kann. Zudem ist Autophagie auch eine Form der Selbstverteidigung: Eindringende Bakterien und Viren werden genauso von den Autophagosom-Membranen eingeschlossen und dem Abbau zugeführt wie recycelbare Zellbruchstücke und nicht mehr funktionsfähige Organellen.

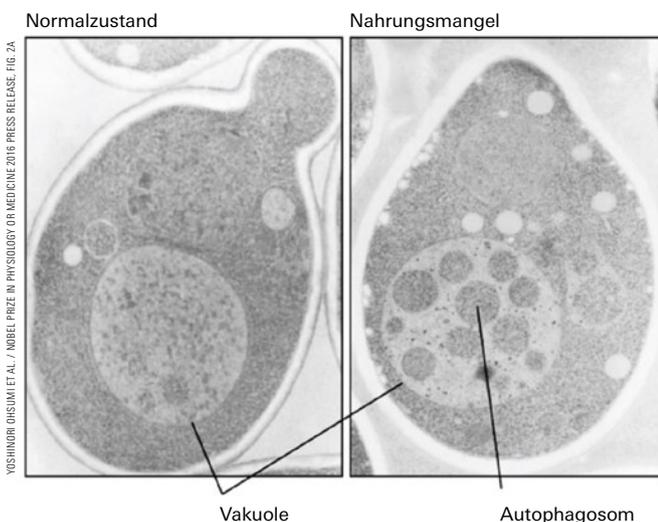
Die Autophagie ergänzt damit einen anderen Zweig der zellulären Abfallwirtschaft: die über Ubiquitin vermittelte Müllabfuhr, die vor allem einzelne, eher kurzlebige Proteine in den Proteasomen der Zelle entsorgt. Wie diese arbeitet, hatten die drei Chemienobelpreisträger des Jahres 2004 Aaron Ciechanover, Avram Hershko and Irwin Rose herausgearbeitet. Sie geht viel differenzierter vor, kann aber anders als die große Abrissbirne Autophagosom nicht ganze Organellen und langlebige Proteinkomplexe entfernen. Mit dem frischgebackenen Laureaten hat das Nobelkomitee nun also zum dritten Mal die Erforschung der zellulären Müllentsorgung gewürdigt – und damit ihre Bedeutung für die Biologie insgesamt nachhaltig unterstrichen. ◀

**Jan Osterkamp** ist Onlineredakteur bei **Spektrum** in Heidelberg.

## QUELLEN

**Takehige, K. et al:** Autophagy in Yeast Demonstrated with Proteinase-Deficient Mutants and Conditions for its Induction. In: *Journal of Cell Biology* 119, S. 301–311, 1992

**Tsukada, M., Ohsumi, Y.:** Isolation and Characterization of Autophagy-Defective Mutants of *Saccharomyces cerevisiae*. In: *FEBS Letters* 333, S. 169–174, 1993



**In der Vakuole der rechts abgebildeten Hefezelle sammeln sich bei Nahrungsmangel Autophagosomen an, da bei ihr einige Verdauungsenzyme deaktiviert wurden.**



**WIR MACHEN  
SIE STARK.**

Das  
**IMMUNSYSTEM**  
Ein innovativer Schlüssel  
gegen Krebs.

Unser Immunsystem ist wohl eines der stärksten Instrumente im Kampf gegen Krebs. Genau darauf setzt ein neues und innovatives Therapieprinzip: Die Immunonkologie. Sie versetzt unser Immunsystem wieder in die Lage, die Krebszellen zu erkennen und anzugreifen.

[www.immunonkologie.de](http://www.immunonkologie.de)



DENISE APPLEWHITE, PRINCETON UNIVERSITY,  
OFFICE OF COMMUNICATIONS



TRINITY HALL, UNIVERSITY OF CAMBRIDGE



COMPIC-PHOTOS / MARKKU OJALA,  
MIT FROL. GEN. DER AALTO UNIVERSITY

Alle drei diesjährigen Nobel-preisträger für Physik sind gebürtige Briten und forschen in den USA: F. Duncan M. Haldane (links) an der Princeton University in New Jersey, David J. Thouless (Mitte) an der University of Washington in Seattle und J. Michael Kosterlitz an der Brown University in Providence.

## NOBELPREIS FÜR PHYSIK SELTSAME ZUSTÄNDE IN FLACHER MATERIE

Der Nobelpreis für Physik geht an David Thouless, Duncan Haldane und Michael Kosterlitz für ihre theoretischen Untersuchungen von Phasenübergängen auf Oberflächen. Damit haben sie Quanteneffekte erklärt und vorausgesagt, die seither experimentell intensiv erforscht werden.

»Gott erschuf die Festkörper, aber der Teufel die Oberflächen.« Dieser Ausspruch wird dem Physiker Wolfgang Pauli zugeschrieben. Er soll verdeutlichen: Die großräumige Ordnung der Atome im Inneren eines Körpers lässt sich meist vergleichsweise gut verstehen – doch damit wissen wir noch kaum etwas darüber, wie der Gegenstand mit seiner Umgebung wechselwirkt. Denn die entscheidenden Effekte spielen sich gerade an den Grenzflächen ab, die sich oft unerwartet verhalten. Heute ist das Zitat des 1958 verstorbenen Pauli brisanter denn je. Die Nanotechnologie ermöglicht zunehmend feinere Strukturen, und die Eigenschaften der Materialien werden zu einem immer entscheidenderen Teil durch das bestimmt, was auf und nicht in ihnen vorgeht.

Der Nobelpreis ehrt drei Physiker, die seit den 1970er Jahren die theoretischen Grundlagen für unser Verständnis davon gelegt haben, was sich auf den Oberflächen solcher Bauteile abspielt. David Thouless von der University of Washington in Seattle, Duncan Haldane von der Princeton University in New Jersey und Michael Kosterlitz von der Brown University in Providence haben sich mit so genannten topologischen Phasenübergängen beschäftigt. Die Phänomene treten in sehr dünnen, quasi zweidimensionalen Lagen auf und funktionieren anders als Phasenübergänge, die wir von alltäglichen Festkörpern wie etwa Eis gewohnt sind.

Schmilzt gefrorenes Wasser, verändert sich die Symmetrie im Inneren – die Ordnung der Moleküle geht verloren. Anders bei den topologischen Phasenübergängen, die Kosterlitz und Thouless 1973 beschrieben haben: Hier treten zwar ebenfalls bei einer kritischen Temperatur neue Eigenschaften auf, aber diese Zustandsänderung lässt sich nicht durch eine gebrochene Symmetrie charakterisieren. Stattdessen kann man den inzwischen nach den beiden Physikern benannten Übergang interpretieren, indem man das Verhalten mikroskopi-

scher Wirbel auf einer Oberfläche betrachtet. Diese entstehen durch die Ausrichtung quantenmechanischer Drehmomente, der Spins. Bei niedrigen Temperaturen treten zwei gegenläufige Quantenwirbel als Paar auf. Analog zu den entgegengesetzten Ladungen in einem Atom, das nach außen elektrisch neutral ist, hebt sich der Gesamtdrehmoment der beiden gekoppelten Spinwirbel auf. Bei dem Kosterlitz-Thouless-Phasenübergang allerdings trennen sich beide Wirbel. Das Verhalten des Materials ändert sich plötzlich: So hat beispielsweise flüssiges Helium unterhalb von rund zwei Kelvin keinerlei innere Reibung, es ist »suprafluid«; oberhalb dieser kritischen Temperatur geht die Eigenschaft verloren. Anschaulich gesprochen unterbinden die nunmehr freien Wirbel das suprafluide Verhalten. Die bis dahin anerkannten Theorien waren unvollständig, denn sie konnten solche und ähnliche Quanteneffekte, wie die so genannte Supraleitung, bei der ein Material jeden elektrischen Widerstand verliert, nur in dreidimensionalen Materialien beschreiben. Es gab jedoch erste Versuche, die zweidimensionale Entsprechungen nahelegten. Das Modell hat seither entscheidend dazu beigetragen, diese exotischen Materiezustände zu deuten.

1983 beschrieb David Thouless dann den 1980 vom deutschen Physiker und späteren Nobelpreisträger Klaus von Klitzing experimentell entdeckten Quanten-Hall-Effekt – ein ebenfalls zweidimensionales quantenmechanisches Phänomen. Hier tritt an Oberflächen bei extrem tiefen Temperaturen und starken Magnetfeldern senkrecht zu einem Strom eine Spannung auf, die ausschließlich Vielfache eines bestimmten Werts annimmt.

Die Erklärung gelang Thouless mit Hilfe der Topologie. Dieser Bereich der Mathematik beschäftigt sich mit den Eigenschaften von Strukturen, die einander ähnlich sind, solange man sie nicht aneinanderklebt oder zerreißt. Aus einem Klumpen Ton lässt sich etwa ein Würfel oder eine

Schale kneten. Solche Formen sind aus topologischer Sicht gleich. Will man aus ihm jedoch eine Kaffeetasse formen, muss man ihn entweder durchstechen oder zwei seiner Enden zusammenfügen, um ein Loch für den Henkel zu schaffen. Löcher ändern also die topologischen Eigenschaften (siehe auch den Artikel ab S. 60). Bruchteile davon gibt es nicht: Ein Körper hat entweder keines, eines oder mehrere. Thouless übertrug diese Diskretheit und weitere Eigenschaften der Topologie auf die Stufen der Leitfähigkeit beim Quanten-Hall-Effekt. Dabei konnte er an sein Erfolgsrezept aus den 1970er Jahren anknüpfen. Bereits bei den Spinwirbeln hatten er und Kosterlitz topologische Argumente verwendet.

Auch der dritte Ausgezeichnete Duncan Haldane hat diesen Zweig der Mathematik genutzt und Anfang der 1980er Jahre einen Effekt vorausgesagt, der sich statt in zwei Dimensionen nur in einer abspielt. Er untersuchte das Verhalten entlang einer Linie aneinandergereihter Spins und zeigte: Wenn man all deren Einflüsse aufaddiert und die Kette dann einen ganzzahligen Gesamtspin hat, unterscheidet sich ihre Topologie von der einer Kette mit halbzahligem Spin. Auch dieses abstrakte Ergebnis überraschte die damaligen Theoretiker und hat weit reichende Konsequenzen. Denn die magnetischen Eigenschaften eines Festkörpers hängen letztlich von den Wechselwirkungen benachbarter Spins ab. Bei langen Ketten ist es aber nicht mehr einfach, alle Einstellmöglichkeiten zusammenzurechnen und zu bestimmen, wie stark der quantenmechanische Einfluss eines Spins auf weiter entfernte abnimmt. Doch die Ausbreitung dieser Korrelationen ist wichtig, um Aussagen über das physikalische Verhalten des Gesamtsystems treffen zu können. Haldane berechnete, dass die Wechselwirkungen bei Ketten mit einem

ganzzahligen Gesamtspin exponentiell abfallen; bei einem halbzahligen Wert ist das nicht der Fall. Als messbarer Effekt unterscheiden sich dadurch die Anregungsenergien der beiden eindimensionalen physikalischen Systeme drastisch. Ersteres weist eine Lücke bei den Anregungsenergien über dem energetisch niedrigstmöglichen Zustand auf, Letzteres nicht. Eine der Vorhersagen aus diesen Überlegungen war beispielsweise: Unter bestimmten Bedingungen sollte der Quanten-Hall-Effekt auch ohne von außen angelegtes Magnetfeld auftreten. Inzwischen konnten Forscher das mit Ketten aus ultrakalten Atomen experimentell bestätigen.

Die Arbeiten von Thouless, Kosterlitz und Haldane bildeten das Fundament für die Entwicklung ganz neuer Materialklassen, etwa so genannter topologischer Isolatoren. Diese leiten ähnlich wie Supraleiter Strom ohne Widerstand, allerdings nur entlang ihrer Oberfläche, dafür bei wesentlich höheren Temperaturen. Die Auszeichnung für die grundlegenden theoretischen Entwicklungen der drei Wissenschaftler würdigt somit auch die große Fülle experimenteller Forschung, die daraus erwachsen ist, und ihren potenziellen Nutzen für die Menschheit – ganz im Sinn des Stifters des Preises. ◀

**Mike Beckers** ist Redakteur bei **Spektrum** in Heidelberg.

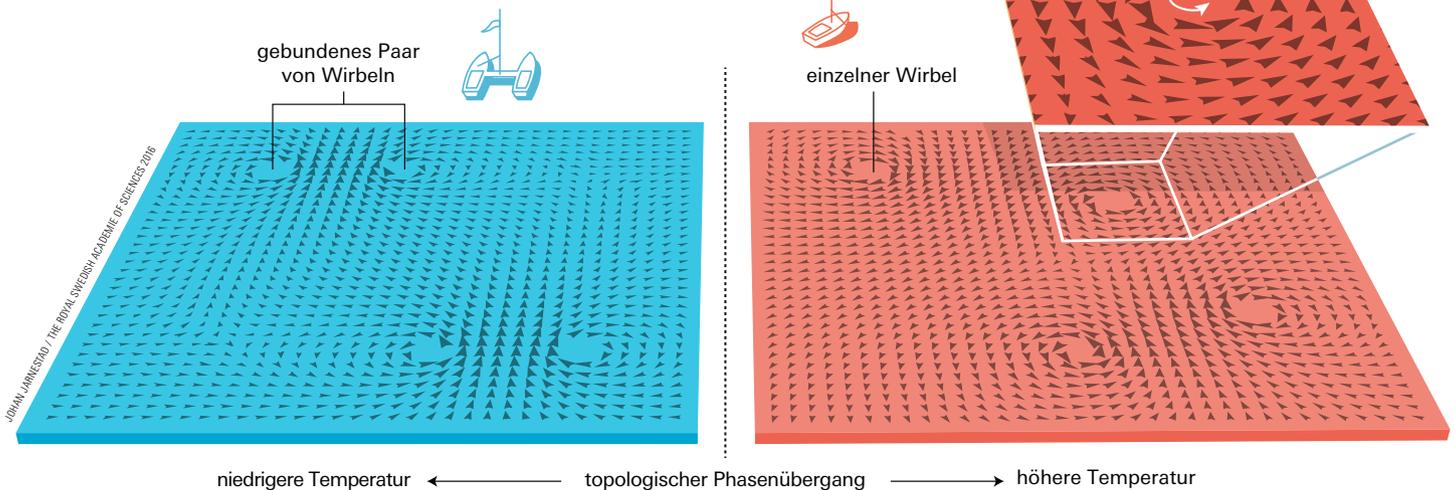
QUELLEN

**Haldane, F. D. M.:** Nonlinear Field Theory of Large-Spin Heisenberg Antiferromagnets: Semiclassically Quantized Solitons of the One-Dimensional Easy-Axis Néel State. In: Physical Review Letters 50, S. 1153–1156, 1983

**Kosterlitz, J. M., Thouless, D. J.:** Ordering, Metastability and Phase Transitions in Two-Dimensional Systems. In: Journal of Physics C: Solid State Physics 6, S. 1181–1203, 1973

### Strudel in zwei Dimensionen

Der Kosterlitz-Thouless-Phasenübergang lässt sich durch Wirbel auf einer Oberfläche illustrieren: Bei niedrigen Temperaturen treten sie paarweise und gegenläufig auf, so dass sich ihr Gesamtdrehmoment aufhebt. Bei einer Übergangstemperatur trennen sie sich und verändern die physikalischen Eigenschaften des Materials.





L. BARRY HETHERINGTON, MIT FRDL. GEN. DES DEPARTMENT OF ECONOMICS, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY



MARSHA STEWART, MIT FRDL. GEN. DES DEPARTMENT OF ECONOMICS, HARVARD UNIVERSITY

**Bengt Holmström (links), geboren 1949 in Helsinki, promovierte 1978 in Stanford. Nach Stationen an der Northwestern und der Yale University ist er seit 1994 Professor am Massachusetts Institute of Technology. Er war Berater zahlreicher Firmen, darunter Nokia und Daimler-Benz. Oliver Hart, geboren 1948 in London, promovierte 1974 in Princeton über Gleichgewichte in Märkten mit unvollständiger Struktur. Seit 1983 ist er Professor für Wirtschaftswissenschaft an der Harvard University.**

## NOBELPREIS FÜR WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTEN VOM STÜCKLOHN ZUM PRIVATISIERTEN GEFÄNGNIS

Der Preis der schwedischen Reichsbank im Gedenken an Alfred Nobel geht dieses Jahr an Oliver Hart und Bengt Holmström für ihre Beiträge zur Vertragstheorie.

Was kann ein Pilot bei der Lufthansa tun, um seine firmeninterne Karriere zu fördern? Gar nichts. Nur Älterwerden hilft. Nach dem »Senioritätsprinzip« hat den ersten Zugriff auf eine frei werdende höherrangige Stelle der jeweils dienstälteste Bewerber.

In einer Zeit, in der leistungsabhängige Bezahlung und ausgeklügelte Bonussysteme – zumindest auf dem Papier – an der Tagesordnung sind, wirkt diese Regelung seltsam antiquiert. Dabei ist die Begründung alles andere als gleichmacherisch oder gar sozialistisch. Was immer ein Pilot tun könnte, um bei der Firmenleitung besser dazustehen – im halb kranken Zustand unermüdlich zum Einsatz erscheinen, zur Gewichtersparnis mit knappen Treibstoffreserven fliegen, Kollegen schlechtmachen –, erhöht im Endeffekt das Risiko. Die zu erwartenden hohen Kosten eines Schadens würden den Nutzen übersteigen, den die Firma aus dem besonderen Einsatz ihrer Angestellten ziehen könnte.

Abwägungen dieser Art haben die diesjährigen Preisträger theoretisch untersucht und insbesondere in Gestalt mathematischer Modelle formalisiert. Die Hauptfiguren dieser Modelle heißen in der englischsprachigen Literatur traditionell »principal« und »agent«, was mit »Chef« und »Angestellter« nur sehr unvollkommen übersetzt ist. Typische Paarungen sind ein Mandant und sein Rechtsanwalt, der McDonald's-Konzern und ein einzelner Restaurantbetreiber, ein Risikokapitalgeber und ein hoffnungsvoller Jungunternehmer, Aufsichtsrat und Vorstand eines Unternehmens.

Allgemein ist der Prinzipal derjenige, der vom Agenten eine Leistung einkaufen will, die erst in der Zukunft zu erbringen und daher durch einen Vertrag zu regeln ist; um solche Verträge geht es in der preisgekrönten Theorie. Der Prinzipal kann nicht oder zumindest nicht genau genug beobachten, was der Agent tut, sondern nur das Ergebnis dieser Tätigkeit. So kann der Aufsichtsrat dem Firmenvorstand nicht auf die Finger schauen, sondern nur hinterher

feststellen, wie gut es der Firma geht. Im Extremfall kann der Agent sogar ungestraft Geld zur Seite schaffen. Daher wird der Prinzipal zumindest einen Teil des Lohns von der Leistung des Agenten abhängig machen.

Damit lässt sich das Vertragsproblem – wie gestaltet man die Bonusregelung? – als Szenario der Spieltheorie formalisieren. Beide Beteiligten sind an der Maximierung ihres in Geld ausdrückbaren Nutzens interessiert und an sonst gar nichts. Hier lebt die klassische Vorstellung vom »Homo oeconomicus« weiter, von der sich die Wirtschaftswissenschaft ansonsten zunehmend verabschiedet. Der Agent kann den Wert  $a$  seines Arbeitseinsatzes bestimmen; der Nutzen, den der Prinzipal daraus zieht, ist eine Funktion von  $a$  plus eine Zufallskomponente. Auch die Mühe, die der Arbeitseinsatz  $a$  den Agenten kostet, lässt sich als Funktion von  $a$  in Geld ausdrücken. Dann gibt es unter plausiblen Zusatzbedingungen einen optimalen Arbeitseinsatz  $a^*$ , nämlich denjenigen, für den der erwartete Nutzen für den Prinzipal (ohne Zufallseinfluss) minus die Mühe für den Agenten ein Maximum annimmt.

Dieses Optimum  $a^*$  (die »first-best solution«) ist zwar praktisch nie berechenbar, aber als theoretische Größe nützlich. So konnte Bengt Holmström, einer der beiden Geehrten, 1982 zeigen, dass bei einem reinen Genossenschaftsprinzip jeder Beteiligte der Versuchung des Trittbrettfahrens ausgesetzt ist: Der Zustand, in dem jeder seinen persönlichen optimalen Arbeitseinsatz  $a^*$  gibt, ist kein Nash-Gleichgewicht, das heißt, es ist für jeden Einzelnen vorteilhaft, von diesem Zustand nach unten abzuweichen. Dabei ist die entscheidende Voraussetzung nicht einmal, dass jeder den gleichen Anteil vom Kuchen bekommt, sondern nur, dass der Kuchen vollständig verteilt wird. Das Dilemma lässt sich erst auflösen, indem ein externer »budget breaker« – zum Beispiel ein Kapitalist oder ein Kreditgeber – sich die Freiheit nimmt, Teile des Gesamtertrags einzubehalten.

#ich #liebe #dich:  
Partnerschaft heute.

# GEO WISSEN

Den Menschen verstehen

NR. 58

## Liebe

Der Traum  
vom *gemeinsamen*  
Glück

*Wie wir uns finden und trennen,  
weshalb wir einander begehren –  
und manchmal betrügen*

### Test

So stabil ist Ihre  
Partnerschaft

### Online

Wie das Internet unsere  
Gefühle verändert

### Sehnsucht

Eine Frau, drei  
Männer

### Therapie

Wenn Paare  
nicht weiterwissen



**Auch mit  
DVD erhältlich**

Jetzt  
im Handel.

Allerdings muten die Werke der Preisträger keineswegs so finster kapitalistisch an, wie dieses Beispiel glauben macht. Vielmehr spielt die Vertragstheorie eine interessante Doppelrolle: Einerseits hilft sie zu erklären, warum sich bestimmte Typen von Verträgen etabliert haben, andererseits gibt sie Leitlinien zu ihrer Gestaltung für neue, bisher ungewohnte Situationen. Dabei kommen die Arbeiten der Preisträger nicht selten zu dem Ergebnis, dass in der Realität zu beobachtende Vertragsformen, darunter vor allem neokapitalistische, suboptimal sind.

So wäre es zwar im Prinzip sinnvoll, den Lohn an den Arbeitseinsatz des Agenten zu koppeln. Da sich dieser aber nicht beobachten lässt, braucht man eine Ersatzmessgröße, zum Beispiel den Ertrag der Bemühungen. Das läuft auf einen Stücklohnvertrag hinaus; der liegt aber fern vom Optimum, wenn der Agent wie üblich eine Einzelperson ist, die das allein auf sie abgewälzte Risiko nicht abfedern kann.

Andere Verträge leiden darunter, dass die Messmethode nicht ausreichend Informationen über das Verhalten des Agenten liefert, ihm falsche Anreize setzt oder Ausweichmöglichkeiten bietet. Letzteres geschieht unweigerlich, wenn der Agent mehrere Ziele zu verfolgen hat, von denen nicht alle messbar sind. Eigentlich soll ein Lehrer seinen Schülern fundiertes Wissen, eine geeignete Arbeitshaltung und auch noch Begeisterung für das Schulfach vermitteln; gemessen wird er aber, vor allem in den USA, nur an der Erreichung des Nebenziels »gute Noten«, mit der Folge, dass er nur noch dieses Ziel verfolgt und dabei häufig genug das Hauptziel beschädigt.

Ein Manager, dessen Einkünfte an den Aktienkurs des Unternehmens in drei Jahren gebunden sind, wird dazu neigen, den kurzfristigen Erfolg der Firma zu maximieren – auf Kosten ihres langfristigen Wohlergehens. Viele Fachleute sehen in diesem Mechanismus eine der wesentlichen Ursachen der Finanzkrise von 2008.

Insgesamt bietet sich eine anreizdominierte Bezahlung – Stücklohn oder Franchisevertrag – für eindimensionale Tätigkeiten in einem vorhersehbaren Umfeld an. Wenn der Agent aber viele verschiedene, schlecht messbare Dinge zu tun hat und mit vielen Überraschungen zu rechnen ist, sollte der Prinzipal einen Vertrag zum Festgehalt schließen. Gerade in einem undurchschaubaren Umfeld kann es sonst nämlich für den Agenten rational sein, hohe Risiken einzugehen.

Das gilt auch, wenn die Anreize nicht unmittelbar in Geld bestehen. So pflegt die übertriebene Risikobereitschaft Manager am Beginn ihrer Karriere zu befallen. Eine große Tat verbessert die Verhandlungsposition für den nächsten Fünfjahresvertrag – wenn sie gelingt. Der erwartete Nutzen solchen Verhaltens mag, dem Risiko des Scheiterns zum Trotz, größer sein als der bescheidene Ruhm, den ein vorsichtiger Verwalter einfährt. Das erklärt, warum in den Verträgen neuer Vorstandsmitglieder die Investitionen gedeckelt sind, die sie allein verantworten dürfen.

Mit solchen und ähnlichen Fragen hat sich vorrangig der zweite Preisträger Oliver Hart beschäftigt. Bekannt geworden ist er durch die Theorie der »unvollständigen Verträge«; gemeint sind solche, die nicht für alle Eventualitäten der

Zukunft eine Regelung vorsehen. Das trifft zwar fast immer zu, in besonderer Schärfe aber auf Projekte, deren Zukunft ihrer Natur nach ungewiss ist, wie Forschungsaufträge oder neue, unerprobte Geschäftsideen. Hier ist es praktisch unmöglich, irgendwelche Ziele und davon abhängige Zahlungen zu vereinbaren. An deren Stelle müssen Bestimmungen zur Verfügungsgewalt über das Firmenvermögen treten. So verlangt ein Investor, der ein Start-up finanzieren soll, im Allgemeinen den Zugriff auf die Produktionsmittel für den Fall, dass der Entrepreneur in die Klemme gerät.

## Die Privatisierung von Gefängnissen ist ein Irrweg

Eine weniger abenteuerliche Form des unvollständigen Vertrags liegt vor, wenn der Staat die Erledigung öffentlicher Aufgaben an einen privaten Betreiber delegiert und damit wesentliche Verfügungsrechte aufgibt. Hart konnte nachweisen, dass dann für den Betreiber ein übermäßiger Anreiz besteht, die Kosten und zugleich die Qualität der zu erbringenden Leistung zu senken, unter Einhaltung des – unvollständigen – Vertrags. Während bei einem privat geführten Altenheim oder Krankenhaus die Kunden wenigstens begrenzt die Möglichkeit haben, ein anderes zu wählen, ist das bei einem Gefängnis nicht der Fall. Immerhin werden auf Grund schlechter Erfahrungen die privatisierten Gefängnisse in den USA allmählich wieder in Staatsregie überführt.

Häufig kommt die Vertragstheorie zu dem unerwarteten Ergebnis, dass zur Erzielung des optimalen Ergebnisses ein Vertrag ohne jeden Leistungsanreiz (Geld, Karriere, Besitz) angesagt ist. Andere Mittel, den Agenten zu guter Arbeit zu veranlassen, sind aber nicht mehr Bestandteil der Theorie.

Nur in einem Punkt ist Hart über das klassische Bild vom »Homo oeconomicus« hinausgegangen: Nicht nur Materielles ist ein Motiv, sondern auch der Fairnessgedanke (**Spektrum** März 2002, S. 52). In einer gemeinsamen Arbeit mit Ernst Fehr und Christian Zehnder zeigte er, dass Versuchspersonen bereit sind, bei einem unvollständigen Vertrag ein abzulieferndes Produkt zu beschädigen und dafür auch noch draufzuzahlen, wenn sie sich zwar vertragsgemäß, aber unfair behandelt fühlen. Ein Vertrag kann auch dazu dienen, einen Bezugspunkt für die empfundene Fairness zu setzen.

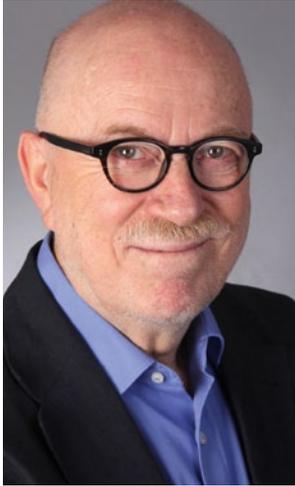
Das Senioritätsprinzip in der Luftfahrtbranche ist übrigens im Bröckeln begriffen. In der Fliegerei muss man viele Ziele zugleich erfüllen und mit Überraschungen rechnen – ein klassischer Fall für einen Vertrag ohne Leistungsanreize. Aber allem Anschein nach halten die Geschäftsführer der Fluglinien es in zunehmendem Maß für profitabel, die Beschäftigten gegeneinander konkurrieren zu lassen. ◀

**Christoph Pöppe** ist Redakteur bei **Spektrum** in Heidelberg.

## QUELLEN

**Fehr, E. et al.:** Contracts as Reference Points – Experimental Evidence. In: *American Economic Review* 1012, S. 493–525, 2011

**Holmström, B.:** Moral Hazard in Teams. In: *Bell Journal of Economics* 13, S. 324–340, 1982



# SPRINGERS EINWÜRFE WER IST WIRKLICH WILLKOMMEN?

**Europa muss einen in seiner Nachkriegsgeschichte noch nie da gewesenen Zustrom von Flüchtlingen bewältigen. Wie werden die Menschen damit fertig?**

**Michael Springer** ist Schriftsteller und Wissenschaftsjournalist. Seit seiner Promotion in theoretischer Physik pendelt er zwischen den »zwei Kulturen«.

» [spektrum.de/artikel/1427404](http://spektrum.de/artikel/1427404)

Die aktuellen Konflikte im Nahen Osten machen Millionen von Menschen heimatlos. Die meisten irren als Binnenflüchtlinge im Land umher oder fallen den wirtschaftsschwachen Nachbarstaaten zur Last. Viele riskieren aber auch die abenteuerliche Flucht über mehrere Landesgrenzen oder das Mittelmeer. So gelangten allein 2015 rund 1,3 Millionen Asylsuchende nach Europa.

In der Regel werden Kriegsflüchtlinge dreifach traumatisiert: durch das Töten und Sterben im Herkunftsland, durch die oft lebensgefährliche Flucht und schließlich durch ihren prekären Status in dem Land, das sie aufnimmt. Dessen Aufgabe besteht daher nicht nur in menschenwürdiger Unterbringung, sondern auch in psychischer Betreuung der Schutzsuchenden, unter denen Psychosen und Depression gehäuft auftreten. Vor allem in Schweden und Deutschland hat man punktuell begonnen, die seelischen Erkrankungen Asylsuchender professionell zu behandeln, doch das reicht noch lange nicht (*Nature* 538, S. 158–160, 2016).

Und was ist mit der Psyche der in den aufnehmenden Ländern lebenden Menschen? Hier zu Lande entwickelte sich zunächst eine spontane Hilfsbereitschaft von überraschendem Ausmaß. Während diese »Willkommenskultur« vielerorts ungebrochen weiter praktiziert wird, häufen sich andererseits fremdenfeindliche, teilweise gewaltsame Proteste, die in der Bewegung Pegida (»Patriotische Europäer gegen die Islamisierung des Abendlandes«) und in der Partei AfD (»Alternative für Deutschland«) Sprachrohre finden. Wie ist dieses widersprüchliche Bild zu erklären? Was geht in den Menschen Europas angesichts der Zuwanderer vor?

Dieser Frage haben die Politologen Kirk Bansak, Jens Haimüller und Dominik Hangartner von der Stanford University in Kalifornien eine aufwändige experimentelle Studie gewidmet. Sie ließen 18000 wahlberechtigte Bürger aus 15 europäischen Ländern online je zehn schriftliche Profile von Asylsuchenden bewerten, die sich in neun Eigenschaften zufällig unterschieden. Die Ergeb-

nisse sind auf den ersten Blick nicht unerwartet, aber im Detail aufschlussreich. Vor allem stellen sie bisherige Vermutungen auf eine solide empirische Basis (*Science* 354, S. 217–222, 2016).

Wie sich herausstellte, hängt die Akzeptanz der Flüchtlinge von ökonomischen, humanitären und religiösen Kriterien ab. Die größte Zustimmung erhielten Asylsuchende, die Chancen auf dem europäischen Arbeitsmarkt besitzen, deren Asylgesuch glaubhaft ist und die keine Muslime sind. Kein Wunder: Ein Flüchtling ohne Berufsausbildung und Sprachkenntnisse wird schwer eine Arbeit finden; ein in sich widersprüchlicher

## Eine gesamteuropäische Flüchtlingspolitik wirkt am besten

Asylantrag stellt den Opferstatus des Flüchtlings in Frage; ein Muslim wirkt in Europa fremder als ein Christ.

Diese Ergebnisse sind erstaunlich unabhängig vom sozialen Status und der Nationalität der Befragten. Demnach spiegelt die offizielle, Flüchtlinge möglichst ausgrenzende Politik von Staaten wie Ungarn oder Polen keineswegs eine besonders ausländerfeindliche Stimmung in deren Bevölkerung wider. Eine gesamteuropäische Flüchtlingspolitik, die Kriegsoffer und Integrationswillige willkommen heißt, entspräche damit der in Europa recht einheitlichen Grundhaltung zum Thema am besten.

Deutlich macht die Studie allerdings auch, dass der Islam weithin als Integrationshindernis gilt. Bei dieser Frage spielte die politische Einstellung der Testteilnehmer eine deutliche Rolle: Ein »Rechter«, also konservativ-autoritär Denkender, lehnte Muslime stärker ab als ein »Linker« mit liberal-egalitären Präferenzen. Daher haben fremdenfeindliche Strömungen, die den Islam als Gefahr für Europa ausgeben, durchaus eine Zukunft – vor allem bei denen, für die Zuwanderer immer Fremde bleiben.

# NEUROBIOLOGIE

# NÄCHTLICHE

# GEHIRNWÄSCHE

**Unser Gehirn beseitigt mit einem bislang unbekanntem Entsorgungssystem schädliche Abfallstoffe – und zwar vor allem während des Schlafs!**



**Maiken Nedergaard** erforscht am Medical Center der University of Rochester und an der Universität Kopenhagen Gliazellen des Gehirns, besonders Astrozyten, die an der Entstehung verschiedener neurologischer Erkrankungen beteiligt sein könnten. **Steven A. Goldman** ist Professor für Neurowissenschaft und Neurologie am Medical Center der University of Rochester und der Universität Kopenhagen.

» [spektrum.de/artikel/1427405](http://spektrum.de/artikel/1427405)

Etwa 1300 Gramm bringt das Gehirn eines durchschnittlichen Erwachsenen auf die Waage, zirka zwei Prozent seines Körpergewichts. Doch seine Zellen verbrauchen bis zu 25 Prozent der gesamten Energie, die unser Körper benötigt. Bei diesem enormen Umsatz fallen große Mengen potenziell giftiger Proteinabfälle und zellulären Schrotts an. Täglich kommen so zirka sieben Gramm biologischer Abfälle zusammen. Das ergibt zweieinhalb Kilo im Jahr – fast die doppelte Masse des Gehirns selbst.

Wie wird das hochkomplexe Organ, das Gedanken produziert und Handlungen steuert, diesen Müll los, der seine vielfältigen Funktionen stören und schließlich ganz zum Erliegen bringen könnte? Bis vor Kurzem war unklar, inwiefern Hirnzellen ihre Abfälle vor Ort recyceln oder zur Entsorgung aus dem Nervensystem ausschleusen. Es liegt allerdings nahe, dass das Gehirn im Lauf der Evolution die Fähigkeit entwickelt hat, Abbauprodukte in Organe zu exportieren, die auf deren Beseitigung spezialisiert sind, etwa die Leber. Dazu würde es jedoch ein effektives Drainagesystem benötigen.

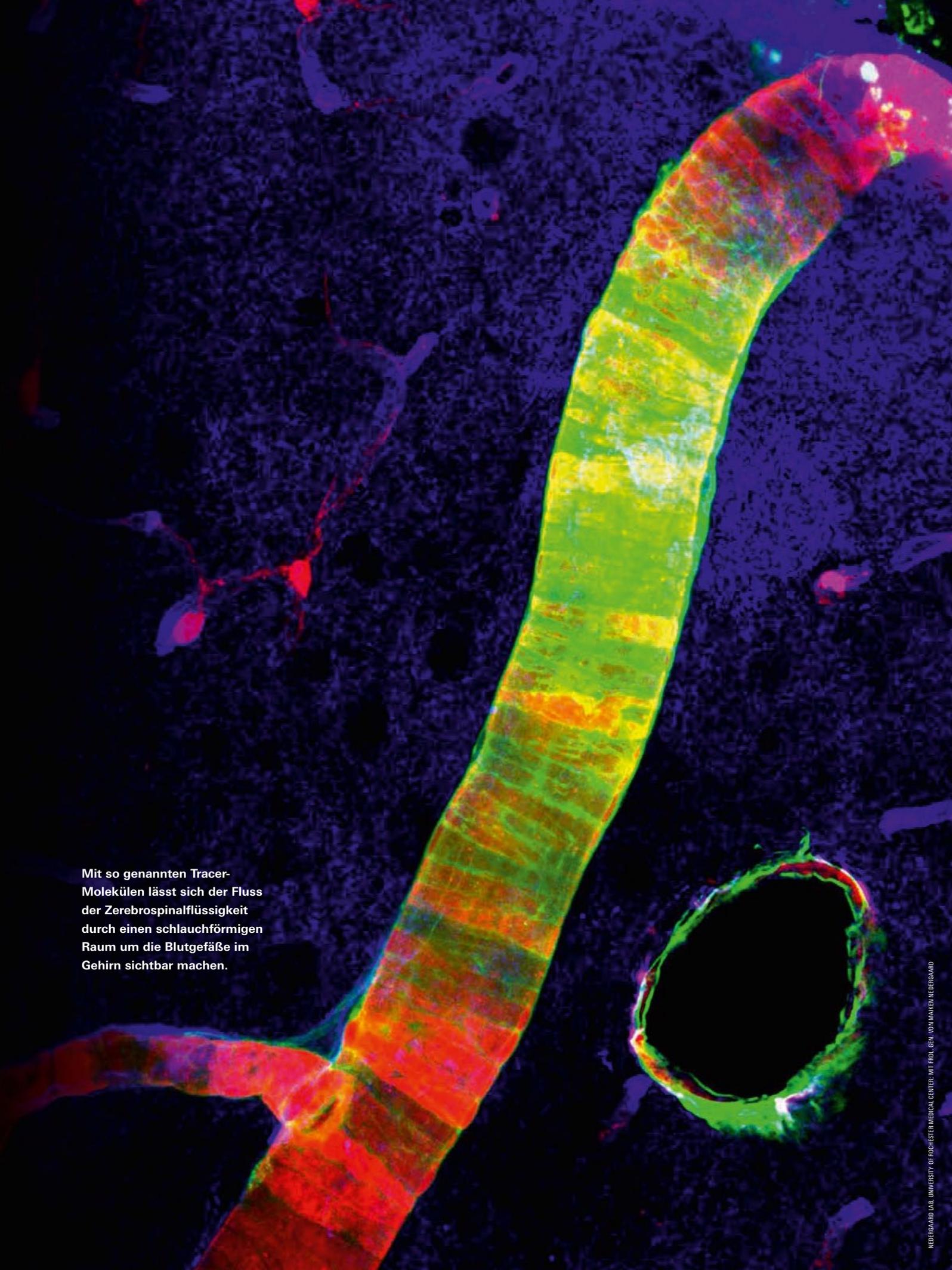
Im Jahr 2011 begannen wir, nach einem solchen zerebralen Abfallentsorgungssystem zu forschen. Uns trieb dabei auch die Frage an, ob sich die typischen kognitiven Störungen bei neurodegenerativen Erkrankungen wie dem Alzheimer- oder Parkinsonsyndrom auf Fehlfunktionen dieses Systems zurückführen lassen. Denn wenn die Entsorgung stockt, dann müssten sich Proteinabfälle in Gehirnzellen oder in den Räumen zwischen ihnen anhäufen. Und genau das ist bei derartigen Erkrankungen besonders häufig zu beobachten. Zudem können diese Ablagerungen die Übertragung elektrischer und chemischer Signale im Gehirn stören und Hirnzellen irreparabel schädigen. An Versuchs-

tieren lassen sich die Symptome altersbedingter neurodegenerativer Störungen nachbilden, indem man die Überproduktion solcher Proteinaggregate forciert.

Im Zuge unserer Untersuchungen entdeckten wir ein bisher unbekanntes Entsorgungssystem im Gehirn. Es beseitigt Proteine und andere Abfälle und verrichtet seine Arbeit vor allem während des Schlafs. Das könnte erklären, warum Schlaf für uns unentbehrlich ist und wir ihm rund ein Drittel unserer Lebenszeit opfern müssen. Wenn wir erst die Arbeitsweise dieses Systems und seine Fehlfunktionen im Detail verstanden haben, könnten sich völlig neuartige Diagnosemethoden und Therapien für verschiedenste Hirnerkrankungen ergeben.

Die meisten Gewebe des Körpers entsorgen Proteinabfälle über die Lymphe, die als eine Art Waschlüssigkeit Gewebsspalten und Zellzwischenräume durchströmt. Zu ihrem Abtransport steht ein weit verzweigtes Gefäßnetz zur Verfügung: das lymphatische System. Feinste Kanäle leiten dabei die Lymphe in zunehmend größere, die schließlich in Blutgefäße münden. Das Schlauchsystem dient auch als Verkehrsweg für Immunabwehrzellen. An strategisch wichtigen Punkten entlang der Bahnen sind Lymphknoten aufgereiht – Stützpunkte für weiße Blutkörperchen, die Infekte bekämpfen. Über 100 Jahre lang herrschte unter Neurowissenschaftlern die Meinung, es gäbe im zentralen Nervensystem kein solches lymphatisches Entsorgungssystem. Stattdessen glaubten sie, das Gehirn beseitige seine Abfälle an Ort und Stelle selbst. Unsere Forschungsergebnisse zeigen nun, dass dies bei Weitem nicht die ganze Wahrheit ist.

Die Blutgefäße des Gehirns sind umhüllt von besonderen, »perivaskulären« Räumen: Kanälen mit ringförmigem Querschnitt. Deren innere Wände entsprechen den äuße-

A fluorescence micrograph showing a long, curved vessel-like structure, likely a blood vessel, with a bright, multi-colored (red, orange, yellow, green) signal along its length, indicating the flow of a tracer molecule. The vessel is set against a dark background with some scattered red and blue spots. In the lower right, there is a circular cross-section of a vessel, also showing a bright, multi-colored signal around its perimeter. The overall image is a high-contrast, multi-color fluorescence micrograph.

Mit so genannten Tracer-Molekülen lässt sich der Fluss der Zerebrospinalflüssigkeit durch einen schlauchförmigen Raum um die Blutgefäße im Gehirn sichtbar machen.

ren Oberflächen der Blutgefäße und bestehen vor allem aus Endothel- und glatten Muskelzellen. Die äußeren Wände der perivaskulären Räume werden dagegen von flächigen Ausstülpungen – »Endfüßchen« – so genannter Astrozyten gebildet (siehe »Neuronale Entsorgungswirtschaft«, rechts).

Diese hoch spezialisierten Zellen sind ausschließlich im zentralen Nervensystem zu finden und unterstützen das Netzwerk aus Neuronen in vielfältiger Hinsicht. Gemeinsam umhüllen die verbreiterten Endfüßchen zahlreicher Astrozyten alle Blutgefäße in Gehirn und Rückenmark: Arterien, Venen und Kapillaren. Die röhrenartigen Räume zwischen Endfüßen und Gefäßwänden sind dabei weitgehend frei von Hindernissen und bilden ein System von Kanälen, das Flüssigkeiten schnell durch das gesamte Gehirn transportieren kann.

Forscher kannten den perivaskulären Raum bereits seit Längerem, doch seine Funktion blieb bis 2012 unklar. Bereits Mitte der 1980er Jahre hat Patricia Grady, damals an der University of Maryland, einen Flüssigkeitsstrom darin beschrieben. Aber die Bedeutung ihrer Entdeckung wurde erst viel später erkannt. Grady berichtete damals, dass große Eiweißmoleküle, die sie in die – das Gehirn und Rückenmark umgebende – Zerebrospinalflüssigkeit von Hunden und Katzen injiziert hatte, in den perivaskulären Raum gelangt waren. Allerdings ließ sich ihre Beobachtung damals weder von anderen Forschern reproduzieren noch gab es eine plausible Erklärung dafür. Daher wurde sie zunächst nicht weiter untersucht.

Als wir uns vor einigen Jahren mit der zerebralen Abfallentsorgung zu beschäftigen begannen, knüpften wir an eine Entdeckung früherer Studien an. Demnach sind die astrozytischen Endfüße von wasserdurchlässigen Poren durchzogen, die aus einem Kanalprotein namens Aquaporin-4 bestehen. Die hohe Dichte dieser Wasserkanälchen faszinierte uns, zumal wir entdeckten, dass die ihnen gegenüberliegenden Endothelzellen der Gefäßwände keine Kanäle in Richtung perivaskulären Raum aufweisen. Daher kann

auch keine Flüssigkeit direkt aus dem Blut in diesen Raum – und damit ins Hirngewebe – fließen. Wir fragten uns also, ob der perivaskuläre Raum eine Art neuronales lymphatisches System darstellen könnte. Dient er vielleicht als Leitungsnetz für die auch Liquor genannte Zerebrospinalflüssigkeit?

### **Der Pulsschlag treibt den Liquor entlang der Blutgefäße durch das Gehirn**

Gemeinsam mit unseren Laborkollegen Jeff Iliff und Rashid Deane gingen wir der Sache auf den Grund. Mit chemischen Farbstoffen färbten wir den Liquor an und beobachteten über spezielle Videomikroskope, die einen tiefen Einblick in das Hirngewebe gewähren, wie der Pulsschlag große Mengen der Flüssigkeit durch den perivaskulären Raum rund um die Arterien pumpt. Über die Astrozyten als Leitungsbahnen gelangte der Liquor ins Hirngewebe und nahm dort Proteinabfälle auf. Der mit Müll beladene Strom verließ dann das Gehirn wieder durch den perivaskulären Raum um Venen in Richtung Hals, mündete in das allgemeine Lymphsystem und von diesem schließlich in den Blutkreislauf. Dort mischte sich das aus dem Gehirn ausgespülte Material unter die übrigen Abfallprodukte aus anderen Organen, die entweder über die Niere entsorgt oder in der Leber abgebaut werden.

Weitere Hinweise auf die wichtige Rolle der Astrozyten für das Drainagesystem des Gehirns lieferten uns Experimente mit gentechnisch veränderten Mäusen, die das Aquaporin-4-Protein nicht bilden können. Deren Astrozyten besitzen also keine Wasserkanälchen. Es stellte sich heraus, dass bei diesen Tieren nur 40 Prozent der normalen Liquormenge in die Astrozyten gelangt, was den Flüssigkeitstransport durch das Hirngewebe deutlich verlangsamt.

Insgesamt war es uns damit gelungen, den kompletten Weg der Spülflüssigkeit durch das Gehirn nachzuverfolgen. Dem neu entdeckten Kanalnetz gaben wir den Namen »glymphatisches System«. Die Wortschöpfung kombiniert die Begriffe »Glia« – jener Typ von Hirnzellen, zu denen auch die Astrozyten zählen – und »lymphatisch«, wegen der dem Lymphsystem ähnelnden Funktion.

In Anbetracht der wichtigen Entsorgungsleistung des glymphatischen Systems drängte sich sofort eine Frage auf: Werden solche Proteine, die sich bei neurodegenerativen Erkrankungen im zentralen Nervensystem anhäufen, bei gesunden Gehirnen zusammen mit anderem alltäglichem Zellabfall herausgespült? Dabei interessierten wir uns besonders für das beta-Amyloid-Protein, das sich bei der Alzheimerkrankheit in den Zellzwischenräumen zu vermutlich toxisch wirkenden Klumpen, so genannten Plaques, zusammenlagert. Die Experten hatten bis dahin angenommen, bei Gesunden würden die Gehirnzellen selbst das beta-Amyloid abbauen oder recyceln.

Wir fanden dagegen heraus, dass beta-Amyloid im gesunden Gehirn über das glymphatische System entsorgt wird. Auch andere Proteine, die mit neurodegenerativen Erkrankungen in Verbindung stehen, wie etwa die Synukleine, die bei Morbus Parkinson, der Lewy-Körper-Demenz und der Multisystematrophie eine Rolle spielen, werden vermutlich über das glymphatische System abtransportiert.

## **AUF EINEN BLICK MÜLLABFUHR IM GEHIRN**

- 1** Täglich entsorgt unser Gehirn etwa sieben Gramm verbrauchte Proteine und ersetzt sie durch neu produzierte. Die jährlich ausgeschwemmte Menge entspricht etwa dem Doppelten seines Eigengewichts.
- 2** Das Gehirn verfügt nicht über Lymphgefäße wie der übrige Körper. Jetzt entdeckten Forscher ein ähnliches Kanalsystem, das Abfallstoffe vorwiegend während des Schlafs aus den Hirnzellen auswäscht.
- 3** Das »glymphatische System« bietet sich an als Angriffspunkt zur Behandlung von Alzheimer oder Parkinson, bei denen schädliche Proteine nicht ausreichend entsorgt werden und sich daher im Gehirn anhäufen.



## Neuronale Entsorgungswirtschaft

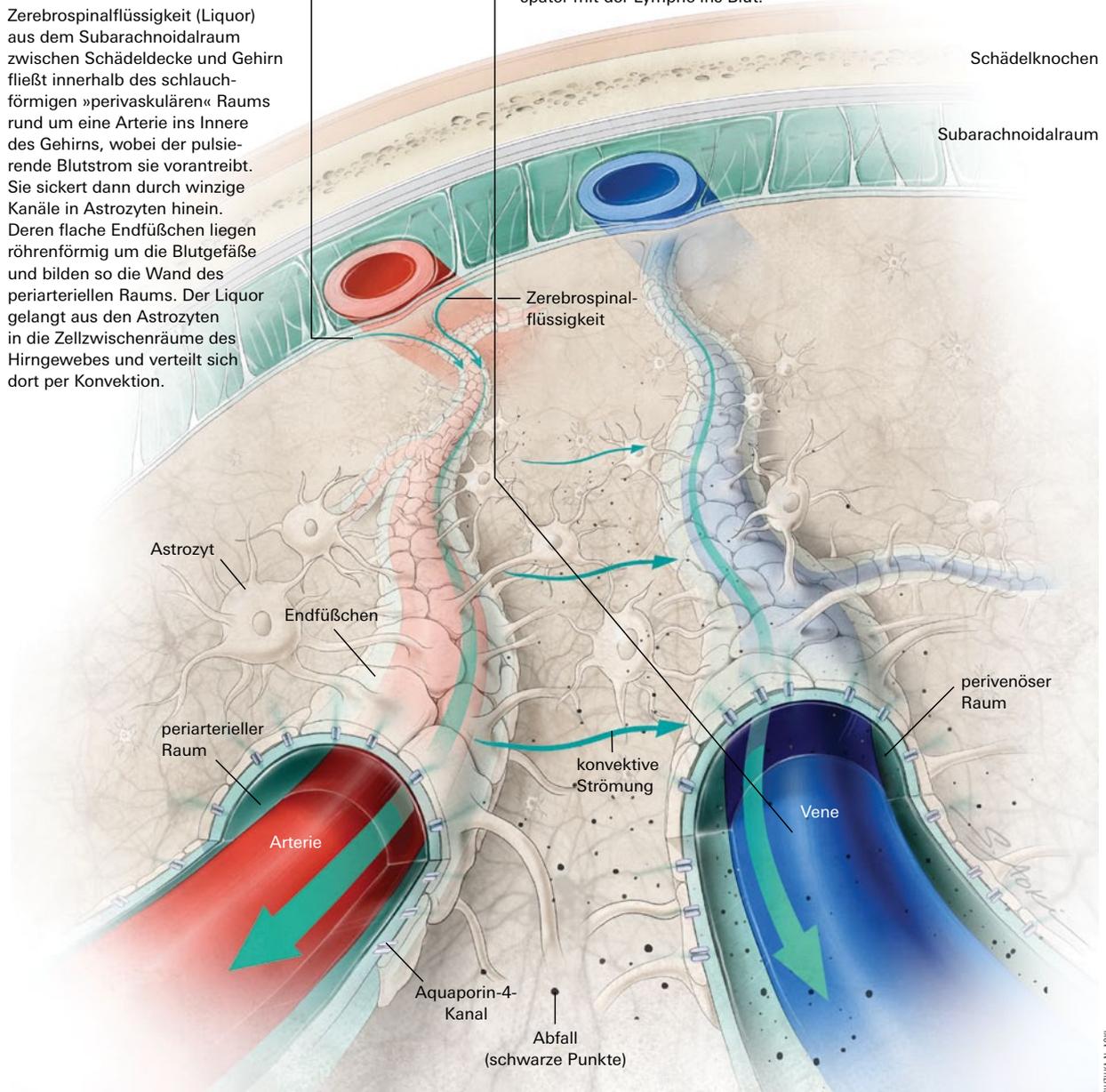
Ein flüssigkeitsgefülltes Kanalnetz – das glymphatische System – durchzieht das Gehirn und transportiert aussortierte Proteine und andere potenziell gefährliche Abfallprodukte ab. Dazu zählen auch die beta-Amyloid-Peptide, die bei der Alzheimerdemenz massenhaft Klumpen (Plaques) bilden. Solchen zellulären Müll entsorgt das Drainagesystem vor allem im Schlaf.

### Flüssigkeitszustrom

Zerebrospinalflüssigkeit (Liquor) aus dem Subarachnoidalraum zwischen Schädeldecke und Gehirn fließt innerhalb des schlauchförmigen »perivaskulären« Raums rund um eine Arterie ins Innere des Gehirns, wobei der pulsierende Blutstrom sie vorantreibt. Sie sickert dann durch winzige Kanäle in Astrozyten hinein. Deren flache Endfüßchen liegen röhrenförmig um die Blutgefäße und bilden so die Wand des periarteriellen Raums. Der Liquor gelangt aus den Astrozyten in die Zellzwischenräume des Hirngewebes und verteilt sich dort per Konvektion.

### Abtransport von Abfall

Nachdem der Liquor Abfallstoffe aus dem Hirngewebe aufgenommen hat, tritt er in den perivenösen Raum entlang eines Venengeflechts über, das Blut aus dem Gehirn zum Herz zurückbefördert. Dabei folgt er zunehmend größeren Venen, die im weiteren Verlauf den Hals erreichen (kleines Bild oben links). Das entsorgte Material geht hier zunächst in den Flüssigkeitsstrom des lymphatischen Systems über und gelangt später mit der Lymphe ins Blut.



Arbeitet dieses nicht ordnungsgemäß, können sie sich im Gehirn anhäufen.

In diesem Zusammenhang fiel uns auf, dass viele Alzheimerpatienten unter Schlafstörungen leiden – und zwar schon lange bevor sich die Demenz klar manifestiert. Ganz allgemein nimmt die Schlafqualität im Lauf des Lebens ab: Je älter der Mensch wird, desto flacher und kürzer schläft er und umso häufiger wacht er auf. Mehrere epidemiologische Studien haben aber nachgewiesen, dass Schlafstörungen im mittleren Lebensalter mit einem erhöhten Risiko einhergehen, 25 Jahre später unter kognitiven Beeinträchtigungen zu leiden.



FOTOLIA / GIORANO AITA

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema Hirnforschung finden Sie unter [spektrum.de/t/hirnforschung](http://spektrum.de/t/hirnforschung)

Auch gesunde Personen, die gezwungen werden wach zu bleiben, zeigen Symptome, die typisch für neurologische und psychiatrische Erkrankungen sind: Konzentrationschwäche, Gedächtnisstörungen, Erschöpfung, Reizbarkeit und Stimmungsschwankungen. Extremer Schlafmangel kann zu Verwirrtheit und Halluzinationen führen, epileptische Anfälle hervorrufen und letztlich sogar tödlich sein. Hindert man Versuchstiere mehrere Tage lang am Schlafen, sterben sie – und Menschen sind da nicht unbedingt widerstandsfähiger. Bei der »tödlichen familiären Insomnie«, einer Erbkrankheit, bei der die Betroffenen immer weniger schlafen können, sterben die Patienten meist innerhalb von 18 Monaten nach der Diagnose.

Vor diesem Hintergrund spekulierten wir, dass Schlafstörungen bei Demenzkranken nicht nur ein Symptom sind, sondern ursächlich zum Krankheitsgeschehen beitragen. Denn wir hatten den schnellen Flüssigkeitsstrom des glymphatischen Systems an narkotisierten Mäusen entdeckt. Möglicherweise geht der Mülltransport aber im Wachzustand deutlich langsamer vonstatten, da sich das Gehirn dann dringenderen Aufgaben widmen muss. Sollte das glymphatische System demnach beta-Amyloid eher während des Schlafens abbauen, würde Schlaflosigkeit den Krankheitsverlauf beschleunigen.

Zum Überprüfen dieser Hypothese trainierten unsere Mitarbeiter Lulu Xie und Hongyi Kang Mäuse darauf, ohne Beruhigungsmittel unter dem Mikroskop still zu sitzen. Dann zeichneten sie währenddessen mittels Zwei-Photonen-Mikroskopie den Fluss der Zerebrospinalflüssigkeit anhand eines hinzugegebenen chemischen »Tracers« auf. Wir verglichen, wie schnell der Tracer bei wachen und bei schlafenden Mäusen das glymphatische System passierte. Da diese Bildgebung die Tiere nicht beeinträchtigte, blieben sie unter dem Mikroskop ruhig und verhielten sich koopera-

tiv – manchmal so sehr, dass sie während der Untersuchung einschliefen. Dadurch konnten wir an ein und demselben Individuum beobachten, wie der Liquor eine bestimmte Hirnregion im Wachzustand und im Schlaf durchströmte.

Es zeigte sich, dass der Liquor im glymphatischen System bei wachen Mäusen dramatisch abnahm. Aber bereits Minuten nach dem Einschlafen oder dem Wirkeintritt einer Narkose begann die Flüssigkeit wieder deutlich stärker einzuströmen. Gemeinsam mit Charles Nicholson von der New York University fanden wir heraus: Wenn Mäuse einschlafen, nimmt der so genannte interstitielle Raum ihres Gehirns, also das Volumen zwischen den Hirnzellen, in dem sich der glymphatische Flüssigkeitsstrom auf seinem Weg zum perivaskulären Raum um die Venen verteilt, um mehr als 60 Prozent zu. Vermutlich schwillt deshalb der glymphatische Fluss im Schlaf an. Denn bei einem größeren Zwischenzellraum erweitert sich auch der für den Flüssigkeitsdurchstrom verfügbare Querschnitt.

Wie wir entdeckten, reguliert der Neurotransmitter Noradrenalin das Volumen des interstitiellen Raums und damit den glymphatischen Fluss. Seine Konzentration im Gehirn stieg bei einer wachen Maus an und fiel während des Schlafs ab. Dieser vorübergehende Noradrenalinmangel dürfte daher dann den Flüssigkeitsstrom erhöhen.

## Die neuronale Müllabfuhr arbeitet während des Schlafs doppelt so effektiv wie im Wachzustand

Kann Schlafmangel also tatsächlich neurodegenerative Krankheiten fördern? Dafür sprechen unsere Experimente an Mäusen, laut denen das glymphatische System beta-Amyloid während des Schlafs doppelt so effektiv entfernt wie im Wachzustand. Und Mäuse, denen auf Grund einer gentechnischen Veränderung die Aquaporin-4-Kanäle in den Astrozyten fehlen, entsorgen 40 Prozent weniger beta-Amyloid im Vergleich zu normalen Tieren.

Diese Ergebnisse widersprechen der weit verbreiteten Annahme, Hirnzellen würden ihren Abfall komplett selbst abbauen, etwa mittels Ubiquitinierung und Autophagie (siehe auch »Forschung aktuell«, S. 25). Offenbar schwemmt das schlafende Gehirn eine große Menge unerwünschter Proteine einschließlich des beta-Amyloids einfach über das glymphatische System aus und überlässt den eigentlichen Abbau anderen Organen.

Die Arbeiten von David M. Holtzmanns Forschungsgruppe an der Washington University in St. Louis stützen unsere Hypothese. Sein Team zeigte, dass die beta-Amyloid-Konzentration im interstitiellen Raum bei wachen Mäusen höher liegt als bei schlafenden. Und bei speziell gentechnisch veränderten Tieren, die grundsätzlich verstärkt Amyloidplaques bilden, verschärfte sich deren Akkumulation unter Schlafentzug zusätzlich.

Bislang dominiert die Grundlagenforschung zum glymphatischen System. Doch jetzt sind Pharmaunternehmen gefordert, aus den neuen Erkenntnissen innovative Therapien zur Demenzbehandlung zu entwickeln. Ein offensichtlicher Ansatzpunkt wäre, dieses Transportsystem zu stimulieren. So könnte ein Medikament, das die Drainagerate erhöht, indem es beispielsweise den Liquorfluss im Schlaf verstärkt, das Amyloidprotein buchstäblich aus dem Gehirn spülen.

Beobachtungen bei einer anderen, gut erforschten neurologischen Erkrankung deuten darauf hin, dass dieser Behandlungsansatz funktionieren könnte. Der so genannte Normaldruck-Hydrozephalus ist eine vor allem bei Älteren auftretende Krankheit, bei der sich übermäßige Mengen Liquor in den Hirnventrikeln ansammeln. Lässt der Arzt über eine im Bereich der Lendenwirbelsäule eingestochene Kanüle Flüssigkeit aus dem Liquorraum ab (»Lumbalpunktion«), verbessern sich die kognitiven Fähigkeiten der Betroffenen häufig eindrucksvoll. Die genaue Ursache dafür war aber lange unklar. Wir vermuten nun, dass bei diesen Patienten der stockende glymphatische Fluss wieder in Gang kommt und über den effizienteren Abtransport störender Abfallstoffe die Hirnleistung steigert.

Die Erkenntnisse über das glymphatische System könnten auch beim Diagnostizieren der Alzheimerkrankheit und anderer Demenzformen helfen. Helene Benveniste von der Stony Brook School of Medicine demonstrierte kürzlich, dass sich die Aktivität des glymphatischen Systems mittels konventioneller Kernspintomografie beobachten und messen lässt. Auf diese Weise könnte man versuchen, den Verlauf von Alzheimer und verwandten Demenzerkrankungen oder auch eines Normaldruck-Hydrozephalus vorherzusagen. Möglicherweise lässt sich damit sogar eine Prognose darüber stellen, wie gut sich Patienten nach Schädel-Hirn-Verletzungen wieder erholen.

Bei unseren bisherigen Untersuchungen haben wir uns überwiegend auf die Entsorgung von Abfallstoffen aus dem

Gehirn konzentriert. Darüber hinaus könnte die künftige Erforschung des glymphatischen Systems wesentliche Erkenntnisse zur grundsätzlichen Funktionsweise des Gehirns liefern. Denn vermutlich haben diese Flüssigkeitsströme weitere wichtige Aufgaben, etwa das Hirngewebe mit Nährstoffen und anderen wichtigen Substanzen zu beliefern. Eine neue Studie zeigt zum Beispiel, dass über die glymphatischen Kanäle Glukose als Energielieferant zu den Neuronen gelangt.

Andere Forscher untersuchen derzeit, ob das glymphatische System auch die isolierende Myelinschicht um die signalleitenden Axonfortsätze der Neurone mit Nährstoffen sowie dem nötigen Material versorgt, damit die Struktur der Zellen erhalten bleibt. In den nächsten Jahren dürften jedenfalls noch einige überraschende Aufgaben dieses Systems bei der alltäglichen – und vor allem der allnächtlichen – Arbeit des menschlichen Gehirns ans Licht kommen. ◀

#### QUELLEN

**Jessen, N.A. et al.:** The Glymphatic System: A Beginner's Guide. In: Neurochemical Research 40, S. 2583–2599, 2015

**O'Donnell, J. et al.:** Distinct Functional States of Astrocytes during Sleep and Wakefulness: Is Norepinephrine the Master Regulator? In: Current Sleep Medicine Reports 1, S. 1–8, 2015

**Simon, M.J., Iliff, J.J.:** Regulation of Cerebrospinal Fluid (CSF) Flow in Neurodegenerative, Neurovascular and Neuroinflammatory Disease. In: Biochimica et Biophysica Acta 1862, S. 442–451, 2016

# Unsere Neuerscheinungen!



Umweltpsychologie: Die Welt und wir • Sportpsychologie: Schneller, höher, weiter! • Rechtspsychologie: Verbrechen unter der Lupe • Kulturpsychologie: Macht der Gemeinschaft • € 8,90



Genregulation: Das interaktive Buch des Lebens • Kognition: Gibt es ein Gen für Intelligenz? • Wovon unsere Lebenszufriedenheit abhängt • Neuropsychologie: Der Schalter für Sucht • Gene und Persönlichkeit • € 8,90



Tyrannosaurier • Archaeopteryx & Co. • Mammuts • Zeitgenossen der Dinosaurier • Als die Federn fliegen lernten • Aufstieg der Säugetiere • Evolution im Zeitraffer • Das flexible Genom der Buntbarsche • € 8,90

Ausgewählte Sonderhefte auch im PDF-Format

## Hier bestellen:

service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743

[www.spektrum.de/neuerscheinungen](http://www.spektrum.de/neuerscheinungen)

# 1916



Der Mundfederhalter.

SCIENTIFIC AMERICAN 1916, S. 533

## SCHREIBPROTHESE FÜR INVALIDEN

»Um Leute, die ihre Hände und Arme oder deren normale Gebrauchsfähigkeit verloren haben, in den Stand zu setzen, sich schriftlich zu betätigen, ist von deutschen Ärzten eine Einrichtung geschaffen worden, die mit dem Munde das regelrechte

Schreiben gestattet. Das Mundstück muß vom Zahnarzt den Zahnverhältnissen des Patienten angepaßt werden. Der Mund kann geöffnet werden, ohne daß der Federhalter herausfällt, er wird durch die unteren Zähne gehalten. Es bedarf geduldiger Übungen, aber die Mundschrift kann ebenso leserlich und flott werden wie die Handschrift.« *Prometheus 1418, S. 207*

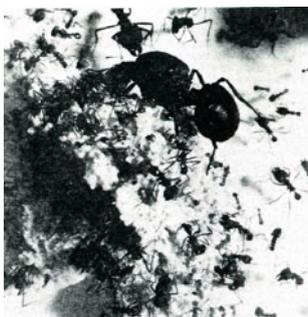
## DIE FISCHFANGLICHTPUMPE

»Auf der letzten Naturforscherversammlung in Wien wurde die erstaunliche Anziehung gewisser Lichtstrahlen auf Fische vorgeführt. Darauf ließe sich eine sehr einfache Art des Fischfanges begründen: man leitet weit hinaus ins Wasser ein Pumprohr, das in einen großen spiegelnden Trichter ausmündet, und wirft aus diesem die Attraktionsstrahlen ins Wasser: kommen dann die Fische in diesen Lichtkegel hineingeschwommen, so können sie durch ein Pumpwerk ohne weiteres aufs Land bzw. in die Fischhalle gesogen werden.« *Die Umschau 50, S. 995*

## POSTBOTE AUF TAUCHSTATION

»Die ungeheuren Schwierigkeiten, sich einen Weg durch die Eismassen des Polarmeeres zu bahnen, führten den Schiffsbautechniker Simon Lake dazu, die Benutzung eines Unterseebootes vorzuschlagen. Ein U-Boot könnte mit vollkommener Sicherheit unter dem Eise fahren; die umgebende Temperatur wäre immer diejenige des Meerwassers. Das Boot könnte 280 km fahren, ohne an die Oberfläche zu kommen. Die kanadische Regierung prüft die Frage der Verwendung des U-Bootes für den Postdienst im Hafen von Vancouver.« *Die Umschau 52, S. 1035*

# 1966



Königin einer jungen Kolonie von *Atta sexdens* auf ihrem Pilzgarten.

## PILZBAUERN AUF SECHS BEINEN

»Unter den pilzzüchtenden Insekten sind die Ameisen einmalig. Das Zentrum der Aktivität bildet der Pilzgarten, wo sich die Königin und die Brutstätte befinden. Die Blätter oder Blüten werden in ein bis zwei Millimeter große Stückchen zerschnitten und unter Beimischung von Speichel

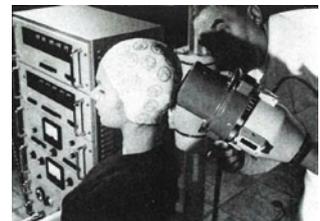
zu einer weichen Masse geformt. Anale Ausscheidungen werden hinzugefügt und die Klümpchen im Garten deponiert. Die Ameisen greifen dann von dem benachbarten Pilzmycel etwas auf und verteilen es auf der Oberfläche. Durch die Kombination von Speichel, analen Sekreten und ständiger Pflege, wird trotz der ständigen Kontaminationsgefahr das Wachstum eines spezifischen Pilzes ermöglicht.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 12, S. 509*

## MEHR LICHT FÜR ALLE

»Sowjetische Ingenieure untersuchen gegenwärtig die Möglichkeiten, einen Riesenbeleuchtungskörper in etwa 200 Meter Höhe so aufzuhängen, dass eine ganze Stadt nachts wie von einer künstlichen Sonne erhellt werden kann. Versuche wurden bereits mit einer Riesenlampe ausgeführt, die von Fesselballons getragen wurde. Von einer solchen eine ganze Stadt gleichmässig erfassenden Beleuchtung verspricht man sich einen Rückgang der nächtlichen Unfälle.« *Neuheiten und Erfindungen 365, S. 227*

## TUMORDIAGNOSTIK MIT ISOTOPEN

»Mit dem Meßplatz lassen sich nach Einbringen kleiner Dosen radioaktiver Isotopen in den Körper des Patienten Tumore im Gehirn feststellen. Dazu stülpt man dem Kranken eine Kappe über den Kopf, auf der die Stellen aufgezeichnet sind, an denen ungefähr der Tumor vermutet wird. Zum Messen richtet man dann auf diese Stelle einen Strahlungsdetektor, der an das Strahlungsmeßgerät angeschlossen ist.« *Elektronik 12, S. E183-E184*



Die Vorrichtung zum Aufspüren von Tumoren ohne Operation.



SIMON KUHM & SUSANNE SCHULE (WWW.FLORIAN-FREISTETTER.DE/FFR.html) / CC BY-SA 3.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/SAS3.0/LEGALCODE)

# FREISTETTERS FORMELWELT DIE SUCHE NACH DER WELTFORMEL

**Früher oder später wird man vermutlich eine wissenschaftliche Beschreibung des Universums finden, die man zu Recht als »Theorie von Allem« bezeichnen kann.**

**Florian Freistetter** ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«.  
» [spektrum.de/artikel/1427415](http://spektrum.de/artikel/1427415)

**W**er an einer physikalischen oder astronomischen Forschungseinrichtung gearbeitet hat, bekam wohl schon einmal Post von Leuten, welche die »Weltformel« gefunden haben wollen. Dabei ist allerdings schnell klar, dass es sich nicht um ernsthafte Wissenschaft handelt. Ob es so etwas wie eine Weltformel gibt und wie sie aussehen könnte, weiß niemand. Aber es handelt sich mit Sicherheit nicht um eine einfache einzelne Formel!

Der Begriff Weltformel steht für eine hypothetische Theorie, mit der sich alle Phänomene im Universum beschreiben lassen. Etwas treffender ist daher die Bezeichnung »Theory of Everything«, also »Theorie von Allem«. Und natürlich geht es nicht darum, eine wissenschaftliche Theorie zu entdecken, mit der sich wirklich jedes Detail erklären lässt. Sollte jemals eine solche Weltformel gefunden werden, wird man damit weder die Lottozahlen vorhersagen können noch das Ergebnis der nächsten Bundestagswahl. Sie wird nicht in der Lage sein zu begründen, warum zwei Menschen sich ineinander verlieben oder Schokolade so gut schmeckt. Doch auf einer sehr fundamentalen Ebene wird sie die Eigenschaften aller Bausteine der Materie sowie derjenigen Kräfte beschreiben, die zwischen ihnen wirken können.

Momentan existiert eine Theorie, die fast all das kann, aber einiges eben auch nicht. Diese »Weltformel« sieht so aus:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + h.c. \\ & + \chi_i y_{ij} \chi_j \phi + h.c. \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi) \end{aligned}$$

CERN

Sie fasst das so genannte Standardmodell der Teilchenphysik zusammen, und zwar in enorm kompakter Form. Wollte man sämtliche dieser Theorie zu Grunde liegenden Gleichungen komplett ausschreiben, bräuchte man dafür mindestens ein paar Seiten. Die einzelnen Symbole in der Formel im Detail zu erklären, würde weit über den Rahmen dieser Kolumne hinausführen – jedoch enthält sie tatsächlich eine Beschreibung der derzeit bekannten Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen. Der Term auf der linken Seite ist übrigens die Lagrange-Dichte, die mit der Lagrange-Funktion (siehe letzte Ausgabe) zusammenhängt.

Das Standardmodell berücksichtigt drei der fundamentalen Kräfte im Universum: die schwache und die starke Kernkraft sowie den Elektromagnetismus. Außen vor bleibt allerdings die Gravitationskraft. Und so gut wie alle Physikerinnen und Physiker gehen davon aus, dass es neben den im Standardmodell vorkommenden Elementarteilchen noch weitere, bisher unbekannte Partikel geben muss, die zum Beispiel mit der so genannten Dunklen Materie zusammenhängen.

Früher oder später wird man vermutlich eine wissenschaftliche Beschreibung des Universums finden, die man zu Recht als Weltformel bezeichnen kann. Dabei wird es sich wahrscheinlich um ein sehr umfangreiches und komplexes mathematisches Konstrukt handeln, das ohne Vorwissen kaum zu verstehen ist. Selbst das dürfte engagierte Laien jedoch nicht davon abhalten, die Entdeckung genau solcher »Weltformeln« zu verkünden.

Mein Favorit unter den mir zugesandten Varianten lautet übrigens  $s = t \cdot c$  und soll so viel bedeuten wie »Raum ist Zeit mal Lichtgeschwindigkeit«. Das klingt verlockend einfach und beeindruckend, ist aber leider auch komplett nichtssagend und unbrauchbar als wissenschaftliches Modell für irgendetwas. Obwohl man sich ja manchmal schon wünschen könnte, dass das Universum es uns nicht immer ganz so schwer macht und seine Geheimnisse in einer simplen Formel wie dieser offenlegt ...



Jeder Tiger hat ein individuelles Streifenmuster. Auf Bildern von Fotofallen lassen sich die Individuen identifizieren und zählen. Statistische Methoden erlauben dann Rückschlüsse auf die Gesamtzahl.

# NATURSCHUTZ

## WIE VIELE TIGER GIBT ES NOCH?

**Aufnahmen mit Fotofallen und aufwändige statistische Berechnungen zeigen: Oft wird die Anzahl der letzten Tiger zu hoch geschätzt, selbst von Naturschutzorganisationen wie dem WWF. Die neuesten Daten aus indischen Schutzgebieten weisen aber auch Wege auf, wie sich die Populationen wieder erholen könnten.**



**K. Ullas Karanth** ist Wissenschaftler bei der Wildlife Conservation Society, einer weltweit operierenden US-Stiftung mit Hauptsitz in New York. Seit mehr als 30 Jahren forscht der indische Ingenieur und Naturschutzbiologe über Tiger in der Wildnis und ihre letzten Bestände. Er engagiert sich mit Vorträgen, Schriften und Büchern für die erfolgreichsten Schutzmaßnahmen.

► [spektrum.de/artikel/1427413](http://spektrum.de/artikel/1427413)

► Als Schuljunge in Südwestindien faszinierten mich die vielen Rituale unserer Hindukultur, die sich um Tiger ranken. Im Herbst zum Beispiel inszenierte das Dasara-Fest den Sieg des Guten über das Böse: Ocker, weiß und schwarz bemalte, muskulöse Huli-Vesha-Männer tanzten die graziösen Bewegungen der großen Raubkatzen zu immer schnellerer Trommelmusik – ein berauschendes Erlebnis.

Zu unserer Alltagserfahrung passten solche Szenen damals schon längst nicht mehr. Denn Viehhalter wie Freizeitjäger erlegten die zunehmend selteneren wilden Tiger, und Holzfäller holten unermüdlich wertvolle Bäume aus den Wäldern. Als Teenager begrub ich in den frühen 1960er Jahren meinen Traum, wenigstens einmal einen Tiger in freier Wildbahn zu sehen.

Doch einige Jahre später geschah ein Wunder. Die damalige Premierministerin Indira Gandhi (1917–1984) reagierte auf Proteste von Umweltaktivisten mit strengen Naturschutzgesetzen und der Einrichtung mehrerer Schutzgebiete. Weltweit wuchs in den nächsten Jahrzehnten das Interesse daran, wenigstens die letzten Tigerbestände zu erhalten. Viele der betroffenen asiatischen Staaten verboten die Jagd auf die Großkatzen. Und sie bemühten sich, das Bedürfnis der Menschen nach Land und das von *Panthera tigris* nach großen Waldgebieten in Einklang zu bringen.

Indien meisterte diese Aufgabe besser als die anderen Nationen Asiens. Obwohl es nur 20 Prozent der gesamten Flächen aufweist, auf denen Tiger heute noch leben, beherbergt es 70 Prozent ihres Restbestands – bei 1,2 Milliarden Menschen, angesichts der noch immer großen Armut und der wachsenden Industrie eine beachtliche Leistung.

Leider sind die Tigerbestände trotz der Naturschutzinitiativen überall weiterhin drastisch geschrumpft. Noch im frühen 19. Jahrhundert kam die Art in 30 asiatischen Staaten vor: am Kaspischen Meer in Schilfdickichten wie in Russland in Nadelwäldern, in Indiens Dschungeln wie in Indonesiens Regenwäldern. Seitdem ist ihr einst riesiges Verbreitungsgebiet um 93 Prozent zurückgegangen, und wilde Tiger gibt es lediglich noch in einer Hand voll Ländern. Und wiederum nur ein kleiner Teil der Restpopulationen hat noch eine realistische Chance, sich langfristig wieder zu erholen. Diese Hoffnungsträger besiedeln zusammen weni-

### AUF EINEN BLICK KORREKTE BESTANDSAUFNAHME

- 1** Tiger besiedeln heute nur noch sieben Prozent ihres früheren Verbreitungsgebiets. Günstigenfalls etwa 40 bis 50 Populationen haben eine Zukunft.
- 2** Oft werden die Bestände mit ungenauen, veralteten Methoden bestimmt. Falsche Zahlen können aber effektive Schutzmaßnahmen verhindern.
- 3** Neue Forschungsansätze erlauben eine fundierte Analyse zum Rückgang der Tiger. Sie zeigen zugleich Möglichkeiten zu einem wirksamen Schutz, etwa den Erhalt von ausreichend Beutetieren.

ger als ein halbes Prozent des früheren Lebensraums der herrlichen Raubkatzen.

Das bedeutet: Vielleicht 40 bis 50 Bestände sind überhaupt noch so groß, dass sie den Fortbestand der Art gewährleisten könnten. Nur solche so genannten Quellen- oder Überschusspopulationen (source populations) hätten vielleicht auch das Potenzial, dass sich die Art wieder ausbreitet. Doch sogar sie sind labil – weil die meisten von ihnen von anderen Tigergruppen abgeschnitten sind und ihre Gebiete überdies in von Menschen genutztem Land liegen. Ohne engmaschige Überwachung und kompetente Begleitung der Bestandsentwicklung können selbst diese letzten größeren Vorkommen kaum überleben.

Das dazu erforderliche Monitoring haben die langjährigen Schutzanstrengungen jedoch in den seltensten Fällen zu Wege gebracht. Infolgedessen ist unsere Kenntnis vom Befinden der noch übrigen Tigerbestände mangelhaft. Die herkömmlichen Beobachtungsmethoden liefern nicht einmal halbwegs zuverlässige Schätzwerte zur gegenwärtigen Individuenzahl. Bestenfalls erfasst man damit, wo Tiger prinzipiell noch vorkommen. In den Medien verbreitete Angaben – wie im Frühjahr 2016 die Meldung, dass die Bestände sich in den letzten Jahren etwas erholt hätten und es wieder fast 4000 Tiger gäbe – entbehren somit oft der wissenschaftlichen Grundlage.

#### **Hauptaugenmerk auf gesunde Populationen richten**

Mit dem Problem solcher Bestandserhebungen befassen meine Kollegen und ich uns seit Jahrzehnten. In letzter Zeit sind wir damit gut vorangekommen. Wir haben gelernt, dass man für zuverlässige Ergebnisse mehrere Verfahren kombinieren muss: Für viele Studien setzen wir Fotofallen ein und werten die Bilder mit einem Computerprogramm aus, das die einzelnen Tiere an ihrem Streifenmuster identifiziert. Die Populationsgröße erschließen wir dann mit Hilfe einer speziellen Statistik, die unter anderem die Anzahl von Aufnahmen derselben Individuen sowie ihre räumlichen Bewegungsmuster bewertet. So gewannen wir für mehrere indische Populationen wesentlich genauere – und teils ganz andere – Zahlen als bisher vorhanden. Eine große Herausforderung ist es nun allerdings, Naturschutzbehörden in Indien und anderswo davon zu überzeugen, unsere verbesserten Methoden der Tigerzählung auf weitere Quellenpopulationen anzuwenden, die meines Erachtens im Zentrum von Schutzmaßnahmen stehen sollten.

Bestandserhebungen von Tigern sind schon deswegen so schwierig, weil diese Raubkatzen sehr scheu sind und außerdem riesige Gebiete durchstreifen. Hinzu kommt das enorm große Verbreitungsgebiet der Art. Deswegen haben Zählversuche in den ersten Jahrzehnten nicht viel gebracht. Zunächst gingen Indien, Nepal, Bangladesch und Russland in den 1960er Jahren damit an, individuelle Trittspuren zu erfassen. Sofern man die Abdrücke überhaupt findet, lassen sie sich jedoch mitunter schwer einem bestimmten Tier zuordnen. Dadurch kamen in Indien eine Menge falscher Daten zu Pfotenabdrücken zusammen, die zu dem Fehlschluss führten, dass sich die Tigerbestände erholten, obwohl das Gegenteil zutraf. Natürlich freuten sich dort alle Beteiligten über den vermeintlichen Erfolg der Schutzmaßnahmen.



MIT FRIEDRICH VON KALININ VARMAN

**In einem Wald in Indien richtet der Autor eine Fotofalle ein. Die Kamera löst aus, wenn ein Tier in die Lichtschranke läuft.**

Erfreulicherweise entwickelten Ökologen, Feldforscher, Statistiker und Informatiker bald wesentlich zuverlässigere Erhebungs- und Schätzverfahren. Damit machte ich mich in den 1980er Jahren als Doktorand an der University of Florida in Gainesville vertraut, denn ich wollte unbedingt mehr über das Leben von Tigern, ihr Verhalten in der Wildnis und ihre gegenwärtige Verfassung herausfinden. Ganz besonders interessierte mich dabei der Nationalpark Nagarhole, eines der Reservate in der Region Malenad in meiner südwestindischen Heimat. Der dortige Tigerbestand hatte sich durch Indira Gandhis Schutzvorschriften erholt. 1990 bekam ich die Gelegenheit, in Zusammenarbeit mit der Wildlife Conservation Society der USA in Indien erstmals einige Tiger mit Sendern auszustatten und sie telemetrisch zu beobachten.

Deutlich erinnere ich mich an den kühlen Morgen des 29. Januar. Mit einem Betäubungsgewehr wartete ich fünf Meter hoch in einem Randia-Baum auf einen 220 Kilogramm schweren Tiger, den meine Mitarbeiter durch einen Engpass aus Tüchern auf mich zutreiben wollten. Da glitzerte im dichten Buschwerk 50 Meter entfernt im Sonnenlicht ein goldener Fleck. Ruhig kam die Katze auf mich zu. Zuerst tauchte eine Schulter in meinem Fadenkreuz auf, dann die Flanke. Ich drückte ab, und der rote Betäubungspfeil traf den Oberschenkel. Der Tiger knurrte nur etwas. Wenig später fanden wir ihn reglos unter einem schattigen Baum und legten ihm ein Halsband mit einem faustgroßen Sender um. Dessen Signale wollte ich mit einer tragbaren Antenne auffangen, so dass ich das Tier, ab jetzt T-04 genannt, jederzeit würde lokalisieren können. Einige Stunden nach dem Betäubungsschuss wanderte T-04 in dem knapp 650 Quadratkilometer großen Reservat wieder davon. Das war der vierte Tiger, den wir mit einem Halsbandsender ausstatteten.

Dank dieser technischen Hilfe erfuhr ich in den nächsten sechs Jahren eine Menge über die Tiere und ihr Verhalten. Weil ich sie weniger lange suchen musste, hatte ich viel mehr Zeit dafür, sie zu beobachten. Aus Naturschutzsicht noch wichtiger waren allerdings die Erkenntnisse zu ihren Raumannsprüchen. Da erwachsene Tiger Einzelgänger sind und sich territorial verhalten, gehen sie sich abgesehen von



MIT FRIHL. GEN. VON K. JULIAS KARANTH UND WILDLIFE CONSERVATION SOCIETY

**Manche Tiger macht der Blitz neugierig, andere schreckt er ab. Das ist bei der Datenauswertung zu berücksichtigen.**

der Paarung gewöhnlich aus dem Weg. Die besenderten Weibchen im Nagarahole-Gebiet beanspruchten etwa 18, die Kater 50 Quadratkilometer große Streifgebiete. Das war unerwartet wenig. Offenbar vermochten sie in einem geschützten Gebiet wie dem Nagarahole-Park dichter zusammenzuleben als vorher angenommen.

Des Weiteren konnte ich genauer als bisher bekannt erfassen, was und wie viel ein Tiger in Malenad frisst. Denn die Sender führten mich auch zu ihrer Beute. Gewöhnlich erlegte ein Tiger pro Woche ein großes Tier – vor allem Hirsche, Wildrinder und Wildschweine – und fraß dann drei bis vier Tage an dem Kadaver, den er zu etwa zwei Dritteln verzehrte. Dann zog er weiter. Dieses Verhaltensmuster spiegelte sich auch in den Exkrementen wider, die ich sammelte und untersuchte. Letztlich ließen meine Befunde den Schluss zu, dass der Rückgang der Tiger in der jüngeren Vergangenheit maßgeblich durch menschliche Jagd auf ihre Beutetiere verschuldet war – eine wichtige Einsicht für die zu ihrem Schutz erforderlichen Maßnahmen.

Bis 1993 hatte ich auch herausgefunden, wie man die Anzahl der bevorzugten potenziellen Beutetiere in einem Gebiet abschätzen kann. Ich übernahm dazu ein von amerikanischen Wildbiologen entwickeltes Verfahren. Hierfür schlug ich 3,2 Kilometer lange, gerade Pfade durch den Dschungel. Solche »Transsekte« gehen dann zwei Beobachter möglichst lautlos entlang. Dabei zählen sie alle in Frage kommenden Beutetiere, die sie rechts und links bemerken, und bestimmen mit einem Entfernungsmesser deren Distanz zum Weg. Die Sichtungen fließen in Hochrechnungen zur Dichtebestimmung ein. Weil dabei auch übersehene Tiere mit einkalkuliert werden, ergeben sich recht zuverlässige Werte.

Erstmals für Asien überhaupt hatten wir hiermit einen Beutetierbestand annähernd ermittelt. Pro Quadratkilometer errechneten wir zwischen 16 und 68 Individuen wilder Paarhufer, also unter anderem Hirsche, Schweine und Hornträger. Eine solche Fülle – eine größere Tierdichte als in den bestandsreichsten ostafrikanischen Savannen – hatte ich in den Schutzzonen Malenads keineswegs erwartet. Für *Panthera tigris* heißt das erfreulicherweise: Obwohl die Reservate

Indiens im Vergleich zu denen Afrikas und Nordamerikas eher klein sind, könnten in ihnen recht viele große Raubkatzen leben. Für Biologen war das ein Anhaltspunkt dafür, wie viele Tiger in den Wäldern Asiens heute noch Platz hätten.

Mitte der 1990er Jahre verschlimmerte sich die Lage jedoch wieder. Wegen der steigenden Nachfrage neureicher Chinesen nach Körperteilen von Tigern kurbelten kriminelle Organisationen die Wilderei kräftig an. Umso dringlicher wurde es, ein möglichst genaues Bild von ihrer Gesamtzahl sowie der Größe und Dynamik der einzelnen Bestände zu gewinnen. Denn niemand wusste, wie viele Vertreter die Art überhaupt noch hat, wie groß die natürliche Fluktuation ist – also wie viele Tiere jährlich sterben und geboren werden, zu- oder abwandern – und wie stark ihre Dichte in den verschiedenen Gebieten differiert.

Wild mit automatisch auslösenden Fotofallen aufzuspüren, war damals ein neues Verfahren. Man platziert Lichtschranken und damit verbundene Kameras an Wegen oder Plätzen, wo die Tiere vermutlich vorbeikommen. Auf den Bildern einzelne Tiger zu identifizieren, ist wegen ihrer individuellen Streifenmuster nicht besonders schwer. Auf diese Weise kann man von wesentlich mehr Individuen Daten gewinnen als mit der viel aufwändigeren Telemetrie, obwohl auch diese Methode sicherlich nur einen Teil der Gesamtpopulation erfasst. Aber die lässt sich mit geeigneten Schätzverfahren extrapolieren.

**Zweites Standbein für zuverlässige Schätzwerte: Eine gut durchdachte, plausible Statistik**

Bei der Suche nach einem passenden statistischen Ansatz stieß ich auf James D. Nichols vom Patuxent Wildlife Research Center des Geologischen Dienstes der USA in Maryland. Er ist Fachmann für Modelle, mit denen sich anhand der Häufigkeit des Wiederfangs von Individuen abschätzen lässt, wie viele Artgenossen des Gebiets man nicht zu Gesicht bekam, wie groß folglich die Gesamtpopulation sein muss. Das ist so ähnlich, wie Murmeln in einem Eimer zu zählen, indem man einige herausnimmt, sie markiert und zurückwirft. Danach fischt man wieder einige heraus, kennzeichnet sie und so fort. Aus dem Verhältnis von Wiederfang zu Neufang erschließt sich letztlich die Gesamtzahl.

Dieses Pauschalmodell war allerdings an unsere speziellen Bedingungen anzupassen. Von den Murmeln wird man jede mit gleicher Wahrscheinlichkeit greifen. Doch Tiger bevorzugen verschiedene Orte, so dass die einzelnen Fotofallen jeden mit einer anderen Wahrscheinlichkeit erfassen. Die Bewegungsmuster hängen zudem vom Alter und Geschlecht ab und können mit der Jahreszeit variieren. Vielleicht erschreckt manche Individuen der Kamerablitz, und sie meiden diesen Ort künftig. Geburten und Todesfälle, Zu- und Abwanderungen verändern die Anzahl. Um in den Daten derartige Fluktuationen möglichst gering zu halten, empfiehlt es sich, eine Population innerhalb einer kurzen Zeitspanne, nach meiner Erfahrung von 30 bis 45 Tagen, mehrmals zu checken. Leider befolgen sogar viele kostspielige Tigerzählprojekte diese Maßgaben immer noch nicht. Deswegen erhalten sie häufig viel zu hohe Werte.

Die Auswertung der Bilder von den Fotofallen in Malenad ergab Populationsdichten zwischen 0,5 und 15 Tigern pro

100 Quadratkilometer, also eine beträchtliche Bandbreite. Womit mochte das zusammenhängen? Der deutsch-amerikanische Freilandforscher und Umweltschützer George Schaller, der in den 1960er Jahren im indischen Kanha-Nationalpark Tiger beobachtete, schätzte, dass so eine Raubkatze im Jahr ungefähr ein Zehntel der im Territorium vorhandenen möglichen Beutetiere reißt. Wenn sie, wie meine Daten von den Sendern besagten, etwa 50 Tiere jährlich erlegt, müsste das Gebiet, in dem sie sich aufhält, rund 500 Huftiere aufweisen. Hängt die starke Streuung der Tigerdichten wohl mit einem unterschiedlich großen Angebot an Beute in verschiedenen Gebieten zusammen?

### Nahrungskonkurrenz durch Menschen eindämmen

Meine These überprüfte ich zwischen 1994 und 2003 in diversen Naturschutzgebieten in ganz Indien. Dabei handelt es sich um völlig unterschiedliche Lebensräume, von Mangrovensümpfen bis zum immergrünen Wald. Für jede Schutzzone, die ich besuchte, ermittelte ich die Dichte von Tigern und ihren Beutetieren. Tatsächlich stellte sich heraus, dass ein Tiger auf 500 Huftiere kommt. In der 2004 dazu erschienenen Arbeit schrieb ich auch: In den letzten 200 Jahren sind die Tigerbestände weniger deswegen eingebrochen, weil so viele dieser eindrucksvollen Raubkatzen auf internationalen Märkten landeten. Der Hauptgrund dafür war und ist vielmehr offensichtlich die übermäßige Jagd auf ihre Nahrung durch die Menschen vor Ort. Wichtiger, als weltweit den Tigerhandel zu bekämpfen, erscheint es demnach, durch Maßnahmen vor Ort die Beutetierbestände zu schützen. Der Schlüssel, um den weiteren Rückgang der Tiger zu

Anfangs habe ich die Tigerbilder noch eigenhändig ausgewertet. Doch tausende Fotos zu durchmustern, um festzustellen, ob ein Tier auf einem neuen Bild früher schon einmal in eine der Fallen gelaufen ist, erfordert viel Zeit und Geduld. Seit 2000 benutze ich die Software Extract-Compare, die der Mathematiker Lex Hiby von Conservation Research in England entwickelte. Dass dieses Programm auch beschlagnahmte Felle von Individuen erkennt, erleichtert die strafrechtliche Verfolgung von Wilderei.

Mit 8843 Aufnahmen von 888 Individuen über die letzten 25 Jahre stellt die Fotosammlung von Malenad eine der umfangreichsten systematisch erhobenen Bilddatenbanken für wild lebende Tiger dar. In den dortigen Reservaten, die zusammen etwa 4000 Quadratkilometer umfassen, dokumentiere ich alljährlich in einer Saison ungefähr 250 verschiedene Individuen. Einzelne von ihnen werden praktisch jedes Jahr wieder abgelichtet, doch die meisten zeigen sich allenfalls in zwei aufeinander folgenden Jahren. Offenbar herrscht hier eine ziemlich hohe Fluktuation. Die gesamte Malenad-Population dürfte aus 400 bis 450 Tigern bestehen und ist damit heute vermutlich die größte der Welt. Immerhin lassen meine Beobachtungen annehmen, dass in dem Gebiet jetzt fünfmal so viele dieser Raubkatzen leben wie noch vor 50 Jahren. Zu verdanken ist das dem Einsatz von lokaler Politik und Naturschützern.

Die Langzeitstudien zeigen erstmals, wie eine gesunde Tigerpopulation funktioniert. Beispielsweise verhält sich der gut geschützte Bestand von Nagarhole keineswegs statisch. Vielmehr fluktuiert die Dichte dort über längere Zeiträume zwischen 7 und 15 Tieren auf 100 Quadratkilometern. Selbst ein dichter Bestand verliert jährlich durchschnittlich ein Fünftel seiner Mitglieder. Einerseits sorgen die Tiger selbst für beträchtliche Verluste – etwa wenn Männchen Jungtiere töten oder wenn Tiere bei Kämpfen beziehungsweise beim Jagen schwer verletzt werden und dann verhungern. Andererseits treiben Bauern, die ihr Vieh schützen, sowie Wilderer, die etwas verdienen wollen, die Todesraten in die Höhe. Dergleichen können Schutzmaßnahmen nie völlig unterbinden. In den genannten Reservaten leben allerdings ausreichend Beutetiere, so dass die Tigergeburten die hohen Verluste mehr als ausgleichen. Überzählige Individuen wandern vielfach ab und versuchen, sich irgendwo anders anzusiedeln.

Anstatt sich also über einzelne erlegte Tiger aufzuregen, wie Naturschützer es oftmals tun, sollten wir lieber die Populationen als ganze im Blick haben. Das heißt: Man sollte nicht die begrenzten Mittel und Kräfte verschwenden, um überall, wo Tiger noch vorkommen, alles daran zu setzen, jegliche Bedrohung von ihnen fernzuhalten. Denn viel mehr erreicht man, wenn man sich auf die besten Quellenpopulationen konzentriert – also auf die Bestände mit dem größten Erholungs- und Ausbreitungspotenzial.

Während der 1990er Jahre und noch Anfang der 2000er Jahre hatte ich mich hauptsächlich mit der Funktionsweise solcher Überschusspopulationen in Naturschutzgebieten befasst sowie damit, wie sie auf Druck durch menschliches Verhalten reagieren. Nun leben aber gerade diese Populationen unter relativ guten, sicheren Bedingungen. Für die angrenzenden weiten Landstriche sieht das ganz anders

verhindern, wäre eine gute Überwachung, die solche Dezimierungen künftig zumindest deutlich eindämmt.

Auf Grundlage der oben genannten Dichtedaten weitete ich 2004 die jährliche Erfassung von Tigerpopulationen in Nagarhole mit Hilfe von Kamerafallen auf andere wichtige Reservate von Malenad aus. Über die Jahre registriert man bei dieser Methode die Populationszuwächse und -abnahmen ziemlich genau und kann abschätzen, wie viele Individuen jeweils durch Tod oder Abwanderung verschwanden und durch Geburten oder Zuwanderung hinzukamen. Nach meiner Erfahrung lassen sich Erfolge und Fehlschläge von Schutzmaßnahmen nur dann zuverlässig feststellen, wenn man den Zustand der betreffenden Populationen in einem engen zeitlichen Raster erfasst. Und nur dann sieht man auch, ob ein Bestand wächst.



FOTOLIA / FRANK WASSERFUHRER

### Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema Artenvielfalt finden Sie unter [spektrum.de/t/artenvielfalt-und-artensterben](http://spektrum.de/t/artenvielfalt-und-artensterben)

aus. Deswegen wollte ich auch wissen, wie es Tigern ergehen mag, die aus einem geschützten Gebiet abwandern in ein von ihnen dünner besiedeltes so genanntes Senkenhabitat (sink-landscape) – also in eine Landschaft, die Individuen aufnimmt, welche in ihrem Herkunftsgebiet keinen Platz finden.

Die Fotofallenaufnahmen von Malenad bezeugen, dass sich junge erwachsene Tiger weit verteilen. Das Männchen BDT-130 wanderte 2008 von Bhadra mehr als 180 Kilometer nach Anshi-Dandeli. BPT-241 legte 2011 von Bandipur bis in Waldgebiete des Distrikts Shimoga mehr als 280 Kilometer zurück. Und etliche andere Individuen gelangten in eines der nächsten Reservate. Wie es aussieht, treffen Tiger aus verschiedenen Quellenpopulationen in Senkengebieten aufeinander und paaren sich dort auch. Hiermit tragen sie zum Erhalt einer gesunden genetischen Vielfalt bei. Demnach ist

## »Wichtig ist, dass die Biotop untereinander verbunden sind«

es wichtig, dass die Schutzgebiete der Quellenpopulationen untereinander über für Tiger geeignete Senkenhabitate verbunden sind und mit ihnen einen Biotopverbund bilden.

Für ein klareres Bild davon, in welchen Landschaften Tiger noch vorkommen, war es nötig, die Erhebungen auf solche Nebengebiete auszudehnen. Mit Kamerafallen lässt sich auf so großen Flächen allerdings nicht mehr viel ausrichten, schon gar nicht mit vertretbaren Kosten. Aber wir suchten beispielsweise nach Fährten und Exkrementen. Zwar war die Anzahl an Individuen so nicht feststellbar, doch die Hinweise verrietten zumindest, wo sich Tiger aufhielten. Im Jahr 2006 rief ich ein Projekt ins Leben, das die Tigervorkommen in ganz Malenad erfassen sollte – einem Gebiet von 38350 Quadratkilometern.

Dabei stellte sich heraus: Tiger gibt es heute auf gut 14000 Quadratkilometern dieser Fläche – das sind zwei Drittel der mehr als 21000 Quadratkilometer derzeit für sie geeigneter und verfügbarer Landschaft. Es gäbe also viel Raum, in dem sie sich ausbreiten könnten. Wieder herrschte in Gegenden mit der höchsten Tigerdichte eine größere Beutetierdichte als anderswo; und Menschen hatten dort nur eingeschränkt Zugang. Diese Beobachtung unterstreicht meine These, dass man Tiger am besten schützt, indem die Bevölkerung nicht mit ihnen um ihre Beute konkurriert.

Im Indienprogramm der Wildlife Conservation Society untersuchen meine Kollegen und ich jetzt in einem Gemeinschaftsprojekt mit dem Statistikinstitut Indiens, wie sich die verschiedenen Ansätze der Tigererfassung zusammenführen lassen: die in Schutzgebieten praktizierte aufwändige und teure, aber recht genaue individuelle Zählung unter anderem mit Fotofallen; und die großräumige, gröbere, dafür billigere Erfassung von Spuren und Hinterlassenschaften außerhalb dieser Zonen. Denn wir würden gern weitere Regionen und noch ausgedehntere Flächen abdecken – auch in anderen Ländern. Solche Daten könnten dazu beitragen, die Situation der Großkatze in ihrem gesamten Verbreitungsgebiet zu verbessern.

In einigen dieser Länder wird bereits mit den beschriebenen Methoden gearbeitet, um ihre Tigervorkommen und Bestandszahlen zu erheben. Doch im Ganzen tun sich Naturschutzbehörden und Nichtregierungsorganisationen damit schwer – trotz der großen wissenschaftlichen Fortschritte auf meinem Forschungsgebiet in letzter Zeit. Vielleicht mangelt es am Verständnis, vielleicht findet man die Vorgehensweisen nur zu mühsam; manchen mögen die alten Verfahren einfach lieber sein, weil die eindrucksvollen Zahlen mehr Ruhm einbringen.

Ein Beispiel dafür, wie tückisch das Vertrauen in veraltete Methoden ist, lieferte erst kürzlich der WWF (World Wide Fund for Nature) zusammen mit dem Global Tiger Forum (GTF), in dem sich eine Reihe von Staaten und Organisationen engagieren. Im April 2016 verkündeten sie lautstark, die Tigerpopulationen würden jetzt letztendlich wieder zunehmen. Der Gesamtbestand zähle nun bereits 3890 Individuen. Bis 2022 strebe man 6000 Tiere an. Diese Rechnung basierte auf offiziellen Schätzwerten, die ihrerseits auf unsicheren Methoden fußen. Einer der Schwachpunkte der Angaben ist, dass für die Hochrechnungen zu den Fotografien und Zählungen von Spuren eine ungenügende Statistik verwendet wurde. Auch der prognostizierte Anstieg der Tigerzahlen übertrifft bei Weitem die Zunahme, die nach den Erhebungen mit den beschriebenen strengen Methoden allenfalls zu erwarten wäre. Hinzu kommt, dass sich höchstens für ein paar Schutzzonen in Indien und manche Gebiete in Thailand wirklich ein Zuwachs aufzeigen lässt. Für das übrige Südostasien und Russland geben die Daten solche Aussagen einfach nicht her. Sie können nicht überzeugend belegen, ob sich die Populationen dort erholen. Einige Länder, darunter Kambodscha, Vietnam und China, haben ihre letzten noch überlebenschfähigen Populationen in den vergangenen Jahren sogar eingebüßt. Solche Verluste erscheinen in einer Gesamtzahl der noch vorhandenen wilden Tiger nicht.

Schließlich untergraben derartige spekulative Zahlen für einzelne Länder und Regionen die Anstrengungen zur Tigerrettung. Denn sie lenken davon ab, dass es oberste Priorität sein sollte, die Quellenpopulationen zu überwachen und zu unterstützen. Selbst wenn es gelänge, die wirkliche Anzahl der heute lebenden Tiger korrekt zu bestimmen, ist das vielleicht gar nicht so wichtig. Entscheidend sind die Quellen-, die Überschusspopulationen! Sie gilt es mit den besten wissenschaftlichen Methoden aufmerksam zu beobachten. Verlässliche Zahlen von ihnen sind Voraussetzung für realistische Zielsetzungen zum zukünftigen Wachstum. Nur damit kann man feststellen, welche Maßnahmen gut greifen und welche weniger. Wir dürfen die Naturschutzpraktiken nicht von solider Wissenschaft abkoppeln, wenn wir ein Symbol der Wildnis wie den Tiger retten wollen. ◀

### QUELLEN

**Gopalswamy, A. M. et al.:** An Examination of Index-Calibration Experiments: Counting Tigers at Macroecological Scales. In: *Methods in Ecology and Evolution* 6, S. 1055–1066, 2015

**Karanth, K. U. et al.:** Tigers and their Prey: Predicting Carnivore Densities from Prey Abundance. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 101, S. 4854–4858, 2004

# SCHLICHTING! WASSERTROPFEN AUF DER RENNBAHN



**Träufelt man Wasser auf eine heiße Platte, schwebt es für lange Zeit auf dem entstehenden Dampf. Besitzt der Untergrund ein Profil, flitzt der Tropfen sogar mitunter davon.**

**H. Joachim Schlichting** war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2013 wurde er mit dem Archimedes-Preis für Physik ausgezeichnet.

» [spektrum.de/artikel/1427408](http://spektrum.de/artikel/1427408)

► Gibt man Wassertropfen in eine kalte Pfanne und erwärmt diese, bleiben sie an ihrem Ort und köcheln vor sich hin, bis sie verdampft sind. Etwas ganz anderes passiert, wenn die leere Pfanne schon heiß ist oder man das Wasser direkt auf das glühende Kochfeld gibt. Dann tanzen die Kügelchen umher und halten erstaunlich lange durch, bevor sie vollständig zu Gas werden.

Hinter diesem von Johann Gottlob Leidenfrost (1715–1794) erstmals erforschten und nach ihm benannten Effekt steckt eine subtile Selbstorganisation. Kommt Wasser mit einer mehr als etwa 200 Grad Celsius heißen Oberfläche in Berührung, verdampft es in der Kontaktregion schlagartig – aber nur dort. Denn wegen der hohen Temperatur läuft der Prozess so schnell ab, dass er sich selbst begrenzt: Bevor das unter dem Tropfen entstehende Gas entweichen kann, hebt es ihn ein wenig an (siehe Illustration, oben). Er sitzt fortan auf einem Dampfkissen, das ihn vom Untergrund isoliert. So wird das Substrat gewissermaßen Wasser abweisend. Der Tropfen ist dadurch äußerst mobil, und kleinste Anstöße, etwa durch gezieltes Anpusten, lassen ihn über die Unterlage flitzen.

Dabei stellt sich eine Art stationäres Gleichgewicht ein, das dem Gebilde ein unerwartet langes Dasein beschert. Entweicht Gas an den Seiten, gerät das Wasser erneut in direkten Kontakt mit der heißen Oberfläche und der Dampfpuffer wird abermals aufgefüllt.

Auf einer glatten, ebenen Heizfläche bestimmen zufällige Strömungen die Bewegung. Forschungen der letzten Jahre haben aber gezeigt, dass sich durch den Untergrund die Driftrichtung beeinflussen lässt: Oberflächen mit einem sägezahnförmigen Profil treiben die Tropfen immer entgegen der aufragenden Zähne.

Liegt das vielleicht daran, dass sich der Wassertropfen darauf verformt? Dagegen spricht folgendes Experiment:

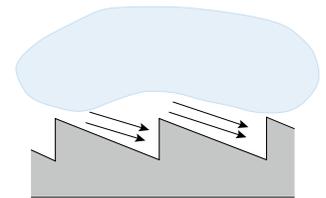
Platziert man dort stattdessen ein Plättchen Trockeneis – festes Kohlendioxid, das direkt in den gasförmigen Zustand übergeht –, verhält es sich genauso. Insbesondere diese Beobachtung hat dazu geführt, dass Wissenschaftler inzwischen eine Erklärung am plausibelsten finden, die auf Gasströmungen basiert.

Unterhalb des Tropfens ist der Dampfdruck höher als in der Umgebung. Das treibt Strömungen an, die vor allem die abfallenden Flanken des Sägezahnprofils herunterlaufen (Illustration, Mitte) und den auflastenden Körper mitziehen. Die übrigen Reibungskräfte sind im Schweben-

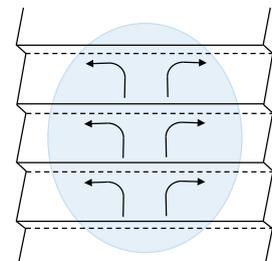
**Oben: Über einer heißen Unterlage hält Dampf einen Wassertropfen in der Schwebe. Das Gas bildet in der Mitte eine kleine Blase und entweicht an den Seiten (Pfeile).**



**Mitte: Auf einem Sägezahnprofil (Ansicht von der Seite) fließt Dampf die Schrägen der Hohlräume herunter.**



**Unten: Der Dampf zieht den Tropfen jeweils ein Stück weit mit. Das Gas entweicht seitlich, sobald es auf die senkrechten Wände des Rasters trifft (Blick von oben).**



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, ILLUSTRATION: H. JOACHIM SCHLICHTING



Der Leidenfrost-Ring mit spezieller, geriffelter Oberfläche wird auf einer Herdplatte erhitzt. Ein Tropfen (unterer Bereich, wegen seiner hohen Geschwindigkeit unscharf) läuft darauf im Kreis.

zustand sehr gering und setzen dieser kleinen, aber steilen Zugwirkung kaum Widerstand entgegen. Schließlich prallt der Dampf auf die steilen Wände und wird dort zu den Seiten abgelenkt (Illustration, unten).

Inzwischen kann man dieses Verhalten spielerisch selbst untersuchen, denn ein Hersteller bietet einen passend gefrästen Aluminiumzylinder an (siehe Foto oben). Der »Leidenfrost-Ring« ist etwa 1,6 Zentimeter hoch und hat einen Durchmesser von vier Zentimetern. In ihm ist ein runder Kanal mit einem sägezahnförmigen Boden. Heizt man diesen Zylinder auf einer Herdplatte ausreichend auf und tropft zum Beispiel mit einem Strohhalm Wasser hinein, setzt sich dieses unversehens in Bewegung – aber erst ab einer bestimmten Mindestmenge. Sind die Tropfen nur etwa so klein wie die Sägezähne, bleiben sie an Ort und Stelle, bis sie völlig verdampft sind.

Größere Tropfen laufen meist ohne Umschweife los. Sie werden so schnell, dass es schwerfällt, die Umläufe direkt zu zählen. Der Gasverlust lässt sie jedoch schrumpfen und bremst sie bis zum Stillstand ab, sobald sich die restliche Wassermenge dem Mindestvolumen nähert. Bis dahin können 90 Sekunden vergehen. Manchmal startet ein Tropfen auch in umgekehrter Richtung, vermutlich durch einen entsprechenden Impuls beim Aufschlagen. Er bremst aber gleich danach ab und kehrt um.

Wenn man den Ring und damit die Sägezahnbahn neigt, lassen sich die rasenden Perlen nicht beirren – sie bewegen sich bergauf. Jedoch können wir mit unserem Spielzeug nicht zweifelsfrei ausschließen, dass dafür allein die Trägheit verantwortlich ist, schließlich geht jedem Aufstieg eine Talfahrt voraus, bei welcher der Tropfen zusätzlich zum Dampftrieb Schwung aufnehmen kann-

### Es ist die Asymmetrie, die das Phänomen hervorbringt.

Pierre Curie (1859–1906)

te. In der Fachliteratur wird allerdings von Exemplaren berichtet, die erhebliche Steigungen erklommen haben. Für die Beschleunigung an sich ist die Schwerkraft offenbar nicht so wichtig, solange sie zumindest für den regelmäßigen Kontakt zur heißen Unterlage sorgt, durch den ständig Dampf nachgeliefert wird.

Alle Bewegungs- und bei geneigtem Untergrund zudem Höhenenergie speist sich also aus einem winzigen Teil derjenigen Energie, die der Platte zugeführt wird, damit sie oberhalb der für den Leidenfrost-Effekt nötigen Temperatur bleibt. So gesehen haben wir es mit einer Wärmekraftmaschine zu tun, die sich selbst verbraucht.

Das ist mehr als nur ein netter Zeitvertreib. Die Physiker hoffen auf praktische Einsatzmöglichkeiten – beispielsweise in so genannten Chiplabors, wo winzige Flüssigkeitsmengen auf scheckkarten-großen Platten automatisch verschiedene chemische oder biologische Prozesse durchlaufen. Auch bei Kühlverfahren, dem Farbauftrag in Druckern oder der Verteilung von Lacken sehen sie Potenzial. Immerhin nahmen nützliche Anwendungen ihren Anfang oft genug in physikalischen Spielereien.

#### QUELLEN

**Dupeux, G. et al.:** Viscous Mechanism for Leidenfrost Propulsion on a Ratchet. In: Europhysics Letters 96, 58001, 2011

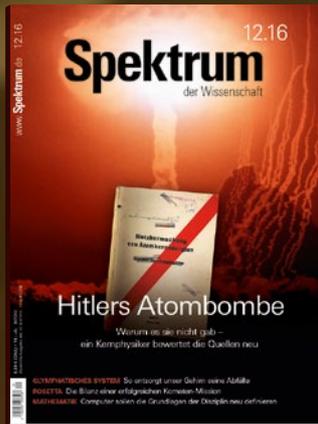
**Linke, H. et al.:** Self-Propelled Leidenfrost Droplets. In: Physical Review Letters 96, 154502, 2006

#### WEBLINK

Unter dieser Internetadresse verkauft ein Händler aus Großbritannien Aluminiumzylinder mit passend gefräster Oberfläche: [www.gyroscope.com/d.asp?product=LEIDENFROSTRING](http://www.gyroscope.com/d.asp?product=LEIDENFROSTRING)

# Weihnachten steht vor der Tür!

Schenken Sie Ihren Lieben zum Fest ein Abo – oder sich selbst!



Die Zeitschrift für Naturwissenschaft, Forschung und Technologie

Print 12 Ausgaben, € 89,-

Print + digital € 95,-



Das Magazin für Psychologie, Hirnforschung und Medizin

Print 12 Ausgaben, € 85,20

Print + digital € 91,20



Das Magazin für Astronomie und Weltraumforschung

Print 12 Ausgaben, € 89,-

Print + digital € 95,-



Der aktuelle Wissensstand der NWT-Forschung

Print 4 Ausgaben, € 29,60



Spannende Themen aus der Welt der Kulturwissenschaften

Print 4 Ausgaben, € 29,60



Die neuesten Erkenntnisse aus dem Bereich der Life Sciences

Print 4 Ausgaben, € 29,60

**Jetzt bestellen:**

service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743

[www.spektrum.de/geschenk](http://www.spektrum.de/geschenk)

# Ihre Vorteile:

## 1. Ein ganzes Jahr Freude:

Verschenken Sie ein Magazin mit anspruchsvollen Artikeln über die neuesten internationalen Entwicklungen in allen Bereichen von Wissenschaft und Forschung.

## 2. Mit Grußkarte:

Der Beschenkte erhält das erste Heft mit einer Grußkarte in Ihrem Namen. Auf Wunsch auch zu Weihnachten.

## 3. Plus Geschenk zur Wahl:

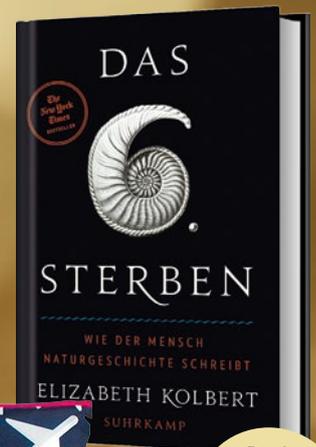


Spiel des Jahres 2016  
»Codenames«



Doku des Jahres 2015:  
DVD »Das Salz der Erde«

Kalender  
»Himmel und Erde 2017«



Buch  
»Das 6. Sterben«  
(Pulitzer-Preis 2016)



Taschenmesser  
»Spartan« von  
Victorinox



Zip Pockets  
»Airport«  
von Loqi

[www.spektrum.de/geschenk](http://www.spektrum.de/geschenk)

# ASTRONOMIE ZU BESUCH BEI EINEM KOMETEN

**Zweieinhalb Jahre begleitete die Raumsonde Rosetta den Kometen 67P/Tschurjumow-Gerasimenko auf seiner Bahn um die Sonne und setzte sogar einen Lander auf ihm ab. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse über das frühe Sonnensystem dürften die Forscher noch eine Weile beschäftigen.**



**Gerhard Schwehm** war Projektwissenschaftler bei der Giotto- und der Rosetta-Mission. Er leitete unter anderem die Abteilungen Planetary Missions und Solar System Science Operations der ESA. In seinem Ruhestand engagiert er sich in der Planetary Protection Working Group.

► [spektrum.de/artikel/1427406](http://spektrum.de/artikel/1427406)

Am 30. September 2016 um 13.19 Uhr MESZ traf das letzte Signal von Rosetta im Bodenkontrollzentrum ESOC der ESA in Darmstadt ein. Die Raumsonde war aus 20 Kilometer Höhe im freien Fall auf 67P/Tschurjumow-Gerasimenko niedergegangen. Damit endete eine gut zwölfjährige Reise durch das innere Sonnensystem und eines der ambitioniertesten Wissenschaftsprojekte der Europäischen Weltraumorganisation (ESA).

Die Planungen für die Rosetta-Mission begannen bereits lange vorher, als die Giotto-Sonde zum Kometen Halley noch

in Kourou auf ihren Start wartete. Am 22. Mai 1985 traf sich eine kleine Gruppe von Wissenschaftlern an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich, um für die ESA einen Vorschlag für eine so genannte planetare Cornerstone-Mission im Rahmen des auf lange Zeit angelegten Programms »Horizon 2000« auszuarbeiten. Anders als mit Giotto wollte man diesmal nicht nur an einem Kometen vorbeifliegen, sondern Materialproben von seinem Kern entnehmen und diese zur Erde bringen – ein lang gehegter Traum der Kometenforscher wie auch der Kosmochemiker, denn in Kometen sollte das ursprüngliche Material aus den Anfängen des Sonnensystems noch weitgehend unverändert vorliegen.

Die ESA akzeptierte den Missionsvorschlag und holte die NASA als Juniorpartner mit ins Boot. Die gemeinsame Arbeit an der wissenschaftlichen Planung konnte beginnen. Wie der Stein von Rosette Jean-François Champollion den Schlüssel für die Entzifferung für ägyptischen Hieroglyphen lieferte und uns Einblick in die Kultur des alten Ägypten gewährte, so sollte die Raummission »Rosetta« die Verwandtschaft zwischen der Kometensubstanz und der interstellaren Materie – und damit dem ursprünglichen Material des Sonnensystems – aufdecken und Aufschluss über dessen Entwicklungsgeschichte geben.

Unser Sonnensystem ist aus einem Fragment einer interstellaren Materiewolke entstanden, das sich immer weiter verdichtet hat, bis sich in seinem Inneren ein Stern formte und zu leuchten begann. Aus den ihn umgebenden Gas- und Staubresten, der protoplanetaren Scheibe, bildeten sich schließlich die Kometen, Asteroiden und Planeten.

## AUF EINEN BLICK ZURÜCK ZUM URSPRUNG

- 1** Kometen enthalten unverändertes Material aus den Anfängen des Sonnensystems. Aus der Analyse der Materie von Tschurjumow-Gerasimenko hoffen Forscher, etwas über seine Entwicklung zu lernen.
- 2** Die Sonde Rosetta hat den Kometen Tschurjumow-Gerasimenko mehr als zwei Jahre begleitet, seine Aktivität aufgezeichnet und einen Lander auf ihm abgesetzt.
- 3** Die Auswertung sämtlicher Messergebnisse steht noch aus. Doch schon jetzt haben die Forscher Neues über den Ursprung von Kometen erfahren.

SERIE

## Unbekanntes Terrain im Sonnensystem

Teil 1: Oktober 2016

### Gibt es Planet X?

von Michael D. Lemonick

Teil 2: November 2016

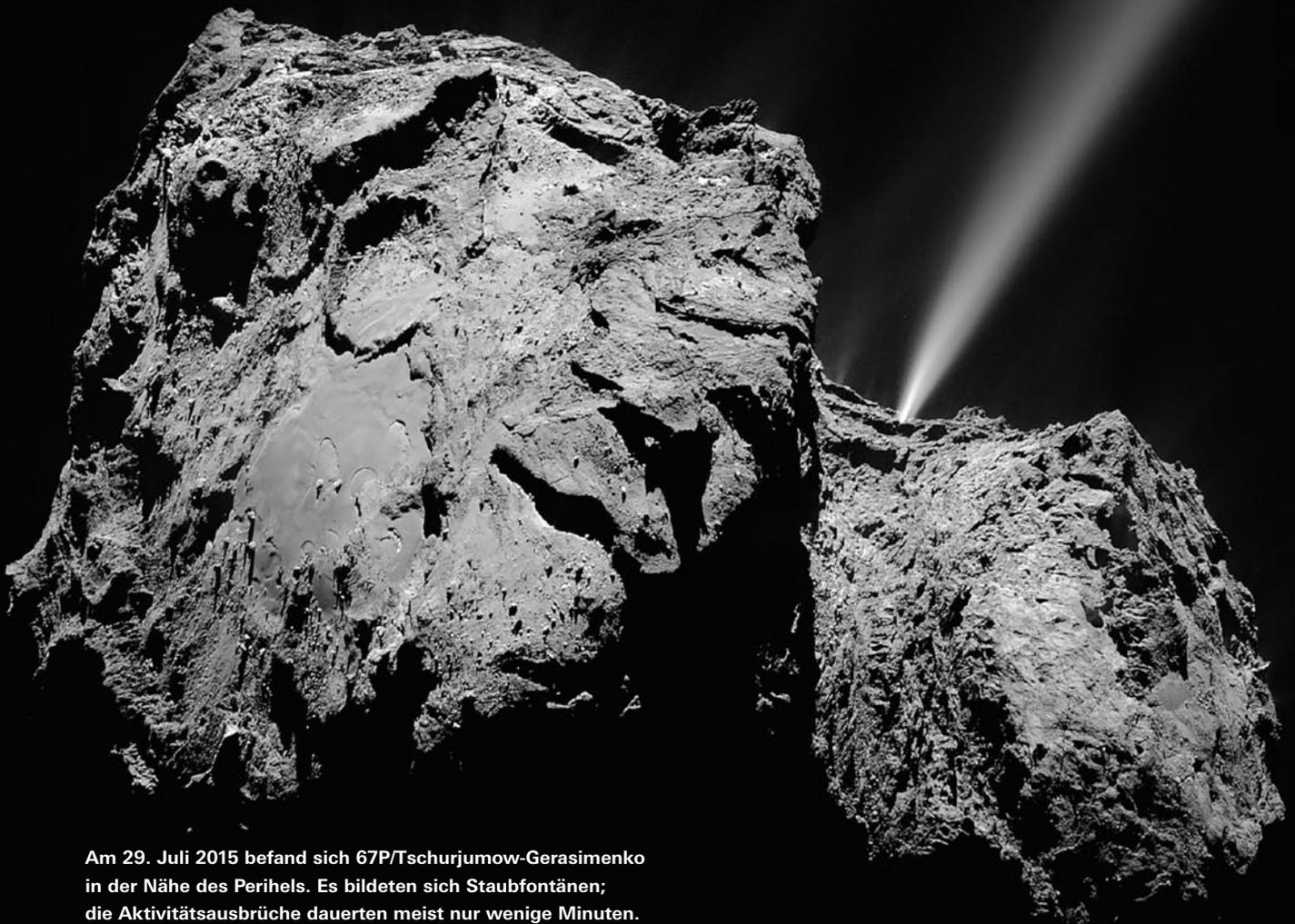
### Blick über den solaren Tellerrand

von Stamatios M. Krimigis und Robert B. Decker

Teil 3: Dezember 2016

### Zu Besuch bei einem Kometen

von Gerhard Schwehm



Am 29. Juli 2015 befand sich 67P/Tschurjumow-Gerasimenko in der Nähe des Perihels. Es bildeten sich Staubfontänen; die Aktivitätsausbrüche dauerten meist nur wenige Minuten.

Anders als Planeten sind Kometen keinen geologischen oder atmosphärischen Einflüssen ausgesetzt, ihre Zusammensetzung ist daher seit ihrer Entstehung nahezu unverändert. Aus diesem Grund erhofften sich die Forscher aus der Materialprobe eines Kometen neue Erkenntnisse über die Frühphase des Sonnensystems und seine weitere Entwicklung. Besonders interessiert die Wissenschaftler dabei die Frage nach der Herkunft des Wassers auf der Erde und die mögliche Rolle von Kometen bei der Entstehung des Lebens.

Diese Fragen zu beantworten, war ein hochgestecktes Ziel. Schon recht bald zeigte sich, dass die NASA ihren Anteil an finanzieller Unterstützung zu einer so aufwändigen Mission nicht würde aufbringen können. Zwar wollte sie sich weiterhin wissenschaftlich an Rosetta beteiligen, doch

## Die Bilder von 67P/C-G brachten bald die erste Überraschung: Der Kometenkern war zweigeteilt und ähnelte einer Badeente

allein konnte die ESA eine komplexe Kometenmission mit Materialrückführung nicht bestreiten. So mussten die Wissenschaftler umdisponieren. Anstatt eine Materialprobe zur Erde zu bringen, sollte Rosetta nun ein Labor zum Kometen bringen und das Material aus einer nahen Umlaufbahn analysieren. Um auch direkt von der Kometenoberfläche Material entnehmen und untersuchen zu können, sollte ein kleines Labor, der Lander Philae, auf dem Himmelskörper abgesetzt werden. Dank des neuen Missionskonzepts war man in der Lage, den Kometenkern jetzt sogar über einen langen Zeitraum zu beobachten und dabei die Entwicklung der Kometenaktivität entlang seiner Bahn in Abhängigkeit von der Entfernung zur Sonne zu verfolgen.

2002 waren Sonde und Lander einsatzbereit. Im Frühjahr 2003 sollten sie mit einer Ariane-5-Rakete starten. Das Ziel: Komet 46P/Wirtanen. Als Rosetta im Dezember 2002 bereits am Weltraumbahnhof Kourou letzten Tests unterzogen wurde, explodierte die verbesserte Version der Ariane 5 bei ihrem Jungfernflug. Bis die Ursache dafür identifiziert und der Fehler behoben war, durften keine weiteren Starts mit diesem Raketentyp stattfinden.

Also mussten die Kometenwissenschaftler erneut ihre Pläne ändern, denn das Startfenster für Wirtanen war inzwischen verstrichen. Glücklicherweise hatten sie schon alle möglichen weiteren Missionsszenarien für Starts von 2000 bis 2005 durchgespielt. Unter den neuen Voraussetzungen stellte sich Komet 67P/Tschurjumow-Gerasimenko (C-G) schnell als einzige sinnvolle Alternative heraus. Das optimale Startfenster war im März 2004.

Bis dahin testeten die Forscher die Software für den Flugbetrieb wie auch für die wissenschaftlichen Instrumente noch einmal sehr viel gründlicher, als es zuvor wegen des üblichen Zeitdrucks möglich gewesen war. Wie sich im Nachhinein zeigte, hat die gesamte Mission davon profitiert.

Mit einem Bilderbuchstart begann am 2. März 2004 endlich Rosettas lange Reise zum Kometen 67P/C-G. Auf ihrem Weg dorthin steuerte die Sonde dreimal an der Erde und einmal am Mars vorbei, um Schwung zu holen (siehe Infografik S. 56/57). Außerdem passierte Rosetta unterwegs zwei Asteroiden: 2867 Steins im September 2008 und 21 Lutetia im Juli 2010. Dabei sammelten die Forscher vor allem Informationen über Oberfläche und Zusammensetzung dieser Himmelskörper, die sie vielleicht einmal zur Asteroidenabwehr nutzen können. Die Gelegenheit diente auch als Generalprobe für die Instrumente auf Rosetta. Und tatsächlich traten bei der Blende der Osiris-Kamera während der Passage bei Steins Probleme auf, die aber rechtzeitig vor dem Vorbeiflug an Lutetia und damit auch vor der Ankunft am Kometen behoben werden konnten.

Im Sommer 2011 wurde Rosetta in den Winterschlaf versetzt, da sich bei einer Entfernung von mehr als 650 Millionen Kilometern von der Sonne trotz der riesigen Solarpaneele nicht genug Strom erzeugen ließ, um die Raumsonde regulär zu betreiben. In diesem Modus trieb die Sonde durch den Weltraum, bis eine interne Uhr sie am 20. Januar 2014 wieder aufweckte. Von da an näherte sich Rosetta Schritt für Schritt dem Kern ihres Zielkometen. Schon bald gaben die Bilder der Osiris-Kamera immer mehr Details über den Himmelskörper preis – und brachten die erste große Überraschung.

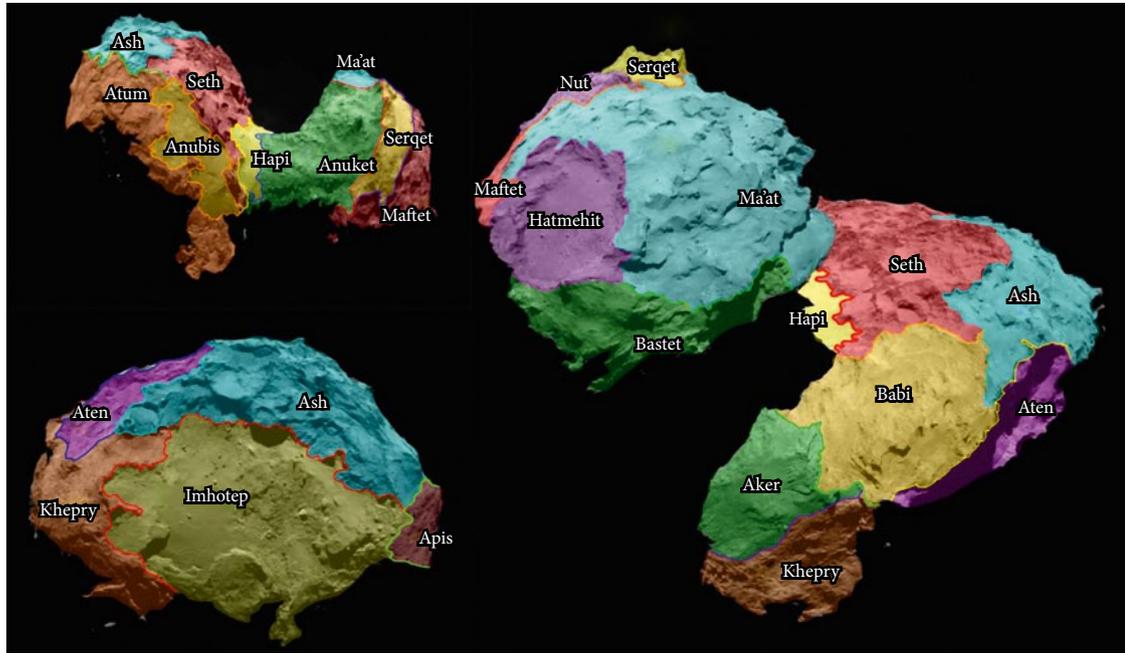
67P/C-G hat eine sehr unregelmäßige, zweigeteilte Form, die fast an eine Badeente mit Kopf, Hals und Körper erinnert. Es stellte sich die Frage, ob dieser Kometenkern in einem Stück entstanden war oder sich ursprünglich aus zwei Körpern gebildet hatte. Auch seine Oberfläche war keineswegs homogen, sondern strukturell äußerst vielfältig (siehe Abbildung rechts). Fast zweieinhalb Jahre sollte Rosetta den Kometen nun auf seiner Bahn in unterschiedlicher Entfernung begleiten. Während die Sonde ihm zunächst immer näher kam, entfernte sie sich während seiner aktivsten Phase in Sonnennähe vorübergehend, da der zunehmende Staub den Sternsensor, mit dem Rosetta sich am Himmel orientierte, sonst irritiert hätte.

### Die schwierige Suche nach einem geeigneten Landeplatz für Philae

Als Erstes aber galt es, die wichtigsten Kenngrößen des Kometen wie Volumen, Masse, Form und Gravitationsfeld zu bestimmen, um Rosettas Bahn um den Himmelskörper präzise planen zu können und vor allem die Landung von Philae vorzubereiten. Viel Zeit blieb nicht dazu. Als Landetermin war der 12. November 2014 festgelegt. Zu diesem Zeitpunkt befand sich der Komet mit mehr als drei Astronomischen Einheiten (AU) noch recht weit von der Sonne entfernt und war wenig aktiv. Störungen durch ausströmendes Gas und Staub sollten möglichst vermieden werden, um die Bahn des Orbiters so wenig wie möglich zu beeinflussen und auch für Philae eine stabile Abstiegsbahn zu garantieren.

Trotz seiner Masse von  $10^{10}$  Tonnen ist die Anziehungskraft von 67P/C-G sehr gering. So wirkt dort auf Philae nur eine Gewichtskraft, die auf der Erde derjenigen eines Papierblatts entspricht. Der Komet ist sehr porös und hat eine

Die Oberfläche von 67P/C-G ist nicht homogen. Es lassen sich fünf Grundtypen der Oberflächenbeschaffenheit unterscheiden. Die Forscher haben die verschiedenen Regionen nach ägyptischen Gottheiten benannt: staubbedeckt (Ma'at, Ash, Babi), brüchiges Material mit Gruben und kreisförmigen Strukturen (Seth), großräumige Depressionen (Hatmehit, Nut, Aten), glatte Flächen (Hapi, Imhotep, Anubis), exponierte, felsartige Strukturen (Maftet, Bastet, Serqet, Anuket, Khepry, Aker, Atum, Apis). Die drei Bilder zeigen verschiedene Ansichten des Kometen.



Dichte von nur ungefähr 0,5 Gramm pro Kubikzentimeter. Umso überraschender war das hohe Verhältnis von Staub zu ausgefrorenem Gas von 4 zu 1. Tschurjumow-Gerasimenko entspricht daher eher einem Ball aus gefrorenem Matsch als einem schmutzigen Schneeball, wie man Kometen lange bezeichnete. Ersterer Begriff war allerdings schon für den Halleyschen Kometen geprägt worden; das damals gemessene Staub-zu-Gas-Verhältnis war jedoch mit großer Unsicherheit behaftet. Der Landeplatz für Philae musste wissenschaftlich interessant sein, das Terrain ziemlich eben und ohne große Felsbrocken, damit Philae beim Aufsetzen nicht umkippen konnte. Und er sollte optimale Beleuchtungsverhältnisse bieten, um das Aufladen der Sekundärbatterien und eine gute Kommunikationsverbindung zum Orbiter zu garantieren. Die Wahl fiel auf die Region Agilkia am Kopf des Kometen (siehe Infografik, S. 57).

Am 12. November stieß Rosetta Philae aus einer Entfernung von 22,5 Kilometern vom Kometen mit einer Geschwindigkeit von 18 Zentimeter pro Sekunde ab. Nach sieben Stunden Flugzeit setzte der Lander nur etwa 100 Meter neben dem vorgesehenen Zielpunkt in Agilkia auf.

Sobald Philae den Kometen berührt hatte, startete die vorprogrammierte Sequenz wissenschaftlicher Experimente. Allerdings zündeten die Harpunen, die den Lander auf der Oberfläche fixieren sollten, nicht, und Philae prallte kurz nach dem Aufsetzen wieder ab. Das Gerät flog nun rund zwei Stunden lang in 100 Meter Höhe über die Kometenoberfläche. Währenddessen sammelten die Instrumente bereits fleißig Daten, bis sich Philae schließlich endgültig in der Region Abydos niederließ, 1,3 Kilometer vom ursprünglichen Landeplatz entfernt.

Dieser ungeplante Ausflug lieferte Informationen über die unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit an verschiedenen Orten entlang der Flugbahn, die sich mittels der hochempfindlichen Magnetometer in Sonde und Lander sehr genau bestimmen ließ. Als Referenz diente hierbei das

interplanetare Magnetfeld, denn der Komet besitzt selbst keines.

Leider war Philae nun aber in einer schattigen Ecke des Kometen zur Ruhe gekommen, wo sich die Sekundärbatterien nicht durch Sonnenlicht aufladen konnten. Die Primärbatterie war nach 64 Stunden erschöpft, und so fiel der Lander in einen Winterschlaf. Dennoch ließen sich bis dahin bereits 80 Prozent der ersten geplanten Messphase erfolgreich abschließen.

### 16 organische Verbindungen in aufgewirbeltem Staub gefunden

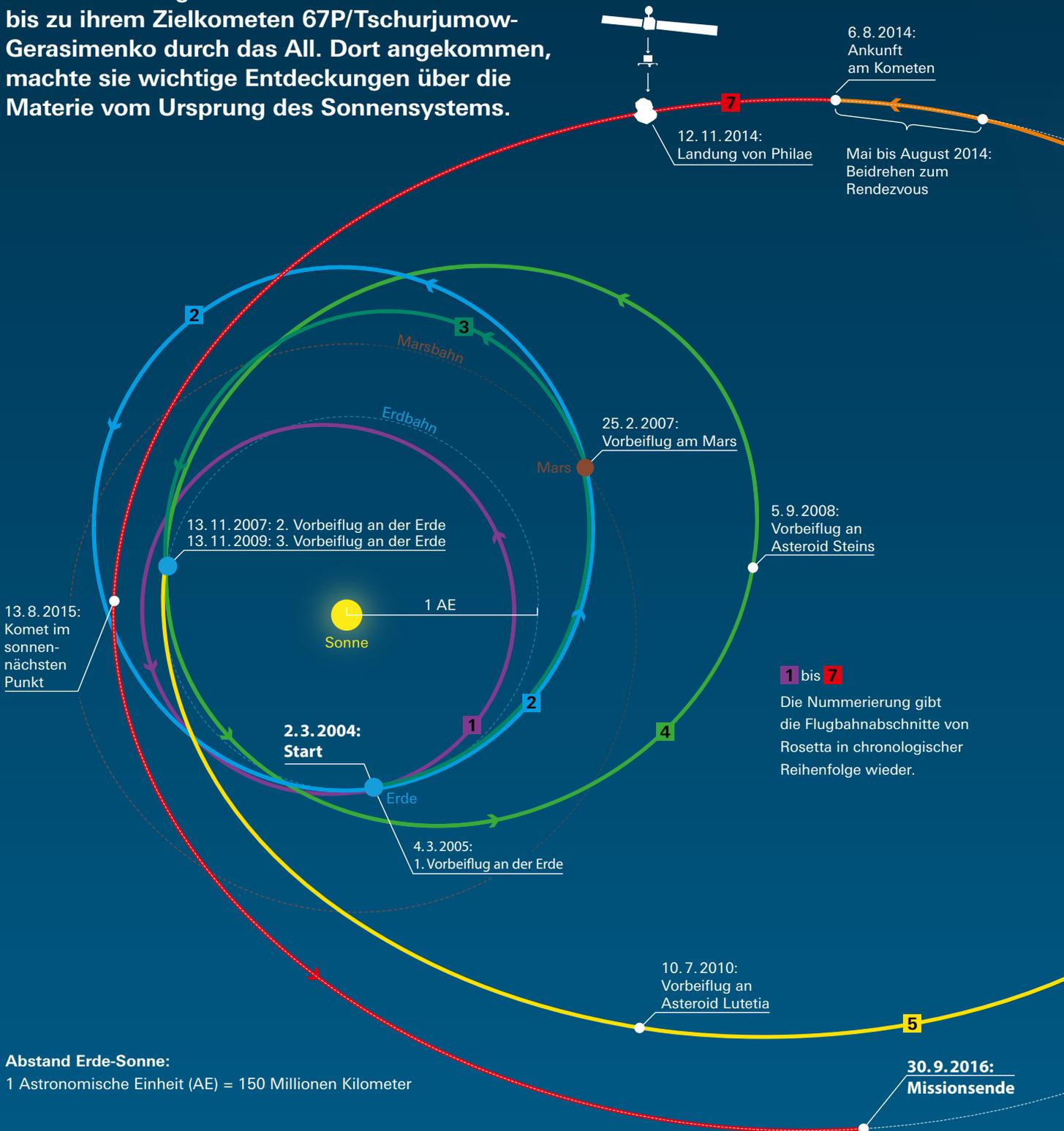
Die Forscher hofften, dass die Sekundärbatterien doch noch genug Sonnenlicht erhalten würden, sobald sich der Komet dem Perihel näherte, also dem sonnennächsten Punkt. Am 13. Juni 2015 meldete sich Philae wieder, allerdings nur für 78 Sekunden. Noch sechsmal konnten die Forscher in den darauf folgenden Tagen Kontakt aufnehmen. Dann verstummte der Lander – für immer. Am 2. September 2016 zeigte er sich endlich auf einer Aufnahme der Osiris-Kamera des Orbiters: Philae war in einen dunklen Felsspalt gerutscht. Das machte es so schwierig, mit ihm in Funkkontakt zu treten.

Wegen der unglücklichen Orientierung konnte Philae nicht wie vorgesehen nach Bodenproben bohren. Allerdings hatte er beim ersten Aufsetzen rund 0,4 Kubikmeter Staub aufgewirbelt. Dieser war in die Öffnung des Massenspektrometers COSAC an der Unterseite der Landeeinheit gelangt, das eigentlich während der Landung die Gase in der Nähe der Oberfläche »erschnüffeln« sollte.

In dem Oberflächenmaterial fanden die Forscher 16 organische Verbindungen. Darunter waren alte Bekannte wie Alkohole, Amine und Nitrile, die bereits in der Koma verschiedener Kometen – auch von der Erde aus – entdeckt worden waren. Zudem tauchten zahlreiche neue Stoffe auf wie Methylisozyanat, Azeton, Propanal und Azetamid. Viele

# EINE SONDE UNTERWEGS ZU KOMET 67P/C-G

Zehn Jahre lang reiste die Raumsonde Rosetta bis zu ihrem Zielkometen 67P/Tschurjumow-Gerasimenko durch das All. Dort angekommen, machte sie wichtige Entdeckungen über die Materie vom Ursprung des Sonnensystems.





**Sonde Rosetta mit Lander Philae**

**Philae landet, kann nicht ankern und kommt erst 1,3 Kilometer abseits vom Bestimmungsort zur Ruhe. Mangels Sonneneinstrahlung kann nur die 1. Messequenz durchgeführt werden.**

**Agilkia, Philaes erster Landeort**

**Jetaktivität**

Als mögliche Quelle der Jets gelten Vertiefungen in der Oberfläche mit Huckeln und Dellen. In der Nähe solch einer Vertiefung ist Rosetta gelandet.

20.1.2014: Ende des Winterschlafs

**Region Ma'at, Landebereich Rosetta**

**Abydos, Philaes finaler Landeort**

**Oberfläche**

Die Oberflächenstruktur des Kometen ist äußerst vielseitig und keineswegs homogen.

**Komplexe Moleküle**

Im Gas, das der Orbiter untersuchte, und im Staub, den Philae kurz vor der Landung aufsammlte, fanden sich viele komplexe Molekülverbindungen.

**Wasser**

Das Verhältnis von schwerem zu gewöhnlichem Wasser auf 67P/C-G ist im Vergleich zur Erde viel größer. Das spricht gegen die Hypothese, dass Kometen aus dem Kuiper-gürtel einst das Wasser auf die Erde brachten.

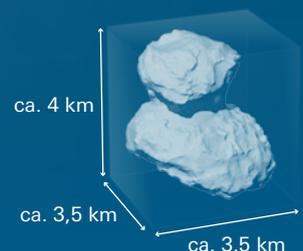
**Molekularer Sauerstoff**

Das O<sub>2</sub> stammt wohl ursprünglich aus interstellaren Molekülwolken und wurde bei sehr niedrigen Temperaturen im Wassereis gebunden.

**Umlaufbahn Komet 67P/Tschurjumow-Gerasimenko**

8.6.2011: Eintritt in Winterschlaf

6



dieser Verbindungen sind potenzielle Ausgangssubstanzen für wichtige biochemische Reaktionen, etwa für die Synthese von Zuckern, Peptiden und Nukleotiden.

Die kombinierte Analyse verschiedener Instrumentendaten zeigte außerdem, dass die erste Landestelle Agilkia von einer etwa 20 Zentimeter dicken Staubschicht überzogen ist. Deren Druckfestigkeit dürfte vergleichbar sein mit der von Neuschnee oder der Daunenfüllung eines Federkissens. Darunter befindet sich möglicherweise eine härtere Schicht. Weder die Füße noch die Eisschrauben von Philae sind dort nennenswert in den Boden eingedrungen. Dagegen zeigt die endgültige Landestelle Abydos ein völlig anderes Bild. Dort konnte der Hammer des MUPUS-Instruments, das unter anderem die Härte des Bodens und die Wärmekapazität des Kometenmaterials messen sollte, die Oberfläche nicht durchbrechen. Ihre Festigkeit dürfte diejenige der ersten Landestelle um das 2000-Fache übersteigen.

Der Orbiter untersuchte seinerseits das vom Kometen abströmende Material mit dem Massenspektrometer Rosina. Obwohl dieses erst ab einer bestimmten Gasdichte präzise messen kann, lieferte es gleich in den ersten Tagen nach dem Einschwenken in die Bahn um den Kometen grundlegende Ergebnisse. So bestimmte es beispielsweise das Verhältnis von schwerem Wasserstoff (Deuterium, D) zu leichtem Wasserstoff.

Dieser D/H-Wert offenbart vermutlich die Entstehungsregion eines Kometen in der protoplanetaren Scheibe, denn das Verhältnis D/H ist temperaturabhängig. In kühleren Regionen, also weiter außen in der protoplanetaren Scheibe, ist Deuterium stärker angereichert als in wärmeren Gegenden weiter innen.

Außerdem spielt der D/H-Wert eine wesentliche Rolle bei der Frage nach der Herkunft des irdischen Wassers. Kurz nach Entstehung der Erde vor 4,6 Milliarden Jahren war ihre Oberfläche noch sehr heiß, und alles ursprüngliche Wasser dürfte verdampft sein. Nachdem sich der Planet abgekühlt hatte, lieferten wahrscheinlich Asteroiden oder Kometen Wasser durch Kollisionen wieder nach. So entstand schließlich eine Umgebung, in der sich Leben entwickeln konnte.

Bisherige Messungen des D/H-Verhältnisses an elf anderen Kometen zeigten eine breite Streuung dieser Werte; nur bei einem einzigen von ihnen, nämlich 103P/Hartley 2, stimmte der Wert mit der Zusammensetzung des Wassers in den irdischen Ozeanen überein. Die entsprechenden Werte in von Asteroiden stammenden Meteoriten passen hingegen sehr gut zum Meerwasser. Zwar enthalten Asteroiden viel weniger Wasser als Kometen, trotzdem könnten sie

die Ozeane gefüllt haben – einfach weil es viel mehr Einschläge solcher Himmelskörper auf die erkalte Erde gab.

Der für 67P/Tschurjumow-Gerasimenko gemessene D/H-Wert überraschte die Wissenschaftler jedoch sehr. Er ist dreimal so hoch wie der irdische, aber auch höher als die bisher bestimmten Werte in Kometen. Jene aus der Oort'schen Wolke sollten einen niedrigeren Wert haben. Denn laut Modellen zur Entwicklung unseres Sonnensystems entstanden diese Objekte ursprünglich in einem Bereich der Jupiterbahn und wurden erst durch Störungen nach außen transportiert. Das stützt die These, dass die Asteroiden die Hauptlieferanten waren und nicht etwa Kometen aus dem Kuipergürtel. Doch durch Rosetta haben wir neue Hinweise erhalten, wonach viele Kometen der Jupiterfamilie sich im frühen Sonnensystem über einen weiteren Bereich von Entfernungen zur Sonne geformt haben müssen als bisher vermutet. Vielleicht werden wir in Zukunft die Klassifizierung in Objekte des Kuipergürtels oder aus der Oort'schen Wolke modifizieren müssen.

### Die wohl größte Überraschung im Kometengas: Molekularer Sauerstoff!

Am meisten erstaunt waren viele Wissenschaftler wohl über den Nachweis von molekularem Sauerstoff, O<sub>2</sub>. Sauerstoff ist das dritthäufigste Element im Sonnensystem, aber als Molekül schwer zu finden, da es hochreaktiv ist und schnell auseinanderbricht, um Bindungen mit anderen Molekülen einzugehen. Vor Rosetta hatte man O<sub>2</sub> nicht mit Kometen in Verbindung gebracht, obwohl es in den Eismonden von Jupiter und Saturn schon entdeckt worden war. Ebenso gab es nur wenige Nachweise des Moleküls in interstellarer Materie, aus der ja das Sonnensystem und damit auch die Kometen entstanden sind.

Höchstwahrscheinlich wurde das O<sub>2</sub>, das wir heute gemeinsam mit dem Wasserdampf von der Oberfläche ausgasen sehen, ursprünglich bei der Kometenentstehung ins Wassereis eingebaut, und zwar in größeren Mengen als alle anderen beobachteten Gase. Vermutlich lagerte sich gasförmiges O<sub>2</sub> während der frühen Phase des Sonnensystems in das Wassereis ein. Chemische Modelle der protoplanetaren Scheibe zeigen, dass jene Regionen, in denen Kometen entstanden, ausreichend O<sub>2</sub> enthalten können. Die Temperaturen müssten dort rasch auf unter –243 Grad Celsius gesunken sein, so dass sich Wassereis mit eingeschlossenem O<sub>2</sub> auf Staubteilchen bilden konnte; das dürfte in den äußeren Bereichen der protoplanetaren Scheibe der Fall gewesen sein. Außerdem müssten diese Staubteilchen dann ohne chemische Veränderungen in den Kometen eingebaut worden sein.

Mit den Erkenntnissen von Rosetta haben die Forscher auch die Messungen des Gasmassenspektrometers auf Giotto, dessen Massenauflösung viel schlechter war, neu analysiert. Anhand des mit der Sonde gefundenen Verhältnisses von O<sub>2</sub> zu H<sub>2</sub>O lassen sich die Spektren sehr gut simulieren und nun eindeutig interpretieren. Es stellte sich heraus, dass wie bei 67P/C-G im Halley'schen Kometen molekularer Sauerstoff ebenfalls das dritthäufigste Eis war.

Aber das Massenspektrometer Rosina hat im Lauf der Mission noch viel mehr gefunden, vor allem komplexe

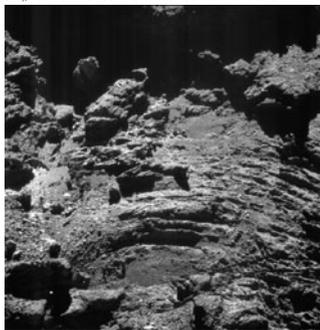


NASA / JPL

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema Sonnensystem finden Sie unter [spektrum.de/t/sonnensystem](http://spektrum.de/t/sonnensystem)

**Wenige Tage vor Rosettas Landung auf Komet 67P/C-G zeigten sich besondere Details: Geröll, Schichtstrukturen und Schlot mit »Gänsehautstruktur« im Inneren. Dort entstehen vermutlich die Staubfontänen.**



Moleküle. So ließ sich etwa erstmals die Aminosäure Glycin eindeutig auf einem Kometen nachweisen. Zwar hatte die Sonde StarDust bereits ein kleines Körnchen davon eingesammelt. Es war jedoch nicht klar, ob es vom Kometen Wild 2 oder aus dem interplanetaren Raum stammte. Ein weiterer wichtiger, zum ersten Mal nachgewiesener Baustein ist Phosphor, der beim Aufbau der DNA und beim Transport chemischer Energie in den Zellen für den Metabolismus eine wichtige Rolle spielt.

### Wie sind die Kometen einst entstanden?

Während ihrer mehr als zweijährigen Reise hat Rosetta 67P/C-G als stark porösen Kometen mit geringer Dichte und doppellappiger Form porträtiert. Die weitläufige Schichtstruktur der beiden Hälften ist ein Hinweis darauf, dass sie ihr Material separat aufgesammelt und sich erst danach vereinigt haben. Da sich beide Bestandteile aber stark gleichen, dürften sie eine ähnliche Entwicklungsgeschichte durchgemacht haben.

Vermutlich sind beide Komponenten dann sehr langsam miteinander kollidiert und aneinander haften geblieben. Andernfalls hätte sich das poröse Material während des Zusammenstoßens entweder mehr verdichtet, oder die beiden Körper wären auseinandergebrochen. Ähnliche Vereinigungsprozesse haben sich wohl auch auf kleinerer Skala abgespielt. In der Region Bastet auf dem Kometenkopf finden sich drei kugelförmige Kappen, von denen man annimmt, dass sie Überreste von kleineren Kometesimalen sind, die bis heute überlebt haben.

Auf noch kleinerem Maßstab von etwa einem Meter ist in Vertiefungen und an Kliffwänden eine raue so genannte Gänsehautstruktur zu erkennen. Obwohl diese Morphologie auch durch Brüche entstanden sein könnte, gehen die Forscher eher davon aus, dass die Klumpen von einer Wachstumsphase mit noch kleineren und kompakteren Kometesimalen zeugen.

Modellrechnungen von protoplanetaren Scheiben zufolge hängt die Geschwindigkeit, mit der die Kometesimale während der Wachstumsphase zusammenstoßen und sich vereinigen, von ihrer Größe ab, da sie in der umgebenden Gasphase Reibung ausgesetzt sind. Für Objekte von einigen Metern Durchmesser ist sie am höchsten. Diese sollten daher auch am kompaktesten und widerstandsfähigsten sein, und genau das hat Rosetta bei Tschurjumow-Gerasimenko beobachtet. Ein alternatives Szenario, nämlich dass Kometen Überreste von Kollisionen größerer Körper sind,

gilt auf Grund der inneren Struktur von 67P/C-G eher als unwahrscheinlich.

Aus den Beobachtungen läßt sich auch ableiten, dass Kometen unter extrem kalten Bedingungen entstanden und sich während beinahe ihrer gesamten Lebensdauer kaum thermisch verändern. Damit bestimmte Eisen überdauern und einige sehr flüchtigen Substanzen erhalten bleiben konnten, müssen sie über einen relativ langen Zeitraum und in sehr kühler Umgebung gewachsen sein.

Rosetta hat die hohen wissenschaftlichen Erwartungen mehr als erfüllt. Auf ihrer Reise konnte die Sonde bereits nach einer Woche in der Bahn um den Kometen mehr Daten sammeln als alle früheren Vorbeiflugmissionen zusammen. Die erste Analyse der Messungen hat bestätigt, dass Kometen tatsächlich aus dem ursprünglichen Material bestehen, aus dem sich vor 4,6 Milliarden Jahren die Planeten gebildet haben. Auch über den Akkretionsprozess, durch den aus den Staub- und Eisteilchen in der protoplanetaren Scheibe die Kometen und schließlich die Planeten gewachsen sind, hat die Mission neue Erkenntnisse geliefert. Wie wichtig Kometen für die Entstehung des Lebens auf der Erde waren, bleibt allerdings weiterhin offen. Vielleicht brauchte es solche Himmelskörper nicht zwingend, um Wasser oder auch organische Moleküle auf die Erde zu bringen, die zur Entwicklung des Lebens notwendig sind. Aber Rosetta hat gezeigt, dass Kometen tatsächlich eine Vielzahl wichtiger komplexer organischer Moleküle bis hin zur Aminosäure Glycin transportieren – das Material also, aus dem in einer günstigen Umgebung Leben unmittelbar hervorgehen könnte.

Die Ergebnisse von Rosetta, von denen hier nur ein sehr kleiner Teil präsentiert ist, werden unser Verständnis von der Entstehung unseres Planetensystems einen großen Schritt weiterbringen. Noch ist es zu früh, um ihre Tragweite endgültig zu verstehen. Es ist sehr viel interdisziplinäre Forschungsarbeit nötig, bis wir auch die Einzelaspekte in einem größeren Zusammenhang begreifen werden.

Und dennoch denken die Forscher bereits über eine nächste Mission zu einem Kometen nach. Dann wollen sie endlich Material von solch einem Himmelskörper entnehmen und in einem Labor auf der Erde untersuchen. ◀

### LITERATURTIPP

*Mehr über die Rosetta-Mission lesen Sie hier:*

**Möhlmann, D., Ulamec, S.:** Raumsonde Rosetta – Die abenteuerliche Reise zum unbekanntesten Kometen. Franckh-Kosmos, Stuttgart 2014

# MATHEMATIK WERDEN COMPUTER DAS WESEN DER MATHEMATIK VERÄNDERN?

**Einer der größten Mathematiker der Gegenwart findet in einer eigenen Arbeit einen Fehler – und stürzt sich in ein Projekt mit dem Ziel, das Beweisen gänzlich dem Computer anzuvertrauen. Dazu muss er nichts weniger als die Grundlagen der Mathematik neu fassen.**

► [spektrum.de/artikel/1427414](https://spektrum.de/artikel/1427414)





**Kevin Hartnett** ist Wissenschaftsjournalist in Columbia (South Carolina).

► Eine Bahnfahrt von Lyon nach Paris ist ein relativ kurzes Vergnügen: Der TGV braucht für die 429 Kilometer gerade mal zwei Stunden – eine knapp bemessene Zeit, wenn man währenddessen seinen Kollegen davon überzeugen will, seine Arbeit fundamental anders zu machen, als das seit jeher üblich ist.

Der Mathematiker Vladimir Voevodsky hat es trotzdem versucht. Und als kurz vor Paris die Idee seinem Fachkollegen Steve Awodey von der Carnegie Mellon University in Pittsburgh (Pennsylvania) immer noch nicht so recht einleuchten will, holt er seinen Laptop aus der Tasche und ruft ein Programm namens Coq auf. Das ist auf den ersten Blick so etwas wie ein spezialisiertes Microsoft Word: Man

schreibt in einer hochgradig formalisierten Notation einen mathematischen Text hinein. Im Zug erarbeitet Voevodsky binnen 15 Minuten mit Hilfe eines neuen, von ihm entworfenen Formalismus namens »Univalent Foundations« die Definition eines mathematischen Objekts. Eigentlich sei das doch ganz einfach, und Awodey möge doch am besten seine Mathematik nur noch in Coq betreiben.

Voevodsky hat gut reden. Der 48-Jährige ist permanentes Fakultätsmitglied am weltberühmten Institute for Advanced Study (IAS) in Princeton (New Jersey). In Moskau geboren, spricht er nahezu akzentfreies Englisch und strahlt die Selbstsicherheit eines Menschen aus, der niemandem mehr etwas beweisen muss. Im Jahr 2002 wurde ihm die Fields-Medaille verliehen, die bedeutendste Auszeichnung auf dem Gebiet der Mathematik. Kaum verwunderlich, wenn er und der Rest der Welt deutlich verschiedene Vorstellungen davon haben, was in der Mathematik einfach ist.

Ein »Beweisassistent« wie Coq beschränkt sich nicht darauf, einen mathematischen Text entgegenzunehmen und zu formatieren; das Programm prüft ihn auch gleich auf Korrektheit – eine faszinierende Idee. Statt auf die eigene Geisteskraft, der immer wieder Fehler unterlaufen, oder die der Kollegen vertraut man auf den Computer. Aber trotz der damit verbundenen Aussicht auf Unfehlbarkeit haben sich Programme zur Beweisprüfung unter den Mathematikern bis heute nicht durchgesetzt. Denn das Formulieren von Mathematik in einer Computersprache ist so überaus mühsam, dass es in den Augen vieler Fachvertreter den Aufwand nicht lohnt.

Seit mittlerweile fast zehn Jahren wirbt Voevodsky für die Vorzüge von Beweisassistenten und entwickelt seine Univalent Foundations weiter mit dem Ziel, den mathematischen Formalismus zu einer Art Programmiersprache zu machen. Das sei schon deswegen unumgänglich, weil einige Zweige der Mathematik inzwischen so abstrakt geworden seien, dass die Nachprüfung ihrer Aussagen den menschlichen Geist überfordere.

»Die Welt der Mathematik erweitert sich ständig, ihre Komplexität nimmt zu, und damit droht auch die Anhäufung von Fehlern«, sagt Voevodsky. Jeder Beweis beruht auf anderen Beweisen, und ein Fehler in einer einzigen Aussage ruiniert alle, die von ihr abhängen.

Das hat Voevodsky selbst erlebt: Im Jahr 1999 entdeckte er in einer sieben Jahre zuvor geschriebenen Arbeit einen Fehler. Und das war kein Einzelfall: Allein aus seinem eigenen Arbeitsgebiet kann er drei bedeutende Resultate aufzählen, deren Beweise sich erst Jahre später als fehlerhaft herausstellten und die bei ihrem Zusammenbruch etliche Arbeiten mit in den Abgrund rissen, die auf ihnen aufbauten. Sein eigenes Ergebnis konnte er zwar retten, indem er ersatzweise eine schwächere Behauptung bewies, die für seine Zwecke ausreichte; aber es bleibt ein nagendes Gefühl der Unsicherheit. Das werde erst wieder verschwinden, so Voevodsky, wenn sein gesamtes Werk mit Hilfe von Computern formalisiert und geprüft sei.

Und das wiederum ist alles andere als einfach. Voevodsky stellte sogar fest, dass er dafür die Grundlagen der Mathematik neu überdenken musste. Allgemein anerkannte Basis der gesamten Mathematik ist heute die Mengenlehre.



ANDREA KANE / INSTITUTE FOR ADVANCED STUDY, PRINCETON, NJ, USA, MIT FROH GEN. DES IAS

Vladimir Voevodsky im Gespräch am Institute for Advanced Study in Princeton.

$$\begin{aligned}
0 & \quad \emptyset \\
1 & \quad \{\emptyset\} \\
2 & \quad \{\emptyset, \{\emptyset\}\} \\
3 & \quad \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}\}
\end{aligned}$$

**Zählen von 0 bis 3 mit Hilfe der elementaren Mengenlehre. Die Null entspricht der leeren Menge, die Eins der Menge, die als einziges Element die leere Menge enthält, und so weiter.**

Diese stellt, wie es sich für eine Grundlage gehört, eine Reihe von Begriffen und Regeln bereit, mit deren Hilfe alle anderen Zweige der Mathematik aufgebaut werden. Mehr als ein Jahrhundert lang erfüllte die Mengenlehre diese Aufgabe zur allseitigen Zufriedenheit; aber sie lässt sich nicht ohne Weiteres in eine Sprache umsetzen, mit der ein Computer mathematische Beweise auf ihre Korrektheit überprüfen könnte. Mit seinem Entschluss, die Mathematik mit Hilfe von Computern zu formalisieren, löste Voevodsky eine Entwicklung aus, an deren Ende nicht weniger steht als die Neufassung des gesamten Unterbaus der Mathematik.

**Die Mengenlehre und der Barbier, der nicht wissen kann, ob er sich selbst rasiert**

Das Elementarste in der Mathematik sind die natürlichen Zahlen? Falsch. Dafür müsste man schon zu viel voraussetzen. Dagegen erfordert eine Menge – in der klassischen Definition als »beliebige Zusammenfassung von Gegenständen unserer Vorstellung oder unseres Denkens« – zunächst einmal gar nichts. Es gibt nämlich eine Menge, die gar keine Gegenstände enthält: die leere Menge. Sie dient zur Definition der Zahl 0.

Die nächste Zahl, 1, wird dann über die Menge definiert, die nur ein einziges Element enthält – die leere Menge. Die

leere Menge und die Menge, die nur die leere Menge enthält, zusammen ergeben eine Menge mit zwei Elementen, und so weiter. Auf diese Weise lässt sich schrittweise jede natürliche Zahl aus Mengen aufbauen, die zuvor gebildet wurden (Bild links).

Im Anschluss an die Definition der natürlichen Zahlen bildet man Brüche als Paare natürlicher Zahlen, daraufhin Dezimalzahlen als unendliche Folgen von Ziffern, dann Funktionen als Mengen geordneter Paare und so weiter. Damit man mit diesen Objekten rechnen kann, muss man noch Dinge festlegen wie zum Beispiel, dass 3/6 und 1/2 dieselbe Zahl sind. Aber auch diese Bildung von Äquivalenzklassen lässt sich mit Hilfe der Mengenlehre formalisieren. »Man bildet nacheinander Mengen von Dingen, die selbst wieder Mengen von Dingen sind, welche ebenfalls Mengen von Dingen sind, bis man schließlich, als Ursprung der gesamten Konstruktion, die leere Menge findet«, so Michael Shulman, ein Mathematiker an der University of San Diego.

Alles, was man zur Grundlegung der gesamten Mathematik braucht, sind also fundamentale Objekte – Mengen – und logische Regeln dafür, wie man aus solchen Objekten neue macht. Die Mengenlehre ist so attraktiv, weil sie mit so wenig auskommt: Ihr einziges fundamentales Objekt ist die leere Menge.

Die Kehrseite dieser Einfachheit ist die Komplexität der Darstellung. Diese erweist sich als besonders problematisch, wenn es um schlichte Gleichheiten oder allgemeiner Beziehungen wie Äquivalenz oder Isomorphie geht. Zum Beispiel stellen der Bruch 1/2 und die Dezimalzahl 0,5 dieselbe Zahl dar, ihre Beschreibungen mit Hilfe von Mengen sind jedoch völlig unterschiedlich. Awodey erläutert: »Ist ein spezielles Objekt erst einmal konstruiert, dann muss man damit auskommen. Man hat dann noch lange nicht Zugriff auf ein anderes, dazu isomorphes Objekt.«

Aber es gibt Alternativen zur Mengenlehre. Die Beweisassistentenprogramme Coq und Agda beruhen auf einem völlig anderen formalen System, der Typentheorie. Diese erwuchs ursprünglich aus dem Bestreben, einem Paradox abzuweichen, das der Philosoph und Logiker Bertrand Russell bereits 1901 entdeckt hatte. Die populäre Version erzählt von dem Barbier, der definiert ist als derjenige Mann, der alle Männer rasiert, die sich nicht selbst rasieren, und in unauflösbare Widersprüche bei der Frage gerät, ob er sich selbst rasiert.

In der mengentheoretischen Version geht es um Mengen, die sich selbst als Element enthalten. Nehmen wir als Beispiel die Menge aller Dinge, die kein Raumschiff sind. Diese Menge ist selbst zweifellos kein Raumschiff; demnach ist sie aber auch ihr eigenes Element.

Russell betrachtete nun die Menge aller Mengen, die sich nicht selbst als Element enthalten, und fragte, ob diese Menge sich selbst enthält. Der Versuch einer Antwort führt auf ein Paradox: Enthält die Menge sich selbst, dann erfüllt sie das definierende Kriterium nicht, also enthält sie sich nicht. Enthält sie sich aber nicht, dann ist sie per Definition Element ihrer selbst, also enthält sie sich ...

Um Paradoxa wie dieses zu vermeiden, verwendet Russells System an Stelle von Mengen vorsichtiger definierte Objekte, die er Typen nennt. Russells Typentheorie beginnt genau wie die Mengenlehre mit einem so genannten Univer-

**AUF EINEN BLICK  
NEUES FUNDAMENT DER MATHEMATIK**

- 1** Der russische Mathematiker Vladimir Voevodsky will Definitionen und Theoreme so formalisieren, dass man das Beweisen an ein Computerprogramm delegieren kann.
- 2** Dazu muss er die bisherige Grundlage der Mathematik, die Mengenlehre, durch eine neue Konstruktion ersetzen: die Typentheorie.
- 3** Die technischen Details dieses Unternehmens sind äußerst mühsam und die Begeisterung der Fachkollegen bislang verhalten. Aber Voevodsky sieht immenses Potenzial in seinen »Univalent Foundations«.



Nach einem unter Mathematikern verbreiteten Scherz ist ein Topologe definiert als jemand, der eine Kaffeetasse nicht von einem Donut unterscheiden kann. Der Mathematiker und Künstler Henry Segerman von der University of Melbourne (Australien) hat diesen Witz mit dem 3-D-Drucker in Keramik umgesetzt.

sum von »Urobjekten«. Eine Zusammenfassung von Urobjekten ist ein neues Objekt vom Typ MENGE. Und dieser Begriff ist sehr eng gefasst: Eine MENGE darf ausschließlich Objekte zusammenfassen, die nicht selbst Zusammenfassungen anderer Dinge sind. Enthält eine Zusammenfassung andere Zusammenfassungen, dann ist sie keine MENGE mehr. Man muss dann einen neuen Typ namens – zum Beispiel – MEGAMENGE einführen; diese Bezeichnung gilt genau für jede Zusammenfassung von Objekten, die selbst Zusammenfassungen von Urobjekten sind.

### Zwei verschiedene Arten, Äpfel mit Birnen zu vergleichen

Nach diesem Prinzip wird das gesamte System folgerichtig weiter aufgebaut: Der Typ SUPERMEGAMENGE fasst also nur Objekte zusammen, die selbst MEGAMENGEN sind, und so weiter. In diesem ziemlich starren Rahmen ist Russells Frage bedeutungslos, denn eine MENGE kann sich ohnehin nicht selbst enthalten, ebenso wenig wie eine MEGAMENGE, eine SUPERMEGAMENGE und so weiter.

Mengenlehre und Typentheorie unterscheiden sich – unter anderem – im Umgang mit Theoremen. In der Mengenlehre ist ein Theorem keine Menge, sondern eine Aussage über Mengen. Im Gegensatz dazu fassen einige Versionen der Typentheorie Theoreme als Typen auf. Und zwar sind die Elemente des Typs alle verschiedenen Möglichkeiten, das Theorem zu beweisen. Der Typ SATZ DES PYTHAGORAS fasst also alle Beweise dieses Satzes zusammen.

Um diesen Unterschied zwischen Mengenlehre und Typentheorie deutlich werden zu lassen, betrachten wir zwei Mengen: Die Menge  $A$  besteht aus zwei Äpfeln und  $B$  aus zwei Birnen. Die beiden Mengen sind äquivalent oder auch »gleichmächtig«, weil sie dieselbe Anzahl von Elementen

enthalten. Um das formal zu demonstrieren, bildet man Paare aus je einem Element der ersten und einem der zweiten Menge. Geht das auf, bleibt also in keiner Menge ein Objekt ungepaart, dann sind sie äquivalent. (Dieses wenig tiefsinnige Verfahren wird erst richtig interessant, wenn es um die Äquivalenz unendlicher Mengen geht.)

Führt man diese Paarbildung tatsächlich durch, dann stellt sich heraus, dass es dafür zwei Möglichkeiten gibt: Apfel 1 mit Birne 1 und Apfel 2 mit Birne 2, oder Apfel 1 mit Birne 2 und Apfel 2 mit Birne 1. Die beiden Mengen sind also sozusagen auf zweierlei Art äquivalent.

Für einen herkömmlichen mengentheoretischen Beweis des Satzes  $A \approx B$  (das Symbol  $\approx$  bedeutet »ist äquivalent zu«) geht es nur darum, ob es überhaupt eine solche Paarung gibt. In der Typentheorie dagegen ist der Satz  $A \approx B$  eine Zusammenfassung aller Möglichkeiten, diese Äquivalenz zu beweisen (in unserem Fall also zwei). In der Mathematik gibt es oft gute Gründe, über die Vielfalt solcher Möglichkeiten Buch zu führen; die Typentheorie macht das automatisch, indem sie diese Äquivalenzen zu einem eigenen Typ bündelt.

Das ist besonders nützlich in der Topologie. Dieser Zweig der Mathematik untersucht die Eigenschaften von Punktmengen (»topologischen Räumen«), bei denen es auf Längen und Winkel nicht ankommt. Ein Kreis oder ein Torus (die Oberfläche eines Donuts) ist zwar ein topologischer Raum, aber vom Standpunkt der Topologie ist es belanglos, ob der Kreis klein oder groß, ebenmäßig oder irgendwie verdellert ist (Bild oben). Um nicht über jeden topologischen Raum einzeln nachdenken zu müssen, schafft man Ordnung in der unübersehbaren Vielfalt der Räume, indem man eine Äquivalenzrelation unter ihnen etabliert. Sie heißt Homotopie, und zwei Räume heißen homotopieäquivalent, wenn

A R Q  
C X K

**Vom Homotopiestandpunkt aus sind die Buchstaben der oberen Zeile alle gleich, ebenso die der unteren Zeile. Es kommt – für zweidimensionale Objekte – nur auf die Anzahl der Löcher an.**

man sie, grob gesagt, durch Deformationen ohne Zerreißen oder Zusammenkleben ineinander überführen kann.

So sind ein Punkt und eine Gerade homotopieäquivalent, denn die Gerade lässt sich auf den Punkt zusammenziehen; man sagt auch, Punkt und Gerade haben denselben Homotopietyp. Der Buchstabe P hat denselben Homotopietyp wie der Buchstabe O, denn der »Schwanz« des P lässt sich zu einem Punkt auf dem oberen Halbkreis zusammenziehen, und der kann in ein O verformt werden. Beide haben auch denselben Homotopietyp wie jeder andere Buchstabe des Alphabets, der ein einziges Loch hat, zum Beispiel A, D, Q und R (Bild oben). Dagegen gehört B zu einem anderen Typ.

Topologen verwenden vielfältige Methoden, um die Eigenschaften eines Raums zu untersuchen und ihren Homotopietyp zu bestimmen. Eine der einfachsten und wichtigsten betrachtet alle Wege zwischen verschiedenen Punkten des Raums und deren Beziehungen zueinander. Genau dafür erweist sich die Typentheorie als bestens geeignet. Zum Beispiel kann man zwei Punkte eines Raums für äquivalent erklären, wenn es einen Weg gibt, der beide miteinander verbindet. (Das ist eine andere Art von Äquivalenz als die Homotopieäquivalenz!) Alle Wege von  $x$  nach  $y$  bilden dann wieder einen eigenen Typ, nämlich alle Beweise für den Satz  $x \approx y$ .

Mit Hilfe von Wegen zwischen Punkten kann man Homotopietypen konstruieren. Ebenso erlaubt es der Formalismus, Wege zwischen Wegen zu Typen zu bündeln oder Wege zwischen Wegen zwischen Wegen und so weiter. Diese Wege zwischen Wegen kann man als Beziehungen höherer Ordnung zwischen Punkten in einem Raum auffassen.

Seit seinen ersten Studienjahren an der Moskauer Staatsuniversität Mitte der 1980er Jahre unternahm Voevodsky immer wieder Versuche, die Mathematik so zu formalisieren, dass sich mit solchen Beziehungen höherer Ordnung – Wegen zwischen Wegen zwischen Wegen – auf elegante Weise arbeiten ließe. Zunächst probierte er es mit einem bereits bekannten formalen System, der Kategorientheorie. Aber wie auch seine Fachkollegen erfahren mussten (**Spektrum** 7/2015, S. 52), war der Erfolg dieser Methode begrenzt und blieb in einigen Gebieten der Mathematik ganz aus.

In den Jahren, nachdem ihm die Fields-Medaille verliehen worden war, wandte sich Voevodsky dem Problem mit frischem Mut zu. Ende 2005 hatte er nämlich eine Art Erweckungserlebnis. Sobald er zur Untersuchung von Beziehungen höherer Ordnung eine Struktur namens Unendlich-Gruppoid heranzog, »begannen sich die Teile wie von selbst zusammenzufügen«, erzählt er.

Unendlich-Gruppoiden erfassen alle möglichen Wege eines Raums auf einmal, also auch Wege zwischen Wegen,

Wege zwischen Wegen zwischen Wegen und so weiter. Andere Forscher hatten sie schon mit Erfolg zur Beschreibung ähnlicher Beziehungen höherer Ordnung eingesetzt, aber vom Standpunkt der Mengenlehre sind sie sehr unhandlich und galten daher als völlig unbrauchbar für irgendwelche fundamentalen Bemühungen zur Formalisierung der Mathematik.

Dann gelang es Voevodsky jedoch, eine Interpretation der Typentheorie in der Sprache der Unendlich-Gruppoiden zu finden. Dadurch konnte man auf einmal erfolgreich mit Unendlich-Gruppoiden arbeiten, ohne an Mengen auch nur denken zu müssen. Dieser Durchbruch führte schließlich zur Entwicklung der Univalent Foundations.

Die Idee eines auf Gruppoiden aufbauenden formalen Systems faszinierte Voevodsky – und zugleich schreckte ihn der technische Aufwand dafür. Und selbst wenn er Erfolg hätte, dann würden die anderen Mathematiker nicht in der Lage sein, das nachzuvollziehen oder gar Fehler zu finden, so fürchtete er, denn nach seinen Erfahrungen bröckelte sein Vertrauen in die Kontrolle durch die Fachkollegen (»peer review«) beträchtlich.

### **Auf dem Weg zu einem neuen grundlegenden System**

In den Gruppoiden hatte Voevodsky seinen Forschungsgegenstand gefunden; es blieb nur noch ein System zu finden, um die Sache sauber formalisieren zu können. Im Jahr 2005 stieß er auf eine Arbeit, die geradezu beängstigend genau das enthielt, wonach er suchte.

Der schwedische Logiker Per Martin-Löf hatte 1972 seine eigene Version der Typentheorie vorgelegt. Sie war inspiriert von einer formalen Sprache namens Automath, die ihrerseits zur Überprüfung von Beweisen per Computer ausgelegt war. Vor allem von Computerwissenschaftlern hatten seinerzeit Martin-Löfs Typentheorie (kurz MLTT) eifrig aufgegriffen und auf ihrer Grundlage Beweisassistenten entwickelt.

Mitte der 1990er Jahre hielt diese Art der Typentheorie auch in der reinen Mathematik Einzug. Ein wesentlicher Schritt kam von dem ungarisch-kanadischen mathematischen Logiker Michael Makkai, damals an der McGill University in Montreal, seit 2010 im Ruhestand. Makkai bemerkte, dass man MLTT zur Formalisierung der Kategorientheorie und ihrer Varianten höherer Ordnung einsetzen kann. Seine Arbeit »First Order Logic with Dependent Sorts« (FOLDS) kam für Voevodsky einer Erleuchtung gleich. Beim ersten Lesen hatte er den Eindruck, »beinahe ein Selbstgespräch in gutem Sinn« zu führen, berichtet er später.

Voevodsky folgte Makkais Weg, verwendete jedoch Gruppoiden an Stelle von Kategorien. Damit gelang es ihm, tiefe Beziehungen zwischen Homotopie- und Typentheorie zu finden. »Das ist eins von diesen magischen Ereignissen«, sagt Shulman. »Was diese Programmierer eigentlich formalisieren wollten, war die Typentheorie – und am Ende hatten sie es mit der Homotopietheorie getan.«

Voevodsky würde der Bezeichnung »magisch« durchaus zustimmen, sieht jedoch hinter der neu entdeckten Verbindung noch weit mehr: einen Meilenstein auf dem Weg zur ersehnten computergerechten Neufundierung der Mathe-

matik. Selbst er brauchte aber noch vier Jahre, um diese Erkenntnis mathematisch präzise zu fassen. Von 2005 bis 2009 entwickelte Voevodsky verschiedene Hilfsmittel, mit denen Mathematiker »erstmalig auf konsistente und bequeme Weise« mit Mengen in der MLTT arbeiten können. Dazu gehören ein neues Axiom, das so genannte Univalentenzaxiom, sowie eine vollständige Interpretation der MLTT in der Sprache der simplizialen Mengen, die neben den Gruppoiden eine andere Möglichkeit zur Beschreibung von Homotopietypen sind.

»Die Konsistenz und Bequemlichkeit kommen nicht von ungefähr«, sagt Daniel Grayson, ein emeritierter Mathematikprofessor an der University of Illinois in Urbana-Champaign. »Die Stärke des Formalismus Univalent Foundations liegt darin, dass er auf eine bis dahin verborgene Struktur in der Mathematik zugreift. Sein Reiz – vor allem für den, der ihn an die Stelle der Mengenlehre setzen will – liegt darin, dass Ideen aus der Topologie plötzlich in den Grundlagen der Mathematik eine Rolle spielen.«

### Von der Idee zur Tat

Eine neue Grundlage für die Mathematik zu entwickeln, ist eine Sache, sie zu »verkaufen« eine völlig andere. Ende 2009 hatte Voevodsky die Einzelheiten der Univalent Foundations ausgearbeitet; jetzt fühlte er sich bereit, sie unter die Leute zu bringen. Ihm war klar, dass er auf große Skepsis stoßen würde: »Sich hinzustellen und zu sagen, ich habe hier etwas Besseres als die Mengenlehre, das ist schon ein starkes Stück.«

Öffentlich stellt Voevodsky seine Ideen erstmals Anfang 2010 an der Carnegie Mellon University vor und dann 2011 am Mathematischen Forschungsinstitut in Oberwolfach. Bei den Vorlesungen in Carnegie Mellon traf er Steve Awodey, der mit seinen Studenten Michael Warren und Peter Lumsdaine auf dem Gebiet der Homotopietheorie gearbeitet hatte. Bald darauf beschloss Voevodsky, eine größere Gruppe zu intensiverer Arbeit zusammenzurufen.

Gemeinsam mit Thierry Coquand, einem Computerwissenschaftler an der Universität Göteborg (Schweden), organisierten Voevodsky und Awodey für das akademische Jahr 2012/13 am IAS ein spezielles Forschungsjahr zu diesem Thema. Mehr als 30 Computerwissenschaftler, Logiker und Mathematiker aus aller Welt nahmen daran teil. »Die dabei diskutierten Ideen seien so seltsam gewesen, dass zu Beginn »kein einziger der Teilnehmer sich wohl dabei gefühlt hat«, so Voevodsky.

Seltsam schon, aber zugleich auch aufregend. Shulman verschob für das Projekt sogar den Antritt eines neuen Jobs. »Viele von uns hatten das Gefühl, den Beginn von etwas Großem, wirklich Wichtigem mitzuerleben«, sagt er, »und dass es einige Opfer wert sei, daran beteiligt zu sein.«

Nach diesem speziellen Forschungsjahr teilten sich die Aktivitäten in verschiedene Richtungen auf. Eine Gruppe von Forschern, darunter Shulman, die sich »HoTT Community« (für Homotopietyp-Theorie) nennt, forschte innerhalb des von ihnen entwickelten Rahmens weiter. Eine andere Gruppe, mit Voevodsky und unter dem Namen »UniMath«, unternahm nichts weniger, als die Mathematik in der Sprache der Univalent Foundations neu zu schreiben. Sie wollten

eine Bibliothek fundamentaler mathematischer Elemente bereitstellen – Sätze, Hilfssätze, Beweise –, mit denen jeder Mathematiker seine eigene Arbeit in der Sprache der Univalent Foundations formalisieren könnte.

Mit dem Anwachsen der Gruppen HoTT und UniMath verbreiteten sich auch die zugehörigen Ideen. »Mittlerweile gibt es keine Tagung mehr ohne einen Vortrag über Homotopietheorie«, so Henry Townser, Logiker an der University of Pennsylvania. »Erst war das so ein Modewort. Bis man erkennt, was die tatsächlich machen und warum es vielleicht doch keine bloße Spielerei ist, dauert es eine Weile.«

Für die Aufmerksamkeit der Fachwelt ist es sicherlich hilfreich, dass Voevodsky, allgemein anerkannt als einer der größten Mathematiker seiner Generation, für die Univalent Foundations entritt. Michael Harris, ein Mathematiker an der Columbia University, widmet dem Projekt in seinem Buch »Mathematics without Apologies« eine ausführliche Diskussion. Die Wissenschaft darin findet er beeindruckend. Ob aber wirklich alle Fachleute ihre Arbeit in den Univalent Foundations formalisieren und vom Computer prüfen lassen würden?

»So wie ich das sehe, reißen sich die Mathematiker nicht gerade darum«, sagt er. »Ich verstehe, warum Computerwissenschaftler und Logiker darauf abfahren, aber Mathematiker streben doch nach etwas anderem.«

Voevodsky ist sich darüber im Klaren, dass die Mathematiker nicht gerade auf eine Neufassung ihrer Grundlagen gewartet haben, und gibt zu, dass zurzeit mehr Lärm um die Sache gemacht wird, als die Leute goutieren. Gegenwärtig arbeitet er an der Formalisierung der Beziehungen zwischen MLTT und Homotopietheorie mit Hilfe der Univalent Foundations – in seinen Augen der nächste notwendige Schritt. Er hat auch vor, dasselbe mit dem Beweis der Milnor-Vermutung zu tun, für den er die Fields-Medaille bekam. Ein Erfolg würde zweifellos die Fachkollegen zum Mitmachen ermuntern.

Langfristig möchte Voevodsky mit Hilfe der Univalent Foundations Aspekte der Mathematik untersuchen, die im Rahmen der Mengenlehre nicht erreichbar sind. Im Moment hält er jedoch in erster Linie Sorgfalt für geboten. Immerhin war die Mengenlehre über ein Jahrhundert lang die Grundlage der Mathematik; wenn die Univalent Foundations ebenso haltbar sein sollen, kommt es entscheidend darauf an, am Anfang alles richtig zu machen. ◀

### QUELLEN

**Autorenkollektiv:** The »HoTT Book«. Homotopy Type Theory: Univalent Foundations of Mathematics. Institute for Advanced Study, 2013. <https://homotopytypetheory.org/book/>

**Makkai, M.:** First Order Logic with Dependent Sorts, with Applications to Category Theory (FOLDS). [www.math.mcgill.ca/makkai/folds/foldsinpdf/FOLDS.pdf](http://www.math.mcgill.ca/makkai/folds/foldsinpdf/FOLDS.pdf)



Nach der redigierten Fassung aus »Quantamagazine.org«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus der Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

# BRONZEZEIT DIE ERFORSCHUNG TROJAS – EIN FAZIT



Das mächtige Troja VI (1700–1350 v. Chr.) umfasste eine gut befestigte Burg für die Kriegerelite und eine Unterstadt. Die Rekonstruktion zeigt den Zustand der späten Phase (1400–1300 v. Chr.), mit einem Turm (vorn) des folgenden Troja VIIa.



**Spätestens seit Heinrich Schliemann gilt ein Ruinenhügel an den Dardanellen als Schauplatz des von Homer besungenen Kriegs. Knapp 150 Jahre später ziehen Tübinger Archäologen ein Resümee: Troja war ein Zentrum der Späten Bronzezeit – und überstand so manche Eroberung.**



Der Archäochemiker **Ernst Pernicka** (links) lehrt Archäometrie an der Universität Heidelberg und ist wissenschaftlicher Direktor und Geschäftsführer der Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie gGmbH in Mannheim. Er leitete die Grabungen in Troja sowie die Aufarbeitung der Ergebnisse in den Jahren 2006 bis 2013. Die promovierten Archäologen **Peter Jablonka** und **Magda Pieniżek** vom Institut für Ur- und Frühgeschichte und Archäologie des Mittelalters der Universität Tübingen sind langjährige Mitarbeiter im Troja-Projekt. Peter Jablonka nahm an den Grabungen ab 1987, Magda Pieniżek ab 1999 teil.

► [spektrum.de/artikel/1427410](https://www.spektrum.de/artikel/1427410)

Für Griechen und Römer stand es außer Frage, dass »Ilias« und »Odyssee«, die Epen des griechischen Dichters Homer, nicht Fiktion waren, sondern die kunstvolle, aber korrekte Schilderung eines epochalen Kriegs. Auch über den Ort herrschte weitgehend Konsens: Troja war ein Ruinenhügel nahe den Dardanellen, der Engstelle zwischen Ägäis und Marmarameer. Bis in die Neuzeit galten die Epen als Geschichtswerke, erst der deutsche Altphilologe Friedrich August Wolf hinterfragte 1795 ihre Entstehung, bis sie schließlich nur noch als literarische Verarbeitung eines Mythos galten.

Daher war es ein gewagtes Unterfangen, als Heinrich Schliemann (1822–1890) den Spaten auf dem »Burghügel« ansetzte, türkisch Hisarlık. Denn mit den Mitteln der damals noch jungen Archäologie wollte er allen Unkenrufen zum Trotz beweisen: Homers Werke haben einen historischen Kern, und die Ruinen über den Dardanellen sind die Überreste Trojas. Der gelehrte Kaufmann hatte unter anderem mit der Lieferung von Munitionsrohstoffen an die zaristische Armee ein Vermögen verdient; nun setzte er es ein, um seiner Leidenschaft für das Altertum zu frönen. Gut 150 Jahre später, nach Abschluss und Auswertung umfangreicher internationaler Grabungsprojekte, steht der letzte Beweis noch immer aus. Sicher ist, dass jene Burg samt der angrenzenden Siedlung ein politisches und wirtschaftliches

CHRISTOPH HAUSNER

Zentrum der Späten Bronzezeit war. Sicher ist ebenso, dass beide im Zuge gewaltsamer Ereignisse tatsächlich zerstört wurden, vermutlich sogar mehrmals. Dabei könnten Invasoren vom griechischen Festland – Homers Achaier – durchaus eine Rolle gespielt haben, möglicherweise auch die unter dem Begriff Seevölker subsumierten Gruppen, die um 1200 v. Chr. zum Untergang der bronzezeitlichen Großreiche beitrugen. Nicht auszuschließen sind des Weiteren lokale Konflikte und Revolten.

Falls der Trojanische Krieg Realität war, so wütete er in ferner Vergangenheit. Schliemann vermutete seine Spuren daher tief unter jüngeren Schichten; mit diesem Ansatz legte er die Grundlagen der archäologischen Stratigrafie. Hunderte Arbeiter schlugen ab 1870 einen 20 Meter breiten Graben durch den Hügel. Direkt auf dem Grundgestein kamen in der untersten Siedlungsschicht Troja I lediglich Hinweise auf ein unscheinbares Dorf zum Vorschein, das nach heutiger Kenntnis um 3000 v. Chr. gegründet wurde. Darüber aber stießen die Männer auf die Mauern einer wohl von einer Feuersbrunst zerstörten Festung. Diese Schicht barg zudem spektakuläre Goldfunde. Schliemann glaubte sich bereits am Ziel und sprach vom »Schatz des Priamos«. Heute wissen wir, dass er rund 1000 Jahre zu alt ist, um aus Homers Troja zu stammen.

Schliemann hatte seinen Fehler wahrscheinlich selbst noch erkannt. Weil er den Goldschatz ohne Genehmigung außer Landes brachte, durfte er eine Zeit lang in der Türkei nicht weiterarbeiten. Er wich auf Mykene aus, der Sage nach Residenz des Königs Agamemnon, des Heerführers der Koalition gegen Troja. Die mykenische Kultur galt als bester Kandidat für Homers Achaier. Doch was Schliemann dort ans Licht brachte, unterschied sich deutlich von seinen Funden aus Troja II; beide konnten also nicht der gleichen Zeitstufe angehören. Nach seiner Rückkehr auf den Hisarlık entdeckte der Deutsche andererseits mykenische Keramik – in der Siedlungsschicht Troja VI (1750–1300 v. Chr.). Sein Mitarbeiter und Nachfolger Wilhelm Dörpfeld (1853–1940) hielt diese für den Schauplatz des Krieges. Der amerika-

nische Archäologe Carl W. Blegen, der in den 1930er Jahren auf dem Hisarlık grub, verlegte die Festung des Königs Priamos auf Grund seiner Baubefunde um eine Schicht nach oben, also nach Troja VIIa (1300–1200/1180 v. Chr.).

### **International das Archäologenteam, interdisziplinär der Forschungsansatz**

Ein internationales Team ging 1987 unter Leitung des Tübinger Archäologen Manfred Korfmann und seit 2005 unter der von Ernst Pernicka erneut zu Werk. Im Fokus stand nun die Erforschung der spätbronzezeitlichen Unterstadt, was das Gesamtbild des Orts völlig veränderte. Amerikanische Archäologen unter Leitung von Charles Brian Rose von der University of Pennsylvania in Philadelphia erkundeten erstmals auch das Troja der griechischen und römischen Antike. 2012 endete das Projekt, eine Gesamtpublikation der Ergebnisse ist in Arbeit. Inzwischen führt ein türkisches Team die Grabungen in geringerem Umfang fort.

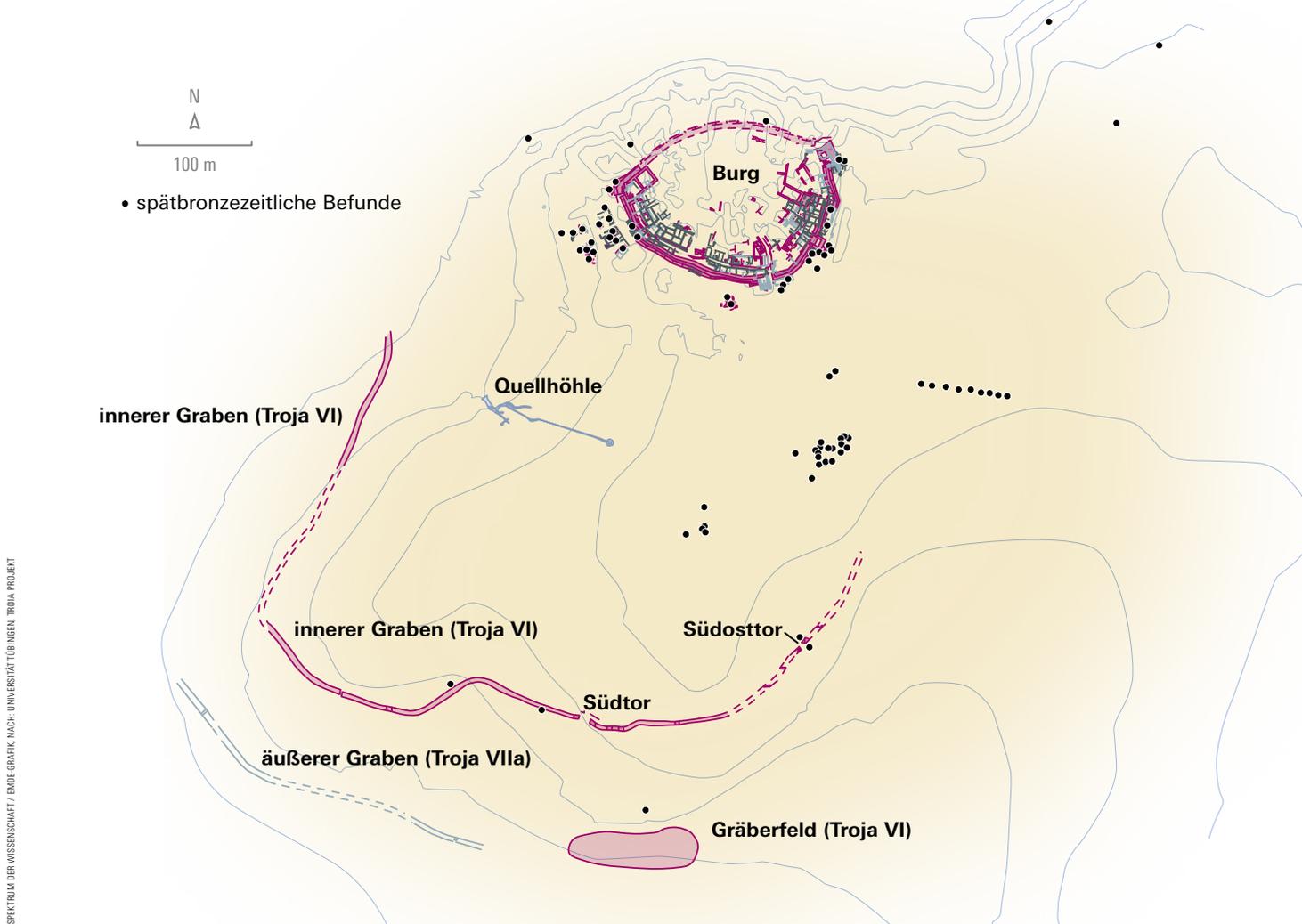
Naturwissenschaftliche Untersuchungen von Pflanzen- und Tierresten, Keramik, Metall und anderem haben neue Erkenntnisse zur Ernährung und Wirtschaftsweise erbracht. Geophysikalische Prospektionen und archäologische Sondagen veränderten die Vorstellung über Struktur und Ausmaße des Orts. Hunderte Bohrkern halfen, die Veränderungen der Landschaft zu rekonstruieren, insbesondere der Küstenlinie und der Flussläufe. Grabungen in der Umgebung erschlossen die Besiedlungsgeschichte.

Freilich lässt die griechische Überlieferung niemanden unberührt, der auf dem Hisarlık gräbt. Denn wer Homer liest, erkennt die von ihm beschriebene Szenerie mit ihren Flüssen, Bergen und vorgelagerten Inseln sofort wieder. In Details wich er zwar ab, doch schon Schliemann notierte vier Jahre nach Grabungsbeginn (gekürzt): »Homer ist nun einmal kein Historiker, sondern ein Dichter, und man muss ihm die Übertreibung zugutehalten.« Mit diesem kritischen Blick aber kam bislang noch jeder Ausgräber zu dem Schluss: Homers Beschreibungen passen zum Hisarlık.

Es besteht also kein Anlass, Troja andernorts zu suchen, wie es gelegentlich medienwirksam versucht wird. Zwar gab es entsprechende Anstrengungen schon in der Antike, doch die waren wohl eher lokalpatriotischer Eifersucht geschuldet. Der Geograf Strabon (etwa 63 v.–23 n. Chr.) schrieb zum Beispiel, dass Ilion – Homers zweiter Name für den Ort –, nicht jenes griechische Ilion an den Dardanellen sei, sondern weiter landeinwärts bei einem Dorf der Ilier gelegen haben müsse. Strabon zitierte als Beleg die Gelehrte Hestiaia, der zufolge die Ebene vor Ilion erst nach besagtem Krieg durch Flussablagerungen in einer Meeresbucht entstanden sei. Wo also hätten die Heere miteinander kämpfen sollen? Die jüngsten Forschungen bestätigen tatsächlich die Auffüllung der Bucht, würden aber für die fragile Zeit rund um den Burghügel noch genug Raum lassen. Pikanterweise stammte Hestiaia wohl aus einer mit Ilion konkurrierenden Stadt. Übrigens hatte auch Schliemann zunächst einige Kilometer weiter südlich nach Troja gesucht, bis ihn Frank Calvert, ein an den Dardanellen lebender Brite, auf den Hisarlık hinwies. Wie der später als Troja-Entdecker gefeierte Schliemann war er vom Altertum begeistert, doch fehlten ihm die Mittel für größere Ausgrabungen.

## **AUF EINEN BLICK WAS HOMER NICHT WUSSTE**

- 1** Die Stadt Ilion galt in der Antike als der Ort, an dem früher das mächtige Troja herrschte. Archäologen bestätigen, dass dort in der Bronzezeit ein bedeutendes politisches und wirtschaftliches Zentrum florierte.
- 2** Anhand archäologischer Befunde sowie hethitischer Schriftquellen lassen sich Kandidaten für ein Troja ausmachen, das in einem Krieg untergegangen sein könnte: Troja VI (um 1300 v. Chr.) und Troja VIIa (um 1200 v. Chr.).
- 3** Die gesellschaftlichen Veränderungen in den jeweiligen Phasen belegen einen enormen Überlebenswillen der einheimischen anatolischen Bevölkerung, aber auch ihre Offenheit gegenüber fremden Einflüssen.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK NACH UNIVERSITÄT TÜBINGEN, TROJA PROJECT

Natürlich wäre es großartig, eine beschriftete Tontafel aus der Bronzezeit in Troja zu Tage zu fördern, die den Namen des Ortes nennt. Im mykenischen und hethitischen Kulturraum kommt so etwas gelegentlich vor. Tatsächlich gibt es aber aus ganz Westkleinasien bisher kaum vergleichbare Funde. War die Verwaltung dort nicht so weit entwickelt? Dies lässt sich leider nicht beantworten. Möglicherweise wurden lediglich vergänglichere Schriftträger wie mit Wachs überzogene Holztafeln verwendet. Im berühmten Schiffswrack von Uluburun, das in jener Zeit versank, wurde eine solche Tafel geborgen, vom Schlick über die Jahrtausende vor dem Zerfall bewahrt.

Das einzige in Troja entdeckte beschriftete Artefakt ist ein Metallsiegel, das die Namen eines Schreibers und einer Frau in luwischer Hieroglyphenschrift nennt (siehe Bild rechts). Man hat es in der Schicht Troja VIIb (1200/1180–1050 v. Chr.) gefunden, es ist aber durch Gebrauch so stark abgenutzt, dass es auch älter sein könnte. Verwendet wurden solche Siegel vor allem im Hethiterreich des 13. Jahrhunderts v. Chr., wo das Luwische weit verbreitet war. Ähnliche Objekte entdeckten Archäologen vereinzelt sogar in Griechenland. Für sich allein genommen bietet dieser Fund daher allenfalls einen schwachen Hinweis auf Kontakte Trojas zu den Hethitern. Ob der namentlich genannte Schreiber vor Ort wohnte oder ob man dort gar Luwisch sprach, lässt sich anhand eines Einzelfunds nicht beantworten.

Um die Überlieferungslücke zu füllen, ziehen Forscher die Tontafelarchive der hethitischen Hauptstadt Hattuscha zu

Zwei Gräben markierten vermutlich die Grenzen der Unterstadt in den Phasen Troja VI und VIIa (oben). Ein Siegel mit luwischen Hieroglyphen (unten eine Rekonstruktion) ist das einzige bislang entdeckte »Schriftstück« dieser Zeit.

UNIVERSITÄT TÜBINGEN, TROJA PROJECT



Rate. Schon vor fast 100 Jahren fiel auf, dass Orts- und Personennamen in einigen Dokumenten solchen bei Homer ähneln: Taruisa erinnert an Troja, der Ländername Wilus(ij)a an (W)ilios (eingeklammert sind Varianten der Lesart), das Reich Ahhijawa an Homers Achaier. Viele geografische Bezeichnungen wissen Hethitologen nicht zu verorten, doch lässt sich Wilusa immerhin auf Grund verschiedener Angaben im Nordwesten Kleinasiens lokalisieren. Dass es mit dem epischen Troja identisch war, ist damit nicht bewiesen, immerhin aber sehr plausibel.

### Wilusa – der hethitische Name für Troja?

Den Dokumenten zufolge gehörte das unabhängige Wilusa zum hethitischen Einflussbereich. Es schloss sich vor 1400 v. Chr. einem Aufstand an – und scheiterte. Um 1300 wurde die Westküste Kleinasiens immer wieder von einem gewissen Piyamaradu angegriffen. Dieser gehörte wohl zur Dynastie eines Reichs namens Arzawa und war zudem ein Verbündeter des Königs von Ahhijawa. Wilusas Regent Alaksandu schloss vielleicht deshalb um 1280 v. Chr. einen Vertrag mit dem Hethiterkönig Muwattalli II., obwohl er Autonomie kostete: Wilusa wurde zum Vasallenstaat, durfte also etwa keine eigene Außenpolitik mehr betreiben.

Offenbar ließ sich der Aggressor davon wenig beeindrucken, wie ein weiterer Brief indirekt verrät: Um 1250 schrieb der Hethiterkönig Hattusilis III. dem König von Ahhijawa, dass bezüglich Wilusas doch inzwischen Einigkeit bestünde, worauf dieser Piyamaradu hinweisen möge. Etwa 50 Jahre später taucht der Ort ein letztes Mal in der hethitischen Reichskorrespondenz auf: Wilusas König Walmu war anscheinend entmachtet worden, und der amtierende hethitische Herrscher versuchte, ihn wieder einzusetzen. Bald

danach ging Hattuscha selbst unter, und damit endete die schriftliche Überlieferung.

Auch der Blick zu anderen bronzezeitlichen Schriftkulturen bringt kaum weiter. Zwar lassen sich in Linear-B-Dokumenten des mykenischen Griechenlands sowie in ägyptischen Inschriften ebenfalls Namen finden, die manchen in den homerischen Epen ähneln. Doch das belegt nur deren bloße Existenz in der Bronzezeit. So erscheint etwa ein Achilles in Linear-B-Texten; dieser war lediglich ein Hirte, nicht der legendäre Held. Ohnehin erschweren Eigenheiten der jeweiligen Schriftsysteme die Gleichsetzung der Namen: Ägyptisch bestand nur aus Konsonanten, das mykenische Linear B war wie die hethitische Keilschrift und die luwischen Hieroglyphen im Wesentlichen eine Silbenschrift. Ob die jeweiligen Begriffe also tatsächlich gleich ausgesprochen wurden, lässt sich nicht sicher sagen.

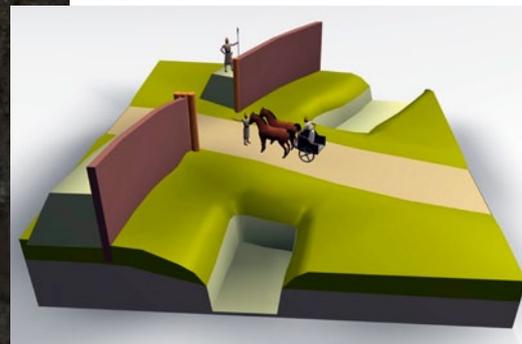
Die Grabungsergebnisse liefern leider ebenfalls nur Hinweise und weitere Indizien. Losgelöst von den Epen erzählen sie aber eine spannende Geschichte aus einer Region, die, zwischen Machtblöcken gelegen, ihren eigenen Weg zu gehen versuchte. Durch die neuen Forschungen wissen wir nämlich, dass unter dem griechisch-römischen Ilios tatsächlich der Hauptort der Region seit Beginn der Bronzezeit liegt. Es kann praktisch ausgeschlossen werden, dass in der weiteren Umgebung eine zeitgleiche Siedlung von ähnlicher Bedeutung existierte.

Seit etwa 1600 v. Chr. ragten die Burgmauern von Troja VI auf, mehr als 1000 Jahre nach Gründung der ersten Siedlung auf dem Höhenrücken nahe den Dardanellen. Noch heute sind sie sechs bis acht Meter hoch erhalten, denn die Steinmetze leisteten in der damaligen Zeit hervorragende Arbeit. Nach und nach verstärkten sie die Anlage mit Tor-

GEBHARD BIEG, UNIVERSITÄT TÜBINGEN, TROJA PROJEKT



PETER JABLONKA, UNIVERSITÄT TÜBINGEN, TROJA PROJEKT



In Troja liegen verschiedene Siedlungsschichten dicht übereinander. Im linken Bild steht der Archäologe Catalin Pavel auf Mauern aus hellenistischer und römischer Zeit. Unter ihm erkennt man ein Stück des in den Fels geschlagenen Grabens. Rechts die Rekonstruktion eines Palisadendurchgangs.



Dieses mykenische Gefäß aus dem »Terrassenhaus« (siehe Bild S. 72) belegt Handelskontakte mit Griechenland auch nach 1300 v. Chr.

bauten und Türmen – man wollte gegen Angriffe gewappnet sein.

Wie mächtig Troja VI war, lässt sich auch an der Architektur innerhalb der Zitadelle ablesen: Früher standen dort Reihenhäuser, nun wurden frei stehende Gebäude errichtet, manche mehr als 20 Meter lang und mehrgeschossig, auf mächtigen Sockeln aus sorgfältig bearbeiteten Steinblöcken aufgemauert. Dergleichen konnten sich nur Angehörige einer wohlhabenden Elite leisten.

Obendrein hatte man das Gelände innerhalb der Festung terrassiert – auch das ein immenser Aufwand, der zahlreiche Arbeitskräfte und potente Auftraggeber, mithin eine entsprechende Hierarchie erforderte. Leider ist die oberste Ebene zerstört, sei es, dass sie den Grabungen Schliemanns zum Opfer fiel, sei es, dass sie schon in der Antike abgetragen wurde, als auf der Akropolis ein Atheneheiligtum entstand. Weil aber Straßen und Rampen erhalten sind, die nach oben führen, müssen im Zentrum der Festung einst wichtige Gebäude gestanden haben.

Außerhalb der Burg setzte sich die Besiedlung fort, zunächst mit dichter Bebauung, etwa 200 Meter weiter weg auch mit größeren Freiflächen zwischen Häusern und Werkstätten; vermutlich waren das landwirtschaftlich genutzte Bereiche. Als Grenze identifizierten die Archäologen schon 1988 mittels geophysikalischer Prospektion einen in den Fels geschlagenen Graben. Dieser war vier Meter breit, zwei Meter tief und mehr als einen Kilometer lang – das Ende wurde bei den Untersuchungen nicht erreicht. In einigen Bereichen ist er durch Baumaßnahmen in der Antike nicht mehr nachzuweisen, doch insgesamt ergibt sich das Bild eines Grabens, der ab etwa 1500 v. Chr. eine 20 bis 30 Hektar große »Unterstadt« umfriedete. Im Zuge der »Troja-Debatte« vor einigen Jahren wurde das Bauwerk mitunter

als Entwässerungsgraben gedeutet, doch seine schieren Dimensionen widersprechen: Wer etwa 10 000 Kubikmeter Gestein mit Hammer und Meißel abträgt, will sich nicht vor Starkregen, sondern vor Angreifern schützen!

#### Wasserversorgung mit Brunnen und Stollen

Vermutlich erhob sich dahinter ein Wall, bestehend aus dem Aushubmaterial, der an der Vorderseite wohl durch eine Palisade gesichert war (siehe Grafik links). In einigen ausgegrabenen Partien kamen nämlich Eintiefungen zum Vorschein, mutmaßlich Verankerungen eines hölzernen Tores. Insgesamt wurden drei Zugänge nachgewiesen. In diesen Bereichen war der Graben unterbrochen, was die Deutung als Entwässerungsgraben endgültig widerlegt.

Hohen Aufwand trieb man auch, um die Wasserversorgung in der Festung wie in der Siedlung zu sichern. Mehrere Tiefbrunnen der Burg erschlossen einen Grundwasserhorizont. Einer dieser Schächte lag gut geschützt innerhalb der so genannten Nordostbastion der Burgmauer. In der Unterstadt gab es ein als Quelhöhle bezeichnetes System von Stollen und Schächten (siehe Grafik S. 69), das ursprünglich ein natürlicher Wasseraustritt im Fels war und immer weiter ausgebaut wurde.

Anders als zum Beispiel in Mykene kamen in der Burg keine Gräber der Elite zum Vorschein. Das ist bedauerlich, weil man Toten in der Bronzezeit Waffen, persönlichen Schmuck und Gegenstände des täglichen Lebens beigab, die bei Angehörigen der Elite oft prächtig ausfielen. Vor dem Südtor des Verteidigungsgrabens hatten bereits Dörpfeld und Blegen einen Friedhof aus der Spätzeit von Troja VI gefunden. Vorherrschend waren dort Brandgräber in zeit-typischen Urnen, es gab aber auch einige Körperbestattungen, was möglicherweise unterschiedliche Jenseitsvor-



Das so genannte Terrassenhaus (links: Blick auf die Ruinen, rechts: Rekonstruktion) zeigt, dass in der Zeit von Troja VII auch Wohlhabende in der Unterstadt wohnten.

stellungen in der Bevölkerung widerspiegelt. Ähnlich wie beim zeitgleichen Friedhof am wenige Kilometer entfernten Beşik-Tepe überwiegen einheimische Beigaben. Es findet sich zudem Importkeramik aus dem mykenischen Griechenland (siehe Bild S. 71). Zwei Urnen enthielten sogar Glas, Fayencen, Elfenbeinobjekte, Gold und Karneolperlen: Die Verstorbenen pflegten offenbar einen gehobenen Lebensstil. Fragmente solcher Importwaren fanden sich auch in der Burg des späten Troja VI, zudem Straußeneierschalen und steinerne Schwertgriffe. All dies bezeugt gute Fernkontakte der trojanischen Elite.

Archäozoologen haben überdies anhand von Knochenfunden nachgewiesen, dass mit Beginn der Phase Troja VI Pferde gezüchtet wurden. Diese lieferten nicht nur Fleisch und transportierten Lasten, sie waren als Reittier und Zugtier für Streitwagen vor allem Waffe und Prestigeobjekt der Eliten der Bronzezeit.

Architektur, weit reichende Kontakte und importierte Luxuswaren unterstreichen die Bedeutung des Orts, der wohl schon seit der Frühbronzezeit ein regionales Zentrum bildete. Seine Ausmaße bestätigen das noch: Troja VI war mindestens doppelt so groß wie andere Orte im Umkreis. Das sowie die Konzentration von Funktionen wie politische Organisation, Kontrolle über agrarische Überschüsse, handwerkliche Spezialisierung sowie Gütertausch über größere Distanzen verhinderten, dass in weitem Umkreis ein zweiter Ort von ähnlicher Bedeutung entstehen konnte. Tatsächlich sind andere Siedlungen während dieser Zeit anscheinend sogar geschrumpft.

Wir gehen davon aus, dass sich Troja während der Spätbronzezeit zu einem starken Fürstentum entwickelte. Typisch für die Bronzezeit war eine Stammesgesellschaft mit einer Kriegeraristokratie. Die gewöhnliche Bevölkerung lebte in der Unterstadt oder im Umland, die Burg war weit-

gehend einer aristokratischen Oberschicht vorbehalten. Ihre einzeln stehenden Häuser mit den fensterlosen Sockelgeschossen lassen an die Turmhäuser führender Familien in mittelalterlichen Städten denken – jedes war für sich zu verteidigen. Ist das ein Hinweis darauf, dass die Machtfrage noch nicht im Sinn einer stabilen Herrscherdynastie entschieden war? Ohne Informationen über die verloren gegangene Bebauung der obersten Terrasse wird sich diese Frage kaum klären lassen. Homers Epen als Informationsquelle zur trojanischen Gesellschaft heranzuziehen, wäre ebenfalls keine Lösung, denn er kombinierte eine idealisierte Schilderung der Verhältnisse in seiner Gegenwart mit den Überlieferungen eines mythischen Heldenzeitalters.

Kontakte zum Hethiterreich, wie sie die erste Erwähnung Wilusas für ebenjene Phase nahelegen, werden in Troja VI kaum sichtbar, und erst recht nicht Spuren der Niederwerfung eines Aufstands um 1400 v. Chr. Dass die auf Expansion bedachten Großkönige Hattuschas ein Auge auf die prosperierende Siedlung geworfen haben könnten, liegt allerdings auf der Hand.

Etwas um 1300 v. Chr. wurde die Festung zerstört, wie die heute noch sichtbaren Brandspuren in Burg und Unterstadt zeigen. Dörfeld deutete sie als Kriegsfolge – und identifizierte Troja VI mit dem Troja Homers. Blegen hingegen sah in Rissen, Senkungen und umgestürzten Mauern lediglich Indizien für ein Erdbeben. Doch von Kontinuität, wie man sie nach einer solchen Katastrophe erwarten würde, konnte keine Rede sein. Die Bewohner Trojas machten nach heutigem Wissen nicht einfach weiter, wo sie aufgehört hatten. Sie setzten nicht bloß die Burgmauer wieder in Stand – Tore und Türme wurden umgebaut beziehungsweise erweitert. Nutzte man lediglich die erforderlichen Reparaturen, um lang gehegte Pläne endlich umzusetzen? Oder gab es eine akute Bedrohungslage?

Drastisches tat sich im Innern der Festung: Mit den solitär stehenden Familienburgen war in dieser Phase Schluss! Kleine Häuser mit einem oder zwei Räumen entstanden stattdessen dicht an dicht. Ein ganzer Ring davon erstreckte sich entlang der Burgmauer und nutzte sie als Rückwand. In vielen Gebäuden wurden große Gefäße, so genannte Pithoi, in den Boden eingegraben. Offenbar wurde der Vorratshaltung nun mehr Gewicht beigemessen. Diese schlichte Architektur inspirierte Dörpfeld zu der These, in der Burg von Troja VII hätten nicht mehr »der Herrscher und seine Verwandten«, sondern »einfache Landleute« gelebt. Blegen vermutete wegen der kleinteiligen Bebauung und der vielen Vorratsgefäße sogar, dass sich ganz Troja in Erwartung eines Angriffs und einer langen Belagerung hinter die Burgmauern zurückgezogen hätte. Das entsprach freilich seinem Wunsch, den Trojanischen Krieg als historisches Ereignis nachzuweisen.

### **Der alte Graben wurde aufgefüllt, denn die Unterstadt war vermutlich gewachsen**

Doch die jüngsten Grabungen widerlegen seine These: Die Unterstadt von Troja VIIa war keineswegs entvölkert. Im Gegenteil, man baute auch dort dichter und teilweise mit gemeinsamen Zwischenwänden direkt aneinander. Zum Ende von Troja VI oder zu Beginn von VIIa – das lässt sich weder anhand von Radiokohlenstoffdatierungen noch archäologisch entscheiden – war der Verteidigungsgraben aufgefüllt worden. Gut 100 Meter weiter meißelten die Bewohner einen neuen aus dem Felsen. Leider lässt sich dessen Verlauf nur teilweise rekonstruieren, da er im Osten der Unterstadt in griechisch-römischer Zeit durch die Anlage eines Steinbruchs zerstört wurde. Die Befunde legen aber die Vermutung nahe, dass die Siedlung inzwischen über ihre frühere Größe hinausgewachsen war und nun etwa 30 oder sogar mehr Hektar Fläche einnahm.

Laut den archäobotanischen Analysen von Bodenproben wurden dann auch höher gelegene, trockenere Gebiete für den Ackerbau genutzt, nicht nur wie zuvor ausschließlich das Skamandertal. Die Landwirtschaft florierte also. Wir gehen daher inzwischen davon aus, dass die Pithoi der Burghäuser nicht der Vorratshaltung für den Belagerungsfall dienten, sondern vielmehr der Kontrolle von Überschüssen. Importwaren zeigen obendrein, dass die Handelsverbindungen zum mykenischen Griechenland und in den Ostmittellerraum nicht nur weiterhin bestanden, sondern Produkte nach mykenischer Art nun auch in Troja selbst hergestellt wurden. Zudem exportierte der Ort nun seine »westanatolische Grauware« (siehe Bild S. 75), wie Grabungen auf Zypern und in der Levante beweisen. Neben der

**In einem Raum des »Terrassenhauses« kamen bei den Ausgrabungen auch Artefakte wie diese Bronzestatuetten zu Tage. Sie legen eine kultische Funktion des Raums nahe.**



UNIVERSITÄT TÜBINGEN, TROJA PROJEKT

Textilindustrie hatte sich in Troja VIIa zudem eine Metallverarbeitung etabliert, wie Gussformen belegen.

Soziale Veränderungen sind aber offensichtlich. Wenn die Gebäude innerhalb der Troja-VI-Burg Residenzen aristokratischer Familien waren, so existierte diese Hierarchieebene jetzt wohl nicht mehr. Die Ursachen der Veränderungen bleiben leider unklar, weil der zentrale Teil der Bebauung nicht erhalten ist. Sicher aber war Dörpfelds Schlussfolgerung übertrieben, denn die Bewohner der Burg grenzten sich immer noch durch eine verstärkte Befestigung von denen der Unterstadt ab. Dass dort nach wie vor nicht nur einfache Bauern und Handwerker wohnten, lässt das »Terrassenhaus« vermuten (siehe Bilder links und unten). Es war wesentlich großzügiger angelegt als andere Gebäude der Unterstadt: eine mit Steinplatten gepflasterte offene Vorhalle, ein Hauptraum mit Feuerstelle sowie seitlich davon Nebenräume mit Vorratsgefäßen. In einem kleineren Zimmer auf der Hinterseite des Gebäudes kamen unter anderem ein minoisches, das heißt kretisches Siegel, Schmuck, ein Gefäß in Form eines Stiers und eine Bronzestatuetten zum Vorschein. Zumindest dieser Raum könnte als Kultstätte gedient haben.

Leider liegt der größte Teil der Unterstadt unter der hellenistisch-römischen Stadt Ilion. Sie eingehender zu untersuchen, würde bedeuten, deren Siedlungsschichten zu zerstören. Zudem kennen wir bislang keine Friedhöfe aus Troja VII, die uns erlauben würden, mehr über seine Gesellschaft zu erfahren. Interessant ist aber, dass Importprodukte wie mykenische Keramik oder Fayenceperlen nun auch in den zugänglichen Schichten der Unterstadt zu Tage kamen.

Ein unscheinbarer Befund mag immerhin einen Hinweis geben: Vor dem Südtor hatte man eine Reihe bis zu zwei Meter großer Stelen aufgestellt. Derartige ohne Relief oder plastischen Schmuck gehaltene Steine markierten bei den Hethitern Kultorte. Ist dies einer der wenigen Bezüge zwischen der Archäologie und den erwähnten schriftlichen Überlieferungen? Denn: Im erwähnten Alaksandu-Vertrag wurden die Götter Wilusas als Zeugen angerufen. Einer von ihnen hieß ...appaliuna (die Anfangszeichen sind nicht erhalten). Das erinnert an Apollon, der laut Homer für die Trojaner Partei ergriff. Möglicherweise verehrte man ihn bei den Stelen. Eine andere Gottheit namens KASKAL.KUR (die Großbuchstaben repräsentieren spezielle Schriftzeichen) hatte nach Ansicht von Experten mit unterirdischen Wasserläufen zu tun, was zur Quelhöhle in der Unterstadt passen würde. Freilich sind das zwar attraktive, letztlich jedoch unbeweisbare Spekulationen.

Zum Ende von Troja VIIa, um 1200, spätestens 1180 v. Chr., finden sich in den hethitischen Texten passende Hinweise auf Probleme in Wilusa, leider ohne Details. Handelte es sich um einen Krieg? Spielte Ahhijawa dabei eine Rolle? Auf solche Fragen geben die Tontafeln keine Auskunft. Tatsächlich aber kamen in allen bislang ausgegrabenen Teilen der Unterstadt und an vielen Stellen der Burg Brandspuren aus der Zeit um 1200 v. Chr. zu Tage.

Rund um das Terrassenhaus wie auch an anderen Stellen der Unterstadt hat man Pfeilspitzen entdeckt, also typische Indizien für einen Angriff. Doch warum kam in der Burg selbst nur eine einzige zum Vorschein? Die Unterstadt, so spekulieren einige Forscher, habe einen direkten Beschuss der Festung auf Grund der Distanz verhindert. Und nachdem die Angreifer Graben und Palisade überwunden hatten, wurden sie eher in Nahkämpfe verwickelt, die vermutlich mit Hieb- und Stichwaffen ausgetragen wurden. Leider erlaubt die Form der Pfeilspitzen nicht, sie einer bestimmten Kultur wie der mykenischen zuzuordnen.

Haufen kleiner Steine in der Unterstadt wurden ebenfalls als Beweis eines Kriegs herangezogen. Sie sollen Schleudergeschosse gewesen sein, zur Verteidigung bereitgelegt. Zwar würde die Größe passen, typische spätbronzezeitliche Schleudergeschosse waren jedoch spitzoval geformt und bestanden aus Keramik oder Blei. Dass Trojas Bewohner diese zumindest in der vorangegangenen Phase VI verwendeten, zeigt ein Vorrat solcher Geschosse in einem Haus hinter dem Südtor der Burg.

Mag das Gesamtbild also auch heterogen sein, so sprechen die massiven Zerstörungen aber für kriegerische Ereignisse. Kurz nach 1200 v. Chr., in Troja VIIb1, wurden zudem kaum Reparaturen durchgeführt oder neue Gebäude errichtet. Das lässt einen starken Bevölkerungsschwund annehmen, der Folge eines Kriegs gewesen sein könnte, doch auch einer Hungersnot oder Seuche. Zunächst bewahrten die verbliebenen Bewohner zwar ihre Traditionen, bei den wenigen Neubauten kam aber beispielsweise eine Technik zum Einsatz, die ein bis zwei Generationen später typisch werden sollte: In den untersten Lagen des Mauer-

eingeebnet –, wurde diese erneut umgebaut und erweitert. Einige Tore waren nicht mehr in Verwendung, doch das Südtor mit seiner gepflasterten Straße hat man in Stand gehalten. Über die Ausdehnung der Unterstadt lässt sich nur mutmaßen. Noch 300 Meter südlich der Burg, also im Bereich des Grabens von Troja VI und innerhalb des neu errichteten Grabens von Troja VIIa, kamen verbrannte Lehmplacken zu Tage, in denen sich Flechtwerk abgedrückt hatte. Vermutlich handelt es sich um Überreste vom Wandverputz einfacher Hütten. Auch Abfall- oder Vorratsgruben gibt es in diesem Radius.

Interessant ist ebenso eine neuartige Keramik, die ohne Töpferscheibe produzierte »Barbarian Ware« in Troja VIIb1 (siehe Bild rechts außen) beziehungsweise »Buckelkeramik« in Troja VIIb2. In Herstellungstechnik, Form und Verzierungen ähneln die Gefäße Produkten des südlichen Balkans, wie sie von der unteren Donau bis Südthrakien in Gebrauch waren. Eine solche Innovation impliziert veränderte Ess- und Trinkgewohnheiten. Die in Troja VI typischen, einheimischen Keramikgattungen verschwanden zwar nicht völlig, ebenso wenig der mykenische Stil, doch insgesamt deuten die vielen fremden Elemente darauf hin, dass spätestens ab Troja VIIb2 neue Bevölkerungsgruppen zugewandert sein dürften.

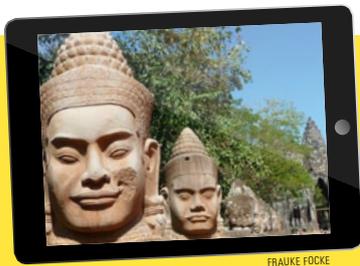
#### **Auch in der Eisenzeit wanderten neue Bevölkerungsgruppen in die Region ein**

Der Aufschwung hielt allerdings nicht lange an. Nach 1050 v. Chr. war die Burg offenbar bis auf wenige Häuser verlassen. Und wieder verweigert sich die Stätte eindeutiger Antworten auf die Frage nach den Ursachen. Einerseits deuten Brandspuren und Pfeilspitzen auf einen Krieg hin, andererseits zählen einige Häuser dieser Zeit zu den am besten erhaltenen Gebäuden: Ihre Mauern stehen zum Teil noch über zwei Meter hoch – das spricht gegen Eroberung und Naturkatastrophen. Es scheint, als seien die meisten Bewohner der Burg einfach fortgezogen.

Einige aber blieben und hielten ihre Häuser in Stand. Eine neue Ära brach nun an: »Protogeometrische« Keramik, also im griechischen Kulturkreis während der »Dunklen Jahrhunderte« gebräuchliche Töpferware, findet sich zusammen mit traditioneller Keramik im Siedlungsschutt und markiert den Übergang von der späten Bronze- zur frühen Eisenzeit. Gerade in Troja und seiner Umgebung, etwa in Eceabat auf der Gallipoli-Halbinsel, erkennen Archäologen ein Nebeneinander von lokalen Gebräuchen mit neuen, die ein Zusammenleben einheimischer mit zugewanderten Bevölkerungsgruppen aufzeigen. Was aber, wie erwähnt, für die Region wohl nichts Neues war.

Südlich der Burgmauer finden sich zudem Spuren einer Kultstätte: Gruben mit Opfertagen, Steinkreise und -reihen. Im Lauf der folgenden Jahrhunderte hat man dieses »Westheiligtum« erweitert, im 8. Jahrhundert v. Chr. entstanden auch wieder einige Häuser außerhalb der Burg. Wann das antike Ilion gegründet wurde, lässt sich bislang nicht sagen.

Heute wissen wir, dass unter seinem Pflaster tatsächlich der bronzezeitliche Hauptort der Region lag. Dessen Burg war immer stark befestigt gewesen, wurde oft zerstört und wiederaufgebaut – meist wehrhafter als zuvor. Während der



FRAUKE FÖCKE

### **Mehr Wissen auf Spektrum.de**

Unser Online-Dossier zum Thema »Alte Hochkulturen« finden Sie unter [spektrum.de/t/hochkulturen-der-menschheit](https://www.spektrum.de/t/hochkulturen-der-menschheit)

werks schichtete man Quader nicht horizontal übereinander, sondern stellte sie hochkant auf. Die Gründe dafür kennen wir leider nicht, die Veränderung fällt jedoch auf.

Erst nach etwa 50 Jahren war der Schock wohl überwunden: In Troja VIIb2 (etwa 1150–1050 v. Chr.) entstanden überall in der Zitadelle neue Häuser; mitunter hat man dabei pragmatisch die Ruinen integriert. Die Grundrisse waren oft unregelmäßig und umfassten meist mehrere Räume, die manchmal einen Hof umgaben. Die Bebauung war so dicht, dass kaum Platz für Gassen blieb.

Unmittelbar außerhalb der Burgmauer, teilweise an sie angebaut, entstanden Häuser mit sehr kleinen, zellenartigen Räumen, die offenbar vom Dach aus zugänglich waren. Wir deuten sie als Vorratsräume. Da sich außerdem das Bodenniveau vor der Mauer erhöht hatte – man hatte allen Schutt



BEIDE FOTOS: GERHARD RIEG, UNIVERSITÄT TÜBINGEN, TROJA-PROJEKT

**Auf Zerstörung folgte Aufschwung:** Bald nach 1300 v. Chr. exportierten die Bewohner von Troja VIIa ihre »westanatolische Grauware« (oben) nach Zypern und in die Levante. Doch die Stadt sollte nicht zur Ruhe kommen. Um 1200 v. Chr. vertrieb wohl ein Krieg viele Bewohner. Gut 50 Jahre später verraten Gefäße der »Barbarian Ware« (rechts), dass in Troja VIIb inzwischen vermutlich auch Immigranten lebten.



Spätbronzezeit war die Zitadelle auch von einer ebenfalls befestigten Unterstadt umgeben. Als Schauplatz der von Homer überlieferten Sage taugt der Ort also sehr wohl, doch die Antwort auf die Frage, wann der Trojanische Krieg stattgefunden hat, fällt nicht eindeutig aus. Nach den Ergebnissen der Archäologie wäre das Ende von Troja VIIb dafür eher unwahrscheinlich, das von Troja VIIa, also die Zeit um 1200 v. Chr., durchaus passend, das Ende von Troja VI um 1300 v. Chr. aber gleichwohl möglich.

Bezieht man die hethitischen Schriftquellen mit ein und identifiziert Wilusa mit Homers Ilion, kämen auch die Auseinandersetzung zwischen mykenischen Griechen und den Verbündeten der Hethiter am Ende von Troja VI und das Ende von Troja VIIa um 1200 v. Chr. in Betracht. Die letzte Option würde den Trojanischen Krieg zwar scheinbar in die zeitliche Nähe zum Untergang der mykenischen Kultur, also des mutmaßlichen Angreifers rücken. Doch wann genau und in welcher Abfolge die griechischen Paläste brannten, ist bisher ebenfalls nicht eindeutig geklärt.

Einige Experten meinen, die in Homers Epen geschilderten Ereignisse hätten, wenn überhaupt, um 700 v. Chr. stattgefunden. Nicht nur, weil »Ilias« und »Odyssee« vor allem die eisenzeitliche Gesellschaft schildern, sondern auch, da mündliche Überlieferungen im Allgemeinen selten mehr als drei Generationen zurückreichen. Wahrscheinlich liegen die Dinge jedoch komplizierter. Mündlich überlieferte Epen, von geschulten Spezialisten vorgetragen, gab es in vielen Teilen der Erde noch bis in die jüngste Zeit. Sie sind daher gut erforscht. Es handelt sich um Verknüpfungen verschiedener Erzählstränge unterschiedlichen Alters, die sich zwar nach den Wünschen und Erwartungen des jeweiligen Publikums richten. Im Vordergrund steht aber immer eine Erzählung vom Ursprung der eigenen Gruppe und

gemeinsamen Taten in ferner Vergangenheit. Dazu kommen andere Aspekte: Ideale und Werte, Verwandtschaftsbeziehungen und Religion.

Die Homerforschung hat zahllose inhaltliche, sprachliche und formale Belege dafür zusammengetragen, dass es sich auch mit der »Ilias« und der »Odyssee« so verhält. Es waren identitätsstiftende Erzählungen mit Bezug zu historischen Tatsachen. Das lässt sich überall feststellen, wo es unabhängige Quellen gibt, um die Mythen zu überprüfen, seien es das Nibelungenlied und die zahllosen Befunde zur Völkerwanderungszeit oder das Alte Testament in Bezug zur Geschichte und Archäologie Israels. In all diesen Fällen vermischen sich historische Wirklichkeit und Fantasie. Ähnlich können auch die bewaffneten Konflikte der Spätbronzezeit den Keim gebildet haben, aus dem später die griechischen Sagen wuchsen. Es bleibt ein müßiges Unterfangen, Archäologie, Schriftquellen und griechische Helden-sagen in völlige Übereinstimmung bringen zu wollen. Sie beziehen sich zwar auf denselben Ort und annähernd auf dieselbe, längere oder kürzere Zeitspanne, sind aber komplementär wie die beiden Seiten einer Münze: verschiedene Bilder, die man nicht gleichzeitig betrachten kann. ◀

#### QUELLEN

##### **Archäologisches Landesmuseum Baden-Württemberg**

**et al. (Hg.):** Troia – Traum und Wirklichkeit. Begleitband zur Ausstellung. Konrad Theiss, Stuttgart 2001

**Latacz, J.:** Troia und Homer. Der Weg zur Lösung eines alten Rätsels. Koehler & Amelang, Leipzig, 6. Auflage 2010

**Pernicka, P. et al. (Hg.):** Troia 1987–2012: Grabungen und Forschungen III. Troia VI bis Troia VII. Studia Troica Monographien 7, Philipp von Zabern, Mainz (in Vorbereitung)



## KOMMENTAR

# WAR TROJA DIE HAUPTSTADT DER SEEVÖLKER?

**Seit gut einem Jahrhundert treibt der plötzliche Untergang von Mykene und Hattuscha die Wissenschaftler um. Der Geoarchäologe Eberhard Zangger will das Rätsel nun gelöst haben. Demnach hätten die Archäologen einen ganzen Kulturkreis übersehen: die Luwier.**

Die Altertumswissenschaftlerin **Luise Loges** arbeitet als Journalistin in Tübingen.

» [spektrum.de/artikel/1427456](https://spektrum.de/artikel/1427456)

Im Sommer 2016 rauschte es im deutschen Blätterwald. Eberhard Zangger, Geoarchäologe und Berater für Wissenschaftskommunikation, präsentierte seine eigenwillige Antwort auf die Frage, was die Reiche der Späten Bronzezeit schlagartig in Schutt und Asche versinken ließ: Das hätten allein die Luwier verursacht, ein im Westen des heutigen Anatolien beheimatetes Volk. Doch warum hatte noch niemand diese Großmacht auf dem Schirm? Auch hierauf wusste Zangger, Gründer der Stiftung Luwian Studies, die Antwort: weil das archäologische Establishment sie aus Ignoranz und rassistischer Verblendung übersehen hatte.

Klingt nach Verschwörungstheorie? Es kommt noch besser. Zangger zufolge waren die Luwier niemand anderes als die Seevölker, von denen die ägyptischen Pharaonen Ramses III. (1184–1153 v. Chr.) und Merenptah (1213–204 v. Chr.) berichteten. Jene Seevölker, die Archäologen

## Kritik als Beleg des Kritisierten – was nicht passt, wird passend gemacht

lange für den Untergang des Hethiterreichs verantwortlich machten. Die mykenischen Staaten Griechenlands hätten sich gegen sie verbündet und ihre Hauptstadt angegriffen – im Trojanischen Krieg. Zwar habe diese Allianz gesiegt, wie man aus der »Ilias« wisse, doch ein Bürgerkrieg machte schließlich auch der mykenischen Welt den Garaus.

Einen Beleg für seine These findet Zangger bei besagten Pharaonen, die einen der Seevölkerstämme als Tjekker bezeichnet hatten, was Historiker mit den Teukrern gleichsetzen – einem der Namen Homers für die Trojaner. Zangger verortet auch die anderen Seevölker in Westanatolien; Troja soll als Hauptstadt oder zumindest als eine von mehreren Hauptstädten der Luwier fungiert haben.

Tatsächlich war das mit dem Hethitischen verwandte Luwisch während der Bronzezeit in Anatolien weit verbreitet. Zangger definiert seine Luwier allerdings weniger über die Sprache als vielmehr als »Menschen, die während des 2. Jahrtausends v. Chr. zwischen den Mykenern in Griechenland und den Hethitern in Zentralanatolien lebten und die sich keiner dieser Kulturen zugehörig gefühlt« hätten. Es gab demnach einen unabhängigen luwischen Staat oder zumindest einen Zusammenschluss von Kleinstaaten mit gemeinsamer Sprache und Kultur, der an Macht seinen Nachbarn wohl ebenbürtig war.

**M**it dieser These variiert Zangger eine frühere aus den 1990er Jahren: Troja sei identisch mit Atlantis, dem legendären Inselreich aus den Dialogen des Philosophen Platon. Dessen Erzählung sei nicht bloß ein Gleichnis über Staatsführung und Machtmissbrauch, sondern basiere auf einer ägyptischen Erzählung vom Trojanischen Krieg, die ins Griechische übersetzt worden sei. Denn die Überlebenden dieses Krieges hätten als Seevölker Ägypten angegriffen.

Damit reihte sich der promovierte Geoarchäologe in den Reigen jener Dilettanten ein, die Atlantis schon auf den Kanaren oder der Kykladeninsel Santorin, auf Rügen, im Jemen oder in der Antarktis gesucht haben. Während die Feuilletons jubilierten, war die Fachwelt peinlich berührt. Zanggers These beruhte auf der wörtlichen Auslegung der Atlantis-Parabel und einer eigenwilligen Interpretation der archäologischen Befunde in Troja. Was nicht mit seiner Theorie übereinstimmte, erklärte er zu Fehlern der griechischen Übersetzung jener mutmaßlichen ägyptischen Vorlage. Zweifel von Archäologenseite waren für ihn Ausdruck dogmatischer Verblendung, veralteter Methoden und schlampiger Arbeit.

Kritik als Beleg für die Richtigkeit des Kritisierten – so argumentieren Verschwörungstheoretiker.

Anfang 2001 zog sich Zangger aus der aktiven Forschung zurück, nun ist er also wieder da. Seine Stiftung

Luwian Studies gewann schnell Zuspruch und Sponsoren. Im Mai 2016 erschien sein Buch »The Luwian Civilization: The Missing Link in the Aegean Bronze Age«, und wieder steigen renommierte Zeitschriften mit ins Boot. Denn die Geschichte hat alles, was ein Blockbuster braucht: einen genialen Helden, ein großes Geheimnis und einen schier unbesiegbaren Widersacher. Zangger gegen die Fachwelt. David gegen Goliath.

Unerbittlich brandmarkt der Held die Fehler all jener, die als Archäologen die Zeit um 1200 v. Chr. erforschen. Denn ihr Augenmerk liege seit dem 19. Jahrhundert zu stark auf dem Ägäisraum: Viel zu wenige Stätten Anatoliens seien gründlich untersucht worden. Geradezu rassistisch habe man den Beitrag der mykenischen Griechen zur Weltgeschichte überbewertet, den der Völker Kleinasiens hingegen vernachlässigt.

Aber das ist ein Zerrbild der Wissenschaftsgeschichte. Anfang des 20. Jahrhunderts gab es sogar einen regelrechten Wettkampf zwischen deutschen und britischen Archäologen, die hethitische Kultur erforschen zu dürfen. 1906 begann der Berliner Altorientalist Hugo Winckler, Hattuscha auszugraben – nachdem sich der deutsche Kaiser beim türkischen Sultan dafür verwendet hatte. In den Ruinen der Stadt kamen etliche Tontafeln ans Licht, unter anderem in den damals noch unbekannt Sprachen Hethitisch und Luwisch. Weitere Grabungen in Anatolien folgten, die Hethitologie wurde etabliert. 1948 gründete der Brite John Garstang das Archäologische Institut von Ankara, das sich explizit der Frühgeschichte Kleinasiens widmet. Die Reihe ließe sich beliebig fortsetzen.

Wahr ist indes, dass im Hinterland Westanatoliens etliche Siedlungsplätze der Erforschung harren. Hethitische Schriftquellen, vor allem Berichte über Kriegszüge, nennen Städte und Länder; über deren Lage gibt es aber meist nur Vermutungen. Beispielsweise herrschte im 15. und Anfang des 14. Jahrhunderts v. Chr. wohl ein luwisches Land namens Arzawa über weite Gebiete. Die Überreste seiner Hauptstadt Apasa liegen vermutlich unter den antiken Schichten von Ephesos und sind damit für Forscher kaum zugänglich.

Anders steht es mit Milet, das in der Bronzezeit den luwischen Namen Millawanda trug. Doch von einer klar abzugrenzenden Luwier-Kultur kann keine Rede sein. Mykenische Keramik, minoische Inschriften und Gewichtssteine kamen in den Schichten der Späten Bronzezeit reichlicher zu Tage als Artefakte einheimischer Tradition. Ähnlich sieht es bei anderen Grabungsstätten an der Küste aus. Zangger sieht darin aber keinen Widerspruch zu seiner These: Die Luwier hätten an rohstoffreichen Orten im Inland gesiedelt und die Hafenstädte den Mykenern überlassen. Was nicht passt, wird passend gemacht.

Indem Zangger die fraglos vielen noch nicht erforschten spätbronzezeitlichen Siedlungsplätze Westanatoliens kurzerhand seiner Luwier-Kultur zuschlägt, erhält er ein großes Reich, und das braucht eine Hauptstadt: Troja. Der Schweizer Assyriologe Emil Forrer identifizierte den Ort zu

Beginn des 20. Jahrhunderts mit dem in hethitischen Quellen erwähnten Königreich Wilusa, das zeitweise zu Arzawa gehörte und später ein hethitischer Vasallenstaat gewesen ist. Als Kopf einer Koalition, die den östlichen Mittelmeerraum heimsuchte, bevor es in Schutt und Asche gelegt wurde, taugt Troja wohl nicht. Die dort bis vor wenigen Jahren grabenden Tübinger Archäologen sehen es als stark befestigtes regionales Zentrum der Späten Bronzezeit, nicht als Kapitale eines Großreichs.

Einige Forscher gehen davon aus, dass dieser große Landstrich durchaus eine indigene Kultur hatte, die weder ägäisch noch hethitisch geprägt war. Die Erkenntnis ist allerdings weder neu noch stammt sie von Eberhard Zangger. Die Angehörigen dieser Kultur nach ihrer Sprache auch gleich der Ethnie »Luwier« zuzuordnen, entspricht jedenfalls nicht moderner Wissenschaft.

Das Gleiche gilt für den Seevölkersturm, der inzwischen als Forschungsmythos gilt. Der zeitgleiche Untergang etlicher bronzezeitlicher Kulturen hatte sicher nicht einen, sondern viele Gründe. Kriegerische Konflikte gehörten ebenso dazu wie eine Klimakatastrophe, Hungersnöte, soziale Verwerfungen und innenpolitische Machtkämpfe. Zanggers These gibt deshalb obendrein eine allzu einfache Antwort, die dem komplexen Staatensystem jener Zeit nicht gerecht wird.

#### QUELLE

Eberhard Zanggers Hypothesen sind auf [www.luwianstudies.org](http://www.luwianstudies.org) nachzulesen.

ANZEIGE

**DIE WELTENSÄNGER-TRILOGIE**

KADELL  
**ORAKEL**  
 WELTENSÄNGER 1

KADELL  
**RAPTOR**  
 WELTENSÄNGER 2

KADELL  
**DIE SUCHER**  
 WELTENSÄNGER 3

Magische Mantren und düstere Orakel, Gedanken lesende Saurier und Schwerter schwingende Kobolde – **Spektrum der Wissenschaft**-Redakteur Klaus-Dieter Linsmeier alias Kadell nimmt seine Leser mit in ein Fantasy-Troja, in dem sich das Schicksal der Welt entscheiden soll.

Die Bände **ORAKEL**, **RAPTOR** und **DIE SUCHER** sind jetzt als eBook bei Amazon für den Kindle erhältlich.

Stock/Alamy

# MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

# DIE LÖSUNG DES

# 27-DAMEN-PROBLEMS

**Deutsche Informatiker haben einen Weltrekord aufgestellt. Wir wissen jetzt, wie viele Anordnungen von 27 Damen es auf einem Schachbrett der Größe 27·27 gibt, die sich gegenseitig nicht bedrohen.**



**Christoph Pöppe** ist **Spektrum**-Redakteur für Mathematik und Computertechnik.

» [spektrum.de/artikel/1427411](http://spektrum.de/artikel/1427411)

Die Geschichte fängt ganz harmlos an. Der fränkische Schachmeister Max Bezzel (1824–1871) warf vor reichlich 160 Jahren die Frage auf, ob man acht Damen so auf die Felder eines Schachbretts setzen könne, dass keine eine andere bedroht. Das »Acht-Damen-Problem« wurde berühmt, und viele Leute versuchten sich an seiner Lösung.

Mit dem Schachspiel hat es eigentlich nichts zu tun; vielmehr ist es eine kombinatorische Aufgabe. Die Fachleute nennen es ein »constraint satisfaction problem« (»Bedingungserfüllungsproblem«): Es sind Werte für die Variablen – hier die Positionen der Damen – zu finden, die eine Reihe vorgegebener Bedingungen erfüllen. Man findet die Lösung des Acht-Damen-Problems im Wesentlichen durch Probieren, und die Kunst besteht darin, alle denkbaren Stellungen möglichst schnell durchzutesten.

Bei der Rechenleistung heutiger Computer muss man sich dabei keine besondere Mühe geben. Schon ein einfacher Suchalgorithmus findet nach kurzer Zeit die 92 Lösungen, die es gibt. Wenn man Anordnungen, die durch Drehungen oder Spiegelungen ineinander übergehen, als »eigentlich dieselbe« zählt, sind es nur zwölf. Da es acht solcher Transformationen gibt, die das (quadratische) Schachbrett auf sich selbst abbilden – die Identität, die nichts tut, mitgezählt –, kann man aus jeder der zwölf »Urlösungen« acht machen. Aber dann müssten es doch insgesamt 96 und nicht 92 Lösungen sein? Schon. Aber eine der zwölf ist ihrerseits punktsymmetrisch und erzeugt daher nur vier statt acht verschiedene Lösungen.

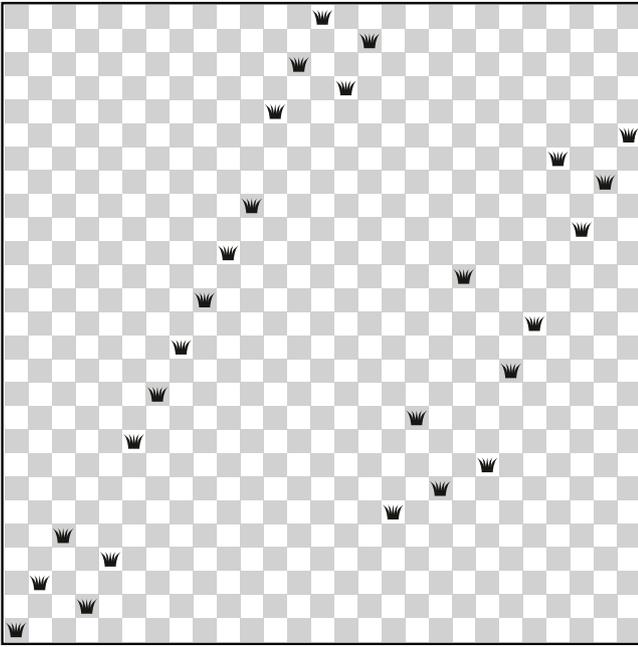
Richtig schwierig – und Gegenstand der aktuellen Forschung – wird das Problem erst, wenn die Mathematiker mit ihrem Hang zum Verallgemeinern sich der Sache annehmen.

Man muss ja nicht bei den 8·8 Feldern des gewöhnlichen Schachbretts stehen bleiben. Wie viele Möglichkeiten gibt es, 9 Damen auf einem 9·9-Brett zu platzieren, oder allgemein  $n$  Damen auf einem  $n$ · $n$ -Brett?

Die erste, wenig überraschende Antwort lautet: Je größer das Brett, desto mehr Stellungen muss man durchprobieren, und desto mehr Lösungen finden sich. Dabei ist die letzte Aussage keineswegs so selbstverständlich, wie es scheint. Für  $n=6$  gibt es nämlich weniger Lösungen als für  $n=5$ . Aber von diesem seltsamen Ausrutscher abgesehen, geht die Anzahl der Lösungen mit zunehmender Seitenlänge  $n$  rasant in die Höhe. Nur eine Formel, um diese Anzahl auszurechnen, kennt man – bisher – nicht. Überhaupt gibt es noch zu wenig Theorie, die irgendeine Art von Struktur in der Menge der Lösungen erkennbar machen würde.

Matthias Engelhardt, gelernter Mathematiker und in seiner Berufspraxis als IT-Fachmann häufig mit »constraint satisfaction problems« befasst, hat sich hobbymäßig seit Jahren mit dem Problem beschäftigt und einen Weg gefunden, die Gesamtheit der Lösungen systematisch einzuteilen – wenn auch nicht zu erzeugen. Für kleine Bretter ( $n=5$  bis 11) kann man das in Bilder bringen, zumindest nachdem diese Gesamtheit vorliegt (siehe Engelhardts Artikel in **Spektrum** August 2010, S. 68, für den Fall  $n=8$ ). Für größere  $n$ , bis etwa  $n=19$ , könnte man derartige Bilder im Prinzip noch herstellen; allerdings würden sie zu riesigen Wandtapeten.

Zum Auffinden der Lösungen bleibt allerdings nur die erschöpfende Suche, und die hat sich inzwischen zu einer Art Sport entwickelt: Wer findet mit seinem Computer in erträglicher Zeit alle Lösungen des Damenproblems für möglichst große  $n$ ?



**Gruppenbild mit Damen: 27 Damen stehen auf einem Schachbrett der Größe 27·27, ohne sich gegenseitig zu bedrohen. Dies ist die erste Lösung, die das Programm von Thomas Preußner und Matthias Engelhardt hervorbrachte.**

Seit sieben Jahren hielt eine Arbeitsgruppe an der TU Dresden um Thomas Preußner den Rekord mit  $n=26$ . Ihr Ergebnis, an dem ihre Computer immerhin neun Monate lang rechnen mussten, wurde kurz nach ihrem Erfolg von einer russischen Gruppe bestätigt. Schon damals ergab sich ein Kontakt zwischen Engelhardt und der Dresdner Gruppe, und mit vereinten Kräften haben sie ihren eigenen Rekord überboten: Seit Ende September dieses Jahres wissen wir, dass es auf dem 27·27-Brett 234 907 967 154 122 528 Anordnungen von 27 Damen gibt, die sich gegenseitig nicht bedrohen. Das sind ungefähr zehnmal so viele wie im Fall  $n=26$ . Trotzdem haben die Computer auch diesmal nur ein knappes Jahr vor sich hin gerechnet. Wie bewältigt man eine derart gigantische Aufgabe?

### Wie extrahiert man den Goldanteil aus Stroh bei einer Konzentration von $2 \cdot 10^{-11}$ ?

Eine erste Lösungsidee lautet: Man ersetze vorübergehend die Damen durch Türme, damit es einfacher ist. Jede Lösung des  $n$ -Damen-Problems ist auch eine des  $n$ -Türme-Problems, denn wenn nirgends zwei Damen einander wehtun, tun die Türme erst recht nicht; sie haben ja weniger Zugmöglichkeiten. Vor allem hat das neue Problem im Gegensatz zum alten eine leicht durchschaubare Struktur. Man darf in jeder Spalte des Schachbretts genau ein Feld mit einem Turm besetzen, und es dürfen keine zwei besetzten Felder in einer Zeile liegen. Schreibt man also der Reihe nach für jede Spalte die Zeile auf, in welcher der Turm stehen soll, so erhält man eine Folge, in der jede Zahl von 1 bis  $n$  genau einmal vorkommt. Das Ergebnis – alle Zahlen von 1 bis  $n$  in irgendeiner Reihenfolge – nennen die Kombi-

natoriker eine Permutation und können leicht ein Programm schreiben, das sie alle erzeugt. Also teste man alle Permutationen der Reihe nach durch, ob sich in der zugehörigen Anordnung auf dem Schachbrett nicht nur Türme, sondern auch Damen vertragen würden. Auf diese Weise verpasst man mit Sicherheit keine Lösung des Damenproblems.

Das würde auf dem Standardschachbrett sogar noch funktionieren. Mit den  $8! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot 8 = 40\,320$  Möglichkeiten ist ein moderner PC schnell fertig. ( $n!$ , gesprochen  $n$ -Fakultät, ist das Produkt aller natürlichen Zahlen von 1 bis einschließlich  $n$ .) Aber bei  $n=27$  wären  $27! \approx 1.08889 \cdot 10^{28}$  Stellungen durchzuprobieren, und das liegt auch für die stärksten Supercomputer weit jenseits des Möglichen.

Stellt man sich diese Permutationen als Strohhalme vor, dann ist der Strohhaufen ungefähr so groß wie die ganze Erdkugel. Darin befindet sich eine sehr große Anzahl von Halmen aus purem Gold – ungefähr  $2,349 \cdot 10^{17}$  Stück, wie wir inzwischen wissen. Und wir sind in der Situation einer armen, aber schönen Müllerstochter, die vor diesem gigantischen Haufen sitzt und das Stroh zu Gold spinnen soll. Der König, der ihr diesen Auftrag erteilt hat, könnte mehr als zufrieden sein, wenn das Mädchen die Goldhalme aus dem großen Haufen herauslesen würde. Leider ist nur einer von ungefähr 50 Milliarden Halmen ein Treffer.

Wie wir aus den Märchen der Gebrüder Grimm wissen, hat ihr ein hutzeliger kleiner Softwarespezialist die beiden letzten Nächte, als es noch um moderate Werte von  $n$  ging, mit einem einfachen Algorithmus aus der Patsche geholfen. Nachdem aber die Goldgier des Königs den Wert von  $n$  bis auf 27 hochgetrieben hat, ist guter Rat teuer. Wenn sich das Männchen nämlich darauf einließ, jeden Halm auch nur anzusehen, wäre es schon verloren. Selbst wenn es pro Sekunde, sagen wir, eine Million Halme besichtigen könnte und die Zeit für das Greifen eines goldenen Halms nicht ins Gewicht fiel, wäre es  $10^{22}$  Sekunden beschäftigt – ungefähr 30 000-mal die bisherige Lebensdauer des Universums.

Bekanntlich fand der Dienstleister damals ein erfolgreiches Verfahren, ist aber geschäftlich trotzdem gescheitert. Das lag weder an seinen mangelnden algorithmischen Fähigkeiten noch an den erpresserischen Umständen, unter denen die Geschäftsbeziehung zu Stande kam, sondern an seinem sorglosen Umgang mit dem Internet. Auch bei der letzten Waldhütte gibt es neugierige Augen, und wer dort höchst privat damit prahlt, dass er übermorgen der Königin ihr Kind holen werde, muss damit rechnen, dass Fuchs und Hase, statt sich gute Nacht zu sagen, die Szene mit der Handykamera aufnehmen und bei Facebook posten. Vor allem aber: Den eigenen Namen als Passwort zu verwenden, ist eine ganz schlechte Idee.

Aber das ist eine andere Geschichte. Versuchen wir lieber, den großen Erfolg des Männchens nachzuvollziehen. Rumpelstilzchen hat sich eben nicht jeden Strohhalm auch nur vorgestellt. Das heißt, beim Damenproblem ist es aussichtslos, nacheinander alle Permutationen im Computer zu erzeugen und dann jede darauf zu testen, ob auch keine zwei Damen sich entlang einer Diagonale bedrohen. Vielmehr muss man in Gedanken eine Dame nach der anderen aufs Brett setzen und jedes Mal nachsehen, ob dadurch bereits ein Konflikt entsteht. Wenn ja, muss man für die

letzte Dame einen neuen Platz suchen, misslingt auch das, die vorletzte ebenfalls vom Brett nehmen und so weiter.

Da wir wissen, dass in jeder Spalte des Bretts genau eine Dame sitzen muss, lässt sich diese Suche systematisieren. Man geht spaltenweise von links nach rechts vor. In der ersten Spalte kann man die Dame noch auf jedes beliebige Feld setzen. Das schränkt jedoch die Möglichkeiten in den Folgespalten bereits ein. Eine Dame in Spalte 1 und Zeile 8 sperrt in Spalte 2 nicht nur das Feld in Zeile 8, in der sie selbst steht, sondern auch die in den Zeilen 7 und 9, die sie in schräger Linie angreifen könnte, entsprechend für die anderen Spalten. Diese Verbote muss man beachten, wenn man nun die nächsten Spalten mit Damen besetzt.

### Die Damen und die 27 Zwerge

Es ist hilfreich, sich vorzustellen, dass an jeder Spalte ein für diese zuständiger Zwerg sitzt (nicht zu verwechseln mit dem Männchen, das mit der Müllerstochter verhandelte). Irgendwann bekommt der Zwerg in Spalte  $k$  von seinem linken Nachbarn einen Laufzettel mit der aktuellen Belegung der Spalten 1 bis  $k-1$  herübergereicht. Daraus errechnet er zunächst die Sperrliste für seine eigene Spalte. Dann setzt er eine Dame in das erste noch freie Feld seiner Spalte und reicht den Laufzettel mit dem aktuellen Zustand des Bretts an seinen rechten Nachbarn  $k+1$  weiter. Der tut in seiner Spalte das Seinige und so weiter, bis entweder ein Zwerg entdeckt, dass in seiner Spalte nichts mehr frei ist, oder der letzte Zwerg eine Dame auf sein einziges freies Feld gesetzt hat, womit eine Lösung des Gesamtproblems entdeckt ist. In jedem Fall reicht ein Zwerg nach getaner Arbeit den Laufzettel an seinen linken Nachbarn zurück. Der setzt daraufhin wieder eine Dame in das nächste freie Feld seiner Spalte und reicht den Zettel nach rechts weiter – oder nach links, wenn es kein unerprobtes Feld mehr gibt.

So wandert der Zettel immer wieder von links nach rechts und zurück. Nur wenn er am äußersten rechten Ende ankommt, findet das Verfahren eine Lösung. Vor allem aber:

Sowie ein potenzieller Lösungsweg als Sackgasse erkannt ist, zieht sich das Verfahren zurück bis zur letzten Abzweigung und probiert von dort aus die nächsten noch unerforschten Wege. Damit verschwendet es keine Zeit für die Besichtigung von Stellungen, die von vornherein aussichtslos sind. Wegen dieses systematischen Rückzugs auf der eigenen Spur heißt das Verfahren »Backtracking«.

Zu jedem Zeitpunkt ist immer nur ein Zwerg aktiv. Deswegen kann man die ganze Arbeit auch einem einzigen Zwerg anvertrauen, der unablässig von Spalte zu Spalte hüpfte; das heißt, ein einziger Computerprozessor führt das ganze Backtracking-Verfahren durch. Das ist auch besser so; denn die Arbeit ist zwar so gigantisch, dass man möglichst viele Zwerge zugleich damit beschäftigen will – aber nicht auf eine Weise, die viel Verständigung unter ihnen erfordert. Zwerge sind ihrer Natur nach nämlich sehr fleißig, aber äußerst maulfaul. Besser, man teilt jedem ein großes Stück Arbeit zu, an dem er schweigend vor sich hin machen kann, bis er schließlich nur noch das Ergebnis mitteilt.

Für diese Zerlegung in Einzelaufträge (die »Parallelisierung«) bietet das Damenproblem einen eleganten Weg. Man bestimmt alle zulässigen Belegungen der ersten paar Spalten und beauftragt für jede Belegung einen Zwerg, alle dazu passenden Lösungen für das Restbrett zu finden. Für  $n=26$  arbeitete die Dresdner Gruppe mit sechs Anfangsspalten.

Dabei kann man sämtliche Anfangsbelegungen weglassen, bei denen die Dame in der ersten Spalte in der oberen Hälfte steht; denn jede dieser Belegungen ist – bezüglich der horizontalen Mittelachse – Spiegelbild einer Belegung mit Dame in der unteren Hälfte der ersten Spalte, und diese Spiegelsymmetrie gilt auch für alle Lösungen, die aus diesen Anfangsbelegungen hervorgehen. Das spart immerhin die Hälfte der Arbeit.

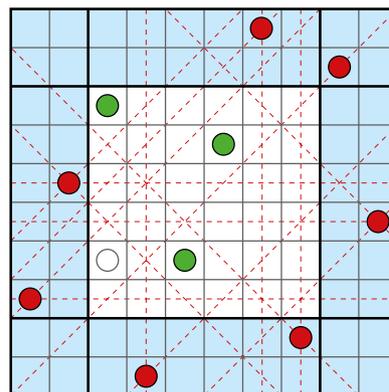
Für  $n=27$  fanden die Dresdner einen noch eleganteren Weg. Sie ermittelten die Anfangsbelegungen nicht auf einem Streifen am linken Rand, sondern ringsum in einen »Rahmen« der Breite 2. Unter diesen Belegungen kann man

## Zerlegung des Damenproblems

Der Übersichtlichkeit zuliebe zeigt dieses Beispiel nicht den Fall  $n=27$ , sondern  $n=10$ . In dem Rahmen der Breite 2 (blau) sitzen sieben Damen (rote Punkte); da eine Dame sowohl die zweitoberste Zeile als auch die zweitletzte Spalte beherrscht, wird die theoretische Maximalzahl von acht Damen im Rahmen hier nicht erreicht. Zum Bearbeiten bekommt ein Prozessor (»Zwerg«) nur das Innenbrett der Größe 6·6 zugewiesen, zusammen mit der Information, welche Felder des Innenbretts durch

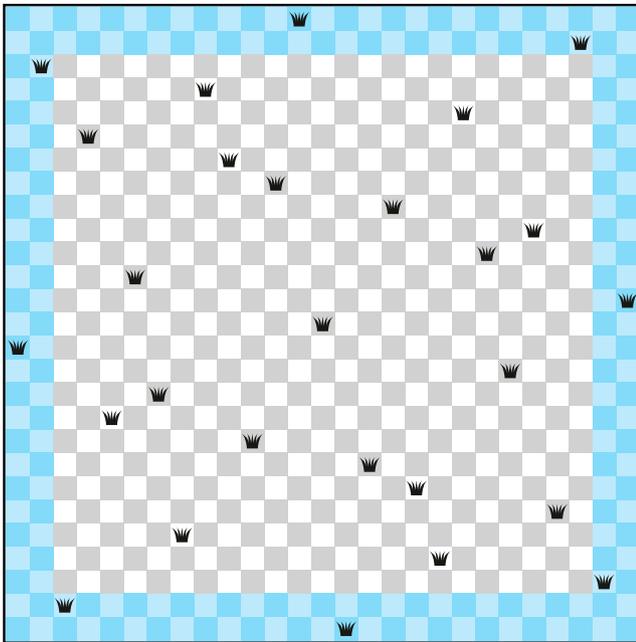
die Rahmendamen bereits gesperrt sind (gestrichelte rote Linien).

Der Zwerg beginnt mit dem ersten freien Feld der ersten Spalte (weißer Kreis). Der Versuch, daraus eine Lösung zu konstruieren, scheitert daran, dass in der dritten Spalte kein Platz mehr frei ist. Im zweiten Versuch setzt er seine erste Dame in das oberste Feld der ersten Zeile und gelangt daraufhin zu einer Lösung (grüne Kreise). Es ist die einzige für die gewählte Vorbelegung des Rahmens.



Das 10·10-Problem wird zerlegt in Rahmen (blau) und Innenbrett (weiß).

THOMAS FREISER, TO DRESDEN, UND MATTHIAS ENGELHARDT



**Eine der zuletzt gefundenen punktsymmetrischen Lösungen des 27-Damen-Problems. Die Vorbelegung im Rahmen (blau) ist sogar symmetrisch bezüglich einer Drehung um 90 Grad.**

nämlich nicht nur die in eine zusammenfassen, die bezüglich dieser einen Spiegelung symmetrisch sind, sondern alle anderen Spiegelungen und die Drehungen mit berücksichtigen. Damit spart man nicht nur wie bisher einen Faktor 2, sondern einen Faktor 8 – fast, denn wenn die Belegung selbst symmetrisch ist, fallen nicht acht, sondern nur vier oder gar auch nur zwei Möglichkeiten in eine zusammen; aber diese Fälle bilden eine verschwindende Minderheit.

Selbst nach dieser Reduktion bleiben reichlich zwei Milliarden verschiedene Vorbelegungen des Rahmens. Die verbleibende Aufgabe, dazu eine Lösung für das Innenbrett der Größe 23·23 zu finden (siehe »Zerlegung des Damenproblems«, links), bietet also praktisch beliebig vielen Zwergen zugleich Beschäftigung; in der Dresdner Installation waren es zeitweise bis zu 7000.

Für eine weitere Beschleunigung der Berechnung mussten die Dresdner tief in die technische Trickkiste greifen. Ein spezieller Schritt innerhalb des Verfahrens ist sehr oft auszuführen und verbraucht daher einen merklichen Anteil der Zeit: »Finde in der aktuellen Spalte das nächste freie Feld.« Das muss man in einem Computerprogramm üblicherweise in eine Folge von mehreren Schritten auflösen: Gehe vom aktuellen Feld eins hoch, frage dieses Feld: »Bist du bedroht?«, wenn ja, gehe noch ein Feld hoch und so weiter. Erst wenn die Antwort nein lautet, ist ein potenzieller Platz für die nächste Dame gefunden. Nun lautet die Antwort meistens ja, vor allem je weiter man zum rechten Rand kommt, so dass die Suche nach dem nächsten freien Feld viele Schritte in Anspruch nimmt.

In die computerübliche Binärdarstellung umgesetzt, läuft die Aufgabe darauf hinaus, in einer langen Kette von Binärziffern unter vielen Einsen die jeweils nächste Null zu finden,

und zwar möglichst, ohne jede Eins in der Kette einzeln abzufragen. Das Problem ist bekannt und auch schon gelöst worden, und zwar beim ganz gewöhnlichen Addieren. In der Grundschule haben wir gelernt, dass man beim schriftlichen Addieren säuberlich von rechts nach links vorgehen muss. Es könnte ja an jeder Stelle ein Übertrag (die »Eins im Sinn«) kommen, der könnte eins weiter links einen weiteren Übertrag auslösen und so weiter.

Entsprechend müsste ein Computer beim Addieren zweier Binärzahlen ebenfalls von rechts nach links arbeiten. Damit zum Beispiel die Summe  $111111+1=1000000$  (dezimal:  $63+1=64$ ) richtig herauskommt, müsste der Übertrag sechs Schritte nach links wandern. Jeder Schritt würde einen elementaren Rechentakt in Anspruch nehmen, und das Addieren zweier Binärzahlen mit typischerweise 32 Stellen wäre eine Zeit raubende Angelegenheit. Deswegen haben die Chipkonstrukteure Schaltungen erdacht, die in einem einzigen Schritt lange Einserketten in die eine Eins umwandeln, die am Ende von der ganzen Kette übrig bleibt. Allerdings stecken diese Schaltungen tief im Inneren eines Prozessors und sind dem Programmierer nicht zugänglich – es sei denn, man nutzt einen FPGA (»field-programmable gate array«, siehe Spektrum August 1997, S. 44). Diese Geräte lassen sich für spezielle Anwendungen gewissermaßen umverdrahten, und selbst interne Strukturen wie die Liste der Überträge sind abgreifbar. Indem Thomas Preußner diese »carry chain« für die Suche nach dem nächsten freien Damenplatz nutzte, gab er der Suche noch einmal einen Geschwindigkeitsschub und machte sie außerdem so effizient, dass auf einem einzigen FPGA teilweise mehr als 300 Zwergere ihren Dienst verrichten konnten.

Nun haben viele FPGAs ein Jahr vor sich hin gerechnet, vor allem nachts, wenn deren offizielle Nutzer nichts für sie zu tun hatten – und was hat die Welt nun davon? Jedenfalls keine Datei, in der alle Lösungen des 27-Damen-Problems verzeichnet wären. Jede dieser Lösungen hat zu irgendeinem Zeitpunkt vorgelegen; aber um sie alle aufzubewahren, hätten alle Festplatten der Welt nicht ausgereicht.

Was man notiert hat, ist die Anzahl der Lösungen zu jeder gegebenen Vorbelegung des Rahmens; selbst diese Datei hat für  $n=27$  die Größe 30 Gigabyte. Erstaunlich und für die Betreiber selbst überraschend ist, wie stark die einzelnen Lösungszahlen schwanken. Es gibt sogar Vorbelegungen, die zu gar keiner Lösung führen.

Für die Studenten war es ein imposantes Beispiel und Übungsstück dafür, wie man ein solches lang laufendes Großprojekt organisiert und implementiert. Und natürlich ist es immer ein schönes Gefühl und eine Art allgemeiner Leistungsshow, wenn man einen Weltrekord erzielt. ◀

#### QUELLE

**Preußner, T.B., Engelhardt, M.R.:** Putting Queens in Carry Chains, No. 27. In: Journal of Signal Processing Systems 10.1007/s11265-016-1176-8, 2016

#### LITERATURTIPP

**Delahaye, J.-P.:** Le problème des 8 reines ... et au-delà. In: Pour la Science 459, S. 78–83, 2016  
*Theorie des Problems und Verallgemeinerungen (auf Französisch)*

zet geredet. alsus gertau  
 sei gar vor allen dingen.  
 dar si des ic gedachte. vñ  
 hiez die maget ic balde  
 widerbringen. Das wa  
 ren storneu mere. sei kü  
 de niemant vñden. do wñ  
 vil zornbere. der furste  
 vñd iah er wolte nicht  
 erwidern. er müst al  
 verst von im das leben

fliesen. oder ez müz vñ  
 be die stange der Gu  
 harzous von mir den en  
 de thiesen. **H**ie mit em  
 ander tene. ic hertzen  
 chom genahet. dar fugt  
 ic michel tene. so dar si  
 want im sterben kan  
 hie bracht. one den sor  
 ge wart verberet. ic  
 gem hochgemüte vñd

5. 6. 8. 4  
 8. 2. 2  
 Dem von Kolonij  
 i. Fürstlichen  
 von Brandenburg  
 i. Lorenz La. 1. 1. 1. 1.  
 5. 5. 2. 0. 0.  
 E. W. G. W.  
 dem von Kolonij  
 Freitag die Wirt  
 i. 1. 1. 1. 1. 1. 1.  
 5. 6. E. 1. 2.  
 W. G. W.  
 dem von Kolonij  
 i. 1. 1. 1. 1. 1. 1.  
 5. 6. A. 37  
 MUSICA  
 i. 1. 1. 1. 1. 1. 1.  
 dem von Kolonij



**hie pracht den iunkfraw d'sygouinen den Strangen:**

Eine kostbare Hundeleine ließ Wolfram von Eschenbach den Besitzer wechseln und dabei Verderben bringen. Der Dichter Albrecht setzte das Romanfragment fort, diese und die folgende Abbildung sind seinem Werk entnommen.

En Sieu mon Esperence: i. 6. ff: 5. 3.  
 Mais mon vray seigneur d'adieu  
 paroit n'est en monne d'adieu  
 d'adieu d'adieu d'adieu  
 Kottall

BAVERISCHE STAATSBIBLIOTHEK MÜNCHEN ALBRECHT VON SCHAMBERG: JÜNGERER TÜBEL, GVN 8470, FOL. 159V, ERSTE HALBTE 15. JAHRHUNDERT

# IMAGINATION BUCHSTABEN, BEGEHREN UND TOD

**SERIE: SCHRIFT** Im Mittelalter war die Lust am Text eng verbunden mit einer Lust an dem Ding, auf dem er geschrieben war. Und diesem wurde nicht selten magische Wirkung beigemessen, wie fantastische Erzählungen aus der Zeit verraten.

»spektrum.de/artikel/1422038



Der Mediävist **Ludger Lieb** lehrt Ältere deutsche Philologie an der Universität Heidelberg. Seinen Forschungsschwerpunkt bildet die Literatur des Mittelalters und der Frühen Neuzeit. Er ist Sprecher des Sonderforschungsbereichs »Materiale Textkulturen«.

Man schreibt das Jahr 1327 Anno Domini. In einer italienischen Benediktinerabtei ereignen sich mehrere mysteriöse Todesfälle, und die Mönche fürchten schon den Anbruch der Apokalypse. Tatsächlich aber treibt ein Giftmörder sein Unwesen. Denn der Hüter der Klosterbibliothek fürchtet, die Lektüre eines verschollen geglaubten Buchs – Aristoteles' zweiter Band zur Poetik mit einem Lob des Lachens – könne Christen vom rechten Pfad abbringen. Also verbirgt er es vor neugierigen Augen und präpariert die Seiten obendrein mit Gift – wer das Werk aufspürt, darin blättert und sich dabei die Finger leckt, stirbt qualvoll. Als sein Tun offenbar wird und er keinen anderen Ausweg mehr sieht, lässt der Mönch die gesamte Bibliothek in Flammen aufgehen.

Ein Buch, das Neugier und große Ängste weckt. Das als verschollen gilt und trotz aller Anstrengungen, es zu verbergen, immer wieder auftaucht, geradezu als wolle es gefunden werden. Eine Schrift, die Menschen beglücken sollte und doch den Tod bringt. Mit seinem 1980 erschienenen Epos »Der Name der Rose« nahm der italienische Mediävist Umberto Eco seine Leser mit in eine von Glauben und Aberglauben geprägte mittelalterliche Welt. Das Werk des Aristoteles über die Komödie und das Lachen – es gilt tatsächlich als verschollen, ist aber vielleicht auch nie geschrieben worden – stellte er in den Fokus diverser Handlungsstränge, die Fiktion und Geschichtsschreibung verknüpften.

Das Verblüffende ist, dass man sich schon im Mittelalter derartige Geschichten erzählte: über Schriften, die erscheinen und wundersam wieder verschwinden. Ein auf den ersten Blick obskures, bei näherer Betrachtung aber gerade-

zu modernes Beispiel ist die »Geschichte vom Brackenseil« von Wolfram von Eschenbach (vermutlich 1170–1220), dem Autor des meisterhaften Ritterromans »Parzival«. Auch wenn dies unter Mittelalter-Germanisten noch diskutiert wird, spricht einiges dafür, dass die Geschichte von vornherein als Fragment konzipiert war, also nie als abgeschlossenes Stück. Gemeinsam mit einem anderen Fragment bildete es Wolframs »Titurel«, der nur in drei Handschriften erhalten ist.

In 39 Strophen zu je vier Versen erzählte der höfische Autor eine packende Szene aus der Liebesgeschichte von Sigune und Schionatulander, einem auch im »Parzival« erscheinenden Paar. Dort steht es exemplarisch für das Leid, das aus Liebe entstehen kann, denn als Parzival erstmals auf die beiden trifft (und er tut das dank einer mehrsträngigen Erzählweise insgesamt viermal), ist Schionatulander bereits tot, und Sigune hält ihn trauernd im Arm. Das Fragment entstand vermutlich nach dem »Parzival«, denn im »Titurel« erwähnte Wolfram den Tod des Landgrafen Hermann von Thüringen, und nach heutigem Wissen starb

## SERIE

### Magie der Schrift

Teil 1: September 2016

**Rätselhafter Indus-Kode**  
von Andrew Robinson

Teil 2: Oktober 2016

**Das Grab des Magiers**  
von Joachim Friedrich Quack

Teil 3: November 2016

**Qumran – Kultort, Schreibstube,  
Wissensspeicher**  
von Friederike Schücking-Jungblut

Teil 4: Dezember 2016

**Buchstaben, Begehren und Tod**  
von Ludger Lieb

dieser Mäzen höfischer Dichtung 1217. Die »Geschichte vom Brackenseil« lieferte damit wohl eine nachträglich verfasste Vorgeschichte dieser Nebenfiguren.

Im Fokus des Fragments steht die Leine eines Jagdhunds, im Mittelhochdeutschen eines »bracken«, und in diesem Fall erfand Wolfram ein wirklich ungewöhnliches Exemplar: Ineinander geschlagene Bahnen von Seide bilden eine mehr als 20 Meter lange Leine. Der wahre Wert zeigt sich aber erst, wenn man den Stoff auseinanderfaltet, wie man ein Buch aufschlägt. Verschiedenfarbige Edelsteine kommen nun zum Vorschein, mit Goldnägeln befestigt. Vor allem aber: Jeder von ihnen hat die Form eines Buchstabens – das Brackenseil trägt also eine lange Inschrift.

### **Geschichten, die Geschichte erzählen**

Im Mittelalter war Schriftlichkeit im Vergleich zu heute extrem selten; Literatur blieb einer gebildeten Elite vorbehalten. Erzählungen aus jener Zeit vermitteln daher Informationen über den praktischen Umgang mit Schrift und Büchern bei Hofe. Sie sind dafür sogar einzigartige Quellen. Denn fragt man Archäologen, die materielle Funde und Fundsituationen auswerten, oder Historiker, die sich mit Urkunden und anderen Dokumenten befassen, so erfährt man zwar viel: über den Bestand und die Größe von Bibliotheken; über die Organisation und Verbreitung von Schreibstuben; über die Werkzeuge, mit denen man schrieb, und die Materialien, auf denen dies geschah, wie auch über die Kosten, die dabei anfielen. Aber welche Erwartungen, Hoffnungen und Fantasien sich mit Schrift und Schreiben, mit Dichten und Lesen verbanden – das entnehmen Literaturwissenschaftler am besten den Erzählungen jener Zeit.

Den wortwörtlichen Inhalt der Inschrift vom Brackenseil offenbarte Wolfram in seiner Geschichte nur teilweise, wohl aber Thema und Autorin. Eine gewisse Königin Clauditte habe die Hundeleine herstellen lassen oder womöglich selbst angefertigt, um sie ihrem Geliebten Ehcunat (gesprochen: Echkunatt), einem Edelmann, doch von weit geringerem Stand als Clauditte, mitsamt dem Bracken zu schenken. Die Inschrift, so verrät der Autor seinen Lesern bezie-

hungsweise Zuhörern, erzähle beider Geschichte in Form eines Liebesbriefs.

Der erreicht zwar den Adressaten, doch der Bracke nimmt die Witterung eines verletzten Wilds auf, reißt sich los und verschwindet im Wald. Zufällig nun stürmen Wild und Hund – mit dieser Szene beginnt das Fragment – direkt auf Sigune und Schionatulander zu, die in der Abgeschiedenheit ein Zelt aufgeschlagen haben. Der Hund schleift die Leine hinter sich her. Deren Edelsteine »glesten durh den walt sam diu sunne« (»glänzten wie die Sonne durch den Wald«).

Schionatulander rennt dem Bracken hinterher und fängt ihn ein. Er schenkt ihn Sigune, seiner Geliebten, die den Ritter bislang aber nicht erhört hat. Damit das Tier nicht wegläuft, wickelt er die Leine um eine Zeltstange. Sigune jedoch bemerkt die Inschrift und beginnt zu lesen. Sie begeistert sich und wickelt die Leine ab, um den ganzen Text zu sehen. Es kommt, wie es kommen muss: Der Bracke reißt sich wieder los und stürmt davon. Vergeblich umklammert Sigune das seidene Seil, doch die scharfkantigen Edelsteinbuchstaben schneiden ihr in die Hand, und sie muss loslassen. Zwar ereilt sie nicht der Gifftod, wie es bei den neugierigen Mönchen des Eco-Romans der Fall war. Dennoch nimmt das Unglück nun seinen Lauf, denn Sigune ist ganz besessen von dem entschwundenen Liebesbrief. Von Schionatulander, der selbst kein Interesse daran hatte und lieber angeln gegangen war, verlangt sie, ihr das Brackenseil zurückbringen; als Gegenleistung will sie seinem Minnewerben endlich nachgeben. Der Geliebte eilt davon, doch ein anderer hat inzwischen das Tier gefangen. Ein Zweikampf entbrennt, und Schionatulander wird getötet.

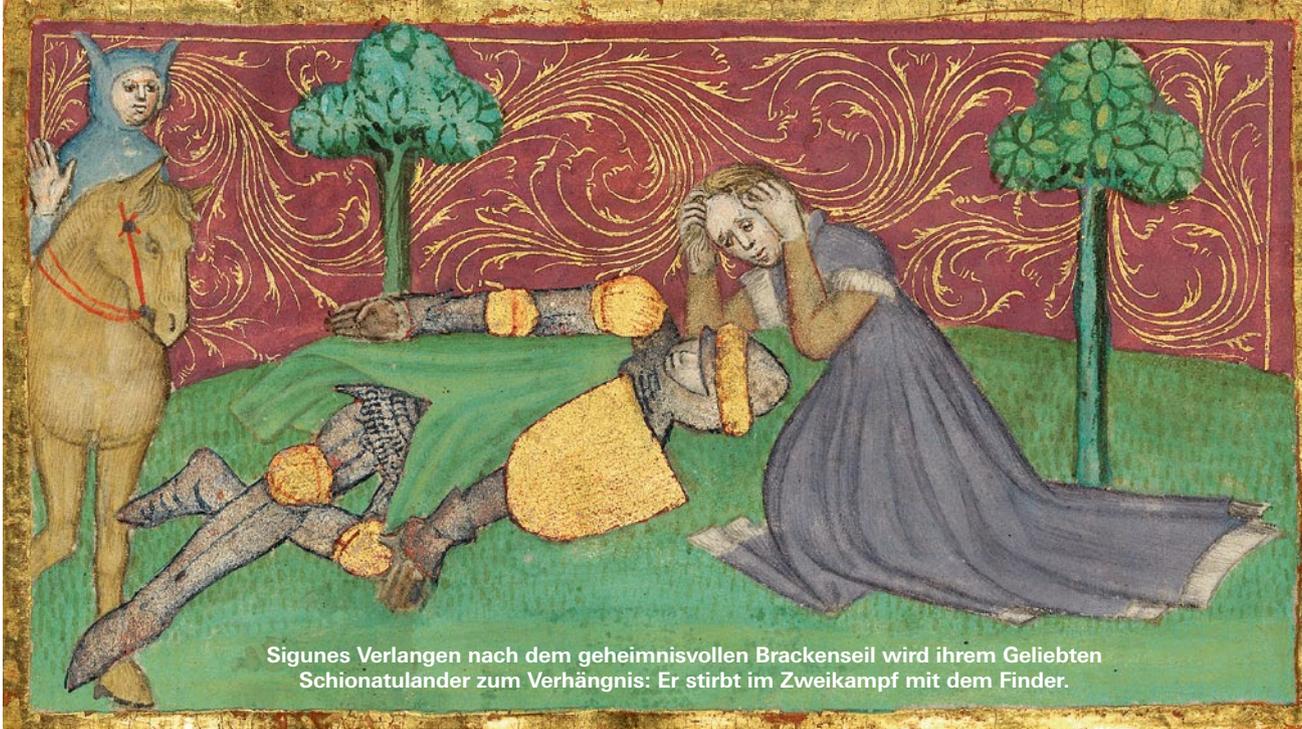
Letzteres wissen wir aus dem »Parzival«, denn Wolframs Fragment bricht hier bereits ab. Sigune bleibt ohne ihren Geliebten zurück, hat die Inschrift verloren und wird daher auch nie alles über die erfüllte Liebe der Königin Clauditte erfahren. Ein materiell und ideell kostbarer Text, der von etwas sehr Schöнем handelt, war dem falschen Boten anvertraut worden, entkam und kehrte zurück, weckte Begehrlichkeiten und brachte am Ende Tod und Trauer.

Wer die Vorstellungswelten des Dichters und seiner Zeitgenossen aus diesem Stück Fantastik herauslesen will, muss sich klarmachen, welch geheimnisvolle Aura des Sakralen und Übernatürlichen alles Geschriebene damals umgab. Die Edelsteine drücken dies schon durch ihren erheblichen materiellen Wert deutlich aus. Zudem hatte jene Königin Clauditte offenbar persönlich sehr viel in diese Schrift investiert. Doch das war auf keinen Fall alles, denn im Mittelalter sprach man Edelsteinen heilende Kräfte zu. Ein damit geschriebener Text musste also unabhängig von seinem Inhalt bereits erhebliche magische Wirkung entfalten (diesen Glauben an eine stoffliche Macht von Schrift kennen wir noch heute, man denke nur an die Gravuren in Eheringen oder an Tätowierungen).

Obendrein schrieb man unterschiedlichen Edelsteinen auch verschiedene Wirkkräfte zu. Denkt man nun als nächste Ebene die Worte hinzu, die aus den in verschiedenen Farben schillernden Buchstaben gebildet wurden, entstand vor dem inneren Auge des höfischen Publikums ein prächtiges Farbenspiel, das die Mehrdeutigkeit der Inschrift auch optisch zum Ausdruck brachte.

## **AUF EINEN BLICK RITTER UND MAGIE**

- 1** Mittelalterliche Erzählungen geben Einblick in den praktischen Umgang mit Schrift ebenso wie die damit verbundenen Vorstellungen.
- 2** Insbesondere fantastische Ritterromane, wie der höfische Dichter Wolfram von Eschenbach sie schrieb, zeigen, dass Texten wie auch Textträgern magische Wirkung zugemessen wurde.
- 3** Eine Analyse der »Geschichte vom Brackenseil« offenbart überdies eine ausgeprägte Lust am Spiel mit Bedeutungsebenen, bei dem Bücher ein von den Menschen schwer kontrollierbares Eigenleben entfalten.



Sigunes Verlangen nach dem geheimnisvollen Brackenseil wird ihrem Geliebten Schionatulander zum Verhängnis: Er stirbt im Zweikampf mit dem Finder.

BAVERISCHE STAATSBIBLIOTHEK MÜNCHEN (ALBRECHT VON SCHARENBERG, JÜNGERER TITUREL, CGM 8402, FOL. 173R, ERSTE HALBE 15. JAHRHUNDERT)

Doch dieses Wunderwerk entweicht und macht sich selbstständig. Mit diesem zentralen Handlungsmotiv hat es zunächst ebenfalls eine praktische Bewandnis: Da es im Mittelalter noch keinen Buchdruck gab, lagen alle Schriften nur als aufwändig hergestellte Unikate vor, die auch ohne Edelsteinbuchstaben wertvoll und begehrt waren – und nicht selten gestohlen wurden. Andererseits ist dem Bild des durch den Wald gezogenen Textes auch eine gewisse Wildheit zu eigen: Die Geschichte des glücklichen Liebespaars Clauditte und Ehcunat scheint gleichsam eigene Ziele zu verfolgen.

Wer wild gewordene Texte einfängt, muss freilich gut Acht geben, dass sie nicht wieder abhandenkommen. Gerade jene Schriften, welche die Pfade der Konvention verlassen, ziehen auf neue Wege. So auch in diesem Fall, denn wie die Verfasserin der Brackenseil-Inschrift liebte auch Sigune einen Mann, dessen gesellschaftlicher Stand weit unter dem ihren lag. Das verzweifelte Begehren Sigunes, die entwichene Inschrift wiederzugewinnen, war wohl auch in der Hoffnung begründet, der vollständige Text böte eine Lösung für ihr Leben.

Doch keine Schrift, und sei sie noch so lehrreich oder einzigartig, kann je die mühevoll Aufgabe ersetzen, im Hier und Jetzt verantwortungsvoll zu handeln. Statt die glitzernde Geschichte einer fremden erfüllten Liebe besitzen zu wollen, hätte die junge Frau ihren werbenden Geliebten und sich selbst glücklich machen können. Letztlich verfiel sie aber der Magie eines Textes, der nicht für sie bestimmt war. In solchen Fällen kann es auch sein, dass Schrift tötet, wenn nicht direkt wie bei Umberto Eco, dann doch als Folge all der Begehrlichkeiten und falschen Entscheidungen, die durch sie ausgelöst wurden.

Erklärt sich damit auch der fragmentarische Charakter der Geschichte? Sie endet, ohne den Verbleib des Seils oder das weitere Schicksal der noch lebenden Personen abschließend zu klären (weshalb ein gewisser Albrecht den »Titurel« etwa 50 Jahre später »fertig« dichtete). Wolframs Publikum erhielt nur ein Stück des gesamten fiktiven Handlungsablaufs, so wie Sigune die Brackenseil-Inschrift nur unvollständig zu Gesicht bekam.

Tatsächlich lässt sich der Bogen noch weiter schlagen. Denn jenes Publikum musste von der Erzählung noch aus anderen Gründen irritiert sein, brach der Autor doch im Großen wie im Kleinen immer wieder mit den Regeln höfischer Literatur: Da war die Liebe, die wegen später Einwilligung der Frau in den Tod führte; da war ein Brief in Form einer kostbaren und magischen Inschrift, die ihrem Empfänger nur erzählte, was er schon wusste (die eigene Liebesgeschichte), oder auch der Edelmann Schionatulander beim Angeln – eine seinem Stand unziemliche Beschäftigung.

Die »Geschichte vom Brackenseil« reihte sich offenbar ein in Wolframs Konzept, Literatur solle ihren Adressaten die Komplexität des Lebens vorführen und die Gleichzeitigkeit von Dunkelheit und Licht erfahrbar machen. Damit stand er im Gegensatz zu den beiden anderen großen Autoren seiner Zeit, Hartmann von Aue und Gottfried von Straßburg, deren Romane in geschliffener Sprache Ordnung und Orientierung schufen. Wolfram verwehrte seinem Publikum solchen Trost. Im Brackenseil-Fragment demonstrierte er ihm, was geschieht, wenn man Literatur mit dem Leben verwechselt, wenn man sich von der Magie der Schrift täuschen lässt, statt das eigene Schicksal in die Hand zu nehmen. ◀

#### QUELLEN

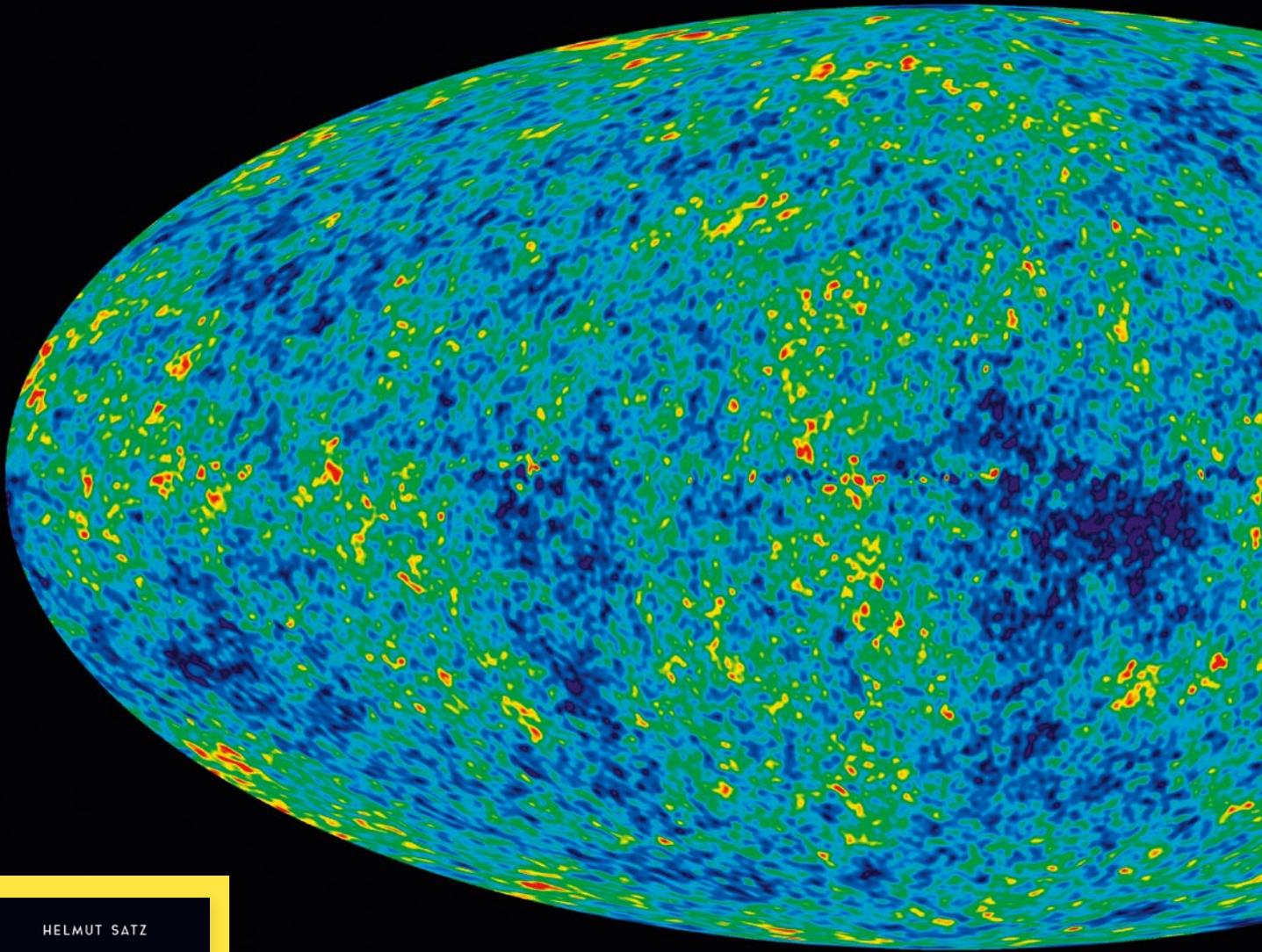
**Brackert, H., Fuchs-Jolie, S. (Hg.):** Wolfram von Eschenbach, Titurel. de Gruyter, Berlin/New York 2003

**Brackert, H.:** Sinnspuren. Die Brackenseilinschrift in Wolframs von Eschenbach »Titurel«. In: Haferland, H., Mecklenburg, M. (Hg.): Erzählungen in Erzählungen. Phänomene der Narration in Mittelalter und Früher Neuzeit, Wilhelm Fink, München 1996, S. 155–175

**Lieb, L.:** Spuren materialer Textkulturen. Neun Thesen zur höfischen Textualität im Spiegel textimmanenter Inschriften. In: Kellner, B. et al. (Hg.): Höfische Textualität. Festschrift für Peter Strohschneider. Winter, Heidelberg 2015, S. 1–20

**Lieb, L., Ott, M.R.:** Schrift-Träger. Mobile Inschriften in der deutschsprachigen Literatur des Mittelalters. In: Kehnel, A., Panagiotopoulos, D. (Hg.): Schriftträger – Textträger. Zur materialen Präsenz des Geschriebenen in frühen Gesellschaften. de Gruyter, Berlin/München/Boston 2015, S. 15–36

NASA / WMAP SCIENCE TEAM

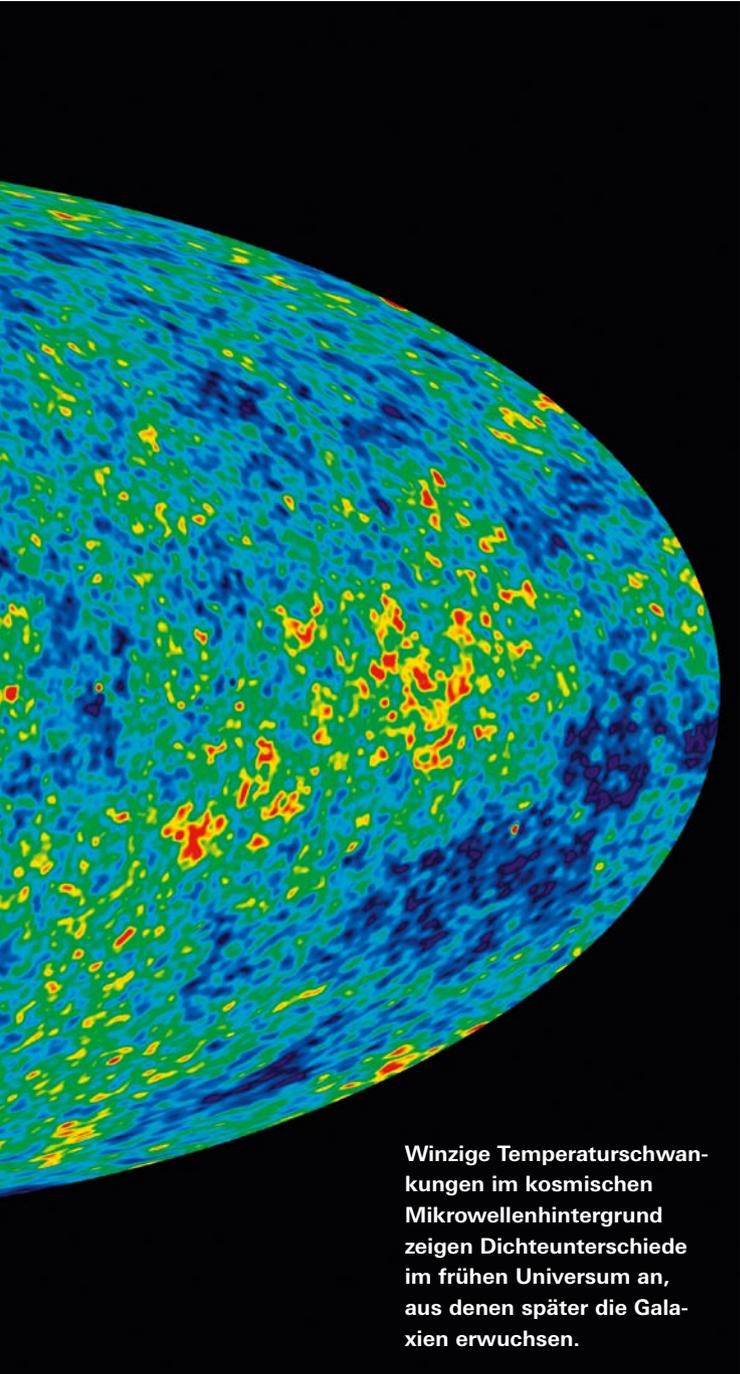


## KOSMOLOGIE **WIE EINE DAMPFBLASE IM KOCHTOPF**

**Ein Teilchenphysiker  
umreißt die Entstehung  
des Universums.**

▶ Dass der Kosmos sehr wahrscheinlich mit einem »Urknall« begann, ist weithin bekannt. Wie dieser genau ablief und das uns umgebende Universum hervorbrachte, dagegen weniger. Eine Lücke, die der emeritierte Physikprofessor Helmut Satz mit vorliegen-

dem Buch schließen möchte. Wegen der extremen Dichte, die das Universum anfangs besaß, benötigt man die Teilchenphysik, um die damaligen Vorgänge zu beschreiben. Diese war das Arbeitsgebiet des Autors. Außerdem sind natürlich Astronomie und Kosmologie



NASA / WMAP SCIENCE TEAM

Winzige Temperaturschwankungen im kosmischen Mikrowellenhintergrund zeigen Dichteunterschiede im frühen Universum an, aus denen später die Galaxien erwachsen.

wichtig – Disziplinen, in denen Satz nicht selbst publiziert hat.

Das erste Kapitel zum Urknall und dem, was »vorher« war, bleibt notgedrungen spekulativ. Vermutlich ist das Universum als Blase aus einer Art Urkonsistenz hervorgegangen,

wobei spontan ein Phasenübergang von einem höher- zu einem niederenergetischen Zustand ablief – ähnlich, wie sich in überhitztem Wasser Dampfblasen bilden. Und wahrscheinlich ist das nicht nur einmal passiert, sondern es geschieht immer wieder.

Weiterhin umreißt der Autor die Grundlagen der Teilchenphysik – ein notwendiger Exkurs, um verstehen zu können, wie die Materie im Universum entstand. Er behandelt auch die kleine, aber äußerst wichtige Asymmetrie der schwachen Wechselwirkung, die unerlässlich war, damit am Ende des Urknalls Materie übrig blieb. Ohne sie hätten sich sämtliche entstandenen Teilchen und ihre entsprechenden Antiteilchen gegenseitig vernichtet.

Mit zunehmender Ausdehnung und dadurch fallender Temperatur durchlief das Universum eine Reihe weiterer Phasenübergänge, verrät das Werk: von der Quark- über die Hadron- und Lepton- zur Strahlungs- und schließlich Materieära, dem heutigen Zustand. Während des letzten Übergangs, bei einer Durchschnittstemperatur des Alls von 3000 Kelvin, trennte sich die Strahlung von der Materie, und das Universum wurde durchsichtig. Die dabei »freigelassene« Strahlung sehen wir heute als kosmischen Mikrowellenhintergrund. Daran anschließend kommt der Autor auf die Strukturbildung im Kosmos zu sprechen: Wie konnte etwas so Komplexes wie das Universum entstehen, wenn doch die Gesetze der Physik diktieren, das große Ganze entwickle sich in Richtung maximaler Unordnung?

Vieles bleibt rätselhaft, allen voran Dunkle Materie und Dunkle Energie. Zusammen mit Schwarzen Löchern widmet Satz ihnen ein eigenes Kapitel, das treffend mit »Dunkle Ecken« überschrieben ist. Ein kurzer Ausblick auf die erwartete weitere Entwicklung des

Kosmos und ein Resümee in Form einer »neuen Schöpfungsgeschichte« runden das Werk ab.

Das alles zusammen ist viel Stoff für die 184 Seiten des Buchs. Wahrlich keine leichte Kost, aber ein wichtiges und fesselndes Thema. Leider kann man das Werk nicht uneingeschränkt empfehlen. Zum einen gelingt es Satz nicht, die diversen Phasenübergänge eingängig zu erklären; der Text springt immer wieder vor und zurück und dürfte etliche Leser verwirren. Der Übergang zur Nukleosynthese ist wie versehentlich sogar zweimal kurz hintereinander erläutert. Zum anderen fallen beim Lesen einige Ungenauigkeiten und auch regelrechte Fehler auf. Die Sonne ist nicht bereits eine Milliarde Jahre nach dem Urknall entstanden; die Temperatur bei der Strahlungsentkopplung betrug nicht 300 000 Kelvin; es wurde kein Schwarzes Loch entdeckt, indem man dabei zusah, wie es etwas verschluckte. Die beiden Anhänge sind verzichtbar, und das Anführen der Einstein-Gleichungen ohne Erklärung des Tensorkalküls ergibt wenig Sinn.

Trotzdem liefert »Kosmische Dämmerung« einen faktenreichen und kompakten Abriss der Entwicklung des Universums und stellt die hier beteiligten Forschungsdisziplinen vor. Ein Glanzpunkt ist das Kapitel über Strukturbildung und Entropie – ich kenne kein anderes populärwissenschaftliches Buch, das dies so gut beschreibt.

Stefan Gillissen ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik.

## TECHNIK AUFSTIEG DER MASCHINEN



Ulrich Eberl  
**SMARTE MASCHINEN**  
Wie künstliche Intelligenz  
unser Leben verändert  
Hanser, München 2016  
416 S., € 24,-

### Die Chancen und Risiken künstlicher Intelligenz.

Das künstliche Superhirn, das die Weltherrschaft an sich zu reißen droht, ist ein klassischer Sciencefiction-Topos. Mag uns ein solches Szenario derzeit auch eher unwahrscheinlich vorkommen angesichts qualmender Smartphone-Akkus oder Autos, die autonom ins nächste Stauende rasen, so dominieren Computer heute doch schon auf etlichen Feldern, die einst der menschlichen Intelligenz vorbehalten schienen. Erinnerung sei hier nur an die vermeintlich ewigen menschlichen Bastionen Schach und Go, die 1997 und 2016 fielen, als sich mit Garri Kasparow und Lee Sedol die jeweils stärksten Meister ihrer Zunft einem Computer geschlagen geben mussten.

Die Beispiele Kasparow und Sedol finden sich auch in Ulrich Eberls Buch. In 13 Kapiteln entwirft der Wissenschaftsjournalist mögliche Zukunftsszenarien dazu, wie künstliche Intelligenz (KI) unseren Alltag verändern könnte. Faktenreich und mit hoher Sachkenntnis führt Eberl durch die Welt der Roboter und Computer, erläutert, was sich hinter Begriffen wie Smart Home, Smart City, Cyborg oder Neurochip verbirgt, und zeigt die Chancen auf, die KI uns künftig eröffnet – ohne dabei die Risiken zu verschweigen. Auch wenn die Prognosen des Autors manchmal etwas überzogen erscheinen, etwa bei der Frage der Vernichtung von Arbeitsplätzen durch KI, so ist das Buch insgesamt doch eine sehr lesenswerte Auseinandersetzung mit einer Entwicklung, die unser Leben mehr und mehr bestimmen wird. Thomas Trösch

## MATHEMATIK GÖTTLICHE PROPORTION UND MENSCHLICHE DEUTUNG

Eine Ausstellung zum Goldenen Schnitt räumt mit hartnäckigen Vorurteilen über dessen künstlerische Bedeutung auf.

Ich gestehe, dass mir der Name Adolf Zeising (1810–1876) bislang nicht geläufig war. Dabei ist der Einfluss dieses Gelehrten kaum zu überschätzen. Zeising war derjenige, der dem Teilungsverhältnis des Goldenen Schnitts eine überragende ästhetische Bedeutung zuschrieb. Seine Zeitgenossen nahmen seine »Neue Lehre von den Proportionen des menschlichen



Oliver Götze,  
Lieselotte Kugler (Hg.):  
**GÖTTLICH, GOLDEN, GENIAL**  
Weltformel Goldener Schnitt?  
Hirmer, München 2016  
192 S., € 29,90

Körpers« (1854) begeistert auf und suchten jene Proportionen nicht nur in der belebten Natur, sondern auch in den verschiedensten Kunstwerken. Die Vorstellung, Maler aller Epochen hätten ihre Bildfläche zu-

nächst im Verhältnis 1,618 zu 1 zerlegt und die wichtigsten Bildelemente auf den Teilungslinien platziert, ist ins allgemeine Bewusstsein übergegangen.

Nur bleibt von dieser Idee unter dem kritischen Blick der Kunsthistoriker so gut wie nichts übrig. In keinem überlieferten Dokument hat je ein Maler beschrieben, dass er diese Technik beim Komponieren eines Bilds angewendet habe. Und bei näherer Betrachtung erweisen sich die vermeintlichen Belege in existierenden Kunstwerken als ungenau oder willkürlich. Irgendein Element findet sich immer, das mehr oder weniger präzise auf einer Teilungslinie liegt; das muss man dann nur noch zum bedeutendsten Bildteil hochinterpretieren.

Inzwischen herrscht offenbar Krieg zwischen den

Vertretern der zeisingischen Ideen und jenen, die sie dekonstruieren – eine Debatte, die so heftig ist, dass für irgendwelche Kompromisspositionen kein Platz bleibt. In diesem Schlachtgetümmel erscheint es durchaus mutig, wenn die Museumsstiftung Post und Telekommunikation eine Ausstellung zum Thema präsentiert (Museum für Kommunikation Berlin, 9. September 2016 bis 26. Februar 2017; später in den Schwestermuseen in Nürnberg und Frankfurt). Das vorliegende Buch ist der Begleitband dazu. Redlich versuchen die Ausstellungsmacher, beiden Seiten gerecht zu werden, aber am Ende stehen die Zeising-Fans eindeutig als Verlierer da. Der Berliner Kunsthistoriker Werner Busch findet zwar zu zwei Zeichnungen von Caspar David Friedrich sehr

fantasievolle und tiefsinnige Deutungen, bestätigt damit jedoch unfreiwillig und ziemlich drastisch den Willkürvorwurf der Gegenseite.

Zeising hat noch etwas anderes durcheinandergebracht. Eigentlich hieß der Schnitt nicht golden, sondern göttlich – der Mathematiker Luca Pacioli (1445–1514) hat die Zerlegung einer Strecke in zwei Teile, von denen der kleinere zum größeren sich verhält wie der größere zum Ganzen, als »divina proportio« bezeichnet. Und in der Mathematik genießt dieses Verhältnis durchaus zu Recht einen prominenten Status. Die Zahl  $\varphi = (1 + \sqrt{5})/2$  ist das Verhältnis von Diagonale zu Seite des regelmäßigen Fünfecks; das wiederum verschafft den »goldenen Dreiecken« (gleichschenkligen Dreiecken mit dem Seitenverhältnis  $\varphi$  oder  $1/\varphi$ ) die Hauptrolle bei der Konstruktion der nichtperiodischen Penrose-Parkette. Dividiert man jedes Glied der Fibonacci-Folge (das ist die mit der Vermehrung der Karnickel) durch seinen Vorgänger, so streben die

Quotienten gegen  $\varphi$ ; und  $\varphi$  ist die irrationalste unter den irrationalen Zahlen in dem Sinn, dass sie sich am hartnäckigsten gegen die Approximation durch rationale Zahlen sträubt. Um diese Themen zu behandeln, bekommt Albrecht Beutelspacher, der Gründer des Gießener Mathematikmuseums, immerhin ein Kapitel Platz – die einzige Passage, die in diesem Buch über ein eigentlich mathematisches Thema ernsthafte Mathematik bietet.

Aber wenn schon nicht in der Kunst, so hat doch zumindest in der Pflanzenwelt der Goldene Schnitt einen legitimen Auftritt. Die Heidelberger Botaniker Peter Leins und Claudia Erbar demonstrieren, warum Pflanzenteile wie Sonnenblumenkerne, die Blätter des Rotkohls sowie die Schuppen am Tannenzapfen und auf der Ananas in ihrer Anordnung aufeinander folgende Fibonacci-Zahlen und im Grenzwert eben auch die Zahl  $\varphi$  realisieren.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

## MEDIZIN ZWEI QUADRAT- METER, ZEHN KILO

Was wir über die Haut wissen sollten.

Wer die Hochglanzwelt von Lifestyle-Magazinen und Werbeclips für echt hält, kann den Eindruck gewinnen, Hautpflegeprodukte wie teure Seifen, Cremes und Lotionen seien unverzichtbar. Und wem auch diese nicht reichen, der hilft gern zusätzlich mit Anti-Aging-Intensivprogrammen und/oder Solarien nach. Was dann noch übrig geblieben ist an natürlichem Umgang mit unserer Haut, das zerstören Piercing- und Tattoo-Studios. Yael Adlers Buch ist bestens geeignet, um jenseits all dieser Modetrends die biologisch-medizinischen Aspekte unseres größten Körperorgans zu beleuchten.

Adler ist Fachärztin für Haut-, Geschlechts- und Gefäßerkrankungen und hat eine Zusatzausbildung als Ernährungsmedizinerin.



Yael Adler  
**HAUT NAH**

Alles über unser größtes Organ  
Droemer, München 2016  
336 S., € 16,99

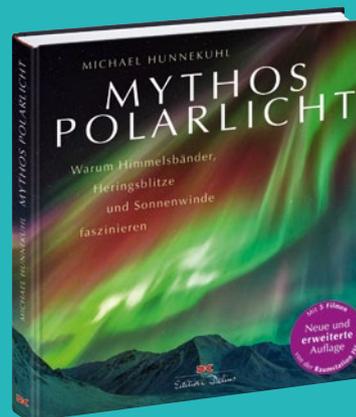
Kaum ein öffentlich-rechtlicher oder privater TV-Kanal, in dem sie nicht schon als Expertin für Hautgesundheit aufgetreten ist. Sie besitzt offensichtlich ein Talent, komplexe Zusammenhänge ebenso sachlich kompetent wie anschaulich unterhaltsam darzustellen – das zeigt auch die Lektüre des vorliegenden Werks.

Mit bis zu zwei Quadratmeter Fläche und bis zu zehn Kilogramm Masse ist die Haut nicht nur das

ANZEIGE



€ 49,90 [D] • ISBN 978-3-667-10662-9



€ 29,90 [D] • ISBN 978-3-667-10814-2

# WETTER PHÄNOMENE



DELIUS KLASING



größte, sondern auch das schwerste unserer Organe. Sie bildet eine unverzichtbare Barriere zur Außenwelt, dient der Reizaufnahme, Temperaturregulation und Abwehr schädlicher Einflüsse.

Mechanorezeptoren etwa ermöglichen uns, auf Berührungen zu reagieren; Hautpigmente schützen vor UV-Strahlung, Schweißdrüsen vor Überhitzung und Haare vor Wärmeverlust; und an besonders beanspruchten Stellen setzt eine

Hornhaut die Verletzungsgefahr herab.

Adler erklärt zunächst, wie die verschiedenen Hautschichten aufgebaut sind, wie sich ihre Schädigung auf die jeweilige biologische Funktion auswirkt und was das für unser Wohlbefinden bedeutet. Ob Säureschutzmantel, Schuppen, Leberflecken, Dehnungstreifen, Falten oder Cellulite: Zu jedem dermatologischen Thema kann die Ärztin Wissenswertes und zuweilen

## Das Stechen von Tattoos installiert quasi tickende Zeitbomben unter die Haut und grenzt damit an fahrlässige Körperverletzung

auch Vergnügliches berichten.

Ausführlich beschreibt sie die sichtbaren und weniger sichtbaren Spuren, die das Leben auf unserer »derma« hinterlässt. Das Spektrum reicht von Altersflecken über Hautkrebs, Herpes und Fußpilz bis hin zu Insektenstichen. Überzeugend führt die Autorin aus, warum bestimmte Lebensstile der Haut eher zuträglich sind, andere dagegen weniger. Manchen beliebten Schönheitsanwendungen erteilt Adler eine klare Abfuhr. Unmissverständlich verdeutlicht sie, dass das Botox-spritzen nur gerade noch akzeptabel ist – das Stechen von Tattoos aber quasi tickende Zeitbomben unter die Oberhaut installiert und somit an fahrlässige Körperverletzung grenzt.

Hautschäden infolge bizarrer Modetrends lassen sich leicht vermeiden. Aber kann man vermittels bestimmter Lebensweisen auch Akne und Pickeln, Neurodermitis und dergleichen vorbeugen oder diese zumindest eindämmen? Adlers Darlegungen lassen diesen Schluss zu. Innerhalb gewisser Grenzen wirkt sich unser Lebenswandel offenbar auf die Haut aus. So zeigt die Autorin, dass viel mehr Hirn und auch Bauch in unserer »derma« steckt als gemeinhin angenommen. Wahre Schönheit und Gesundheit kommen in der Tat von innen. Emotionen und Neurosen, vor allem

aber der Speiseplan machen die Haut zum Spiegel der Seele: »Die Haut ist, was du isst!« Daher empfiehlt Adler eine »Haut-Cuisine«, die auf bestimmte Makro- und Mikronährstoffe setzt. Zudem präsentiert sie Belege dafür, dass liebevoller Sex nicht nur ein Jungbrunnen ist, sondern eines der wirksamsten Schönheits- und Gesundheitsmittel.

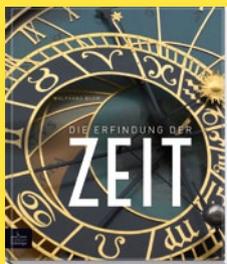
Aus seiner Haut kann bekanntlich niemand heraus. Sie zeigt uns und anderen an, wie jung oder alt, erholt oder abgespannt, gesund oder krank wir sind. Zudem verrät sie etwas über unseren Gemütszustand. Angesichts dessen warnt die Autorin mehrfach vor übertriebener Körperpflege. Viele im Alltag verwendeten Hygieneprodukte seien nicht nur überflüssig, sondern bei regelmäßiger Anwendung sogar schädlich. Nichts ruiniere die Haut so nachhaltig wie kosmetisch motivierter Wasch- und Pflegewahn, kombiniert mit Solarienbesuchen. Adlers Empfehlung: »Wer der Haut wirklich Gutes tun will, sollte nicht zu viel tun.«

Eine ebenso lehrreiche wie amüsante Lektüre, die buchstäblich unter die Haut geht. Denn Adler bietet en passant auch Tipps für eine gelungene Lebensgestaltung. Mehr kann ein dermatologisches Sachbuch nicht leisten.

Reinhard Lassek ist promovierter Biologe und arbeitet als Journalist und Publizist in Celle.

## ZEIT DREI ZUGÄNGE ZUR ZEITWAHRNEHMUNG

Vom Chronometer über gesellschaftliche Aspekte bis zur Raumzeit.



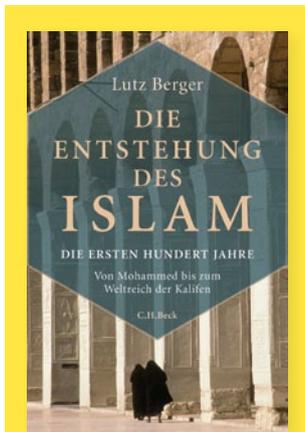
Wolfgang Blum  
**DIE ERFINDUNG DER ZEIT**  
Edition Fackelträger,  
Köln 2016  
288 S., € 40,-

Was ist Zeit? Wolfgang Blum nimmt sich dieser Frage aus drei verschiedenen Perspektiven an: Zunächst beschreibt er die Entdeckungen, die es der Menschheit möglich machten, Zeit immer genauer zu messen. Anschließend berichtet er aus Sozialwissenschaft und Literatur, wie wir Zeit wahrnehmen und welche gesellschaftlichen Entwicklungen das menschliche

Zeitgefühl beeinflusst haben. Zuletzt erklärt er, wie Philosophen und Physiker die Zeit definieren. Dabei schildert er Anekdoten über Erfinder und Wissenschaftler und stellt Bezüge zum heutigen Alltag her, so dass selbst komplexe physikalische Themen leicht lesbar und gut verständlich erscheinen. Eine ansprechende Bebilderung rundet den Text ab. Schade nur, dass der Autor die Studien, auf die er sich vor allem im Mittelteil bezieht, selten konkret benennt und überhaupt nur an wenigen Stellen Belege anführt, weshalb man sich schwer eine Meinung zu den dargebotenen Thesen bilden kann. Katrin Hochberg

## RELIGIONS- GESCHICHTE IM NAMEN DES PROPHETEN

**Nüchterne und zugleich farbige Schilderung der ersten 100 Jahre muslimischen Glaubens.**



Lutz Berger  
**DIE ENTSTEHUNG DES ISLAM**  
Die ersten hundert Jahre  
Von Mohammed bis zum  
Weltreich der Kalifen  
C.H. Beck, München 2016  
334 S., € 26,95

Der Islamwissenschaftler und Turkologe Lutz Berger versteht es, die Geschichte des Islam in dessen ersten 100 Jahren nüchtern und zugleich farbig darzulegen. Nüchtern deshalb, weil der Autor immer wieder auf die schwierige Quellenlage hinweist. Farbig, weil er pointiert Einblicke in eine Welt gibt, die von unseren heutigen Denkweisen sehr weit entfernt ist – ohne deren Kenntnis man das derzeitige Geschehen aber nicht verstehen kann.

Die Anfangszeit einer Religion, ob Islam, Judentum oder Christentum, ist historisch meist schwer zu fassen. Zeitgenössische Dokumente sind in der Regel äußerst rar, und Schriften aus späteren Epochen idealisieren und überformen die frühen Jahre üblicherweise. Berger bettet die Entstehung des Islam deshalb detailliert in die Geschichte des 6. und 7. Jahrhunderts ein. Die religiösen Probleme dieser Zeit verbindet er geschickt mit

dem politischen Geschehen, das auf der einen Seite bis weit nach Asien und auf der anderen bis nach Europa ausstrahlte. Die Jahrzehnte damals waren überschattet von einem Konflikt zweier mächtiger Imperien, die sich einen langen und erbitterten Abnutzungskrieg lieferten: das Oströmische Reich und das iranische Reich der Sassaniden. Beide standen sich unter anderem in religiösen Belangen als Kontrahenten gegenüber. Im Sassanidenreich dominierte der Zoroastrismus, der eng mit der iranischen Kultur verbunden war. Das Oströmische Reich hingegen war christlich, wenn auch von zahlreichen Auseinandersetzungen um die richtige Lehre geprägt. Ihr andauerndes Ringen band wirtschaftliche und militärische Kräfte und schwächte beide Großreiche enorm.

Vor dem Hintergrund dieser Situation, schreibt Berger, lässt sich die Ausbreitung des Islam von der abgelegenen Arabischen

Halbinsel her nachvollziehen. Anhand einiger Leitfragen beschreibt er den Aufstieg der jungen Religion: Warum setzte sich unter den Arabern der Islam durch und nicht eine der anderen vorherrschenden Religionen? Wie gelang es den Muslimen innerhalb sehr kurzer Zeit, große Teile der Welt zu erobern? Wie veränderte sich die Welt durch das Auftreten der Muslime?

Als Leser erlebt man einige Aha-Momente, wenn der Autor beispielsweise die Stammesstrukturen arabischer Gesellschaften beleuchtet und den Islam als Religion ausmacht, in der die Araber ihre kulturelle Identität bewahren konnten, ohne sich zwischen christlichen Römern und zoroastrischen Sassaniden entscheiden zu müssen. Der ungeheure Expansionsdrang der Muslime und ihre militärischen Erfolge hingen damit zusammen, dass die neue Religion ihre Stammesverbände ideologisch auf weitgehend einheitliche Linie brachte.

## GESELLSCHAFT DARUM IST DIE STEINZEIT AKTUELL

**Tief im Innern sind wir immer noch Wildbeuter.**

Der Humangenetiker Werner Buselmaier ist emeritierter Universitätsprofessor und Autor zahlreicher wissenschaftlicher Publikationen. Sein jüngstes Werk richtet sich an eine breite Öffentlichkeit, Fachwissen ist für die Lektüre nicht notwendig. Buselmaier geht auf Grundlagen der genetischen Vererbung ein und beleuchtet ihre möglichen Konsequenzen für unsere Gesellschaft. Bezüglich der Erbanlagen seien die Menschen immer noch an ein Leben als nichtsesshafte Jäger und Sammler angepasst, die in kleinen Gruppen organisiert sind. Die Einflüsse der modernen Umwelt könnten unser Genom aber verändern. So sei zum Beispiel die Zunahme der Kurzsichtigkeit darauf zurückzuführen, dass wir sowohl im Kindes- als auch im Erwachsenenalter fast nur noch nahe Dinge betrachten (Bücher, Indoor-Spiele, Arbeit und Spiele am PC). Buselmaier erläutert diverse Konflikte zwischen genetischer und kultureller Prägung auf verständliche Art und Weise. Sein Buch ist besonders für Laien lesenswert, auch auf Grund der überschaubaren Länge. Kristina Vonend



Werner Buselmaier  
**DER GEN-KULTUR-KONFLIKT**  
Springer,  
Berlin und Heidelberg 2016  
160 S., € 14,99

# REZENSIONEN

Die heutige islamische Welt mit ihren Konflikten zu erklären, das können historische Deutungen zwar nicht – darauf weist Berger explizit hin. Trotzdem hat man nach der Lektüre den Eindruck, das derzeitige Geschehen mit einem größeren Verständnis wahrzunehmen. Dies gilt etwa für die Unterschiede zwischen sunnitischer und schiitischer Konfession, die eine so große Bedeutung haben. Entstanden sind sie in der Frühzeit des Islam, und zwar im Zuge des Konflikts darum, wer rechtmäßiger Nachfolger Mohammeds sein sollte. Die einen unterstützten Ali ibn Abi Talib, Schwiegersohn und Vetter Mohammeds, die anderen dagegen Abū Bakr, dessen

Schwiegervater. Eine Auseinandersetzung, die in zwei Bürgerkriege mündete. Aus der unterlegenen Partei ging die religiöse Strömung der Schiiten hervor, deren Theologie sich von der Majorität der Sunniten abgrenzte.

Die Geschichte des Islam gehört nicht unbedingt zum allgemeinen Bildungsgut in Europa. Leserinnen und Leser, die kaum Kenntnisse darüber besitzen, werden manchmal Schwierigkeiten haben, den Ausführungen zu folgen. Das Glossar im Anhang des Buches leistet hier allerdings gute Dienste. Auch die Übersichtskarten in den Umschlagseiten sind sehr hilfreich.

Christian Hellmann ist evangelischer Pfarrer und Journalist in Gelsenkirchen.

## DIGITALE UMWÄLZUNG TIEF GREIFENDER WANDEL DER ZIVILISATION

**Nach Industrialisierung, Elektrifizierung und Computerisierung steht die Menschheit nun erneut am Scheideweg.**

► Klaus Schwabs Buch zeigt die technischen Umwälzungen (»Disruptionen«) auf, die aus der exponentiellen Zunahme immer neuer Entdeckungen und Entwicklungen folgen. Zudem macht es die enorme wirtschaftliche, soziale, politische und ökologische Sprengkraft bewusst, die diesem Fortschritt innewohnt.



Klaus Schwab  
**DIE VIERTE INDUSTRIELLE  
REVOLUTION**  
Pantheon, München 2016  
240 S., € 14,99

Schwab ist Wirtschaftswissenschaftler, Gründer und Präsident des Weltwirtschaftsforums, das alljährlich Wissenschaftler und intellektuelle Vordenker, Wirtschaftsbesitzer und Spitzenpo-

## GEOGRAFIE IN DIE FERNE

**Die unwiderstehliche Faszination märchenhafter Länder.**



Dirk Liesemer  
**LEXIKON  
DER PHANTOMINSELN**  
mare, Hamburg 2016  
155 S., € 24,-

► Seit jeher regen unentdeckte Eilande die Fantasie der Menschen an. Die Aussicht auf sagenhafte Reichtümer, Macht, Ruhm oder auch einfach nur der wissenschaftliche Entdeckerdrang haben sie immer wieder zu waghalsigen bis tollkühnen Expeditionen ins Unbekannte getrieben. Oft ruhte das ganze Unterfangen auf vagen Annahmen, zweifelhaften Berichten oder uralten Legenden. Menschen waren bereit, ihr Leben zu riskieren, um sich in den Annalen der Entdecker zu verewigen.

Journalist Dirk Liesemer macht den Leser mit solchen Menschen bekannt. 30 Phantominseln stellt er vor und zeigt anhand ihrer Nichtentdeckung die Motive, Schmerzen, Strapazen und Enttäuschungen der hoffnungsvollen Erkunder. Der Autor behandelt geisterhafte Eilande rund um den Globus, und die Leser dürften überrascht sein, dass einige wenige davon nicht sehr weit vor europäischen Küsten liegen. Selbstverständlich muss es in einem solchen Buch auch um Extreme gehen: am anderen Ende der Welt liegende exotische Inseln, ja sogar Kontinente, besiedelt von Kriegeren, die Rüstungen aus purem Gold tragen.

Das Buch ist optisch ansprechend gestaltet. Zu Beginn jedes Kapitels erscheint die Position der vorgestellten Insel auf einer Karte und – wenn bekannt – die zugehörigen vermeintlichen Koordinaten. Allerdings erweist sich hierbei die Farbgebung als irritierend: Weiß für das Meer und Blau für das Land. Liesemer geht nicht weiter auf geschichtliche Hintergründe oder Zusammenhänge ein, sondern beleuchtet jede

Phantominsel und die erfolglosen Bemühungen um ihre Entdeckung als Einzelfall. Interessierte Leser finden aber hinreichend Anhaltspunkte für eigene Recherchen. Das Buch setzt keinerlei Fach- oder Spezialwissen voraus. Jeder, der sich für Entdecker und Abenteuer begeistert, wird an der Lektüre seine Freude haben. Markus Neurohr

litiker in Davos versammelt. Die Quintessenz der zurückliegenden Jahrestreffen legt Schwab in diesem Werk vor, das im englischen Original mit »The Fourth Industrial Revolution« betitelt ist. Mit einem gleich lautenden Videoclip sowie einer zehnmütigen Dokumentation auf Youtube (englisch mit deutschen Untertiteln) unterstreicht er seine Mission: Er will wachrütteln und darüber aufklären, welchen Einfluss die technischen Umwälzungen heute auf unser individuelles Leben und die Menschheit haben.

Zwar sei schon immer alles in Bewegung gewesen, schreibt er. Jetzt aber stehe ein tief greifender, entscheidender Wandel der menschlichen Zivilisation an. Nach

den Entwicklungen im Gefolge der Dampfmaschine (ab 1760), der Elektrizität (spätes 19. Jahrhundert) und der Computertechnik (ab den 1960ern) stünden wir nun an der Schwelle der »vierten industriellen Revolution«. Diese gründe auf Digitalisierung und durchdringe unaufhaltsam Industrie, Wirtschaft und alle Lebensbereiche. Sie könne Fluch oder Segen für die Menschheit bringen. Smartphone, GPS-Navigation, künstliche Intelligenz, Roboter und Drohnen, automatisierte Fabriken und Hochfrequenzhandel, Big Data in Biotechnologie und Genetik, animierte Kinofilme und Videospiele sind nur Symptome dieser rasenden Umwälzung. Viele davon beleuchtet Schwab in einem

fast 60-seitigen Anhang als 23 »tief greifende Veränderungen«.

So faszinierend die Chancen sind, die damit einhergehen, so beängstigend sind auch die einschlägigen Herausforderungen, wie der Autor klarmacht. Die Gegensätze zwischen Arm und Reich nähmen zu; Politik und Zivilgesellschaft seien verunsichert und überfordert; der Einzelne finde weniger Halt.

Das Werk trägt zwar einen technisch klingenden Titel, ist aber ein Appell an alle Verantwortlichen, sich mit diesen Veränderungen auseinanderzusetzen und gemeinsam nach Lösungen zu suchen, damit wir uns in der zunehmend künstlichen Welt nicht verlieren. Schwab

ruft dazu auf, den Herausforderungen der digitalen Vernetzung mit Intelligenz zu begegnen – und zwar sowohl in ihren praktischen (»Verstand«), emotionalen (»Herz«), spirituellen (»Seele«) als auch physischen (»Körper«) Facetten.

Dem Autor ist ein wichtiges und hochverdichtetes Sachbuch gelungen, das einen in den Bann zieht. Es ist Politikern, Wirtschaftsleuten, Wissenschaftlern und Ingenieuren, Lehrern und Schülern gleichermaßen zu empfehlen. Bildung, so die Botschaft des Werks, ist der einzige Weg, der uns in die Zukunft führt.

Reinhard Löser ist promovierter Physiker und habilitierter Volkswirt; er arbeitet als Journalist in Berlin.



**STERNE UND WELTRAUM**

## DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2017

**Sterne und Weltraum** präsentiert im Bildkalender »Himmel und Erde« 13 fantastische Motive aus der astronomischen Forschung. Sie stammen aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums: dem sichtbaren Licht, dem Infrarotlicht, dem Mikrowellen- und Radiowellenbereich; darüber hinaus zum Teil vom Weltraumteleskop Hubble und der Raumsonde Rosetta. Zusätzlich bietet der Kalender wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2017 und erläutert ausführlich auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern abgebildeten Objekte.

14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung; Format: 55 x 45,5 cm; € 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand

**So einfach erreichen Sie uns:**

Telefon: 06221 9126-743  
[sterne-und-weltraum.de/kalender](http://sterne-und-weltraum.de/kalender)  
 E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

MOTIVE  
 VORAB ONLINE  
 ANSCHAUEN!

## EIN WEITERER PIONIER DER LUFTARCHÄOLOGIE

**Drei Experten stellten vor, wie mittels Laserortung archäologische Stätten vom Flugzeug aus entdeckt werden** (»Archäologie aus der Luft«, **Spektrum** August 2016, S. 78).

**Hartmut Wiegand, Hannover:** Im Artikel wird Charles Lindbergh 1929 in der »New York Times« als Pionier der Luftarchäologie genannt. Diese Aussage möchte ich ergänzen. Der deutsche Archäologe Theodor Wiegand (1864–1936), Ausgräber von Pergamon, Priene, Milet, Didyma und anderen sowie Mitbegründer des Berliner Pergamonmuseums und Präsident des Deutschen Archäologischen Instituts, hat 1916/1917 während des Ersten Weltkriegs durch Verhandlungen mit entsprechenden Stellen der



**Der deutsche Archäologe Theodor Wiegand (1864–1936).**

Regierung des Osmanischen Reichs und des Deutschen Reichs erreicht, dass im Rahmen militärischer Operationen deutsche Aufklärungsflyer Luftbilder archäologisch relevanter Gebiete im damaligen Palästina machen durften, die dann entsprechend ausgewertet werden konnten. Theodor Wiegand ist daher als Pionier der Luftarchäologie zu betrachten, zumal die damals entstandenen Bilder nicht militärisch, sondern archäologisch motiviert waren.

## NETZ VON AUTARKEN SYSTEMEN

**Michael Springer dachte darüber nach, wie sich schwankende Energielieferung durch Wind und Sonne ausgleichen lässt** (»Dringend gesucht: Intelligente Energienetze«, Springers Einwüfe, **Spektrum** September 2016, S. 37).

**Walther Mathieu, Herzogenrath:** Ihr Einwurf beschreibt die Problematik der Energiewende auf dem Strommarkt recht zutreffend, aber leider nicht vollständig.

Erstens: Die Frage ist nicht nur, ob die große Transformation der Stromversorgung gelingen kann, sondern ob sie es soll oder vielleicht gar unbedingt muss. Die Antwort fällt sehr unterschiedlich aus, je nachdem, wen man fragt. Ein Politiker wird Ihnen etwas anderes sagen als ein leitender Vorstand eines Braunkohlekonzerns und der wiederum etwas völlig anderes als ein Klimawissenschaftler. Dass die Energiewende im Stromsektor bei gutem Willen und hin-

## Leserbriefe sind willkommen!

Schicken Sie uns Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach per E-Mail an [leserbriefe@spektrum.de](mailto:leserbriefe@spektrum.de). Oder kommentieren Sie im Internet auf [Spektrum.de](http://Spektrum.de) direkt unter dem zugehörigen Artikel. Die individuelle Webadresse finden Sie im Heft jeweils auf der ersten Artikelseite abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht.

reichendem Einsatz von intelligenter Planung und Steuerung sehr wohl gelingen kann, hat Karl-Martin Hentschel 2010 in seinem Buch »Es bleibe Licht« überzeugend dargestellt.

Zweitens: Energieversorgungssysteme werden heute nicht mehr rein von der Versorgungsseite her konstruiert, im Mittelpunkt steht vielmehr der Speicher. Intelligente Verbrauchssteuerung ist ein Thema, ein weiteres die ebenfalls intelligente Abstimmung der verschiedenen Erzeuger – man verzeihe hier die physikalisch unkorrekten Begriffe Erzeugung und Verbrauch, wo es nach dem ersten Hauptsatz Bereitstellung und Nutzung heißen müsste. Es bedarf unbedingt intelligenter und umfänglicher Speicher, mit denen das tages- und jahreszeitlich sowie wetterbedingt schwankende Energieangebot vereinnahmt, aufbewahrt und nivelliert werden kann.

Eine reine Eingrenzung auf die Energieform Strom verstellte den Blick auf Lösungen, die im großen Maßstab bereits verfügbar sind: das Gasleitungsnetz und die Gasspeicher. Das so genannte Power-to-Gas-Verfahren ist einfach, funktioniert ausgezeichnet und wird bereits im Großversuch betrieben. Auch wenn durch jede Umwandlung Verluste auftreten, rechtfertigt das reichliche Strahlungsüberangebot von rund 1 kW/m<sup>2</sup> Erdoberfläche des schon seit langer Zeit in unserer Nähe perfekt funktionierenden Kernfusionsgroßreaktors namens Sonne auch verschwenderischen Umgang mit der von ihm bereitgestellten Energie.

Drittens: So wichtig es sein mag, belastbare Vorhersagen für die Planung der Bereitstellungsinfrastruktur im Stromsektor zur Hand zu haben (Stichwort EWeLiNE) – die Struktur unseres Energiesystems wird sich insgesamt im Rahmen der Energiewende tief greifend wandeln. In dem Maß, wie kleine, intelligente und sparsame Einheiten von Bereitstellungs-, Speicherungs- und Verbrauchssystemen entstehen, steigt der Grad von deren Autonomie: Am Ende der Entwicklung wird ein überwiegend kleinräumiges, engmaschiges und fehlertolerantes Netz von autarken Systemen stehen, die überhaupt keiner zentralen Steuerung mehr bedürfen.

## KONSTRUKTIV HINTERFRAGT

**Einige spieltheoretische Experimente stehen auf sehr wackligen Füßen, meinte der Mathematiker Christoph Pöppe** (»Einladung zum Mogeln«, **Spektrum** September 2016, S. 32).

**Michael Blume, Filderstadt:** Ein hervorragender Artikel. Wieder hantierte eine Studie zur Evolution von Religion mit dem unklaren Begriff des Altruismus. Pöppe stellt dagegen klar (S. 34): »Wer davon überzeugt ist, dass Gott ihm auch

beim Würfeln im stillen Kämmerlein auf die Finger schaut, wird ganz grundsätzlich zu größerer Ehrlichkeit neigen. Das allein kann schon den beobachteten Effekt erklären. Mit Altruismus in einer großen Gemeinschaft hat das nicht unbedingt etwas zu tun.«

Dem kann ich als Religionswissenschaftler nur zustimmen: Religiös glaubende Menschen verhalten sich regelkonformer und damit auch häufiger in-Group-orientierter – aber das ist nicht gleich Altruismus, kann zum Beispiel auch von einer Terrorgruppe ausgefüllt werden. Leider wird noch immer zu selten differenziert. Wo also ein Mathematiker psychologische Studien kritisch-konstruktiv hinterfragt und damit dazu beiträgt, wenig reflektierte geisteswissenschaftliche Begriffe wie Altruismus zu klären – dort leuchtet das **Spektrum** der Wissenschaft!

## RECHENSCHIEBER UND CHEMIE

**Warum der Logarithmus uns das Rechnen erleichtern kann, erläuterte der Wissenschaftspublizist Florian Freistetter** (»Keine Angst vor dem Logarithmus!«, Freistetters Formelwelt, **Spektrum** September 2016, S. 65).

**Eckart Stetter, Nabburg:** In diesem Artikel hätte man vielleicht noch erwähnen können, dass der Rechenschieber ebenfalls auf dem Prinzip  $\log(xy) = \log(x) + \log(y)$  beruht. Mit diesem Gerät, das in der einfachsten Version zwei gegeneinander verschiebbare Skalen von 1 bis 10 in logarithmischer Teilung aufweist, kann man mit hinreichender Genauigkeit zwei Zahlen mit bis zu drei gültigen Ziffern multiplizieren beziehungsweise dividieren.

Solche Rechenschieber waren bis Anfang der 1970er Jahre, als Taschenrechner verfügbar wurden, die man sich finanziell auch leisten konnte, bei Ingenieuren und Physikern recht populär, sofern die Rechenergebnisse nicht genauer als ein paar Promille sein mussten. Luxuriösere Ausführungen wiesen zusätzlich Skalen 1 bis 100, 1 bis 1000, eine lineare Teilung sowie einen Schieber mit Strich über alle Skalen auf. Damit konnte man dann auch quadrieren, eine Quadrat- beziehungsweise Kubikwurzel und den Logarithmus berechnen. Wie bei Logarithmentafeln auch liefert der Rechenschieber nur die Ziffernfolge des Ergebnisses. Die richtige Zehnerpotenz musste man separat ermitteln.



Bevor bezahlbare Taschenrechner verfügbar wurden, löste man aufwändigere Berechnungen mit Hilfe der logarithmisch geteilten Skalen von Rechenschiebern.

wiesen zusätzlich Skalen 1 bis 100, 1 bis 1000, eine lineare Teilung sowie einen Schieber mit Strich über alle Skalen auf. Damit konnte man dann auch quadrieren, eine Quadrat- beziehungsweise Kubikwurzel und den Logarithmus berechnen. Wie bei Logarithmentafeln auch liefert der Rechenschieber nur die Ziffernfolge des Ergebnisses. Die richtige Zehnerpotenz musste man separat ermitteln.

**Walter Kölle, Hannover:** Der Logarithmus hat sich in der Chemie einen dauerhaften Platz reserviert, und zwar bei der Beschreibung der Eigenschaften von Säuren, Basen und Wasser.

Ausgangspunkt ist das Ionenprodukt »I« des Wassers:  $I = [H^+] \times [OH^-] = 10^{-14}$ . Dabei bedeuten die eckigen Klammern Konzentrationen in der Einheit Mol pro Liter. In einer Säure der Konzentration  $10^{-3}$  Mol pro Liter herrscht daher eine  $OH^-$ -Konzentration von  $10^{-11}$  Mol pro Liter. Der Umgang mit diesen Einheiten wurde durch die Einführung des Logarithmus stark vereinfacht:  $\log[H^+] + \log[OH^-] = -14$ .

Noch stärker vereinfacht wurde der Sachverhalt durch die Schreibweise  $pH + pOH = 14$ . Das p leitet sich vom lateinischen »pondus« ab. Es steht für die Übereinkunft, dass eine damit charakterisierte Größe nicht eine Konzentration, sondern deren negativen Logarithmus wiedergibt. Die oben genannte Säure hat somit einen pH-Wert von 3 und einen pOH-Wert von  $(14 - 3) = 11$ . Jeder, der mit Säure und Lauge rechnerisch umgeht, muss wissen, wo auf seinem Rechner die »log«-Taste sitzt.

## VERGLEICH MIT VEGANERN

**Nobelpreisträger Harald zur Hausen hegt den Verdacht, dass virale DNA in Milch und Rindfleisch multiple Sklerose und andere neurodegenerative Krankheiten auslösen kann** (»Wir sind alle infiziert«, **Spektrum** September 2016, S. 38).

**Michael Rückert, Bergisch-Gladbach:** Professor zur Hausen hält eine Ernährungsumstellung deswegen für nicht sinnvoll, weil wir angeblich alle schon durch unsere kindliche Ernährung mit Milchprodukten infiziert sind. Zusätzlich zu epidemiologischen Betrachtungen wären daher Vergleichsuntersuchungen mit seinen biogenetischen Methoden von Veganern einerseits und »Normalessern« andererseits aussagekräftig.

## ERRATUM

»Vorsicht – explodierende Samenkapseln!« Schlichting!, **Spektrum** September 2016, S. 74

Beim Rechenbeispiel zum waagerechten Wurf aus zwei Meter Höhe beträgt die Startgeschwindigkeit 2,8 Meter pro Sekunde statt 3,3 Meter pro Sekunde. Wir danken unserem Leser Mike Anen für den Hinweis.

# futur III

## In der Glaszsphäre

Die Welt ist einfach zu schön, um wahr zu sein. **Eine Kurzgeschichte von Thorsten Küper**

Seit Monaten habe ich das Gefühl, nicht aufzuwachen. Seit ich den Brief gelesen habe. Handgeschrieben. Keine Mail.

Meine Glaszsphäre bemüht sich, mir einen aufmunternden blauen Himmel vorzulügen. Die Wolken sind hinreißend, aber nur scheinbar zufällig strukturiert. Tatsächlich formen sie das Logo eines Pharmakonzerns, und jemand flüstert: »This sunny sky is brought to you by ...«

Wie jeden Morgen bin ich aus meinem Haus geflohen. Das Wohnzimmer: leer. Die Küche: leer. Das Schlafzimmer: leer. Selbst das Bad.

Ich habe die Möbel nach draußen geschoben, um mich von der Kontamination mit Erinnerungen zu befreien. Lediglich das Zimmer meiner Tochter ließ ich unangetastet. Poster an den Wänden und Bilder, die sie selbst gemalt hat, Stofftiere, ihr Bett, am Kopfende die Haarbürste mit ein paar feinen Haaren. Und der Brief in der präzisen und doch kunstvollen Schrift meiner Frau. Ein Brief, in dem es um Singapur geht, um Abschied und darum, dass meine Tochter vor allem ihr Kind sei und warum es keinen Sinn hätte, ihnen zu folgen.

Jeden Morgen fliehe ich fast schlafend aus dem Haus und finde mich hier wieder: vor der Snackbar, einem umgebauten Wohnwagen aus spiegelndem Metall.

Das Frühstück ist gewohnt schlecht. Auf dem Tablett ploppen mir zwei Nachrichtensendungen und diverse pornografische Angebote entgegen. Die Glaszsphäre nutzt alle Flächen. Vor dem schwarzen Spiegel meines Kaffees drängt sich mir ein Link zum Thema Fair-Trade-Produkte auf, im Gelb meines Spiegeleidotters warnt mich eine Ernährungsexpertin mit blonden Locken und einer blau-weiß

gemusterten Schürze vor Cholesterin, und als ich meinen Orangensaft leere, stoße ich am Boden des Glases auf eine winzige Reggae-Band, die ich mit einem nassen Stück Toast zerquetsche. Ich hasse Reggae.

Warum du die permanenten Werbeeinblendungen der Sphäre erträgst? Weil sie dich schützt. Das Pixelgitter auf meiner Netzhaut blendet Frauen eines bestimmten Typs aus sowie Mädchen im Alter zwischen 6 und 14 Jahren. Stattdessen lächelnde Avatare, die mir Erholungsreisen für Singles anbieten, Therapeuten in meiner Nähe oder Psychopharmaka.

Der Warnhinweis auf meinen Zigaretten umkreist einen dicht verkabelten Lungenkrebspatienten. Die Glaszsphäre beerdigt ihn an einem weißen Strand, den die leichte Brandung eines türkisfarbenen Ozeans umspielt.

Deine Sphäre koloriert und zensiert die Wirklichkeit, bis sie für dich erträglich wird. Milton Glasz wird heute gehandelt wie Gates vor 40 und Zuckerberg vor 20 Jahren. Glasz schuf Glaszwerk, das große Metanetzwerk über all den anderen sozialen Netzen. Er bietet dir deine persönliche, in die reale Welt installierte Filterblase. Als würdest du in einem rosa Gummiball durchs Leben rollen.

Die Snackbar liegt an einem alten Kanal. Drüben am Ufer steht eine einzelne Gestalt, das Gesicht unter einer Kapuze verborgen. Beobachtet sie mich, oder bilde ich mir das ein?

Schiffe kommen nicht mehr. Dafür Werbebotschaften aus dem Glaszwerk. Drei riesige Aufputzspillen rollen über das Wasser. Eine Musikerin im ultraknapen Plastikmonokini erhebt sich, auf einer Violine spielend, 20 Meter hoch aus dem Kanal. Links an erfreulichen Stellen ihres Riesenkörpers bieten mir kostenpflichtige Downloads an.

Markierungen auf den Köpfen der Personen in meiner Nähe signalisieren negativen Freundschaftsstatus, aber in 2746 Meter Entfernung eine Frau namens Sina, mit der ich vor 109 Tagen Sex gehabt haben soll. Das muss kurz nach dem Brief gewesen sein. Oder davor?

Die Sphäre will wissen, ob ich eine Kontaktaufnahme wünsche. Ein zusätzlich eingblendeter Link erkundigt sich, ob Kondome direkt an meinen Standort geliefert werden sollen. Ich könnte mir auch eine Aufzeichnung der gemeinsamen Nacht ansehen.

Tatsächlich: Die Gestalt am Kanalufer starrt mich an – mich oder die Gäste um mich herum. Ich zoome, das Bild wird aus den allgegenwärtigen Kameras ringsum hochgerechnet. Eine junge Frau. Bleiches Gesicht, langes Haar, alte Kontaktknöpfe von Batterien als Wangenpiercings.

Die Glaszsphäre bewertet ihre Unbedenklichkeit mit 82 Prozent. Das tut der Algorithmus automatisch bei Menschen, die nicht Glaszwerknutzer sind und keine Basisinformationen über sich selbst zur Verfügung stellen. Die Unbekannte hebt etwas auf, ein großes Stück Karton, darauf der Markenname eines Schlafmittels für Kinder. Sie dreht es um. Auf dem grauen Untergrund steht eine Frage in bunten, selbst gemalten Buchstaben: »Wie viele hast du vor mir ausgeblendet?«

Glaszwerk erkennt den Vorgang als Interaktion und stuft die Unbedenklichkeit auf 49 Prozent herunter. Außerdem bietet man mir an, den »Vorfall« zu melden. Gleich wird eine Drohne die Situation unter die Lupe nehmen. Sinkt die Unbedenklichkeit auf unter 45 Prozent, wird sich ein Glasztrooper zeigen oder eine Polizeistreife.

Die Frau hält ein zweites, größeres Stück Karton hoch. »Jene, die du vergessen willst«, steht darauf. Und dann bin ich plötzlich farbenblind. Die Welt wird still und grau, als hätte jemand aus einem Gemälde das Bunte herauslaufen lassen.

Ein Angriff! Sie hat unsere Sphären deaktiviert! Der echte Himmel ist milchig trüb, die Sonne ein weißer Fleck auf einer schlierigen Mattscheibe.

»Was soll das jetzt?«, blafft jemand. Eine Frau in Trainingskleidung stöhnt auf. »Bitte nicht!«

Auf dem polierten Metall der SnackBar werden unsere Spiegelbilder sichtbar. Ungeschönt. Grau. Müde. Aber viel schlimmer: Nun erscheinen auch all jene, deren Anblick uns verletzt. Ich weiß nicht, wen die anderen sehen. Für mich sind es meine Frau und meine Tochter. Die Sphäre hat mir jeden Menschen verborgen, der ihnen ähnelt. Jetzt nicht mehr.

Ich erlebe eine Guerilla-Installation. Die Frau am Kanal muss eine Kunstaktivistin und Glasgegnerin sein. Sie hat unsere Containments gehackt – die ganz persönlichen Filter, die alle ausblenden, denen wir nicht begegnen möchten, an die wir uns nicht erinnern wollen. Einen hat sie damit definitiv getroffen: mich.

Die Sphäre reaktiviert sich. Prompt liest sie mir meinen neuen Wunsch von den Augen ab: Ich sehe ein Foto meiner Exfamilie – und darüber schwebend ein Angebot für ein Flugticket nach Singapur.

Ist es wirklich so einfach?

Sirenen nähern sich. Die Frau lässt die Pappe fallen und stürzt davon.

Ich kann mich nicht erinnern, mich entschieden zu haben. Erst auf dem Fußweg neben dem Kanal begreife ich, dass ich ihr nachrenne.

Es ist nicht von Bedeutung, ob ich sie je einhole. Wichtig ist nur, dass ich jetzt aufgewacht bin.

DER AUTOR

**Thorsten Küper** veröffentlicht Kurzgeschichten und Artikel in Magazinen wie »Nova«, »Exodus«, »c't«, »GEE«, »telepolis« und zahlreichen Anthologien. Er wurde mittlerweile 15-mal für den Deutschen Science Fiction Preis und den Kurd-Laßwitz-Preis nominiert. Sein Blog: [www.kueperpunk.de](http://www.kueperpunk.de)

## Spektrum der Wissenschaft

**Chefredakteur:** Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys. Carsten Könneker M.A. (v.i.S.d.P.)

**Redaktionsleiter:** Dr. Hartwig Hanser

**Redaktion:** Mike Beckers, Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Kordinator Archäologie/Geschichte), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke

**E-Mail:** [redaktion@spektrum.de](mailto:redaktion@spektrum.de)

**Ständige Mitarbeiter:** Dr. Felicitas Mokler, Dr. Michael Springer, Dr. Gerd Trageser

**Art Direction:** Karsten Kramarczik

**Layout:** Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

**Schlussredaktion:** Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

**Bildredaktion:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

**Redaktionsassistent:** Barbara Kuhn

**Assistenz des Chefredakteurs:** Hanna Hillert

**Verlag:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg

**Hausanschrift:** Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

**Redaktionsanschrift:** Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

**Geschäftsleitung:** Markus Bossle, Thomas Bleck

**Herstellung:** Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733

**Marketing:** Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741,

**E-Mail:** [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

**Einzelverkauf:** Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744

**Übersetzer:** An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Ursula Loos, Dr. Andreas Nestke.

**Leser- und Bestellservice:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

**Vertrieb und Abonnementverwaltung:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: [spektrum@zenit-presse.de](mailto:spektrum@zenit-presse.de)

**Vertretungsberechtigter:** Uwe Bronn

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

**Bezugspreise:** Einzelheft € 8,50 (D/A/L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland: € 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.

**Anzeigen:** iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Gesamtbereichsleitung: Michael Zehntmaier, Tel. 040 3280-310, Fax 0211 887 97-8550; Anzeigenleitung: Anja Väterlein, Speersort 1, 20095 Hamburg, Tel. 040 3280-189

**Druckunterlagen an:** iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

**Anzeigenpreise:** Gültig ist die Preisliste Nr. 37 vom 1. 1. 2016.

**Gesamtherstellung:** L. N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen:

© 2016 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

### SCIENTIFIC AMERICAN

1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562,  
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Dean Sanderson,  
Executive Vice President: Michael Florek



Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.



# VORSCHAU

## DAS ANTHROPOZÄN

Hinterlässt die Menschheit dauerhafte Spuren in Gesteinsschichten und läutet damit eine neue erdgeschichtliche Epoche ein? Die flächendeckende Ablagerung von Aluminium, Plastik, Beton, Ruß und radioaktiven Substanzen lässt dies vermuten. Geologen suchen jetzt nach Veränderungen in den Sedimenten, die den genauen Beginn des »Anthropozäns« anzeigen. Mit diesem Artikel beginnt eine neue sechsteilige Serie zum Thema »Die Zukunft der Menschheit«.



## ARTENRETTUNG DURCH UMSIEDLUNG?

Verlieren Tiere infolge des Klimawandels ihren angestammten Lebensraum, dann wird manchmal versucht, sie woanders anzusiedeln – durchaus mit Erfolg. Doch solche Maßnahmen sind umstritten, weil die etablierten Ökosysteme darunter leiden können.



## WELTWEITER GESUNDHEITSCHECK

Ein Forscherteam hat einen Supercomputer mit Daten aus der ganzen Welt gefüttert und der Erdbevölkerung eine Gesamtdiagnose gestellt. Sie birgt viele Überraschungen.



## EISEN-60 IN MOND UND MEER

Der Nachweis des Isotops Eisen-60 sowohl in Mondgestein als auch im irdischen Meeresgrund deutet auf eine Reihe von Supernovae vor wenigen Milliarden Jahren in unserer kosmischen Nachbarschaft hin.

## NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein? Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:

[spektrum.de/newsletter](http://spektrum.de/newsletter)

VERSCHENKEN SIE **DIE WOCHE**  
IM KOMBIPAKET ALS APP UND  
PDF ZU WEIHNACHTEN!

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im (Geschenk-)Abonnement nur € 48,- für 52 Ausgaben im Jahr.





## Der Hintergrund

Frauen sind in wissenschaftlichen Führungspositionen unterrepräsentiert. Es fehlen jedoch passende Instrumente, um schnell sehr gute und geeignete Wissenschaftlerinnen zu finden.

## Das Projekt

AcademiaNet ist eine Datenbank mit Profilen von über 2100 exzellenten Forscherinnen aus allen Fachdisziplinen.

## Unser Ziel

Wir wollen Ihnen mit unserem Rechercheportal die Besetzung von Führungspositionen und -gremien mit Wissenschaftlerinnen erleichtern.

## Die Partner

Robert Bosch **Stiftung**

**Spektrum**  
der Wissenschaft

**nature**

Sie wollen mehr erfahren?

[www.academia-net.de](http://www.academia-net.de)