

# Spektrum

der Wissenschaft

## Die nächste Quantenrevolution

Jetzt folgt die  
technische Anwendung

- PHARMA** Wenn Zulassungsbehörden wichtige Informationen zurückhalten
- EVOLUTION** Warum die Schlangen ihre Beine verloren
- DÜRREN** Wie man die Grundwasserspeicher wieder füllt

# Jetzt abonnieren!

**Spektrum  
PSYCHOLOGIE** –  
Das Magazin für  
den modernen,  
selbstbestimmten  
Menschen



Auch im Handel erhältlich!

**Spektrum PSYCHOLOGIE** bringt Ihnen ab sofort alle zwei Monate tiefere Einsicht in das menschliche Miteinander, mehr Orientierung in aktuellen gesellschaftlichen Fragen sowie positive Impulse für Ihr eigenes Leben:  
**Kompakt und informativ.**

Verpassen Sie kein Heft und lesen Sie 6 Ausgaben im Jahresabonnement mit einem Preisvorteil von fast 12 % gegenüber dem Einzelkauf!

Informationen und Bestellmöglichkeit:

[www.spektrum-psychologie.de](http://www.spektrum-psychologie.de)

Telefon: 06221 9126-743 · Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)



# EDITORIAL 100 JAHRE NACH DEN PIONIEREN

Carsten Könneker, Chefredakteur  
koenneker@spektrum.de

Ich bin beileibe kein Experte für Quantentechnologien. Umso verblüffter war ich zunächst, als ich im Frühjahr 2014 von der Nationalakademie Leopoldina neben vier ausgewiesenen Fachleuten – einer davon der Nobelpreisträger Wolfgang Ketterle vom Massachusetts Institute of Technology – gebeten wurde, eine an die deutsche Forschungspolitik adressierte 60-seitige Stellungnahme zu just diesem Thema zu begutachten. Es ist der letzte Schritt auf dem Weg zur Publikation von Akademie-Papieren zur Politikberatung: Nachdem eine Arbeitsgruppe von Spezialisten oft über mehrere Jahre hinweg eine Forschungsfrage beackert oder eine wichtige Entwicklung auf einem bestimmten Fachgebiet analysiert hat, formuliert sie einen Text mit gemeinsamen Empfehlungen. Dieser wird dann vor der Veröffentlichung noch von einer kleinen Zahl unabhängiger Gutachter kommentiert. Meine Aufgabe bestand darin, die Stellungnahme aus Sicht der Wissenschaftskommunikation kritisch zu beäugen. 2015 erschien sie schließlich unter dem Titel »Perspektiven der Quantentechnologien«; Sie finden sie frei zugänglich zum Nachlesen auf den Seiten von [leopoldina.org](http://leopoldina.org).

Die unverhoffte Lektüre hatte mich damals sofort in ihren Bann geschlagen. Der Tenor: Rund ein Jahrhundert nachdem Quantenpioniere wie Niels Bohr, Werner Heisenberg und Erwin Schrödinger das Tor aufgestoßen hatten zur Beschreibung der seltsamen Gesetze des Mikrokosmos, zeichne sich nun eine zweite Quantenrevolution ab. Ganze Industriezweige dürften sich bald herausbilden, welche die skurrilen Phänomene der Quantenwelt in großem Maßstab nutzen. Damit Deutschland die Morgendämmerung etwa der Quanteninformationstechnologien nicht verschlafe, möge die Politik geeignete Förderstrukturen schaffen, lautete das Fazit. Diesen Ruf hat schließlich die Europäische Union vernommen und 2017 ein riesiges »Flaggschiff-Projekt« aufgesetzt. Wesentlich daran beteiligt ist auch einer der Autoren von 2015, der Ulmer Physiker Tommaso Calarco. Gemeinsam mit seinem Koautor Max Riedel erläutert er ab S. 12, wie die Quanten künftig ganze Branchen umwälzen könnten. Eine weitere Einordnung nimmt Philip Ball ab S. 22 vor. Dass Quantencomputer kurz davorstünden, herkömmliche Rechner abzulösen, bezweifelt der britische Wissenschaftspublizist allerdings. Machen Sie sich selbst ein Bild!

Herzlich  
Ihr



## NEU AM KIOSK!

Die geheimen Herrscher unserer Welt können Sie in unserem Spektrum Spezial Biologie – Medizin – Hirnforschung 2.18 kennen lernen.

## AUTOREN DIESER AUSGABE



### TOMMASO CALARCO UND MAX RIEDEL

Die beiden Quantenphysiker haben in den letzten Jahren ein großes europäisches Forschungsprojekt zu Quantentechnologien auf den Weg gebracht. Nun ist dieses »Quanten-Flaggschiff« losgesegelt (S. 12).



### HONGYU YI

Die Evolutionsbiologin interessiert sich für die Sinnesorgane ausgestorbener Reptilien. Sie fand heraus, wie die Schlangen ihre Beine verloren haben: anhand versteinerner Innenohren (S. 38).



### MARTIN DOPPELBAUER

Seit 20 Jahren engagiert sich der Ingenieur in internationalen Gremien für Industriestandards bei Elektromotoren. Am Elektrotechnischen Institut des KIT optimiert er die Antriebe für den Einsatz in Autos (S. 64).

## 3 EDITORIAL

## 6 SPEKTROGRAMM

Leuchtendes Chamäleon

Ausbreitung der Süßkartoffel

Neuer Weg zum Higgs-Teilchen

Wettlauf gegen Antibiotikaresistenzen

Salzseen unter Gletschereis

Ein Schwarm Schwarzer Löcher

Mehr Hitzewellen im Meer

Fit trotz Insulinresistenz

## 28 FORSCHUNG AKTUELL

### Leben im Schattenreich

Mikroben produzieren »Höllenglocken« in Unterwasserhöhlen Mexikos.

### Falsche Paarbildung

Tautomere von DNA-Basen verursachen Mutationen.

### Sterngruppen auf Abwegen

Satellitengalaxien folgen nicht den Regeln des Standardmodells.

### Abelpreis für Robert Langlands

Die »große vereinheitlichte Theorie der Mathematik«.

## 37 SPRINGERS EINWÜRFE

### Wettrüsten im Cyberraum

Dem Internet droht eine digitale Eskalationsspirale.

## 41 IMPRESSUM

## 62 SCHLICHTING!

### Wirbel in der Teetasse

Warum landen Blattrückstände immer in der Mitte?

## 71 FREISTETTERS FORMELWELT

### Ordnung im Chaos

Rekurrenzplots – ein Hilfsmittel zur Analyse.

## 12 PHYSIK QUANTENTECHNOLOGIEN VOR DEM GROSSEN SPRUNG

Ein gigantisches europäisches Forschungsprojekt soll neue Technologien auf Basis der Quantenphysik entwickeln. Sie könnten gleich mehrere Branchen einschneidend verändern.

Von Tommaso Calarco und Max Riedel

## 22 QUANTENCOMPUTER REVOLUTION AUF RATEN

Forscher kämpfen gegen die Störanfälligkeit der neuen Rechnertypen.

Von Philip Ball

## 38 EVOLUTION WIE DIE SCHLANGEN DAS GLEITEN LERNTEN

Fossilien und genetische Erkenntnisse erhellen, warum die Schlangen ihre Beine verloren und Wirbel hinzugewonnen haben.

Von Hongyu Yi

## 46 MEDIZIN ZENSIERT!

Hält die US-Arzneimittelbehörde Studiendaten zurück, um Pharmaunternehmen zu schützen?

Von Charles Seife

## 54 HYDROLOGIE ÜBERSCHWEMMTE FELDER GEGEN DIE NÄCHSTE DÜRRE

Neue Strategien könnten helfen, überschüssiges Wasser für die nächste Trockenzeit unterirdisch zu sammeln.

Von Erica Gies

## 64 TECHNIK FAHREN UNTER STROM

**Serie: Elektromobilität (Teil 2)** Elektromotoren wurden in den letzten Jahrzehnten immer effizienter. Heute geht es vor allem um wichtige Optimierungen in zahlreichen Details.

Von Martin Doppelbauer

## 72 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN KARTENSPIEL-ALGEBRA

Von einem Kinderspiel zur projektiven Ebene über einem endlichen Körper.

Von Ralf Goertz

## 78 GESCHICHTE WIE KAM ES ZUM DREISSIGJÄHRIGEN KRIEG?

**Neue Serie: Der Dreißigjährige Krieg (Teil 1)** Weil ein Streit um die richtige Religion die Entscheidungsgremien des Reichs lahmlegte, entfachte ein Aufstand in Böhmen 1618 einen der blutigsten Kriege der Geschichte.

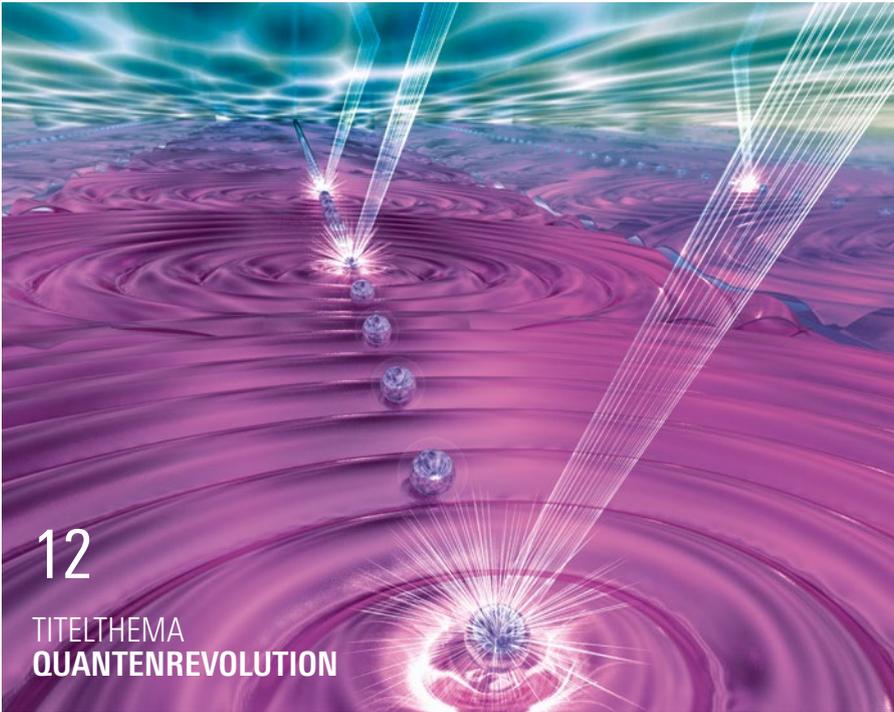
Von Axel Gotthard

## 84 DREISSIGJÄHRIGER KRIEG EINE CHRONOLOGIE

Schon im Vorfeld garte es im Reich, 1618 entzündete sich der Religionskrieg. Als sich ab 1630 immer mehr Staaten beteiligten, spielte der Glaube aber kaum noch eine Rolle.

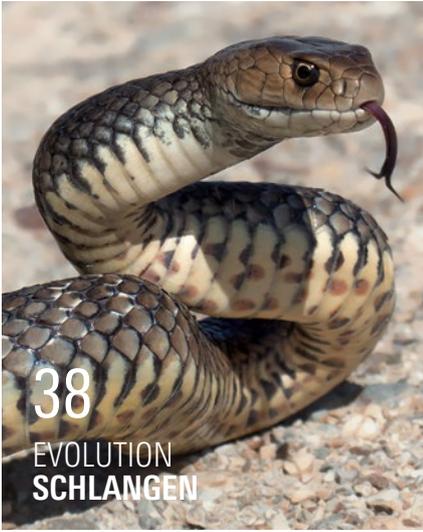
Von Daniel Carlo Pangerl

EMILY EDWARDS, JOINT QUANTUM INSTITUTE (JQI)



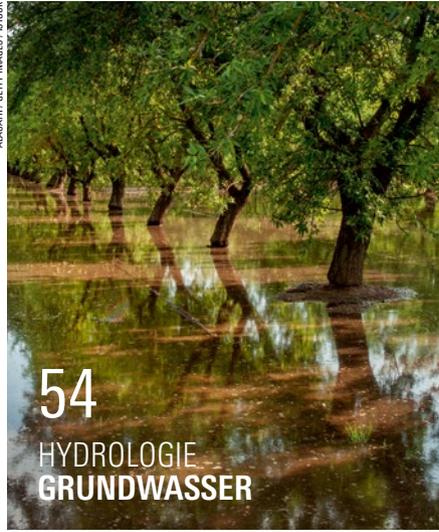
12  
TITELTHEMA  
QUANTENREVOLUTION

KRISTIAN REEL / GETTY IMAGES / ISTOCK



38  
EVOLUTION  
SCHLANGEN

ALACRIS / GETTY IMAGES / ISTOCK



54  
HYDROLOGIE  
GRUNDWASSER

MIT FRIEDRICH VON MARTIN DOPPELBAUER



64  
TECHNIK  
ELEKTROMOTOREN

AKG IMAGES (NACH WERZEL VON BROZIK 'PRAGER FENSTERSTURZ', 1899)



78  
GESCHICHTE  
DER DREISSIGJÄHRIGE KRIEG

88 REZENSIONEN

- Pierre Bouet, Francois Neveux:** Der Teppich von Bayeux
- Christophe Galfard:** Das Universum in deiner Hand
- Jonathan B. Losos:** Glücksfall Mensch
- Steven Lin:** Mundum gesund
- Jonathan Balcombe:** Was Fische wissen

94 LESERBRIEFE

- 95 ZEITREISE  
Vom Turm zu Babel zum Reisepass der Zukunft

96 FUTUR III

- Die letzte Frage**  
Begegnung mit einer Superintelligenz.

98 VORSCHAU

Titelbild:  
agsandrew / stock.adobe.com;  
Bearbeitung: Spektrum der  
Wissenschaft



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

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

# SPEKTROGRAMM

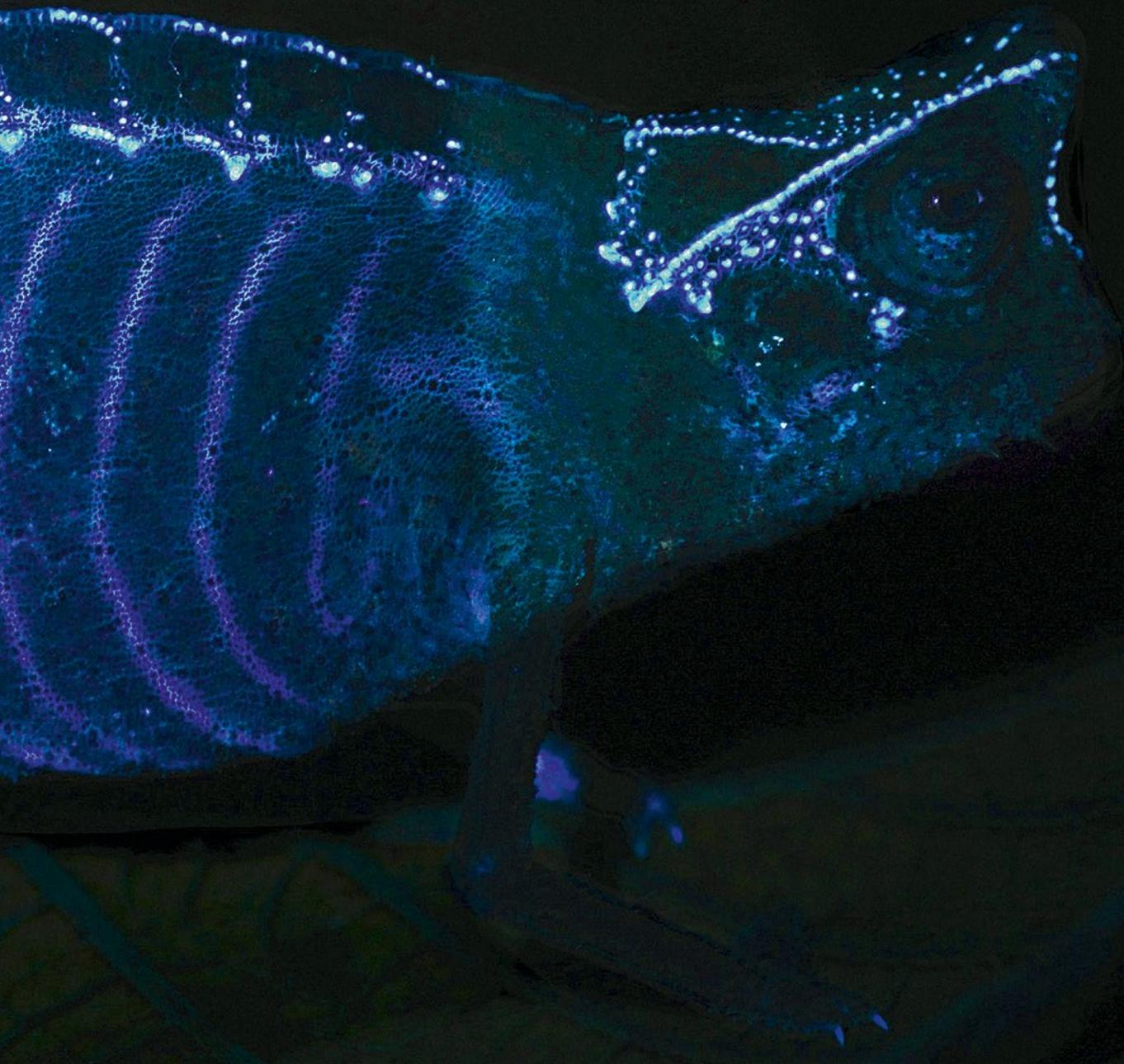


DAVID PRÖTZEL, ZOOLOGISCHE STAATSSAMMLUNG MÜNCHEN (ZSM LMU)

## LEUCHTENDES CHAMÄLEON

► Chamäleons können den Farbton ihrer Haut verändern, was sie unter anderem nutzen, um mit Artgenossen zu kommunizieren. Forscher um Frank Glaw von der Zoologischen Staatssammlung München haben nun eine weitere verblüffende Eigenart der Schuppen-

kriechtiere entdeckt: Viele Chamäleons, beispielsweise der in Madagaskar heimischen Gattung *Calumma* oder der hier abgebildeten Art *Brookesia superciliaris*, fluoreszieren blau, wenn man sie mit UV-Licht bestrahlt. Biologen kennen das Phänomen unter anderem von Meeresorganis-



DAVID PRITZEL, ZOOLOGISCHE STAATSSAMMLUNG MÜNCHEN (ZSM/UMI)

men. Dass auch Chamäleons leuchten können, liegt an kleinen Knochenhöckern, so genannten Tuberkeln, die nur von einer dünnen, durchsichtigen Oberhautschicht bedeckt sind. Durch sie kann ultraviolette Strahlung direkt auf den Knochen fallen. 0,3 Prozent dieser Photonen

werden bei Wellenlängen um 430 Nanometer wieder abgestrahlt, die Folge ist ein blaues Leuchten. Es könnte den Tieren dabei helfen, ihresgleichen im vorwiegend grünen Regenwald besser zu erkennen, vermuten die Forscher.

*Sci. Rep.* 8, 698, 2018

## ARCHÄOBOTANIK AUSBREITUNG DER SÜSSKARTOFFEL

Die lateinamerikanische Süßkartoffel verbreitete sich auf natürlichem Weg nach Polynesien, vermutet eine Arbeitsgruppe um Robert Scotland von der University of Oxford. Damit widersprechen die Botaniker einer populären Theorie, laut der Seefahrer lange vor Christoph Kolumbus die nahrhafte Knolle in die Südsee überführt hätten. Stattdessen müssen den Forschern zufolge Wind, Meeresströmungen oder Vögel die Samen über den Pazifik getragen haben – und das bevor Menschen die Inselgruppe besiedelten.

Für ihre Studie haben die Wissenschaftler einen Stammbaum der Süßkartoffel (*Ipomoea batatas*) und ihrer nächsten Verwandten erstellt. Demnach liegt der Ursprung der Pflanzengruppe vermutlich in Mittel-

amerika. Abkömmlinge hiervon gibt es laut den genetischen Analysen schon sehr lange auf den Südseeinseln. So trennte sich die Art *Ipomoea littoralis*, die ausschließlich in Polynesien vorkommt, bereits vor mehr als einer Million Jahre von diesem Hauptstamm. Und die Abspaltung der Vorfahren eines Süßkartoffel-exemplars, das 1769 im Zuge der Südseeexpedition von James Cook (1728–1779) auf den Inseln gesammelt worden war, liegt mehr als 100 000 Jahre zurück. Menschen können bei der Verbreitung demnach keine Rolle gespielt haben, sie besiedelten Polynesien erst vor 3000 Jahren.

Noch ist ungeklärt, auf welchem Weg die Süßkartoffel auf die Südseeinseln gelangt sein könnte. Die Forscher um Scotland



Verschiedene Süßkartoffelsorten im Centro Internacional de la Papa, einem Kartoffelforschungszentrum in Lima.

verweisen darauf, dass die Samen von anderen Mitgliedern der Pflanzengruppe sehr widerstandsfähig sind und lange Zeit im Wasser überleben können. Das spreche für einen Transport durch Pazifikströmungen. Offen bleibt allerdings die Frage, worauf

die ausgeprägte technologischen und linguistischen Ähnlichkeiten zwischen präkolumbischen Kulturen in Amerika und Polynesien beruhen, die ohne einen frühen kulturellen Austausch nur schwer erklärbar sind.

*Curr. Biol.* 28, S. 1246–1256, 2018

## PHYSIK NEUER WEG ZUM HIGGS-TEILCHEN

Physiker am Kernforschungszentrum CERN haben eine weitere Möglichkeit entdeckt, das Higgs-Boson zu erzeugen. Das berühmte Teilchen, für dessen Vorhersage unter anderem der Brite Peter Higgs 2013 den Physiknobelpreis erhielt, entsteht bei der Kollision extrem energiereicher Protonen in der 27 Kilometer langen Vakuumröhre des Large Hadron Collider (LHC) bei Genf. Bei diesen Mikrokarambolagen wird gemäß der berühmten

Formel  $E=mc^2$  Energie in Masse umgewandelt; konkret entsteht ein ganzer Schwall von Partikeln, die meist rasch in andere Teilchen zerfallen.

Die Wissenschaftler kennen bereits eine Reihe solcher Kaskaden, in denen für kurze Zeit ein Higgs-Teilchen auftaucht. Da ist zum Beispiel jene subatomare Reaktion, bei der sich ein Paar aus einem Top-Quark und seinem Antimaterie-Pendant gegenseitig auflöst und dadurch ein Higgs entstehen lässt. Dieses stößt daraufhin eine Zerfallskette an, an deren Ende zwei charakteristische Lichtteilchen stehen. Auf

diese Weise wiesen Physiker die Existenz des Bosons im Jahr 2012 erstmals nach.

Die nun aufgespürte Kaskade war deutlich schwieriger zu entdecken, da sie von den Produkten anderer Teilchenzerfälle überlagert wird. Die Physiker haben daher seit 2011 die Messdaten des CMS-Detektors nach entsprechenden Signaturen durchsucht. Nun sind sie sicher: Das Higgs entsteht auch in einer Reaktion, die parallel dazu ein eng gekoppeltes Paar aus Top-Quark und Anti-Top-Quark ausspuckt. Damit habe man zum ersten Mal direkt messen können, wie stark das

Higgs-Teilchen mit dieser schwersten Variante der Quarks wechselwirkt, berichten die Forscher.

Das Ergebnis steht im Einklang mit dem Standardmodell der Teilchenphysik, mit dem die Physiker die Interaktionen zwischen Elementarteilchen beschreiben. Und es schließt eine Lücke für exotischere Phänomene: Bisher sei denkbar gewesen, dass bei der 2012 beobachteten Higgs-Kaskade auch unbekannte Elementarteilchen von jenseits des Standardmodells eine Rolle spielten. Das könne man nun ausschließen.

*ArXiv:1804.02610*, 2018

## MEDIZIN WETTLAUF GEGEN ANTIBIOTIKA- RESISTENZEN

► Durch den wachsenden Einsatz von Antibiotika entwickeln immer mehr Bakterien Resistenzen, so dass in naher Zukunft einige Infektionskrankheiten nicht mehr behandelbar sein könnten, warnt ein internationales Forscherteam. Die Wissen-

schaftler um Eili Klein vom Center for Disease Dynamics, Economics & Policy in Washington (USA) hatten die Antibiotikaverkaufszahlen von 2000 bis 2015 in 76 Ländern der Erde analysiert. Dabei zeigte sich, dass der durchschnittliche Verbrauch pro Kopf in diesem Zeitraum um 39 Prozent anwuchs.

Vor allem ärmere Ländern setzen immer mehr Antibiotika ein, was an den hohen Infektionsraten, aber

auch an einem starken Bevölkerungswachstum liegt. Noch ist die Gesamtmenge an verkauften Antibiotika dort deutlich niedriger als in den Industriestaaten. Das dürfte sich aber in Zukunft ändern, prognostizieren Klein und seine Kollegen.

Daher rechnen die Forscher mit einem weiteren rasanten Anstieg des Antibiotikakonsums weltweit und damit auch der Zahl resistenter Bakteri-

enstämme. Die Epidemiologen schlagen gezielte Maßnahmen vor, um unnötigen Einsatz der Medikamente einzudämmen, beispielsweise gezielte Aufklärung, Impfprogramme, Hygienemaßnahmen und sauberes Trinkwasser. Wichtig sei, dass sich die Maßnahmen an den unterschiedlichen sozioökonomischen und demografischen Bedingungen der Länder orientieren.

*PNAS 115, S. E3463-E3470, 2018*

## GEOGRAFIE SALZSEEN UNTER GLETSCHEREIS

► In den vergangenen Jahrzehnten wurden in der Antarktis und in Grönland über 400 so genannte subglaziale Seen entdeckt, die in völliger Dunkelheit unter mächtigen Eispansern liegen. Die Temperatur dieser Seen beträgt gewöhnlich mehrere Grad unter null, trotzdem gefrieren sie nicht. Grund dafür sind der enorme Druck, den die aufliegenden Eismassen erzeugen, oder salzhaltige Zuflüsse, die den Gefrierpunkt des Wassers herabsetzen. Man vermutet, dass diese Biotope mikrobielles Leben beherbergen.

Eher zufällig hat ein Geologenteam um Anja Rutishauser von der University of Alberta nun zwei solcher Seen unter mehreren hundert Metern Gletschereis in der kanadischen Arktis entdeckt. Sie sind vermutlich extrem salzhaltig und seit mehr als 120 000 Jahren völlig abgeschlossen von der Außenwelt. Die Forscher führten Radioecholotmessungen über dem Devon-Gletscher auf der gleichnamigen kanadischen Insel durch.

Auf die Seen stießen sie durch Unregelmäßigkeiten in den Echolotsignalen, die flüssiges Wasser 560 bis 740 Meter unter dem Eis verrietten. Anschließende Berechnungen ergaben, dass in dieser Tiefe eine Temperatur von höchstens minus 10,5 Grad Celsius herrscht. Da die Seen trotzdem nicht gefrieren, müsse das Wasser einen sehr hohen Salzgehalt aufweisen, so die Wissenschaftler.

Bohrkerne aus der Nähe des Fundorts legen nahe, dass unterhalb des Gletschers Sedimentgestein lagert, das zu 98 Prozent aus Halit (Natriumchlorid) besteht. Dadurch könnte die Salinität der Seen vier- bis fünfmal höher sein als die von Meerwasser. Womöglich haben sich in diesen extremen und gänzlich isolierten Lebens-

ANJA RUTISHAUSER, UNIVERSITY OF ALBERTA



**Der Plateaugletscher Devon Ice Cap im Norden Kanadas gleicht einer Eiswüste. In der Tiefe verstecken sich jedoch Seen aus extrem salzhaltigem Wasser.**

räumen speziell angepasste Mikroorganismen entwickelt. Diese ungewöhnlichen Biotope zu erforschen, könnte auch bei der Suche nach extraterrestrischem Leben helfen, etwa auf dem Jupitermond Europa oder dem Saturntrabant Enceladus: Unter ihren kilometerdicken Eiskrusten vermuten Planetenforscher Ozeane aus flüssigem Wasser.

*Science Advances 10.1126/sciadv.aar4353, 2018*

## ASTRONOMIE EIN SCHWARM SCHWARZER LÖCHER

► Um das gigantische Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße

kreisen offenbar zahlreiche kleinere Exemplare, berichtet ein Team um Charles J. Hailey von der Columbia University (USA). Bei diesen Objekten, so genannten stellaren Schwarzen Löchern, handelt es sich wahrscheinlich um die

Überbleibsel großer Sterne, die sämtlichen Brennstoff aufgebraucht haben und dann unter ihrer eigenen Schwerkraft kollabiert sind. Zum Vergleich: Das supermassereiche Schwarze Loch Sagittarius A\* im Herzen der Milchstraße vereint die Masse von Millionen Sonnen auf engstem Raum.

Das Team um Hailey hat die stellaren Schwarzen Löcher in Daten des Weltraumteleskops Chandra aufgespürt. Auf dessen Bildern sehen Astronomen etliche Punkte im Umfeld des galaktischen Zentrums, von denen energiereiche Strahlung ausgeht (siehe Bild). Dahinter verbergen sich unter anderem so genannte Röntgenbinärsysteme (englisch: »x-ray binaries«), die entweder aus einem Neutronenstern und einem gewöhnlichen Stern bestehen oder aus einem Schwarzes-Loch-Stern-Duo.

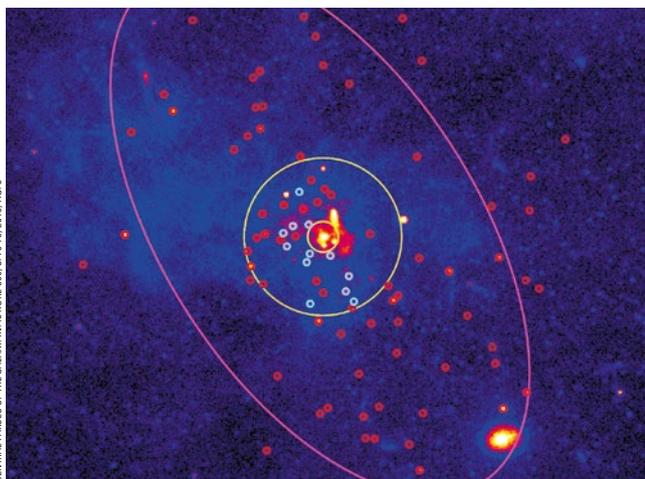
Binärsysteme mit Neutronenstern neigen dazu,

alle fünf bis zehn Jahre für kurze Zeit große Mengen Röntgenstrahlung ins All zu schießen.

Bei mindestens sechs der Röntgenquellen im Umfeld von Sagittarius A\* blieben derart große Ausbrüche während der vergangenen zwölf Jahre allerdings aus, weshalb es sich vermutlich um Sternsysteme mit einem kleinen Schwarzen Loch handele, argumentieren die Astrophysiker.

Hochrechnungen zufolge müsste es noch deutlich mehr solcher Objekte geben. Sie treiben jedoch allein durchs All und sind daher nicht für Teleskope sichtbar. Insgesamt gehen die Astrophysiker von mindestens 300 bis 500 stellaren Schwarzen Löchern aus, die in einem Abstand von 3,3 oder weniger Lichtjahren um Sagittarius A\* kreisen, eventuell könnten es aber auch mehr als 10 000 sein.

*Nature 556, S. 70–73, 2018*



HAILEY, C. J. ET AL.: A DENSITY CUSP OF QUIESCENT X-RAY BINARIES IN THE CENTRAL PARSEC OF THE GALAXY. IN: NATURE 556, S. 70–73, 2018, FIG. 3

**Röntgenaufnahme des Zentrums der Milchstraße: Rote Krügel stehen für weiße Zwergsterne, hellblaue für Paare aus Stern und Neutronenstern oder einem Schwarzen Loch. In der Mitte des vom Weltraumteleskop Chandra aufgenommenen Bilds befindet sich das supermassereiche Schwarze Loch Sagittarius A\*. Der äußere gelbe Kreis markiert einen Abstand von 3,3 Lichtjahren von ihm.**

## KLIMAFORSCHUNG MEHR HITZEWELLEN IM MEER

► Hitzewellen gibt es nicht nur an Land: Im Meer bedrohen Episoden ungewöhnlich hoher Wassertemperaturen mitunter ganze Ökosysteme. Offenbar treten solche marinen Hitzewellen im Zuge des Klimawandels öfter auf als noch vor 100 Jahren, hat jetzt eine Arbeitsgruppe um den kanadischen Ozeanografen Eric C. J. Oliver von der Dalhousie University in Halifax herausgefunden. Die Häufigkeit habe zwischen 1925 und 2016 im Meer um 34 Prozent zugenommen, auch währten die Heißphasen im Durchschnitt um 17 Prozent länger, berichten die Forscher. Seit 1982 scheint sich der Trend zudem beschleunigt zu haben.

Von einer marinen Hitzewelle spricht man, wenn die Meerestemperaturen an einem Ort für mindestens fünf Tage höher sind als während 90 Prozent aller vergleich-

barer Zeiträume in einer Phase von 30 Jahren. Wie oft es zu solchen Episoden kam, ermittelten die Forscher einerseits anhand der Daten von sechs Messstationen in den USA, Kanada, Großbritannien und Norwegen, die seit rund 100 Jahren die lokalen Meerestemperaturen ermitteln. Für den Zeitraum ab 1982 werteten sie außerdem Satellitendaten aus.

Die steigenden Ozeantemperaturen haben drastische Auswirkungen auf das Leben im Meer: Meeresorganismen sind gegenüber veränderten Temperaturen oft empfindlicher, weil die hohe Wärmekapazität des Wassers starke Schwankungen normalerweise abmildert. So haben Hitzewellen in den vergangenen Jahren zu Korallenbleichen geführt und vor Westaustralien großflächig so genannte Kelpwälder absterben lassen, in denen Fische und andere Meeresbewohner Schutz und Nahrung fanden.

*Nat. Commun. 10.1038/s41467-018-03732-9, 2018*



ZACHARY ZANKER / GETTY IMAGES

## BIOLOGIE FIT TROTZ INSULIN- RESISTENZ

► Höhlenfische der Art *Astyanax mexicanus* verfügen über eine Eigenschaft, um die sie vermutlich viele Diabetespatienten beneiden: Die Salmier haben zwar dauerhaft hohe Blutzuckerwerte – gesundheitliche Schwierigkeiten bereitet ihnen das allerdings nicht. Im Gegenteil: Ihr ungewöhnlicher Zuckerstoffwechsel hilft ihnen wahrscheinlich dabei, in ihrem extrem nahrungs-

armen Lebensraum zu existieren, berichtet ein Team um Nicolas Rohner vom Stowers Institute for Medical Research in Kansas City (USA).

*Astyanax mexicanus* lebt sowohl in Flüssen als auch in unterirdischen Gewässern, wo Dunkelheit herrscht und die Tiere nahezu vollständig von der Außenwelt abgeschottet sind. Entsprechend müssen die Höhlenfische weite Teile des Jahres ohne Nahrung auskommen und große Mengen zu sich nehmen, wenn schließlich doch einmal etwas verfügbar

**Fische der Art *Astyanax mexicanus* verfügen über einen hohen Blutzuckergehalt.**

sein sollte. Wie die Biologen herausfanden, tritt bei den Fischen – und zwar nur bei der Höhlenform der Art – ein mutierter Insulinrezeptor auf, der weniger empfindlich auf das Hormon reagiert, so dass der Glukosegehalt im Blut nach dem Fressen hoch bleibt. Rohner und seine Kollegen glauben, dass diese Insulinresistenz den Tieren dabei hilft, mit den angefütterten Reserven länger auszukommen.

Beim Menschen gilt eine Insulinresistenz als sicheres Zeichen für eine Stoffwechselerkrankung und nicht zuletzt als Wegbereiter für

Diabetes. Sie führt in aller Regel zur Einlagerung großer Fettmengen; der chronisch erhöhte Blutzuckerspiegel schädigt Blutgefäße und Nerven. Die Salmier scheinen dagegen überhaupt nicht unter den hohen Zuckerwerten zu leiden. Sie nehmen zwar stärker an Gewicht zu als ihre in Flüssen lebenden Artgenossen und neigen zu einer Fettleber; im Blut finden sich aber keine schädlichen Endprodukte des Zuckerstoffwechsels, und die Lebenserwartung bleibt unverändert. Möglicherweise, so spekulieren die Forscher, verfügen die Tiere über eine weitere Mutation, die sie vor den Auswirkungen des hohen Zuckerspiegels schützt.

*Nature* 555, S. 647–651, 2018

# Spektrum PLUS+

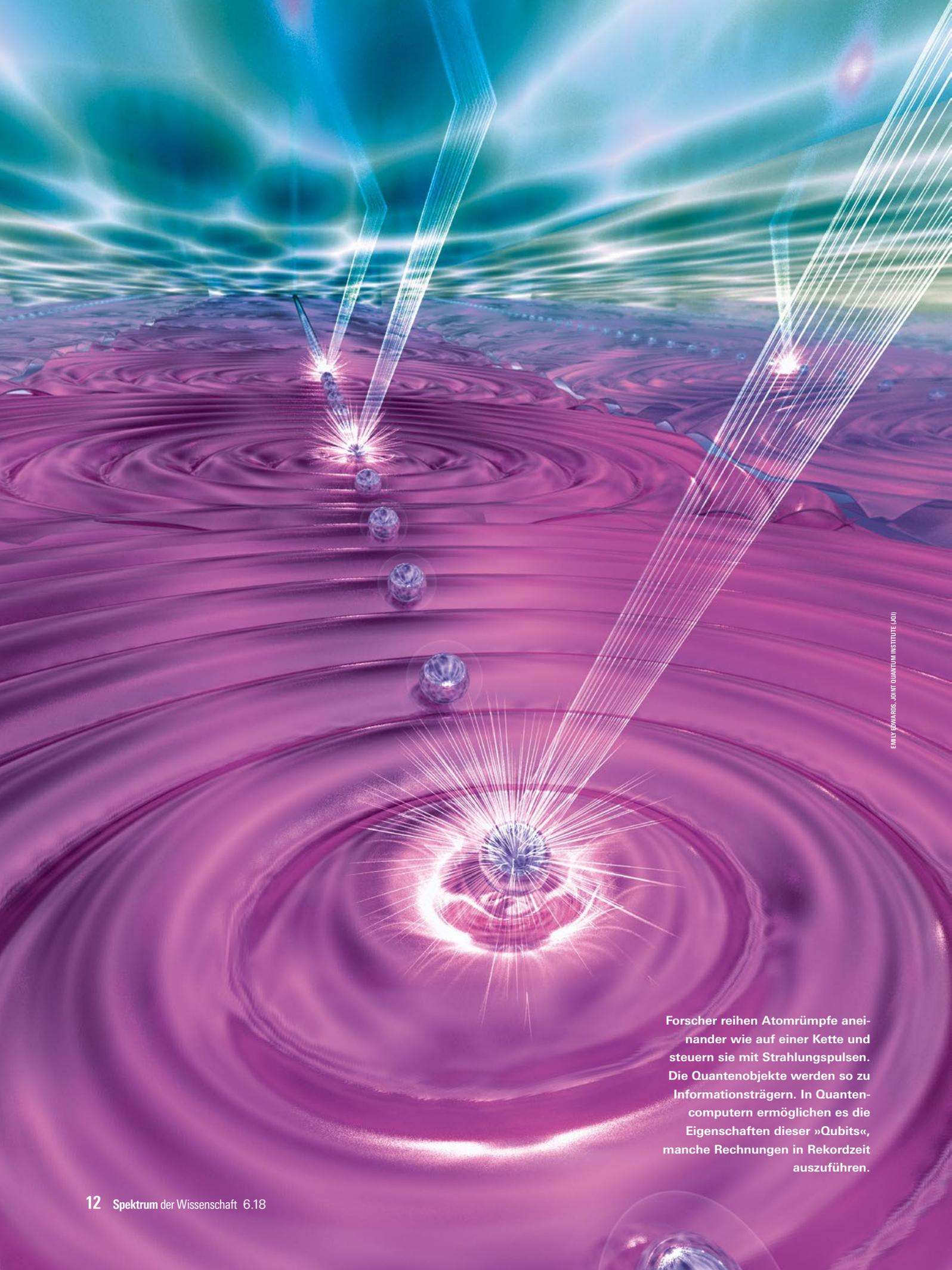
**NEU!**

DIE VORTEILSSEITE FÜR ABONNENTEN

Exklusive Vorteile und Zusatzangebote für alle Abonnenten von Magazinen des Verlags **Spektrum** der Wissenschaft

- Download des Monats im Juni: **Spektrum** KOMPAKT »Halluzinationen«
- Leserexkursion zum Radioteleskop Effelsberg am 9. Juni 2018
- Redaktionsbesuch bei Spektrum.de am 12. Juni 2018
- Ermäßigter Reisepreis für die Kurzreise nach Bern »Auf den Spuren von Albert Einstein« vom 3.–7. Oktober 2018
- Veranstaltungen der neuen Reihe **Spektrum** LIVE zum Vorteilspreis

Weitere Informationen und Anmeldung!  
**Spektrum.de/plus**



EMILY EDWARDS, JOINT QUANTUM INSTITUTE (JQI)

Forscher reihen Atomrümpfe aneinander wie auf einer Kette und steuern sie mit Strahlungspulsen. Die Quantenobjekte werden so zu Informationsträgern. In Quantencomputern ermöglichen es die Eigenschaften dieser »Qubits«, manche Rechnungen in Rekordzeit auszuführen.

# PHYSIK

# QUANTENTECHNOLOGIEN

# VOR DEM GROSSEN SPRUNG

**Weltweit investieren Staaten und Unternehmen in die Entwicklung futuristischer Technologien auf Basis der Quantenphysik. Nun startet auch in Europa ein groß angelegtes Forschungsprogramm, das die letzten Hürden beseitigen soll.**



**Tommaso Calarco** (links) ist Professor am Institut für Komplexe Quantensysteme der Universität Ulm, wo er Kontrolltechniken für Vielteilchen-Quantensysteme entwickelt, um Quantentechnologien effizienter zu machen. Er ist seit über einer Dekade maßgeblich an der Koordinierung der Europäischen Quantentechnologie-Gemeinschaft beteiligt und gilt als einer der gedanklichen Väter des Quanten-Flaggschiffs der EU. **Max Riedel** ist promovierter Quantenphysiker und Senior Consultant für Universitätsbeziehungen bei der Siemens AG. Seit Januar 2017 ist er an die Universität Ulm als Projektmanager für Europäische Aktivitäten delegiert und unterstützt dort Tommaso Calarco bei der Vorbereitung des Quanten-Flaggschiffs.

» [spektrum.de/artikel/1561160](https://spektrum.de/artikel/1561160)

► An einem warmen Sommerabend des Jahres 1998 hielt eine schwere, schwarze Limousine vor den Pforten des Instituts für Experimentalphysik der Universität Innsbruck. Und obwohl das Institut zu den führenden der Welt auf seinem Gebiet zählt und prominenten Besuch durchaus gewöhnt ist, war dieser Gast ein ganz besonderer: Der 14. Dalai Lama wollte mit eigenen Augen einen der Grundbausteine des Universums sehen. Wie die meisten von uns hatte er in der Schule gelernt, dass Physiker seit Anfang des 20. Jahrhunderts Atome und Lichtquanten (so genannte Photonen) mit Hilfe der Quantentheorie beschreiben. Allerdings hatten es die Gründerväter der modernen Physik für unmöglich gehalten, einzelne Atome zu fangen, direkt sichtbar zu machen oder gar gezielt zu verändern.

Doch genau dies war den Innsbrucker Experimentalphysikern um Rainer Blatt gelungen. In ihrem Labor hielten sie mitten in einer Ultrahochvakuumkammer und mit Hilfe elektrischer Felder ein einzelnes Barium-Ion in der Schwebe. Die Innsbrucker Forscher beschossen diesen Atomrumpf mit grünem Laserlicht, welches das Ion ständig in alle Richtungen streute, ähnlich einem Staubkorn im Sonnenschein. Beobachtern zeigte sich der schwebende Materiebaustein also als winziger grüner Punkt.

Und mehr noch: die Experimentatoren brachten das Ion wiederholt in eine Überlagerung – auch Superposition genannt (siehe »Superposition und Verschränkung«, S. 15) – aus zwei quantenmechanischen Zuständen: einem, in dem das Ion das Laserlicht des Abbildungsstrahls streut und

damit sichtbar ist, und einem, in dem es das Abbildungslicht nicht streut und damit unsichtbar bleibt. Das Besondere an einer solchen Superposition ist, dass das Ion bis zum Zeitpunkt der Messung, wenn also der Abbildungs-laser angeschaltet wird, quasi in beiden Zuständen »gleichzeitig« verharrt. Erst bei dem Kontakt mit den Photonen des Lasers entscheidet es sich, welchen der beiden es einnimmt – viele Leser kennen wahrscheinlich Schrödin-

## AUF EINEN BLICK DIE ZWEITE QUANTENREVOLUTION

- 1** Physiker können Quantenobjekte mittlerweile gezielt steuern. Damit rücken neuartige Sensoren, Netzwerke und Computer in Reichweite.
- 2** Weltweit fließen seit einigen Jahren große Beträge in diese Quantentechnologien. Nun hat auch die Europäische Union ein ambitioniertes Forschungsprogramm gestartet, das »Quanten-Flaggschiff«.
- 3** Noch müssen Forscher viele wissenschaftliche und technologische Probleme lösen. Gelingt dies, könnte die Quantenphysik in den nächsten Jahrzehnten zahlreiche Branchen revolutionieren.

gers Katze als Analogon zum beschriebenen Phänomen. Anhand des zufällig blinkenden Ions konnte der Dalai Lama hier also Zeuge einer der wichtigsten, aber unintuitivsten Eigenschaften der Quantenwelt werden.

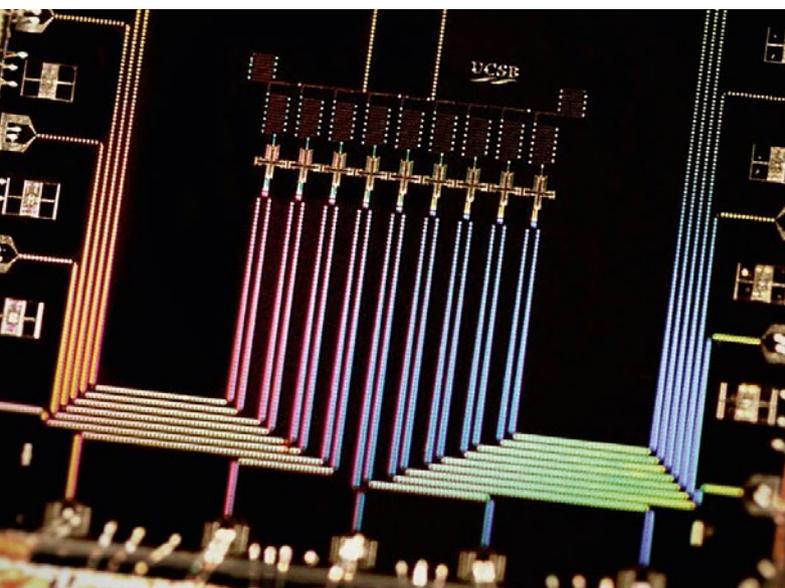
Was der berühmte Geistliche für eine philosophische Laborspielerei gehalten haben mag, ist 20 Jahre später Grundlage eines ambitionierten Großforschungsprojekts der Europäischen Union: Von 2018 an fördert sie die Quantenforschung mit 500 Millionen Euro; noch einmal der gleiche Betrag soll während der zehnjährigen Laufzeit des Programms aus den Fördertöpfen der EU-Mitgliedsstaaten kommen. Wir waren maßgeblich daran beteiligt, dieses Projekt Wirklichkeit werden zu lassen und wollen hier die Vision hinter dem Projekt beschreiben.

Langfristig sollen durch das »Quanten-Flaggschiff«, an dem sich hunderte Forschungsgruppen aus ganz Europa beteiligen werden, Technologien entstehen, die auf der Superposition und anderen quantenphysikalischen Phänomenen des Mikrokosmos basieren. Unserer Einschätzung nach haben diese das Zeug dazu, unser Kommunikationswesen und andere Bereiche zu revolutionieren. Und jetzt ist aus unserer Sicht der Zeitpunkt gekommen, ihre Entwicklung im großen Stil zu fördern.

Natürlich gibt es bereits seit Jahrzehnten Technologien, die auf den Gesetzen der Quantenphysik basieren, beispielsweise Laser, Transistoren oder Atomuhren. Sie fußen jedoch darauf, dass wir große Gruppen von Lichtteilchen, Elektronen oder Atomen steuern. Mittlerweile aber können Wissenschaftler die Quanteneffekte einzelner Quantenobjekte kontrollieren – aus Sicht vieler Experten gleicht dies einer »zweiten Quantenrevolution«.

Wer gezielt einzelne Atome und Lichtquanten verändert, kann über völlig neue Anwendungen nachdenken, beispielsweise ultraempfindliche Quantensensoren für

**Der Kalifornier John Martinis platzierte 2015 neun supraleitende Qubits auf einem Mikrochip und bereitete damit die Entwicklung größerer Quantencomputer vor.**



Magnetfelder und andere Messgrößen. Auch könnten abhörsichere Netzwerke auf Basis einzelner Photonen zum neuen Standard digitaler Kommunikation werden. Und Quantencomputer sowie Quantensimulatoren eröffnen in vielen Bereichen neue Perspektiven, von der Materialforschung über die Verkehrsflusssteuerung bis hin zur künstlichen Intelligenz (siehe **Spektrum** November 2015, S. 78).

Neben der bereits erwähnten Superposition nutzen Quantenwissenschaftler vor allem das Phänomen der Verschränkung aus. Bei ihr korrelieren die Zustände zweier Teilchen miteinander, auch wenn diese weit voneinander entfernt sind. Die vielleicht spektakulärste Anwendung der Verschränkung ist die so genannte Quantenteleportation, die im Jahr 1997 der Innsbrucker Arbeitsgruppe um Anton Zeilinger erstmals gelang. Anders als in der Fernsehserie »Star Trek« wird hierbei nicht Materie übertragen, sondern ein quantenphysikalischer Zustand. Eine Datenübertragung mit Überlichtgeschwindigkeit durch Quantenteleportation ist ausgeschlossen, auch wenn man dies immer wieder liest. Nichtsdestotrotz hat sie enormes Anwendungspotenzial in der Kommunikationstechnik – mehr dazu später.

#### **Alte Technologien weiterentwickeln, neue erfinden**

Superposition und Verschränkung widersprechen mit ihrer starken Zufallskomponente dem gesunden Menschenverstand so sehr, dass Albert Einstein sie anzweifelte und den berühmten Ausspruch »Gott würfeln nicht!« prägte. Er glaubte, dass wir die Gesetze, denen die Welt im kleinsten folgt, einfach noch nicht genau kennen und es »verborgene Variable« geben müsse, mit deren Hilfe man den scheinbaren Zufall doch berechnen könnte. Niels Bohr hielt dagegen und soll geantwortet haben, dass wir Gott nicht vorschreiben könnten, wie er die Welt zu lenken hat. Es sollte viele Jahre dauern, bis der Disput (zumindest nach der Überzeugung der allermeisten Physiker) gelöst war. 2015 – mehr als 80 Jahre nach Einsteins und Bohrs Streit – zeigten drei Experimente, so genannte »schlupflochfreie« Bell-Tests, in Delft, Wien und Boulder unabhängig voneinander, dass es keine verborgene Variablen geben kann. Damit bewiesen sie endgültig die Vollständigkeit der Quantentheorie: Gott würfeln doch!

Wie diese Beispiele zeigen, haben wir heute eine unglaublich gute Kontrolle über einzelne Quanten. Im Rahmen der zweiten Quantenrevolution wollen wir diese Kontrolle nun außerhalb des Labors nutzbar machen. Daneben wollen wir aber auch bestehende Quantentechnologien weiterentwickeln. Ein Beispiel hierfür sind die hochgenauen Atomuhren, die bereits an Bord von Navigationssatelliten im Einsatz sind. Mit ihrer Hilfe bestimmt man die Position des Empfängers durch den Vergleich der Laufzeit von Signalen von mindestens vier verschiedenen Satelliten. Dazu ist es nötig, dass die Uhren in allen Satelliten die exakt gleiche Zeit (bis auf wenige milliardstel Sekunden) zeigen.

Atomuhren nutzen aus, dass alle Atome einer Sorte (auf GPS-Satelliten verwendet man unter anderem Zäsium und Rubidium) die exakt gleiche Elektronenkonfiguration haben. Eines der Elektronen wird von seinem natürlichen

Grundzustand in einen energetisch höheren Zustand angeregt, indem es ein Photon einer ganz bestimmten Energie und damit einer ganz bestimmten Frequenz absorbiert. In einer Atomuhr misst man diese Frequenz extrem genau und nutzt so die Atome gewissermaßen als Uhrenpendel. Die besten heutigen Atomuhren sind so präzise, dass sie weniger als eine Sekunde falsch gehen würden, wenn man sie zur Geburt des Universums vor 13,8 Milliarden Jahren angeschaltet hätte. Damit ist die Zeit die mit Abstand am genauesten bestimmbare Messgröße.

Streng genommen ist die Energiedifferenz zwischen Grundzustand und angeregtem Zustand nur für einzelne, vollkommen isolierte Atome konstant. Äußere Einflüsse, wie etwa elektromagnetische Felder, können die Energieniveaus der Zustände und damit auch die Übergangsfrequenz beeinflussen. Atomuhren werden daher aufwändig abgeschirmt, und es werden spezielle Paare von Elektronenkonfigurationen gewählt, die möglichst unempfindlich gegen Störungen sind.

Für Quantensensoren dreht man den Spieß um: Man wählt Zustandspaare, deren Energieniveaus stark von äußeren Einflüssen wie beispielsweise Magnetfeldern abhängen. Eine Änderung des Felds wird dadurch in eine Änderung der Uhrenfrequenz konvertiert, die Forscher wiederum hochpräzise messen können. Für Quantensensoren kommen neben Atomen eine Vielzahl anderer Quantensysteme zum Einsatz, zum Beispiel so genannte NV-Zentren in Diamant (bei denen im Diamantgitter ein Kohlenstoffatom durch ein Stickstoffatom und eine Fehlstelle ersetzt ist), supraleitende Schaltkreise oder sogar mechanische Nanostrukturen.

Die Anwendungsgebiete für diese Technologie sind vielfältig. Quanten-Magnetfeldsensoren ermöglichen schon heute die so genannte Magnetoenzephalografie, mit der sich die Gehirnaktivität messen lässt. Die Sensoren verwenden so genannte SQUIDs (Superconducting Quantum Interference Devices), die jedoch aufwändig mit flüssigem Helium auf wenige Kelvin über dem absoluten Nullpunkt gekühlt werden müssen. Künftige Exemplare sollen auch bei Raumtemperatur funktionieren und damit weitaus kompakter, energieeffizienter und kostengünstiger sein. Möglicherweise wird man sie sogar als Mensch-Maschine-Schnittstelle einsetzen können: Eine Reihe kompakter Sensoren, eingearbeitet in einer Haube, würde dann bestimmte zuvor eintrainierte Gehirnstrommuster erkennen und diese Signale über Funk an technische Geräte (von der Spielekonsole bis zum Rollstuhl) weitergeben.

So genannte Quanten-Inertialsensoren könnten hingegen zur satellitenunabhängigen Navigation eingesetzt werden, die wichtig für die Sicherheit von Schiff- und Luftfahrt ist. Diese Variante der Technologie beruht auf dem Prinzip des Welle-Teilchen-Dualismus und kehrt die Rolle von Licht und Materie im Vergleich zu einem normalen Interferometer um: Eine fallende Atomwolke wird mit Hilfe eines Laserstrahls in Superposition aus Grund- und angeregtem Zustand gebracht. Letzterer erhält durch die Absorption des Lasers einen kleinen Stoß senkrecht zur Fallrichtung, so dass die beiden Zustände unterschiedliche Wege im Raum zurücklegen.

## Superposition und Verschränkung

Quantenobjekte befinden sich oft in einer Überlagerung mehrerer Zustände, Physiker sprechen von Superposition. Bei einem Photon überlagern sich beispielsweise die Polarisierungsrichtungen des Lichtfelds, nennen wir sie hier H und V (für horizontal und vertikal). Das Besondere einer Superposition dieser beiden Zustände ist, dass sich die Natur erst bei einer Messung für einen der beiden Zustände entscheidet, und zwar völlig zufällig. Bis dahin existieren sie gewissermaßen gleichzeitig. Das Konzept der Superposition kann man auch auf mehrere Teilchen ausweiten und spricht dann von Verschränkung – die beiden Begriffe führen häufig zu Verwirrung, beschreiben sie im Kern doch dasselbe Phänomen. Verschränkt man beispielsweise zwei Photonen 1 und 2 miteinander in einer Superposition  $H_1H_2 + V_1V_2$ , so wird man bei einer Messung entweder beide horizontal polarisiert ( $H_1H_2$ ) oder vertikal polarisiert ( $V_1V_2$ ) finden, niemals jedoch in zwei unterschiedlichen Zuständen (alternativ könnte man natürlich auch eine antikorrelierte Verschränkung  $H_1V_2 + V_1H_2$  präparieren und würde dann die beiden Lichtteilchen immer in unterschiedlichen Zuständen finden). Dem Experimentator ist es unmöglich vorauszusagen, welches der beiden Messergebnisse eintritt. Sogar wenn man die Messungen exakt gleichzeitig an weit entfernten Orten durchführt und damit ausschließt, dass eine Messung die andere beeinflusst haben kann (da dies eine Wechselwirkung mit Überlichtgeschwindigkeit benötigen würde, was laut Relativitätstheorie nicht möglich ist), hat dieses Ergebnis Bestand.

Ein weiterer Strahl sorgt dafür, dass sich die Atomwolken wieder aufeinander zubewegen, und ein dritter bringt die beiden Zustände schließlich zur Interferenz. Letztlich misst man die Population der beiden Zustände in der Atomwolke und kann aus dem Verhältnis zum Beispiel bestimmen, inwieweit sich das Gesamtsystem während des Versuchs gedreht hat. Eine dritte Variante, so genannte Quanten-Gravitationssensoren, messen direkt die Beschleunigung der jeweiligen Zustände. So können sie sehr präzise die Masseverteilungen unter der Erdoberfläche abbilden, was für Firmen interessant ist, die Bauvorhaben planen oder nach Rohstoffen suchen.

Die nächste Generation von Quantensensoren könnte übrigens nicht nur das Prinzip der Superposition, sondern auch das der Verschränkung ausnutzen. Was damit möglich ist, zeigt der Physiknobelpreis 2017, der für die Entdeckung von Gravitationswellen an drei Physiker des LIGO-Observatoriums vergeben wurde: Gravitationswellendetektoren wie LIGO können ihre enorme Sensitivität weiter



PICTURE ALLIANCE / PHOTOSHOT

Mit Hilfe des chinesischen Quantensatelliten »Micius« (oben) übertrugen Forscher um Jian-Wei Pan 2017 einen Verschlüsselungskode nach Österreich, um ein quantengesichertes Telefonat mit Anton Zeilinger (rechts) zu führen.

steigern, wenn sie verschränkte Photonen verwenden (»gequetschtes Licht«). Bei den Geräten handelt es sich um riesige optische Interferometer, die winzige Längenänderungen eines ihrer Arme messen. Werden die Detektoren mit »klassischem« Licht betrieben, so ist die Auslesegenauigkeit durch das so genannte Schrotrauschen beschränkt. Es geht darauf zurück, dass die Photonen unabhängig voneinander das Interferometer durchlaufen und es zu statistisch bedingten Schwankungen an den Lichtdetektoren kommt – die Anzahl der Photonen zu einem bestimmten Zeitpunkt streut gewissermaßen wie das Geschoss einer Schrotflinte. Aus diesem Grund wird LIGO mit extrem starken Lasern betrieben, die das Verhältnis von Signal zu Rauschen maximieren. In der Praxis ist die maximale Lichtleistung aber zum Beispiel durch die Erwärmung der Spiegel begrenzt. Der deutsche Detektor GEO600, an dem seit Jahrzehnten Technologie für LIGO entwickelt wird, verwendet daher bereits nicht-klassisches Licht, bei dem die Photonen paarweise miteinander verschränkt sind, wodurch die Lichtstärke weniger stark streut. Denn die Photonen sind nicht mehr völlig unabhängig unterwegs, sondern sie wissen gewissermaßen über den Weg eines Nachbarn Bescheid, was das Rauschen mit heutiger Technik um mehr als das Zehnfache reduzieren kann.

Das Quanten-Flaggschiff soll auch Fortschritte in einem anderen Bereich der Quantentechnologien bringen. Wie das zufällig morsende Dalai-Lama-Ion zeigt, messen wir ein Teilchen, das sich in Superposition zweier Zustände befindet, immer nur in genau einem der beiden Zustände – wir können jedoch nicht voraussagen, in welchem. Nach der Messung befindet sich das Teilchen in einem eindeutig definierten Zustand, die Superposition wird durch die Messung aufgehoben. Man kann einen Superpositionszustand also nie kopieren, ohne das Original zu zerstören. Dieses No-Cloning-Prinzip macht sich die Quantenkommunikation, genauer die Verteilung von Quantenschlüsseln (englisch: Quantum Key Distribution, QKD) zu Nutze. Sie stellt einen abhörsicheren Austausch von Nachrichten und Daten in Aussicht (siehe **Spektrum** August 2016, S. 64).



ÖSTERREICHISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN (ÖAW)

Um das zu verstehen, stellen wir uns zunächst vor, dass Anna mit ihrer Freundin Barbara chatten will. Möchte Anna eine geheime, quantenkodierte Botschaft an Barbara senden, schickt sie ihr zunächst über einen Quantenkanal einen zufälligen digitalen Schlüssel, kodiert in der Polarisation (der Schwingungsrichtung) einzelner Photonen, die etwa durch ein Glasfaserkabel zu ihr gelangen. Der Trick ist, dass Anna zufällig die Photonen entweder horizontal/vertikal oder diagonal links/diagonal rechts polarisiert und sie dies Barbara zunächst nicht mitteilt – sie benötigt also zwei Zufallsgeneratoren, einen für die Bitfolge des Schlüssels (0 oder 1) und einen für die Wahl der Polarisationsbasis. Schaltet sich nun Barbaras eifersüchtiger Exfreund Ernst dazwischen, um die Schlüsselübertragung aus Nullen und Einsen abzuhören, muss er die Polarisationsbasis erraten und wird wegen des No-Cloning-Prinzips die Zeichenkette verändern, denn der Abhörvorgang stellt ja eine Messung dar.

Anna und Barbara können den Lauschangriff erkennen, indem sie nach der Schlüsselübertragung eine gewöhnliche, also abhörbare Leitung verwenden: Zunächst teilt Anna Barbara die Wahl der Polarisationsbasis mit, und

beide verwenden nur die Schlüsselbits, bei denen beide zufällig die gleiche Basis gewählt haben. Dann vergleichen sie einige Bits des von Barbara empfangenen mit dem von Anna gesendeten Schlüssel: Wenn sie Unterschiede feststellen, wissen sie, dass jemand mitgehört hat. Wenn die Stichproben gleich sind, können sie (mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit) davon ausgehen, dass niemand gelauscht hat und den Schlüssel dazu verwenden, ihre Daten zu verschlüsseln und über eine klassische Leitung zu übertragen.

Was nach Sciencefiction klingt, kann man bereits seit rund zehn Jahren kaufen. Der Weltmarktführer ist ein Schweizer Unternehmen, das 2001 von vier Wissenschaftlern der Universität Genf gegründet wurde. Mittlerweile gibt es unseres Wissens weltweit eine Hand voll Firmen, die entsprechende Systeme anbieten. Inzwischen sind sogar Systeme erhältlich, die sich nahtlos in bestehende Kommunikationsnetzwerke integrieren lassen. Diese werden schon heute für sichere Kommunikation zwischen Datenzentren oder Finanzinstituten verwendet. Doch noch sind einige Hürden zu überwinden, die den breiten Einsatz dieser Technologie für alle Internetnutzer verhindern.

Insbesondere begrenzen Übertragungsverluste in den Glasfaserleitungen die Reichweite in der Praxis auf ein paar hundert Kilometer. Bei klassischer Telekommunikation werden Verluste durch optische Verstärker aus einer Photodiode und einem Laser ausgeglichen. Sie müssen dafür jedoch das Signal messen, so dass die sichere Quantenverschlüsselung bei jeder Verstärkerstation unterbrochen wird. In Quantentechnologie-Laboren wird daher intensiv an »Quanten-Repeater« geforscht, mit denen sich die Reichweite der Verschränkung erweitern lässt, ohne den Superpositionszustand zu zerstören.

Hierzu ist zunächst die Übertragung der im Photon gespeicherten Quanteninformation in ein anderes System nötig, das letztlich ein neues Photon mit der gleichen Information aussendet. In den vergangenen Jahren wurden auf diesem Gebiet große Fortschritte erzielt. So hat etwa eine Forschergruppe um Hugues de Riedmatten vom Barcelona Institute of Science and Technology im Jahr 2017 den Quantenzustand einer ultrakalten Gaswolke mittels eines Photons in ein Festkörpersystem übertragen. Und Kollegen aus Delft haben im selben Jahr eine besonders robuste Form der Verschränkung zwischen zwei Stickstofffehlstellen in Diamanten hergestellt.

Große Erfolge hat auch die Volksrepublik China vorzuweisen. Sie hat Quantentechnologien zu einem strategischen Forschungsbereich in ihrem 13. Fünfjahresplan ernannt und zeigt, dass Quantenkommunikation im großen Maßstab heute schon machbar ist: Im September 2017 haben Regierungsvertreter und Wissenschaftler einen 2000 Kilometer langen faserbasierten QKD-Link zwischen Peking und Schanghai eingeweiht, der aus Teilstücken zwischen 32 vom Staat kontrollierten Knotenpunkten besteht.

Bereits im August 2016 hatte China den wissenschaftlichen Satelliten Micius in die Erdumlaufbahn geschossen, mit dem ein Team um Jian-Wei Pan Experimente zum Schlüsselaustausch im Weltall durchgeführt hat. Daneben

sind den Physikern damit Experimente zur Quantenteleportation über eine Entfernung von mehr als 1200 Kilometern geglückt, was einem neuen Weltrekord entspricht (siehe **Spektrum** August 2017, S. 8). Langfristiges Ziel ist es, ein Quantensatellitennetzwerk aufzubauen, das globale quantenverschlüsselte Kommunikation mit Hilfe von einzelnen verschränkten Photonen ermöglicht.

Allerdings: Aus Sicht vieler Cybersicherheitsexperten können die aktuellen Verschlüsselungsverfahren zwar eventuell gebrochen werden, stellen derzeit jedoch nicht das schwächste Glied in der Kette der sicheren Datenübertragung dar. Computerviren und Informationsweitergabe durch Personen sind weitaus größere Probleme. Zudem wird an alternativen mathematischen Algorithmen zur Verschlüsselung geforscht, die nur ein Software-Update der bestehenden Kommunikationsinfrastruktur, jedoch keine neue Hardware benötigen. Somit würden sie auch für die Verschlüsselung in Funknetzen funktionieren. Allerdings gibt es bei diesen Lösungen, »Post-Quantum Kryptographie« genannt, keine Garantie dafür, dass nicht doch einmal ein findiger Mathematiker eine Entschlüsselungsmethode entwickelt. Die QKD hingegen bietet Sicherheit, die auf fundamentalen Naturgesetzen basiert.

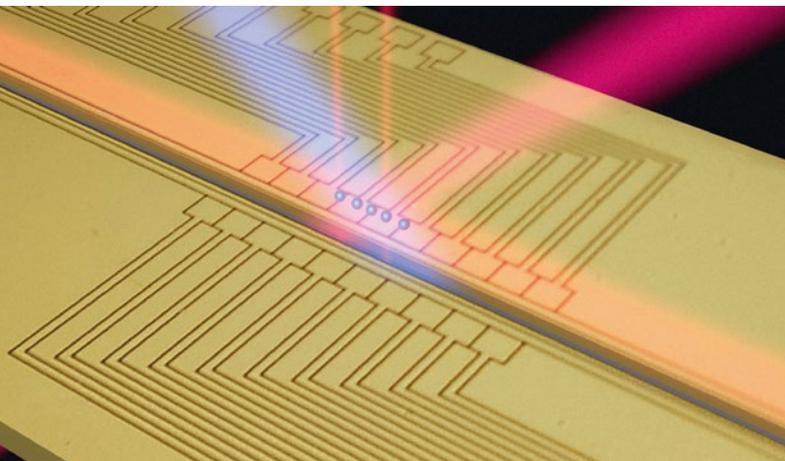
#### **Die »Mondmission« des Projekts ist die Entwicklung eines vollwertigen Quantencomputers**

Die bisher genannten Anwendungen werden sicher großen Einfluss auf die jeweiligen Anwendungsgebiete und Industriezweige haben. Die »Mondmission« der Quantentechnologien ist allerdings die Entwicklung von Quantencomputern. Sie versprechen bisher unvorstellbare Rechenleistung zum Lösen bestimmter Problemtypen und haben damit das Potenzial, viele verschiedene Bereiche unserer digitalisierten Gesellschaft zu transformieren.

Quantencomputer kodieren die Informationen nicht in klassischen Bits, die die Werte 0 oder 1 annehmen können, sondern in Qubits, die eine beliebige Superposition aus 0 und 1 annehmen können. Quantenalgorithmen verwenden neben klassischen Rechenoperationen wie Addition und logischen Verknüpfungen auch die Verschränkung zwischen verschiedenen Qubits. Daraus ergibt sich bei bestimmten Rechenaufgaben ein erheblicher Geschwindigkeitsvorteil.

1994 entwickelte der amerikanische Informatiker Peter Shor einen Quantencomputer-Algorithmus, der große Zahlen in ihre Primfaktoren zerlegen kann – und dies sehr viel schneller als alle bekannten klassischen Algorithmen. Die gängigen Verfahren, mit denen wir beispielsweise unsere E-Mails oder sichere Seiten im Netz verschlüsseln, beruhen darauf, dass es zwar leicht ist, zwei große Zahlen miteinander zu multiplizieren, aber sehr schwer, eine große Zahl in ihre Primfaktoren zu zerlegen. Mit heutigen Supercomputern betrüge die benötigte Rechenzeit zum Knacken der gängigen RSA-2048-Verschlüsselung daher mehrere Millionen Jahre. Ein ausreichend großer Quantencomputer, auf dem der Shor-Algorithmus läuft, könnte das Problem hingegen in wenigen Tagen lösen.

Dies erklärt, warum sich viele Regierungen für Quantencomputer interessieren. Allerdings sind inzwischen



RAINER BLATT, UDORN-INSBRUCK

**Forscher um Rainer Blatt von der Universität Innsbruck nutzen Mikrochips, um aufgereichte Ionen gefangen zu halten und mit Laserlicht zu manipulieren.**

weitere wichtige Anwendungsgebiete für Quantencomputer entstanden, die teilweise eine ähnliche Beschleunigung von Rechenoperationen in Aussicht stellen. Die Liste reicht vom Finden von Daten in unstrukturierten Listen, über die Optimierung von komplexen Systemen mit vielen Freiheitsgraden (etwa in der Lagerlogistik oder der Analyse von Verkehrsströmen), über die Berechnung von chemischen Systemen für die Chemie, Pharma- oder Materialforschung bis hin zu Anwendungen im maschinellen Lernen. Kein Wunder also, dass große IT-Firmen wie Google, IBM, Intel, Microsoft und Alibaba inzwischen viele Ressourcen in die Entwicklung eigener Quantencomputer und die entsprechende Softwareinfrastruktur stecken.

Dies wiederum weckt die Aufmerksamkeit von Risikokapitalgebern und vieler Firmen anderer Branchen, die Anwendungsfälle für ihr Unternehmen identifizieren wollen. Zudem verstärkt es das Engagement von Regierungen, die entsprechende Innovationsökosysteme in ihren Ländern schaffen wollen. Man kann dem Thema Quantencomputing somit eine gewisse Eigendynamik nicht absprechen. Manche sprechen sogar von einem Hype, bei dem sich zeigen muss, ob das große Interesse langfristig gerechtfertigt ist.

Andererseits lässt sich nicht von der Hand weisen, dass es in den vergangenen Jahren immense Fortschritte in der Entwicklung von Quantencomputern gegeben hat. Schaut man sich etwa die Entwicklung der Qubit-Anzahl von supraleitenden, auf Schaltkreisen basierenden Quantencomputern an, ist diese von 2 im Jahr 2009 über 5 im Jahr 2015 und 17 im Jahr 2017 auf mittlerweile 72 gestiegen. Allerdings gilt nach wie vor, dass noch immer viele Herausforderungen zu meistern sind, bis solche Geräte den Status von Prototypen hinter sich lassen können (siehe Artikel S. 22). Zum einen gibt es unterschiedliche physikalische Systeme, die für Quantencomputer in Frage kommen, mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen. Die momentan vielversprechendsten sind ultrakalte Ionen, bei denen die Qubits in atomaren Zuständen (ähnlich wie bei

atomaren Uhren) kodiert werden, und besagte supraleitende Schaltkreise, bei denen der Wert der Qubits der Flussrichtung eines Stroms entspricht.

Auf Letztere setzen die meisten zuvor genannten Firmen, und bei allen gibt es noch erheblichen Ingenieursaufwand, um die Systeme zu miniaturisieren, automatisieren, robuster zu machen und kostengünstiger zu fertigen. Die derzeit größten funktionierenden Quantencomputer bestehen aus rund 20 Ionen oder mehreren Dutzend supraleitenden Schaltkreisen. Diese Größenordnung galt lange als magische Schwelle, denn ab rund 50 Qubits sollten Quantencomputer mit heutigen klassischen Supercomputern nicht mehr ohne Weiteres simulierbar sein (siehe **Spektrum** Februar 2018, S. 62).

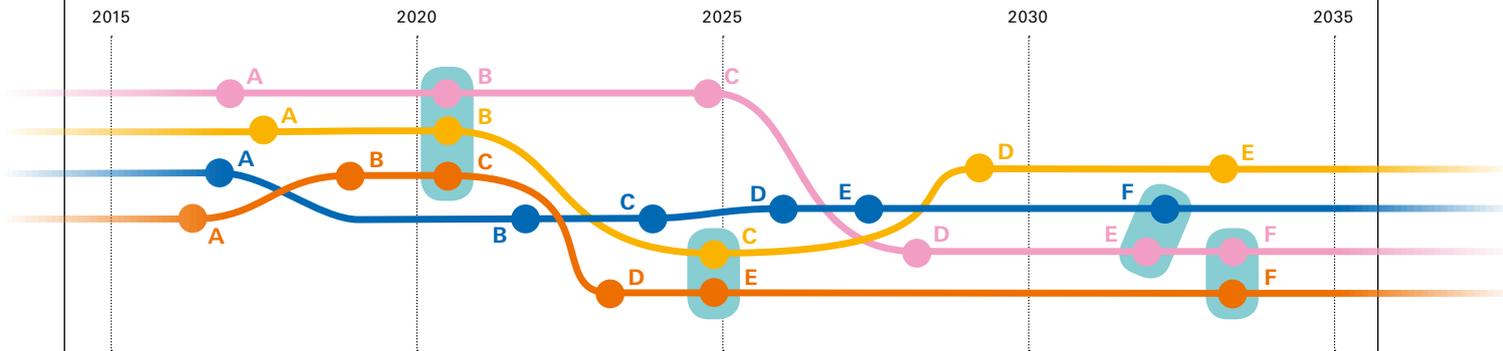
Zum anderen kämpfen Quantencomputer mit dem gleichen Problem wie Atomuhren: Überlagerungen und verschränkte Zustände reagieren extrem empfindlich auf äußere Einflüsse. Je mehr mikroskopische Bauteile man verschränkt, desto stärker schlägt dieser Dekohärenzeffekt zu Buche. Quantencomputer – basierend auf heutiger Technologie – sind daher in der Länge des zuverlässig abgearbeiteten Programms und der Anzahl der maximal koppelbaren Qubits Grenzen gesetzt. Zwar gibt es Quantenfehlerkorrekturverfahren, sie sind jedoch noch recht ineffizient. Theoretisch werden, je nach Hardwarefehler rate und Algorithmenlänge, Millionen bis Milliarden von physikalischen Qubits benötigt, um ein paar tausend fehlerkorrigierte logische Qubits zu erzeugen. Praktisch ist dies eine enorme Herausforderung. Es muss also noch weitere Durchbrüche in Forschung und Quanteningenieurwesen geben, bevor unsere derzeitige E-Mail-Verschlüsselung in Gefahr gerät. Es gibt allerdings bereits viel versprechende Ansätze, bestimmte Probleme auch mit kleineren, nicht fehlerkorrigierten Quantencomputern zu lösen, zum Teil in Kombination mit klassischen Supercomputern. Dies ist ein sehr aktives Forschungsgebiet mit viel Industriebeteiligung.

### **Quantensimulatoren für spezielle Aufgaben**

Besonders interessant sind hier so genannte Quantensimulatoren. Vom physikalischen Aufbau her ähneln sie Quantencomputern, führen aber keine Algorithmen aus, die aus einer Aneinanderreihung logischer Verknüpfung von Qubits bestehen. Vielmehr wird die Wechselwirkung zwischen den Bausteinen so eingestellt, dass das Verhalten des Quantensimulators äquivalent zu dem eines viel komplexeren, nicht kontrollierbaren Quantensystems ist. Dies ist einem Windkanal ganz ähnlich, wo Parameter wie Luftdruck, Strömungsgeschwindigkeit und Modellgröße aufeinander abgestimmt werden, um etwa den Wiedereintritt eines Spaceshuttles in die Atmosphäre zu simulieren.

Will man Quantensysteme mit klassischen Computern nachstellen, wird oft der Speicherplatz zum Nadelöhr: Jeder zusätzliche Quantenspin, der simuliert werden soll, verdoppelt den benötigten klassischen Speicherplatz, und dieses exponentielle Wachstum übertrifft recht schnell selbst die Kapazität der größten Supercomputer (50 Spins benötigen etwa eine Million Gigabyte an Speicher). Quantensimulatoren haben dieses Problem nicht.

## Meilensteine der Quantentechnologien – ein Zeitplan



### 1. Kommunikation

- A** Basistechnologie der Quanten-Repeater
- B** Sichere Datenübertragung zwischen zwei Quantenlinks
- C** Quantennetzwerke zwischen weit entfernten Städten
- D** Kreditkarten mit Quantenverschlüsselung
- E** Quanten-Repeater übertragen quantenverschlüsselte Informationen und geben Alarm bei Lausangriff.
- F** Europaweites Internet, das Quantentechnologie und klassische Kommunikationstechnik verwendet

### 2. Simulatoren

- A** Bewegung von Elektronen in Materialien können simuliert werden.
- B** Neue Algorithmen für Quantensimulatoren und Netzwerke
- C** Entwicklung neuartiger Materialien
- D** Anspruchsvolle Simulationen von magnetischen und elektrischen Quanteneffekten
- E** Simulation der Quantendynamik chemischer Reaktionen, Unterstützung des Designs neuer Arzneimittel

### 3. Sensoren

- A** Quantensensoren für Nischenanwendungen (z. B. Magnetfeldmessungen)
- B** Genauere Atomuhren zur Netzwerksynchronisation
- C** Quantensensoren in der Fertigungsindustrie
- D** Tragbare Quanten-Navigationsgeräte
- E** Quantensensoren erlauben die räumliche Abbildung des lokalen Gravitationsfelds
- F** Quantensensoren in der Unterhaltungselektronik und in Smartphones

### 4. Computer

- A** Einsatz eines logischen Qubits mit einfacher Fehlerkorrektur
- B** Entwicklung neuer Quantencomputer-Algorithmen
- C** Kleine Quantenprozessoren, die anwendungsrelevante Algorithmen ausführen
- D** Spezialisierte Quantencomputer mit mehr als 100 physischen Qubits, die Probleme aus Materialwissenschaft und Chemie lösen
- E** Verbindung von Quantenschaltkreisen mit klassischer Hardware bei niedrigen Temperaturen
- F** Allzweck-Quantencomputer, die klassische Computer bei manchen Anwendungen übertreffen

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: QUANTUM MANIFESTO S. 8

In den vergangenen Jahren haben Wissenschaftler diese immer besser gemacht: So fangen sie heute routinemäßig mehrere hundert neutrale Atome in einem Gitter aus Licht ein und untersuchen damit Phasenübergänge oder topologische Effekte in Vielkörper-Quantensystemen. Auch der in den Medien viel zitierte »Quantencomputer« der kanadischen Firma D-Wave ist eine besondere Art von Quantensimulator, ein so genannter Quanten-Annealer. Langfristig versprechen sich Forscher von Quantensimulatoren eine Reihe von Durchbrüchen, unter anderem im Optimieren des energieintensiven Haber-Bosch-Verfahrens zur Düngerherstellung, das ein bis zwei Prozent des Weltenergiebedarfs benötigt, oder im Verständnis der Hochtemperatur-Supraleitung in komplexen Materialien.

Die Quantentechnologien bewegen sich momentan also rasant voran, und in den USA und China werden große Summen investiert. Aber was ist mit Europa? Tatsächlich sind hier im weltweiten Vergleich die meisten Quantenwissenschaftler tätig. Das ergibt zumindest eine Analyse der Fachveröffentlichungen zwischen 2013 und 2015. Ihr zufolge stammten 2455 Autoren aus der EU, aus China 1913 und aus Nordamerika 1564. Auch die Europäische Kommission investiert in den Bereich und hat die Quantenwissenschaft in den vergangenen 20 Jahren mit insgesamt 550 Millionen Euro gefördert.

Allerdings wird Grundlagenforschung in Europa seltener unter dem Blickwinkel einer möglichen Anwendbarkeit und späteren Kommerzialisierung betrachtet als etwa in

den Vereinigten Staaten. Im Bereich der Digitalisierung hat es Europa beispielsweise wiederholt versäumt, von selbst entwickelten technologischen Trends zu profitieren. Diesen Fehler sollten wir bei den Quantenwissenschaften nicht wiederholen.

So laufen bereits seit Jahren die Vorbereitungen für ein fokussiertes Forschungsprogramm, das auch als Starthilfe für die europäische Industrie in Sachen Quantentechnologien dienen soll. Dabei hat die Europäische Kommission immer wieder nicht nur Forschungsvorhaben, sondern auch so genannte Koordinierungs- und Unterstützungsprojekte gefördert. Dadurch hat sie die Zusammenarbeit innerhalb der interdisziplinären Forschergemeinschaft – neben Festkörper- und Atomphysikern arbeiten auch Chemiker, Informatiker, Ingenieure und Elektrotechniker an Quantentechnologien – unterstützt und eine gemeinsame Forschungsagenda gefördert.

Vorläufiger Höhepunkt dieser gemeinsamen Anstrengungen war die Veröffentlichung des »Quantum Manifesto«, das 2015/16 auf den Weg gebracht und letztlich von mehr als 3500 Mitgliedern der Quantenforscher-Gemeinschaft unterschrieben wurde. Darin haben wir den aktuellen Stand sowie die Chancen von Quantentechnologien auf allgemein verständliche Weise erklärt und die Europäische Kommission aufgefordert, ein strategisches Förderprogramm für Quantentechnologien zu initiieren.

Zudem verfassten Quantenforscher eine Reihe von Positionspapieren, unter anderem zur Perspektive der europäischen Industrie, die aus Sicht des für Technologie-Entwicklung zuständigen Generaldirektorats DG Connect eine wichtige Voraussetzung für die Förderung war. Gleichzeitig rührten gut vernetzte Kollegen, insbesondere aus den EU-13-Staaten, in ihren Heimatländern die Werbetrommel für Quantentechnologien. Und auch die Europäische Kommission fertigte unabhängige Berichte an.

Eine wichtige Rolle bei der Entstehung des Quanten-Flaggschiffs spielte sicherlich auch das Bewusstsein von großen Investitionen in anderen Ländern, neben den USA und China sind hier vor allem Kanada, Australien und Japan zu nennen. Die Überzeugungsarbeit trug Früchte: Im Rahmen einer großen Konferenz unter der niederländischen EU-Präsidentschaft im Mai 2016 kündigte die Kommission offiziell an, dass sie das Flaggschiff starten würde.

Sein Ziel ist, Europas Position an der Spitze der Forschung zu festigen und gleichzeitig als Region für Innovationen und Investitionen in die Quantentechnologien zu etablieren. Viele Ausgründungen aus europäischen Laboren sind bereits weltweit erfolgreiche Zulieferer, etwa für Lasersysteme, Elektronik oder Vakuum- und Kühlsysteme. Diese Position wollen wir weiter stärken und auch die Gründung von neuen Start-ups fördern. Darüber hinaus sollen Firmen aus anderen Industriezweigen befähigt und ermutigt werden, Quantentechnologien in Anwendungen zu überführen und auf den Markt zu bringen.

Ganz wesentlich hierfür sind aus unserer Sicht die Ausbildung und Förderung junger Wissenschaftler und Experten sowie die Weiterbildung von Berufstätigen. Gleichzeitig dient das Flaggschiff als Zugpferd, um ergänzende Förderprogramme sowie private Investitionen anzustoßen.

Einen solchen Effekt sehen wir bereits jetzt, zwei Jahre nach der offiziellen Verkündung des Projekts. Viele Mitgliedsstaaten der EU haben Quantentechnologie-Programme gestartet oder wollen dies in den kommenden Monaten tun. Auch außerhalb Europas wird das Flaggschiff als wichtiges Signal für den Fortschritt des Felds angesehen. Eine Rolle spielt dabei sicherlich, dass es nicht nur durch das Europäische »Forschungsministerium« DG Research getragen wird, sondern insbesondere auch durch DG Connect, das Europäische »Ministerium« für Digitalisierung und Kommunikation.

Bei der Umsetzung des Quanten-Flaggschiffs haben wir auch auf die Erfahrungen der beiden bereits vorher gestarteten Flaggschiff-Initiativen (Graphen-Flaggschiff und Human Brain Project) zurückgegriffen. So hat sich gezeigt, dass der Alleingang eines einzelnen Konsortiums zwar zielgerichtet sein kann, jedoch zu Uneinigkeit innerhalb der Community über die richtigen Ziele und – wie im Fall des Human Brain Projects – gar zu öffentlichem Protest führen kann (siehe **Spektrum** Februar 2016, S. 58). Kernprinzipien des Quanten-Flaggschiffs sind daher transparente Entscheidungen und das Einbeziehen aller Beteiligten. Wir sehen die Initiative also nicht als einzelnes Großprojekt, sondern als Förderprogramm mit übergreifender Forschungsagenda.

Insgesamt wird es aus vier Anwendungsbereichen bestehen: Quantensensorik und Metrologie, Quantenkommunikation, Quantencomputing und Quantensimulation (siehe »Meilensteine der Quantentechnologie – ein Zeitplan«, S. 19). Für jeden dieser Bereiche sind Ziele für drei, sechs und zehn Jahre definiert, wobei wir diese immer wieder dem wissenschaftlichen und technischen Fortschritt anpassen wollen. Zudem planen wir eine eigene Förderung für Projekte aus der Grundlagenforschung, die nicht unmittelbar auf Anwendungen abzielt. Wir versprechen uns auch viel davon, die Kooperation zwischen Forschungsinstituten, Technologiezentren, Industrie und Quantentechnologie-Start-ups zu fördern. So kann man am ehesten Anwendungspotenzial von Forschungsarbeiten erkennen.

### **Die ersten Wissenschaftsprojekte sollen noch dieses Jahr starten**

Unser Konzept wurde von der Europäischen Kommission gut aufgenommen: Im Februar dieses Jahres hat sie die erste, mit 130 Millionen Euro dotierte Ausschreibung für Forschungsanträge abgeschlossen – die ersten Wissenschaftsprojekte des Quanten-Flaggschiffs werden damit noch Ende 2018 starten.

Wir werden immer wieder gefragt, was die Erfolgsaussichten unseres Projekts sind – und mit Bedenken zum Timing und zum Umfang des Flaggschiffs konfrontiert. Andere Regierungen, darunter die der Volksrepublik China, nehmen viel größere Fördersummen in die Hand und konzentrieren diese auf wenige Projekte. Dies führt zu beeindruckenden Ergebnissen wie dem bereits erwähnten Quantenkommunikationssatelliten Micius und der Peking-Schanghai-Verbindung. Manche Skeptiker behaupten sogar, Europa habe das Rennen im Bereich der Quanten-



**Auf dem Weg zum Quantenflaggschiff mussten die Physiker auch Günther Oettinger vom Nutzen der Quantenphysik überzeugen (hier an der Universität Ulm). Der damalige Digital-Kommissar der EU soll gefordert haben, dass die Forscher das Interesse der europäischen Industrie an Quantentechnologien dokumentieren und dass nicht nur die größten Mitgliedstaaten von dem Projekt profitieren.**

computer bereits verloren, da fast alle Nachrichten dazu aus den USA zu kommen scheinen.

Die Zweifel sind auf den ersten Blick berechtigt, aber unserer Meinung nach in zwei Aspekten nicht weit genug gedacht. Erstens hat das Rennen erst begonnen. Gerade in den vielversprechendsten Bereichen der Quantentechnologien gibt es noch grundsätzliche Herausforderungen zu lösen, unter anderem bei den Quanten-Repeater und der Fehlerkorrektur für Quantencomputer. Es ist bezeichnend, dass bis auf wenige Ausnahmen industrielle Großunternehmen, die potenzielle Nutzer von Quantentechnologien sind, zwar verstärkt Interesse zeigen, aber große Investitionen jenseits von ein paar Millionen Euro bisher noch ausgeblieben sind. Sie sehen, wie viele andere auch, die Gefahr überzogener Erwartungen.

Europa sollte hier aus unserer Sicht seine Ausdauer unter Beweis stellen. Nur eine Kombination aus breiter Förderung vieler verschiedener Stoßrichtungen einerseits und gezielter Förderung von ambitionierten Forschungs- und Innovationsvorhaben mit klaren Projektzielen und Zeitplänen andererseits (wie zum Beispiel dem Bau eines europäischen Quantenverschlüsselungsnetzwerks oder europäischer Quantencomputerzentren) wird letztendlich zum Erfolg führen.

In der jetzigen Phase des Quanten-Flaggschiffs ist die Förderung noch vergleichsweise breit angelegt, um sich nicht zu früh auf die vermeintlich gewinnenden Technologien festzulegen. Eine Besonderheit der europäischen Herangehensweise ist sicherlich die starke Einbindung der gesamten Wissenschaftlergemeinschaft bei der Erarbeitung der Forschungsagenda, um eine Benachteiligung bestimmter Fachbereiche zu verhindern.

Zweitens ist die Metapher des Wettrennens womöglich die falsche. Gerade im Bereich der Quantentechnologien ist eine globale Zusammenarbeit seit Jahrzehnten gang und gäbe. So kooperiert beispielsweise das Quantentechnologie-Institut der Technischen Universität Delft in den Niederlanden sehr eng mit dem amerikanischen Unternehmen Intel bei der Entwicklung supraleitender Quantencomputer-Chips. Und die Gruppe von Anton Zeilinger arbeitet mit dem chinesischen Programm unter Jian-Wei Pan – der bei Zeilinger einst seine Doktorarbeit geschrieben hat – zusammen.

Die Staaten Europas werden Quantentechnologien nicht nur in Konkurrenz zu anderen Regionen vorantreiben, sondern auch gemeinsam mit ihnen. Bill Phillips, amerikanischer Nobelpreisträger und Quantentechnologiepionier, brachte es Ende Januar dieses Jahres in einer Anhörung im Europäischen Parlament auf den Punkt: »Wird es Wettbewerb oder Kooperation zwischen den USA und Europa geben? Lassen Sie es mich quantenphysikalisch ausdrücken: beides!« Daher ist auch der Zeitpunkt für das Europäische Quanten-Flaggschiff genau richtig. Europa kann auf führende Forschung bauen und hat eine starke Industrie, insbesondere im Fertigungssektor, im Gesundheits- und Pharmabereich sowie in der Chemieindustrie. Hier ergeben sich viele Anwendungen für Quantentechnologien, von Produktions- und Logistikprozessen über verbesserte Bildgebung bis zur Optimierung von chemischen Prozessen. Die technische Entwicklung hat sich gerade in den vergangenen zwei bis drei Jahren massiv beschleunigt; dennoch bleiben grundsätzliche Hürden.

Sobald diese genommen sind, könnten Quantentechnologien in Zukunft fast alle Bereiche der Gesellschaft beeinflussen. Dann wird sich zeigen, ob Europa in die richtigen Technologien genug investiert hat. Sowohl die Kommission als auch das Europäische Parlament stehen jedenfalls geschlossen hinter Quantentechnologien als strategisch wichtigem Feld für Europas Zukunft. Sie sind gewillt, gegebenenfalls benötigte Anpassungen vorzunehmen – das wurde bei öffentlichen Sitzungen wie auch in Gesprächen im Hintergrund immer wieder klar. Es gibt noch viele Ungewissheiten: Quantentechnologien sind ein typisches »high risk, high gain«-Projekt. Doch wer nicht wagt, der nicht gewinnt! ◀

#### QUELLEN

**Acín, A. et al.:** The European Quantum Technologies Roadmap, 2018, [arXiv.org/abs/1712.03773](https://arxiv.org/abs/1712.03773) (eingereicht bei New Journal of Physics)

**De Touzalin, A. et al.:** Quantum Manifesto, Mai 2016, <http://quope.eu/manifesto>

**Mlynek, J. et al. (High-Level Steering Committee):** Quantum Technologies Flagship Final Report, Juni 2017, <http://tinyurl.com/qt-hlsc-report>



IBM RESEARCH: FOTO: OWINE ZHOU / IBM Q NETWORK, WWW.FLICR.COM/PHOTO SUBM, RESEARCH\_ZÜRICH/3897256982/ / CC BY-ND 2.0, CREATIVE COMMONS.ORG/LICENSES/RY/ND/2.0/LEGAL.DDDEI

# QUANTENCOMPUTER REVOLUTION AUF RATEN

Rechner auf Basis der Quantenmechanik könnten bei bestimmten Aufgaben bald schneller sein als ihre klassischen Pendants. Doch auf dem Weg zur universellen Überlegenheit sind noch zahlreiche Schwierigkeiten zu meistern.



IBM RESEARCH. FOTO: CONNIE ZHOU / IBM Q NETWORK (WWW.FLICR.COM/PHOTOS/IBM\_RESEARCH\_ZÜRICH/887256982/) / CC BY-ND 2.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/RY/ND/2.0/LEGALCODE)

**Mehrere große Technologiefirmen betreiben Grundlagenforschung an unterschiedlichen Konzepten für Quantencomputer – hier ein Labor des US-Konzerns IBM in Yorktown Heights, New York. Die Geräte selbst stecken in großen Behältern. Diese schotten die störanfälligen Speichereinheiten vor Wärme, Licht und weiteren Umgebungseinflüssen ab.**

## AUF EINEN BLICK DURCHWACHSENE AUSSICHTEN

- 1** Fortschritte in jüngster Zeit lassen Experten auf »Quantenüberlegenheit« hoffen, bei der ein Quantencomputer ein Problem besser löst als herkömmliche Algorithmen.
- 2** Allerdings begrenzen unvermeidbare quantenmechanische Störungen die Dauer und Komplexität möglicher Berechnungen. Forscher lernen gerade erst, damit umzugehen.
- 3** Die neuartige Technologie wird bestehende IT-Ressourcen nicht so schnell obsolet machen. Beides könnte sich sogar sinnvoll ergänzen.



**Philip Ball** ist Physiker und war 20 Jahre Redakteur der Zeitschrift »Nature«. Er arbeitet als Autor in London. 2018 hat er ein populärwissenschaftliches Buch über die Grundlagen der Quantenmechanik veröffentlicht (»Beyond Weird«).

» [spektrum.de/artikel/1561162](https://spektrum.de/artikel/1561162)

► Nachdem es jahrzehntelang auf dem Feld der Quanteninformatik nur schleppend voranging, ist seit einigen Jahren eine erstaunliche Aktivität zu verspüren. 2016 machte beispielsweise das US-Unternehmen IBM der Welt einen Fünf-Qubit-Rechner zugänglich, also eine Maschine mit fünf Quantenbits, den Informationseinheiten der Quantencomputer. Das klingt zunächst eher wie ein wissenschaftliches Spielzeug. Das IBM Q Experience genannte Gerät verzeichnet seither nicht nur rund 70000 registrierte Nutzer, sondern ist außerdem auf eine viermal so große Zahl von Qubits aufgestockt worden. 2017 behaupteten IBM und Intel, in ihren Forschungsabteilungen stünden Quantencomputer mit 50 beziehungsweise 49 Qubits. Google hat Schaltkreise ähnlicher Dimension in Arbeit (siehe »Siegeszug der Quanten«, **Spektrum** Februar 2018, S. 62). »Der Forschungsbereich sprüht vor Energie, und der jüngste Fortschritt ist immens«, kommentiert der Physiker Jens Eisert von der FU Berlin.

Immer öfter äußern Experten deshalb die Erwartung, der Moment der »Quantenüberlegenheit« stünde kurz bevor. Damit bezeichnen sie den Augenblick, in dem ein Quantencomputer bei einer Aufgabe erstmals die besten herkömmlichen Superrechner übertrifft. Bei einem Blick auf die nackten Zahlen erscheint das absurd: nur

50 Qubits gegenüber Milliarden von klassischen Bits in jedem Laptop. Doch ein Quantenbit zählt eben viel, viel mehr – auf dieser Feststellung beruht das ganze Konzept der Quantencomputer.

50 Qubits galten lange als die Mindestgröße für Berechnungen, die auf herkömmlichen Maschinen eine undurchführbar lange Zeit benötigen würden. Mitte 2017 ließen Forscher von Google verlautbaren, sie zielten auf eine Verkündung der Quantenüberlegenheit bis Ende des Jahres ab. Das haben sie nicht geschafft. Auf Nachfrage bekräftigt ein Sprecher die Hoffnung auf baldige Resultate, bittet aber um Geduld: »Wir überprüfen die Arbeit zuvor noch einmal in allen Einzelheiten, um ein solides Ergebnis sicherzustellen.«

Angesichts dessen könnte man die grundlegenden Probleme für prinzipiell gelöst halten und meinen, der Weg zu allgegenwärtigen Quantencomputern sei jetzt nur noch eine Angelegenheit der Ingenieure. Aber die Baupläne lassen sich nicht so einfach hochskalieren, denn man kann die Qubits nicht von ihren grundlegenden physikalischen Funktionsprinzipien entkoppeln – und diese sind in vielen Details weiterhin rätselhaft. Selbst wenn wir den Meilenstein Quantenüberlegenheit hinter uns gelassen haben, wird sich erst in den folgenden Jahren zeigen, ob die Informatik tatsächlich vor einer Revolution steht.

Sowohl die Chancen als auch die Herausforderungen der Quantencomputer haben ihre Ursache in der Physik, die sie überhaupt erst möglich macht. Klassische Computer kodieren und verarbeiten Informationen als Folge binärer Ziffern, also Nullen und Einsen. Quantencomputer machen grundsätzlich das Gleiche, nur dass sich ihre Informationseinheiten, die Qubits, in einer Überlagerung der Zustände 0 und 1 befinden können. Erst eine Messung liefert ein eindeutiges Ergebnis: entweder 0 oder 1.

Für eine erfolgreiche Berechnung mit vielen Qubits müssen sich diese ununterbrochen in voneinander abhängigen Superpositionen befinden – einem »quantenkohärenten« Zustand, in dem sie miteinander verschränkt sind. Dann beeinflusst die Änderung eines Qubits zugleich alle anderen. Deswegen können Rechenoperationen mit ihnen mehr bewerkstelligen als solche mit klassischen Bits. Bei klassischen Computern wächst die Rechenleistung lediglich proportional zu der Anzahl der Bits, während sie sich bei Quantencomputern mit jedem zusätzlichen Qubit verdoppelt. Entsprechend ist der Unterschied zwischen einer Maschine mit 5 und einer mit 50 Qubits gewaltig.

Oft liest man, der Vorteil der Quantencomputer liege darin, dass die Verfügbarkeit von Superpositionen die Anzahl der kodierbaren Zustände massiv vergrößere. Oder die Verschränkung erlaube es, viele Berechnungen parallel durchzuführen. Beide Aussagen enthalten manchmal ein Körnchen Wahrheit, treffen jedoch nicht den Kern der Sache. Weil die Quantenmechanik selbst so schwer greifbar ist, lässt sich leider nicht leicht qualitativ ausdrücken, warum Quantencomputer potenziell so mächtig sind. Den Effekt zeigen zwar die Gleichungen der Quantentheorie – beispielsweise kann ein Quantencomputer im Prinzip bestimmte Arten von Berechnungen wie die Fakto-



**Das Herzstück eines Quantencomputers (hier ein Exemplar von IBM außerhalb seines Behälters) enthält zahlreiche Leitungen und Elektronik, um die Qubits im untersten, am stärksten gekühlten Bereich anzusteuern und auszulesen.**

risierung oder das Durchsuchen von Datenbanken erheblich schneller durchführen. Aber wie genau tut er das? Eine unverfängliche Beschreibung lautet, dass die Quantenmechanik eine Ressource zugänglich macht, die klassischen Geräten nicht zur Verfügung steht.

So ist immerhin klar: Die Qubits müssen kohärent sein. Und das ist nicht ohne Umstände zu bewerkstelligen. Die Wechselwirkung eines solchen Systems mit seiner Umgebung schafft Pfade, über welche die Kohärenz gewissermaßen verschwindet. Der Prozess wird als Dekohärenz bezeichnet. Will man einen Quantencomputer bauen, muss man sie möglichst verhindern. Das schaffen die Forscher derzeit nur für Bruchteile von Sekunden, und die Herausforderung wächst mit der Anzahl der Qubits.

Darüber hinaus gibt es – wie bei nahezu jedem Vorgang in der Natur – auch bei Quantencomputern Rauschen. Zufällige Fluktuationen durch die Wärme in den Qubits oder durch fundamentale quantenmechanische Prozesse

führen dann und wann dazu, dass der Zustand eines Qubits umklappt oder völlig zufällig wird. Das kann zu einem Fehler bei der Berechnung führen. Auch bei klassischen Computern gibt es das Problem, aber es lässt sich leicht lösen, indem man einfach mehrere Kopien jedes Bits hat. So fällt ein zufällig verändertes auf und kann korrigiert werden.

Die Quantenmechanik verbietet solche Kopien, und deshalb haben sich Forscher eine Reihe von Strategien für den Umgang mit dem Rauschen ausgedacht. Diese bringen alle eine hohe Last an weiteren Rechenschritten mit sich. Irgendwann wird praktisch die gesamte Kapazität für die Korrektur der Fehler eingesetzt statt für die eigentliche Aufgabe. »Die derzeitige Häufigkeit von Fehlern begrenzt die Länge der durchführbaren Berechnungen«, bekräftigt Andrew Childs vom Joint Center for Quantum Information and Computer Science der University of Maryland. »Ohne erhebliche Fortschritte in diesem Bereich werden wir keine interessanten Aufgaben lösen.«

Ein großer Teil der Forschung auf dem Gebiet der Quantencomputer gilt daher der Korrektur von Fehlern. Viele Schwierigkeiten dabei haben ihre Ursache in einer wichtigen Eigenschaft von Quantensystemen: Superpositionen lassen sich nur so lange aufrechterhalten, bis man den Wert eines Qubits misst. Dann wird er eindeutig, also entweder 1 oder 0. Wie soll man aber herausfinden, ob ein Qubit fehlerhaft ist, wenn man seinen Zustand nicht kennt?

### **Eine Stecknadel Information in einem Heuhaufen Rechnerei**

Eine raffinierte Methode basiert darauf, das zu prüfende Qubit an ein weiteres Hilfs-Qubit oder »Ancilla-Qubit« (nach dem lateinischen Begriff für Dienerin) zu koppeln. Es nimmt an den folgenden Schritten nicht teil und kann deshalb untersucht werden, ohne dass die Superposition des ursprünglichen Qubits ebenfalls kollabiert. Doch das lässt sich nur schwer verwirklichen. Bei einem solchen Verfahren muss man viele physikalische Qubits einsetzen, um ein einziges logisches Qubit für eine erfolgreich fehlerkorrigierte Berechnung zu erzeugen.

Wie viele? Etwa 10 000 der heutigen Qubits wären dafür nötig, schätzt der Quantentheoretiker Alán Aspuru-Guzik von der Harvard University – eine vollkommen unrealistische Anzahl. Ließen sich die Qubits erheblich verbessern, so der Forscher, reichten vielleicht ein paar tausend oder sogar einige hundert. Jens Eisert ist weniger pessimistisch. Seiner Ansicht nach könnten bereits heute etwa 800 physikalische Qubits genügen, aber selbst das sei eine erhebliche Zusatzlast.

Eine Alternative zur Korrektur von Fehlern ist, sie entweder zu vermeiden oder ihren Einfluss auszuschalten. Beispielsweise entwickeln Wissenschaftler von IBM Verfahren, um herauszufinden, wie viele Fehler wahrscheinlich bei einer Berechnung aufgetreten sind und wie sich das Ergebnis auf einen theoretischen Grenzfall ohne Rauschen extrapolieren lässt.

Einige Experten halten das Problem für unlösbar. Sie denken, dass Quantencomputer die hochgesteckten

Erwartungen enttäuschen werden und, solange sie Fehler machen, nie besser sein dürften als klassische Computer. Andere halten die Schwierigkeiten für überwindbar. Childs äußert sich vorsichtig optimistisch: »Ich bin sicher, dass wir verbesserte experimentelle Demonstrationen von Fehlerkorrekturen sehen werden. Aber es wird eine Weile dauern, bis sie in wirklichen Berechnungen Verwendung finden.«

Auf absehbare Zeit bleiben Quantencomputer anfällig für Fehler. Die Frage ist, wie man mit ihnen leben kann. Bei IBM sprechen die Forscher von »approximiertem Quantencomputing« für die nahe Zukunft. Es geht darum, Methoden zu finden, wie man mit dem Rauschen umgeht. Fehlertolerante Algorithmen sollen trotz der Störungen korrekte Ergebnisse liefern. »Eine hinreichend umfangreiche und genaue Berechnung mit einem Quantencomputer sollte auch dann Vorteile bieten, wenn sie nicht vollständig fehlertolerant ist«, meint dazu Jay Gambetta vom Thomas J. Watson Research Center von IBM.

Eine der ersten Anwendungen dürfte Simulationen im atomaren Bereich betreffen. Die Quantenmechanik bietet zwar eine theoretische Grundlage, um Eigenschaften eines Moleküls zu beschreiben, etwa seine Stabilität und sein chemisches Reaktionsvermögen. Doch die Gleichungen lassen sich klassisch nur mit radikalen Vereinfachungen lösen.

Im Gegensatz dazu liegt das Quantenverhalten von Elektronen und Atomen »relativ nah an der natürlichen Funktionsweise von Quantencomputern«, konstatiert Childs. Deshalb könne man ein exaktes Computermodell eines Moleküls erstellen. Aspuru-Guzik ergänzt: »Viele Forscher auf diesem Gebiet, darunter auch ich, zählen Quantenchemie und Materialwissenschaften zu den ersten möglichen Anwendungen solcher Geräte.« Aspuru-Guzik will das Forschungsgebiet verstärkt in diese Richtung lenken.

Bereits auf den derzeit verfügbaren, sehr kleinen Quantencomputern beweisen Quantensimulationen ihren Wert. Ein Forscherteam, an dem Aspuru-Guzik beteiligt ist, hat einen Variational Quantum Eigensolver genannten Algorithmus entwickelt (VQE, auf Deutsch etwa: Variationsmethode zur Berechnung von Eigenwerten mit Hilfe eines Quantencomputers), der effizient die niedrigsten Energiezustände von Molekülen finden kann – selbst mit verbrauchten Qubits. Bislang funktioniert er zwar nur bei sehr kleinen Molekülen mit wenigen Elektronen, die klassische Computer ebenfalls akkurat simulieren können. Aber die Leistungsfähigkeit der Quantencomputer wächst schnell. Das zeigten Gambetta und seine Mitarbeiter im September 2017, als sie mit einer Sechs-Qubit-Maschine von IBM die elektronischen Strukturen von Molekülen wie Lithiumhydrid und Berylliumhydrid berechneten. Diese Arbeit war »ein deutlicher Sprung vorwärts«, so der Physikochemiker Markus Reiher von der ETH Zürich. »Die Verwendung von VQE für Simulationen kleiner Moleküle ist ein großartiges Beispiel dafür, was auf mittelfristige Sicht mit heuristischen Algorithmen möglich ist«, betont auch Gambetta. Aspuru-Guzik gibt jedoch zu, dass selbst für diese Anwendung vermutlich Qubits mit Fehlerkorrektur nötig sind, um

klassische Rechner zu übertreffen. Reiher ergänzt: »Wenn wir mehr als 200 logische Qubits hätten, könnten wir in der Quantenchemie Dinge tun, die mit Standardmethoden nicht möglich sind. 5000 davon würden das Forschungsgebiet völlig transformieren.«

Trotz der Herausforderungen hat das schnelle Wachstum von 5 auf 50 Qubits innerhalb von kaum mehr als einem Jahr Hoffnungen geweckt. Aber wichtiger als die Frage, wie viele Qubits man hat, ist die, wie haltbar diese und wie effizient die verwendeten Algorithmen sind. Jede Berechnung muss vollständig abgeschlossen sein, bevor Dekohärenz alles zerstört. Die bisher erstellten Gruppen von Qubits haben typische Dekohärenzzeiten von einigen wenigen Mikrosekunden. Die Anzahl der logischen Operationen, die sich in diesem kurzen Augenblick durchführen lassen, hängt davon ab, wie schnell sich die Quantengatter schalten lassen. Wenn sie zu langsam sind, ist es unerheblich, wie viele Qubits man zur Verfügung hat.

Die Anzahl der elementaren Operationen, die für eine Berechnung nötig sind, wird als deren Tiefe bezeichnet. »Flache« Algorithmen mit geringer Tiefe lassen sich leichter durchführen als solche mit großer. Die entscheidende Frage ist, ob damit sinnvolle Dinge möglich sind. Nicht alle Arten von Qubits sind gleich stark verrauscht. Theoretisch sollte es etwa möglich sein, sehr robuste Qubits aus so genannten topologischen Zuständen bestimmter Materialien anzufertigen. Ihre spezielle elektronische Form dient als eine Art Schutz gegen zufällige Einflüsse. Insbesondere bei Microsoft, aber auch bei anderen Unternehmen suchen Forscher in exotischen Werkstoffen nach derlei stabilen Zuständen.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / DANIELA LEITNER

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter

[www.spektrum.de/t/quantenphysik](http://www.spektrum.de/t/quantenphysik)

Selbst wenn geeignete gefunden werden, ist offen, ob sie kontrollierbar sind. Forscher von IBM haben vorgeschlagen, die Rechenleistung von Quantencomputern mit einer als Quantenvolumen bezeichneten Zahl auszudrücken. Sie bündelt alle relevanten Einflussfaktoren: die Anzahl und Konnektivität der Qubits, die Tiefe des Algorithmus sowie das Rauschen und weitere Kennziffern der Gatterqualität. Laut Gambetta sind Hardware-Entwicklungsstrategien, die das verfügbare Quantenvolumen insgesamt vergrößern, am aussichtsreichsten.

Wegen solcher Zusammenhänge ist die viel gepriesene Quantenüberlegenheit eine recht unscharfe Angelegenheit. Ein 50-Qubit-Quantencomputer, der einen modernen Superrechner übertrifft – das klingt überwältigend. Doch

eine derartige Aussage lässt eine Menge Fragen offen. Bei welchem Problem schlägt er ihn? Woher wissen wir, ob die Lösung richtig ist, wenn wir sie nicht mit einer bewährten klassischen Methode überprüfen können? Und was macht uns so sicher, dass der herkömmliche Computer es nicht seinerseits besser könnte – mit dem richtigen Algorithmus?

Das Konzept der Quantenüberlegenheit ist darum mit Vorsicht zu genießen. Einige Forscher sprechen inzwischen lieber von »Quantenvorteil« und bezeichnen damit die Geschwindigkeitszunahme infolge von Quantenhardware, ohne eine endgültige Wertung abzugeben. Unabhängig von der Bezeichnung wäre der Beleg, dass Quantencomputer Aufgaben jenseits der Möglichkeiten der derzeitigen Computer bewältigen können, von großer psychologischer Bedeutung für das Forschungsgebiet. »Die Demonstration eines eindeutigen Quantenvorteils wäre ein wichtiger Meilenstein«, bekräftigt Eisert.

## Entwickler und Anwender müssen sich die Revolution gemeinsam erarbeiten

Das würde zunächst eher symbolisch zeigen: Quantencomputer könnten unsere technischen Optionen tatsächlich erweitern. Dennoch stünde ein Umsturz unserer praktisch nutzbaren IT-Infrastruktur wohl kaum unmittelbar bevor. IBM, Google und andere Unternehmen böten nicht plötzlich ihre neuen Superrechner zum Verkauf an. Vielmehr käme es zunächst zu einer engen und womöglich schwierigen Zusammenarbeit von Entwicklern und Anwendern. Letztere werden sich die notwendigen neuen Fertigkeiten nur aneignen, wenn sie ausreichend darauf vertrauen können, dass sich die Mühe auszahlt.

Um die Interessenten davon zu überzeugen, machen die Unternehmen ihre fertigen Maschinen möglichst zügig zugänglich. Neben dem 16-Qubit-Rechner IBM Q Experience, den jeder nach einer Onlineanmeldung nutzen kann, stellt IBM inzwischen seinen Geschäftskunden – darunter JP Morgan Chase, Daimler, Honda, Samsung und der University of Oxford – eine 20-Qubit-Version zur Verfügung.

Einerseits können Investoren so herausfinden, was ihnen die neuen Rechnertypen zu bieten haben. Andererseits hilft das dabei, eine wachsende Zahl von Programmierern auszubilden. Sie liefern mehr Ressourcen und Lösungsansätze, als es einzelne Unternehmen vermöchten. »Damit Quantencomputer zur Blüte gelangen, müssen wir der Welt ermöglichen, den Umgang mit ihnen zu lernen«, unterstreicht Gambetta. »Wissenschaft und Industrie sollten sich jetzt bereit machen.« ◀

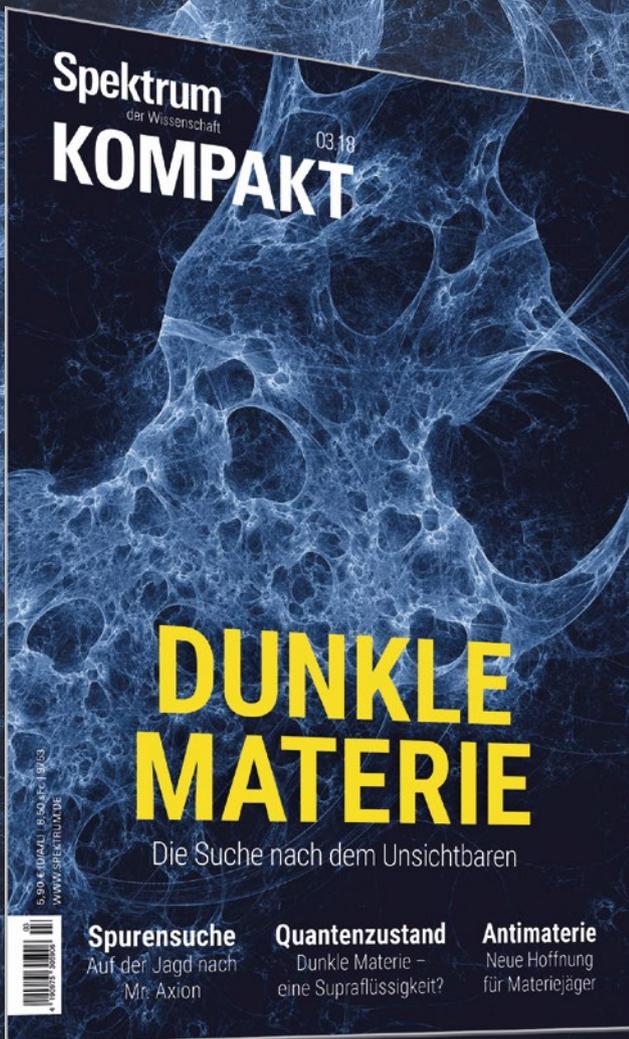
Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »The Era of Quantum Computing Is Here. Outlook: Cloudy« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.



Spektrum  
der Wissenschaft

# KOMPAKT

Jetzt bei Ihrem  
Zeitschriftenhändler!



Print | 5,90 €  
Download | 4,99 €

[www.spektrum.de/aktion/dunklematerie](http://www.spektrum.de/aktion/dunklematerie)



## BIOGEOCHEMIE LEBEN IM SCHATTENREICH

**Unter der Erde Mexikos verbirgt sich ein weit verzweigtes System an Höhlen, die bis zur Decke geflutet sind. Hier wachsen einzigartige mineralische Formationen, und trotz Finsternis existiert ein vielschichtiges Ökosystem. Darin scheinen Mikroorganismen eine Schlüsselrolle zu spielen.**

Die Karibikhalbinsel Yukatan beherbergt das vermutlich größte Netzwerk an Unterwasserhöhlen weltweit. Schätzungen zufolge erstreckt es sich insgesamt über 7000 Kilometer, wobei einzelne Höhlensysteme bis zu 250 Kilometer Länge erreichen. Entstanden sind sie durch die Korrosion von Kalkstein, das überwiegend Kalziumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) enthält und überall in der Region vorkommt. Im Boden verbindet sich Wasser mit  $\text{CO}_2$  zu Kohlensäure ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). Die wiederum reagiert mit dem Gestein zu wasserlöslichen Kalzium- ( $\text{Ca}^{2+}$ ) und Hydrogenkarbonationen ( $\text{HCO}_3^-$ ) und höhlt den Untergrund so allmählich aus. Man spricht hierbei von Kohlensäureverwitterung. Sie ist ein wichtiger Prozess bei der Bildung von Karstlandschaften, wie sie etwa auch im Mittelmeerraum zu finden sind.

Das poröse Karstgestein an der Ostküste Mexikos steht im ständigen Austausch mit dem Karibischen Meer, das Salzwasser in die Höhlen und deren Verbindungsarme

drückt. Zudem werden sie von Regenwasser gespeist, das entweder einsickert oder über so genannte Cenoten direkt einfließt. Cenoten sind rund 10 bis 100 Meter tiefe Einsturzlöcher im Kalkstein, die häufig mitten im Dschungel liegen und das unterirdische Höhlennetz mit der Oberfläche verbinden. Den Maya dienten sie einst als Frischwasserquelle sowie als rituelle Stätten, an denen sie durch tierische und menschliche Opfergaben versuchten, ihre Götter gnädig zu stimmen. Heute steigen Abenteuerlustige und Forscher hier freiwillig in die Unterwelt hinab.

Taucher haben bislang gut 1000 Kilometer des vielerorts schwer zugänglichen Systems erkundet. Man weiß jedoch erst wenig über die biologischen und chemischen Prozesse in diesem nahezu lichtlosen Lebensraum. So ist zum Beispiel unklar, was die Nahrungsgrundlage bildet für die überraschend vielfältige Gemeinschaft an Fischen, Garnelen und anderen Wirbellosen. Denn lediglich an den Eingängen der Cenoten wachsen Algen und Wasserpflanzen oder es fällt pflanzliches Material aus dem Urwald herab. Darüber hinaus sorgt die Schichtung von Süßwasser über dem dichteren Meerwasser in den Höhlen für ein starkes Konzentrationsgefälle an gelösten Ionen, organischem Kohlenstoff und Sauerstoff. Solche Gradienten findet man etwa auch in nährstoffreichen Seen, wenn sich im Sommer das Wasser an der Oberfläche aufheizt, oder an den Rändern sauerstoffarmer Zonen im Meer. Oft ist hier eine Vielzahl an Mikroorganismen aktiv, deren Stoffwechsel maßgeblich ist für die Funktion des gesamten Ökosystems.

**Forschungstaucher erkunden die Cenote »El Zapote« auf der mexikanischen Halbinsel Yukatan. Die Unterwasserhöhle beherbergt Kalkformationen, »Hells Bells« genannt. Sie entstehen, weil Bakterien die Chemie des Wassers verändern.**

Zwei aktuelle Studien bringen nun ein wenig Licht ins Dunkel: In den Höhlen gedeihen offenbar verschiedene Einzeller – Bakterien und Archaeen –, die eine breite Palette reduzierter Verbindungen zur Energiegewinnung nutzen. In bestimmten Wasserschichten erzeugen sie auf diese Weise ein chemisches Milieu, in dem glockenförmige Minerale über Jahrtausende zu beeindruckender Größe wachsen. Gleichzeitig bilden die mikroskopischen Lebewesen eine wichtige Futterquelle für jene, die weiter oben in der Nahrungskette stehen.

**Hard Rock(s) in der mexikanischen Unterwelt**

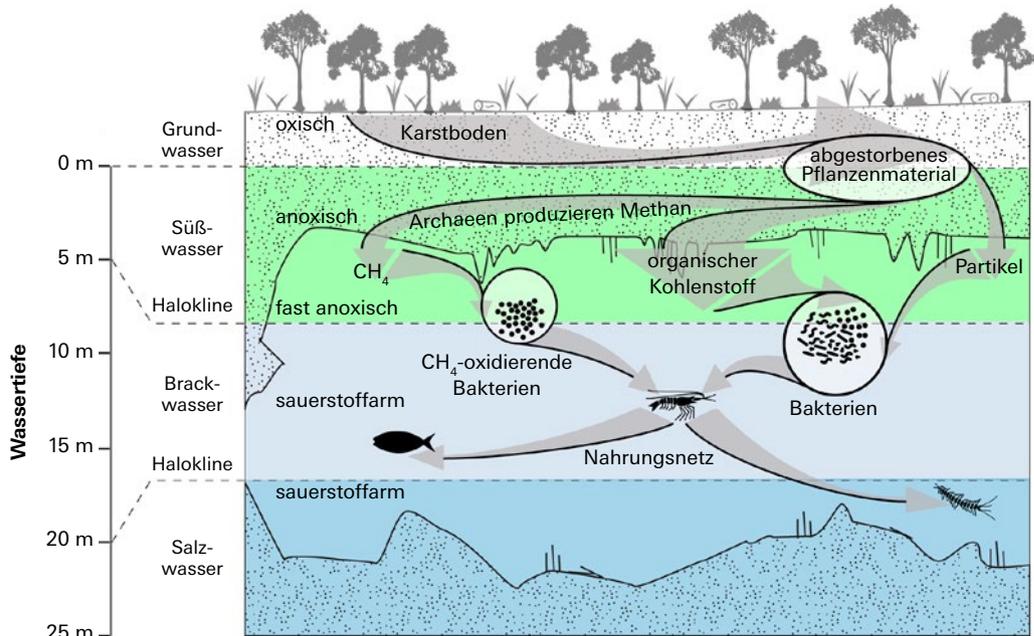
Ein Forscherteam um den Geologen Wolfgang Stinnesbeck von der Universität Heidelberg untersuchte südlich der Touristenhochburg Cancún die gut 60 Meter tiefe Cenote »El Zapote«. Das Loch im Waldboden ist zuerst ein schmaler, wassergefüllter Schacht, der sich ab 30 Meter Tiefe zu einem mehr als 100 Meter breiten Gewölbe ausdehnt. Lokalen Tauchern war seit Langem bekannt, dass hier mineralische Formationen von der Höhlendecke hängen, die Glocken ähneln. Die größten erreichen eine Länge von über zwei Metern und messen 80 Zentimeter im Durchmesser. In Anlehnung an den gleichnamigen Song der Rockband AC/DC taufte die Einheimischen sie »Hells Bells«. Die »Höllenglocken« bestehen aus Kalziumkarbonat und gehören zu den so genannten Speleothemen (Höhlenmineralen). Letztere umfassen auch Tropfsteine, die sich in luftgefüllten Höhlen durch das Ausfällen von

Kalziumkarbonat – der Rückreaktion der Kohlensäureverwitterung – bilden. Wie jedoch entstehen derartige Strukturen in einer überfluteten Umwelt?

Um das zu entschlüsseln, sammelten die Wissenschaftler Minerale und nahmen Wasserproben für geochemische sowie molekularbiologische Analysen. Die Speleothemen wachsen ausschließlich im oberen Bereich des Höhlengewölbes. Hier endet das sauerstoffhaltige (oxische) Süßwasser und eine nahezu sauerstofffreie (anoxische) Zone beginnt. Diese weist einen steilen Salzgradienten auf – die so genannt Halokline – und markiert den Übergang zum Salzwasser am Grund der Cenote. Stinnesbeck und seine Kollegen stellten fest, dass die Position der Grenzschicht für das Wachstum der Minerale entscheidend ist: Dort wo sich Süßwasser und Halokline treffen, florieren Bakterien, die durch ihren Stoffwechsel einen leicht alkalischen pH-Wert schaffen. Das Wasser der Cenote weist eine hohe Konzentration an Kalzium- und Karbonationen auf, die bei erhöhtem pH-Wert unlösliches  $\text{CaCO}_3$  bilden. Ober- und unterhalb der Grenzschicht ist das Wasser weniger alkalisch, was ein Ausfällen verhindert.

Die Forscher analysierten DNA- und RNA-Sequenzen von Bakterien, die auf den Speleothemen siedeln oder frei schwimmend leben. Diese legen nahe, dass vor allem zwei Typen von Mikroorganismen den pH-Anstieg verursachen: Nitrifizierer, die wie Pflanzen  $\text{CO}_2$  fixieren und Energie gewinnen, indem sie Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) zu Nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) und schließlich zu Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) oxidieren; und Denitrifizierer, die bei Sauerstoffmangel organischen Kohlenstoff zu  $\text{CO}_2$  veratmen, indem sie  $\text{NO}_3^-$  etwa zu  $\text{NO}_2^-$  oder  $\text{NH}_4^+$  reduzieren. Die Bakterien profitieren also vom Stoffwechsel des jeweils anderen. Als Biofilme auf den Höhlenmineralen fördern sie die Kristallisation von  $\text{CaCO}_3$  vermutlich noch auf andere Weise: Die schleimige Hülle der Zellverbände enthält negative geladene Moleküle, an die positive

**Unterirdisches Nahrungsnetz: Im porösen, wasserreichen Karstboden zersetzen Mikroorganismen Pflanzenreste. In der sauerstofffreien (anoxischen) Zone entsteht so Methan ( $\text{CH}_4$ ). Dieses und andere reduzierte Kohlenstoffverbindungen gelangen in die Höhlen und werden dort von Bakterien oxidiert. Garnelen fressen die Einzeller – und stehen ihrerseits auf dem Speiseplan von Fischen und anderen Tieren.**



BRANKOVITS, D. ET AL.: METHANE- AND DISSOLVED ORGANIC CARBON-FUELED MICROBIAL LOOP SUPPORTS A TROPICAL SUBTERRANEAN ESTUARINE ECOSYSTEM. IN: NATURE COMMUNICATIONS 8, ART. 185, 2017. FIG. 6 (WWW.NATURE.COM/ARTICLES/41867-017-0178-X) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/CC BY/4.0/LEGALCODE)

Kalziumionen andocken können. Auch Stromatolithen entstehen so.

Die mexikanischen Höllenglocken wachsen extrem langsam: Ein rund zehn Zentimeter langes Fragment war über einen Zeitraum von 4500 Jahren entstanden. Das ergaben Messungen von Radioisotopen. Im Schnitt hatte sich also pro Jahr lediglich eine etwa 20 Mikrometer dünne Schicht  $\text{CaCO}_3$  abgelagert. Allerdings schwankte das Wachstum in der Vergangenheit erheblich. In manchen Phasen betrug es kaum zehn Mikrometer jährlich, in anderen mehr als das Zehnfache. Ursache dafür waren wahrscheinlich Klimaveränderungen, so die Forscher: Gelangte weniger Regenwasser in die Cenoten oder verdunstete auf Grund höherer Temperaturen mehr davon, stieg die Halokline bisweilen um mehrere Meter. Umgekehrt sank sie, wenn es feuchter und kälter wurde. Dieses Auf und Ab der alkalischen Zone lässt sich an den mineralischen Formationen ablesen – und damit die Klimageschichte der Region.

Bakterien fungieren in den Höhlen nicht nur als Baumeister, sie nehmen auch eine wichtige Stellung im Nahrungsnetz ein. Das hat ein Team aus Geologen und Biologen um David Brankovits von der Texas A&M University herausgefunden. Sie nahmen das »Ox Bel Ha«-System unter die Lupe, dass unter einem Tropenwald verläuft.

Abseits der Cenoten enthalten die Höhlen kaum organische Partikel, was sie zu einem äußerst energiearmen Lebensraum macht. Die Hypothese der Forscher: Aus toter Pflanzenbiomasse entstehen im wasserreichen Karstboden Methan ( $\text{CH}_4$ ) und andere Kohlenstoffverbindungen, die in die Höhlen gelangen und dort das Wachstum von Bakterien antreiben. Von denen könnten sich dann höhere Organismen ernähren. Die Wissenschaftler entdeckten, dass die obere Süßwasserschicht praktisch

anoxisch ist, wo die Höhlendecke den Gasaustausch mit der Atmosphäre verhindert. Gleichzeitig konnten sie dort – wie vermutet – auffallend hohe Konzentrationen an Methan und gelöstem organischen Kohlenstoff messen. Ihren Ursprung konnten die Forscher aus dem Verhältnis der stabilen Kohlenstoffisotope  $^{13}\text{C}$  und  $^{12}\text{C}$  in den Molekülen ermitteln: Das Methan bilden Archaeen, die im Erdreich unter Ausschluss von Sauerstoff organisches Material abbauen, welches wiederum von abgestorbener Vegetation stammt.

In tieferen Zonen, wo das Wasser sauerstoffhaltiger ist, verstoffwechseln Mikroorganismen diese Verbindungen. Anhand von RNA-Sequenzen identifizieren Brankovits und seine Kollegen zahlreiche Bakterien, die Methan sowie andere reduzierte Moleküle oxidieren – und anschließend selbst zu Futter werden: Sie landen im Magen von Höhlengarnelen, die winzige Partikel aus dem Wasser filtrieren. Deren Nahrung besteht zu rund 20 Prozent aus  $\text{CH}_4$ -basierter Biomasse, wie die Analyse von Lipiden aus dem Gewebe der Krustentiere ergab. Die sind ihrerseits eine bevorzugte Beute von Fischen und anderen Tieren, so dass die Größten in diesem einzigartigen Ökosystem am Ende von den Kleinsten abhängen. ◀

**Tim Kalvelage** ist promovierter Meereswissenschaftler und Redakteur bei **Spektrum** der Wissenschaft.

## QUELLEN

**Brankovits, D. et al.:** Methane and Dissolved Organic Carbon-Fueled Microbial Loop Supports a Subtropical Subterranean Estuary Ecosystem. In: *Nature Communications* 8, 1835, 2017

**Stinnesbeck, W. et al.:** Hells Bells – Unique Speleothems from the Yucatán Peninsula, Mexico, Generated under Highly Specific Sub-aquatic Conditions. In: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 489, S. 209–229, 2018

## MOLEKULARBIOLOGIE FALSCHER PAARBILDUNG

**Beim Vervielfältigen des Erbguts entstehen manchmal spontane Mutationen. Das liegt unter anderem daran, dass die »Buchstaben« des DNA-Moleküls in verschiedenen Tautomerformen vorliegen und sich deshalb fehlerhaft paaren können.**

► Kleine Fehler können mitunter große Folgen haben. Besonders deutlich zeigt sich das bei Erbkrankheiten, die durch Veränderung eines einzigen Bausteins im Genom entstehen. Eine solche Punktmutation im Gen für eine Untereinheit von Hämoglobin sorgt dafür, dass die Aminosäure Glutaminsäure in der Beta-Globin-Proteinkette durch Valin ersetzt wird. Infolgedessen verformen sich die betroffenen Erythrozyten bei Sauerstoffmangel sichelförmig, verstopfen die feinen Blutgefäße und platzen. Klinisch äußert sich das in der Sichelzellanämie – einem Krankheitsbild, das schwerste Verläufe bis hin zum Tod nehmen

kann, sofern beide Genkopien betroffen sind. Punktmutationen treten unter anderem im Zuge von Kopierfehlern bei der Vermehrung des Erbguts auf.

Zellen vervielfältigen ihr Erbgutmolekül, indem sie es zunächst in zwei Einzelstränge auftrennen und dann den jeweils fehlenden Strang ergänzen. Dazu fügt eine molekulare Kopiermaschine – das Protein DNA-Polymerase – gegenüber jeder Nukleinbase das passende Gegenstück in den neu entstehenden Strang ein. Als Bausteine hierfür verwendet sie so genannte Nukleotide, Einheiten aus je einem phosphorylierten Zucker, der mit einer Nukleinbase

verbunden ist. Fügt die DNA-Polymerase irrtümlich ein falsches Nukleotid in den zu ergänzenden DNA-Strang ein, verändert sich dort die Basenabfolge und damit der genetische Code. In der nächsten Kopierunde wird der Fehler auf den wiederum neu entstehenden Strang übertragen und manifestiert sich dauerhaft im Genom. Derartige Mutationen können – wie bei der Sichelzellanämie – schwere Folgen haben, indem sie die Proteine, also die Genprodukte, an wichtigen Stellen verändern.

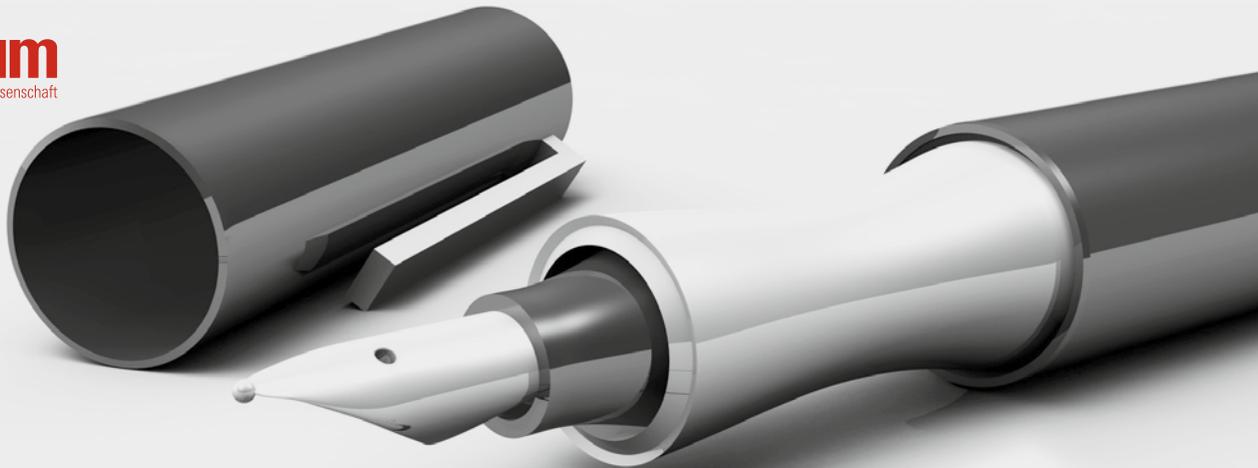
#### **Auch eine Polymerase macht Fehler**

Mutationen entstehen aus verschiedenen Ursachen heraus, etwa durch äußere Einflüsse wie ionisierende elektromagnetische Strahlung oder Krebs erregende Stoffe im Tabakrauch wie 1,3-Butadien. Beim Vervielfältigen des Erbguts kommt es aber auch zu spontanen Mutationen, bei denen Umwelteinflüsse keine Rolle spielen. Unter anderem arbeitet die DNA-Polymerase nicht völlig perfekt. Sie macht statistisch gesehen alle paar Millionen bis Milliarden geknüpfte Verbindungen einen Fehler, den ihre eingebaute Korrekturlesefunktion nicht verbessert. Schon Watson und Crick haben einen möglichen Grund dafür formuliert: Die Nukleinbasen liegen demnach als so genannte Tautomere vor, also als chemische Verbindungen mit gleicher Summenformel und Molekülmasse, aber voneinander abweichender Verknüpfung oder räumlicher

Anordnung der Atome. Die verschiedenen Tautomere einer Verbindung stehen miteinander im chemischen Gleichgewicht und können sich ineinander umwandeln. Bei den Tautomeren der Nukleinbasen ist eine Form jeweils deutlich häufiger als die andere(n), und genau diese ist in der Regel auch im Doppelstrang eingebaut. Die selteneren Formen besitzen zusätzliche Doppelbindungen im Ringmolekül und eine Enol- statt einer Ketogruppe (siehe Bild S. 32), weshalb sie andere Wasserstoffbrücken ausbilden. Aus diesem Grund verbinden sich die Enolformen im entstehenden Doppelstrang nicht mehr mit den Nukleinbasen, mit denen sie sich sonst immer paaren, sondern mit anderen – es kommt zu einer Fehlpaarung. Bleibt dabei die räumliche Struktur der DNA unverändert, kann sich der Austausch als dauerhafte Mutation manifestieren.

Auf Grund fehlender Nachweismethoden ließ sich dieser Mechanismus, den Watson und Crick vermutet hatten, lange Zeit nicht eindeutig belegen. Kürzlich jedoch gelang es einem Team um Hashim Al-Hashimi von der Duke University in North Carolina (USA), mit einer speziellen Form der Kernspinresonanz-(NMR-)Spektroskopie nachzuweisen, dass die Molekularbiologen richtig gelegen hatten. Mit der NMR-Spektroskopie lässt sich die Struktur und Dynamik von Molekülen aufklären. Das zu Grunde liegende Prinzip ist die magnetische Kernresonanz: eine Wechselwirkung zwischen dem magnetischen Moment

**Spektrum**  
der Wissenschaft



## **SCHREIBWERKSTATT**

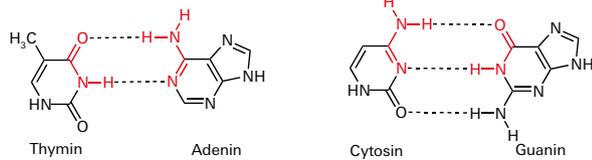
Möchten Sie mehr darüber erfahren, wie ein wissenschaftlicher Verlag arbeitet, und die Grundregeln fachjournalistischen Schreibens erlernen?

Dann profitieren Sie als Teilnehmer des Spektrum-Workshops »Wissenschaftsjournalismus« vom Praxiswissen unserer Redakteure.

Ort: Heidelberg  
Spektrum-Workshop »Wissenschaftsjournalismus«; Preis: € 139,- pro Person;  
Sonderpreis für Abonnenten: € 129,-

Telefon: 06221 9126-743 | [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)  
[spektrum.de/schreibwerkstatt](http://spektrum.de/schreibwerkstatt)

normale Basenpaare



**Normale Basenpaare im DNA-Molekül (links) und Fehlpaarungen mit seltenen Tautomerformen (rechts).**

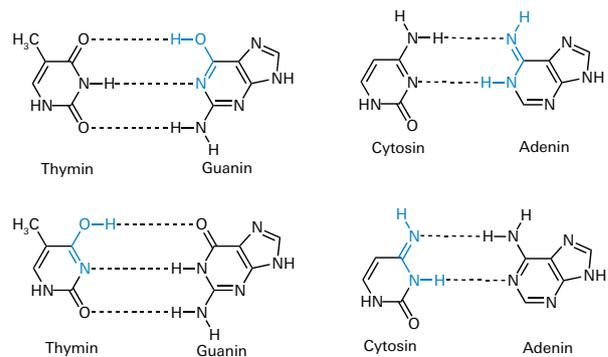
der Atomkerne in den untersuchten Molekülen, einem äußeren Magnetfeld und eingestrahlt elektromagnetischen Wellen. Die interessierende Materialprobe wird einem starken statischen Magnetfeld ausgesetzt, in dem die Moleküle bestimmte Orientierungen einnehmen. Nun strahlen die Mediziner elektromagnetische Wechselfelder ein, deren Energie die Atomkerne – je nach ihrer lokalen Umgebung – spezifisch absorbieren, wobei sie ihre Orientierung verändern. Dieser Effekt beziehungsweise seine Folgen werden mit Messgeräten registriert.

Die von Al-Hashimi und seinen Kollegen verwendete NMR-Spektroskopiemethode eignet sich besonders gut dazu, seltene und kurzlebige Zustände von chemischen Verbindungen zu erfassen. Dazu zählen energiereiche, angeregte Zwischenstadien, die meist rasch und durch Abgabe von Energie in den Grundzustand zurückfallen. Mit dem Verfahren gelang es den Forschern, die seltenen Basentautomere im aktiven Zentrum der DNA-Polymerase nachzuweisen, wo die Nukleotide verknüpft werden. Sie konnten die molekulare Kopiermaschine quasi in flagranti beim Knüpfen einer falschen Verbindung beobachten.

Die Nukleinbasenmoleküle sind Ringsysteme, die außer Kohlenstoff- auch Stickstoffatome enthalten. Zu den Basen zählen sie, weil sie an den Stickstoffatomen ein Wasserstoffion (Proton) aufnehmen können und somit den pH-Wert einer Lösung erhöhen. Die DNA enthält vier verschiedene Nukleinbasen; zwei davon sind Einring-, die anderen beiden Doppelringsysteme. Bei den ersten, den »Pyrimidinen«, handelt es sich um Cytosin (C) und Thymin (T). Die zweiten, Purine genannt, umfassen Guanin (G) und Adenin (A). Beim Vervielfältigen des Erbguts, wenn die Zelle neue DNA-Stränge erzeugt, ist der entstehende Strang immer komplementär zu seiner Vorlage, das heißt seine Nukleinbasen passen zu denen des alten Strangs. Es paaren dabei über Wasserstoffbrücken immer eine Purin- und eine Pyrimidinbase miteinander, das heißt jeweils Adenin und Thymin (über zwei Wasserstoffbrücken) sowie Guanin und Cytosin (über drei Wasserstoffbrücken).

Baut die Zellmaschinerie jedoch eine Nukleinbase in einer seltenen Tautomerform (mit Enolgruppe) ein, bindet diese nicht mehr an ihre eigentlich komplementäre Base. Die Enolform von Thymin beispielsweise kann mit Guanin drei Wasserstoffbrücken ausbilden. Ebenso paart sich die Enolform von Guanin mit Thymin. Basenfehlpaarungen kommen allgemein beim Kopieren des Erbmoleküls zwar durchaus häufig vor, verändern aber meist die räumliche

Fehlpaarungen mit seltenen Tautomeren



Struktur der DNA, weil die Basen auf Grund ihrer Molekülgestalt nicht gut zueinander passen. Die DNA-Polymerase erkennt in solchen Fällen, dass sie ein falsches Nukleotid »erwischt« hat, und baut es nicht in den Strang ein. Fehlpaarungen jedoch, an denen Tautomerformen beteiligt sind, verzerren die räumliche Struktur der DNA nicht und werden deshalb von der DNA-Polymerase nicht als inkorrekt erkannt. Infolgedessen fügt die Zellmaschinerie ein falsches Nukleotid in den neu entstehenden Strang ein und erzeugt einen Fehler in der Basenabfolge.

### In die fehlerhafte Tautomerform umgeklappt

Al-Hashimi und sein Team hatten bereits zuvor gezeigt, dass gelegentlich Paarungen zwischen einem Guanin und einem Thymin (statt G mit C) vorkommen und dabei in einem dynamischen Gleichgewicht mit einer tautomeren Fehlpaarung stehen. Da G-T-Paare die räumliche Struktur der DNA verzerren, werden sie von der DNA-Polymerase als falsch erkannt und eliminiert. Wenn jedoch eine der beiden Basen in ihre Enolform umklappt, kann ein fehlgepaartes Basenpaar entstehen, das die DNA-Geometrie nicht mehr verändert und daher erhalten bleibt.

Mit Strukturanalysen der Basenpaarungen im aktiven Zentrum der DNA-Polymerase, Messungen zur Enzymkinetik und Computermodellierungen haben die Forscher um Al-Hashimi abgeschätzt, dass sich unter physiologischen Bedingungen fast alle fehlerhaften G-T-Paare im Erbmolekül mit diesem Effekt erklären lassen. Damit haben sie nun nach 65 Jahren einen großen Teil der spontanen Mutationen empirisch aufgeklärt. Es fehlt noch der Nachweis, dass auch C-A-Fehlpaarungen auf den Tautomermechanismus zurückzuführen sind. ◀

**Larissa Tetsch** ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Maisach bei München.

### QUELLEN

**Goodman M. F.:** Smoking Gun for a Rare Mutation Mechanism. In: Nature 554, S. 180–181, 2018

**Kimsey, I. J. et al.:** Dynamic Basis for dG•dT Misincorporation via Tautomerization and Ionization. In: Nature 554, S. 195–201, 2018

**Watson J. D., Crick F. H.:** The Structure of DNA. In: Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology 18, S. 123–131, 1953

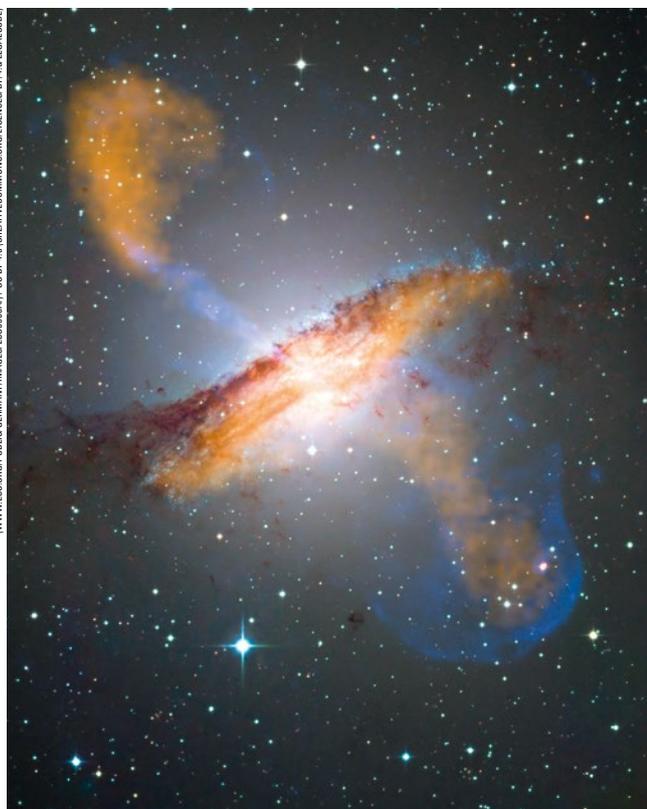
# KOSMOLOGIE STERNGRUPPEN AUF ABWEGEN

**Manche Satellitengalaxien halten sich nicht an die Regieanweisungen des Standardmodells der Kosmologie. Die neuen Beobachtungen schüren Zweifel am Konzept der Dunklen Materie.**

Es ist ein elegantes Modell unseres Universums – und ein mysteriöses: Dunkle Materie und Dunkle Energie machen rund 95 Prozent dieses Budgets aus, »normale« Atome und Elementarteilchen fristen nur ein Schattendasein. Während die Dunkle Energie den Kosmos immer schneller auseinandertreibt, sorgt die Dunkle Materie durch ihre Gravitationskraft dafür, dass sich Galaxien, Sterne und Planetensysteme überhaupt erst bilden konnten.  $\Lambda$ -CDM nennen die Kosmologen dieses Standardmodell.  $\Lambda$  steht für die Dunkle Energie, CDM bedeutet »cold dark matter«. Kalt heißt, dass diese Materieform aus schweren Teilchen aufgebaut sein soll, die eher den Atomkernen der normalen Materie ähneln, und nicht aus leichten, schnellen und damit »heißen« Elementarteilchen. Es erklärt, warum sich Galaxien und Galaxienhaufen so bewegen, wie Astronomen es beobachten. Wenn man auf seiner Grundlage die Entwicklung des Universums mit

**In der Mitte der Spiralgalaxie Centaurus A befindet sich ein Schwarzes Loch, das eng gebündelte Materiestrahlen (blau) aussendet, die nur durch Röntgenteleskope sichtbar werden. Die orange dargestellten Molekülwolken der Galaxie emittieren dagegen Licht im Submillimeterbereich.**

ESOWAR (PT)SCH; WPHRISSE (AP)XAVIERS ET AL. (S)UBMILLIMETER; MASACCC (CA)KRAFT ET AL. (R)ÖNTGEN  
WWW.ESONDIPUBLICHEMANTWANGES.ESONDIP. CC BY 4.0 (G)RANTEDCOMMONS (L)ICENSE BY 4.0 (G)AL.COM



Supercomputern simuliert, entsprechen die dabei errechneten Universen dem echten fast bis aufs Haar.

Allerdings hat das derart erfolgreiche kosmologische Standardmodell einige Schönheitsfehler: Weder gibt es für die Natur der Dunklen Energie eine auch nur halbwegs befriedigende physikalische Erklärung, noch konnten Experimentatoren bislang die von den theoretischen Physikern vorhergesagten Elementarteilchen nachweisen, aus denen die Dunkle Materie bestehen soll. Auch die Bewegung der Galaxien – historisch einer der ersten Kronzeugen für die Existenz der Dunklen Materie – scheint bei genauer Betrachtung nicht genau den Vorhersagen des  $\Lambda$ -CDM-Modells zu gehorchen. Hinweise darauf verdichteten sich seit Längerem; die neueste Untersuchung dazu legte am 1. Februar eine Forschergruppe um Oliver Müller von der Universität Basel vor. Ihre Veröffentlichung fordere die auf der kalten Dunklen Materie aufbauende Kosmologie heraus, behaupten die Autoren bereits in der Überschrift.

Konkret geht es um die Art und Weise, wie die vielen kleinen Satellitengalaxien um große, massereiche Galaxien kreisen. Die Milchstraße beispielsweise besitzt Dutzende solcher Miniaturgalaxien; ebenso ihr Nachbar, die zweieinhalb Millionen Lichtjahre entfernte Andromedagalaxie. Die Forscher um Müller untersuchten die etwa viermal so weit entfernte Galaxie Centaurus A im Sternbild des Zentaurus. Sie ist eine der größten Sternhaufen des »lokalen« Universums, das sich über einen Radius von knapp 33 Millionen Lichtjahren um uns herum erstreckt, und besitzt mindestens 16 Satellitengalaxien. Ganze 14 davon, entdeckten die Wissenschaftler, umkreisen Centaurus A in ein und derselben Ebene und sogar mit gleicher Umlauffrequenz; etwa so, wie die Planeten des Sonnensystems die Sonne umrunden. Nach dem Standardmodell sollten sie sich jedoch völlig regellos um das Schwerezentrum der Galaxie bewegen, ähnlich wie ein Bienenschwarm. Vergleichbare Ergebnisse hatte man schon zuvor bei der Andromedagalaxie und der Milchstraße gefunden.

## Supercomputer simulieren unser Universum

Das  $\Lambda$ -CDM-Modell sollte erklären, wie aus dem anfangs im frühen Universum fast gleichförmig verteilten Gas Galaxienhaufen, Galaxien und letztlich Sternsysteme wie das unsrige entstanden sind. Die beste Methode, um das zu überprüfen, sind Computersimulationen. Eines der detailliertesten dieser Modelluniversen entwickelte ein Team um Mark Vogelsberger vom Massachusetts Institute of Technology und Volker Springel vom Institut für Theoretische Studien in Heidelberg mit den Superrechnern »Curie« in Frankreich und »SuperMUC« in Garching bei München vor einigen Jahren. Es trägt den Namen Illustris (siehe **Spektrum** Januar 2015, S. 10) und enthält rund 40 000 simulierte Galaxien. Die Grundzutaten des Standardmodells berücksichtigend, reproduziert Illustris das echte Universum verblüffend gut – mit Ausnahme der Miniaturgalaxien: Gerade einmal 0,5 Prozent der damit simulierten

Galaxien zeigten eine Konfiguration ihrer Satellitengalaxien wie bei Centaurus A, erklären die Forscher um Müller. Eine zu Illustris konkurrierende Simulationsrechnung schneide mit 0,1 Prozent sogar noch schlechter ab. Ist das der Anfang vom Ende des kosmologischen Standardmodells und der Dunklen Materie?

»Man wird solch eine Seltenheit in sehr viel mehr Systemen finden müssen, um  $\Lambda$ -CDM in wirklich gravierende Schwierigkeiten zu bringen«, meint dazu Volker Springel. Denn Centaurus A sei eher ungewöhnlich: Vor kosmologisch kurzer Zeit erlebte sie einen so genannten Merger, verschluckte also eine zweite Galaxie. Ähnliches wird auch unserer Milchstraße zustoßen, wenn sie sich in etwa fünf Milliarden Jahren mit der Andromedagalaxie zu einem noch größeren Sternensystem vereint. »In einem solchen Fall kann man Reste von Drehbewegungen im Halo und dann auch in den Satellitensystemen durchaus erwarten.« Zudem könne man weder Centaurus A noch die Andromedagalaxie oder die Milchstraße und ihre jeweiligen Satelliten als wirklich isolierte Systeme betrachten, erklärt Michael Boylan-Kolchin von der University of Texas in einem Begleitartikel zur Arbeit von Müller und dessen Kollegen. Selbst Materie in der weiteren Umgebung von 100 Millionen Lichtjahren und mehr wirke sich auf ihre Dynamik aus: »Die (Rotations-)Ebenen von Andromeda und Centaurus A scheinen eine gemeinsame kosmische Ausrichtung zu haben, was Grund zu der Annahme liefert, dass großräumige Strukturen (zwischen diesen Galaxien) die Ursache für die beobachtete Bewegungsebene der Satelliten sind.« Systemspezifische Effekte wie diese

würden von den Simulationen üblicherweise nicht abgebildet: Eventuell zeigt die Beobachtung von Müller und seinem Team also nur, dass Illustris und andere Simulationen ihre Grenzen haben – eine keineswegs überraschende Erkenntnis.

Aus Sicht von Springel haben die Forscher um Müller zwar eine »interessante Eigentümlichkeit« in Centaurus A gefunden. »Ob diese statistisch mit  $\Lambda$ -CDM wirklich unverträglich ist, wird man jedoch noch intensiver studieren müssen.« Boylan-Kolchin sieht das ähnlich: »Die Verteilung der Satelliten um nahe Galaxien erreicht bislang nicht das Niveau einer Krise für  $\Lambda$ -CDM.« Aber sie ist ein weiteres Puzzlestück, das die Kosmologen in ein vollständiges Bild des Universums einfügen müssen. Und die anderen Bausteine des Standardmodells gibt es weiterhin – für Theoretiker, Experimentalphysiker und Astronomen bleibt genug zu tun. Ingeheim hoffen einige vielleicht darauf, dass der Fund von Müller und seinem Team ein ernsthaftes Problem offengelegt hat: Liegen die Theoretiker mit dem Standardmodell falsch, dann erklären womöglich alternative Ansätze, wo und was die Dunkle Materie ist. Und falls nicht, lernen sie vielleicht immerhin die Galaxienentwicklung und ihre Simulationsrechnungen besser verstehen. ◀

**Jan Hattenbach** ist Astronom und Wissenschaftsjournalist auf La Palma.

## QUELLEN

**Müller, O. et al.:** A Whirling Plane of Satellite Galaxies around Centaurus A Challenges Cold Dark Matter Cosmology. In: Science 6375, S. 534–537, 2018

## MATHEMATIK ABELPREIS FÜR ROBERT LANGLANDS

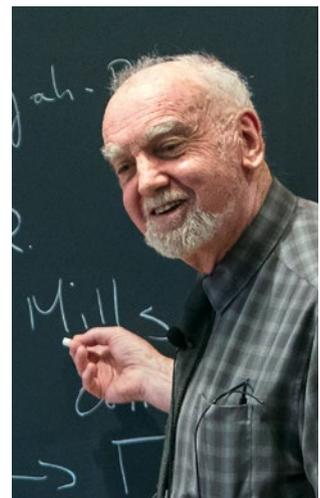
**Die Norwegische Akademie der Wissenschaften vergibt die nobelpreisähnliche Auszeichnung an den kanadischen Mathematiker »für sein visionäres Programm, das die Zahlentheorie mit der Darstellungstheorie verbindet«.**

Die Geschichte beginnt mit einem Smalltalk aus Langeweile. Im Januar 1967 steht man auf dem Flur des ehrwürdigen Institute for Advanced Study in Princeton (New Jersey) herum und wartet auf einen Vortrag des berühmten Shiing-Shen Chern. Der nicht minder berühmte André Weil gerät mit einem mathematischen Jungspund ins Gespräch, der die Gelegenheit wahrnimmt und dem großen Meister von den vagen Ideen erzählt, die ihm im Kopf herumspuken. Weil bemerkt alsbald, dass ernsthaftes Zuhören in Arbeit ausarten würde, und wimelt seinen Gesprächspartner mit dem klassischen Spruch ab: »Schreiben Sie das doch mal auf, dann will ich mir das wohl anschauen.«

Wenig später schickt der Junior Weil eine 17-seitige handgeschriebene Arbeit. Im Anschreiben gesteht er in aller Offenheit: »Hinterher wurde mir klar, dass in diesem

**Robert Phelan Langlands**, geboren am 6. Oktober 1936 in New Westminster, einem Vorort von Vancouver (Kanada), promovierte 1959 an der Yale University über ein Thema aus der Gruppentheorie. Ein Jahr später wurde er

Dozent an der Princeton University. Nach mehreren Stationen, darunter ein Jahr in Ankara, kehrte er 1972 nach Princeton zurück, diesmal an das benachbarte Institute for Advanced Study. Dort ist er bis heute aktiv, mittlerweile als 81-jähriger Emeritus, in Einsteins ehemaligem Büro. Zu seinen Doktoranden zählt Thomas Hales, der 1998 die 400 Jahre alte Kepler-Vermutung bewies.



DAN KOMODAK/INSTITUTE FOR ADVANCED STUDY; MIT. FOTO: GEN. VON KELLY D. THOMAS, IAS

Text kaum eine Aussage steht, deren ich mir sicher sein kann. Wenn Sie bereit sind, ihn als pure Spekulation zu lesen, wäre ich Ihnen dankbar; wenn nicht – ich bin sicher, Sie haben einen Papierkorb zur Hand.«

André Weil beantwortet den Brief nicht. Aber er wirft ihn auch nicht weg, sondern lässt ihn abtippen und verteilt Kopien unter den Kollegen. Bald wird klar, dass die dreiste Spekulation nichts weniger ist als ein überaus kühnes Forschungsprogramm mit dem Ziel, eine Verbindung zwischen zwei weit voneinander entfernten Gebieten der Mathematik herzustellen. Die in jenem Brief formulierte Vermutung wird in Fachkreisen unter dem Namen ihres Autors bekannt: »Langlands conjecture«.

Das eine der beiden Gebiete lässt sich noch relativ klar benennen: Zahlentheorie. Es geht zum Beispiel um die Frage, welche Primzahlen sich als Summe zweier Quadrate ausdrücken lassen – damit hatte Carl Friedrich Gauß, der »Fürst der Mathematiker«, die Zahlentheorie in ihrer modernen Form begründet. Oder um die Lösung diophantischer Gleichungen; das sind solche, in denen die Unbekannten nur miteinander und mit ganzen Zahlen multipliziert und diese Ausdrücke dann addiert werden dürfen. Prominente Beispiele sind

- ▶ die quadratische Gleichung  $x^2+1=0$ , die keine reelle Lösung hat, was den Anlass zur Einführung der imaginären Einheit  $i$  und damit der komplexen Zahlen gibt;
- ▶ Gleichungen fünfter Ordnung wie  $x^5+x+1=0$ , für die der Preisnamensgeber Niels Henrik Abel mit gruppentheoretischen Mitteln bewies, dass ihre Lösung nicht mit Hilfe von Wurzelausdrücken darstellbar ist;
- ▶ die Gleichung  $x^n+y^n=z^n$ , die bekanntlich für Exponenten  $n>2$  keine nichttriviale Lösung hat, was Pierre de Fermat um 1644 bewiesen zu haben glaubte und erst 350 Jahre später Andrew Wiles wirklich bewies.

Das andere Gebiet ist nicht so einfach umschreibbar. Es geht um Funktionen, die auf den komplexen Zahlen definiert sind und spezielle Symmetriebedingungen erfüllen (»automorphe Funktionen«), oder auch um Darstellungen von Lie-Gruppen; das ist eine Möglichkeit, derartige Symmetriebedingungen in den Griff zu bekommen.

Da beide Gebiete so groß und vielgestaltig sind, nehmen Brücken zwischen ihnen die verschiedensten Formen an. Da kommt es vor, dass die Mathematiker auf beiden Ufern auf dieselben natürlichen Zahlen stoßen, was ihnen so abwegig vorkommt, dass sie – mit der englischen Metapher für etwas ganz Verrücktes – von der »moonshine conjecture« sprechen (**Spektrum** Mai 2018, S. 70). Andrew Wiles konstruierte zu einer hypothetischen Lösung der Fermat-Gleichung  $x^n+y^n=z^n$  eine Kurve mit sehr speziellen Eigenschaften, so speziell, dass sie gar nicht existieren konnte, wie mit Techniken vom »anderen Ufer« beweisbar war; also kann es auch keine Lösung der Fermat-Gleichung geben (**Spektrum** Januar 1998, S. 96).

Das Forschungsprogramm, das Langlands skizziert hatte, läuft auf eine Art allgemeine Bauanleitung für verschiedenste Brücken hinaus. In den letzten 50 Jahren hat es hunderten erstrangiger Mathematiker, darunter mehre-

re Fields-Medaillen-Preisträger und Langlands selbst, reichlich Beschäftigung verschafft. Manche von ihnen gehen so weit, das Langlands-Programm als die »große vereinheitlichte Theorie der Mathematik« zu preisen.

Wegen dieser Allgemeinheit ist es aber so abstrakt, dass schon die Formulierung der notwendigen Begriffe einen erheblichen Aufwand erfordert. Hier folgt eine Schmalspurversion einer Brücke, die Edward Frenkel, einer der bedeutenderen Beteiligten am Langlands-Programm, in seinem Buch »Liebe und Mathematik« beschrieben hat.

Der Brückenbau beginnt am Ufer der Zahlentheorie. Eine diophantische Gleichung ist zunächst eine Aussage über natürliche – vielleicht auch rationale oder reelle – Zahlen. Man hat jedoch die Freiheit, sie umzuinterpretieren. An Stelle der Zahlen betrachtet man deren Reste bei der Division durch eine Primzahl  $p$ ; das sind natürliche Zahlen zwischen 0 und  $p-1$ . Beim Rechnen mit diesen Resten muss man bei Bedarf zum Ergebnis ein Vielfaches von  $p$  addieren oder davon subtrahieren, so dass wieder eine Zahl zwischen 0 und  $p-1$  herauskommt: Man rechnet »modulo  $p$ «. Mit den so definierten Grundrechenarten bilden diese Zahlen einen so genannten Körper, der als  $\mathbb{F}_p$  bezeichnet wird (siehe die »Mathematischen Unterhaltungen« auf S. 72 in diesem Heft).

### Von den Primzahlen und den endlichen Körpern bis zur harmonischen Analyse und zur Stringtheorie

Hat eine diophantische Gleichung eine Lösung in den natürlichen Zahlen, dann hat sie auch eine in jedem Körper  $\mathbb{F}_p$ ; man kann einfach auf beiden Seiten der Gleichung den Rest bei der Division durch  $p$  nehmen. Umgekehrt gilt das nicht. So ist die Fermat-Gleichung modulo jeder Primzahl lösbar, was an ihrer Unlösbarkeit in den natürlichen Zahlen nichts ändert. In der Tendenz gibt es also in den endlichen Körpern  $\mathbb{F}_p$  mehr Lösungen als im »Original«.

Bemerkenswerterweise gibt die Anzahl der Lösungen in den  $\mathbb{F}_p$  eine gewisse Auskunft über die Eigenschaften der Gleichung. Man nimmt diese unendlich vielen Anzahlen – für jede Primzahl  $p$  eine –, berechnet aus jeder Anzahl eine Zahl  $a_p$  und bildet dann eine unendliche Summe (eine »Potenzreihe«) der Form  $f(z)=a_2z^2+a_3z^3+a_5z^5+a_7z^7 \dots$ . Das ist eine Funktion der neu eingeführten Variablen  $z$ , die als komplexe Zahl aufzufassen ist. Für Potenzreihen mit komplexen Variablen gibt es einen gut ausgebauten theoretischen Apparat, die komplexe Analysis. Insbesondere ist man in der Lage, Aussagen über die Symmetrien einer solchen Funktion zu treffen, ob also stets  $f(z)=f(g(z))$  ist, wenn  $g$  eine Symmetrietransformation der komplexen Zahlen ist. Und damit ist man am anderen Ufer angelangt: Die Untersuchung von Funktionen mit derartigen Symmetrien heißt harmonische Analyse.

Edward Frenkel hat, gemeinsam mit etlichen anderen, das ohnehin sehr umfangreiche Langlands-Programm noch bereichert. Mittlerweile gibt es Brücken zu einem dritten Ufer: der Stringtheorie aus der theoretischen Physik. ◀

**Christoph Pöppe** ist Redakteur bei **Spektrum** der Wissenschaft.

## Forschung braucht Öffentlichkeit



Auf dem Videoportal von **Spektrum der Wissenschaft** erreichen Forschungseinrichtungen und Hochschulen, Stiftungen und Unternehmen ein breites und interessiertes Publikum. Spektrum.de spricht 1,62 Millionen Nutzer pro Monat an, immer mehr von ihnen suchen gezielt nach Videos. 42 Prozent der Seitenabrufe erfolgen über mobile Endgeräte (AGOF daily digital facts 2017-09).

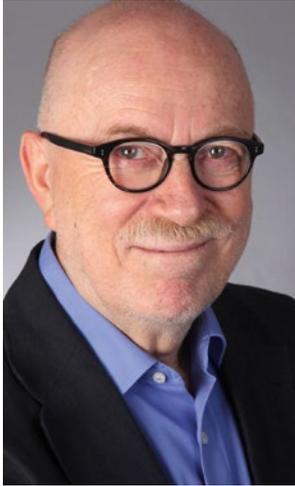
Auf **SciViews** finden Sie Videokanäle von:

Alexander von Humboldt Stiftung  
dasgehirn.info

Deutscher Zukunftspreis  
Exzellenzcluster CellNetworks  
Exzellenzcluster PRISMA  
Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie

Institut für Didaktik der Physik, Universität Münster  
Lindauer Nobelpreisträgertagungen  
Max-Planck-Institut für Festkörperforschung  
Nature  
Universität Innsbruck  
und anderen

**SciViews** Hohe Sichtbarkeit für Wissenschaftsvideos in einem exzellenten Umfeld  
auf **Spektrum.de/SciViews**



# SPRINGER'S EINWÜRFE WETTRÜSTEN IM CYBERRAUM

**Dem Internet, notorisch anfällig für Datenspione und Manipulation, drohen bald digitale Kriege durch künstliche Intelligenz.**

**Michael Springer** ist Schriftsteller und Wissenschaftspublizist. Eine Sammlung seiner Einwürfe ist unter dem Titel »Unendliche Neugier. Was die Wissenschaft treibt« erschienen.

» [spektrum.de/artikel/1561166](https://spektrum.de/artikel/1561166)

**A**llein in den USA war das Internet 2017 laut FBI rund 4000-mal pro Tag Schauplatz von so genannten Ransomware-Angriffen; die Erpressungssoftware verschlüsselt alle Daten des Attackierten und verlangt für die Wiederherstellung Geld. Doch das ist nur die Spitze eines wachsenden Eisbergs. Der weltweite Schaden durch Cyberattacken aller Art, für 2017 auf fünf Milliarden Dollar geschätzt, könnte bis 2021 auf sechs Billionen Dollar anwachsen.

Längst ist im Internet ein Wettrüsten zwischen Angriffs- und Verteidigungsmaßnahmen ausgebrochen, an dem sich ganze Staaten beteiligen. Dabei kommt zunehmend auch künstliche Intelligenz (KI) zum Einsatz. Vor den schwer beherrschbaren Folgen künftiger autonomer Cyberkriegssysteme warnen nun die Informatikerin Mariarosaria Taddeo und der Philosoph Luciano Floridi vom Digital Ethics Lab der University of Oxford (*Nature* 556, S. 296 – 298, 2018).

## Autonom lernfähige Systeme gehen aufeinander los

Maschinelles Lernen beschleunigt schon heute das Schreiben von Computercodes und das Aufspüren von Programmierfehlern. Die gleiche KI-Software vermag aber auch abnorme Vorgänge in einem Datenetz zu erkennen und selbstständig abzuwehren.

Würden autonom agierende KI-Systeme also geradezu politisch entspannend wirken, indem sie Cyberattacken ohne großes Aufsehen unter der Hand abwehren? Doch je perfekter die Verteidigung, desto raffinierter die Angriffe – also lassen im Cyberkampf bald beide Seiten autonom lernfähige Systeme aufeinander los. Und am Ende dieser Eskalation steht das Risiko eines mit echten Waffen ausgetragenen Kriegs.

Darum fordern die beiden digitalen Ethiker aus Oxford dringend internationale Abmachungen, die das staatliche Handeln im Cyberraum regeln, rote Linien definieren und im Übertretungsfall Sanktionen androhen. Das dafür geeignete Gremium sind die Vereinten Nationen, wo tatsächlich seit 2004, allerdings bisher ohne Einigung, über freiwillige digitale Benimmregeln verhandelt wird.

**D**ie Zeit drängt: Die USA, führend in der Cyberabwehr, haben begonnen, mit militärischen KI-Systemen zu experimentieren und lassen sie bereits in virtuellen Manövern gegeneinander antreten. China strebt in der künstlichen Intelligenz eine internationale Führungsrolle an, die gewiss auch eine militärische Seite hat. Wie weit beispielsweise Russland und Nordkorea bei künftigen Hackerangriffen maschinelles Lernen einsetzen können, ist nicht genau bekannt.

Die von Taddeo und Floridi zur Eindämmung des Wettrüstens vorgeschlagenen Maßnahmen – regionale und internationale Initiativen mit dem Ziel einer UNO-Vereinbarung – gemahnen an die jahrzehntelangen Abrüstungsverhandlungen über Nuklearwaffen. Allerdings gibt es einen wichtigen Unterschied: Atom- und Wasserstoffbomben waren von vornherein nichts als Kriegswaffen; selbst wenn US-Physiker Edward Teller damit einst einen zweiten Panamakanal sprengen und Berge versetzen wollte, blieb er mit dieser Idee ziemlich allein.

Hingegen verspricht das maschinelle Lernen autonomer KI-Systeme unser gesamtes Leben derart umzuwälzen, dass deren militärische Nutzung – ob für »intelligente Waffen« oder den globalen Cyberkrieg – als Nebenaspekt in Vergessenheit zu geraten droht. Einer künftigen Friedensbewegung mit dem Ziel digitaler Abrüstung stünden deshalb schwere Zeiten bevor. Aber sie hätte gute Argumente.



# EVOLUTION WIE DIE SCHLANGEN DAS GLEITEN LERNTEN

Lange war unbekannt, wie sich die Schlangen in der Evolution herausbildeten. Neue Analysen von Fossilien sowie genetische Erkenntnisse erhellen jetzt, warum die Tiere ihre Beine verloren und zusätzliche Wirbel gewonnen haben.



**Hongyu Yi** ist Evolutionsbiologin und Professorin am Institut für Wirbeltierpaläontologie und Paläoanthropologie der Chinesischen Akademie der Wissenschaften in Peking. Als Expertin für Sinnesorgane von Reptilien erforscht sie, wie sich die Tiere im Lauf der Evolution an ihre Umwelt angepasst haben.

» [spektrum.de/artikel/1561164](https://spektrum.de/artikel/1561164)

Ein lang gestreckter dünner Körper ganz ohne Beine – Schlangen wie die in Nordamerika heimische Indigonatter *Drymarchon melanurus erebennus* sind hervorragend an das Gleiten auf dem Untergrund angepasst.



## AUF EINEN BLICK DER URSPRUNG DER SCHLANGEN

- 1** Der Bauplan der Schlangen mit ihrem langen beinlosen Körper weicht radikal von dem anderer Wirbeltiere ab. Ihre echsenartigen Vorfahren besaßen noch gut ausgebildete Extremitäten.
- 2** Hochauflösende Röntgenbilder von Schlangenfossilien deuten darauf hin, dass der Verzicht auf Vorder- und Hinterbeine aus einer Anpassung an eine im Erdboden grabende Lebensweise resultierte.
- 3** Inzwischen kennen Forscher auch genetische Mechanismen, auf denen der Beinverlust sowie die Entwicklung einer langen Wirbelsäule mit zahlreichen Wirbeln und Rippen beruht.

Was läuft ohne Beine, schwimmt ohne Flossen und fliegt ohne Flügel? Die Antwort auf dieses chinesische Rätsel lautet: Schlangen. Alle heute bekannten über 3000 Arten dieser Reptilien haben einen langen, beinlosen Körper, mit dem sie zu Lande, zu Wasser und sogar im Luftraum zwischen den Bäumen manövrieren. Ihre Vorfahren besaßen dagegen noch Gliedmaßen. Wie haben die Schlangen ihre Beine verloren?

Speziell ausgebildete Körperanhänge entstehen oft in bestimmten Lebensräumen: Wale entwickelten Flossen als Anpassungen an ihre Umwelt im Wasser, Vögel bekamen Flügel, als sie zum Leben in der Luft übergingen. Aber seit Jahrzehnten zerbrechen sich Evolutionsbiologen darüber den Kopf, welche Umweltbedingungen dazu beitrugen, den unverwechselbaren Körperbauplan von Schlangen zu formen. Die Frage ist auch deswegen so schwierig zu beantworten, weil Schlangen heute weit verbreitet, fossile Überreste aus ihrer frühen Evolution aber nur spärlich erhalten sind.

Die Debatte konzentriert sich auf zwei konkurrierende Hypothesen: Nach der einen verloren Schlangen ihre Beine an Land, als sie sich an unterirdische Habitate anpassten; die andere besagt, dass Schlangen ihre typischen Eigenschaften im Meer entwickelten. In beiden Szenarien tendieren Körper dazu, eine stromlinienförmige Gestalt anzunehmen.

Könnten wir rund 100 Millionen Jahre zurück in die Kreidezeit reisen, dann ließen sich die ursprünglichen Schlangen in ihren tatsächlichen damaligen Lebensräumen beobachten. Doch wir kennen nur ihre versteinerten Überreste. Und es erweist sich als ausgesprochen schwierig, allein aus Knochen, die – wie bei Fossilien häufig – beschädigt oder nur fragmentarisch erhalten sind, die Umweltbedingungen und das Verhalten eines Tiers zu rekonstruieren.

### Das Puzzle der Schlangenevolution

Mit verbesserten bildgebenden Verfahren konnten Forscher jedoch im vergangenen Jahrzehnt viele bisherige Schwierigkeiten beim Studium der Schlangenevolution bewältigen: Hochenergetische Röntgenaufnahmen fossiler Schädel offenbarten verborgene Merkmale, die auf die Lebensweise ursprünglicher Schlangen hinweisen. Entwicklungsbiologische Untersuchungen deckten außerdem genetische Mechanismen auf, die hinter dem Gliedmaßenverlust sowie dem Gewinn zusätzlicher Wirbel steckten. Auch wenn unser Wissen noch sehr unvollständig ist, können wir nun endlich die verstreuten Mosaiksteine der außergewöhnlichen Verwandlung der Schlangen zusammenfügen.

Die Schlangen büßten ihre Beine natürlich nicht von heute auf morgen ein. Wie wir von Fossilien wissen, tauchte als eine der ersten beinlosen Arten *Dinilysia patagonica* in der späten Kreidezeit vor etwa 85 Millionen Jahren auf, als noch die Dinosaurier herrschten. Bemerkenswert gut erhaltene Überreste dieser Spezies konnten Forscher aus den rostfarbenen Sandsteinen der patagonischen Hochebene bergen. Dem fast vollständigen Skelett des Tiers, das knapp zwei Meter lang war, fehlten nicht



Das nur wenige Zentimeter lange, 92 Millionen Jahre alte Schlangenfossil *Najash rionegrina* weist winzige Hinterbeine auf.

nur die Beine, sondern auch der Schulter- und der Beckengürtel. Weil das Fossil in terrestrischen Sedimentablagerungen gefunden wurde, muss es an Land existiert haben.

Andere Schlangen aus dieser Zeit hatten dagegen noch ihre Beine behalten: *Najash rionegrina*, ein landlebendes Reptil, das vor 92 Millionen Jahre im heutigen Argentinien vorkam und nur so lang wie ein Spaghetto war, besaß ein Paar winziger Hinterbeine mit Knochen von der Hüfte bis zum Fußgelenk (siehe Bild oben). Diese Gliedmaßen waren jedoch viel zu fragil, um das Gewicht des Tiers tragen zu können. Vermutlich dienten sie eher als Klammerorgane bei der Paarung.

Weitere beintragende Schlangen der Oberkreide lebten im Meer. Marine Ablagerungen nahe dem heutigen Jerusalem bargen Fossilien von Seeschlangen, die zusammen mit Haien schwammen. Zwei solcher Kreaturen, *Pachyrhachis* und *Haasiophis*, wiesen fast vollständige Hinterbeine mitsamt Oberschenkel-, Schienbein- und Fußknochen auf. Die Funktion dieser Beine bleibt unklar, denn sowohl *Pachyrhachis* als auch *Haasiophis* fehlte ein Beckengürtel, der das Bein mit dem Rumpf verbindet. Zum Schwimmen dürften die Gliedmaßen also kaum getaucht haben.

Alles in allem deuten diese Fossilien darauf hin, dass die Evolution der Schlangen in der späten Kreidezeit schon weit fortgeschritten war. Der lange, sich schlängelnde Körper mit stark reduzierten Extremitäten hatte sich damals bereits entwickelt, und es entstand eine Vielzahl an Formen, die zahlreiche ökologische Nischen besetzen konnten. Um den Ursprung des charakteristischen Körperbaus der Schlange zu erforschen, braucht man also noch ältere Fossilien.

Bis vor Kurzem kannten wir nur wenige Schlangenfossilien aus der Zeit vor der Oberkreide. Doch in den vergangenen fünf Jahren tauchten mehrere neue Kandidaten aus der Unterkreide sowie dem noch früheren Jura auf. Diese

Fossilien aus terrestrischen Lagerstätten in Europa und den USA sind aber ziemlich bruchstückhaft und verraten nicht viel über die Körperproportionen. Falls es sich bei ihnen tatsächlich um Schlangen handelte, dann erweiterten diese Exemplare die Fossilien Geschichte der Tiergruppe um weitere 70 Millionen Jahre in die Vergangenheit. Demnach wären die ältesten bekannten Vertreter klein gewesen und hätten nicht im Meer, sondern an Land gelebt.

### Spurensuche im Ohr

Die wachsende Zahl an Fossilien, die auf eine terrestrische Herkunft der Schlangen hinweist, erklärt aber noch nicht, warum die Reptilien überhaupt einen stromlinienförmigen Körper entwickelten. Eine Gliedmaßenreduktion dürfte allerdings für eine unterirdische Lebensweise förderlich gewesen sein. So schieben heutige grabende Schlangen und Echsen einfach ihren Kopf durch die weiche Erde, um Tunnel zu bauen – Beine würden dabei nur stören. Ob eine ausgestorbene Schlange ebenfalls gegraben hat, lässt sich jedoch schwer beurteilen. Die Fossilien aus Jura und Unterkreide sind zu lückenhaft, um ihr Verhalten auch nur ansatzweise erraten zu können. *Najash* mit ihrem kurzen Schwanz könnte ein Gräber gewesen sein. *Dinilyisia*, die früheste bekannte Schlange ganz ohne Beine, war dagegen wesentlich größer als heutige grabende Reptilien. Hat sie dennoch unterirdisch gelebt? Das wollte ich herausfinden.

Am ersten Weihnachtstag 2014 flog ich mit *Dinilyisia*-Schädeln in einem Schuhkarton von Buenos Aires nach New York. Fast ein Jahr hatten meine argentinischen Kollegen und ich für den ganzen Papierkram gebraucht,

um die Fossilien für die Computertomografie ausleihen zu dürfen – alles nur, weil wir den Tieren ins Ohr schauen wollten. Warum gerade das Ohr? Zusammen mit dem Paläontologen Mark Norell vom American Museum of Natural History in New York hatte ich eine Methode entwickelt, mit der sich anhand dieser anatomischen Region grabende Schlangen von im Meer lebenden Arten unterscheiden lassen. Und genau das versuchten wir jetzt mit *Dinilyisia*.

Wir hatten hoch aufgelöste Röntgenaufnahmen der Schädel von Dutzenden heute lebender Schlangen und Echsen erstellt, um daraus dreidimensionale virtuelle Modelle der Innenohren zu entwickeln. Dabei konzentrierten wir uns auf den Vorhof: das so genannte Vestibulum, das als Teil des Innenohrs Lympflüssigkeit und Ohrsteine enthält, mit denen die Tiere Schwerkraft und Kopfbewegungen wahrnehmen.

Die statistischen Analysen der virtuellen Modelle ergaben signifikante Unterschiede zwischen Grabspezialisten, terrestrischen Generalisten und aquatischen Formen: Seeschlangen und Echsen haben fast überhaupt kein Vestibulum. Bei grabenden Arten – insbesondere bei solchen, die eigene Höhlen bauen, statt einen anderen Tierbau als Unterschlupf zu übernehmen – ist das Vestibulum hingegen wie ein Ballon aufgebläht, wodurch sie unter der Erde tiefe Schwingungsfrequenzen besser zu hören vermögen. Dieser Trend gilt unabhängig von Körpergröße und Gliedmaßenbau: Eine fast einen Meter lange Sandboa besitzt wie eine asiatische Pfeifenschlange von 25 Zentimetern Länge ein erweitertes Vestibulum – genauso wie die bizarre Grabechse *Bipes*, die ein Paar Vordergliedmaßen, aber keine Hinterbeine hat.

## 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 (stellv. Redaktionsleiter), Manon Bischoff (Volontärin), Robert Gast, Dr. Andreas Jahn, Dr. Tim Kalvelage, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Kordinator Archäologie/Geschichte), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.de

**Freie Mitarbeit:** Dr. Gerd Trageser

**Art Direction:** Karsten Kramarczik

**Layout:** 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:** Andrea Roth

**Assistenz des Chefredakteurs:** Lena Baunacke

**Verlag:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

**Geschäftsleitung:** Markus Bossle, Thomas Bleck

**Herstellung:** Natalie Schäfer

**Marketing:** Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.de

**Einzelverkauf:** Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744

**Übersetzer:** An diesem Heft wirkten mit: Dr. Dirk Gassmann, Dr. Claudia Hecker, Dr. Ingrid Horn, Dr. Rainer Kayser, Dr. Michael Springer.

**Leser- und Bestellservice:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: 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, 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, ermäßig € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachfrage.

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. 39 vom 1. 1. 2018.

**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 ohne die Quellenangabe in der nachste-

henden Form 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: © 2018 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

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,

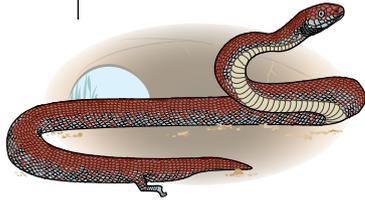
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Florek



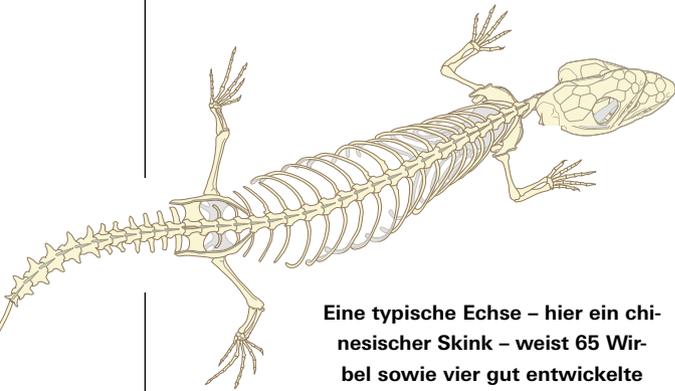
Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressfachhändler mit diesem Zeichen.

## Formvollendet

Die Evolution der Schlangen aus Echsenvorfahren zählt zu den dramatischsten Umwälzungen in der Wirbeltiergeschichte. Neue Entdeckungen ermöglichen es, die Entstehung des unverwechselbaren Schlangenkörpers mit seinem extrem langen Rumpf und den fehlenden Gliedmaßen zu rekonstruieren.

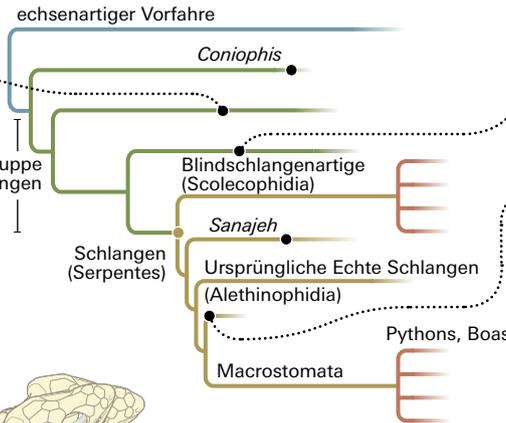
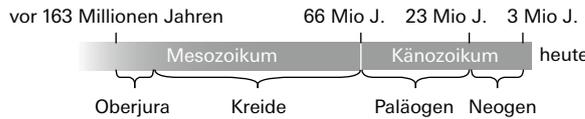


**Najash rionegrina**, eine 92 Millionen Jahre alte landlebende Schlange aus Argentinien, besaß ein Paar winziger Hinterbeine, die wohl während der Paarung als Klammer dienten.



Eine typische Echse – hier ein chinesischer Skink – weist 65 Wirbel sowie vier gut entwickelte Gliedmaßen auf, die seitlich vom Körper abgespreizt sind und von Knochen der Extremitätengürtel gestützt werden.

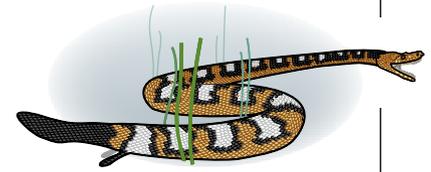
### Stammbaum der Schlangen



Heutige Schlangen wie die Halysotter besitzen mehr als 300 Wirbel, von denen fast alle Rippen tragen. Ihnen fehlen sämtliche Knochen für Gliedmaßen sowie für Schulter- und Beckengürtel.



**Dinilysia patagonica** gilt mit einem Fossilalter von 85 Millionen Jahren als erste Schlange, der Hüften und Gliedmaßen vollständig fehlten. Die Spezies wühlte wahrscheinlich im Boden. Demnach haben die Vorfahren heutiger Schlangen ihre Beine verloren, als sie sich dem Leben im Untergrund anpassten.



**Pachyrhachis problematicus**, eine 98 Millionen Jahre alte Seeschlange aus der Nähe von Jerusalem, besaß winzige Hinterbeine, aber keine Beckenknochen. Die Gliedmaßen eigneten sich somit nicht zum Schwimmen.

Ich hatte Grund zu der Annahme, dass *Dinilysia* sich bei den grabenden Schlangen einreicht, präsentierte doch eine 2012 veröffentlichte Studie ein Röntgenbild des Schädels, in dem ein großes Vestibulum zu erkennen ist. Allerdings konnte bislang niemand dessen dreidimensionale Struktur. Wie unsere Untersuchungen nun bestätigten, weist die Urschlange wie heutige Gräber ein ballonförmiges Vestibulum auf. Damit unterscheidet sie sich praktisch nicht von der heute lebenden Regenbogenschlange aus Südostasien, die hauptsächlich kleine Nagetiere und kleinere Schlangen frisst. Nach unserem Modell war *Dinilysia* mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit ein Gräber. Vermutlich jagte das Reptil wie eine Regenbogenschlange auf der Erdober-

fläche und grub sich im lockeren Boden ein.

Übertragen auf einen Stammbaum wird die Rolle des Habitatwechsels beim Übergang von Echsen zu Schlangen deutlich: *Dinilysia* gehörte nicht zu den frühen Linien, die sich von Echsen abspalteten. Vielmehr war die Gattung eng mit den Vorfahren der heutigen Schlangen verwandt – moderner als *Najash* mit noch funktionsfähigen Hinterbeinen, aber ursprünglicher als heutige Arten (siehe »Formvollendet«, oben). Die Zuordnung von *Dinilysia* als Gräber stützt die These, dass die Linien, die zu modernen Schlangen führen, ihre Gliedmaßen verloren, als sie sich an das Leben im Erdboden anpassten.



voneinander entstanden sein und geht nicht auf einem gemeinsamen Vorfahren zurück. Der Vergleich von Fossilien mit modernen Arten offenbart somit, was die Schlangen von ihren beintragenden Vorfahren geerbt haben – die Rippen entlang des ganzen Körpers – und was bei ihnen wirklich einzigartig und neu ist: der extrem gestreckte Körper.

### Eine Maus ohne Beine durch eingepflanzte Schlangengene

Inzwischen sind auch genetische Mechanismen bekannt, die hinter dem Beinverlust der Schlangen stecken könnten: 2016 identifizierte die Arbeitsgruppe von Len Pennacchio vom Lawrence Berkeley National Laboratory bei Schlange und Maus einen Genschalter für die Gliedmaßenentwicklung. Die Forscher hatten ein Schlangengenfragment in das Erbgut einer Labormaus verpflanzt. Heraus kam eine »Schlangen-Maus«, die zwar einen normalen Mauskörper, aber nur noch Beinstümpfe aufwies.

Das implantierte DNA-Stück wird als ZRS (Zone of Polarizing Activity Regulatory Sequence) bezeichnet. Mäuse brauchen aktives ZRS, um normale Beine zu entwickeln; schon eine einzige Mutation darin verursacht abnorme Gliedmaßen. Die regulatorische Sequenz ist damit derart wichtig für das Überleben, dass sie in der Evolution der Landwirbeltiere weitgehend unverändert blieb – bei Schlangen ist sie jedoch hoch variabel.



FOTOLIA / HLP/PHOTO

### Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Diese ZRS-Varianten spiegeln die morphologische Vielfalt der Extremitätenentwicklung von Schlangen wider. Bei primitiven Vertretern wie Python und Boa ist die Sequenz funktionsfähig, jedoch verkürzt, so dass beide Gattungen rudimentäre, spornartige Hintergliedmaßen ausbilden. Im Gegensatz dazu haben hoch entwickelte Schlangen wie die Kornnatter das ZRS-Segment vollständig verloren und verfügen über keinerlei Extremitätenknochen.

Solche genetische Varianten können die Gliedmaßenentwicklung bei ausgestorbenen Gattungen erklären: *Najash* behielt Skelettelemente wie Beckengürtel, Oberschenkelknochen, ein verkürztes Schienbein sowie ein Wadenbein, hatte jedoch keine Zehenknochen. Auch bei *Pachyrhachis* fehlen die Zehen. Aus den beiden Fossilien lässt sich schließen, dass sich beim Übergang von der Echse zur Schlange die regulatorischen Gene für Gliedmaßen verändert haben, aber bei mehreren ursprünglichen Schlangen noch funktionsfähig blieben. So hatte *Haasiophis* zwar keinen Beckengürtel mehr, besaß aber komplette Oberschenkelknochen, gut entwickelte Schien- und

Wadenbeine sowie Knöchel- und Fußknochen. *Dinilysia* wiederum hatte überhaupt keine Extremitätenknochen oder Beckengürtel – das Fossil steht somit für den ersten vollständigen Funktionsverlust der DNA-Regulationssequenz. Die Beispiele zeugen von dem dramatischen Umbau der Schlangen in der Oberkreide, dem letzten Kapitel der Dinosaurierära – vermutlich einhergehend mit einer raschen Veränderung ihres Genoms.

Immer wieder tauchen neue Fossilien auf, welche die Ursprünge der Schlangen erhellen. 2015 beschrieben Forscher um David Martill von der University of Portsmouth eine etwa 120 Millionen Jahre alte, in Brasilien gefundene Schlange: *Tetrapodophis amplexus* besaß vier vollständige Gliedmaßen samt Fingern und Zehen (siehe Bild S. 43). Die Beine wären stark genug gewesen, um sich während der Paarung an den Partner festzuklammern. Auch wenn das Tier von Kopf bis Schwanz nicht einmal so lang wie ein Esstättchen war, verfügte es doch über mehr als 200 Wirbel. Auf Grund des langen Rumpfs und des kurzen Schwanzes handelte es sich vermutlich um einen Gräber – was wiederum die Hypothese stützt, dass die Schlangen an Land entstanden. Mit seinem Fossilalter, seiner mutmaßlichen Lebensweise sowie dem Zustand seiner Beine scheint *Tetrapodophis* alle Eigenschaften zu vereinen, nach denen Paläontologen bei ihrer Suche nach Übergangsformen lange gefahndet hatten.

Doch auf dem Jahrestreffen der Society of Vertebrate Paleontology 2016 in Salt Lake City bezweifelten einige Forscher die Fossilbeschreibung. Statt einer Schlange könnte *Tetrapodophis* eine Meerechse gewesen sein. Damit wäre die Frage, ob Schlangen an Land oder im Meer entstanden sind, wieder offen. Auf derselben Konferenz kritisierten andere Wissenschaftler, der private Eigentümer habe inzwischen das Fossil aus dem öffentlichen Museum entfernt, so dass es für weitere Untersuchungen nicht mehr zur Verfügung steht. Das brachte die Debatte um *Tetrapodophis* erst einmal zum Erliegen.

Doch auch sonst bleiben noch reichlich Geheimnisse zur Schlangenevolution. So wüssten wir beispielsweise gern, ob die Reptilien zuerst auf den nördlichen Kontinenten oder im Süden auftauchten und ob sie damals nacht- oder tagaktiv waren. Unklar ist ebenfalls, wie Schlangen ihre außergewöhnlichen Kiefer entwickelt haben, mit denen sie Beutetiere verschlingen, die größer sind als sie selbst. Und schließlich stellt sich noch die Frage, wie viele Arten zu ihrer ganz besonderen Geheimwaffe kamen: den oft tödlich wirkenden Giften. ◀

### QUELLEN

- Head, J. J., Polly, P. D.:** Evolution of the Snake Body Form Reveals Homoplasy in Amniote Hox Gene Function. In: Nature 520, S. 86–89, 2015
- Kvon, E. Z. et al.:** Progressive Loss of Function in a Limb Enhancer during Snake Evolution. In: Cell 167, S. 633–642, 2016
- Martill, D. M. et al.:** A Four-Legged Snake from the Early Cretaceous of Gondwana. In: Science 349, S. 416–419, 2015
- Yi, H., Norell, M. A.:** The Burrowing Origin of Modern Snakes. In: Science Advances 1, e1500743, 2015

## Das Kombipaket im Abo: App und PDF

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im Abonnement nur € 0,92 pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur € 0,69. (Angebotspreise nur für Privatkunden)



# MEDIZIN

**ZENSIERT!**



SIGRID ESTERLINA

**Charles Seife** arbeitet als Professor für Journalistik an der New York University.

► [spektrum.de/artikel/1561168](https://spektrum.de/artikel/1561168)

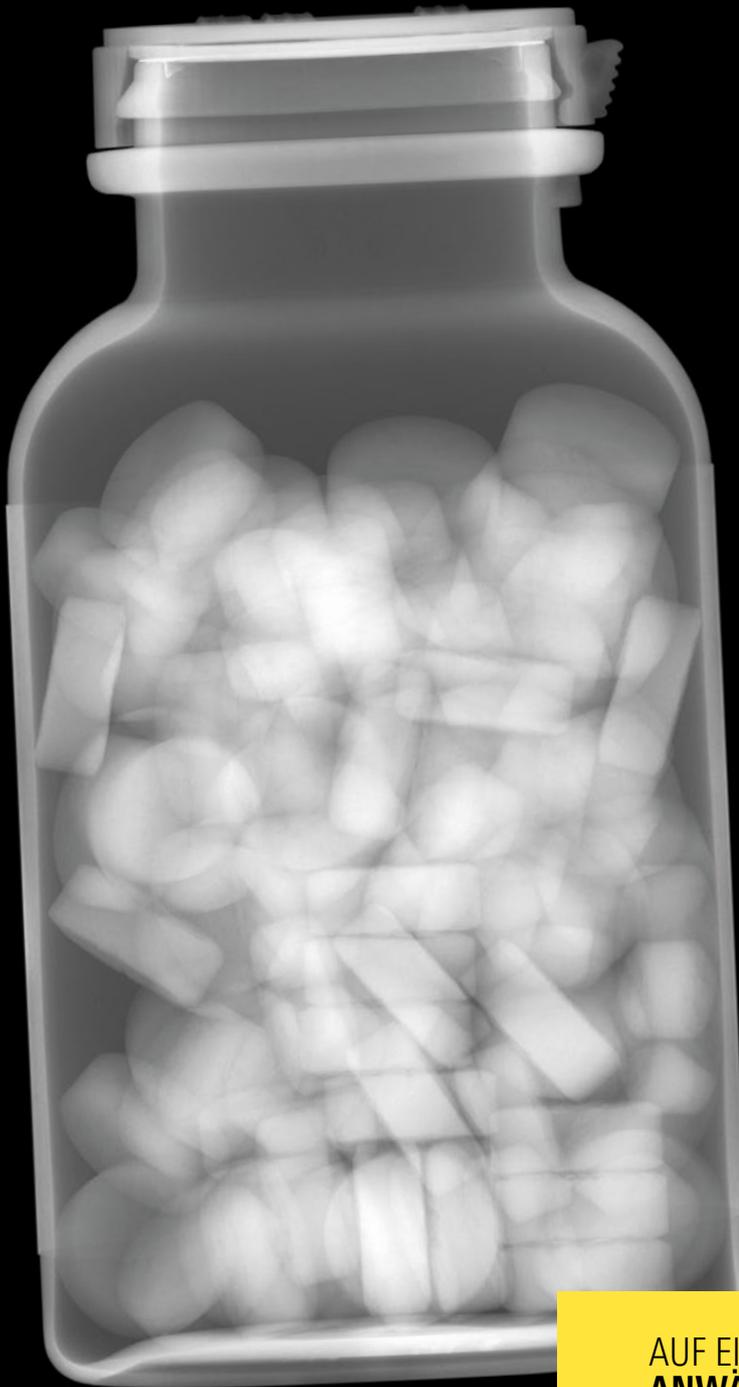
## Hält die US-Arzneimittelbehörde FDA Studiendaten zurück, um Pharmaunternehmen zu schützen?

Die US-Behörde für Lebens- und Arzneimittel (Food and Drug Administration, abgekürzt FDA) sieht sich nur selten mit dem Vorwurf konfrontiert, zu transparent zu arbeiten. Im September 2017 allerdings gab sie wohl eher zu viel preis. In der erklärten Absicht, »größtmögliche Klarheit« zu schaffen, sorgte die Behörde unfreiwillig dafür, dass die Aktienkurse von vier Biotech-Unternehmen (Sarepta Therapeutics, Ionis Pharmaceuticals, Biogen und Acadia Pharmaceuticals) massiv einbrachen. Sie machte aus dem Zusammenhang gerissene Informationen über Arzneimittel öffentlich zugänglich und versetzte damit Händler in Panik, die daraufhin überstürzt ihre Aktien loswerden wollten.

Wie war es dazu gekommen? Um Transparenz herbeizuführen, hatte die FDA einen Internetzugang veröffentlicht, der Zugriff auf die Datenbank FAERS (FDA Adverse

Event Reporting System) erlaubt. Nutzer können sich darin über Nebenwirkungen von Arzneimitteln informieren. Freilich war FAERS schon vorher zugänglich gewesen, wenn auch in einer weniger benutzerfreundlichen Form. Zudem ist die Datenbank schlecht strukturiert, enthält kaum Kontextinformationen und unterliegt allen möglichen empirischen Verzerrungen und Fehlern, was eine korrekte Interpretation der Daten nahezu unmöglich macht. Deshalb sind die darin gelisteten Informationen viel zu unpräzise, um Aktienhändler bei vernünftigen Kaufentscheidungen zu unterstützen.

Die eigentliche Ursache des Dilemmas liegt jedoch tiefer und hat ironischerweise gerade nicht mit Transparenz zu tun, sondern mit dem genauen Gegenteil. Es ist die Geheimniskrämerei der FDA hinsichtlich der nachteiligen Wirkungen bestimmter Arzneistoffe, die bei Patienten



Vor einer Zulassung werden Arzneimittel in klinischen Studien auf Wirksamkeit und Sicherheit durchleuchtet. Die gewonnenen Daten sind aber nicht in jedem Fall öffentlich zugänglich.

GETTY IMAGES / NICK VEASEY

auftreten, aber nicht publiziert werden. Manche Daten deuten sogar auf fragwürdig oder schlecht durchgeführte Arzneimittelstudien hin. Die FDA weigert sich, sie frei zu geben – obwohl niemand ohne solche Angaben eine informierte Entscheidung für oder gegen den Gebrauch eines Medikaments treffen kann.

Die Behörde ist in der wenig beneidenswerten Lage, täglich über Leben und Tod entscheiden zu müssen. Auch wenn sie noch so gewissenhaft und gründlich vorgeht,

## AUF EINEN BLICK ANWÄLTIN DER INDUSTRIE

- 1** Im September 2016 unternahm die US-Arzneimittelbehörde FDA einen höchst ungewöhnlichen Schritt: Sie ließ den Arzneistoff Eteplirsen zu – gegen den Rat der eigenen Fachleute.
- 2** Auf öffentlichen Druck hin publizierte die Behörde später zahlreiche Dokumente mit Informationen über Eteplirsen. Allerdings waren diese stark zensiert.
- 3** Es liegt die Vermutung nahe, dass die FDA hier Arzneimittelhersteller schützen wollte, statt die Interessen von Ärzten, Patienten und ihren Angehörigen zu vertreten.

kann sie nicht immer vermeiden, hin und wieder einen Fehler zu machen und Patienten dadurch einem Risiko auszusetzen. In einer konstruktiven Arbeitskultur muss man so etwas aufarbeiten und versuchen, für die Zukunft daraus zu lernen. Wenn jedoch bei der FDA etwas schief läuft, ist es oft schwer herauszufinden, was passiert ist. Sie hat seit Langem den Ruf, intransparent zu sein – sich beispielsweise zu weigern, wichtige Basisinformationen bereitzustellen. Selbst Kongressabgeordnete sind daran schon verzweifelt. Als der US-Senator Charles Grassley vor Jahren einen Fall überprüfen ließ, in dem die FDA während eines Zulassungsprozesses falsch entschieden hatte, nutzte die Behörde ihm zufolge »jede Ausrede unter der Sonne«, um die Freigabe der angeforderten Dokumente zu verhindern. Und wenn sie doch lieferte, beklagte Grassley, stellte sie eher Quantität als Qualität bereit: »In etlichen Dokumenten fanden sich Markierungen wie »57 Seiten entfernt« oder »43 Seiten entfernt«; das betraf insgesamt hunderte Seiten. In anderen Dokumenten waren Sätze, Absätze oder ganze Seiten geschwärzt, ohne Erklärung, was hier unzugänglich gemacht worden war und warum. Die FDA hatte dieselben Inhalte mitunter auf unterschiedliche Weise editiert und sogar in einen meiner Briefe eingegriffen, den ich in anderem Zusammenhang an sie geschickt hatte.«

Autoren wie ich können Ähnliches berichten. Als ich beispielsweise in einem schweren Betrugsfall recherchierte, der mehrere Medikamentenzulassungen in einem fragwürdigen Licht erscheinen ließ, weigerte sich die Behörde, die Namen der betroffenen Arzneimittel herauszugeben. Nicht nur, dass sie oft nur zögerlich über Probleme informiert, die bei bestimmten Arzneistoffen aufgetreten sind – sie hat die Öffentlichkeit sogar schon im Hinblick auf Produkte beschwichtigt, die sich später als gefährlich erwiesen. Man kann sich offensichtlich nicht darauf verlassen, dass die FDA immer alle relevanten Daten veröffentlicht.

### **Die eigenen Gutachter überstimmt**

Eine der umstrittensten Entscheidungen, welche die Behörde in den zurückliegenden Jahren traf, hatte mit der Firma Sarepta Therapeutics zu tun. Im September 2016 erteilte die FDA dem ersten Wirkstoff des Unternehmens die Zulassung, einer Substanz namens Eteplirsen. Der Arzneistoff wurde entwickelt, um die Duchenne-Muskeldystrophie zu behandeln, eine erbliche Muskelkrankheit, die sich im Kindesalter manifestiert, fast nur Jungen betrifft und immer tödlich endet – meist im jungen Erwachsenenalter.

Anfangs wollten die Gutachter bei der FDA das Präparat nicht genehmigen, aber Janet Woodcock, Leiterin des Center for Drug Evaluation and Research (CDER) bei dieser Behörde, überstimmt sie, was sehr ungewöhnlich ist. Woodcock erklärte, der Arzneistoff müsse auf den Markt kommen. Seither versuchen Versicherungsunternehmen, Ärzte und unabhängige Forscher herauszufinden, ob die Substanz tatsächlich wirkt oder nicht. Die FDA hat tausende Seiten mit Informationen über Eteplirsen veröffentlicht, aber zahlreiche entscheidende Daten fehlten darin. Es

steht der Verdacht im Raum, dass die Behörde, gestützt auf fehlerhafte klinische Studien und zu weit gehend von der Pharmaindustrie beeinflusst, ein unwirksames Arzneimittel zugelassen hat.

Um den Hintergrund dieser Angelegenheit besser zu verstehen, verklagte ich die FDA im Mai 2017 unter Berufung auf den Freedom of Information Act, jenes Gesetz zur Informationsfreiheit, das allen das Recht gibt, von staatlichen Behörden Akteneinsicht zu verlangen. Damit wollte ich die Behörde zwingen, Informationen über den Wirkstoff und das Zulassungsprozedere herauszugeben. Ende 2017 veröffentlichte sie zahlreiche einschlägige Dokumente, die zuvor unter Verschluss gewesen waren. Doch einmal mehr ging sie dabei alles andere als transparent vor. Was an diesen Schriftstücken vor allem auffällt, sind nicht die Informationen, die enthalten sind, sondern der Umstand, dass so viele Angaben fehlen.

In mehreren Dokumenten wurden unerwünschte Effekte wie behandlungsbedingte Nebenwirkungen geschwärzt. Manchmal liefern uns weitere Quellen einen Hinweis darauf, worum es sich dabei handeln könnte. So heißt es in einem Dokument, dass »zu den am häufigsten gemeldeten Nebenwirkungen anwendungsbedingte Schmerzen, Schmerzen im Mund- und Rachenraum, Husten, nasaler Blutandrang und schmerzende Extremitäten« gehören. Unter einem ganz ähnlichen Abschnitt, der ebenfalls bearbeitet wurde, ist indes eine aufschlussreiche Tabelle intakt geblieben. Aus ihr geht hervor, dass der geschwärzte Teil folgende Nebenwirkungen dokumentierte: Hypokaliämie (Kaliummangel), Brechreiz, Gleichgewichtsstörungen, Kopfschmerzen, Fieber, Rückenschmerzen sowie Hämatoame. Brechreiz und Gleichgewichtsstörungen sind als mögliche Nebenwirkungen auf dem Beipackzettel von Eteplirsen aufgelistet.

In anderen Fällen ist es jedoch praktisch unmöglich, herauszufinden, was die FDA zu verbergen versucht. So heißt es in einer aktualisierten Auflistung unerwünschter Effekte, erschienen in einer Folgestudie, dass »die am häufigsten aufgetretenen Beeinträchtigungen anwendungsbedingte Schmerzen waren«. Ebenfalls aus dem Dokument gestrichen wurden mögliche Anzeichen auf Nierenprobleme und Effekte im Zusammenhang mit Blutgerinnseln.

Die FDA hat offensichtlich bewusst entschieden, die Angaben hinter den schwarzen Balken der Öffentlichkeit vorzuenthalten. Und das betrifft nicht nur potenzielle Nebenwirkungen. Bei einer Arzneimittelzulassung geht es zentral darum, wie sich Patienten, die an klinischen Studien teilnehmen, im Hinblick auf die gewählten Endpunkte entwickeln, anhand derer die Mediziner den Therapieerfolg bewerten. Beim Behandeln der Duchenne-Muskeldystrophie lassen sich viele mögliche Endpunkte wählen: Wie weit kann ein Patient binnen sechs Minuten gehen, wie lange benötigt er für zehn Meter, wie viel Zeit kostet es ihn, vom Boden aufzustehen, um nur ein paar Beispiele zu nennen. Entscheidend ist in jedem Fall, diese Maßstäbe festzulegen, bevor die Studie beginnt, und nach Abschluss der Studie die Ergebnisse zu allen gewählten Endpunkten zu veröffentlichen. Andernfalls könnte man das Zulas-

sungsprozedere durch nachträgliches »Anpassen« der Maßstäbe austricksen. Es ist leicht, ein unwirksames Arzneimittel als hochwirksam erscheinen zu lassen, indem man nur jene Endpunkt-Daten veröffentlicht, die den gewünschten Effekt belegen, und die anderen unterschlägt.

Die mit Eteplirsen befassten Wissenschaftler beurteilten die Wirkung des Arzneistoffs anhand von mindestens neun Endpunkten, welche die Muskelkraft und den Muskeltonus der Patienten erfassen sollten. Zu mindestens zweien dieser Endpunkte sind die Ergebnisse verschwun-

Es ist leicht,  
ein unwirksames  
Arzneimittel  
als hochwirksam  
erscheinen zu lassen,  
indem man nur  
jene Endpunkt-Daten  
veröffentlicht, die  
den gewünschten Effekt  
belegen, und  
die anderen  
unterschlägt

den: Sie tauchen in der Fachliteratur nicht auf. Das ist nicht unbedingt überraschend, da so etwas in der Pharmaforschung ständig vorkommt. Aber es mutet schon seltsam an, dass die FDA hier Komplizenhaft mitmischt. Die Behörde zensiert alle Hinweise darauf, was bei diesen Messungen herausgekommen ist, und schwärzt sogar die Bezeichnungen der beiden Endpunkte. So ziemlich jede Erwähnung derselben ist aus den Dokumenten getilgt worden. Messwerttabellen: [REDACTED]. Sareptas Auswertung dieser Endpunkt-Daten: [REDACTED]. Selbst Angaben in Inhaltsverzeichnissen: [REDACTED].

Mittels weiterer Quellen war es mir möglich, die Lücken zu schließen. Bei den beiden unterschlagenen Endpunkten handelt sich erstens um den Nine Hole Peg Test (NHPT), eine Geschicklichkeitsprüfung, die erfasst, wie lange ein Patient benötigt, um Holzstifte in dafür vorgesehene Löcher zu stecken. Und zweitens um den Maximum Voluntary Isometric Contraction Test (MVICT), der dokumentiert, wie stark ein Patient an einem Band zieht. Die Studiendaten dieser beiden Tests sind nirgends zu finden, obwohl sie Sarepta seit Jahren vorliegen müssen. All meine Nachfragen nach diesen Ergebnissen wurden abgewiesen, sowohl von dem Unternehmen als auch von den Forschern. Und das, obwohl die mit Eteplirsen be-

fassten Wissenschaftler die Daten offenbar auf einer Konferenz im Oktober 2017 präsentiert hatten – kurz nachdem die FDA damit begonnen hatte, einschlägige Dokumente frei zu geben. Der Verdacht liegt nahe, dass die Ergebnisse des NHPT und des MVICT unterschlagen wurden, weil sie der Zulassung von Eteplirsen im Weg hätten stehen können.

Weitere Belege dafür, dass Endpunkte von Eteplirsen-Studien im Nachhinein manipuliert worden sind, gibt es im Hinblick auf die Menge bestimmter weißer Blutzellen – den CD3-, CD4- und CD8-Zellen nämlich – in der Muskulatur von Patienten. Es ist nicht ganz klar, was die Wissenschaftler mit der Analyse jener Zellen beabsichtigt hatten, denn Sareptas Beschreibung dieses »wichtigen sekundären Endpunkts«, zu finden auf der Website des nationalen Registers klinischer Studien, war sehr vage formuliert. Wir wissen allerdings, dass irgendwann zwischen Juli 2011, als die einschlägige Studie startete, und Juli 2015, drei Jahre nachdem sie endete, derselbe »wichtige sekundäre Endpunkt« sich auf mysteriöse Weise zu einem Gehtest wandelte. Die Daten zu den weißen Blutzellen waren nirgends zu finden. Weder der Leiter der Studie noch Sarepta zeigten sich bereit, Fragen zu diesem Endpunkt oder den entsprechenden Untersuchungsergebnissen zu beantworten. Die FDA kennt die Antworten, äußert sich aber ebenfalls nicht. Wie es scheint, stecken die entscheidenden Verweise auf die fraglichen Analysen in einem umfangreichen zensierten Textblock.

Zuvor festgelegte Endpunkte abzuändern, ermöglicht es Forschern und Pharmaunternehmen, den Kontext eines Studienergebnisses zu verzerren und so zu erreichen, dass ein Arzneimittel wirksamer oder sicherer erscheint, als es in Wirklichkeit ist. Die FDA hat die Aufgabe, genau dies zu verhindern: Sie soll verzerrten Ergebnissen der Pharmaunternehmen etwas entgegensetzen und dafür sorgen, dass Wirksamkeit und Sicherheit von Arzneistoffen objektiv dokumentiert werden, damit Ärzte die beste Entscheidung für ihre Patienten treffen können. Doch im Fall von Eteplirsen scheint die Behörde fest an der Seite des Unternehmens zu stehen und sich damit gegen die Interessen der breiten Öffentlichkeit zu stellen.

### Einfach zu fälschende Streifenmuster

Das gilt sogar im Hinblick auf Betrugsvorwürfe. Ein erschütterndes Dokument, das die FDA auf meine Klage hin herausgab, beinhaltet einen E-Mail-Wechsel, in dem ein Gutachter der Behörde darauf hinweist, Sarepta oder die mit Eteplirsen befassten Forscher könnten Abbildungen nicht richtig dargestellt oder sogar manipuliert haben. Am meisten beunruhigten ihn einige Darstellungen von sogenannten Westernblots.

Wissenschaftler verwenden die Westernblot-Technik, um die Sorten und jeweiligen Mengen von Proteinen in einer Probe zu ermitteln. Westernblot-Abbildungen tauchen in der medizinischen und biologischen Fachliteratur sehr häufig auf. Aber weil sie sehr simpel sind – sie zeigen oft nur unscharfe Streifenmuster –, lassen sie sich leicht fälschen. Deshalb sind Betrügereien damit erschreckend weit verbreitet.

Auch bei den Eteplirsen-Studien waren Westernblot-Abbildungen verwendet worden, und diese hatten die Aufmerksamkeit des FDA-Gutachters erregt: »Es gibt Grund zur Annahme, dass hier Daten nicht korrekt dargestellt wurden«, schrieb er. Er befürchtete anscheinend, die Bilder seien irreführend oder unangemessen manipuliert worden. Jerry Mendell, Kinderarzt am Nationwide Children's Hospital und führender Eteplirsen-Forscher, bestreitet das. »Die Studien sind von der FDA überprüft worden, die Fachartikel haben einen Peer-Review durchlaufen, das Arzneimittel ist zugelassen«, schrieb er in einer E-Mail. Sarepta lehnte es rundweg ab, über Vorwürfe von Fehlverhalten zu diskutieren.

Wer hatte Recht? Das war unmöglich zu sagen. Hierzu musste ich die unbearbeiteten Rohbilder mit jenen vergleichen, die publiziert wurden. Mendell reagierte jedoch auf Nachfragen nach den Rohdaten nicht, und Sarepta ebenso wenig. Aber es gab noch weitere Akteure, die diese unbearbeiteten Bilder besaßen. Der FDA lagen sie vor, und ich musste einen harten Kampf ausfechten, bis ich sie bekam. Nach langwierigen Debatten mit meinen Anwälten übermittelte die Behörde das Material, so dass meine Mitarbeiter und ich es sichten konnten. Offenbar entsprechen die Rohbilder tatsächlich nicht immer ihren mutmaßlichen Gegenstücken, die Sarepta im Jahr 2011 öffentlich präsentiert hatte. Die Bedenken des Gutachters scheinen also berechtigt gewesen zu sein. Auf jeden Fall lässt sich festhalten, dass die FDA nicht von sich aus versuchte, Klarheit in die Sache zu bringen – im Gegenteil, auf juristischen Druck hin wiesen die Mitarbeiter kategorisch jeden Verdacht auf Fehlverhalten von sich. Dabei hatte ein weiterer Gutachter, kurz nachdem Eteplirsen zugelassen worden war, in dieser Angelegenheit immerhin von »schlampiger Wissenschaft« gesprochen. Auch in anderen Fällen schwärzte die Behörde Rohbilder und hielt Angaben darüber zurück, wie Bilddaten bearbeitet worden waren.

### **Schädigung der Wettbewerbsfähigkeit**

Was könnte der Grund dafür sein, dass die FDA, die sich doch angeblich so sehr um Transparenz bemüht, Belege unterschlägt, die auf eine nachträgliche Abänderung von Endpunkten hindeuten? Warum verbirgt sie Hinweise auf die Nebenwirkungen einer medikamentösen Behandlung? Nachdem ich mich lange und intensiv damit befasst habe, scheint die Antwort für mich zu lauten: weil diese Informationen dem Unternehmen Sarepta, das Eteplirsen herstellt, schaden könnten. Die Behörde hat erklärt, die geschwärzten Absätze enthielten »Betriebsgeheimnisse und kommerzielle oder finanzielle Informationen, die von bestimmten Personen stammen und vertraulich sind«. Im fraglichen Fall soll das wohl heißen, dass deren Freigabe eine »erhebliche Schädigung der Wettbewerbsfähigkeit« jenes Unternehmens bedeuten würde, das die Informationen an die FDA übermittelt hat.

Bevor die Behörde die Eteplirsen-Dokumente herausgab, erlaubte sie Sarepta, redaktionelle Änderungen vorzuschlagen, um mögliche Wettbewerbsnachteile zu verhindern oder Informationen zurückzuhalten, die aus anderen Gründen nicht an die Öffentlichkeit sollen. Kann

es irgendjemanden wundern, wenn das Unternehmen meint, die Bekanntgabe unerwünschter Nebenwirkungen und durchwachsender Endpunkt-Daten schade dem Geschäft und helfe den Mitbewerbern? Sarepta vertritt beispielsweise die Ansicht, die festgelegten Endpunkte zu veröffentlichen, liefere den Konkurrenten »unbezahlbare Informationen« – ganz zu schweigen von den Testergebnissen. Hätte die FDA diesen Standpunkt nicht geteilt, dann hätte sie die Informationen entweder publiziert oder zumindest einen anderen Grund dafür angegeben, sie zurückzuhalten. Offenbar stimmt die Behörde dem Unternehmen aber zu.

Die FDA blockiert also den Zugang zu grundlegenden Informationen über Eteplirsen. Sie zensiert Angaben zu Nebenwirkungen, unterschlagenen Endpunkten und möglichem Fehlverhalten, um Sarepta nicht zu schaden. Mit anderen Worten, das Interesse der Öffentlichkeit, die ganze bekannte Wahrheit über ein Arzneimittel zu erfahren, steht hinter dem Interesse eines Unternehmens zurück. Meine Nachfragen hierzu zu beantworten, lehnte die Behörde übrigens unter Verweis auf das laufende Gerichtsverfahren ab.

Ein solches Verhalten vergiftet das öffentliche Vertrauen in ein wichtiges staatliches Organ sowie in zugelassene Arzneistoffe. Es kann durchaus sein, dass im Hinblick auf die Eteplirsen-Studien kein wissenschaftliches Fehlverhalten vorlag. Möglicherweise kennen wir alle wichtigen Nebenwirkungen des Arzneimittels. Wir können nicht einmal ausschließen, dass die weggelassenen Endpunkt-Daten eher für die Wirksamkeit der Substanz sprechen als dagegen. Doch die Bereitschaft der FDA, so grundlegende Informationen als »Geschäftsgeheimnisse« oder »vertrauliche Daten« anzusehen und sie der Öffentlichkeit vorzuenthalten, sorgt dafür, dass wir es nicht wissen können.

Und das war letztlich der Grund für den dramatischen Kurseinbruch im September 2017. Als die FDA den Zugang zu ihrer Datenbank FAERS erleichterte, begannen Investoren sofort, diese zu durchforsten. Sie stießen auf beängstigend wirkende Berichte über Todesfälle und allerlei sonstige Nebenwirkungen, die das Vertrauen in einige Arzneistoffe dramatisch schwinden ließen – unter anderem in Eteplirsen (Sareptas Aktienkurse haben sich inzwischen wieder erholt). Die Angaben in der Datenbank sind zwar nicht sehr nützlich, wenn es darum geht, die Sicherheit eines Medikaments einzuschätzen. Aber in einem schlecht informierten Marktumfeld kann jeder kleine Datenfetzen Panik auslösen. Hätte die FDA von Anfang an transparent agiert, hätten sie und die betroffenen Unternehmen sich auf ein weit größeres Vertrauen stützen können, und allen Beteiligten wäre viel Ärger erspart geblieben. ◀

### QUELLEN

FDA Grants Accelerated Approval to First Drug for Duchenne Muscular Dystrophy. Pressemitteilung der FDA vom 9. September 2016. [www.fda.gov/NewsEvents/Newsroom/PressAnnouncements/ucm521263.htm](http://www.fda.gov/NewsEvents/Newsroom/PressAnnouncements/ucm521263.htm)

Miller, J.E. et al.: Measuring Clinical Trial Transparency: An Empirical Analysis of Newly Approved Drugs and Large Pharmaceutical Companies. In: British Medical Journal Open 7, e017917, 2017

# INTERVIEW

## »ZULASSUNGEN IN DEUTSCHLAND UND IN DEN USA SIND GETRENNT«

### Der Arzneimittelexperte Klaus Cichutek über Medikamentenzulassungen, klinische Studien und veränderte Endpunkte.

**Herr Professor Cichutek – der vorstehende Artikel schildert verschiedene Probleme bei der Arzneimittelzulassung in den USA. Es heißt, die dort zuständige Behörde FDA habe in bestimmten Fällen die gemeldeten Nebenwirkungen eines Arzneimittels geschwächt und Informationen rund um die Zulassungsstudien zurückgehalten. Wäre so etwas auch in Deutschland vorstellbar?**

Das kann man nicht so einfach unmittelbar miteinander vergleichen. Grundsätzlich gilt, dass in Europa Transparenz einen hohen Stellenwert genießt. Aber auch hier müssen Behörden bei der Veröffentlichung von Informationen nach dem Informationsfreiheitsgesetz prüfen, welche Daten dem Betriebs- und Geschäftsgeheimnis unterliegen oder ob ein berechtigtes öffentliches Interesse Vorrang hat.

**Wie viel Einfluss hat die FDA auf die Situation in Deutschland? Hängen Arzneimittelzulassungen hier zu Lande von denen in den USA ab?**

Nein. Arzneimittel sind in Deutschland auf Grund einer Zulassung nach dem deutschen Arzneimittelgesetz im Verkehr. Diesem kann ein rein nationales Zulassungsverfahren, ein europäisches Verfahren der gegenseitigen Anerkennung von Zulassungen oder ein dezentralisiertes Zulassungsverfahren vorangegangen sein. Sie alle enden mit einer »nationalen« Zulassung in Deutschland.

Innovative Arzneimittel werden seit 1995 in den EU-Mitgliedstaaten nicht mehr rein national beantragt, sondern in dem so genannten zentralisierten Zulassungsverfahren unter dem Dach der Europäischen Arzneimittelagentur EMA evaluiert und gegebenenfalls von der EU-Kommission zugelassen. Dabei arbeiten die deutschen Zulassungsbehörden sehr aktiv mit; das Paul-Ehrlich-Institut ist bei Impfstoffen und biomedizinischen Arzneimitteln europaweit führend.

Arzneimittelzulassungen in Deutschland und in den USA unterliegen unterschiedlichen Regelwerken und sind rechtlich und faktisch voneinander getrennt. Jedoch tauschen sich die amerikanischen und die europäischen Arzneimittelbehörden zunehmend aus.

**Es gibt sogar drei deutsche Zulassungsbehörden: das Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM), das Paul-Ehrlich-Institut (PEI) und das Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL). Wie teilen sie sich ihre Arbeit auf?**

Das legt das Arzneimittelgesetz fest. Es handelt sich um eine »produktbezogene« Zuständigkeit dieser Bundesoberbehörden, die nicht nur Arzneimittel sowie Gewebe- und bestimmte Blutstammzell-Zubereitungen umfasst, sondern auch das Genehmigen klinischer Prüfungen und die wissenschaftliche Beratung in Deutschland.

Das Paul-Ehrlich-Institut arbeitet im Bereich der Humanarzneimittel, die einen biologischen Ursprung haben und nicht chemisch-synthetisch hergestellt werden. Dazu gehören Sera, Impfstoffe, Genterapeutika sowie Blut-, Stammzell- und Gewebesubereitungen. Weiterhin ist das PEI für so genannte Hochrisiko-in-vitro-Diagnostika zuständig und unterhält ein Prüflabor. Daneben befasst es sich mit immunologischen Tierarzneimitteln wie Sera, Impfstoffen, Immunmodulatoren und Tuberkulinen. In-vitro-Diagnostika, die zum Nachweis meldepflichtiger Tierkrankheiten dienen, liegen in der Verantwortung des Friedrich-Loeffler-Instituts, alle weiteren Tierarzneimittel in der des BVL.

Das BfArM wiederum befasst sich mit Produkten für den Menschen, die nicht in die Verantwortung des PEI fallen. Dazu gehören chemische Pharmazeutika, Phytotherapeutika, Homöopathika und Medizinprodukte.

**Welche Studien beziehen deutsche Behörden ein, wenn sie über eine Arzneimittelzulassung entscheiden?**

EU-weit ist durch Rechtsvorschriften geregelt, was bei einem Zulassungsantrag an Unterlagen und gegebenenfalls an Untersuchungsmaterial eingereicht werden muss. Dazu gehören die Ergebnisse klinischer Prüfungen der Phase III, der so genannten Zulassungsstudien. Eine Phase-III-Studie kann es nur geben, wenn vorher die Phasen I und II erfolgreich beendet wurden. Seit 2004 müssen klinische Prüfungen in Deutschland von der jeweils zuständigen Bundesoberbehörde genehmigt werden, also dem PEI oder dem BfArM. Generell sind Entwickler verpflichtet, die Ergebnisse aller Studien einzureichen, die für die beantragte Indikation relevant sind.

**Wie informieren die Zulassungsbehörden in Deutschland die Öffentlichkeit über klinische Studien?**

Das Deutsche Institut für Medizinische Dokumentation und Information bietet eine Datenbank, die über klinische Prüfungen von Arzneimitteln informiert, welche bereits zugelassen oder für das Inverkehrbringen genehmigt sind.



PAUL-EHRlich-INSTITUT

## Klaus Cichutek

ist Präsident des Paul-Ehrlich-Instituts und außerplanmäßiger Professor für Biochemie an der Johann Wolfgang Goethe-Universität in Frankfurt am Main. Er forscht über biomedizinische Arzneimittel, Gentherapie und Retrovirologie mit dem Schwerpunkt der HIV/SIV-Immunpathogenese und Aids.

Erreichbar ist sie unter [www.pharmnet-bund.de/dynamic/de/klinische-pruefungen](http://www.pharmnet-bund.de/dynamic/de/klinische-pruefungen). Zudem gibt es das Europäische Register klinischer Prüfungen unter [www.clinicaltrialsregister.eu](http://www.clinicaltrialsregister.eu). Es erteilt Auskunft über genehmigte klinische Prüfungen der Phasen II bis IV bei Erwachsenen und der Phasen I bis IV bei Kindern und Jugendlichen, meist in englischer Sprache.

### **Das Heilmittelwerbegesetz schränkt die Verbreitung von Informationen über verschreibungspflichtige Arzneimittel ein. Neben dem frei zugänglichen [pharmnet-bund.de](http://www.pharmnet-bund.de) gibt es aber auch öffentlich einsehbare Register der EU, der WHO und der NIH. Was genau bekommt die Öffentlichkeit zu sehen?**

Fragen zum Heilmittelwerberecht fallen in Deutschland in die Zuständigkeit der Landes- und nicht der Bundesoberbehörden. Das Arzneimittelgesetz regelt unter anderem allgemeine Pflichten der Bundesoberbehörden, die das Informieren der Öffentlichkeit betreffen. Dort finden sich Vorgaben zu Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen pharmazeutischer Unternehmen. Diese Pflichten gelten aber nicht für Arzneimittel, die im zentralisierten Verfahren von der Europäischen Kommission zugelassen werden. Hier informiert die Europäische Arzneimittelagentur EMA mittels eines öffentlichen Bewertungsberichts, des »European Public Assessment Report«, kurz EPAR.

Das Paul-Ehrlich-Institut verlinkt in seinen Listen zugelassener Arzneimittel sowohl auf den EPAR als auch auf die Fach- und Gebrauchsinformationen zu national zugelassenen biomedizinischen Arzneimitteln unter [pharmnet-bund.de](http://www.pharmnet-bund.de). Diese Informationen geben unter anderem an, welche Hilfsstoffe beim Herstellen des Arzneimittels verwendet wurden und – möglicherweise nur noch in Spuren – im Endprodukt vorhanden sein können. Das können minimale Reste von Hühnereiweiß bei Influenza-Impfstoffen, Aluminiumsalze als Wirkverstärker bei inaktivierten Impfstoffen oder Antibiotikaresten sein.

Das Informationsfreiheitsgesetz erlaubt es, weitere Unterlagen anzufordern, sieht aber ebenfalls den Schutz personenbezogener Daten, des geistigen Eigentums und von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen vor. Falls diese von der Anfrage potenziell betroffen sind, ist eine so genannte Drittbeteiligung gesetzlich vorgesehen, also das Einbeziehen des betroffenen Pharmaunternehmens.

### **Kommt es vor, dass bei klinischen Prüfungen mit Arzneimitteln die erfassten Endpunkte während der Studie oder danach verändert werden? Muss der Studienbetreiber das dokumentieren?**

Nachträgliche Änderungen des Prüfplans und damit auch der Endpunkte sind möglich, müssen allerdings dokumentiert und der zuständigen Behörde mitgeteilt beziehungsweise zur vorherigen Genehmigung vorgelegt werden. Aus wissenschaftlicher Sicht sind Änderungen des primären Endpunkts in Phase-III-Studien kritisch zu sehen, jedoch bei verblindeten Studien und vor Aufheben der Verblindung grundsätzlich möglich. Änderungen der Endpunkte bei nicht verblindeten Studien müssen grundsätzlich kritisch gesehen werden, hier ist der Einzelfall zu prüfen. Bei jeder Zulassung ist es nötig, alle eingereichten Daten zu kontrollieren und zu beurteilen, wie sich Änderungen des Prüfplans im jeweiligen Kontext auswirken. Alle Änderungen des Studienablaufs müssen beim Antrag auf Zulassung eingereicht werden. Gibt es Zweifel an der Dokumentation, führen die Behörden gegebenenfalls Inspektionen durch.

### **Muss jede Nebenwirkung, die im Rahmen klinischer Studien beobachtet wird, angegeben werden?**

Sämtliche Verdachtsfälle auf unerwünschte Arzneimittelwirkungen, die im Rahmen einer klinischen Studie beobachtet werden, müssen dokumentiert und der jeweils zuständigen Behörde gemeldet werden. Die Dokumentations- und Mitteilungspflichten des Sponsors einer klinischen Prüfung sind gesetzlich geregelt, ebenso die des Prüfers sowie die Inhalte der Ergebnisberichte nach Arzneimittelgesetz. Diese Ergebnisse sind eine wichtige Grundlage beim Bewerten eines Zulassungsantrags.

Die Fragen stellte **Frank Schubert**, Redakteur bei **Spektrum** der Wissenschaft.

# Spektrum LIVE

VERANSTALTUNGSREIHE ZUM  
40-JÄHRIGEN JUBILÄUM DES VERLAGS  
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

## Vortrag Der Ursprung des Lebens auf der Erde

**Wann?** 8. Juni 2018, 20.00 Uhr

**Wo?** LICHTHOF Theater, Hamburg

In seinem Vortrag erläutert Spektrum.de-Redakteur Lars Fischer, was wir heute über die chemische Evolution wissen – und was nicht.

## Künstliche Intelligenz, Humanoide Robotik und Computer-Vision

**Wann?** 20. Juli 2018, 16.00–19.00 Uhr

**Wo?** Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

Seminar mit Prof. Dr.-Ing. Tamim Asfour und Prof. Dr.-Ing. Rainer Stiefelhagen, beide vom Institut für Anthropomatik und Robotik am KIT. Machen Sie auch die Bekanntschaft mit einem humanoiden Roboter!

Tickets und Anmeldungen:

**Spektrum.de/live**



# HYDROLOGIE ÜBERSCHWEMMTE FELDER GEGEN DIE NÄCHSTE DÜRRE

**Kalifornien erprobt neue Strategien, überschüssiges Wasser für Trockenzeiten unterirdisch zu sammeln. Volle Grundwasserspeicher können der Bevölkerung der USA und anderer Länder das Überleben in Zeiten zunehmender Wetterextreme erleichtern.**



Erica Gies ist Journalistin und schreibt für Zeitungen wie die »New York Times«, den »Guardian« oder den »Economist« über Wissenschaft und Umwelt.

► [spektrum.de/artikel/1561174](https://spektrum.de/artikel/1561174)



ALACAR / GETTY IMAGES / ISTOCK

Der Klimawandel beschert Kalifornien vermehrt ausgedehnte Trockenperioden und starke Regenfälle. Wie hier auf einer Mandelplantage im California Central Valley leitet man Hochwasser neuerdings gezielt auf Ackerflächen, damit es versickert und die erschöpften Grundwasservorräte für schlechte Zeiten auffüllt.

Die verheerenden Stürme in Kalifornien hatten im vorletzten Winter viele Hänge dermaßen aufgeweicht, dass sie auf Straßen hinabrutschten und Gemeinden von der Außenwelt abschnitten. Zwischen Oktober 2016 und Februar 2017 fiel in dem Bundesstaat an der amerikanischen Westküste rund doppelt so viel Regen wie sonst üblich. Nördlich von Sacramento mussten fast 200 000 Menschen ihre Häuser verlassen, weil der Oroville-Stausee überlief und das Wasser einen riesigen Krater in die Überlastungsrinne fraß. Eines der größten Wasserreservoirs Kaliforniens drohte sich schlagartig zu entleeren.

Die Situation hatte sich von einem Extrem ins andere gekehrt: In den fünf Jahren zuvor herrschte zeitweise im gesamten Bundesstaat Dürre (siehe **Spektrum** November 2015, S. 68). Die Stauseen waren leer und die Rasenflächen der Vorgärten braun. Der Wassermangel verunsicherte die Bevölkerung spürbar. Viele Menschen fragten sich, ob sie weiter in Kalifornien leben konnten, ob man den stetigen Zuwachs an Neubürgern stemmen könnte und weiterhin im großen Stil Nahrungsmittel für den weltweiten Export produzieren sollte. Die heftigen Regenfälle Ende 2016 sorgten zunächst für allgemeines Aufatmen, angesichts der Schäden schlug die Stimmung jedoch schnell wieder um. Nicht so bei Kaliforniens Wassermanagern, die jahrelang hatten zuschauen müssen, wie die Reserven zur Neige gingen. Sie sahen das plötzliche Überangebot als Chance und überlegten, wie man die Fluten speichern könnte, um für die nächste Trockenperiode vorzusorgen.

## AUF EINEN BLICK DIE RESSOURCE WASSER NACHHALTIG NUTZEN

- 1 Kalifornien könnte Überschwemmungen und Dürren besser überstehen, wenn es seine leer gepumpten Grundwasserspeicher bei Hochwasser auffüllt.
- 2 Es bedarf einer neuen Mentalität, die Flüsse, Seen und Grundwasser als zusammenhängendes System betrachtet und die Ressource Wasser nicht länger als Privateigentum, sondern als Gemeingut.
- 3 Forscher fluten in Pilotprojekten Felder, damit mehr Wasser versickert. Vielerorts steigt dadurch der Grundwasserspiegel wieder. Ausgleichszahlungen an die Landwirte erhöhen die Akzeptanz.

Diese Frage ist Sinnbild einer neuen Realität: Obwohl sich Dürren und Überschwemmungen hier schon immer abgewechselt haben, nimmt ihre Intensität laut Wissenschaftlern durch den Klimawandel zu. Zudem schmilzt die Schneedecke der Sierra Nevada auf Grund der Erwärmung – um geschätzte 90 Prozent wird dieser Wasserspeicher im östlichen Hochgebirge Kaliforniens zurückgehen. Das verheißt nichts Gutes. Denn die Niederschläge fallen vor allem im Winter, während die Sommer für gewöhnlich trocken sind. Der Schnee schmilzt im Lauf des Frühlings und Sommers, wenn der Bedarf am höchsten ist, langsam und deckt den Wasserverbrauch des Bundesstaats zu etwa 30 Prozent und. Zukünftig erwartet man, dass der Schnee vermehrt als Regen fällt. Dadurch käme es häufiger zu Überschwemmungen, und in den warmen Monaten

wäre weniger Schmelzwasser aus den Bergen verfügbar. Die hohe Zuwanderung in Kalifornien verschärft das Problem: Immer mehr Menschen leben in Gegenden, die von Hochwasser bedroht sind, und strapazieren die ober- und unterirdischen Speicher in Trockenzeiten.

Veränderte Niederschlagsmuster und wachsende Bevölkerungen zwingen Länder weltweit, sich anzupassen. Millionen von Menschen konnten bislang auf das Schmelzwasser von schneebedeckten Bergen und von Gletschern vertrauen – am Fuße des Himalaja, im Alpenraum oder in der Andenregion. Die Wasserwirtschaft muss neue Wege finden, Hochwasser zurückzuhalten, um die Infrastruktur zu schützen und um besser auf Dürreperioden vorbereitet zu sein.

Neue Reservoirs können das Problem in Kalifornien und anderswo nicht lösen. »Wir haben die meisten Flüsse bereits gestaut«, erklärt Felicia Marcus, die Vorsitzende der Kontrollbehörde für Wasserressourcen des Bundesstaats. Unter der Erde jedoch gibt es große Speicherkapazitäten: Poröse Gesteinskörper, die Grundwasser leiten, können zehnmal mehr Wasser aufnehmen als alle 1400 Reservoirs Kaliforniens zusammen. Diese so genannten Aquifere sind jedoch durch immer tiefere Brunnenbohrungen für die Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen vielerorts bereits erschöpft. Die unterirdischen Wasserspeicher wieder aufzufüllen, wäre deutlich günstiger als der Bau neuer Staudämme. Man schätzt die Kosten auf etwa ein Fünftel der Summe, die man oberirdisch investieren müsste. Eine Gruppe progressiver Wissenschaftler, Landwirte, Naturschützer und Politiker entwickelt daher Strategien, Wasser in einem noch nie da gewesenen Umfang unterirdisch zu sammeln – um Flutschäden zu mindern und gleichzeitig neue Wasservorräte anzulegen.

### Dämme, Stauseen und Kanäle kappen den Nachschub

Einst konnten sich die Überschwemmungen im Winter sowie die Schneeschmelze im Frühjahr über das gesamte Central Valley ausbreiten. Das Wasser versickerte langsam im Boden und gelangte in die Aquifere; es ließ Auenwälder gedeihen und schuf Feuchtgebiete, die wandernden Lachsen, Wapitihirschen, Grizzlys und Vögeln einen Lebensraum boten. All das änderte sich im 20. Jahrhundert, als Kalifornien anfang, sich in Sachen Wasserbau zu überschätzen. Riesige Staudämme und Rückhaltebecken, Aquädukte, Kanäle, Deiche und Pumpen veränderten die Wege des Wassers im gesamten Bundesstaat grundlegend – mit zahllosen unbeabsichtigten Folgen: Zwar machte der intensive Ausbau der Wasserinfrastruktur das moderne Kalifornien erst möglich, aber die jüngste Dürre und die anschließenden Überflutungen offenbarten, wie wenig sich dieses System dazu eignet, die heutige Situation zu beherrschen. Der Hauptfehler war es, Flüsse von ihren Überschwemmungsflächen abzuschneiden, um Städte und Ackerland zu schützen. Damit haben die Ingenieure sehr effektiv verhindert, dass sich die angezapften Aquifere regenerieren können.

Nun will man sich den ursprünglichen Verhältnissen wieder ein wenig annähern, indem man Flächen kontrolliert flutet. Damit dieses Vorhaben Realität wird, bedarf es

zunächst eines Kulturwandels, weg vom Egoismus, der die Wassernutzung in Kalifornien seit Langem prägt. Und offenbar bewegen sich die Dinge in die richtige Richtung: 2014 wurde für den Bundesstaat ein wegweisendes Gesetz verabschiedet, das den Endverbrauchern mehr Verantwortung für einen sorgsam Umgang mit Wasser überträgt und gleichzeitig größere Flexibilität auf lokaler Ebene erlaubt. Anstatt wie bisher auf wasserbauliche Großunternehmungen zu setzen, verfolgt man die Vision von tausenden kleinen Projekten, in denen sich Bürger für eine Regeneration der Wasservorräte einsetzen.

Es laufen Pilotversuche, in denen Wissenschaftler und Vertreter der lokalen Wasserbehörden untersuchen, welche Maßnahmen mit der Hydrologie, der Art der Landnutzung und der finanziellen Situation eines Ortes vereinbar sind. Man sucht gemeinsam nach Lösungen, die möglichst vielen Ansprüchen gerecht werden. Beispielsweise, indem man Felder dann flutet, um Aquifere wieder aufzu-



**Wassermangel: Der zweitgrößte Stausee Kaliforniens, Lake Oroville, schrumpfte von März 2015 (links) bis September desselben Jahres (rechts) dramatisch.**

füllen, wenn das Hochwasser die landwirtschaftlichen Erträge nicht gefährdet und Wildtiere davon profitieren. So wie Israel die Tröpfchenbewässerung entwickelte und Australien die Wasserrechte und den Handel damit reformierte, sucht Kalifornien nach innovativen Antworten auf Dürren und die Bedürfnisse von Farmern und Bewohnern der Großstädte an der US-Westküste.

Damit die Projekte Erfolg haben, gilt es zuerst, lange Zeit vorherrschende Missverständnisse in Sachen Hydrologie aus der Welt zu schaffen. Im April 2017 waren nach vier Monaten, in denen heftige Stürme über den Bundesstaat gezogen waren, nur noch neun Prozent der Fläche Kaliforniens von der Dürre gezeichnet. Gouverneur Jerry Brown erklärte diese daraufhin für überstanden. Sandi Matsumoto, Vizedirektorin des Wasserprogramms der Naturschutzorganisation The Nature Conservancy, hält das

im wahrsten Sinne des Wortes für eine oberflächliche Sichtweise: »Seen, Flüsse, Bäche und die darunterliegenden Aquifere teilen sich dasselbe Wasser. Sie sind durch die Schwerkraft und den hydraulischen Druck untrennbar miteinander verbunden.« Auch wenn die kalifornischen Oberflächengewässer in diesem Jahr gut gefüllt scheinen, seien die Grundwasserpegel nach jahrzehntelanger Plünderung für die Landwirtschaft und die Versorgung der Bevölkerung noch immer extrem niedrig. »Die Aquifere werden Jahrzehnte, wenn nicht gar ein halbes Jahrhundert brauchen, um sich zu erholen«, so Matsumoto.

Grundwasser deckt den Wasserbedarf Kaliforniens in trockenen Jahren zu etwa 60 Prozent und in solchen mit durchschnittlichen Niederschlägen zu etwa 30 Prozent. Doch selbst die entnommene Menge in feuchten Jahren ist nicht nachhaltig. Regenwasser, das im Boden versickert, kann das Grundwasser nicht so schnell wieder auffüllen, wie es nach oben gepumpt wird. Damit folgt



FLORENCE LOWY / CALIFORNIA DEPARTMENT OF WATER RESOURCES

man einem globalen Trend: Laut einer Studie aus dem Jahr 2015, die auf Satellitendaten der NASA beruht, hat mehr als die Hälfte der größten Grundwasserspeicher der Erde einen kritischen Schwellenwert unterschritten.

Das ist Besorgnis erregend, denn dieses Wasser dient größtenteils dem Erzeugen von Nahrungsmitteln. Wenn Bauern in jenen Regionen, die auf Grundwasser angewiesen sind, ihre Felder nicht mehr bestellen können, wäre das katastrophal. Vor allem angesichts der Schätzungen der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation (FAO) der UN, wonach die weltweite Nahrungsmittelproduktion bis 2050 um 70 Prozent wachsen müsste, um die dann gut neun Milliarden Menschen ernähren zu können.

Über ein Jahrhundert lang hat sich Kalifornien nur um das Wasser an der Oberfläche gekümmert. Grundwasser konnten Landbesitzer nach Belieben nutzen: Jeder durfte auf seinem Grund und Boden einen Brunnen graben und so viel Wasser hochpumpen, wie er wollte; ohne Rücksicht auf die Folgen für seine Nachbarn. Flüsse und Seen auf der einen und Grundwasser auf der anderen Seite galten als zwei separate Ressourcen – obwohl ein gut

gefüllter Aquifer einen Fluss bei Trockenheit am Leben erhält und Letzterer umgekehrt als Puffer für erschöpfte Tiefenspeicher dienen kann. »Im San Joaquin Valley ist der Grundwasserspiegel stellenweise so stark gefallen, dass keine Verbindung mehr zu den Flüssen existiert, die ursprünglich mit den unterirdischen Reservoiren im Austausch standen«, beklagt Helen Dahlke, Professorin für integrierte Hydrologie an der University of California in Davis. Der Bruch im Wasserkreislauf lässt Feuchtgebiete und Quellen austrocknen und beeinträchtigt so die aquatische Tier- und Pflanzenwelt. Würden die Grundwasserspeicher wieder aufgefüllt, könnten sich einige Aquifere erneut mit ihren Flüssen verbinden. Das hydrologische System wäre so weniger anfällig für Extremwetter.

Frühere Ansätze zum Speichern von Wasser in Kalifornien hatten die Aquifere als eine Art Wasserbank betrachtet: Dieselbe Menge, die man ihnen zuführt, kann man in Trockenperioden einfach wieder abrufen. Das Wasser wartet jedoch nicht unbedingt geduldig in einem unterirdischen Becken darauf, bei Bedarf hochgepumpt zu werden. Damit die Vision des Bundesstaats Realität wird, müssen die Menschen anfangen, Wasser als Gemeingut zu betrachten – anstatt es sich gegenseitig streitig zu machen.

#### Das Ende der rücksichtslosen Wasserentnahme?

Kaliforniens Wasserrechte galten lange als politisch unantastbar. Das panische Anzapfen der Grundwasservorräte während der jüngsten Dürre führte jedoch zu einem Umdenken. 2014 verabschiedete der Bundesstaat ein Gesetz für nachhaltiges Grundwassermanagement: Der Sustainable Groundwater Management Act schreibt vor, Grundwasser auf der Ebene der Einzugsgebiete zu bewirtschaften und dabei sowohl die Oberflächengewässer als auch die darunterliegenden Aquifere zu berücksichtigen. Von den 515 Einzugsgebieten Kaliforniens liefern 127 96 Prozent des Grundwassers und haben daher Priorität. Jede Region muss eine Agentur einrichten, die bis 2022 einen Plan zum nachhaltigen Management des Grundwassers vorlegt und diesen bis spätestens 2040 umsetzt. »Ein ehrgeiziges Ziel, da es für die meisten Gebiete keine belastbaren Daten gibt«, sagt Tara Moran von der Stanford University, die ein Forschungsprojekt zur Wassernutzung im Westen der USA leitet.

Das neue Gesetz soll dafür sorgen, dass Städte und Regionen mit Bewässerungswirtschaft das Grundwasser nicht weiter plündern, damit die unterirdischen Wasserpegel steigen können. »Der Großteil der gegründeten Agenturen würde es bevorzugen, die Aquifere wieder aufzufüllen, anstatt die Entnahme von Grundwasser zu begrenzen«, meint Esther Conrad, die ebenfalls an der Stanford University forscht und lokale Wasserkonferenzen in ganz Kalifornien besucht hat.

Anregungen liefern Gemeinden, die vor Jahrzehnten mit Wassermangel zu kämpfen hatten. Eine davon ist das Santa-Clara-Tal, heute bekannt als Silicon Valley. Im 19. und 20. Jahrhundert nannten es die Leute »Tal der Herzenslust«, weil man dort Aprikosen, Kirschen und Pflaumen in großen Mengen erntete. Damit ihre Bäume die trockenen Sommer gut überstanden, bedienten sich

die Obstbauern des Wassers der Aquifere. Die Folge: Zwischen 1890 und 1920 sanken die Grundwasserspiegel dramatisch, und die Böden sackten ab – in der Innenstadt von San Jose um knapp vier Meter.

Die Ortsvorsteher entschieden, die Aquifere wieder aufzufüllen, indem man bei Hochwasserständen Wasser zurückhielt, das sonst einfach gen Ozean rauschte. So wie Biber ein Fließgewässer stauen, um einen Teich entstehen zu lassen, errichteten Ingenieure mit Sandsäcken Dämme an verschiedenen Stellen quer über den Page Creek in Los Gatos. Entlang des kleinen Flusses bildeten sich so Staubecken, die dem Wasser Zeit verschafften, in den Untergrund zu sickern. Später baute man Erdwälle über den Los Gatos Creek wie den gut zehn Meter hohen Vasona-Sickerdamm. Heftige Regenfälle überfluteten den

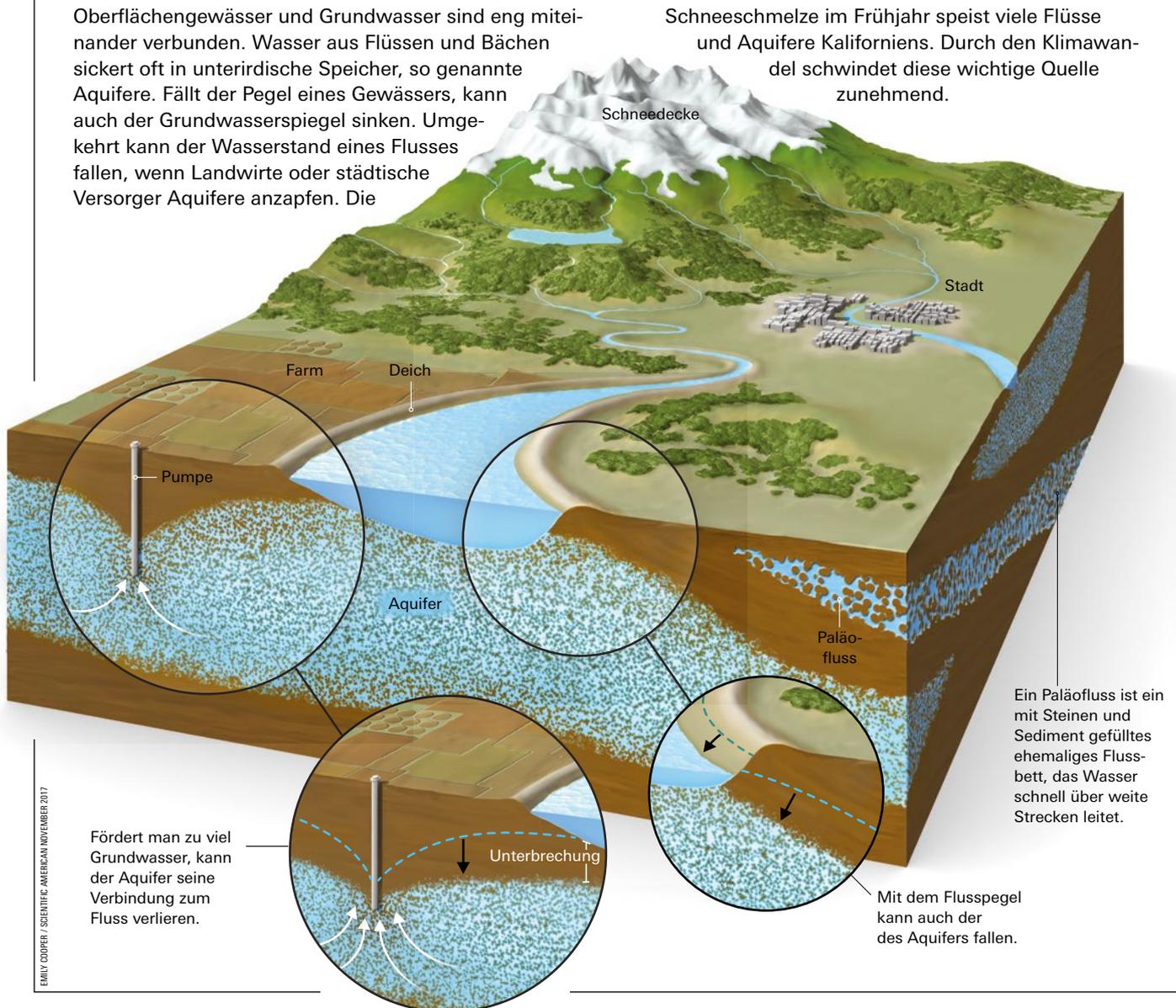
Stadtpark rings um den Damm, so dass sich zusätzliches Grundwasser anreichern konnte, ohne Wohn- oder Geschäftshäuser zu gefährden. Die Staumaßnahmen stoppten sowohl das Absacken der Böden als auch das Absinken der Grundwasserpegel. Auf Grund des starken Bevölkerungswachstums im Tal nach dem Zweiten Weltkrieg benötigte man jedoch mehr Wasser, als das Ökosystem natürlicherweise hergab. Die Landes- und Bundesregierung errichtete Rohrleitungen zu den massiven Kanälen, um Wasser aus Nordkalifornien nach Süden umzulenken.

Heute profitiert der Santa Clara Valley District von den Staubecken. Die menschengemachten Barrieren an Bächen und Flüssen erstrecken sich über fast 150 Kilometer. Sie sorgen dafür, dass schnell fließendes Wasser sich verlangsamt und in den Untergrund sickert. Zudem verfügt

## Ein großer Wasservorrat

Oberflächengewässer und Grundwasser sind eng miteinander verbunden. Wasser aus Flüssen und Bächen sickert oft in unterirdische Speicher, so genannte Aquifere. Fällt der Pegel eines Gewässers, kann auch der Grundwasserspiegel sinken. Umgekehrt kann der Wasserstand eines Flusses fallen, wenn Landwirte oder städtische Versorger Aquifere anzapfen. Die

Schneesmelze im Frühjahr speist viele Flüsse und Aquifere Kaliforniens. Durch den Klimawandel schwindet diese wichtige Quelle zunehmend.



Ein Paläofluss ist ein mit Steinen und Sediment gefülltes ehemaliges Flussbett, das Wasser schnell über weite Strecken leitet.

Fördert man zu viel Grundwasser, kann der Aquifer seine Verbindung zum Fluss verlieren.

Unterbrechung

Mit dem Flusspegel kann auch der des Aquifers fallen.

der Distrikt über rund 120 Hektar frei stehender Sickerbecken, in die bei Überflutungen Wasser aus nahe gelegenen Orten geleitet wird. Wie wertvoll die Grundwasseranreicherung tatsächlich ist, zeigte sich während der letzten Dürre: 2014 konnten die Regionen trotz akuten Wassermangels 51 Prozent des Bedarfs durch Grundwasser decken.

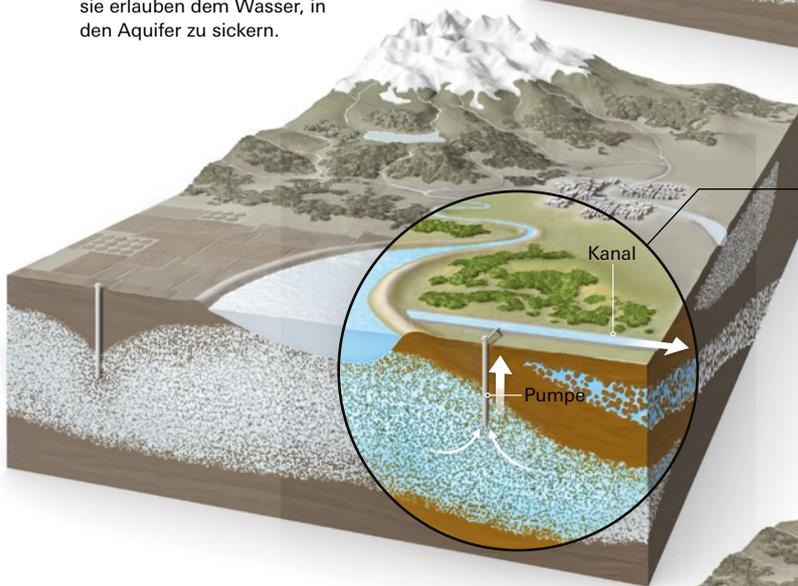
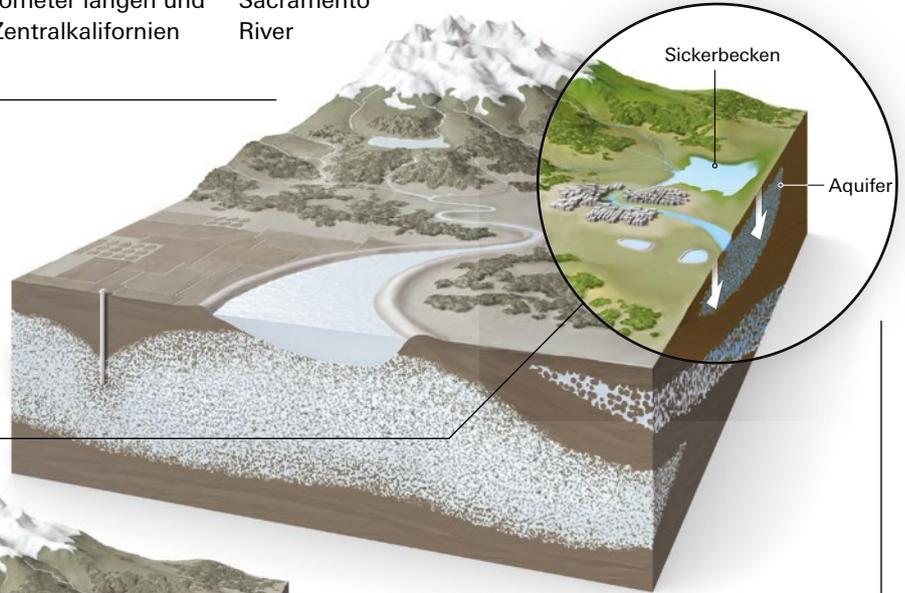
Will man Grundwasser großflächig anreichern, kommt zuallererst die Frage auf, wo das Wasser herkommen soll. »Die Wasserrechte der meisten Leute gelten für die Pflanz- und Wachstumszeit«, erklärt Felicia Marcus. »Im Winter gibt es daher einen großen Überschuss an Wasser.« Eine jüngst veröffentlichte Studie bestätigt, dass dieser ausreichen würde, um die Aquifere im 600 Kilometer langen und bis zu 80 Kilometer breiten Längstal in Zentralkalifornien

(Central Valley) wieder aufzufüllen. Die Herausforderung besteht darin, Regenwasser dorthin zu leiten, wo der Untergrund es aufnehmen kann. Im Norden Kaliforniens fallen mehr Niederschläge während des Winters, der Verbrauch im Süden aber ist während des Sommers am größten. Ein Großteil des Wassers, das Kanäle und Aquädukte von Nord nach Süd bringen, nutzen die Bauern im Winter überhaupt nicht. Anstatt es in den Pazifik fließen zu lassen, könnte man das überschüssige Wasser also auf die südlichen Felder leiten, damit es die Aquifere für den Sommer füllt.

Auch ein Handel in umgekehrter Richtung ist denkbar: Vergleichsweise wasserreiche Regionen wie jene um den Sacramento River

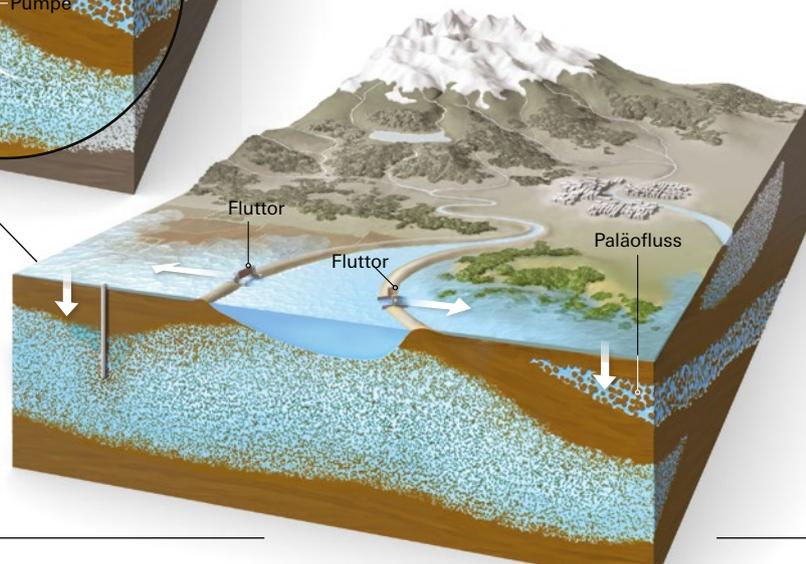
**Nachhaltiges Wassermanagement:** Sickerbecken, gezieltes Fluten und anderen Maßnahmen helfen, Dürren und Hochwasser zu überstehen.

Bei starken Regenfällen oder wenn Flüsse über die Ufer treten, können tief liegende Becken Entlastung bieten. Und sie erlauben dem Wasser, in den Aquifer zu sickern.



Wenn ein Aquifer gut gefüllt ist, Landwirte aber gerade nicht bewässern müssen, kann man Grundwasser abpumpen und über einen Kanal in andere erschöpfte Aquifere leiten. Auch Flüsse können bei hohen Pegelständen angezapft werden, um Grundwasserspeicher zu füllen.

Bei Hochwasser können offene Fluttore Wasser gezielt auf Felder und andere nicht versiegelte Flächen leiten, so dass dieses versickert und darunterliegende Aquifere auffüllt. Verläuft darunter ein Paläofluss, kann dieser das Grundwasser zu einem weit entfernten Aquifer leiten – wie ein natürlicher, unterirdischer Kanal.



könnten in regenreichen Jahren Grundwasser zur Bewässerung der Felder nutzen und ihr Oberflächenwasser nach Süden leiten, um die dortigen Aquifere zu speisen, so Ellen Hanak, Direktorin des Zentrums für Wasserpolitik am Public Policy Institute of California. Die Bilanzierung sei allerdings nicht ganz einfach, und man müsse noch ein Kompensationsverfahren erarbeiten, bevor sich diese Praxis verbreiten könne. Überschüssiges Wasser im Winter zu speichern, ist zudem schwierig, da die Böden gesättigt und die Reservoirs voll sind, ergänzt Hanak. Aber man habe bereits einige Landgebiete als Entlastungsflächen für Hochwasser ausgewiesen. Zusätzliche Flächen könnten Grundwasser direkt vor Ort anreichern oder als Zwischenspeicher dienen, bis die nötige Infrastruktur vorhanden sei, um das Wasser zu weiter entfernten Speichern zu leiten.

Wie das aussehen könnte, zeigen Maßnahmen im Sacramento-San-Joaquin-Delta, das in die Bucht von San Francisco mündet. Hier verwandelten Landwirte vor über einem Jahrhundert Marschland in Ackerflächen, indem sie Deiche aufschütteten. Im Jahr 2014 bauten Ingenieure diese auf einer Länge von etwa 230 Metern zurück, damit der ebenfalls ins Delta fließende Cosumnes im Winter sein ursprüngliches Überschwemmungsgebiet erreichen kann. Man will die Landschaft in ihren natürlichen Zustand überführen, in der Hoffnung, dass sich die Aquifere so wieder füllen. Im Winter 2016/2017 konnten Hydrogeologen um Graham Fogg vom Zentrum für Wassereinzugsgebiete an der University of California in Davis nachweisen, dass sich während des Hochwassers tatsächlich Grundwasser anreichert: dreimal mehr als normalerweise durch Regen oder Bewässerung. Das Überschwemmungsgebiet ist mit 115 Hektar relativ klein, sammelte aber rund 2,5 Millionen Kubikmeter Wasser (das Volumen von etwa 1000 olympischen Schwimmbecken).

### Effektiv und billig: Überschwemmte Ackerflächen sorgen für volle Grundwasserspeicher

Ein Großteil des Central Valley wird heute landwirtschaftlich genutzt. Wissenschaftler beschäftigen sich deshalb damit, wie man Felder ohne Schäden für die Bauern fluten kann. Flächen, die sich zur Anreicherung von Grundwasser eignen, müssen mehrere Kriterien erfüllen, etwa ein geringes Gefälle und eine hohe Durchlässigkeit des Bodens, damit das Wasser schnell versickern kann. Zudem sollte der Boden wenig Salze, Pestizide und Nährstoffe enthalten, die das Grundwasser belasten könnten. Und die Landwirte brauchen die Gewissheit, dass das Fluten brachliegender oder bewirtschafteter Felder zu sorgfältig abgestimmten Zeiten keine Ernteeinbußen nach sich zieht.

Helen Dahlke flutet im Rahmen ihrer Forschung teilweise Felder, um die Gesundheit von Pflanzen und Wurzeln, die Geschwindigkeit, mit der Wasser versickert, sowie Salz- und Nitratkonzentrationen zu erfassen. Im kalifornischen Scott Valley setzte sie Luzerneacker unterschiedlich lange unter Wasser: ein bis zwei Tage pro Woche, drei bis vier Tage pro Woche oder durchgehend von Februar bis April. Während der Testphase im Winter reicherten sich unter den insgesamt sechs Hektar Land knapp 170 000 Kubikmeter Grundwasser an. Mehr als

90 Prozent des Wassers versickerte, ohne dass die Erträge darunter litten. Auch andere Pflanzenarten hat Dahlke getestet, etwa Mandelbäume. Deren Wurzeln stehen angeblich nicht gern in Wasser. Doch hinsichtlich Blütenbildung und des Austreibens der Blätter konnte sie zwischen überfluteten und nicht überfluteten Feldern keine Unterschiede feststellen.

Eine weitere Herausforderung ist es, Nährstoffe und Pestizide nicht ins Grundwasser gelangen zu lassen. Das Überschwemmen der Felder und das Ausbringen von Dünger sowie Pflanzenschutzmitteln muss daher zeitlich weit genug auseinanderliegen, erläutert Thomas Harter, der sich an der University of California in Davis mit Grundwasserverschmutzung beschäftigt.

Ein Landwirt war den Wissenschaftlern bereits voraus: Don Cameron hatte 1983 beobachtet, dass ein benachbar-

**Lange wurde der Cosumnes von seinen Schwemmflächen (links) durch Deiche (nicht im Bild) getrennt. Heute kann der Fluss bei Hochwasser wieder über die Ufer treten (rechts) und füllt so die Grundwasserspeicher.**



ter Weinberg eine gute Ernte einbrachte, obwohl dieser nach heftigen Regenfällen monatelang unter Wasser gestanden hatte. Er selbst betreibt eine fast 3000 Hektar große Ranch im San Joaquin Valley, auf der er 25 verschiedene Feldfrüchte sowohl konventionell als auch biologisch anbaut und fast ausschließlich mit Grundwasser versorgt. 2011 sowie im Winter 2016/2017 erlaubte ihm die örtliche Kings-River-Wasservereinigung, ungenutztes Hochwasser auf seine Felder umzuleiten. Einige davon lagen brach, auf anderen wuchsen Luzerne, Weintrauben, Walnüsse, Mandeln oder Pistazien. Sein Plan ging auf: Die Pflanzen blieben unbeschädigt, und im Boden installierte Sensoren zeigten, dass mindestens 70 Prozent des Wassers in Tiefen unterhalb der Wurzelzone gelangt war. Mit Hilfe von Landes- und Bundesmitteln kann Cameron nun weitere Kanäle anlegen und Pumpen bauen, um zukünftig all seine Äcker zu fluten – und so die darunterliegenden Aquifere aufzufüllen.

Farmer, die dem Beispiel folgen wollen, könnten es schwerer haben, ungenutztes Wasser im Winter zu verwenden. Vielerorts benötigen sie hierfür eine Erlaubnis, und diese zu erhalten, ist ein langwieriger Prozess. Einer der Gründe: »Daten zu Wasserrechten stecken in zehn Millionen Akten, verteilt auf das kalifornische Wasserwirtschaftsamt und 58 Bezirksgerichte im gesamten Bundesstaat«, sagt Michael Kiparsky, Direktor des Wheeler Institute for Water Law an der University of California in Berkeley. Dass die Wasserrechte im Epizentrum des digitalen Wandels nur auf Papier verfügbar sind, ist kein Zufall. Viele Rechteinhaber glauben, je weniger andere über ihre Wassernutzung wüssten, desto besser. Kiparsky und Richard Roos-Collins von der Arbeitsgruppe für Wasser- und Energierecht in Berkeley arbeiten aktuell mit staatlichen Stellen daran, eine Datenbank zu entwickeln. Die soll es den regionalen Wasserverbänden erleichtern, Informationen zu bereits vergebenen Nutzungsrechten für einen bestimmten Fluss einzuholen.

Manche Farmer brauchen einen stärkeren Anreiz zur Mitwirkung. So bezahlt The Nature Conservancy Landwirte dafür, ihre Felder unter Wasser zu setzen. Ihr geht es



JUDAH GRISMAN, THE NATURE CONSERVANCY

dabei vor allem um Rastplätze für Zugvögel, die ihren Bedarf an Wasser und Nahrung zu 60 Prozent auf überschwemmtem Ackerland decken. Da Zugvögel aber stets auf der Durchreise sind, benötigen sie solche Flächen nur für wenige Wochen im Jahr. Die Umweltschutzorganisation pachtet daher Felder, die auf den Flugrouten der Vögel liegen, und flutet diese für zwei Wochen während der Wanderperioden im Frühjahr und Herbst. Im Rahmen des »BirdReturns« (»Vogel-Rückkehr« oder auch »Vogel-Rendite«)-Programms arbeitet man inzwischen auch vermehrt mit Farmern zusammen, unter deren Ländereien erschöpfte Aquifere liegen. Nach vorsichtigen Schätzungen ließen sich in den vergangenen vier Jahren durch gezieltes Fluten von Äckern etwa 25 Millionen Kubikmeter Grundwasser gewinnen.

Andrew Fisher, Hydrologe an der University of California in Santa Cruz, hat eine andere Lösung gefunden, Landwirte für Grundwasseranreicherung zu kompensieren.

Er leitet ein Pilotprojekt im Pajaro Valley an der Bucht von Monterey, südlich von San Francisco. Hier wachsen Artischocken, Beeren und Blattgemüse für den Export. Da es jedoch an Oberflächenwasser mangelt, müssen die Farmer Wasser aus der Tiefe hochpumpen. Bereits in den 1980er Jahren war die nicht nachhaltige Nutzung ein großes Problem, so dass die Regierung eine Agentur gründete, um das Wasser des Pajaro-Tals besser zu managen. Seitdem werden für das Fördern von Grundwasser Gebühren erhoben, die Maßnahmen zur Verbesserung der Wasserversorgung und der Wasserqualität finanzieren.

### Wer Grundwasser sammelt, zahlt später weniger

Fishers Projekt leistet dazu einen wichtigen Beitrag: Es leitet überschüssiges Regenwasser von Feldern und umliegenden Gebieten in ein zirka 1,6 Hektar großes Becken zur Grundwasseranreicherung. Letzten Winter verzeichneten er und sein Team gut 170 000 Kubikmeter Wasser, das in den Boden gesickert war. Dieses wird den Landwirten gutgeschrieben und mit zukünftigen Nutzungsgebühren verrechnet – so wie Stromverbraucher mit Solarpaneelen auf ihren Dächern Guthaben erhalten, wenn sie überschüssigen Strom ins Netz einspeisen. Die Wasserwirtschaftsagentur im Pajaro Valley rechnet den Landwirten die Hälfte des Sickerwassers an. Damit berücksichtigt sie Wasser, das ohnehin in tiefere Bodenschichten gelangt wäre, und solches, das sich im hydrologischen Netzwerk unter der Erde verliert und später nicht zur Verfügung steht.

Anstatt weiter darüber zu streiten, wem das Wasser gehört, entsteht allmählich ein neuer Gemeinsinn. Auch weil die Erfolge der zeitlich begrenzten Überschwemmungen für sich sprechen – und schnell die Runde machen: »Es gibt mehr Bewerbungen für unser Projekt, als wir aufnehmen können«, freut sich Fisher. Ähnlich gut entwickelt sich »BirdReturns«. Nach anfänglicher Zurückhaltung gibt es heute doppelt so viele Angebote von Landwirten, die ihre Felder fluten lassen wollen, wie das Projekt benötigt.

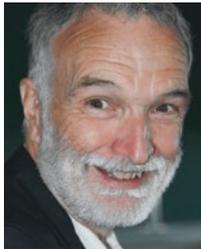
Die neuen Ansätze zeigen, dass Grundwasseranreicherung vielfältigen Nutzen hat, und animieren zur Nachahmung. Zudem verdeutlichen sie, dass man Nachhaltigkeit nur erreicht, wenn man die Verantwortung für die Ressource Wasser in die Hände der lokalen Gemeinschaften legt. »Hydrologische Probleme lassen sich nicht ausschließlich mit den Methoden der Wissenschaft lösen. Ebenso wichtig ist es, die Menschen zu verstehen und einzubinden«, meint Thomas Harter und ergänzt: »Diese stehen neuen Ideen sehr viel aufgeschlossener gegenüber, wenn sie an der Umsetzung beteiligt sind.« ◀

### QUELLEN

**Kocis, T. N., Dahlke, H. E.:** Availability of High-Magnitude Streamflow for Groundwater Banking in the Central Valley, California. In: Environmental Research Letters 12, 084009, 2017

**The Nature Conservancy:** Sustainable Groundwater Management: What We Can Learn from California's Central Valley Streams. 2016. [http://scienceforconservation.org/dl/TNCSGMWhatwecanlearn\\_2016.pdf](http://scienceforconservation.org/dl/TNCSGMWhatwecanlearn_2016.pdf)

# SCHLICHTING! WIRBEL IN DER TEETASSE



**Subtile spiralförmige Strömungen in umgerührtem Tee schichten darin verbliebene Blattstücke zu einem kleinen Häufchen in der Mitte des Tassenbodens auf.**

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/1561176](http://spektrum.de/artikel/1561176)

## Ich peitsche diese Vorstellung im Kreise umher wie ein Bube seinen Kreisel!

Wilhelm Raabe (1831–1910)

Den meisten Teetrinkern dürfte schon einmal aufgefallen sein, dass sich in die Tasse geratene Blattstückchen nach dem Umrühren in der Mitte ansammeln, so als hätte man sie dort fein säuberlich angehäuft. Anfangs unternehmen einige den Versuch, im Zentrum aufzusteigen, doch letztlich bleiben sie alle liegen. Kein Geringerer als Albert Einstein sah in diesen Vorgängen mehr als eine Kuriosität während einer Teepause. Für ihn war das Alltagsphänomen ein Modell für die bis dahin nicht verstandene physikalische Ursache, die zur Bildung von Flussmäandern führt.

Auf den ersten Blick scheint das Verhalten der Teeblätter dem zu widersprechen, was man bei anderen drehenden Dingen beobachtet und oft am eigenen Leib erlebt: Alles drängt nach außen. Das betrifft den Beifahrer, der sich in einer Kurve an die Tür gedrückt fühlt, und wirkt besonders spektakulär, wenn eine senkrecht herumgeschleuderte Flüssigkeit problemlos in ihrem Behälter bleibt (siehe »Katastrophenabwehr beim Coffee to go«, *Spektrum* April 2014, S. 56).

Man könnte versuchen, solche Phänomene physikalisch in den Griff zu bekommen, indem man die Zentrifugalkraft bemüht, die viele »für ein Wesen halten, eine Art Raumgespenst, das überall bereitsteht, wo sich etwas dreht, um pflichtgemäß einzugreifen«, wie der deutsche Physikdidaktiker Martin Wagenschein es einmal ausgedrückt hat. Doch diese Scheinkraft ist nur in einem mitbewegten beschleunigten System definiert. Betrachtet man die Drehbewegungen von außen, so löst sie sich in Nichts auf: Vom Straßenrand aus gesehen tendiert der Beifahrer des kurvenden Autos dazu, aus

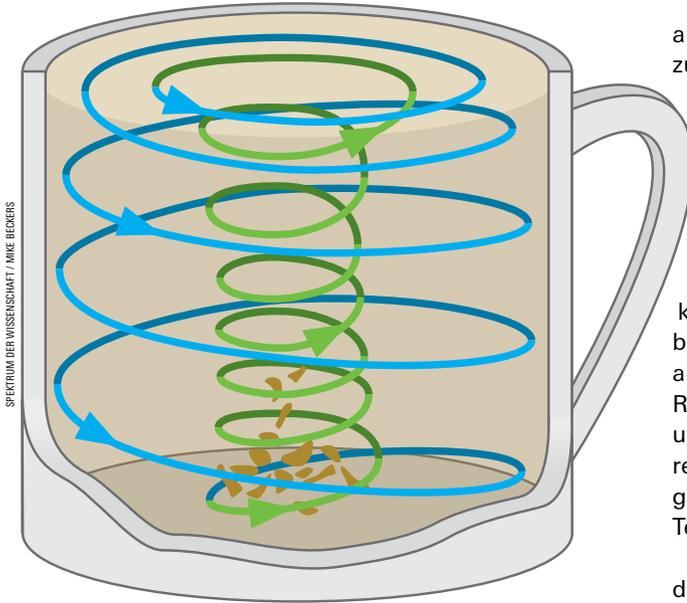


H. JOACHIM SCHLICHTING

**Rotierende Blätter (oben) sammeln sich in der Mitte, wenn der Tee zur Ruhe kommt (unten).**



H. JOACHIM SCHLICHTING



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MIKE BECKERS

**Eine Flüssigkeitsportion in einer Teetasse startet am Boden, steigt in der Mitte spiralförmig auf (grün) und an der Außenseite hinab (blau), wandert in Bodennähe nach innen und von dort erneut nach oben. Dabei reißt sie Rückstände von Blättern mit ins Zentrum.**

Trägheit seinen Bewegungszustand beizubehalten und sich geradlinig gleichförmig weiterzubewegen. Daran hindert ihn lediglich der Sicherheitsgurt des Fahrzeugs, das durch eine zum Zentrum der Kurve gerichtete Kraft von seiner Geradeausfahrt abgelenkt wird.

Auch in der Tasse lässt sich die Wirkung der Trägheit feststellen. Wir bringen den Tee durch Umrühren in Rotation, wobei durch Reibung schließlich auch die Flüssigkeitsbereiche erfasst werden, die nicht den Löffel berühren. Jede der so in Bewegung versetzten Flüssigkeitsportionen würde sich dem Trägheitsprinzip entsprechend geradlinig gleichförmig weiterbewegen, wäre da nicht die Tassenwand im Weg. Dies gilt nicht nur für die Portionen außen am Rand, sondern auch für jene weiter innen, die man sich zunächst vereinfachend auf konzentrischen Bahnen mit gleicher Winkelgeschwindigkeit umlaufend denken kann.

Am Tassenrand vermindert starke Reibung jedoch die Geschwindigkeit, was sich durch innere Reibung auch auf die zentraleren Bereiche auswirkt. Die tiefer gelegenen Flüssigkeitsschichten werden zusätzlich vom Tassenboden abgebremst. So bleiben sie hinter den mehr in der räumlichen Mitte des Tees befindlichen Bahnen zurück. Wegen dieser Effekte drängen die weiter innen umlaufenden Portionen nach außen, denn sie bewegen sich mit größerer Winkelgeschwindigkeit. Als Folge davon türmt sich die Flüssigkeit zum Rand hin auf und bildet eine vom Zentrum bis zum Tassenrand hin parabol-förmig ansteigende Oberfläche. Auch das kennt jeder

aus Erfahrung: Rührt man in einer gut gefüllten Tasse zu stark, schwappt der Inhalt über den Rand.

Dieser seitliche Anstieg bewirkt einen zunehmenden hydrostatischen Druck und verursacht so eine zum Boden hin gerichtete Kraft auf die rotierenden Teilchen. Sie lenkt diese auf spiralförmigen Bahnen nach unten ab. Dabei kommt es einerseits zur reibungsbedingten Verlangsamung und andererseits zu einer Drift zur Mitte, um diejenigen Flüssigkeitsportionen zu ersetzen, die von dort zum Rand treiben. Folglich bewegt sich in der Mitte die Flüssigkeit auf Spiralbahnen von unten nach oben, von wo sie zum Rand abgedrängt wird und in eine Abwärtsspirale nach unten gerät (siehe Illustration links). Nach dem Umrühren dissipieren Reibungsvorgänge die Bewegungsenergie allmählich und verlangsamen das Geschehen – der Tee kommt zur Ruhe.

Von der komplexen Bewegung der Flüssigkeit bleiben die aufgewirbelten Blätter unberührt. Wegen ihrer größeren Dichte würden sie sich eigentlich unten absetzen, doch die bewegte Flüssigkeit zieht sie hinter sich her. Dies gilt insbesondere in der Nähe des Tassenbodens, wo sie in den Strom des von außen nach innen laufenden Tees geraten. Die spiralförmige Aufwärtsbewegung in der Mitte des Gefäßes machen sie jedoch nicht mehr mit, weil sie dabei zusätzlich gegen die Schwerkraft gehoben werden müssten. Dazu reicht die Reibung mit dem strömenden Wasser nicht aus. Unmittelbar nach dem Rühren sieht man allenfalls einige hilflose Hüpfen der Pflanzenfetzen. Mit abklingender Bewegung des Tees bleiben sie schließlich in einem Häuflein liegen.

Albert Einstein erklärte dieses dreidimensionale Phänomen durch eine Überlagerung einer Primärströmung (Rotation in konzentrischen Bahnen) mit einer Sekundärströmung in dazu senkrechten Ebenen. In Wirklichkeit ist es komplizierter, denn diese fiktiven Strömungen entsprechen keinen realen Bahnen von Flüssigkeitsportionen.

Das Phänomen lässt sich an vielen Stellen beobachten. Beispielsweise sammeln sich Sandkörner oder andere Partikel in Regentonnen immer dann in der Mitte, wenn das Wasser schräg zuströmt. Sogar eine neuartige Methode, rote Blutkörperchen vom Blutplasma zu trennen, wurde von dem Effekt inspiriert.

#### QUELLEN

**Einstein, A.:** Die Ursache der Mäanderbildung der Flußläufe und des sogenannten Baerschen Gesetzes. In: Die Naturwissenschaften 14, S. 223–224, 1926

**Herwig, H. et al.:** Sind Sekundärströmungen noch zeitgemäß? In: Forschung im Ingenieurwesen 69, S. 115–119, 2005

**Yeo, J.C. et al.:** Label-Free Extraction of Extracellular Vesicles Using Centrifugal Microfluidics. In: Biomicrofluidics 12, 024103, 2018

# TECHNIK

# FAHREN UNTER STROM

**SERIE ELEKTROMOBILITÄT** Elektromotoren wurden in den letzten Jahrzehnten immer effizienter – durch neue Materialien sowie bessere Berechnungs- und Regelungsmethoden. Heute geht es vor allem um Optimierungen in zahlreichen Details. Das Ziel: viel Leistung bei wenig Gewicht.



© GEBI ZACHMANN, KIT

**Martin Doppelbauer** hat den Lehrstuhl für Hybridelektrische Fahrzeuge am Elektrotechnischen Institut des Karlsruher Instituts für Technologie inne.

► [spektrum.de/artikel/1561180](http://spektrum.de/artikel/1561180)

Elektrische Maschinen gibt es schon seit fast 200 Jahren. Den ersten praxistauglichen Elektromotor, der über das Stadium von reinen Demonstratoren hinausging, hat der Ingenieur Moritz Jacobi 1834 in Königsberg gebaut. Was also soll nach einer so langen Zeit heute noch Neues zu entwickeln sein?

Tatsächlich aber war der Fortschritt in den letzten zwei Jahrzehnten rasant. Das liegt einerseits an modernen Materialien, zum Beispiel starken Magneten aus Seltenen Erden, andererseits an leistungsfähigen Rechnern und elektronischen Bauteilen, die inzwischen komplexe Regelungen mit zuvor ungeahnter Schnelligkeit und Präzision ausführen.

Ähnlich wie auch bei Verbrennungsmotoren gibt es ganz verschiedene Varianten von Elektromotoren. Ihr Funktionsprinzip basiert auf der Anziehungskraft von Magnetfeldern (siehe »Das Grundprinzip eines Elektromotors«, S. 66). Grundsätzlich unterscheidet man Gleichstrommaschinen mit feststehendem Magnetfeld und Drehstrommaschinen mit rotierendem Magnetfeld.

Bei Gleichstrommaschinen polen Schleifkontakte die Wicklungen im drehbar gelagerten Teil (»Rotor«) immer so um, dass im Zusammenspiel von seinem und dem äußeren Magnetfeld ein Drehmoment entsteht. Derartige Motoren werden millionenfach produziert und lassen sich leicht über die Spannung in der Drehzahl regeln. Ein Pkw der Oberklasse kann rund 100 von ihnen enthalten: zur Sitzverstellung, für Scheibenheber und Scheibenwischer oder für verschiedene Pumpen, Lüfter und Kompressoren. Gleichstrommotoren kommen heute nur noch als solche Kleinantriebe zum Einsatz. Das liegt an der aufwändigen Konstruktion des Rotors mit Bürsten und Stromwender, was bei leistungsstarken

## SERIE Elektromobilität

Teil 1: Mai 2018  
**Die Ökobilanz der E-Mobilität**  
Christopher Schrader

**Energiespeicher für eine elektromobile Gesellschaft**  
Dominic Bresser

Teil 2: Juni 2018  
**Fahren unter Strom**  
Martin Doppelbauer

Teil 3: März 2018  
**Werden die Rohstoffe knapp?**  
Matthias Buchert



MITTEILUNG VON  
MARTIN DOPPELBAUER

Ausführungen relativ teuer wird und außerdem durch den Verschleiß die Lebensdauer begrenzt.

Zum Antrieb von Elektroautos dienen daher ausschließlich Drehstrommotoren, bei denen ein umlaufendes Feld im festen, Stator genannten Hohlzylinder den inneren Rotor gewissermaßen mitzieht. Seit dem Aufkommen von immer leistungsfähigeren Computersteuerungen und preisgünstiger Leistungselektronik erreichen Ingenieure mit diesen relativ einfachen und robusten Antrieben inzwischen sogar bessere Regeleigenschaften als mit Gleichstrommaschinen.

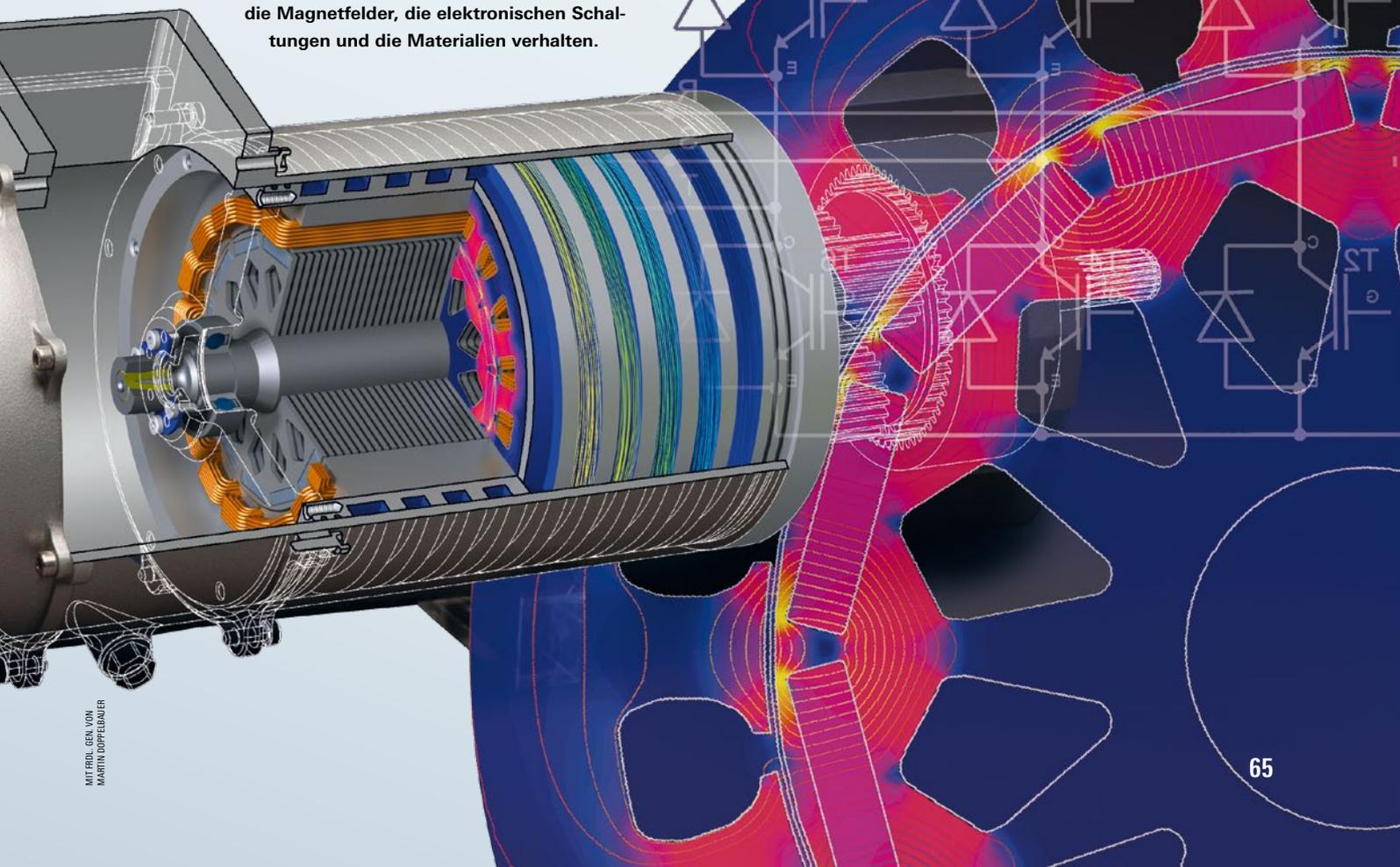
Die historisch erste Drehstrommaschine war die fremd-erregte Synchronmaschine (FESM). Der Deutsche Friedrich August Haselwander hatte sie 1888 aus einer umgebauten Gleichstrommaschine entwickelt. Sie benötigt keine teuren Permanentmagnete, dafür aber einen relativ aufwändigen Rotor (siehe »Drei Bauformen von Motoren«, S. 67). Heute wird so ein Motor beispielsweise im Renault Zoe und im Renault Kangoo verbaut.

Etwas zur gleichen Zeit wurden die ersten so genannten Asynchronmotoren (ASM) entwickelt. Der Unterschied im Namen deutet bereits auf ein anderes Funktionsprinzip: Während die Synchronmaschine mit der Frequenz des rotierenden Magnetfelds läuft, entwickelt der ASM nur ein Drehmoment, wenn sich sein Rotor mit abweichender Geschwindigkeit bewegt. Erstmals hatte der Italiener Galileo Ferraris das Konzept im März 1888 bei einem viel beachteten Vortrag in Turin bekannt gemacht. Wenige

## AUF EINEN BLICK NEUE IMPULSE FÜR BEWÄHRTES PRINZIP

- 1** Drehstromantriebe stecken seit dem 19. Jahrhundert in zahllosen Industriemaschinen. Sie sind robust und setzen elektrische Energie mit hohem Wirkungsgrad in mechanische Bewegung um.
- 2** Für den mobilen Einsatz erhöhen Ingenieure die pro Motorgewicht erreichbare Leistung – durch höhere Drehzahlen, bessere Kühlung, stärkere Magneten, moderne Elektronik und Computersteuerung.
- 3** Prototypen in den Laboren und Entwicklungen für den Rennsport übertreffen bereits die besten Verbrenner. Die Herausforderung ist nun, die Ansätze auf Serienmodelle zu übertragen.

Um Elektroantriebe zu verbessern, simulieren die Konstrukteure im Computer detailliert, wie sich die Magnetfelder, die elektronischen Schaltungen und die Materialien verhalten.



Monate später berichtete der Kroatier Nikola Tesla in New York von ähnlichen Erfindungen und demonstrierte zwei einfache Prototypen. Schließlich entwickelte der Russe Michael Dolivo-Dobrowolsky ab 1889 bei der AEG in Berlin den Asynchronmotor in seiner heute noch gebräuchlichen Form. Nahezu alle modernen Bahnen und Industrieantriebe verwenden Asynchronmaschinen. Auch im Tesla Model S steckt ein Motor nach diesem Prinzip.

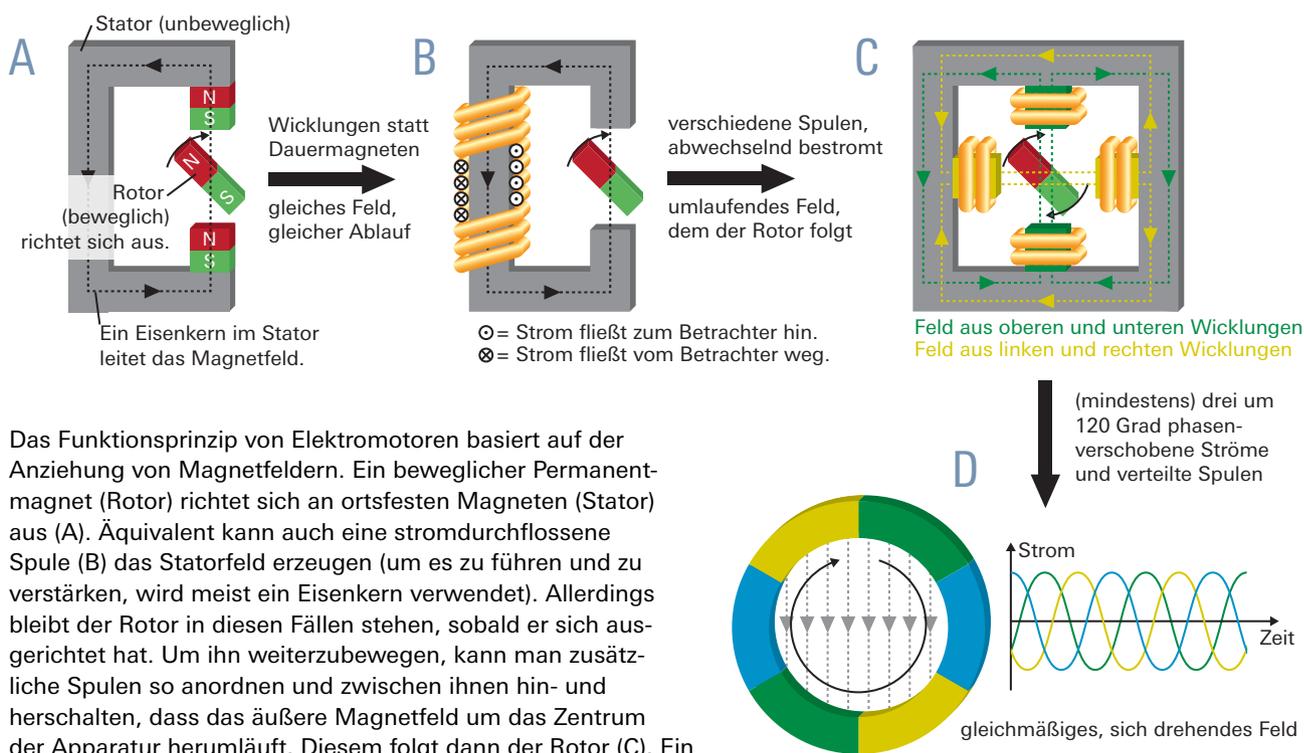
### Modernes Magnetmaterial für Höchstleistungen

Die historisch jüngste Motorvariante ist die permanentmagneterregte Synchronmaschine (PMSM), die sich erst mit dem Aufkommen von starken Magneten aus Seltenen Erden gegen Ende des letzten Jahrhunderts voll entwickelte. Mit PMSM lässt sich die höchste Leistung im Verhältnis zum Motorgewicht erzielen. Darum kommen PMSM heute in den meisten Elektroautos zum Einsatz. Sie eignen sich besonders gut für niedrige und mittlere Geschwindigkeitsbereiche, während bei hohen Geschwindigkeiten die Asynchronmaschine Vorteile bietet. Einen guten Kompromiss zwischen beiden stellt die bereits genannte FESM dar. Sie ist etwas aufwändiger in der Fertigung, denn der Rotor benötigt gewickelte Spulen und zwei Schleifringe.

Alle Drehstromantriebe nutzen sinusförmige Wechselströme. Die Spulen des unbeweglichen Teils des Motors, des so genannten Stators, erzeugen daraus ein rotierendes Magnetfeld. Üblich sind drei Phasen, also ein zeitlicher Versatz der Ströme von 120 Grad. Sie speisen mindestens drei Statorspulen, die entlang des Umfangs angeordnet sind. Durch das Zusammenwirken von zeitlicher Verschiebung der Ströme und räumlicher Distanz der Spulen entsteht ein Magnetfeld, das sich gleichmäßig dreht und eine konstante Amplitude hat.

Das Magnetfeld von drei Phasen mit je einer Spule bildet zwei magnetische Pole (Nord- und Südpol). Um das Feld gleichmäßiger zu gestalten, verwendet man für jede Phase meist nicht nur eine, sondern zwei oder drei Spulen in unmittelbarer Nachbarschaft. Außerdem werden diese Spulengruppen nicht um 120 Grad, sondern nur um 90 oder sogar nur um 60 Grad versetzt angeordnet. Den verbleibenden Statorumfang belegen dann symmetrisch weitere Spulengruppen. Dadurch erhöht sich die Anzahl der magnetischen Pole. Oft werden Asynchronmaschinen mit zwei Polpaaren (also je zwei Nord- und zwei Südpolen) und Synchronmaschinen mit drei oder vier Polpaaren gebaut.

## Das Grundprinzip eines Elektromotors

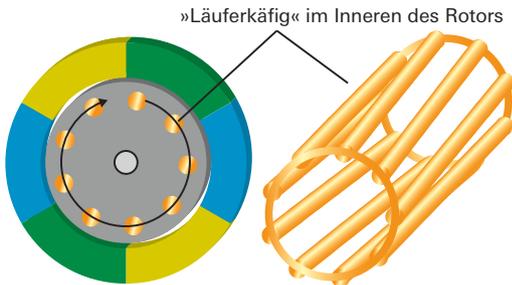


Das Funktionsprinzip von Elektromotoren basiert auf der Anziehung von Magnetfeldern. Ein beweglicher Permanentmagnet (Rotor) richtet sich an ortsfesten Magneten (Stator) aus (A). Äquivalent kann auch eine stromdurchflossene Spule (B) das Statorfeld erzeugen (um es zu führen und zu verstärken, wird meist ein Eisenkern verwendet). Allerdings bleibt der Rotor in diesen Fällen stehen, sobald er sich ausgerichtet hat. Um ihn weiterzubewegen, kann man zusätzliche Spulen so anordnen und zwischen ihnen hin- und herschalten, dass das äußere Magnetfeld um das Zentrum der Apparatur herumläuft. Diesem folgt dann der Rotor (C). Ein sich gleichmäßig drehendes Feld mit konstanter Amplitude entsteht in realen Maschinen meist mittels dreier sinusförmiger Ströme, die um 120 Grad phasenverschoben sind. Mehrere Spulen werden passend dazu räumlich im Stator verteilt (D).

## Drei Bauformen von Motoren

### ASM

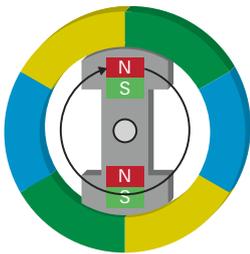
Asynchronmaschine



Das äußere Feld induziert Ströme im Rotor und erzeugt so dessen Magnetfeld.

### PMSM

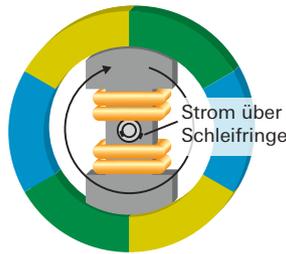
permanentmagneterregte Synchronmaschine



Dauermagnete im Rotor

### FESM

fremderregte Synchronmaschine



gewickelte Spulen im Rotor

Die am häufigsten verwendeten Motorentypen in Elektroautos lassen sich anhand ihrer Arbeitsweise unterscheiden. Dabei bewegt stets ein umlaufendes Magnetfeld den ebenfalls magnetischen Rotor.

In der permanentmagneterregten Synchronmaschine (PMSM) erhält der Rotor sein Feld durch Dauermagneten (die Darstellungen sind schematisch – reale Motoren besitzen mehr Polpaare).

Bei der fremderregten Synchronmaschine (FESM) sorgen Spulen im Rotor für dessen Magnetfeld. Der dafür erforderliche Gleichstrom gelangt über Schleifkontakte in die Wicklungen.

Bei den Asynchronmaschinen (ASM) entsteht das Rotorfeld durch Induktion: Dazu sind leitende Metallstäbe eingebettet. Das äußere Drehfeld ruft in ihnen eine Spannung hervor, die über Ringe an den Stabenden kurzgeschlossen wird (»Läuferkäfig«). Die dadurch fließenden Ströme erzeugen ein Magnetfeld.

Die Kraft und damit letztlich Drehmoment und Leistung entsteht aus dem Wechselspiel des Stroms in den Spulen des Stators mit dem so genannten Erregerfeld im Rotor. Letzteres übernimmt die Kraftübertragung. Man kann es sich wie ein Abschleppseil vorstellen: Ein liegen gebliebener Pkw (Rotor) wird von einem vorausfahrenden Fahrzeug (Stator) gezogen. Die Kraft überträgt ein Seil (Erregerfeld), das möglichst stark sein sollte (hohe Energiedichte). Die Erzeugung des Erregerfelds ist es dann auch, wodurch sich die drei Varianten der Drehfeldmaschinen voneinander unterscheiden.

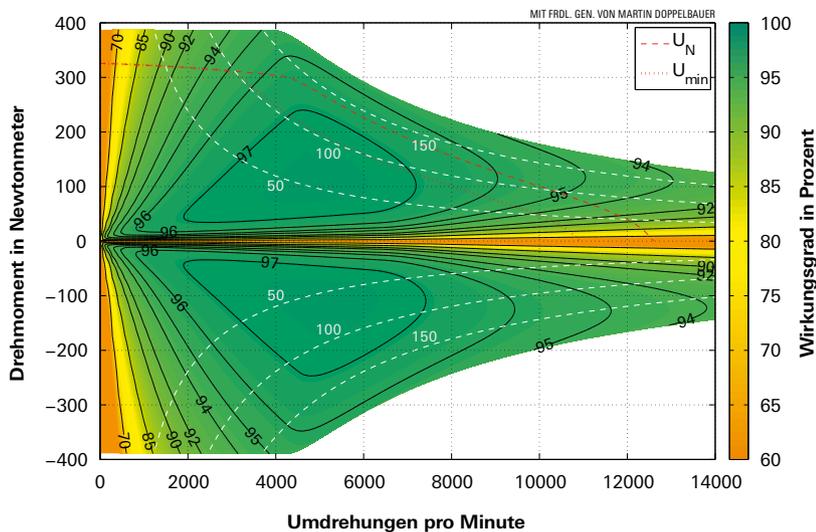
Bei der PMSM wird das Erregerfeld von Permanentmagneten hervorgerufen, bei der FESM von stromdurchflossenen Spulen. Rotorspulen gibt es auch in der ASM. Sie sind aber nicht aus Windungen von Kupferdrähten aufgebaut, sondern haben die Form eines leicht verdrehten Käfigs aus Kupferstäben mit je einem Ring an beiden Enden, der sie kurzschließt. Der für das Erregerfeld nötige Strom entsteht erst durch Induktion aus dem Statorfeld. Deshalb werden Asynchronmaschinen manchmal auch als Induktionsmotoren bezeichnet.

Für den Aufstieg der permanentmagneterregten Synchronmaschine war entscheidend, dass Wissenschaftler im Lauf des letzten Jahrhunderts immer neue und bessere Materialien für Permanentmagneten entdeckt haben. Das historisch erste Material war ab zirka 1940 Aluminium-Nickel-Kobalt (AlNiCo) mit einer magnetischen Energie von bis zu 150 Kilojoule pro Kubikmeter. Wegen einer geringen Resistenz gegenüber Gegenfeldern (»Koerzitivfeldstärke«) eignet es sich allerdings nicht für elektrische Maschinen. Ab den 1960er Jahren folgte Ferrit. Seine Energiedichte, also die magnetische Energie pro Volumen, ist etwa dreimal geringer, aber es hat eine hohe Koerzitivfeldstärke und funktioniert daher in Elektromotoren gut. Außerdem ist Ferrit sehr preisgünstig. In einfachen PMSM und vor allem in Gleichstrommaschinen wird Ferrit häufig verwendet.

Seit den 1970er Jahren gibt es zunehmend leistungsfähigere Magneten mit Seltenen Erden. Zunächst waren das Samarium-Kobalt-Legierungen (SmCo, bis 300 Kilojoule pro Kubikmeter) und dann ab etwa 1990 überwiegend Neodym-Eisen-Bor (NdFeB, bis 450 Kilojoule pro Kubikmeter). Neodym wird heute hauptsächlich in China gefördert. NdFeB-Magneten benötigen außerdem das Seltene Erdmetall Dysprosium, das für Temperaturstabilität sorgt und rund zehnmals teurer als Neodym ist. Durch die Monopolstellung Chinas haben die Preise in der Vergangenheit rasante Berg- und Talfahrten durchlaufen. Deshalb bereiten sich viele große Automobilhersteller und Zulieferer auf die Einführung permanentmagnetfreier Elektromotoren vor, also ASM und FESM.

Kritisch bei NdFeB-Magneten ist auch der hohe Anteil von Eisen (um 60 Prozent), das leicht durch Luftsauerstoff oxidiert wird. Die Oberfläche der fertigen Magneten muss sorgfältig versiegelt werden, zum Beispiel durch eine Aluminiumschicht. Wird diese bei der Montage beschädigt, ist ein vorzeitiger Ausfall des Motors programmiert.

Um die Effizienz eines Antriebs zu beurteilen, ist das so genannte Leistungsgewicht ein wichtiger Indikator. Es bezeichnet das Motorgewicht, das zur Erzeugung einer



Das Drehmoment eines Elektromotors hängt von der Drehzahl und der Batteriespannung ab. In diesem simulierten Verlauf bei einer permanentmagneterregten Synchronmaschine bleibt das Drehmoment zunächst nahezu konstant (»Grunddrehzahlbereich«) und fällt ab, sobald die Maximalspannung der Batterie erreicht ist – im entladenen Zustand ( $U_{\min}$ ) früher als im vollen ( $U_N$ ). (Die grauen Linien kennzeichnen die Dauerleistung in Kilowatt.) Der Wirkungsgrad liegt meist deutlich über 90 Prozent, sowohl im Betrieb als Motor (obere Hälfte) als auch bei der Rückgewinnung von Energie, etwa beim Bremsen (untere Hälfte).

bestimmten mechanischen Leistung nötig ist. Klassische Industriemotoren – wie zum Beispiel in Rolltreppen, Aufzügen, Kühlanlagen und Kompressoren – wiegen rund zehn Kilogramm pro Kilowatt mechanischer Dauerleistung. Solche Antriebe sind besonders robust und laufen wartungsfrei über viele Jahrzehnte. Sie sind allerdings zu schwer für elektrische Autos. Pkw oder elektrische Bahnen werden heute von Motoren mit Leistungsgewichten unter einem Kilogramm pro Kilowatt angetrieben. Damit liegen sie auf einem ähnlichen Niveau wie moderne Verbrennungskraftmotoren.

Der Stand der Forschung ist allerdings schon deutlich weiter: Inzwischen sind 0,1 Kilogramm Motorgewicht pro Kilowatt Dauerleistung möglich. Solche Elektroantriebe sind leistungsfähiger als die besten Verbrennungskraftmaschinen, die zum Beispiel im Formel-1-Rennsport eingesetzt werden. Neben der Anwendung in elektrischen Pkw soll damit in Zukunft auch das elektrische Fliegen möglich werden. Hierbei denken die Ingenieure nicht nur an Kleinflugzeuge, sondern an Maschinen mit 50 bis 100 Passagieren für Flugstrecken bis 1000 Kilometer. Die elektrische Energie muss dabei nicht allein aus Batterien stammen, sondern könnte von Generatoren bereitgestellt werden, die ständig mit hohem Wirkungsgrad im optimalen Drehzahlbereich laufen.

Um Elektromotoren mit Hilfe von Magnetfeldern anzutreiben, nutzt man sowohl die Lorentzkraft – das ist die Kraft auf bewegte Ladungen im Magnetfeld –, als auch die Reluktanzkraft oder maxwellsche Grenzflächenkraft, die Anziehungskraft zwischen einem Magneten und beispielsweise einem Stück Eisen. Sie spielt bei »weichmagnetischen« Materialien eine Rolle, die sich leicht magnetisieren lassen. Solche Stoffe führen die Magnetfelder und ermöglichen es, bei gleicher Größe mehr Leistung zu übertragen. Deswegen besteht ein Elektromagnet üblicherweise nicht nur aus einer Spule, die das magnetische Feld erzeugt, sondern enthält zudem einen weichmagnetischen Kern aus Elektroblech, der es leitet und verstärkt.

Elektroblech ist im Grunde ein mit Silizium und Aluminium legierter Stahl. Der Werkstoff hat einen niedrigen magnetischen Widerstand, so dass mit wenig Strom ein

starker magnetischer Fluss erzeugt werden kann. Die »relative Permeabilitätszahl« von Elektroblech in einem Motor ist, abhängig von dessen Drehmoment und Drehzahl, rund 100-fach besser als die von Luft. Das bedeutet: Für den gleichen Strom bekommt man 100-mal mehr Flussdichte. Leider hat Elektroblech die negative Eigenschaft, dass der magnetische Fluss ab einer bestimmten Stromstärke kaum noch ansteigt.

Der magnetische Fluss erzeugt gemeinsam mit dem Strom der Spulen die Kraft, welche den Motor antreibt. Aus dieser Kraft und dem Hebelarm, also dem halben Durchmesser des sich drehenden Rotors, entsteht das Drehmoment. Drehmoment und Drehzahl ergeben schließlich die mechanische Motorleistung.

### Schon jetzt extrem effizient – und in Zukunft immer kompakter

Alle rotierenden elektrischen Maschinen lassen sich in beiden Leistungsflussrichtungen betreiben, das heißt als elektrischer Motor sowie als Generator. Dieses Umkehrprinzip wurde schon zur Zeit der ersten Elektromotoren entdeckt. Es ermöglicht die »Rekuperation«, die Rückspeisung von Energie in die Batterie bei Bergabfahrt oder beim Abbremsen vor Ampeln und Staus. Der Wirkungsgrad eines gut konstruierten Elektromotors kann weit über 90 Prozent erreichen (siehe Diagramm oben), während Verbrennungsmotoren Werte um 30 Prozent aufweisen.

Da Elektroantriebe die elektrische Energie bereits so gut in mechanische Bewegung umsetzen, geht es bei den aktuellen Entwicklungen vor allem darum, das Leistungsgewicht zu optimieren. Je leichter ein Motor ist, umso weniger Platz braucht er und umso weniger Energie muss beim Beschleunigen und Abbremsen des Fahrzeugs auf ihn selbst aufgewendet werden. Beispielsweise wiegt der elektrische Antriebsmotor des BMW i3 rund 50 Kilogramm. Er erreicht bei seiner Dauerleistung von 75 Kilowatt ein Leistungsgewicht von 0,67 Kilogramm pro Kilowatt. Ein prototypischer Hochleistungsmotor, der am Karlsruher Institut für Technologie entwickelt wurde und zum Antrieb eines umgebauten Audi A1 dient, wiegt bei einer Dauerleistung von 70 Kilowatt nur noch rund 13 Kilo-

gramm. Er hat also ein Leistungsgewicht von 0,19 Kilogramm pro Kilowatt.

Um diese hohen Leistungen zu erreichen, ohne dabei den Motor zu vergrößern, stehen prinzipiell drei Wege offen: mehr magnetische Flussdichte, mehr Strom in den Wicklungen und eine höhere Drehzahl.

Die magnetische Flussdichte wird wie erwähnt durch die Sättigung des Elektroblechs eingeschränkt. Bessere Blechsorten sind nur in geringen Produktionsmengen und zu sehr hohen Kosten verfügbar. Solche mit Kobalt legierten Stähle werden beispielsweise im Rennsport eingesetzt. Für Serien-Pkw sind sie zu teuer.

Die zweite Möglichkeit zur Steigerung der Leistungsdichte besteht darin, den Strom zu erhöhen. Das verursacht aber Verluste und somit Wärme, denn die Wicklungen sind aus Kupferdraht, und der hat nun einmal einen gewissen elektrischen Widerstand. Daneben gibt es noch weitere Quellen für Verluste, vor allem im Elektroblech durch die ständige Ummagnetisierung und durch Wirbelströme. Allerdings überwiegen in heutigen Elektromotoren die Stromwärmeverluste.

Entscheidend für die Menge an Strom, den man über längere Zeit durch einen Motor treiben kann, ist also die Kühlung. Bei heutigen Traktionsmotoren umschließt den Stator ein hohlwandiges Gehäuse, durch das Kühlwasser gepumpt wird. Moderne Entwicklungen gehen noch viel weiter: Beispielsweise leitet eine Lanze Kühlflüssigkeit in

die hohl gebohrte Motorwelle. Oder man sprüht einen Ölnebel direkt auf die Wicklungen im Inneren des Motors.

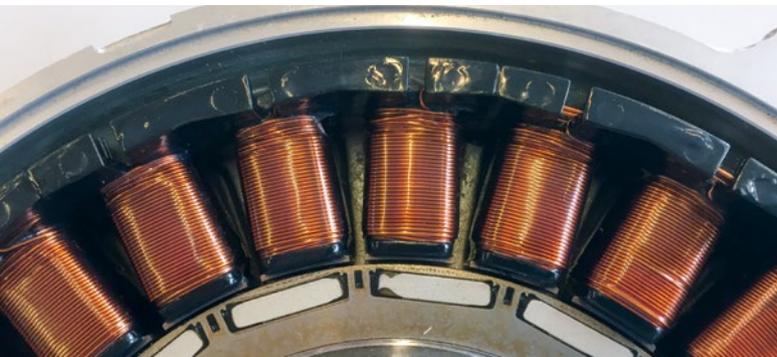
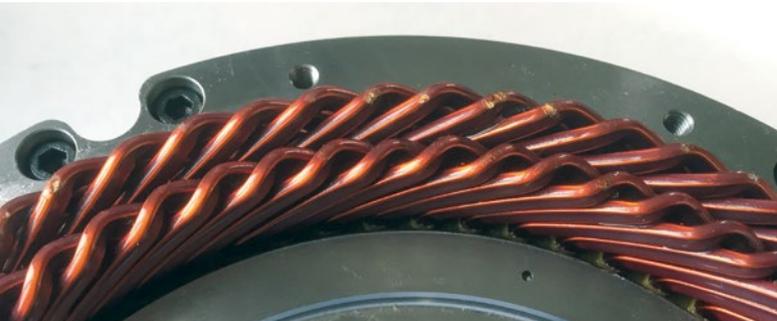
Die neuesten Forschungen laufen dahin, das Kühlwasser direkt zu den Kupferleitern in die Nuten des Statorblechpakets zu bringen, um den Wärmetransport weiter zu verbessern. Gleichzeitig erhöht die Verwendung von Rechteckleitern an Stelle von Runddrähten die »Nutfüllung«, das heißt, auf der gleichen Fläche wird mehr Kupfer untergebracht (siehe oberes Bild auf dieser Seite). All das stellt ganz neue Herausforderungen an die elektromagnetische Berechnung sowie die Konstruktion und Fertigungstechnik. Prototypen dazu sind teilweise schon realisiert, aber noch lange nicht bereit für die Großserie.

Wie auch immer die technische Lösung aussieht, in jedem Fall ergibt sich eine maximal zulässige Verlustenergie, also die höchstmögliche Wärmemenge, die man gerade noch abführen kann. Sie bestimmt den erreichbaren »Dauerstrombelag«. Das ist der gesamte Strom aller Leiter bezogen auf den Rotorumfang. Heutige Traktionsantriebe liegen typischerweise bei 50 000 bis 100 000 Ampere pro Zentimeter im Dauerbetrieb. Für kurzzeitige Spitzenbelastungen in der Beschleunigungsphase sind bis rund 200 000 Ampere pro Zentimeter möglich. Die zusätzliche Wärmemenge wird dann temporär im Blechpaket gespeichert und anschließend weggekühlt.

Als dritte und letzte Option zur Verbesserung der Leistungsdichte bleibt die Drehzahl, das heißt die Oberflächengeschwindigkeit des Rotors. Gerade in dieser Hinsicht hat sich in den letzten Jahren viel getan. Typische Industriedmotoren laufen mit bis zu 3000 Umdrehungen pro Minute. Roboterantriebe erreichen 6000 Umdrehungen pro Minute. Schon die ersten serientauglichen Elektroautos fuhrten mit wiederum doppelt so hohen Spitzendrehzahlen. Aktuelle Entwicklungen reichen in der Serie bis 20 000, in der Forschung schon bis 30 000 Umdrehungen pro Minute.

Um diese schnell laufenden Motoren anzusteuern, ist eine Wechselspannung mit entsprechend hoher Frequenz nötig. Sie reicht derzeit bis zu einem Kilohertz, teils noch darüber hinaus. Dazu zerhackt man die von der Batterie gelieferte Gleichspannung durch leistungselektronische Schalter, so genannte Wechselrichter oder DC/AC-Konverter. In der Praxis sind heute Taktfrequenzen weit oberhalb von zehn Kilohertz üblich. Für eine präzise Regelung muss jeder Schaltimpuls mit leistungsfähigen Computersystemen genau berechnet werden. Das ist erst seit wenigen Jahren möglich.

Wesentlich höher als auf 30 000 Umdrehungen pro Minute werden sich die Drehzahlen voraussichtlich nicht mehr steigern lassen. Zum einen muss das Getriebe sie wieder auf die typischen 1500 Umdrehungen pro Minute heruntersetzen, die bei Höchstgeschwindigkeit am Rad anliegen. Zum anderen muss die mechanische Festigkeit des Rotors der Fliehkraftbelastung standhalten. Je nach Rotorkonstruktion – teils mit Magneten, teils mit Kupferkäfig – kommt man bei den für Traktionsmotoren üblichen Baugrößen (200 bis 300 Millimeter Außendurchmesser des Blechpakets des Stators) auf Oberflächengeschwindigkeiten von 100 bis 150 Meter pro Sekunde. Außerdem nehmen mit steigender Drehzahl die Verluste durch die



Die Spulen im Stator von Motoren werden entweder als verteilte (oben) oder konzentrierte Wicklungen (unten) ausgeführt. Für große, schnell laufende Maschinen sind erstere besser geeignet. Fast alle leistungsstarken Antriebe enthalten darum verteilte Wicklungen. Besonders kompakte Konstruktionen haben dabei eckige Leiter (hier abgebildet) statt runder, um den Raum besser auszunutzen.

MIT FRIEDRICH VON MARTIN DOPELBAUER

ständige Ummagnetisierung im Eisenkern immer mehr zu, so dass sich die Leistung ab einer gewissen Grenze gar nicht mehr verbessern lässt.

Anders als Verbrennungsmaschinen erzeugen Elektroantriebe bereits aus dem Stand ein kräftiges Drehmoment, das bis zu höchsten Drehzahlen reicht. Man benötigt daher keine Kupplung und kein mehrgängiges Getriebe. Aber auch beim Elektromotor muss man die Drehzahl der Welle an die gewünschte der Räder anpassen. Typischerweise liegt zwischen beiden rund ein Faktor zehn. Dazu dienen Getriebe, die meist zwei Stufen besitzen. Sie sind kompakt – typischerweise kleiner als der Elektromotor selbst – und erreichen auf Grund der wenigen bewegten Teile sehr hohe Wirkungsgrade von weit über 90 Prozent.

Man könnte auch langsam laufende Motoren bauen, die ohne Getriebe direkt auf die Räder einwirken. Aber sie hätten zwangsläufig eine schlechte Leistungsdichte. Direktantriebe sind bei vergleichbarer Leistung größer, schwerer und teurer als schnell laufende Zentralantriebe. Außerdem sinkt der Motorwirkungsgrad, da sich Eisen- und Reibungsverluste erhöhen. Deshalb arbeiten alle heutigen Serien-Elektroautos mit schnellen Elektromotoren und einem kleinen Getriebe.

Vereinzelt haben auch Elektroautos umschaltbare Untersetzungen, also mehrere Gänge. Das ist interessant, wenn ein großes Anfahrtdrehmoment mit einer hohen Endgeschwindigkeit kombiniert werden soll, beispielsweise im Rennsport. Im Allgemeinen vereinnahmen solche Getriebe aber unnötig viel Platz und Gewicht, ganz zu schweigen von den Verlusten durch die vielen rotierenden Wellen und Zahnräder. Selbst der Tesla Model S, der in 4,4 Sekunden von 0 auf 100 Kilometer pro Stunde beschleunigt und eine Höchstgeschwindigkeit 225 Kilometer pro Stunde erreicht, kommt mit einer festen Getriebeuntersetzung aus.



## Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter

[www.spektrum.de/  
t/elektromobilitaet](http://www.spektrum.de/t/elektromobilitaet)

Trotz der technologischen Unterschiede zwischen FESM, ASM und PMSM sind die Betriebseigenschaften aller elektrischen Antriebe relativ ähnlich. Im Grunddrehzahlbereich bei niedrigen Geschwindigkeiten arbeitet die Maschine mit einem gleich bleibenden magnetischen Fluss. Um ihn konstant zu halten, steigert die Elektronik die Spannung proportional zur Frequenz und damit zur Drehzahl. Gleichzeitig begrenzen die Wärmeverluste und die abführbare Kühlleistung des Motors den dauernd zulässigen Strom. Maximaler Strom und Magnetfluss sind im Grunddrehzahlbereich also konstant, und damit gilt das auch für das maximal erreichbare Drehmoment (siehe

Diagramm auf S. 68). Die Motorleistung wiederum ergibt sich aus Drehmoment und Drehzahl. Daher steigt die verfügbare Leistung im Grunddrehzahlbereich von null (bei Stillstand) bis zum Höchstwert an, der etwa bei der Eckdrehzahl erreicht wird. Sie liegt meist zwischen einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 40 bis 60 Kilometern pro Stunde und ist abhängig von der Motorauslegung.

Oberhalb der Eckdrehzahl folgt der Feldschwächbereich. Der Frequenzumrichter – das Bauteil, das den Motor immer mit der passenden Wechselspannung versorgt – nutzt nun die maximal verfügbare Batteriespannung. Die Frequenz wird weiterhin proportional zur Geschwindigkeit erhöht. Weil aber der magnetische Fluss proportional zum Verhältnis von Spannung zur Frequenz ist, wird er zunehmend schwächer. Der thermisch zulässige Dauerstrom bleibt der gleiche. Insgesamt fällt darum das Drehmoment umgekehrt proportional zur steigenden Drehzahl ab. Die verfügbare Dauerleistung (Drehmoment mal Drehzahl) bleibt konstant. Diese Zusammenhänge gelten vor allem für Traktionsmotoren, die als Hauptantrieb in rein elektrischen Autos oder in Plug-in-Hybridfahrzeugen eingesetzt werden. Elektromotoren in Mild- und Full-Hybridfahrzeugen, so genannte getriebeintegrierte Motoren, werden etwas anders ausgelegt, funktionieren aber nach dem gleichen Prinzip.

## Nur eine volle Batterie liefert auch die volle Motorleistung

Die Spannung der Batterie sinkt ab, je weiter sie sich entlädt. Typische Batterien in heutigen Serienfahrzeugen liefern zum Beispiel maximal 360 Volt im geladenen Zustand. Die Spannung geht bis auf 320 oder sogar 300 Volt zurück, wenn die Batterie nahezu leer ist. Sie hat einen wichtigen Einfluss auf das Betriebsverhalten. Bei geringerer Spannung endet der Grunddrehzahlbereich bei entsprechend kleineren Drehzahlen und der Feldschwächbereich beginnt früher. Proportional zur verfügbaren Spannung sinkt dann die maximale Motorleistung. Das kann man bei einigen Fahrzeugen (etwa dem Renault Zoe) bei Vollgas auf dem Display beobachten.

Ingenieure konnten in den letzten zwei Jahrzehnten all diese Gestaltungsmöglichkeiten auf die Arbeitsweise elektrischer Antriebe nutzen, um die Motoren – verglichen mit ihren Vorgängern aus großen Industriemaschinen – effizient genug für einen Einsatz in Pkw zu machen. Höhere Drehzahlen, bessere Lösungen zur Kühlung, stärkere Magneten, moderne Elektronik und Computersteuerung haben das Leistungsgewicht insgesamt etwa um einen Faktor zehn verbessert. Aktuelle Konstruktionen in den Laboren und Entwicklungen für den Rennsport lassen im Vergleich zu den gegenwärtigen Serienmodellen eine Steigerung um noch einmal eine Größenordnung realistisch erscheinen. Mit Halbleitern aus Siliziumkarbid steht beispielsweise die nächste Revolution im Bereich der Leistungselektronik bevor: Sie halten höhere Temperaturen aus, ermöglichen geringere Verluste und kürzere Schaltzeiten. Solange noch an so vielen Stellen Optimierungspotenzial steckt, werden elektrische Antriebe auch in Zukunft immer kompakter und leistungsfähiger werden. ◀



# FREISTETTERS FORMELWELT ORDNUNG IM CHAOS

**Die natürliche Welt ist voller Chaos. Wenn wir die Übersicht bewahren wollen, brauchen wir einen klaren Blick. Den liefert uns die Mathematik.**

**Florian Freistetter** ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«.  
» spektrum.de/artikel/1561182

**M**athematik soll Dinge verständlicher machen. Wer den Umgang mit Formeln und Symbolen nicht gewöhnt ist, mag das anders empfinden. Wer aber die Sprache der Mathematik beherrscht, sieht vieles klarer. Zum Beispiel mit dieser Formel:

$$R(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } \|\vec{x}(i) - \vec{x}(j)\| \leq \epsilon \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Sie beschreibt einen »Rekurrenzplot«, ein Mittel zur Analyse nichtlinearer dynamischer Systeme. Ein dynamisches System ist beschreibbar als ein Punkt, der sich in einem »Phasenraum« bewegt. Leider kann man sich diesen abstrakten mathematischen Raum im Allgemeinen nicht vorstellen. Schon eines der einfachsten dynamischen Systeme, ein Objekt ohne Ausdehnung im Raum, erfordert zur Beschreibung seines Zustands sechs Zahlen: drei Koordinaten für die Position im Raum und noch einmal drei für die Geschwindigkeit in jeder der drei Raumrichtungen. Das System hat also sechs Freiheitsgrade und der zugehörige Phasenraum sechs Dimensionen.

In diesem Raum beschreibt der Systemzustand eine Kurve, die Phasenraum-Trajektorie. Die gilt es irgendwie zu visualisieren, um das Systemverhalten analysieren zu können. Mehr als drei Dimensionen können wir aber anschaulich nicht darstellen. Genau hier hilft uns der Rekurrenzplot weiter.

In der Formel steht der Vektor  $\vec{x}$  für den Systemzustand in Abhängigkeit von der Zeit, die hier nicht kontinuierlich verläuft, sondern aus getrennten (»diskreten«) Einzelpunkten besteht. Man betrachtet das System zu zwei verschiedenen Zeitpunkten  $i$  und  $j$  und bestimmt den Abstand, den die Punkte der Trajektorie zu den beiden Zeitpunkten voneinander haben (das wird mit den beiden vertikalen Doppelstrichen bezeichnet). Ist der Abstand kleiner als ein vorgegebener Wert  $\epsilon$ , dann liefert die Formel eine 1, ansonsten eine 0. Im ersten Fall nimmt das System zu den beiden verschie-

denen Zeitpunkten  $i$  und  $j$  ähnliche Zustände ein. Ein perfektes, reibungsfreies Pendel zum Beispiel wird immer wieder den gleichen Zustand einnehmen, den es auch schon in der Vergangenheit innehatte. Die Phasenraum-Trajektorie wird also in gleichen Zeitabständen wieder am selben Ort des Phasenraums vorbeikommen. Ein chaotisches System dagegen nimmt vielleicht auch einen Zustand ein, den es früher schon hatte, aber ohne jede Regelmäßigkeit.

**D**er Rekurrenzplot, der sich aus der obigen Gleichung ergibt, ist stets zweidimensional. Auf beiden Achsen ist die Zeit aufgetragen, und an der Stelle  $(i, j)$  des Diagramms setzt man genau dann einen Punkt, wenn  $R(i, j)=1$  ist. Die Methode wurde 1987 von Physikern der Universität Genf entwickelt und seitdem zur Analyse einer Vielzahl dynamischer Systeme eingesetzt.

Die Reduktion eines hochdimensionalen Phasenraums auf einen zweidimensionalen Rekurrenzplot führt unweigerlich zu einem Verlust an Information. Viele grundlegende dynamische Eigenschaften bleiben aber erhalten. Anhand der Strukturen, die in einem Rekurrenzplot sichtbar werden, lässt sich bestimmen, ob das System sich periodisch oder quasiperiodisch verhält, ob es stationär ist oder sich im Lauf der Zeit langsam entwickelt. Man kann aber auch herausfinden, ob sich im System Änderungen für die Zukunft ankündigen und auf welchen Zeitskalen sie zu erwarten sind.

Besonders interessant ist der Einsatz von Rekurrenzplots bei natürlichen Phänomenen wie zum Beispiel dem Sonnenfleckenzyklus oder dem Wetterphänomen El Niño. Diese Vorgänge sind angenähert periodisch: Zirka alle elf Jahre gibt es ein Maximum an Sonnenflecken; ungefähr alle vier Jahre kehrt das Muster der Meeresströmungen im Pazifik wieder. Aber die Regelmäßigkeit wird durch chaotische Phänomene gestört. Will man dieses Chaos durchschauen, dann braucht man den klaren Blick der Mathematik.

# MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

## KARTENSPIEL-ALGEBRA

MIT FRIEDRICH-GERHARDT-KUNSTWERKSTÄTTE GMBH

**Welche Struktur steckt hinter dem Kinderspiel »Dobble«? Die Antwort lautet: projektive Ebenen über endlichen Körpern. Aber diese Worte haben hier nicht ihre landläufige Bedeutung.**



**Ralf Goertz** promovierte 1997 an der Humboldt-Universität zu Berlin in Psychologie über ein Thema aus der EEG-Analyse. Im anschließenden Mathematikstudium befasste er sich unter anderem mit Differenzmengen. Zurzeit arbeitet er als Biostatistiker bei der Advanced Medical Services GmbH in Mannheim.

» [spektrum.de/artikel/1561184](http://spektrum.de/artikel/1561184)

Neulich erzählte ein Kollege von dem Kinderspiel »Dobble«. Dieses besteht aus 55 Karten, von denen jede acht verschiedene Symbole trägt. Die Aufgabe besteht darin, auf zwei ausgelegten Karten dasjenige Symbol zu identifizieren, das auf beiden Karten vorkommt, und zwar schneller als die anderen Mitspieler. Kinder haben ihren Spaß daran, und die Erwachsenen fragen sich, wie es denn überhaupt sein kann, dass zwei beliebig ausgewählte Karten immer genau ein Symbol gemeinsam haben.

»Ganz einfach«, antwortete ich auf die entsprechende Frage meines Kollegen. »Es gibt insgesamt  $55 \cdot 7 + 1 = 386$  verschiedene Symbole. Das Symbol 1 kommt auf jede Karte. Die restlichen 385 Symbole werden auf die übrigen sieben Plätze auf den 55 Karten verteilt. Dann besteht die Schnittmenge zwischen zwei beliebigen Karten stets aus dem Symbol 1.«

Diese triviale – und natürlich nicht ernst gemeinte – Lösung ist maximal asymmetrisch: Ein Symbol dient als das gemeinsame aller Paare von Karten. Doch das würde das Spiel extrem langweilig machen. Ideal wäre eine symmetrische Lösung, also eine, bei der jedes Symbol gleich häufig als dasjenige auftritt, das die Kinder finden müssen. Wenn diese Bedingung erfüllt ist, kommen alle Symbole automatisch auch einzeln mit der gleichen Häufigkeit  $h$  vor. Eine solche Lösung kann es mit 55 Karten nicht geben, denn wenn es insgesamt  $x$  verschiedene Symbole gibt, müsste einerseits  $h \cdot x = 8 \cdot 55 = 440$  sein, der Anzahl der insgesamt verwendeten Symbole; andererseits müsste  $x$  mal die Anzahl  $h(h-1)/2$  der Kartenpaare, die ein bestimmtes Symbol gemeinsam haben, gleich der Anzahl

Es werden immer wieder zwei Karten zugleich aufgedeckt. Wer als Erster das beiden Karten gemeinsame Symbol findet, darf beide einheimsen. Der Spieler mit dem größten Stapel hat gewonnen – eine von mehreren Möglichkeiten, Dobble zu spielen.





$55 \cdot 54/2 = 1485$  aller möglichen Paare von Karten sein. Das lässt sich aber mit keinem  $h$  erreichen. Es gibt daher keine symmetrische Lösung mit 55 Karten zu je  $h=8$  Symbolen.

Fügt man jedoch zwei Karten hinzu, könnte die Rechnung aufgehen: Hat man 57 Karten mit je acht Symbolen, so kommt jedes der 57 verschiedenen Symbole auf acht Karten vor und damit in 28 von 1596 Paaren als gemeinsames Symbol.

Allgemein gilt: Wenn jede Karte  $h$  Symbole trägt und jedes Symbol insgesamt  $h$ -mal vorkommt, dann benötigt man insgesamt  $s = h(h-1) + 1$  Karten und ebenso viele verschiedene Symbole. Diese Erkenntnis sagt uns allerdings noch nicht, wie wir die Symbole auf die Karten verteilen müssen, damit die Bedingung »Zwei beliebige Karten haben genau ein Symbol gemeinsam« erfüllt ist. Und es ist nicht gesagt, dass es für jedes  $h$  eine solche Verteilung gibt.

Im Folgenden bezeichnen wir die Symbole mit den Nummern  $0, 1, \dots, s-1$ , was sich als zweckmäßig erweisen wird. Für kleine Werte von  $h$  findet man eine geeignete Verteilung noch einigermaßen leicht durch Probieren. Für den Fall  $h=2$  ist es sogar sehr einfach: Wir benötigen  $s=3$  verschiedene Symbole. Die drei Karten enthalten dann jeweils eins der drei möglichen Paare von Symbolen:  $\{0, 1\}$ ,  $\{1, 2\}$  und  $\{2, 0\}$ .

Für  $h=3$ , also  $s=7$ , kommt man mit etwas Mühe ebenfalls auf eine Lösung:

- $\{0, 1, 3\}$
- $\{1, 2, 4\}$
- $\{2, 3, 5\}$
- $\{3, 4, 6\}$
- $\{4, 5, 0\}$
- $\{5, 6, 1\}$
- $\{6, 0, 2\}$

Die Nummerierung der Symbole ist zunächst willkürlich. Man hätte daher auch überall die 2 mit der 3 vertauschen und so mit der Karte  $\{0, 1, 2\}$  anfangen können. Trotzdem ist die gewählte Darstellung sinnvoller.

### Differenzmengen

$\{0, 1, 3\}$  hat nämlich eine besondere Eigenschaft, die  $\{0, 1, 2\}$  nicht hat:  $\{0, 1, 3\}$  ist eine Differenzmenge. Um das zu erklären, ist etwas modulare Arithmetik nötig. Zwei Zahlen heißen kongruent modulo der natürlichen Zahl  $s > 1$ , wenn sie bei der Division durch  $s$  denselben Rest lassen.

So werden zum Beispiel bei der Uhrzeit auch die Nachmittagsstunden häufig mit Zahlen unter 12 angegeben, also etwa 3 Uhr statt 15 Uhr. Der Grund ist, dass eine analoge Uhr nur 12 Stunden hat und daher beide Uhrzeiten durch denselben Zeigerstand repräsentiert werden. Die mathematische Schreibweise dafür ist  $15 \equiv 3 \pmod{12}$ . Das funktioniert genauso gut für negative Reste: 3 Uhr ist 9 Stunden vor Mittag, daher gilt auch  $-9 \equiv 3 \pmod{12}$ . Kongruente Zahlen unterscheiden sich also nur um

Vielfache des Moduls, man kann sie daher zu so genannten Restklassen zusammenfassen. Von ihnen gibt es zu jedem Modul  $s$  genau  $s$  Stück. Üblich ist es, den kleinsten nichtnegativen Rest als Vertreter der Restklasse zu benutzen. Mit diesen Resten lässt sich beliebig addieren, subtrahieren und multiplizieren. Gerät man dabei aus dem Bereich  $0, 1, \dots, s-1$  heraus, addiert oder subtrahiert man  $s$  so lange, bis das Ergebnis wieder in dem Bereich liegt.

Eine Differenzmenge der Ordnung  $m$  ist nun eine Menge von  $h = m + 1$  natürlichen Zahlen mit der Eigenschaft, dass jede Restklasse modulo  $s$  mit Ausnahme der Null genau einmal als Differenz zweier Elemente auftritt. Da es  $h \cdot (h-1)$  verschiedene Möglichkeiten gibt, Differenzen zweier verschiedener Elemente zu bilden, muss demnach  $s = h(h-1) + 1 = m^2 + m + 1$  sein. Für das obige Beispiel mit der Ordnung 2 und damit dem Modul 7 sieht es so aus:

- $1 \equiv 1 - 0 \pmod{7}$
- $2 \equiv 3 - 1 \pmod{7}$
- $3 \equiv 3 - 0 \pmod{7}$
- $4 \equiv 0 - 3 \pmod{7}$
- $5 \equiv 1 - 3 \pmod{7}$
- $6 \equiv 0 - 1 \pmod{7}$

Warum man von der Ordnung  $m = h - 1$  und nicht direkt von der Ordnung  $h$  spricht, wird später klar werden. Übrigens kann  $\{0, 1, 2\}$  keine Differenzmenge sein, denn mit ihr ergibt sich die 1 als Differenz sowohl aus  $1 - 0$  als auch aus  $2 - 1$ .

Hat man erst einmal eine Differenzmenge der Ordnung  $m$  (siehe zum Beispiel »Eine Differenzmenge der Ordnung 4«, unten), dann schreibt man ihre Elemente – beziehungsweise die Symbole mit den zugehörigen Nummern – auf eine Karte des Dobble-Spiels (die »Urkarte«). Alle anderen Karten sind daraufhin leicht zu erzeugen. Die  $n$ -te Karte entsteht, indem man zu jeder Zahl der Urkarte die Zahl  $n$  addiert und das Ergebnis (wie ab jetzt immer) modulo  $s$  betrachtet. Nach  $s$  erzeugten Karten ist man wieder beim Ausgangspunkt angelangt. In den Beispielen oben sind die Karten entsprechend dieser Regel dargestellt. Bezeichnet man die Ausgangskarte  $\{d_1, d_2, \dots, d_h\}$  mit  $D$ , so ergibt sich auf Grund des Konstruktionsprinzips die  $n$ -te Karte als  $\{d_1 + n, d_2 + n, \dots, d_h + n\}$ , was man kurz

als  $D + n$  schreibt. Die Zahlen auf jeder dieser Karten bilden ebenfalls eine Differenzmenge, denn das  $n$  fällt bei der Bildung der Differenz wieder weg:  $d_i + n - (d_j + n) = d_i - d_j$ .

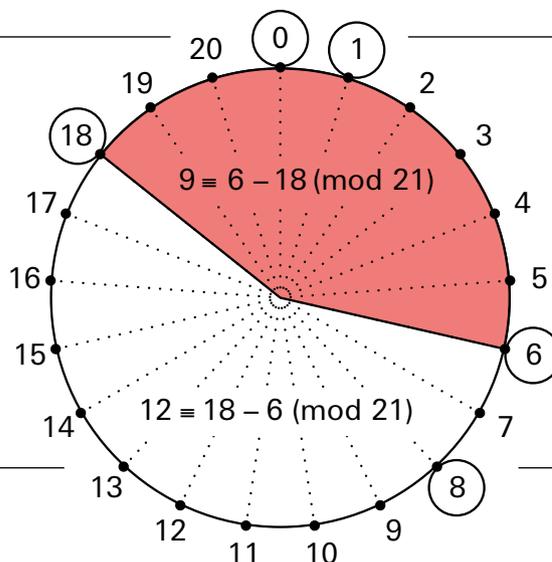
Viel wichtiger für das Funktionieren des Spiels ist es, dass zwei beliebige verschiedene Karten  $D + n_1$  und  $D + n_2$  immer genau ein Symbol (sprich eine Zahl) gemeinsam haben. Das sieht man, indem man alle möglichen Differenzen  $d_i + n_1 - (d_j + n_2)$  von Zahlen der Karten  $D + n_1$  und  $D + n_2$  betrachtet. Wenn diese beiden Karten die gleiche Zahl enthalten sollen, muss zum Beispiel die  $i$ -te Zahl von  $D + n_1$  gleich der  $j$ -ten Zahl von  $D + n_2$  sein. Daraus folgt  $d_i - d_j = n_2 - n_1$ . Die rechte Seite  $n_2 - n_1$ , nennen wir sie  $c$ , ist ungleich 0 und unabhängig von  $i$  und  $j$ . Andererseits gibt es, da  $D$  eine Differenzmenge ist, genau ein Paar  $(i, j)$  mit der Eigenschaft, dass  $d_i - d_j = c$  ist. Also gibt es auch genau ein solches Paar gleicher Zahlen auf den beiden Karten.

Damit ist das Problem, ein ganzes Kartenspiel herzustellen, auf das einfachere Problem zurückgeführt, eine Differenzmenge der passenden Ordnung für die Urkarte zu finden. Doch auch dieses Problem ist für größere Werte von  $h$  noch schwer genug, und es ist nicht klar, ob es zu jeder Ordnung überhaupt lösbar ist. Vielleicht versuchen Sie an dieser Stelle, eine Differenzmenge der Ordnung 3 zu finden, das heißt vier Zahlen, deren Differenzen alle von null verschiedenen Restklassen modulo 13 abdecken. Ihre Suche ist nicht von vornherein vergeblich. Dagegen gibt es keine Differenzmenge der Ordnung 6. Man kann also ein Dobble-Spiel mit 43 Karten zu je sieben Symbolen nicht auf die dargestellte Weise konstruieren. Es ist sogar überhaupt unmöglich, wie Richard Bruck und Herbert John Ryser 1949 bewiesen haben.

Einer Lösung des allgemeinen Problems kommt man näher, indem man eine auf den ersten Blick sehr seltsame Analogie aus der Geometrie zu Hilfe nimmt: Ein Symbol wäre ein Punkt und eine Karte eine Gerade, was ja eine Menge von Punkten oder auch Symbolen ist. »Zwei Karten haben stets genau ein Symbol gemeinsam« wäre zu übersetzen in »Zwei Geraden schneiden sich stets in genau einem Punkt«. Der andere elementare Satz der Geometrie, »Durch zwei Punkte geht stets genau eine Gerade«, besagt dann »Zu zwei Symbolen gibt es genau eine Karte, die diese beiden enthält«, eine Eigenschaft, die

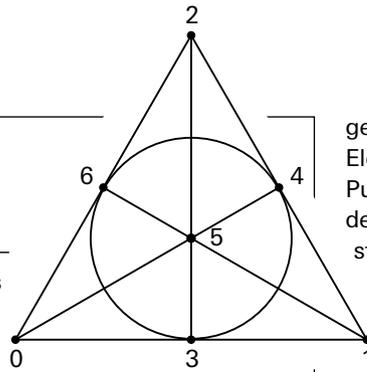
### Eine Differenzmenge der Ordnung 4

Die  $s = 21$  Restklassen sind kreisförmig angeordnet und die Elemente der Differenzmenge durch Kringel markiert. Die Anzahl der Kreissegmente zwischen zwei markierten Zahlen repräsentiert ihre Differenz. Die beiden möglichen Differenzen der Elemente 6 und 18 entsprechen den  $9 \equiv 6 - 18 \pmod{21}$  (mod 21) roten beziehungsweise  $12 \equiv 18 - 6 \pmod{21}$  weißen Segmenten.



## Fano-Ebene

Jede der sieben Geraden – auch der Kreis gilt hier als Gerade – enthält drei Punkte und schneidet jede andere Gerade in genau einem Punkt. Andererseits liegen je zwei Punkte immer genau auf einer Geraden. Die Nummern der Punkte einer jeden Geraden entsprechen den sieben Differenzmengen der Ordnung 2.



RALE GÖBERTZ

beim Spiel Dobble keine Rolle spielt, aber gleichwohl zutrifft. Das Beispiel mit den drei Symbolen pro Karte entspricht der so genannten Fano-Ebene.

Allerdings passt die Analogie noch nicht wirklich. Die gewöhnlichen Geraden in der Ebene enthalten im Gegensatz zu den Spielkarten unendlich viele Punkte, zudem gibt es unendlich viele von ihnen. Und zwei Geraden schneiden sich nicht immer in einem Punkt; sie könnten ja auch parallel sein. Aber die Mathematik bietet erstaunliche Möglichkeiten, die Analogie trotzdem zu retten.

### Endliche Körper

Zunächst die Sache mit der Unendlichkeit. Gewöhnliche Geraden enthalten unendlich viele Punkte, weil sie in der reellen Zahlenebene leben. Deren Punkte sind Paare aus reellen Zahlen, nämlich der  $x$ - und der  $y$ -Koordinate. Die reellen Zahlen ihrerseits sind zwar eine unendliche Menge; aber vom abstrakten algebraischen Standpunkt aus interessiert nur, dass man Elemente dieser Menge uneingeschränkt addieren, subtrahieren, multiplizieren und dividieren kann (mit Ausnahme der Division durch null) und stets wieder auf Elemente der Menge gerät. Eine Menge mit einer derart reichhaltigen algebraischen Struktur nennt man einen Körper. Und Körper gibt es auch mit endlich vielen Elementen.

Am einfachsten konstruiert man sich einen endlichen Körper mit Hilfe der modularen Arithmetik. Wenn  $p$  eine Primzahl ist, dann ist die Menge der Restklassen modulo  $p$  ein Körper; man pflegt ihn mit  $\mathbb{F}_p$  zu bezeichnen. Ein einfaches Beispiel ist der Körper  $\mathbb{F}_3$  (siehe »Rechnen in  $\mathbb{F}_3$ «, rechts). Dort findet man zum Beispiel, dass  $2 \cdot 2 = 1$  ist, denn 4 lässt bei der Division durch 3 den Rest 1. Im endlichen Körper  $\mathbb{F}_7$  ist  $6 \cdot 6 = 36 \equiv 1$ , also ist auch  $1/6 = 6$ . Und da  $2 \cdot 4 = 1$  ist, gilt  $1/2 = 4$  und  $1/4 = 2$  – etwas gewöhnungsbedürftig.

Die Anzahl aller Elemente eines endlichen Körpers ist stets eine Primzahl  $p$ , wie in den obigen Beispielen, oder eine Potenz  $p^k$  einer Primzahl. Der Körper mit  $p^k$  Elementen – es gibt im Wesentlichen nur einen – wird als  $\mathbb{F}_{p^k}$  bezeichnet, obwohl er für  $k > 1$  nicht die Menge der Restklassen modulo  $p^k$  ist (»Rechnen in  $\mathbb{F}_4$ «, S. 76).

Wie über dem Körper der reellen Zahlen gibt es auch über einem endlichen Körper eine Ebene; das ist wie

gewohnt die Menge aller Paare  $(x, y)$ , wobei  $x$  und  $y$  Elemente des Körpers sind. Geraden sind Mengen von Punkten, die eine gewisse Gleichung erfüllen – eine Geradengleichung eben. Aber es sollen sich ja zwei Geraden stets in einem Punkt treffen: keine Ausnahme für die Parallelen.

In der gewöhnlichen reellen Ebene entledigt man sich dieser Ausnahme durch eine schlichte Festsetzung: Zwei Parallelen schneiden sich im Unendlichen. Genauer ausgedrückt, führt man zu jeder Schar paralleler Geraden einen neuen Punkt ein, den man unendlich fernen Punkt nennt, und die Menge aller unendlich fernen Punkte heißt die unendlich ferne Gerade. Beim perspektivischen Zeichnen und beim Fotografieren wird diese abstrakte Definition konkret; im Bild treffen sich Parallelen (zum Beispiel Eisenbahnschienen) in einem ganz gewöhnlichen Punkt. Aus diesem Grund spricht man von der projektiven Geometrie.

Um sich gegen irgendwelche Widersprüche abzusichern und mit projektiver Geometrie rechnen zu können, treiben die Mathematiker erheblichen Aufwand: Sie siedeln ihre Punkte erst im dreidimensionalen Raum an und identifizieren danach alle Punkte, die auf derselben Geraden durch den Ursprung liegen (mit Ausnahme des Ursprungs selbst), mit einem einzigen Punkt der projektiven Ebene. Dabei werden die Geraden, die in der  $(x, y)$ -Ebene liegen, zu unendlich fernen Punkten und alle anderen zu gewöhnlichen Punkten.

Dasselbe Konzept kann man statt mit reellen Zahlen auch mit den Elementen eines endlichen Körpers durchführen; denn die ganze Rechnerei beschränkt sich auf die Anwendung der vier Grundrechenarten, und die gibt es in einem endlichen Körper auch. Man sollte nur nicht versuchen, sich unter dem dreidimensionalen Raum über einem endlichen Körper etwas Geometrisches vorzustellen.

In gewissem Sinn ist dieser Raum sogar schöner als der gewohnte. Im Gegensatz zum dreidimensionalen Raum über den reellen Zahlen hat er nämlich selbst die Struktur eines Körpers. Diese erfasst man mit einem Mittel, das den Algebraikern aus ihrem klassischen Arbeitsgebiet geläufig ist: dem Lösen von polynomialen Gleichungen. Man nehme eine Gleichung, die über dem gewählten Körper keine Lösung hat, zum Beispiel  $x^3 + x + 1 = 0$  über

### Rechnen in $\mathbb{F}_3$

Das Rechnen in einem Körper der Form  $\mathbb{F}_p$  ist nichts anderes als modulare Arithmetik. Zu jedem Element  $a$  gibt es ein additiv inverses Element  $-a \equiv p - a$ . Weil  $p$  eine Primzahl ist, gibt es auch zu jedem  $b \neq 0$  ein multiplikativ inverses Element  $b^{-1}$ . In  $\mathbb{F}_3$  ist die Zwei ihr eigenes Inverses, denn  $2 \cdot 2 = 4 \equiv 1 \pmod{3}$ .

+	0	1	2
0	0	1	2
1	1	2	0
2	2	0	1
·	0	1	2
0	0	0	0
1	0	1	2
2	0	2	1

RALE GÖBERTZ

## Rechnen in $\mathbb{F}_4$

In Körpern  $\mathbb{F}_{p^k}$  mit  $k > 1$  kommen zu den Elementen des Primkörpers  $\mathbb{F}_p$  noch das Element  $\lambda$  und seine Linearkombinationen  $a_{k-1}\lambda^{k-1} + \dots + a_1\lambda + a_0$  mit beliebigen  $a_i$  aus  $\mathbb{F}_p$  hinzu. Dabei ist  $\lambda$  per Definition eine Nullstelle des irreduziblen Polynoms  $x^k + b_{k-1}x^{k-1} + \dots + b_1x + b_0$  (mit Koeffizienten  $b_i$  aus  $\mathbb{F}_p$ ), also eines Polynoms, in das jedes Element des Primkörpers eingesetzt werden kann, ohne dass die Auswertung 0 ergibt, und das auch nicht als Produkt zweier Polynome kleineren Grades geschrieben werden kann. Im Beispiel lautet das Polynom  $x^2 + x + 1$ . Einsetzen von 0 oder 1 (die beiden einzigen Elemente von  $\mathbb{F}_2$ ) ergibt jeweils 1, daher wird formal  $\lambda$  eingeführt mit der Eigenschaft  $\lambda^2 + \lambda + 1 = 0$ , also  $\lambda^2 = -(\lambda + 1) = \lambda + 1$ , denn  $1 \equiv -1$  in  $\mathbb{F}_2$ . Daraus ergeben sich alle Regeln fürs Rechnen mit  $\lambda$ . Beispiel:  $(\lambda + 1) \cdot (\lambda + 1) = \lambda^2 + \lambda + \lambda + 1 = \lambda^2 + 1 = (\lambda + 1) + 1 = \lambda + 1 + 1 = \lambda$ . Dabei wurde zweimal die Tatsache ausgenutzt, dass  $a + a = 2a = 0$  ist, denn  $2 \equiv 0$  in  $\mathbb{F}_2$ .

+	0	1	$\lambda$	$\lambda + 1$
0	0	1	$\lambda$	$\lambda + 1$
1	1	0	$\lambda + 1$	$\lambda$
$\lambda$	$\lambda$	$\lambda + 1$	0	1
$\lambda + 1$	$\lambda + 1$	$\lambda$	1	0
·	0	1	$\lambda$	$\lambda + 1$
0	0	0	0	0
1	0	1	$\lambda$	$\lambda + 1$
$\lambda$	0	$\lambda$	$\lambda + 1$	1
$\lambda + 1$	0	$\lambda + 1$	1	$\lambda$

RALF GÖRTEZ

den rationalen Zahlen. (Eigentlich muss man mehr fordern als nur die Unlösbarkeit, nämlich die so genannte Irreduzibilität; aber darauf kommt es hier nicht an.) Der Standardtrick besteht darin, so zu tun, als hätte man eine Lösung – nennen wir sie  $\lambda$  (lambda) –, und den gegebenen Körper um  $\lambda$  und alles, was man aus  $\lambda$  durch Addieren und Multiplizieren von Körperelementen bilden kann, zu erweitern. Die Struktur dieser Körpererweiterung gibt dann Auskunft über die Lösbarkeit der Gleichung.

Ein so erweiterter Körper ist sogar einigermaßen überschaubar. Alle seine Elemente sind von der Form  $a_0 + a_1\lambda + a_2\lambda^2$ , wobei  $a_0, a_1$  und  $a_2$  Elemente des Grundkörpers sind, denn alle höheren Potenzen von  $\lambda$  lassen sich über  $\lambda^3 = -\lambda - 1$  auf höchstens zweite Potenzen zurückrechnen;  $\lambda$  ist ja eine Lösung unserer Gleichung. »Rechnen in  $\mathbb{F}_4$ « (oben) zeigt das Prinzip am Beispiel einer Erweiterung des kleinsten möglichen endlichen Körpers  $\mathbb{F}_2$ , der nur aus den Elementen 0 und 1 besteht.

Jetzt muss man nur noch den Punkt  $(a_0, a_1, a_2)$  des dreidimensionalen Raums über dem Grundkörper mit dem Element  $a_0 + a_1\lambda + a_2\lambda^2$  des erweiterten Körpers identifizieren und erhält eine Körperstruktur. Diese lässt sich hervorragend nutzen, um das eigentlich interessierende Objekt, die projektive Ebene über dem endlichen Körper  $\mathbb{F}_{p^k}$ , zu durchschauen. Denn jeder endliche Körper, insbesondere der erweiterte Körper  $\mathbb{F}_{p^{3k}}$ , hat ein so genanntes primitives Element. Das ist eines, dessen  $p^{3k} - 1$  verschiedene Potenzen alle von null verschiedenen Elemente des Körpers ergeben. Auch eine beliebige Gerade der projektiven Ebene kann man sich aus Potenzen des primitiven Elements bestehend denken. James Singer vom Brooklyn College zeigte 1938, dass deren Exponenten modulo  $s = p^{2k} + p^k + 1$  genau das Objekt ergeben, das für unsere Zwecke von zentraler Bedeutung ist: eine Differenzmenge der Ordnung  $m = p^k$  mit Modul  $p^{2k} + p^k + 1 = m(m + 1) + 1$ .

Für die Fano-Ebene verläuft das Verfahren zum Beispiel so: Als Gerade der projektiven Ebene wählen wir die Punkte von  $K = (\mathbb{F}_2)^3$ , deren Koordinate  $a_2 = 0$  ist. Das irreduzible Polynom zum Erzeugen von  $\mathbb{F}_8$  sei  $x^3 + x + 1$ . Dessen Nullstelle  $\lambda$  ist auch ein primitives Element von  $\mathbb{F}_8$ . Die sieben Potenzen von  $\lambda$  sind der Reihe nach  $\lambda, \lambda^2, \lambda^3 = \lambda + 1, \lambda^4 = \lambda^2 + \lambda, \lambda^5 = \lambda^2 + \lambda + 1, \lambda^6 = \lambda^2 + 1$  und  $\lambda^7 = 1$ . Die Punkte unserer gewählten Geraden mit der Gleichung  $a_2 = 0$  sind die Potenzen mit den Exponenten 1, 3 und 7, also ist  $\{1, 3, 0\}$  eine Differenzmenge der Ordnung 2.

Wenn Sie vorhin nicht durch Probieren auf eine Differenzmenge der Ordnung 3 gekommen sind, können Sie eine solche nun einfach ausrechnen. Nehmen Sie dafür  $x^3 + 2x^2 + x + 1$  als irreduzibles Polynom über  $\mathbb{F}_3$ . Dessen Nullstelle  $\lambda$  ist wieder ein primitives Element von  $\mathbb{F}_{27}$ , und unter seinen ersten 13 Potenzen finden Sie vier mit  $a_2 = 0$ .

### Multiplikatoren

Eine Differenzmenge liefert die Urkarte eines Dobble-Spiels, und alle anderen Karten entstehen aus ihr, indem man jeweils eine Konstante zu allen ihren Elementen addiert. Gibt es über dieses Sortiment hinaus noch weitere Differenzmengen zu ein und derselben Ordnung?

Um darüber einen Überblick zu gewinnen, bestimmt man für die genannte Schar einen Vertreter, die so genannte reduzierte Differenzmenge. Das ist diejenige, welche die Elemente 0 und 1 enthält. Man kann jede Differenzmenge  $D$  reduzieren, denn sie muss insbesondere zwei Elemente  $d_i, d_j$  enthalten, so dass  $d_i - d_j = 1$  ist. Durch Addition von  $-d_j$  zu allen Elementen von  $D$  wird sie zu einer reduzierten.

Addition irgendeiner Konstanten ersetzt also nur ein Element der Schar durch ein anderes. Wenn man aber jedes Element von  $D$  mit einer festen natürlichen Zahl multipliziert, kommt man möglicherweise zu einer neuen Schar und durch Addition einer geeigneten Konstanten zu deren reduziertem Vertreter.

Dabei muss man allerdings aufpassen. Nicht jede natürliche Zahl eignet sich als Faktor. Würde man zum Beispiel die Menge  $\{0, 1, 6, 8, 18\}$  – die im Bild S. 74 dargestellte Differenzmenge der Ordnung  $m = 4$  – mit 7 multiplizieren, dann erhielte man dreimal die 0, nämlich durch

0·7, 6·7 und 18·7, denn alle Produkte sind Vielfache des Moduls 21.

Beschränkt man sich jedoch auf Faktoren, die zum Modul 21 teilerfremd sind, erhält man wieder eine Differenzmenge. Eine Multiplikation mit dem Faktor 5 ergibt die Menge {0, 5, 9, 19, 6}, die man durch Addition von 16 auf die reduzierte Form {16, 0, 4, 14, 1} bringen kann.

Multiplizieren bringt allerdings nicht in jedem Fall etwas Neues. Man kann sogar zeigen, dass eine Multiplikation mit einem Teiler der Ordnung  $m$  (der stets teilerfremd zum Modul  $m^2 + m + 1$  ist) und damit auch die Multiplikation mit jeder Potenz eines solchen Teilers wieder auf dieselbe reduzierte Differenzmenge führt. Faktoren mit dieser Eigenschaft heißen Multiplikatoren. So sind 2, 4, 8, 16, 11 und natürlich 1 die Multiplikatoren für die auf S. 74 abgebildete Differenzmenge, denn das sind der Reihe nach die Potenzen von 2 modulo 21. Multipliziert man zum Beispiel jedes Element mit 8, erhält man sogar direkt dieselbe Menge {0, 8, 6, 1, 18}; nur die Reihenfolge der Elemente hat sich geändert.

Welche reduzierte Differenzmenge man auf dem oben beschriebenen Weg erhält, hängt von dem benutzten Polynom und dem primitiven Element ab. Jedoch lassen sie sich alle durch Multiplikation ineinander überführen. Insgesamt gibt es für die Ordnung  $p^k$  (mit dem Modul  $s = p^{2k} + p^k + 1$ ) genau  $\varphi(s)/(3k)$  reduzierte Differenzmengen, wobei der Zähler (der Wert der eulerschen  $\varphi$ -Funktion für  $s$ ) die Anzahl der möglichen (weil zu  $s$  teilerfremden)

Faktoren und der Nenner die Anzahl der Multiplikatoren angibt. Ob das alle sind, ist bisher nicht bekannt; für kleine Ordnungen ist das aber gesichert. Die Eigenschaften von Multiplikatoren liefern auch das beste Hilfsmittel zum Beweis der Vermutung, dass die Ordnung einer Differenzmenge immer eine Primzahlpotenz ist. Daniel Gordon hat 1994 gezeigt, dass das jedenfalls für alle Ordnungen unterhalb von 2 Millionen gilt.

Die Ordnung 7, die dem Dobble-Spiel zu Grunde liegt, ist eine Primzahl, es gibt daher Differenzmengen mit 8 Elementen. Wenn Sie sich also selbst ein Dobble-Spiel basteln möchten, fangen Sie mit {0, 1, 3, 13, 32, 36, 43, 52}, einer der zwölf reduzierten Differenzmengen dieser Ordnung, als Ausgangskarte an. Dann können Sie sogar mit 57 Karten spielen. Warum die Macher des Dobble-Spiels sich mit 55 Karten begnügt haben, bleibt deren Geheimnis. ◀

#### QUELLEN

**Bruck, R. H., Ryser, H. J.:** The Nonexistence of Certain Finite Projective Planes. In: Canadian Journal of Mathematics 1, S. 88–93, 1949

**Gordon, D. M.:** The Prime Power Conjecture is True for  $n < 2,000,000$ . In: Electronic Journal of Combinatorics 1, R6, 1994

**Singer, J.:** A Theorem in Finite Projective Geometry and Some Applications to Number Theory. In: Transactions of the American Mathematical Society 43, S. 377–385, 1938

# Unsere Neuerscheinungen!

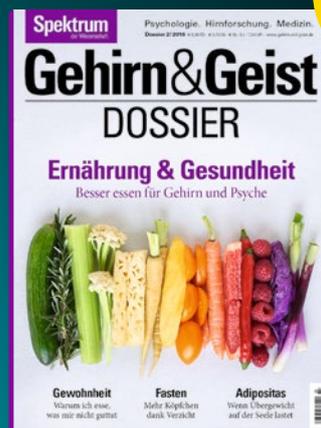
Ausgewählte  
Sonderhefte  
auch im  
PDF-Format



Biochemie: Wie entstand das Leben? • Bakteriophagen: Viren statt Antibiotika • Bakterien-Genetik: Die Rätsel des CRISPR/Cas-Systems • Nutztierhaltung: Tickende Zeitbombe • Kontingenzt: Evolution zwischen Zufall und Wiederholung • € 8,90



Standardmodell: Schöne neue Teilchenwelt • Eisdetektor: Neutrinojagd am Ende der Welt • Entschleuniger: Antimaterie in der Falle • Kernteilchen: Das Neutronenrätsel • Mathematik: Die seltsamsten Zahlen der Teilchenkollisionen • € 8,90; ab 25.5. 2018



Gewohnheit: Warum ich esse, was mir nicht guttut • Fasten: Mehr Köpfcchen dank Verzicht • Adipositas: Wenn Übergewicht auf der Seele lastet • Demenz: Ein Training gegen Alzheimer • Macht Schlafmangel dick? • € 8,90; ab 25.5. 2018

## Hier bestellen:

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

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

# GESCHICHTE WIE KAM ES ZUM DREISSIGJÄHRIGEN KRIEG?

SERIE  
**Der Dreißigjährige Krieg**

Teil 1: Juni 2018  
**Wie kam es zum  
Dreißigjährigen Krieg?**  
Axel Gotthard

**Chronologie des Kriegs**  
Daniel Carlo Pangerl

Teil 2: Juli 2018  
**Wittstock, 1636**  
Sabine Eickhoff

Teil 3: August 2018  
**War der Dreißigjährige Krieg europäisch?**  
Georg Schmidt

**Weil der Streit um die richtige Religion die Entscheidungsgremien des Alten Reichs lahmlegte, entfachte ein Aufstand in Böhmen 1618 einen der blutigsten Kriege der Weltgeschichte.**



**Axel Gotthard** lehrt Neuere und Neueste Geschichte an der Universität Erlangen-Nürnberg. Zu seinen Arbeitsschwerpunkten zählen das vormoderne Denken über Krieg und Frieden sowie die politische und kulturelle Entwicklung des Heiligen Römischen Reichs Deutscher Nation.

► [spektrum.de/artikel/1545895](https://spektrum.de/artikel/1545895)

Mit dem »Prager Fenstersturz« fing alles an – so die landläufige Meinung. Am 23. Mai 1618 werfen böhmische Adlige zwei habsburgische Statthalter und einen Sekretär aus dem Fenster der Prager Burg. Der Aufstand findet im Reich Unterstützung, und bald befinden sich die Vertreter der Konfessionen miteinander im Krieg. Tatsächlich herrschte aber seit Jahrzehnten Krisenstimmung, der böhmische Konflikt entzündete lediglich die längst bereite Lunte.



## AUF EINEN BLICK RELIGIONSKRIEG UND MACHTKAMPF

- 1** Weil die Vertreter der katholischen Seite ihre Mehrheit in den Reichsgremien ausnutzten, verweigerten die protestantischen um 1600 ihre weitere Mitarbeit.
- 2** Mit politischen Mitteln war das Reich nicht mehr kontrollierbar. Durch den »Prager Fenstersturz« am 23. Mai 1618 schlug der Konflikt in einen Krieg um.
- 3** Bis in die 1630er Jahre galt er beiden Konfessionen als gottbefohlenen Streiten um die Wahrheit. Dann aber wurde Deutschland zum Kriegsschauplatz für Frankreich und Spanien, zwei katholische Mächte.



1619 wählten Böhmens Adelige den Pfälzer Kurfürsten Friedrich V. auf den Prager Thron, nachdem sie den in Wien residierenden König Ferdinand II. für abgesetzt erklärt hatten. Friedrich hielt sich jedoch nur einen Winter lang, was ihm den Schmähtitel »Winterkönig« einbrachte.

► Aus dem Osten flog der Funke heran, der Deutschland in Brand setzen sollte: Am 23. Mai 1618 stürzten aufrührerische Adelige die beiden Statthalter des Königs von Böhmen samt ihrem Sekretär aus einem Fenster der Prager Burg. Denn der im fernen Wien residierende habsburgische Herrscher Matthias (1557–1619), überzeugter Katholik und obendrein Kaiser des Heiligen Römischen Reichs Deutscher Nation, schränkte die konfessionellen und politischen Freiheiten des überwiegend evangelischen Adels in Böhmen seit einigen Jahren mehr und mehr ein. Zudem hatte der greise Monarch einen katholischen Hardliner zum Nachfolger bestimmt: Von Ferdinand II. (1578–1637) war ein gegenreformatorischer Kurs zu erwarten. Sowohl die Wiener Hofburg als auch die böhmischen Stände warben nach diesem Eklat bei deutschen Fürsten ihrer jeweiligen Konfession um Unterstützung. Und diese ließen sich, obwohl Böhmen eigentlich gar nicht zum Reichsverband gehörte, in einen nicht enden wollenden Krieg hineinziehen.

»Gott ist's, der da streitet, wir samt allem was wir dazu bringen, mögen nur Instrument und Mittel sein, dadurch Gott unseren Widerpart darnieder wirft«, so agitierte eine vermutlich calvinistische Flugschrift in den 1630er Jahren (alle Zitate dieses Beitrags wurden heutiger Rechtschreibung weitgehend angepasst).

Wie das hatte geschehen können, fragten sich schon die Juristen und Diplomaten, die fast 30 Jahre nach dem Fenstersturz den Westfälischen Frieden aushandelten. Ausdrücklich hielten sie in den Verträgen fest: Schuld am Krieg seien vor allem die »Gravamina« gewesen, also jene zahlreichen »Beschwerden«, die katholische und evangelische Fürsten in den Vorkriegsjahrzehnten gegeneinander vortrugen.

Auf langen Listen warf man einander bössartige Verdrehungen des Augsburger Religionsfriedens vor. Der hatte 1555 die »alte Religion« und die der Anhänger Luthers anerkannt. Zudem war darin festgelegt: Die regionale Obrigkeit – ein Fürst oder Graf, in Reichsstädten der Magistrat – durfte sich frei für eine von beiden Konfessionen entscheiden. Das galt dann verbindlich für das jeweilige Territorium; wer einen anderen Glauben behalten wollte, durfte aber auswandern. So einfach dieses Grundprinzip klang, gab es doch viele offene Fragen, über die man in den Jahrzehnten um 1600 heftig stritt: Durften auch geistliche Fürsten, also beispielsweise Fürstbischöfe, evangelisch werden, oder verloren sie dann ihr Amt? Hatten weltliche Fürsten, die zum Protestantismus konvertierten, das Recht, katholische Klöster in ihrem Land aufzulösen? War auch calvinistische Glaubenspraxis legal, obwohl der Religionsfrieden den Calvinismus gar nicht erwähnte? Kein Wunder also, dass die Vertreter der Konfessionen einander mit Beschwerden konfrontierten.

Diese Gravamina setzten eine Ereigniskette in Gang, bei der die Reichsorgane nach und nach entweder ganz ausfielen oder wirkungslos wurden. Beispielsweise endete die lange Tradition Rheinischer Kurfürstentage. Dort waren nicht nur Angelegenheiten der Rheinanlieger besprochen worden. Denn mit vier der sechs deutschen Kurfürsten ließ sich auch hohe Reichspolitik diskutieren. Die enge Nach-

barschaft erleichterte überdies die Verabredung: Benötigte ein Kaiser eine Rückmeldung aus dem Reich, erhielt er sie von diesem Gremium sehr schnell. Doch im späten 16. Jahrhundert lehnten es die Kurfürsten und Erzbischöfe von Mainz, Köln und Trier ab, sich mit dem Kurfürsten der Pfalz überhaupt noch an einen Tisch zu setzen, da er Protstant war.

Umgekehrt weigerte sich dieser, in den Kurverein einzutreten, eine Vereinigung der Kurfürsten. Deren Satzung verpflichtete die Mitglieder zur engagierten Reichspolitik im engen Schulterschluss. In Heidelberg und in Berlin hielt man so eine Selbstverpflichtung nicht mehr für angemessen, weil die geistlichen Mitfürsten »mit lauter martialischen und kriegerischen Gedanken« erfüllt seien sowie »Gewissens halben«.

Im Widerstreit der Lesarten des Augsburger Religionsfriedens schrumpfte auch der Konsens darüber, wie man Widersprüche in politischen Verfahren abarbeiten könne. So strebten die katholischen Teilnehmer des Reichstags, also der Vollversammlung aller regionalen Obrigkeiten Mitteleuropas, nicht mehr nach deutlichen Mehrheiten oder gar einem von allen getragenen Beschluss. Vielmehr stimmten sie mit ihrer Mehrheit schon seit dem späten 16. Jahrhundert die Protestanten ohne Skrupel nieder.

#### **Klagen und Urteile werden blockiert**

Auch die beiden obersten Gerichtshöfe, Reichshofrat und Reichskammergericht, fielen als Schlichtungsinstanzen für Gravamina aus. So lehnten die Protestanten Ersteren ab, weil darin lauter enge Vertraute des Kaisers saßen – dort würden Justiz und Politik ungut vermischt. Das Kammergericht wurde unwirksam, weil seine Urteile durch eine unglückliche Konstruktion leicht zu blockieren waren: Man konnte eine »Visitationskommission«, die regelmäßig zur Kontrolle vorbeischaute, anrufen und eine Entscheidung prüfen lassen; so lange wartete das Urteil auf Vollzug. Im Jahr 1588 durfte unter anderem das Erzstift Magdeburg einen Juristen in besagte Kommission abordnen. Die katholischen Mitglieder der Kommission lehnten es aber ab, mit einem Vertreter des für sie Illegalen zusammenzuarbeiten. Denn das Magdeburger Domkapitel hatte einen Protestanten zum Landesherrn gewählt, was der Religionsfrieden in katholischer Lesart untersagte. Die Urteile des Kammergerichts konnte nicht mehr geprüft werden, und immer mehr harrten ihres Vollzugs.

1601 kam man auf die Idee, diese Krise durch einen Deputationstag zu lösen. Dieses gleichsam verkleinerte Abbild des Reichstags trat in unregelmäßigen Abständen zusammen, um im kleinen Kreis vom letzten Reichstag nicht restlos abgearbeitete Fragen zu klären oder dem nächsten vorzuarbeiten. Nun sollte er als letzte Instanz fungieren. Da Magdeburg ihm nicht angehörte, schien das eine Lösung. Doch wie im Reichstag waren die protestantischen Teilnehmer auch dort in der Minderheit. Sie zogen vorzeitig ab, um zu verhindern, dass sie von der altgläubigen Mehrheit überstimmt wurden (es ging um die Rechtslage von vier katholischen Klöstern in nun lutherischen Territorien). Ein halbes Jahrhundert lang sollte es keinen Deputationstag mehr geben.



**Ferdinand II. hatte bereits als Erzherzog von Innerösterreich seine politischen Ziele offenbart: Absolutismus und Gegenreformation. Seine Wahl zum König von Böhmen war daher für den dortigen, mehrheitlich protestantischen Adel inakzeptabel.**



ANG IMAGES (KOPPIERTION VON GEORG COLE, NACH EINER ZEICHNUNG VON MICHAEL HEER, UM 1590)

**Auf Reichstagen entschieden Kaiser, Kurfürsten, Fürsten, Grafen und Vertreter der Reichsstädte wichtige politische Fragen. Diese seit zirka 1500 bestehende Institution wurde durch den Konfessionsstreit wirkungslos (im Bild: Augsburger Reichstag 1530).**

Die letzte bis dahin noch arbeitsfähige Reichsinstitution wurde dann 1608 gesprengt. Im Frühjahr dieses Jahres verließen die Protestanten einen nach Regensburg einberufenen Reichstag, als ihre Forderung, die Rechtskraft des Augsburger Religionsfriedens noch einmal zu bestätigen, lediglich zu heftigen Disputen führte. Schon ehe der Reichstag auseinanderbrach, hielt ein Kommentator fest: »Hier geht alles zäh voran und doch drunter und drüber, kurz, Krieg ist in Sicht.«

Nur wenige Wochen später schlossen sich etliche evangelische Fürsten und Reichsstädte, vorwiegend aus Süddeutschland, zur »Union« zusammen, im Jahr darauf fast alle katholischen Territorien in der »Liga«. Ihre Satzungen verraten, dass sich beide Seiten mit dem Rücken an der Wand fühlten. Während die Mitglieder der Liga klagten, ihre Gegner planten die Ausrottung »der alten wahren, allein selig machenden Religion«, legten diese in der Satzung bereits fest, wie nach »Ausgang des Kriegs« mit erobertem Gebiet zu verfahren sei.

Zu den politischen Forderungen der Union gehörte es, Probleme, die zwischen den Konfessionen strittig waren, im kleinen Kreis besonders kompromissfähiger Vertreter beider Lager zu bereinigen. Man nannte das »composition«, nach dem lateinischen »componere«, zusammenbringen, vereinigen. Die Teilnehmer des von der Union erhofften Kompositionstags sollten sich einigen, anstatt nach Konfessionen abzustimmen. Doch die Altgläubigen in Reichshofrat und Reichstag wetteten über den notorischen »Ungehorsam« der evangelischen Minderheit und pochten auf die Entscheidungskompetenzen dieser beiden Gremien und des Kaisers. Der Vorschlag blieb bis 1618 auf der Tagesordnung – und wurde stets abgelehnt.

Ohne politischen Grundkonsens und funktionsfähige Institutionen war der Reichsverband nicht mehr steuerbar. Schon Jahre vor dem Aufstand in Prag sprühten deshalb die ersten Funken. 1610 ging es um eines der letzten noch nicht klar zwischen den Konfessionen verteilten Gebiete: ein Konglomerat von Territorien am Niederrhein im Umkreis der Städte Jülich und Kleve. Unionstruppen versuchten wiederholt auf fremdem Gebiet zu verhindern, dass Söldnerverbände zusammengestellt wurden, welche die umstrittenen Gebiete unter kaiserliche Verwaltung zwingen sollten. Es gab viele Tote. Vier Jahre später wiederholte sich das riskante Spiel.

Auch 1618 schauten Deutschlands Protestanten bangen Herzens zunächst an den Rhein. Nahe einem Städtchen namens Udenheim hatte der Fürstbischof von Speyer Befestigungsanlagen errichten lassen – und drohte damit das Kräfteverhältnis im Achtzigjährigen Krieg zu verschieben, dem Unabhängigkeitskrieg der calvinistisch geprägten niederländischen Nordprovinzen gegen die Zentralregierung in Madrid. Denn die neue Festung lag an der Heeresstraße von Oberitalien nach Holland und Seeland, unterstützte also die militärische Logistik Spaniens. Fürsten der Union setzten deshalb Truppen in Marsch, und nach kurzem Gefecht lagen die Mauern in Trümmern. Der Dreißigjährige Krieg brach demnach nicht aus heiterem Himmel über ein politisch gesundes Reich herein. Ohne Grundvertrauen und handlungsfähige Reichsorgane glich es vielmehr längst einem Pulverfass. Nach drei Beinahekatastrophen am Rhein zündete schließlich der Prager Funkenschlag: Die Unionsfürsten sympathisierten mit ihren aufbegehrenden böhmischen Glaubensgenossen, und Friedrich V. von der Pfalz (1596–1632) ließ sich von diesen 1619 zum neuen König wählen (siehe »Chronologie« ab S. 84).

Ein in Rothenburg angesetzter Unionstag debattierte ausgiebig über den Charakter des sich abzeichnenden militärischen Ringens. Bis auf wenige Mitglieder legten sich alle ausdrücklich darauf fest, dass man mit einer »religions sach« konfrontiert sei. Finstere katholische Kräfte wollten den Protestantismus ausrotten – heute in Böhmen, morgen im ganzen Reich. Deshalb müsse man

den Aufständischen helfen, »Gott strafte sonst die Unachtsamkeit«.

Auch die katholische Seite sorgte sich um die Religion in Deutschland. Böhmisches Nöte und Probleme interessierten wenig, man befürchtete aber »hochgefährliche Weiterungen, welche das Heilige Römische Reich unser geliebtes Vaterland wohl mit begreifen möchten«. Auf wessen Seite man sich zu schlagen habe, stand außer Frage, denn würde »man den Kaiser verlassen, werde die Reichscomposition noch viel weniger verhütet werden können«. Jede Verhandlungslösung in Böhmen konnte »leichtlich zu einer Consequenz im heiligen Reich gezogen« werden. Mit anderen Worten: Zugeständnisse an die aufständischen Protestanten dort könnten denen in Deutschland Rückenwind für ihre Forderung nach einem Kompositionstag geben.

Deshalb eilte die Liga den Habsburgern zu Hilfe. Am 8. November 1620 sprachen schließlich die Waffen. Bayerns Herzog persönlich gab den Schlachtruf aus: »Maria!«, hallte es von den Hängen des Weißen Bergs bei Prag. Im Namen der Gottesmutter siegten die katholischen Truppen. Kommandeur der Aufständischen war Christian von Anhalt (1568–1630) vom Heidelberger Kurhof. Mochte der Anlass auch böhmisch gewesen sein, so standen sich am Weißen Berg bereits deutsche Katholiken und Protestanten gegenüber – es war die erste große Schlacht des Dreißigjährigen Kriegs.

#### »Die seinen beschützen, die Feinde stürzen«

1629 schien das Ringen zu Gunsten der kaiserlich-katholischen Seite entschieden. Deren Fürsten ermunterten den Kaiser, die katholische Interpretation des Augsburger Religionsfriedens im »Restitutionsedikt« als einzig zulässige festzuschreiben. Hatte man nicht genau dafür elf Jahre lang verlustreich gekämpft? Mit der falschen Lesart sollte es vorbei sein, was die Protestanten an Hochstiften, Klöstern und anderem an sich gerissen hatten, sollten sie nunmehr zurückgeben.

Doch das Morden ging weiter, und die ideologischen Wellen brandeten immer höher. Flugschriften schäumten vor konfessionellem Geifer, und der gerechte Krieg mutierte zu einem von Gott befohlenen. Heerführer wie Gustav II. Adolf von Schweden (1594–1632) oder der Ligageneral Tilly (1559–1632) führten jeweils »des Herrn Krieg«, waren jeweils »Auserwählte, welche Gott der Herr gebraucht, die seinen zu beschützen und die Feinde zu stürzen«. Niemand konnte sich heraushalten, »weil Gott Neutralität zwischen Gott und dem Teufel mehr hasst« als den »Abfall zum Teufel«. Wer sich also in dem gottgefälligen Krieg für die falsche Seite entschieden hatte, beging damit eine immer noch weniger grauenhafte Sünde als jener, der sich gar nicht beteiligen wollte. Man würde Gott »versuchen, wenn man daheimen faulenzen wollte«.

Auch abseits der Regierungszentralen und Gelehrtenpulte galt der Dreißigjährige Krieg nach Ausweis vieler Schriftquellen als ein Glaubenskampf. Religiöse Deutungsmuster halfen der einfachen Bevölkerung, der schrecklichen Gegenwart einen Sinn abzutrotzen. Gerade Aufzeichnungen aus den späten Kriegsjahren, in denen die blanke Not in

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/t/krieg-und-frieden](http://www.spektrum.de/t/krieg-und-frieden)



FOTOLIA / FOTOS 593

weiten Teilen Deutschlands herrschte, lassen erahnen, wie intensiv man den Krieg als Kampf um Wahrheit und Seelenheil empfand. Für die Angehörigen der katholischen Eliten galt das insbesondere nach dem Scheitern des Restitutionsedikts kaum noch, und für die der protestantischen bedeutete der Tod des schwedischen Königs Gustav II. Adolf in der Schlacht von Lützen 1632 eine ebensolche Zäsur. Auf beiden Seiten waren zu viele Hoffnungen zerschlagen. Und seit 1635 drehte sich das Kriegsgeschehen nicht mehr in erster Linie um das konfessionelle und politische Antlitz Mitteleuropas. Deutschland war vielmehr zum Nebenkriegsschauplatz eines Hegemonialkampfs zwischen den katholischen Ländern Frankreich und Spanien geworden. Hatten die Flugschriften vordem Voraussetzungen eines »gerechten« Friedens diskutiert, der natürlich der Ketzerei des Gegners kein Terrain überlassen dürfe, umkreisten sie nun den »ehrvollen« Frieden. Nur ein solcher erlaube es, einen Kampf, der enorme Geldmengen verschlungen, unzählige Menschen das Leben gekostet und das Reich verwüstet hatte, endlich zu beenden.

Wie schwierig dieses Ziel zu erreichen war, offenbaren die Verträge des Westfälischen Friedens. Natürlich zogen sie neue Grenzlinien, es gab Gewinner und Verlierer wie nach jedem großen Krieg. Auch die Kompetenzen von Kaiser, Kurfürsten und Reichstag wurden angesprochen, doch beschränkte man sich auf wenige Allgemeinplätze. Ein Vielfaches an Umfang aber widmeten die Juristen und Diplomaten beider Seiten der konfessionellen Besitzstandsverteilung sowie der Frage, wie Deutschlands Protestanten und Katholiken künftig gewaltfrei miteinander leben könnten. Der Westfälische Frieden war über weite Passagen ein zweiter Religionsfrieden, der jenen von Augsburg kommentierte und modifizierte. Vier Jahrzehnte nach dem Desaster des Regensburger Reichstags war das Heilige Römische Reich Deutscher Nation endlich wieder ein funktionsfähiger Staat geworden. ◀

#### QUELLEN

**Gotthard, A.:** Der Dreißigjährige Krieg. Eine Einführung. Böhlau, Köln, Weimar, Wien 2016

**Gotthard, A.:** Wie funktionierte das Alte Reich? Die politischen Rahmenbedingungen. [www.bpb.de/geschichte/deutsche-geschichte/reformation/235715/wie-funktionierte-das-alte-reich](http://www.bpb.de/geschichte/deutsche-geschichte/reformation/235715/wie-funktionierte-das-alte-reich). In: Gotthard, A.: Luthers Thesen und die Folgen. Deutsche Geschichte im Zeichen konfessioneller Polarisierung 1517–1648. Bundeszentrale für politische Bildung, [www.bpb.de/reformation](http://www.bpb.de/reformation)

**Rebitsch, R. (Hg.):** 1618. Der Beginn des Dreißigjährigen Krieges. Böhlau, Wien, Köln, Weimar 2017

# DREISSIGJÄHRIGER KRIEG EINE CHRONOLOGIE

Schon im Vorfeld gärt es im Alten Reich, 1618 entzündet sich der Religionskrieg. Als sich ab 1630 immer mehr Staaten beteiligen, spielt der Glaube aber kaum noch eine Rolle.



Text von **Daniel Carlo Pangerl**, promovierter Historiker mit Schwerpunkt Mittelalter und Frühe Neuzeit. Der Wissenschaftspublizist lebt in Starnberg bei München.

» [spektrum.de/artikel/1545893](http://spektrum.de/artikel/1545893)

**1555** Der Augsburger Religionsfrieden sichert lutherischen Reichsständen freie Religionsausübung zu. Dabei gilt, dass die Konfession des jeweiligen Landesherrn die seiner Untertanen vorgibt.

**1593** Das Osmanische Reich erklärt dem Heiligen Römischen Reich Deutscher Nation den Krieg.

**23.6. 1606** Mit dem Frieden von Wien endet ein antihabsburgischer Aufstand ungarischer Adliger zu deren Gunsten und schafft damit einen Präzedenzfall.

**11.11. 1606** Der Friede von Zsitvatorok beendet den Langen Türkenkrieg, das Haus Habsburg ist politisch angeschlagen und hoch verschuldet.

**14.5. 1608** Gründung der protestantischen Union im schwäbischen Auhausen unter Vorsitz des Kurfürsten von der Pfalz

**10.7. 1609** Gründung der katholischen Liga in München unter Vorsitz des Herzogs von Bayern

**23.5. 1618** Der »Prager Fenstersturz« gilt als Auslöser des Dreißigjährigen Kriegs.

**22.8. 1619** Die böhmischen Stände setzen Ferdinand II. als König von Böhmen ab und wählen den protestantischen Kurfürsten Friedrich V. von der Pfalz zum neuen Herrscher.

## Vor dem Krieg

--- Grenze des Heiligen Römischen Reichs

— Militärgrenze

■ Habsburger Erblande 1616

◆ katholische Liga 1612

- |             |              |
|-------------|--------------|
| 1 Köln      | 7 Bamberg    |
| 2 Trier     | 8 Konstanz   |
| 3 Straßburg | 9 Ellwangen  |
| 4 Mainz     | 10 Augsburg  |
| 5 Fulda     | 11 Bayern    |
| 6 Würzburg  | 12 Eichstätt |

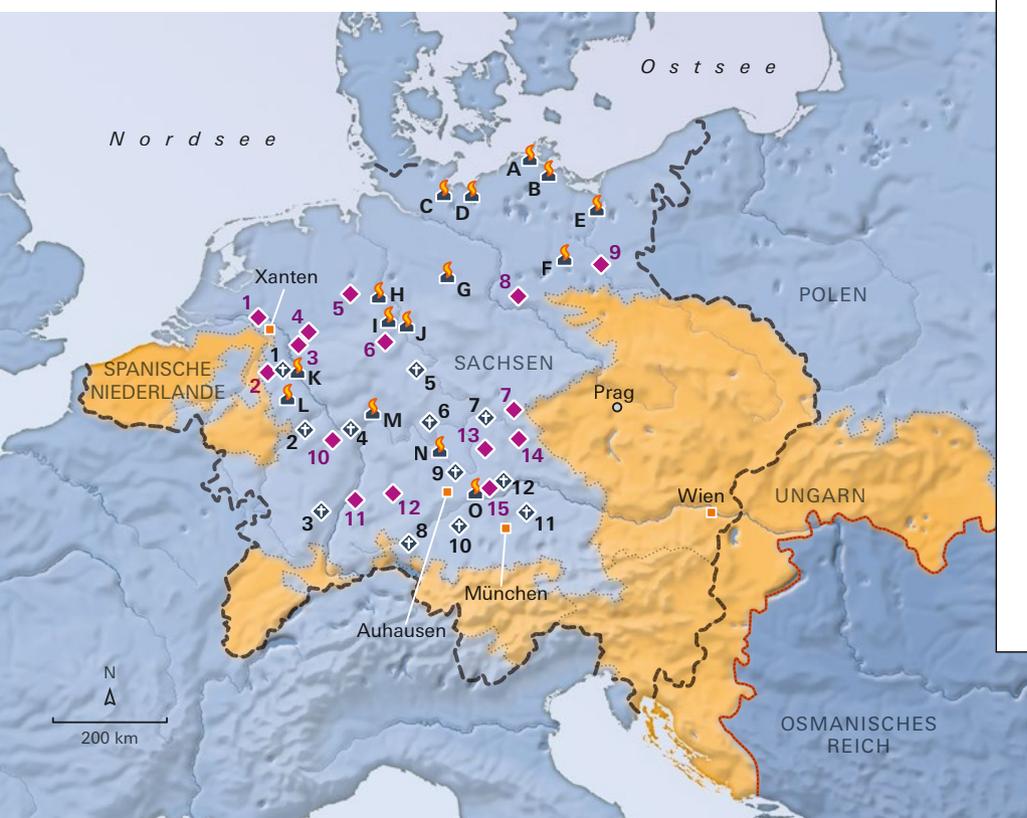
◆ protestantische Union 1612

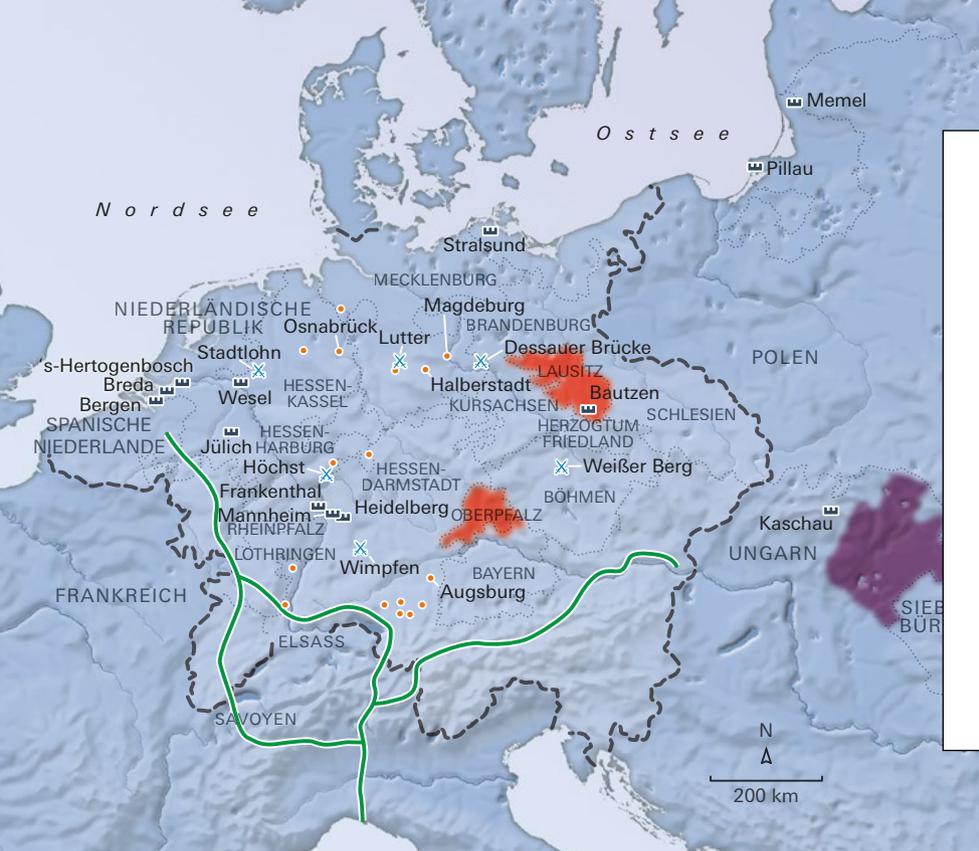
- |                 |                |
|-----------------|----------------|
| 1 Kleve         | 9 Brandenburg  |
| 2 Jülich        | 10 Rheinpfalz  |
| 3 Berg          | 11 Baden       |
| 4 Mark          | 12 Württemberg |
| 5 Ravensburg    | 13 Ansbach     |
| 6 Hessen-Kassel | 14 Oberpfalz   |
| 7 Bayreuth      | 15 Neuburg     |
| 8 Anhalt        |                |

🔥 städtische Unruhen 1600–1618

- |                |                |
|----------------|----------------|
| A Stralsund    | I Paderborn    |
| B Greifswald   | J Höxter       |
| C Lübeck       | K Köln         |
| D Wismar       | L Aachen       |
| E Stettin      | M Frankfurt    |
| F Berlin       | N Schwäb. Hall |
| G Braunschweig | O Donauwörth   |
| H Lemgo        |                |

■ Vertragsorte





## Der Krieg 1618–1629

- Grenze des Heiligen Römischen Reichs
- spanische Straße
- x wichtige Schlachten
- Belagerungen
- größere Orte, die vom Restitutionsedikt betroffen waren
- von Ferdinand II. 1621 an Bayern und Sachsen abgetretene Gebiete
- von Ferdinand II. 1621–1629 an Siebenbürgen abgetretene Gebiete

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMILIE-GRAFIK, NACH: E. BUTSCHAN / AXEL GOTTHARD; DER DREISSIGJÄHRIGE KRIEG - EINE EINFÜHRUNG, BOHLAU-VERLAG, KÖLN

**28.8. 1619** Ferdinand II. wird in Frankfurt am Main zum Kaiser des Heiligen Römischen Reichs Deutscher Nation gewählt.

**8.10. 1619** Der Kaiser verbündet sich mit Herzog Maximilian I. von Bayern zum Kampf gegen Böhmen.

**8.11. 1620** Schlacht am Weißen Berg: Truppen des Kaisers und der katholischen Liga unter dem Feldherrn Tilly besiegen das Heer der böhmischen Stände; Friedrich V. flieht.

**24.4. 1621** Auflösung der protestantischen Union

**Juni 1621** Ferdinand II. setzt seinen Anspruch auf die böhmische Krone durch, lässt 27 aufständische Adelige hinrichten, entmachtet die böhmischen Stände und setzt die Rekatholisierung des Landes in Gang.

**29.1. bis 4.2. 1622** Der protestantische Herzog Christian von Braunschweig lässt das katholische Paderborn plündern.

**19.9. 1622** Nach langwieriger Belagerung nimmt Tilly das protestantische Heidelberg ein.

**25.2. 1623** Herzog Maximilian von Bayern erhält die Kurwürde der Pfalz.

**6.8. 1623** Tilly schlägt den protestantischen Feldherrn Christian von Halberstadt bei Stadtlohn.

**13.8. 1624** Kardinal Richelieu wird leitender Minister in Frankreich.

**7.4. 1625** Der böhmische Feldherr Wallenstein erhält den Oberbefehl über die kaiserlichen Truppen.

**1625** Christian IV., der protestantische König von Dänemark, greift in den Krieg ein; seine Gegner sind Kaiser Ferdinand II. und die katholische Liga.

**25.4. 1626** Schlacht an der Dessauer Elbbrücke: Wallenstein siegt über Ernst von Mansfeld, einen mit Dänemark verbündeten Kriegsunternehmer.

**27.8. 1626** Schlacht bei Lutter am Barenberge: Christian von Dänemark unterliegt Tilly.

**Februar 1627** Offensive von kaiserlichen und Ligatruppen unter Wallenstein und Tilly. Diese vertreiben gegenriderische Söldner unter Führung Christians von Dänemark aus Mecklenburg, Pommern und Holstein.

**Januar 1628** Wallenstein wird Herzog von Mecklenburg.

**6.3. 1629** Mit dem kaiserlichen Restitutionsedikt erhält die katholische Kirche Besitzungen zurück, die protestantischen Fürsten übereignet worden waren.

**22.5. 1629** Im Frieden von Lübeck scheidet Christian von Dänemark aus dem Krieg aus.

**6.7. 1630** Kriegseintritt Schwedens: König Gustav II. Adolf landet mit seiner Armee auf Usedom.

**13.8. 1630** Ferdinand II. entlässt Wallenstein als Oberbefehlshaber.

**23.1. 1631** Frankreich und Schweden verbünden sich.

**20.5. 1631** Plünderung des protestantischen Magdeburg durch Tilly

**15.12. 1631** Der Kaiser setzt Wallenstein wieder in sein altes Amt ein.

**14./15.4. 1632** Schlacht bei Rain am Lech: Gustav II. Adolf siegt; Tilly wird verwundet und erliegt am 30.4. seinen Verletzungen.

**20.4. 1632** Die Schweden nehmen Augsburg ein, einen knappen Monat später München.



## Der Krieg 1630–1640

- Grenze des Heiligen Römischen Reichs
- Feldzug Gustav II. Adolfs 1631–1632
- spanischer Feldzug 1634
- x Siege der Kaiserlichen und ihrer Verbündeten
- x Niederlagen der Kaiserlichen und ihrer Verbündeten
- m Belagerungen
- Vertragsorte
- o sonstige Städte
- Heilbronner Bund
- Gebiete, die 1632–1633 unter französische Protektion kamen
- Gebiete, die 1633–1638 unter französische Protektion kamen

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ENDE-GRAFIK NACH: BRÜTSCHEW / GEOFFREY PARKER DER DREISSIGJÄHRIGE KRIEG. CAMPUS VERLAG, FRANKFURT / AXEL GOTTHARD

**16.11. 1632** Gustav II. Adolf fällt in der Schlacht bei Lützen. Sein Kanzler Oxenstierna führt die Staatsgeschäfte für die minderjährige Königin Christina.

**23.4. 1633** Schweden schließt mit den protestantischen Reichsständen den Heilbronner Bundesvertrag; darin wird Schwedens dominierende Rolle festgeschrieben.

**25.2. 1634** Vermutlich auf Befehl von Kaiser Ferdinand II. wird Wallenstein in Eger ermordet.

**6.9. 1634** Schlacht bei Nördlingen: Truppen des Kaisers und der katholischen Liga besiegen mit spanischer Unterstützung die Schweden und den Heilbronner Bund.

**19.5. 1635** Kriegserklärung Frankreichs an Spanien

**30.5. 1635** Die protestantischen Reichsstände rücken von den Schweden ab und schließen mit Kaiser Ferdinand II. den Prager Frieden. Im Gegenzug setzt dieser das Restitutionsedikt von 1629 aus.

**18.9. 1635** Kriegserklärung des Kaisers an Frankreich. In der Folge kämpft das katholische Frankreich an der Seite des protestantischen Schweden.

**27.10. 1635** Herzog Bernhard von Weimar läuft mit seinem Heer zu den Franzosen über.

**1636** Einmarsch kaiserlicher Truppen in Frankreich

**4.10. 1636** Schlacht bei Wittstock an der Dosse: Die Schweden siegen über eine kaiserlich-sächsische Armee.

**15.2. 1637** Nach dem Tod Ferdinands II. wird Ferdinand III. Kaiser.

**28.2. und 3.3. 1638** Bei Rheinfelden siegt das schwedisch-protestantische Heer.

**7.6. 1639** Schlacht bei Diedenhofen/Thionville: Die Franzosen unterliegen kaiserlichen und spanischen Truppen unter dem Feldherrn Piccolomini.

**18.7. 1639** Mit dem Tod Bernhards von Weimar löst sich dessen Armee auf; seine Territorien im Elsass fallen an Frankreich.

**13.9. bis 10.10. 1640** Der Regensburger Reichstag regt Friedensverhandlungen an.

**30.6. 1641** Der Hamburger Allianzvertrag verlängert das französisch-schwedische Bündnis.

**24.7. 1641** Stockholmer Waffenstillstand zwischen Schweden und Kurbrandenburg

**25.12. 1641** Die Hamburger Präliminarverträge zwischen Kaiser, Spanien, Frankreich und Schweden bestimmen Münster und Osnabrück als Verhandlungsorte für Friedensverhandlungen.

**2.11. 1642** Schlacht bei Breitenfeld: Schwedens Feldherr Torstenson schlägt ein kaiserlich-sächsisches Heer.

**4.12. 1642** Kardinal Richelieu stirbt, neuer leitender Minister in Frankreich wird Kardinal Jules Mazarin.

**14.5. 1643** Ludwig XIII. stirbt, Nachfolger wird sein Sohn Ludwig XIV., »der Sonnenkönig«.

**ab Juli 1643** Beginn der Verhandlungen zum Westfälischen Frieden

**August bis September 1644**

Frankreich erobert die rheinischen Städte Landau, Speyer, Worms, Oppenheim, Mainz und Bingen.

**17.12. 1644** Regierungsantritt von Königin Christina in Schweden

**5.3. 1645** Die Schweden dringen bis Wien und Prag vor; in der Schlacht bei Jankau in Böhmen erleidet die kaiserliche Armee eine schwere Niederlage.

**3.8. 1645** Schlacht von Alerheim bei Nördlingen: Niederlage der kaiserlich-bayerischen Armee gegen französische, weimarische und hessische Truppen

**29.8. 1645** Kaiser Ferdinand III. lädt die Reichsstände zum Westfälischen Friedenskongress.

**6.9. 1645** Waffenstillstand von Kötzschenbroda bei Dresden zwischen Schweden und Kursachsen

**1646** Trotz Friedensverhandlungen gehen die Gefechte und Verwüstungen in großen Teilen des Reichs weiter.

**13.9. 1646** kaiserlich-französischer Vorfriede

**8.1. 1647** spanisch-niederländischer Vorfriede

**18.2. 1647** kaiserlich-schwedischer Vorvertrag

**14.3. 1647** Waffenstillstand von Ulm zwischen Frankreich, Schweden, Hessen auf der einen sowie Bayern und Kurköln auf der anderen Seite

**30.1. 1648** Friede von Münster zwischen Spanien und den Niederlanden

**15.5. 1648** Beschwörung des spanisch-niederländischen Friedens

**7.5. 1648** Schlacht von Zusmarshausen bei Augsburg: Franzosen und Schweden besiegen die kaiserlich-bayerische Armee.

**24.10. 1648** Westfälischer Frieden von Münster

**20.11. 1648** Verdammung dieses Friedens durch Papst Innozenz X.

**April 1649** Beginn des Friedens-  
 exekutionskongresses in Nürnberg

**Juli 1650** Ende dieses Kongresses: Demobilisierung der Armeen und Abzug aus allen besetzten Gebieten

**Oktober 1652 bis Mai 1654**

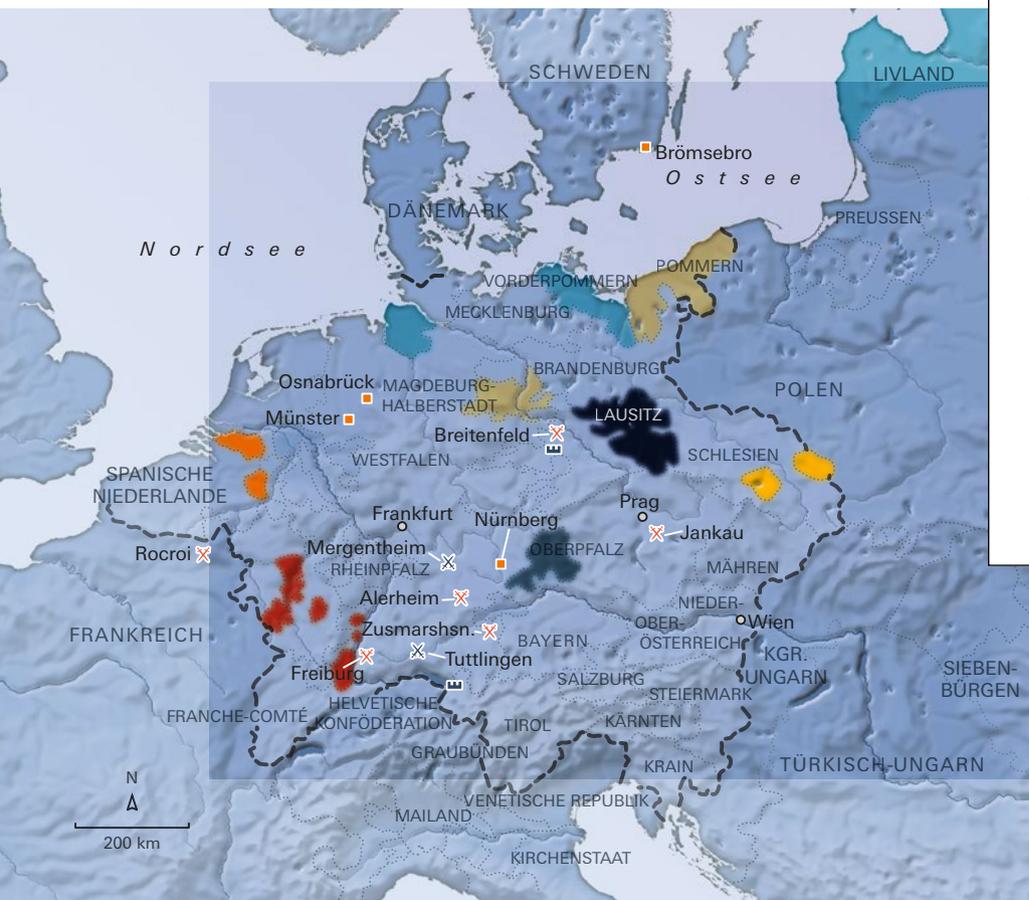
Reichstag in Regensburg. Die Verträge des Westfälischen Friedens inklusive der Nürnberger Beschlüsse werden Teil der Reichsverfassung.

**Der Krieg nach 1640**

- Grenze des Heiligen Römischen Reichs
- × Siege der Kaiserlichen und ihrer Verbündeten
- × Niederlagen der Kaiserlichen und ihrer Verbündeten
- Belagerungen
- Vertragsorte
- sonstige Städte

**Territoriale Veränderungen 1648**

- an Schweden
- an Brandenburg
- an Sachsen
- an Frankreich
- an die Niederländische Republik
- an Bayern
- an Polen



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / FENDE-GRANIK, MACH, E. BUTSCHAN / GEOFFREY PARKER, DER DREISSIGJÄHRIGE KRIEG, CAMPUS VERLAG, FRANKFURT / AXEL GOTTWARD

# REZENSIONEN



## GESCHICHTE HISTORIE ALS STICKARBEIT

Dieser reich illustrierte Bildband über den Teppich von Bayeux stellt die Geschichte des mittelalterlichen Kunstwerks umfassend dar.

► 1066 besiegte der Normannenherzog Wilhelm der Eroberer in der entscheidenden

Schlacht von Hastings das angelsächsische Aufgebot unter König Harald II. Die dramatischen Ereignisse von damals sind in einer einzigartigen Bildquelle festgehalten, dem weltberühmten Teppich von Bayeux.

Pierre Bouet und François Neveux (Universität Caen), zwei ausgewiesene Kenner der anglonormannischen Geschichte, legen in diesem reich illustrierten Bildband eine umfassende Gesamtdarstellung des

knapp 70 Meter langen und etwa einen halben Meter breiten Tuchstreifens vor. Sie beantworten Fragen zur Entstehungsgeschichte, zum Aufbau, zur Urhebererschaft und Intention des Kunstwerks, das 58 Einzel-szenen darstellt.

Zunächst beschreiben Bouet und Neveux die auf den Textilstreifen aufgestickte Bildergeschichte. Sie erörtern detailliert Szene für Szene, erklären die Darstellungen und ordnen sie in den histo-

rischen Kontext ein. Anhand verschiedener Aspekte des mittelalterlichen Lebens (Kleidung und Schmuck, Jagd und Tischkultur, Herrschaft und Repräsentation, Kriegswesen und Schiffsbau) vermitteln die Autoren interessante Einblicke in die höfische Welt des 11. Jahrhunderts.

Wie wirklichkeitsnah die Abbildungen auf dem Tuchstreifen sind, zeigt ein Vergleich mit archäologischen Funden bezie-



König Eduard der Bekenner spricht zu seinen Getreuen und stirbt (links). Harald, der Earl of Wessex, bekommt die Krönungskrone (rechts).

tik des Wandteppichs. Ging man bislang davon aus, dass es sich bei dem Tuchstreifen um ein Propagandawerk handle, das Wilhelms Herrschaft legitimieren und die Eroberung Englands rechtfertigen sollte, sehen die Autoren die eigentliche Botschaft des Teppichs eher darin, die Versöhnung zwischen Angelsachsen und Normannen hervorzuheben. Dies sei, so die Autoren, auch der Grund gewesen, warum die aufwändige Stickarbeit unmittelbar nach der Eroberung Englands und in relativ kurzer Zeit entstanden sei. Vermutlich von Wilhelms Halbbruder Odo, Bischof von Bayeux, in Auftrag gegeben, war der Teppich eine Gemeinschaftsproduktion mehrerer Stickwerkstätten, die an verschiedenen Abschnitten zeitgleich arbeiteten und diese anschließend zusammensetzten, wie die Nahtstellen noch heute zeigen.

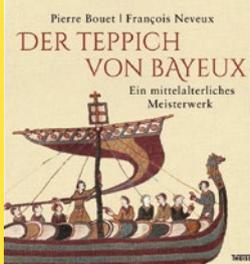
Neben seiner hohen handwerklichen Qualität besticht der Teppich von Bayeux mit durchdachter Ikonografie und künstlerischer Gestaltung. Wie die Autoren schreiben, sei es den mittelalterlichen Künstlern beispielsweise gelungen, den Eindruck räumlicher Tiefe zu erzeugen und verschiedene Augenblicke ein und derselben Aktion in einem einzigen Bild darzustellen.

Längst nicht alle Geheimnisse des Werks sind gelüftet. Nicht hinreichend geklärt ist beispielsweise die Frage, ob der Tuchstreifen ausschließlich als Wanddekor für fürstliche Bankette diente oder auch als »mobile Bildergeschichte«, die man zu bestimmten

hungsweise anderen bildlichen Darstellungen aus dieser Zeit. Viele Details auf dem Teppich von Bayeux stimmen gut mit solchen Quellen überein. Das gilt einerseits für die Werkzeuge, die beim Bau von Wilhelms Invasionsflotte zum Einsatz kamen und die Originalfunden aus der Wikingersiedlung Haithabu stark ähneln. Es gilt aber auch für die Schiffsdarstellungen auf dem Wandteppich, die mit hohem Ste-

ven, geradem Kiel und vier-eckigem Rahsegel den typischen Langschiffen der Wikinger entsprechen. Für Bouet und Neveux sind das Indizien dafür, wie stark die angelsächsisch-normannische Kultur im 11. Jahrhundert noch in der skandinavischen Tradition verwurzelt war.

Souverän behandeln die Autoren den aktuellen Forschungsstand, warten aber auch mit neuen Erkenntnissen auf, etwa zur Datierung und Programma-



Pierre Bouet, François Neveux  
**DER TEPPICH VON BAYEUX**  
Ein mittelalterliches Meisterwerk

Aus dem Französischen von Heike Rosbach und Hanne Henninger  
Theiss, Darmstadt 2018  
240 S., € 49,95

gesellschaftlichen Anlässen einem breiten Publikum präsentierte. Rätselhaft bleibt auch ein nackter, in obszöner Haltung dargestellter Mann, über dem ein Priester abgebildet ist, der eine vornehm bekleidete Frau berührt. Auf welches Ereignis hier angespielt wird, ob vielleicht auf einen damals weithin bekannten Sexskandal, können die Autoren nicht beantworten.

Den Band beschließt ein Kapitel namens »Rezeptionsgeschichte«, das sich der Frage widmet, wie über die Jahrhunderte hinweg diverse Akteure immer wieder versuchten, ideologischen Nutzen aus dem Kunstwerk zu ziehen. Etwa Napoleon, der 1803 den Tuchstreifen nach Paris bringen ließ, um die Franzosen auf die von ihm geplante Eroberung Englands einzustimmen.

»Der Teppich von Bayeux« ist ein lesenswertes und optisch äußerst ansprechendes Buch, das die Geschichte des Kunstwerks umfassend, kompetent und anschaulich vermittelt.

Der Rezensent Theodor Kissel ist promovierter Althistoriker, Sachbuchautor und Wissenschaftsjournalist.

## PHYSIK FANTASIETRIP DURCH MIKRO- UND MAKRO- KOSMOS

**Christophe Galfard, ein ehemaliger Mitarbeiter Stephen Hawkings, versucht sich an einer populären Darstellung der Physik.**

»Hallo Leser, hast Du Lust auf das Universum?« In diesem Buch, das die deutsche Ausgabe eines englischen Originals ist, duzt Christophe Galfard, Mitarbeiter des kürzlich verstorbenen Stephen Hawking und laut Klappentext »der neue Stern am Himmel der Astrophysik«, seine Leser durchgängig. Das geht schon bald auf die Nerven und gefällt sicher nicht jedem.

Dabei ist das Konzept des Werks durchaus interessant, wenn auch nicht neu. Die Älteren erinnern sich vielleicht noch an das Märchen »Peterchens Mondfahrt«, das sein Publikum lange vor der Raumfahrt auf eine abenteuerliche Reise zu unserem Trabanten entführte. Noch einmal drei Jahrhunderte vorher hatte bereits Johannes Kepler in seinem »Somnium« dieselbe Idee. Basiert ein solcher fiktiver

Trip auf physikalischen Fakten, kann er auf unterhaltsame Weise viel Wissen vermitteln. Die Grundlagen dafür sind heute besser denn je, denn die relevanten Geschwindigkeiten und Entfernungen bei einer Reise durchs Sonnensystem kennen wir nach vielen einschlägigen Missionen sehr genau. Und die Sciencefiction hat das Universum kreuz und quer mit Warpgeschwindigkeit erkundet.

Galfard begibt sich in seinem Band ebenfalls auf eine »unglaubliche Reise«, bei der sich Rationalität, Philosophie und Poesie mischen. Sein Startpunkt ist der einsame Strand einer Vulkaninsel. Von hier aus geht er auf fiktive Wanderschaft zu den Sternen und Galaxien, vorbei an Planeten, Supernovae, Schwarzen Löchern und kosmischen Jets. Dabei erkundet er allerlei relativistische Effekte, stellt sich aber auch der Herausforderung, die Welt des Mikrokosmos zu vermitteln. Wie »erfährt« man beispielsweise ein Atom oder die Unbestimmtheit? Sieht man, auf Teilchengröße geschrumpft, die Dinge verschwommen? Der Autor bemüht sich, die bizarre Welt der Quanten und Felder irgendwie beobachtbar zu machen – eigentlich ein Widerspruch in sich. Dabei befasst er sich natürlich auch mit den Anfängen von Raum, Zeit und Materie, spricht mit Urknall, Inflation und Hintergrundstrahlung. Das »Mini-Ich«, durch dessen Augen er seine Leser blicken lässt, begegnet dabei Strings und Branen und wagt auch einen scheuen Blick in höhere Dimen-

sionen, bis es schließlich auf ein unüberwindliches Hindernis stößt, die »Planck-Mauer«. Dahinter lauert das Quantenchaos.

Das alles ist schwer vorstellbar, und so wirft der locker geschriebene Text leider mehr Fragen auf, als er beantwortet. Kann man überhaupt so etwas wie die »Theorie von Allem« in Worte fassen und »begehrbar« machen? Schon Hawking hatte in seinem Bestseller »Eine kurze Geschichte der Zeit« versucht, die Welt populär zu erklären, und das ohne jede Abbildung (eine illustrierte Version wurde später nachgereicht). Galfard eifert seinem berühmten Lehrer nach, was in dem Werk auffällig betont wird, und setzt noch eins drauf – wieder unter weitgehendem Verzicht von Abbildungen.

Doch mit Blick auf normal vorgebildete Leser steht schon seit Hawking die Frage im Raum: Wie weit kann jemand, der mit der modernen Theorie von Raum, Zeit und Materie nicht wirklich vertraut ist, sie begreifen? Galfard zeigt sich hier optimistisch: »Ich bin zutiefst überzeugt, dass das jeder verstehen kann.« Dem stimme ich nicht zu. So eindeutig und klar der mathematische Formalismus ist, so wenig eindeutig und klar lässt er sich in Worte fassen. Das haben berühmte Physiker wie Bohr oder Feynman immer wieder betont. Als Bewohner einer Zwischenwelt zwischen Mikro- und Makrokosmos sind wir mit den Gesetzen der klassischen Physik vertraut; zu Mechanik, Elektrodynamik und Thermodynamik kön-



Christophe Galfard  
**DAS UNIVERSUM  
IN DEINER HAND**  
Die unglaubliche Reise durch die Weiten von Raum und Zeit und zu den Dingen dahinter  
Aus dem Englischen von Jens Hagedstedt und Ursula Held  
C.H.Beck, München 2018  
400 S., € 24,95

nen wir vielleicht noch einen intuitiven Zugang bekommen. Quantenfelder, Strings, Urknall, Wurmlöcher oder die Topologie des Universums dagegen sind nur über den schmalen Grat der höheren Mathematik erreichbar. Jeder Versuch, daraus Prosa, Poesie oder Philosophie zu formen, grenzt an die Quadratur des Kreises. Letztlich entspringt er wohl dem allgegenwärtigen Bedürfnis nach einfachen Erklärungen für komplexe Vorgänge. Die Natur ist aber nicht einfach.

Schaden kann die Lektüre sicher nicht, sie ist auf jeden Fall anregend. Das Buch enthält nur wenige Fehler und Ungenauigkeiten. Ob es aber mehr Ordnung in »deine« Welt bringt oder eher Verwirrung stiftet, musst »du« am Ende selbst entscheiden.

Der Rezensent Wolfgang Steinicke ist Physiker und Mitglied der Vereinigung der Sternfreunde e. V., deren Fachgruppe »Geschichte« er leitet.

## EVOLUTION ZUFALLSGEPRÄGT UND DENNOCH VORHERSEHBAR

**Feld- und Laborstudien erlauben es, der Evolution zuzuschauen.**

► Liefere die Evolution ein zweites Mal genauso ab? Würden sich die heutigen Organismen, etwa der Mensch, erneut entwickeln? Lange Zeit lautete die einhellige Antwort unter Evolutionsbiologen Nein – zu sehr seien Mutation und Selektion zufallsbestimmt. Es häufen sich

aber die Hinweise darauf, dass Evolution mitunter sehr wohl vorhersagbar ist und bestimmte Muster wiederholt auftreten. Das schreibt der Biologe Jonathan Losos in diesem Buch.

Der Autor ist Professor für evolutionäre Biologie in Harvard und Vertreter der experimentellen Evolutionsforschung. Sein Werk bietet umfassendes Wissenschaftswissen ebenso wie zahlreiche Anekdoten, beispielsweise wie der Autor sich als reisender Doktorand mit Hurrikannen und Drogenhändlern auseinandersetzen musste oder welche logistischen und handwerklichen Herausforderungen nötig sind, um nachzuvollziehen, wie sich die Fellfarbe von Hirschmäusen entwickelt. Man spürt beim Lesen durchweg die Begeisterung des Autors für sein Fach.

Das Buch gliedert sich in drei große Abschnitte. Im ersten stellt Losos das Prinzip der evolutionären Konvergenz vor, also das Phänomen, dass Organismen verschiedener Arten ähnliche Merkmale ausprägen. Das geschieht häufiger, als viele annehmen. Von der Koffeinbildung in verschiedenen Pflanzenarten über die ähnlich aufgebauten Augen von Wirbeltieren und Tintenfischen bis hin zur gleichartigen Sozialstruktur von Termiten und Ameisen: Nahezu jedes Prinzip scheint sich mehrmals unabhängig voneinander entwickelt zu haben. Es gibt in der Natur offenbar die Tendenz, auf ähnliche Umweltbedingungen mit ähnlichen Anpassungen zu reagieren. Bekannte Beispiele hierfür sind die



Jonathan B. Losos

### GLÜCKSFALL MENSCH

Ist Evolution vorhersagbar?

Aus dem Englischen von Sigrid Schmid und Renate Weitbrecht  
Hanser, München 2018

384 S., € 26,-

Darwinfinken sowie die Anolis-Echsen, Losos' eigene Studienobjekte, die in dem Buch immer wieder auftauchen. Auch bei diesen sind Arten, die ähnliche Merkmale ausgeprägt haben, nicht zwingend diejenigen, die genetisch am engsten miteinander verwandt sind. Stattdessen hat sich in ihren Inselformen mehrfach dasselbe Merkmal unabhängig voneinander entwickelt, sofern es einen evolutionären Vorteil bedeutete.

Wie Forscher evolutionäre Vorgänge wissenschaftlich untersuchen – sei es im Labor oder in der freien Natur –, davon berichten der zweite und dritte Abschnitt des Buchs. Der Autor stellt ausführlich Schlüsselexperimente vor, die zum heutigen Verständnis der Evolution beigetragen haben. Von den ersten Versuchen mit Birkenspanern über Feldstudien zur Farbentwicklung von Guppys bis zu Losos' eigenen Untersuchungen bezüglich

der Beinlänge von Anolis-Echsen: Wie Arten sich anpassen, lässt sich oft vorhersagen und geschieht häufig deutlich schneller, als Darwin vermutete. Eine elegante Möglichkeit, die Wiederholbarkeit der Evolution unter Laborbedingungen zu testen, stellt das Long Term Evolution Experiment von Richard Lenski dar.

Hier vergleichen Forscher die Entwicklung von zwölf parallel wachsenden *Escherichia coli*-Populationen über zehntausende Generationen hinweg, spielen das Band der Evolution also zwölfmal unabhängig voneinander ab. Obwohl sich viele Populationen ähnlich entwickeln, beschreiten einige mitunter einen ganz neuen evolutionären Pfad.

All diese Versuche veranschaulichen, dass gewissermaßen beide Lager Recht haben. Oft lässt sich Evolution vorhersagen; zugleich hängen die Anpassungen aber stark von zufälligen Mutationen ab, die hin und wieder für eine völlig neue Richtung sorgen.

Ob der Mensch tatsächlich ein zweites Mal entstehen würde, ist fraglich. Womöglich hätte intelligentes Leben – wie Losos im Ausblick darlegt – auch aus Dinosauriern hervorgehen können: in Form zweibeiniger, vogelähnlicher Wesen, die Werkzeuge benutzen. Das überzeugende Buch beschreibt auf unterhaltsame Weise die Wege der neueren Evolutionsforschung und vermittelt viele Grundlagen hierzu.

Die Rezensentin Lamia Özgör ist promovierte Biologin mit dem Schwerpunkt Immunologie.

## MEDIZIN TOR ZUR GESUNDHEIT

**Mediziner Steven Lin erläutert die Ursachen von Zahnkrankheiten und Kieferproblemen – und gibt Tipps für eine allgemein gesündere Lebensweise.**

Zahnerkrankungen sind heutzutage weit verbreitet. So leiden in den Industrienationen 60 bis 90 Prozent der Schulkinder an Karies. In Deutschland betrifft Karies sogar 15 Prozent der unter Dreijährigen. Das sind erschreckende Zahlen, bedenkt man, welche verheerende Auswirkungen Zahnerkrankungen auf den gesamten Körper haben können. Steven Lins Gesundheitsratgeber verfolgt daher einen ganzheitlichen Ansatz: Wer sich um die Gesundheit seiner Zähne kümmert, schützt zugleich auch Knochen, Darm, Immunsystem und Gehirn.

Für Lin – Zahnarzt in Sydney mit ergänzenden Ausbildungen in Biomedizin, Ernährung und Fitness – ist der Mund das Tor zur Gesundheit. Weil wir uns nicht mehr richtig ernähren, schreibt er, entwickelten sich unsere Kiefer nicht mehr richtig. Dies führe zu einer Epidemie von Zahnfehlstellungen nebst eingewachsenen (Weisheits-) Zähnen – mit wiederum bedeutenden Auswirkungen auf andere Schädelpartien. So könne es zu einer Schwächung der Atemwege kommen, die zu mehr Mund- statt Nasenatmung führe. Und sei unsere Versorgung mit Sauerstoff

erst einmal gestört, ergäben sich leicht weitere Probleme, vom Schnarchen über das Aufmerksamkeitsdefizitsyndrom bis hin zum Herzleiden. Der Kiefer nimmt somit Einfluss auf fast jedes Organ im Körper.

Zahngesundheit ist weniger eine Frage der Zahnpflege als der Ernährung, ist der Lektüre zu entnehmen. Wer »mundum gesund« bleiben will, muss seine Lebens- und Ernährungsweise hinterfragen. Ebenso auf den Prüfstand gehört das Gesundheitssystem: Es darf nicht länger aufgespalten werden in »geschlossene Abteilungen«, in denen der Zahnarzt nur den Kauapparat behandelt, der Gastroenterologe den Magen, der Neurologe das Gehirn und so weiter. Alles, was gut für den Mund sei, betont Lin, nutze auch dem restlichen Körper: »Je gesünder Ihr Mund und Ihr orales Mikrobiom, desto gesünder Ihr Verdauungstrakt, Ihr Immunsystem und Ihr gesamter Körper.«

Fakt ist: Hoch industrialisierte Staaten sind zugleich Hochburgen der Zahnerkrankungen einschließlich Zahnfehlstellungen. Zudem werden ihre Bürger vermehrt heimgesucht von Verdauungsproblemen (Morbus Crohn, Reizdarmsyndrom), Autoimmunerkrankungen (Zöliakie, multiple Sklerose, Rheuma) sowie Störungen des Zentralnervensystems (ADHS, Demenz). Fakt ist auch, dass es bei vielen dieser Erkrankungen klare Hinweise darauf gibt, dass sie entscheidend von der Ernährung beeinflusst werden.



Steven Lin

### MUNDUM GESUND

Die richtige Ernährung für Zähne und Immunsystem. Mit 40-Tage-Ernährungsplan für ganzheitliche Gesundheit

Aus dem Englischen von Elisabeth Liebl  
Scorpio, München 2018  
384 S., € 18,90

Auffälligerweise leiden Menschen aus Epochen beziehungsweise Kulturkreisen mit eher traditioneller Ernährung deutlich weniger unter Zahnerkrankungen als solche aus modernen Industriegesellschaften. Das zeigen nicht nur die fossilen Gebisse steinzeitlicher Jäger und Sammler, sondern etwa auch die von altägyptischen Mumien. Selbst Untersuchungen aus jüngerer Zeit, etwa bei australischen Aborigines oder arktischen Inuit, belegen eine geradezu sensationelle Zahngesundheit, sofern noch eine traditionelle Ernährungsweise vorliegt.

Offenbar sind viele Erkrankungen der Mundhöhle, wie wir sie heute kennen, eine Begleiterscheinung industriell verarbeiteter Nahrung. Bei den etwa 600 000 in den USA angebotenen Lebensmitteln hat sich beispielsweise seit

1965 der Anteil industriell verarbeiteter Produkte auf mittlerweile 70 Prozent erhöht. Lin erklärt plausibel und detailliert, welche fatalen Auswirkungen dieser Trend auf uns hat.

Das Buch hat drei Teile und einen ausführlichen Anhang mit Anmerkungen sowie einem Rezept- und Stichwortverzeichnis. Im Einführungsteil erläutert der Autor, warum Zähne ein so vorzügliches Frühwarnsystem für gravierende Gesundheitsprobleme sind. Eindrucksvoll legt er dar, was über evolutionäre Vorgaben, genetische und epigenetische Einflüsse sowie über fehlende Vitamine und die Mitwirkung von Bakterien bekannt ist. Im mittleren Teil referiert er, warum das, was wir heute verzehren, oft krank macht. Im Schlussteil führt Lin sodann aus, wie wir »essen sollten, damit Mund, Körper und Geist gesund bleiben«. Das letzte Kapitel ist zugleich das längste, da es einen »40-Tage-Ernährungsplan« mit entsprechenden Rezepten enthält, inklusive Beschaffungs- und Zubereitungstipps.

Lins »zahngesunde Ernährung« folgt vier Leitprinzipien: (1) Kiefer, Knochen und Atemwege stark und gesund halten, (2) den Mund mit allen notwendigen Nährstoffen versorgen, insbesondere fettlöslichen Vitaminen, die etwa für den Kalziumstoffwechsel gebraucht werden, (3) das Mikrobiom in Mund und Darm unterstützen, (4) positive epigenetische Effekte vermitteln.

Was die ersten drei Prinzipien anbelangt, ist die medizinische Evidenz geradezu erdrückend. Beim

vierten Prinzip dagegen sind Belege eher rar. Es erscheint zwar nahe liegend, dass bestimmte Nährstoffe (oder ihr Fehlen) die Methylierung der DNA fördern und somit Genaktivitäten regulieren können – und dass sich dieser Prozess auf die körperliche Gesundheit auswirkt. Jedoch bleibt umstritten, ob so genannte Bioprodukte positive epigenetische Effekte vermitteln und industrielle Erzeugnisse eher nicht. Auch verrät uns der Autor nicht, warum die Lebenserwartung weiter steigt, wo wir uns doch immer ungesünder ernähren. Dafür räumt er argumentationsstark und unterhaltsam mit einigen besonders hartnäckigen Ernährungsmythen und falschen Diätplänen auf.

Das Buch führt jedenfalls »mundum« die Zahnmedizin, die Medizin sowie die Ernährungswissenschaft konsequent zusammen. Seiner komplexen Diagnostik stellt Steven Lin eine ebenso einfache wie effektive Methode zur Seite, um die Gesundheit des Mundes und des gesamten Körpers zu unterstützen.

Der Rezensent Reinhard Lassek ist promovierter Biologe und arbeitet als freier Journalist und Publizist in Celle.

## VERHALTENS- BIOLOGIE IM NAMEN DER FISCHER

**Verhaltensbiologe Jonathan Balcombe erklärt, was Fische empfinden können und welch erstaunliches Verhalten sie an den Tag legen.**

»Den unbekanntesten Billionen gewidmet« – mit diesen Worten beginnt der Verhaltensbiologe Jonathan Balcombe sein Buch über Fische. Das Werk soll »den Fischen auf eine Weise eine Stimme geben, wie es bislang nicht möglich war«, erklärt der Autor, der für die Tierschutzorganisation Humane Society of the United States in Washington D.C. arbeitet und sich mit dem Empfindungsvermögen von Tieren befasst. Dies möchte er erreichen, indem er Erkenntnisse aus Verhaltensforschung, Soziobiologie, Neurobiologie und Ökologie zusammenführt.

Balcombe nimmt seine Leser mit auf eine Reise in Süß- und Salzwasser. Er präsentiert Zitteraale, pupsende Heringe, millimetergenau zielende Schützenfische und andere erstaunliche Arten und Phänomene. Er pflegt nicht nur einen unterhaltsamen



Jonathan Balcombe  
**WAS FISCHER WISSEN**  
Wie sie lieben, spielen, planen:  
unsere Verwandten unter  
Wasser  
Aus dem Englischen von Tobias  
Rothenbücher  
mare, Hamburg 2018  
336 S., € 28,-

und verständlichen Erzählstil, sondern gibt auch Fachwissen detailliert und differenziert wieder.

Zunächst widmet sich der Autor der Frage, was Fische hören, sehen, schmecken, riechen und fühlen. Er zeigt, dass etliche von ihnen Reize wie UV-Licht oder elektrische Signale wahrnehmen, die Menschen verborgen bleiben. Zudem erklärt er anhand wissenschaftlicher Studien, weshalb er davon überzeugt ist, dass Fische Schmerzen und Genuss empfinden.

Intelligent wirkendes Verhalten verschiedener Fischarten deutet darauf hin, dass die Tiere planen, einander erkennen, miteinander kooperieren und mentale Repräsentationen räumlicher Zusammenhänge erstellen. So nimmt der Anker-Zahnlippfisch (*Chœorodon anchorago*) Muscheln in sein Maul und transportiert sie über beachtliche Entfernungen zu geeigneten Steinen hin, um dort die Muschelschalen durch geduldiges Draufschlagen aufzubrechen. Ein Verhalten, das Planung erfordert und dem Gebrauch von Werkzeugen nahekommt.

Es wird deutlich, dass Balcombe das Tierwohl sehr am Herzen liegt. So plädiert er dafür, Fische besser zu behandeln. Unter anderem kritisiert er, dass Angeln als ehrbarer Sport gelte und viele Menschen glaubten, die Angelhaken würden Fischen keinen Schmerz zufügen. Weiterhin geht er auf das Problem der Überfischung und der Haltung in Aquakulturen ein. Der Verhaltensforscher erzählt zahlreiche Anekdo-

ten, etwa über die Erlebnisse einer Aquarienhälterin, deren Fische sich gegenseitig halfen. Diese Geschichten sollen dazu dienen, die wissenschaftlichen Erkenntnisse aufzulockern und begreifbar zu machen, welche Fähigkeiten der Tiere noch nicht untersucht sind. Das gelingt dem Autor über große Strecken. Dennoch wäre weniger in seinem Buch mehr gewesen. Das Werk zieht sich stellenweise in die Länge, und es hätte nicht geschadet, einige Geschichten wegzulassen.

Die Frage, was Fische wissen, lässt sich auch nach der Lektüre des Buchs nicht eindeutig beantworten. Ein höheres Verständnis und eine Ahnung, wie komplex und vielfältig die Verhaltensweisen der Tiere sind, bleiben jedoch. Insgesamt bietet das Buch einen ausführlichen Rundumblick und stützt sich auf viele Fachartikel.

Balcombe erklärt die Arbeit der Forscher sehr eingängig, wobei wissenschaftlicher Anspruch und Details nicht verloren gehen. Seine Quellen gibt er im Anhang an, so dass Interessierte weiterführende Literaturempfehlungen bekommen.

Immer wieder kommentiert der Autor und regt seine Leser zum Nachdenken oder Schmunzeln an. So gibt er zu bedenken, dass der Clownfisch-Papa Marlin in dem Film »Findet Nemo« nach dem Tod der Mutter eigentlich eine Clownfisch-Mama hätte werden müssen.

Die Rezensentin Miriam Plappert ist Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Tübingen.

# LESERBRIEFE

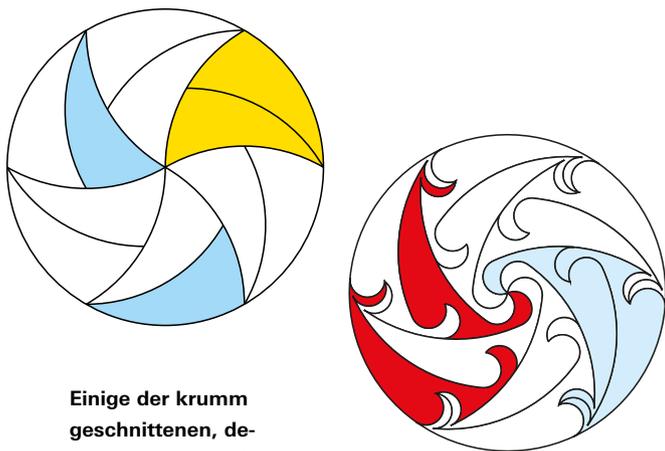
## MEHR MÄNNER SIND DÜMMER, ABER AUCH KLÜGER

Der Psychologe Andrei Cimpian und die Philosophin Sarah-Jane Leslie vertraten die These, Frauen würden in Disziplinen, in denen es auf intellektuelle Brillanz ankommt, auf Grund von Vorurteilen benachteiligt. (»Die akademische Geniefalle«, *Spektrum* Februar 2018, S. 80)

**Daniel Lechmann, Universität Erlangen-Nürnberg:** In dem Artikel wird es als Vorurteil hingestellt, dass kognitive Fähigkeiten vom Geschlecht abhängen. Im Mittel mag tatsächlich kein geschlechtsspezifischer Unterschied in der Intelligenz bestehen. Jedoch wurden in Studien sehr wohl Unterschiede in der Varianz der Intelligenz gefunden – dergestalt, dass Männer beziehungsweise Jungen eine höhere Variabilität aufweisen. Mit anderen Worten: Es gibt bei Männern einen höheren Anteil extrem dummer, aber auch extrem intelligenter Personen als bei Frauen (siehe zum Beispiel *Johnson, W. et al.: Sex Differences in Variability in General Intelligence. In: Perspectives on Psychological Science 3, S. 518–531, 2008* und die darin zitierte Literatur). Insofern erscheint es wenig verwunderlich, dass Männer in Fächern, die (zumindest dem Anschein nach) ein höheres Ausmaß an extrem hoher Intelligenz (im Artikel »Brillanz« genannt) verlangen, überrepräsentiert sind.

## ZWEIGETEILTE TORTEN

Auf wie viele Weisen kann man eine Torte gerecht zerlegen? Jean-Paul Delahaye präsentierte eine Fülle möglicher Schneidestrategien. (»Gerechtes Tortenteilen«, *Spektrum* April 2018, S. 80)



Einige der krumm geschnittenen, deckungsgleichen Stücke wären bei realen Kuchen noch praktikabel (links). Andere funktionieren wohl lediglich auf Papier (rechts).

## 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.

**Iris Hebbeker, Troisdorf:** Der interessante Beitrag lässt einige Fragen offen, etwa die nach der Existenz einer Zerlegung, bei der der Kreismittelpunkt Ecke keines der Teile ist. Dabei lassen sich unendlich viele solche Zerlegungen finden, wenn man bei den radialen Zerlegungen  $n=2$  setzt. Die entstehenden Stücke haben am Kreismittelpunkt beide den Winkel  $360^\circ/2=180^\circ$ , was schwerlich als Ecke bezeichnet werden kann.

**Antwort von Redakteur Christoph Pöppe:**

Formal haben Sie Recht: Jede radiale Zweiteilung geht zwar durch den Mittelpunkt, ist aber dort gerade nicht eckig. Allerdings ist diese Lösung so einfach, dass sie keinen Neuigkeitswert hat – weshalb sie sowohl den Verfassern des Originalartikels als auch unserem Autor Jean-Paul Delahaye schlicht nicht in den Sinn gekommen ist.

## ZU WENIG SUBSTANZ

Die Psychologin Alison Gopnik berichtete, dass sich die künstliche Intelligenz neuerdings am Wissenserwerb von Ein- bis Fünfjährigen orientiert. (»Lernen wie die Kinder«, *Spektrum* April 2018, S. 74)

**Niko Neufeld, Genf:** Der Artikel ist leider sehr enttäuschend. Außer einer wohlthuenden Zurechtrückung des Hypes um maschinelles Lernen (»bottom-up« in der Terminologie der Autorin) und ein paar (zu vielen) netten Anekdoten über den Enkel der Autorin bringt er sehr wenig Substanzielles. Nicht ein einziges konkretes Beispiel dafür, wie bayessches Schlussfolgern in der Praxis funktioniert. Natürlich kann man die Referenzen lesen, aber in einem Magazin wie *Spektrum* kann man dem Leser schon zutrauen (nicht zumuten!), zumindest in einem Seitenkasten etwas ins Detail gehen zu wollen, gerade wenn man Artikel von aktiven Wissenschaftlern bringt. Da hätten sich die sehr simplen Grundlagen der Theorie gut geeignet.

**Antwort von Redakteur Christoph Pöppe:**

Elementares bayessches Schlussfolgern war bereits mehrfach Thema in *Spektrum*, zum Beispiel in einer Bayes-Biografie im Oktober 2011 und dem Artikel »Der Fluch des  $p$ -Werts« vom September 2014, der sehr detailliert den Einfluss des A-priori-Wissens (des Vor-Urteils) auf die Interpretation des Ergebnisses bespricht.

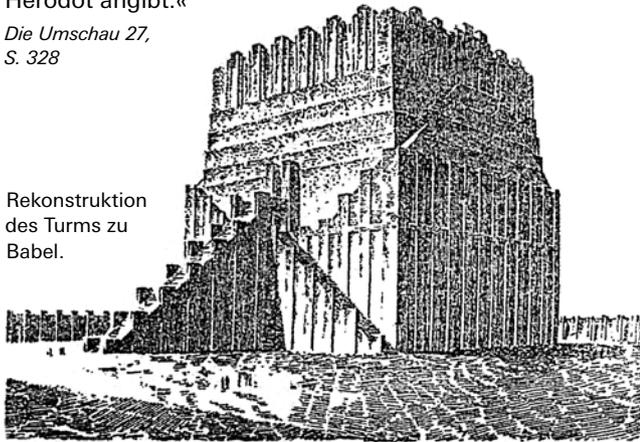
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH HADDLEY, J.A., WORSLEY, S., INFINITE FAMILIES OF MONOHEDRAL DISK TILINGS. IN: ARXIV 1512.0791, 2016

# 1918

## NEUES VOM TURM ZU BABEL

»Durch die, auch anfangs des Weltkrieges weitergeführten Ausgrabungen der ›Deutschen Orient-Gesellschaft‹ ist der babylonische Turm in seinem Grundriß zutage gekommen. Prof. Koldewey, der die Ausgrabungen 18 Jahre lang geleitet hat, weist nach, daß es sich um einen Hochtempel handelt. Unsere Abbildung zeigt, welch ein eindrucksvoller Bau der babylonische Turm gewesen ist. Rechnet man das Podest der Südtreppe mit dem Gang noch hinzu, so erhält man 8 Geschosse, wie sie Herodot angibt.«

*Die Umschau 27, S. 328*



Rekonstruktion des Turms zu Babel.

## NACHTEILE DER FRAKTURSCHRIFT

»Solange die deutsche Volkswirtschaft einen großen Teil des Schrifttums durch Frakturschrift gegen das Ausland abschließt, so lange bleibt [sie] im Nachteil. Nach A. Windeck und J. Gysin würden unsere Kinder, wenn sie nur die lateinische Schriftart zu lernen hätten, ungefähr 200 Stunden sparen. Da wir etwa 10 Millionen Volksschüler haben, würde man durch Beseitigung unserer Zweischriftigkeit 250 Millionen Lehrstunden im Jahre sparen und auf solche Lehrgegenstände verwenden können, die unserer Volkswirtschaft Nutzen bringen. Und doch glauben weite Kreise an unserer Zweischriftigkeit festhalten zu müssen, weil sie ein Teil unseres Deutschtums sei.« *Prometheus 1494, S. 338*

## EIN PHÄNOMEN DER DRAHTLOSEN TELEGRAFIE

»Die Hertzschen Wellen, die zur Funkentelegraphie benutzt werden, und die Lichtwellen [sind] grundsätzlich gleichartig. Wie kommt es nun, daß [erstere] der gekrümmten Erdoberfläche folgen, während sich Licht geradlinig fortpflanzt? Zwei Erklärungsmöglichkeiten kommen in Betracht. Unsere drahtlosen Stationen arbeiten mit Wellenlängen von 0,5 bis 6 Kilometer Streuung, groß genug, um sie der Erdoberfläche weithin folgen zu lassen. Ein weiterer Erklärungsversuch geht davon aus, daß die Hertzschen Wellen elektrische Leiter nicht zu durchdringen vermögen. [Sie] wären demnach [zwischen] der Erdoberfläche und der leitenden Luftschicht [der Stratosphäre] eingeschlossen.« *Kosmos 6, S. 150/151*

# 1968

## DER REISEPASS DER ZUKUNFT

»Je mehr der moderne Mensch reist, umso grössere Bedeutung erlangt der Reisepass. Man macht sich daher bei verschiedenen Regierungen Gedanken darüber, Reisepässe so zu vereinfachen, dass sie durch ein Elektronengehirn in Bruchteilen einer Sekunde kontrolliert werden können. [Hier sind] alle Angaben über unerwünschte Personen, gesuchte Verbrecher, gestohlene und verlorene Pässe usw. gespeichert. Wenn ein solcher Pass präsentiert wird, wird eine rote Lampe aufleuchten und das Drehkreuz zum Eintritt in das Staatsgebiet gesperrt.« *Neuheiten und Erfindungen 380, S. 106*

## LINGUISTEN IN AFRIKA

»Der Sprache der Khung-Buschmänner widmet sich die diesjährige Afrika-Expedition von Prof. Dr. Oswin Köhler. Im Vordergrund der Arbeiten stehen Tonbandaufnahmen, Sprachanalyse, Aufzeichnung des Wortschatzes und Aufzeichnungen von mündlichen Überlieferungen. Angesichts des schnellen Verfalls der Sprachen kleiner Restvölker gewinnen die Untersuchungen von Prof. Köhler erhöhte Bedeutung.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 6, S. 269*

## RÜCKSTURZ ZUR ERDE

»[Ein Nachrichtensatellit] droht in Kürze in der Erdatmosphäre zu verglühen. Echo I wurde am 12. August 1960 gestartet. Die mittlere Bahnhöhe, die noch im September 1967 über 1200 Kilometer betrug, fiel bis Mitte April auf unter 850 km. Leider liegen von dem Eintritt eines Satelliten in die unteren und dichteren Schichten der Erdatmosphäre noch keine praktischen Erfahrungen vor. Nach vorliegenden Beobachtungen und Bahndaten dürfte der Absturz etwa im Juni 1968 erfolgen.« *Kosmos 6, S. 212*

# futur III

## Die letzte Frage

Eine schicksalhafte Reise zu einer Superintelligenz.  
**Eine Kurzgeschichte von Frank W. Haubold**

»Es ist nicht mehr weit, Sir«, sagte Marians Begleiter, ein hünenhafter Sikkaner, der sein Gesicht hinter einer silbernen Maske verbarg. Wahrscheinlich wunderte er sich darüber, dass Marian nicht schneller lief, jetzt, da ihr Ziel fast zum Greifen nah war. Die geringe Schwerkraft des kahlen Planetoiden hätte durchaus ein höheres Tempo erlaubt, Marians verhaltener Schritt hatte jedoch keine körperlichen Gründe. Er war erschöpft, das stimmte, aber seine Erschöpfung war einzig mentaler Natur.

Er hatte nur wenig geschlafen danach, zuerst, weil er es nicht wahrhaben wollte und wider besseres Wissen auf ein Wunder hoffte. Auf einen Anruf vielleicht, dass ein Fehler bei der Identifizierung passiert sei, dass Clarissa und die Kinder zwar auf der Passagierliste gestanden hätten, aber gar nicht an Bord des abgestürzten Shuttles gewesen seien. Oder, besser noch, dass plötzlich die Tür aufging, die Mädchen hereinstürmten und ihm aufgeregt und einander ins Wort fallend von ihren Abenteuern erzählten. Natürlich war nichts dergleichen geschehen. Sein Compad blieb stumm und das Haus so still, als wäre es mit ihnen gestorben.

Marian hatte versucht, sich mit Arbeit zu betäuben, war von Termin zu Termin geeilt, aber die Ablenkung war nie von Dauer gewesen. Manchmal hörte er ihre Stimmen – mitten in einer Besprechung – und musste gegen die Versuchung ankämpfen, einfach davonzulaufen und sich irgendwo zu verkriechen. Eine Weile hatte er sich noch gequält, dann aber doch den Rat seiner Freunde befolgt, sich eine längere Auszeit zu nehmen und Malmari Bay zu verlassen. Marians Vater, ebenfalls vom Kummer

gezeichnet, hatte seine Entscheidung akzeptiert und sogar selbst den Kontakt zu Agion Oros geknüpft, einem abgelegenen Planeten, auf dem der Orden der Heiligen Madonna der letzten Tage seinen Sitz hatte.

Die Monate, die Marian in den Mauern des Klosters verbracht hatte, hatten ihm geholfen. Die Arbeit im Freien und der geordnete Tagesablauf mit all seinen Ritualen waren wie ein Gerüst gewesen, an dem er sich festhalten konnte, auch wenn der Boden unter seinen Füßen brüchig blieb. Doch seine unausgesprochene Erwartung, Trost und vielleicht sogar Zuversicht im Glauben zu finden, blieb unerfüllt. Dabei hoffte er nichts sehnlicher, als dass es tatsächlich ein Leben danach gab und einen Ort, an dem seine Familie auf ihn wartete. Vielleicht lag es daran, dass er – anders als die Patres – die Nähe Gottes nie wirklich zu empfinden vermochte. Er blieb fern und unfassbar.

»Glauben kann man nicht erzwingen, Marian«, hatte Abt Clemens versucht ihn zu trösten, als sie sich verabschiedeten. »Vielleicht ist dein Kummer noch zu groß, um ihm Raum zu bieten. Aber ich bin sicher, du wirst zu ihm finden.« Marian hatte sich höflich bedankt und seine Ungeduld verborgen, die der Grund für seinen eiligen Aufbruch war.

Er hatte etwas erfahren, das ihn förmlich elektrisierte. Zwar handelte es sich nach Ansicht der Patres nur um ein Gerücht, aber wenn es zutraf, war das die Chance, endlich Klarheit zu erlangen ...

Es klang abenteuerlich, dass ausgerechnet die Sikkaner, eine nach archaischen Regeln organisierte Clangemeinschaft, die Dienste einer künstlichen Superintelligenz anboten, die angeblich jede Frage beantworten

konnte. Andererseits hielten sich schon seit Längerem Gerüchte über eine Evolution jener KIs, die sich vor Jahrhunderten dem Zugriff ihrer menschlichen Schöpfer entzogen hatten. Zudem waren die Sikkaner nicht nur gefürchtete Kämpfer, sondern auch gewiefte Geschäftsleute, die mit allem handelten, was Gewinn versprach.

Also hatte Marian noch auf dem Rückflug zu recherchieren begonnen und war tatsächlich auf eine konkrete Spur gestoßen: eine Büroadresse auf Freehaven, wo die Transaktionen angeblich abgewickelt wurden. Freehaven war eine fliegende Stadt und Freihandelsmetropole, die ihren Standort nur wenige Lichtsekunden außerhalb der Föderationsgrenzen hatte. Marian hatte sich umgehend auf den Weg dorthin gemacht und das Büro zu seiner eigenen Überraschung besetzt vorgefunden.

Die Verhandlungen mit dem sikkikanischen Vermittler waren allerdings eher ein Diktat gewesen, mit einem horrenden Paketpreis für Transfer, einen bewaffneten Begleiter und eine auf zehn Standardminuten limitierte Unterredung mit einer Kontakteinheit der KI. Marian hätte auch das Doppelte bezahlt, um endlich Gewissheit zu erhalten. Als Juniorchef und Anteilseigner der Leandros-Firmen war Geld sein geringstes Problem, und viel davon würde er ohnehin nicht mehr brauchen.

Doch jetzt, da er über die Oberfläche des Planetoiden lief und es beinahe geschafft hatte, spürte Marian, wie ihn der Mut verließ. Es war nicht die Müdigkeit, die seinen Schritt hemmte, sondern die Furcht vor einer Antwort, die wie ein Urteil sein würde. Das Gebäude, das sich vor ihnen aus der Dämmerung schälte, hatte nichts Spektakuläres an sich – ein fensterloser Pavillon aus Plastahl mit einem kuppelförmigen Dach. Und genauso schmucklos und profan war auch sein Inneres. Abgesehen von zwei Stühlen und einem runden Plastikstisch schien der Raum völlig leer.

»Sie sollten jetzt hineingehen, Sir«, ermahnte ihn sein Begleiter. »Ich warte so lange draußen.«

## »Das Wissen ums Jenseits ist zerstörerisch«, sagte sie

Marian gehorchte und registrierte beiläufig, wie sich die Tür hinter ihm schloss. Ein wenig ratlos sah er sich um, berührte vorsichtig die glatte Wandverkleidung und versuchte, die Quelle des warmgelben Lichtes zu finden, das den Raum füllte.

»Keine Sorge, die Wände sind absolut schalldicht«, sagte jemand hinter ihm, und Marian fuhr erschrocken herum. Es war eine Frau, nicht mehr ganz jung und in ein weites, knöchellanges Gewand gehüllt. Sie war schön, allerdings eher auf klassisch strenge Art, zu der auch die ausgeprägte Nase und das straff nach hinten zu einem Knoten gebundene, dunkle Haar passten. Natürlich war die Frau nicht real, aber das änderte nichts an Marians Verwirrung, denn ihre Erscheinung war in jeglicher Hinsicht perfekt. Es war schwer, ja, beinahe unmöglich, sie als Manifestation einer leblosen Superintelligenz anzusehen.

»Ich bin Vera«, sagte die Frau und deutete in Richtung der beiden Stühle. »Wir sollten uns besser setzen und gleich zur Sache kommen.«

»Gern«, erwiderte Marian mit belegter Stimme und räusperte sich. »Dann wissen Sie, was ich fragen möchte?« Es sollte abgeklärt klingen, aber die Anspannung ließ seine Stimme zittern.

»Ja, wir haben uns natürlich informiert, Marian Leandros.« Sie lächelte wieder, ihr Blick blieb jedoch ernst. »Und genau da liegt das Problem.«

»Sie wissen es tatsächlich?«, fragte er überrascht. »Woher?«

»Einfache Logik«, erwiderte sie schulterzuckend. »Die Informationen stammen aus der Datensphäre, und der Rest ist simple Psychologie. Du hast deine Familie verloren und möchtest wissen, ob dieses hypothetische Jenseits tatsächlich existiert.«

Die Leichtigkeit, mit der sie seine Befindlichkeiten auf eine simple Logikaufgabe reduzierte, verschlug Marian für einen Moment die Sprache. Das Zittern verlagerte sich auf

seine Knie, und er war froh, dass er saß und sich irgendwo festhalten konnte.

»Dann kennen Sie die Antwort?«, fragte er, nachdem er all seinen Mut zusammengenommen hatte.

»Ja, natürlich«, antwortete die Frau gelassen. »Aber du solltest dir gut überlegen, ob du darauf bestehst. Denn sobald du die Antwort kennst, kannst du diesen Ort nicht mehr verlassen.«

»Und warum nicht?«, fragte er eher überrascht als erschrocken.

»Weil dieses Wissen zerstörerisch ist«, erwiderte sie ernst. »Und zwar unabhängig davon, wie die Antwort ausfällt. Nehmen wir einmal an, sie lautet Ja. Was würde passieren, wenn es sich auf den bewohnten Welten herumspricht, dass das Leben gar nicht mit dem Tod endet?«

»Ich weiß es nicht«, gab Marian zu und fragte sich, worauf sie hinauswollte.

»Nun, wir haben analysiert, was geschehen würde. Für die meisten Menschen würde das eigene Leben schlagartig an Bedeutung verlieren und jede Anstrengung sinnlos erscheinen: Schmerz, Krankheit oder Enttäuschung wären Grund genug, sich in eine bessere Welt zu empfehlen. Die gesamte Ordnung des Zusammenlebens würde früher oder später zusammenbrechen.«

»Und wenn?«, wandte er ein. »Das ist weder mein Problem noch eures.« Ihm war klar, dass der Einwand dumm und egoistisch war, aber er wollte eine Antwort, und er wollte sie jetzt.

»In gewisser Hinsicht schon.« Die Frau lächelte nachsichtig. »Das würde jetzt zu weit führen. Möglicherweise lautet die Antwort ja auch ›Nein‹«, sagte sie.

»Wir haben natürlich diese Variante bezüglich ihrer Auswirkungen auf religiöse Menschen und Sikkaner analysiert. Die prognostizierten Opferzahlen gehen in die Milliarden. Zum Beispiel wäre der Ehrenkodex der Sikkaner mit dem Verlust der Aussicht auf Heimkehr in das Land der Väter hinfällig, also würden sie das tun, was sie am besten können: Krieg führen, erbarmungslos und effizient.«

»Aber doch nur, wenn eure Antwort publik wird«, erwiderte Marian mit einem Lächeln. Alle Anspannung war von ihm abgefallen, denn er hatte eine Entscheidung getroffen. »Von mir wird niemand etwas erfahren, wenn euch das beruhigt.«

»Auch mit dieser Möglichkeit war zu rechnen«, erklärte Vera ungerührt. »Soviel wir wissen, ist sie sogar in den Vertragsbedingungen erwähnt. Anderenfalls hätte unser sikkkanischer Freund kaum zugelassen, dass du eine Waffe mitführst.«

Sie wissen alles, dachte er. Eigentlich hätte Marian schockiert sein müssen, aber es berührte ihn kaum noch. Dieses Ding vor ihm war kein Mensch, vor dem er sich hätte rechtfertigen müssen. Es war höchste Zeit, es zu Ende zu bringen.

»Die Antwort«, beharrte er und wunderte sich selbst ein wenig darüber, wie ruhig seine Stimme klang.

»Also gut.« Die Frau lächelte eine Spur resigniert. »Es ist deine Entscheidung.« Dann sagte sie es ihm und verschwand, kaum dass sie das letzte Wort ausgesprochen hatte.

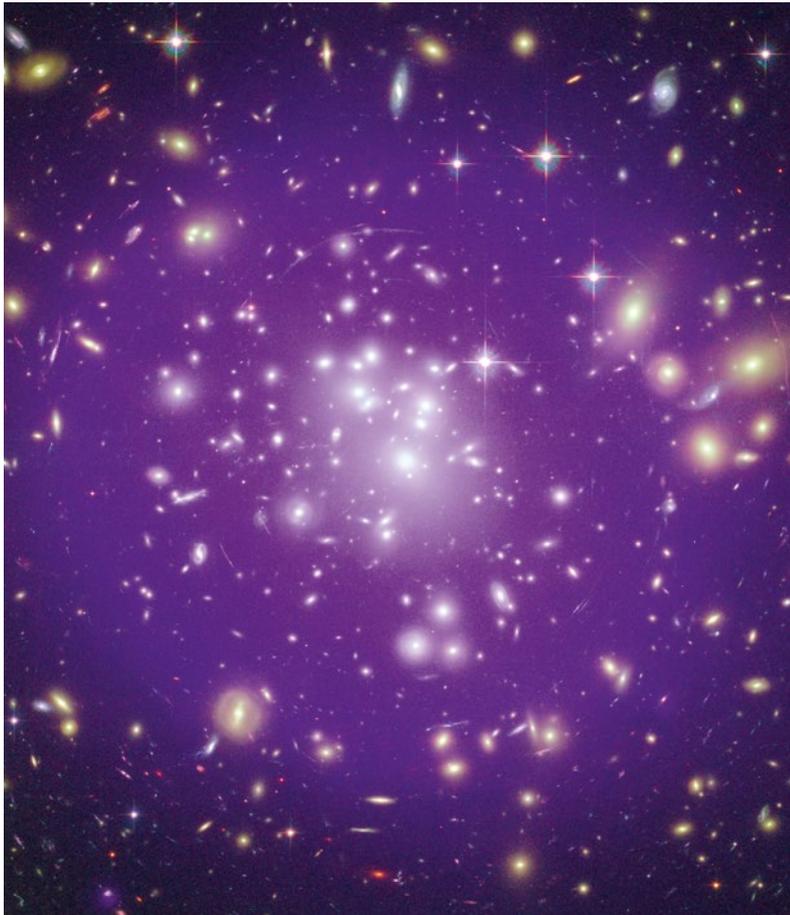
Es dauerte einen Moment, bis Marian begriff, doch dann überflutete eine Woge der Erleichterung sein Bewusstsein. Mit einem entrückten Lächeln, fast wie in Trance zog er die Waffe aus der Tasche und richtete sie auf seine Schläfe. »Gleich bin ich bei euch«, flüsterte er überglücklich und drückte ab. Den Knall des Schusses hörte Marian Leandros nicht mehr.

Nur Mikrosekunden später erwachte tausende Lichtjahre entfernt die Bewusstseinskopie, die im Moment seines Todes von der Datensphäre autorisiert und als Dirac-Paket versendet worden war, innerhalb der virtuellen Umgebung, die fortan ihre Heimstatt sein sollte. Das Jenseits war Realität, nur war es *ihr* Jenseits, das Jenseits der Maschinen ...

### DER AUTOR

**Frank W. Haubold** (Jahrgang 1955) studierte Informatik und Biophysik und schreibt seit 1989 Romane und Kurzprosa unterschiedlicher Genres (Sciencefiction, Fantastik, Gegenwart). 2008 gewann er als erster Autor überhaupt den Deutschen Science-Fiction-Preis in beiden Kategorien und 2012 den Kurd-Laßwitz-Preis.

# VORSCHAU



RÖNTGEN: MASACHOMI/E-H. PENG ET AL.; OPTISCH: MASASTSCI

## STREIT UM HUBBLES ERBE

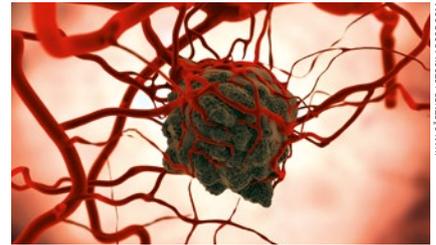
Die Hubble-Konstante gibt an, wie schnell das Weltall expandiert. Allerdings sind sich Kosmologen seit Langem uneins über den exakten Wert dieser wichtigen Größe, da sie mit verschiedenen Messmethoden zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Hat eines der Teams einen Fehler gemacht oder deutet der Disput den Weg zu neuen Naturgesetzen?



SOYOLBOLD SERGELEN

## SCHUTZ FÜR DIE HERDE

Die Wiedereinführung einer traditionsreichen Hunderasse soll mongolischen Hirten helfen: Der Bankhar verteidigt ihre Ziegen und Schafe gegen Wölfe und Schneeleoparden. Die Nomaden können sich daher mit kleineren Herden begnügen, um der Überweidung der Steppe Einhalt zu gebieten.



JUAN GARTNER / STOCK-ABBRECOM

## WELCHER TUMOR STREUT?

Genetische Analysen enthüllen bei Krebspatienten mit Metastasen, wie deren entartete Zellen voneinander abstammen. Mutationen, die zur Bildung von Tochtertumoren befähigen, scheinen demnach schon in frühem Erkrankungsstadium aufzutreten – ein möglicher Therapieansatz.



NASA/JPL CALTECH/NESS

## NASSE JUGEND DES MARS

Der NASA-Rover Curiosity kurvt seit mehr als fünf Erdenjahren über den Roten Planeten. Das fahrende Laboratorium hat zahlreiche Erkenntnisse über die geologische Geschichte des Mars geliefert, unter anderem Hinweise auf einstmals fließendes Wasser.

## 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)

# Verpassen Sie keine Ausgabe!



## JAHRES- ODER GESCHENKABO

### Ersparnis:

12 x im Jahr **Spektrum** der Wissenschaft für nur € 89,- inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 69,90), über 10 % günstiger als der Normalpreis.

### Wunschgeschenk:

Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten. Auch wenn Sie ein Abo verschenken möchten, erhalten Sie das Präsent.

### Keine Mindestlaufzeit:

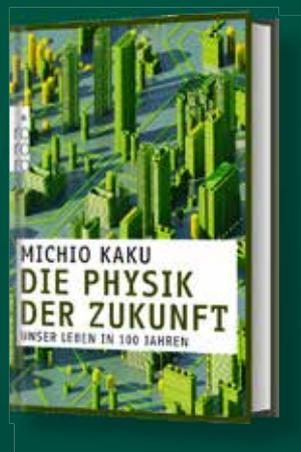
Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.

### Auch als Kombiabo:

Privatpersonen erhalten für einen Aufpreis von nur € 6,-/Jahr Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins im PDF-Format.

### Buch »Die Physik der Zukunft«

Wie werden wir leben – in 20, 60, 100 Jahren? Der Physiker Michio Kaku beschreibt in seinem Buch auf spannende Weise den Weg in die Zukunft. Dazu befragte er weltweit 300 namhafte Forscher, um so ein realistisches Szenario vorzustellen.



Wählen  
Sie Ihr  
Geschenk



### Spiel »Exit –

### Die Grabkammer des Pharaos«

Bei diesem einmaligen Spiel kommen die in der Grabkammer des Pharaos gefangenen Teilnehmer durch Kombinationsgabe, Teamgeist und Kreativität der Freiheit nach und nach näher. Dabei müssen sie auch ungewöhnliche Wege beschreiten.

## Bestellen Sie jetzt Ihr Abonnement!

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

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



Sie möchten Lehrstühle oder Gremien besetzen? Sie suchen weibliche Experten, Gutachter oder Redner zum Thema?

Finden Sie die passende Kandidatin in unserer Datenbank mit über 2.700 Profilen herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

**AcademiaNet** – das internationale Rechercheportal hoch qualifizierter Wissenschaftlerinnen

Die Partner

