

Spektrum

der Wissenschaft

Der Ursprung von Raum und Zeit

Was sind die kleinsten
Bausteine einer
Quantengravitation?

ÖKOLOGIE Aas sorgt für neues Leben
CHEMIE Alternativen zum Periodensystem
PHOTONIK Nach dem Vorbild der Natur

Spektrum der Wissenschaft KOMPAKT



Ob A wie Astronomie oder Z wie Zellbiologie: Unsere **Spektrum** KOMPAKT-Digitalpublikationen stellen Ihnen alle wichtigen Fakten zu ausgesuchten Themen als PDF-Download, optimiert für Tablets, zur Verfügung. Wählen Sie unter mehr als 300 verschiedenen Ausgaben und Themen. **Jetzt neu:** Beim Kauf von vier Kompakt-PDFs erhalten Sie ein fünftes Kompakt-PDF gratis.



Ausgewählte **Spektrum** KOMPAKT gibt es auch im Printformat!



Hier bestellen:
E-Mail: service@spektrum.de
[Spektrum.de/aktion/kompakt](https://www.spektrum.de/aktion/kompakt)



EDITORIAL

EIN KRIEG – VIELE LEIDTRAGENDE

Daniel Lingenhöhl, Chefredakteur
lingenhoehl@spektrum.de

► Angesichts des russischen Angriffskriegs in der Ukraine fällt es mir schwer, ein »normales« Editorial zu schreiben. Das Leid der Zivilbevölkerung und die Drohungen des russischen Präsidenten Wladimir Putin bis hin zum Einsatz von nuklearen Waffen überschattet alle wissenschaftlichen Themen.

Dabei zieht der Konflikt längst auch die Forschung in Mitleidenschaft: Ukrainische Wissenschaftlerinnen fliehen nach Westen, ihre männlichen Kollegen dürfen das Land nicht mehr verlassen, um es im Notfall mit der Waffe verteidigen zu können. Universitäten und Museen werden ebenso beschossen wie Schulen, Kindergärten und Krankenhäuser. Es herrscht entfesselte Gewalt gegen friedliche Zivilisten. Derweil bringen beispielsweise Biologen ihre Sammlungen in Sicherheit und laden Physikerinnen ihre Daten ins Internet hoch, um sie für später oder die Nachwelt zu sichern.

Außerhalb der Ukraine legen Forschungsinstitutionen Projekte mit Russland auf Eis: Das bekannteste Beispiel ist wahrscheinlich der »ExoMars«-Rover, eine gemeinsame Expedition der Europäischen Weltraumorganisation ESA mit der russischen Raumfahrtagentur Roskosmos. Dessen Start war 2022 geplant und wurde inzwischen abgesagt. Es ist völlig unklar, ob es jemals so weit kommen wird. Und die Zukunft der ISS ist offen: der Internationalen Raumstation, auf der Russen, Amerikaner und Europäer bislang gut zusammengearbeitet haben.

Die globalen Folgen des Ukraine-Kriegs lassen sich bisher nur in Ansätzen ahnen: von verschärften Hungerkrisen in Afrika bis hin zu verstärkter Abholzung in brasilianischen Indigenenreservaten, weil Getreide oder Rohstoffe aus Russland und der Ukraine fehlen. Und der Krieg wird die globale Preisspirale für Energie, Nahrung und Konsumgüter weiter antreiben. Dabei hat die Inflation bereits durch Corona an Fahrt aufgenommen. Diesem Preisschub der letzten Jahre können wir uns leider nicht auf Dauer entziehen. Die gestiegenen Kosten für Energie, Papier und Transport führen daher bei »Spektrum der Wissenschaft« zu einer Preiserhöhung im Einzelverkauf (auf 9,30 Euro) und beim Abo um 0,45 Euro pro Ausgabe ab 1. April (siehe Impressum S. 97).

In der Hoffnung auf friedlichere Zeiten grüßt

Daniel Lingenhöhl



NEU AM KIOSK!

Spektrum GESCHICHTE 1.22 gibt Einblicke in das Leben in der Jungsteinzeit – in der ersten Stadt der Menschheitsgeschichte.

IN DIESER AUSGABE



RENÉ KRAWCZYŃSKI

Die Diplom-Ökologe und Artenschutzspezialist erklärt ab S. 30, warum es sinnvoll ist, tote Wildtiere im Wald einfach liegen zu lassen.



TOBIAS RENKAWITZ

Computersysteme helfen Ärzten dabei, künstliche Hüft- und Kniegelenke einzusetzen. Was das bringt, erläutert der Heidelberger Mediziner ab S. 48.



ANTOINE MOREAU, PAULINE BENNET

Der Nanophysiker und die Physikerin untersuchen am Institut Pascal in Aubière optische Nanostrukturen bei Insekten. Das soll helfen, innovative photonische Strukturen zu entwickeln (S. 66).

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

22 FORSCHUNG AKTUELL

Booster für Elektrolyse

Zugabe bestimmter Ionen fördert die Wasserstoffproduktion an der Elektrode.

Verräterische RNA

Nukleinsäureschnipsel im Blut zeigen Schwangerschaftsrisiken an.

Die Zahlen-Verschwörung

Folgen die natürlichen Zahlen einem unerkannten Muster?

29 SPRINGERS EINWÜRFE

Dein Freund und Helfer

Vertraute Ordnungshüter sorgen für Wohlfühlen.

55 FREISTETTERS FORMELWELT

Wilder Kreisel

Präzession bringt sogar die Astrologie durcheinander.

76 SCHLICHTING!

Bestäubte Regentropfen

Benetzter Schmutz wirkt auf das Wasser zurück.

83 ZEITREISE

90 REZENSIONEN

95 LESERBRIEFE

96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE

97 IMPRESSUM

98 VORSCHAU

12 QUANTENGRAVITATION

WORAUS BESTEHT DIE RAUMZEIT?

Raum und Zeit könnten aus Bausteinen hervorgehen, die von ganz anderer Art sind als die bisher bekannten Teilchen und Wechselwirkungen.

Von Adam Becker

30 KADAVEROÖKOLOGIE **LEBEN IM TOD**

In unseren Wäldern stößt man selten auf ein verendetes Tier – Kadaver werden meist schnell beseitigt. Dabei ist Aas eine wichtige Nahrungsquelle für Insekten, Vögel oder Säuger.

Von René Krawczynski

38 EVOLUTIONSÖKOLOGIE

DIE BLÜTENBESTÄUBER VON ARIZONA

In den Chiricahua Mountains ernähren sich Kolibris und Fledermäuse von Nektar und übernehmen dabei die ökologische Rolle der Insekten.

Von Theodore H. Fleming, M. Brock Fenton und Sherri Fenton

48 MEDIZINTECHNIK **DER COMPUTER ALS OP-ASSISTENT**

Chirurgische Eingriffe laufen präziser und verlässlicher ab, wenn sie computerunterstützt erfolgen. Der Rechner liefert dabei räumliche Informationen und hilft, Ungenauigkeiten zu vermeiden.

Von Tobias Renkawitz

56 CHEMIE **ZEIT FÜR EINE NEUE ORDNUNG?**

Seit mehr als 100 Jahren bringt das Periodensystem der Elemente Struktur in die Vielfalt der Stoffe. Aber vielleicht gibt es ja noch eine bessere Methode, dieses Ziel zu erreichen.

Von Guillermo Restrepo

66 PHOTONIK **NACH DEM VORBILD DER NATUR**

Die farbenfrohen Muster vieler Insekten beruhen auf winzigen Nanostrukturen in den Panzern oder Flügeln der Tiere. Sie inspirieren Fachleute dazu, völlig neuartige photonische Bauteile zu entwickeln.

Von Antoine Moreau und Pauline Bennet

78 KÜNSTLICHE INTELLIGENZ **KI ERSCHAFFT KI**

Schon lange versucht man, neuronale Netze zu entwickeln, die nur wenige Trainingsdaten benötigen. Das ist nun gelungen – dank übergeordneter KI-Programme, die den Aufbau von Netzwerken optimieren.

Von Anil Ananthaswamy

84 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN **KRUMMES ORIGAMI**

Papier entlang gekrümmter Knicklinien zu falten, erzeugt eine erstaunliche Vielfalt von Formen und findet sogar Anwendung in der Architektur.

Von Christoph Pöppe

12

TITELTHEMA
WORAUS BESTEHT DIE RAUMZEIT?

CARYLN / GETTY IMAGES / ISTOCK



SOUVEN / GETTY IMAGES / ISTOCK

30

KADAVERÖKOLOGIE
LEBEN IM TOD

48

MEDIZINTECHNIK
DER COMPUTER
ALS OP-ASSISTENT



MIT FRIEDL. GEM. VON DEPIK SYNTHEIS
(GE-ZERTIFIZIERUNG NOCH AUSSTEHEND)

SEUNGWON KIM / GETTY IMAGES / ISTOCK

56

CHEMIE
ZEIT FÜR
EINE NEUE
ORDNUNG?

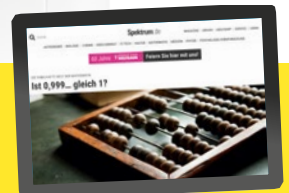
				5	10.811	6	12.0
				B	Boron	C	Carbon
				13	26.982	14	28.0
				Al	Aluminum	Si	Silicon
29	63.546	30	65.38	31	69.723	32	72.4
Cu	Copper	Zn	Zinc	Ga	Gallium	Ge	Germanium
47	107.858	48	112.411	49	114.82	50	118
Ag	Silver	Cd	Cadmium	In	Indium	Sn	Tin
79	196.967	80	200.592	81	204.38	82	207
Au	Gold	Hg	Mercury	Tl	Thallium	Pb	Lead



66

PHOTONIK
VORBILD NATUR

YONBY / GETTY IMAGES / ISTOCK



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

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

SPEKTROGRAMM





MIKROBENMIX FÄRBT SEE ROSA

► Auf Middle Island vor der australischen Westküste findet sich eines der größten Naturwunder des Fünften Kontinents: der Lake Hillier. Der 600 Meter lange und bis zu 250 Meter breite See ist extrem salzig und leuchtet sattrosa in der grünen Vegetation auf. Lange war unklar, wie es zu dieser außergewöhnlichen Färbung kommt. Ein Team um Scott Tighe von der University of Vermont in Burlington hat das Gewässer untersucht und die mutmaßliche Ursache des Phänomens herausgefunden: Mikroben.

Mit Hilfe von Genomuntersuchungen ermittelte die Gruppe, welche Mikroorganismen in dem See vorkommen. Demnach leben dort mindestens 500 Algen-, Bakterien-, Archaeen- und Virenspezies, die mit dem hohen Salzgehalt zurechtkommen. Zu ihnen zählen das rot-orange gefärbte Schwefelbakterium *Salinibacter ruber* sowie rote Algen der Spezies *Dunaliella salina*. Ihre Anmutung verdanken sie Karotinoiden – fettlöslichen Pigmenten mit gelblichem bis rötlichem Farbton, die vermutlich einen Schutz gegen die besonderen Umweltbedingungen bieten. Diese spezielle Mikrobengemischung erkläre das Aussehen des Gewässers, schreiben die Forscher.

BioRxiv 10.1101/2022.02.17.480683, 2022

ARCHÄOLOGIE WAR STONEHENGE EIN KALENDER?

► Stonehenge im Süden des heutigen Englands ist eines der rätselhaftesten Monumente der Vergangenheit. Sicher scheint, dass sich die Positionen seiner tonnenschweren Sandsteinblöcke (»Sarsen«) an den Sonnenwenden orientieren. Welchen Zweck die Anlage damit im 3. Jahrtausend v. Chr. erfüllte, ist aber nicht ganz klar. Timothy Darvill von der Bournemouth University postuliert nun, sie sei ein Kalender gewesen.

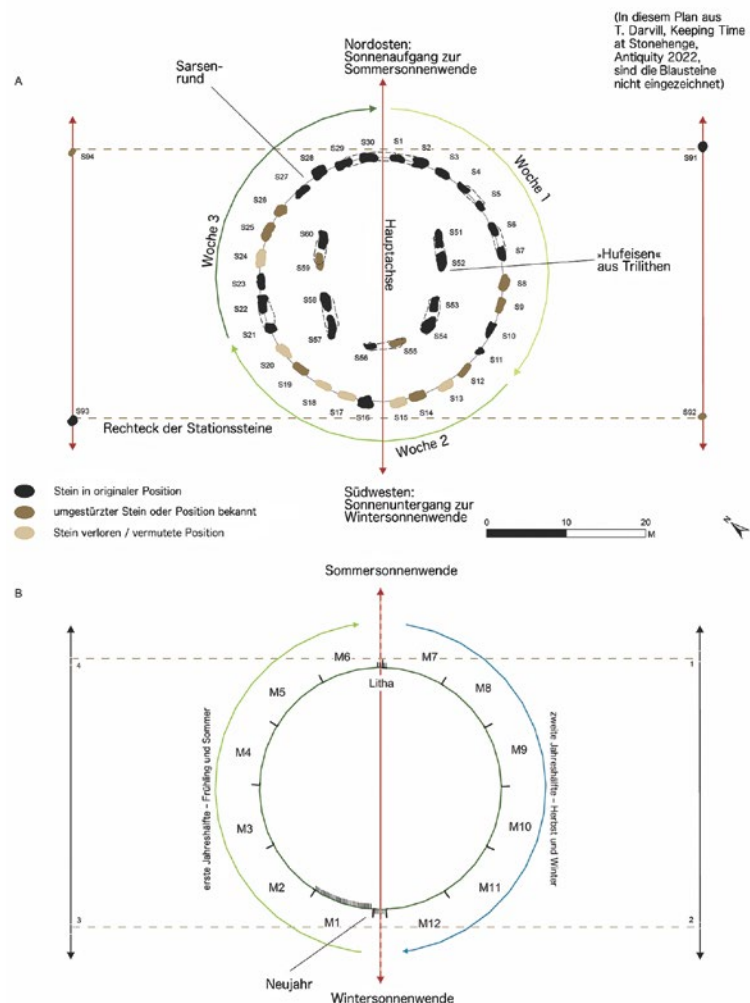
Stonehenge entstand in mehreren Phasen. Gegen 2500 v. Chr. wurde die Anlage als Rund aus 30 Blöcken arrangiert, auf denen weitere 30 Steine als Sturz ruhten. Innerhalb dieses Kreises errichteten die Erbauer ein Hufeisen aus fünf »Trilithen« (Sturzsteinen, die auf je zwei aufrechten Blöcken liegen). Dazwischen stellten sie Blausteine in Kreis- und Hufeisenform auf. Zudem befinden sich im Umfeld weitere Blöcke, darunter vier so genannte Stationssteine, die ein Rechteck bilden.

Die Hauptachse des Monuments läuft von Südwesten nach Nordosten. An ihr entlang lässt sich zweimal jährlich der Sonnenauf- beziehungsweise -untergang beobachten: im Nordosten während der Sommersonnenwende, im Südwesten während der Wintersonnenwende. Darvill meint in dem Monument nun sogar einen komplexen Kalender zu erkennen. Weil die Blöcke aus einer gemeinsamen Lagerstätte stammen, könnten sie, so vermutet er, als zusammengehöriges Ensemble errichtet worden sein.

Laut dem Forscher entspricht jeder der 30 äußeren Blöcke einem Tag. Der erste Tagstein liege am Eingang im Nordosten, zwei auffällig kleinere an 11. und 21. Stelle im Rund. Diese würden die Wochenanfänge markieren. Ein Monat hätte so aus drei Wochen mit je zehn Tagen bestanden; zwölf Monate hätten 360 Tage ergeben. Um das Jahr zu vervollständigen, seien die fünf Trilithen im Zentrum als fünftägiger Zwischenmonat gezählt worden. Die vier Stationssteine im Umfeld hätten die Schaltjahre abgebildet.



IM JAHRESRHYTHMUS Die Steinkreise von Stonehenge (oben) könnten eine Kalenderfunktion (unten) erfüllt haben.





Die These enthält allerdings einige Unklarheiten. So spielen die prominent aufgestellten Blausteine in dem postulierten Kalender keine Rolle. Ebenso bleibt offen, warum die Zählung der Tage im Nordosten begonnen haben soll, obwohl das Jahr Darvill zufolge mit der Wintersonnenwende begann, also im Südwesten. Rätselhaft scheint zudem, wieso im äußeren Rund jeder Block einem Tag entsprochen haben soll, im inneren Hufeisen dagegen je zwei Steine einem Tag.

Im alten Ägypten war um die Mitte des 3. Jahrtausends v. Chr. ein ähnlicher Kalender in Gebrauch, wie ihn Darvill für Stonehenge vorschlägt: 12 Monate à 3 Wochen zu je 10 Tagen plus 5 Zusatztage (Schalttage wurden nicht berücksichtigt). Sollte Darvill mit seiner These richtigliegen, würde das die Frage aufwerfen, ob die Kalenderkenntnisse damals aus Ägypten nach Britannien gelangt sind.

Antiquity 10.15184/aqy.2022.5, 2022

MEDIZIN HIRNSCHWUND BEREITS BEI MÄSSIGEM ALKOHOLKONSUM

► Schon ein zurückhaltender Alkoholkonsum, wie er bei vielen Menschen üblich ist, geht mit einer Schrumpfung und vorzeitigen Alterung des Gehirns einher. Zu diesem Schluss kommen Forscherinnen und Forscher um Reagan Wetherill von der University of Pennsylvania, nachdem sie medizinische Daten von mehr als 36000 Erwachsenen analysiert haben. Hierfür griffen sie auf die Datenbank »UK Biobank« zu, die gesundheitsrelevante Informationen über mehrere hunderttausend britische Bürger enthält. Neben grundlegenden Angaben wie Alter, Körpergröße, Geschlecht und sozioökonomischem Status lassen sich in der Datenbank auch Hirnscans abfragen – magnetresonanztomografische Daten, die Rückschlüsse auf das Hirnvolumen erlauben. Außerdem hatten alle untersuchten Personen auf Fragebogen über ihr Trinkverhalten während des jeweils vorangegangenen Jahres Auskunft gegeben.

Bei der Auswertung dieser Informationen zeigte sich: Je mehr Alkohol ein Mensch konsumiert, umso deutlicher vermindert ist sein Hirnvolumen. Die Schrumpfung kommt einem vorzeitigen Altern gleich, denn die Hirnmasse schwindet auch mit den Lebensjahren. Selbst Alkoholgengen, die weithin als unbedenklich gelten, sind demnach mit messbaren Effekten assoziiert. 50-Jährige beispielsweise, die täglich eine Flasche Bier oder ein Glas Wein zu sich nehmen, weisen einen Hirnverlust auf, der zwei zusätzlichen Lebensjahren entspricht – gemessen an dem durchschnittlichen Volumen, das man für dieses Alter erwarten würde. Der Schwund betrifft das gesamte Organ, vor allem aber den Frontal- und Scheitellappen und die Inselrinde. Diese Hirnregionen wirken an der Steuerung von Bewegungen sowie an der Verarbeitung von Sinneseindrücken mit; der Frontallappen gilt zudem als Sitz der individuellen Persönlichkeit und des Sozialverhaltens.

Bei dem beobachteten Effekt handle es sich um eine rückblickend ermittelte statistische Beziehung, betonen die Forscher. Daraus ließen sich nicht ohne Weiteres Aussagen über Ursache und Wirkung ableiten. Um die zu bekommen, seien beispielsweise Längsschnittstudien nötig, deren Teilnehmer im Lauf der Zeit wiederholt untersucht werden.

Der Zusammenhang zwischen Alkoholkonsum und Hirnschwund scheine nicht linear zu sein, so die Wissenschaftler. Während ein kleines Glas Bier pro Tag lediglich einem halben zusätzlichen Lebensjahr gleichkomme, seien es bei vier Gläsern täglich bereits zehn zusätzliche Jahre. Die Wirkung des Nervengifts Alkohols scheine mit steigender Menge exponentiell zu wachsen. Das heiße aber auch: Jene, die am meisten trinken, profitieren am stärksten von einer Einschränkung ihres Konsums.

Nature Communications 10.1038/s41467-022-28735-5, 2022

GEOWISSENSCHAFTEN

LOCH IN DER ERDKRUSTE LÄSST PATAGONIEN RASANT AUFSTEIGEN

► Um mehr als vier Zentimeter jährlich hebt sich derzeit ein Teil der südlichen Anden – schneller als irgendeine andere Region der Erde. Das hat zwei Gründe: Zum einen hat die dortige Kontinentalplatte ein »Loch« an ihrer Unterseite, hervorgebracht von geschmolzenem Gestein. Zum anderen taut der Patagonische Eisschild, der auf dem Gebirge lastet, rasant ab, wodurch sein Druck auf die Erdkruste nachlässt. Beide Prozesse zusammen lassen das Gebirge schnell emporsteigen, berichtet ein Team um Hannah F. Mark von der Washington University in St. Louis.

Mit Hilfe seismischer Messungen spürten die Forscherinnen und Forscher unter dem Patagonischen Eisschild eine Zone auf, in der sich Erdbebenwellen bereits in geringer

Tiefe auffällig langsam bewegen. Ihre Schlussfolgerung: Wo eigentlich festes Gestein, das die Schwingungen gut leitet, tief unter das Gebirge hinabreichen sollte, ist das Material ungewöhnlich heiß und weich. Vermutlich habe aufsteigende Schmelze die Unterseite der Kontinentalplatte abgetragen, schreibt das Team – ein Prozess namens thermische Erosion. Dadurch ist die Platte dort dünner und die Erdkruste besonders beweglich.

Das verflüssigte Material steigt in einer Zone auf, wo ein einstiger Mittelozeanischer Rücken in Richtung Erdkern sinkt. Er bildete früher einen Spalt, an dem Magma aus dem Erdinneren zur Oberfläche aufstieg und permanent neue Erdkruste hervorbrachte. Infolge dieser Neubildung schob sich der Mittelozeanische

Rücken immer näher an den südamerikanischen Kontinent heran und verschwand letztlich darunter. Beim Abtauchen weitete er sich und ließ in den zurückliegenden Jahrmillionen große Mengen an Gesteinsschmelze durch, die allmählich die Unterseite der Kontinentalplatte erodierte.

Während der Eiszeiten drückten gigantische Massen gefrorenen Wassers die südamerikanische Erdkruste dem heißen Strom entgegen. Der heutige Patagonische Eisschild in den südlichen Anden ist ein Überrest davon. Doch er schmilzt und drückt deshalb immer schwächer auf die ausgedünnte Kruste – die deshalb rapide in die Höhe schnellte.

Geophysical Research Letters
10.1029/2021GL096863, 2022

BIOLOGIE

WÜSTENBAKTERIEN MIT SELTSAMEN LICHTRÄDERN

► Ein einzigartiger Doppelring aus Proteinen ermöglicht es dem Bakterium *Gemmatimonas phototrophica*, Sonnenlicht zu ernten. Zwar stammen die meisten Teile des radförmigen Molekülkomplexes ursprünglich von einer anderen Mikrobe, die sie über horizontalen Gentransfer weitergegeben hat. Doch *G. phototrophica* entwickelte daraus etwas ganz Neues. Wie eine Arbeitsgruppe um Pu Qian von der University of Sheffield berichtet, fügte das Bakterium dem angeeigneten Fotosynthesekomplex einen äußeren Proteinring hinzu. Die so entstandene Antennenstruktur ist außergewöhnlich groß, effizient und stabil. Das überrascht, weil der Einzeller seine Fotosynthese quasi nur nebenbei betreibt.

G. phototrophica ernährt sich überwiegend von organischen Stoffen in seinem Lebensraum, dem Süßwas-

sersee Tian E Hu in der westlichen Wüste Gobi. Fotosynthese lässt das Bakterium zwar besser wachsen, ist aber keineswegs seine Hauptenergiequelle. Angesichts dessen erstaunt, dass der Einzeller eine derart komplexe Molekülstruktur dafür unterhält. Die äußeren Ringe bestehen aus 24 beziehungsweise 16 Proteineinheiten, die eintreffendes Licht absorbieren und dessen Energie auf Elektronen übertragen. In der Mitte des Molekülkomplexes befindet sich das Reaktionszentrum, in dem die eingefangene Energie eine Ladungstrennung bewirkt, was – nach vielen Zwischenschritten – in die Produktion von Kohlenwasserstoffen mündet.

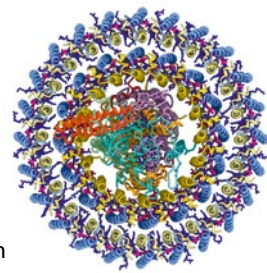
Alles in allem besteht der Fotosynthesekomplex aus mehr als 80 Einzelproteinen, in die rund 180 lichtempfindliche Moleküle wie Bakteriochlorophyll eingebettet sind. Von diesem gibt es drei Sorten; zwei davon sitzen in den äußeren Ringen und absorbieren grünes Licht, die dritte befindet sich nahe der Mitte und absorbiert rotes Licht. Die gesamte Struktur funktioniert wie ein Trichter, der die eingefan-

OPULENT Der Fotosynthesekomplex von *G. phototrophica*.

gene Energie in Richtung Zentrum leitet.

Zu den »Eigenentwicklungen« des Bakteriums gehören weiterhin Proteinstreben, die die Ringe mit dem Zentrum verbinden. Zudem sorgt eine Ansammlung von Lipidmolekülen zwischen Zentrum und innerem Ring für eine bessere Bindung zwischen den beiden. Rätselhaft ist, warum es sich für das Bakterium lohnt, einen derart großen und damit Ressourcen verschlingenden Fotosynthesekomplex zu betreiben. Der Grund könnte darin liegen, dass die Struktur chemisch außerordentlich stabil ist. Demnach kostet es zwar viel, sie herzustellen – aber weil sie lange hält, lässt sie sich in guten Zeiten auf Vorrat produzieren, um in schlechten die Versorgung zu sichern.

Science Advances 10.1126/sciadv.abk3139, 2022



ÖKOLOGIE DAS ENDE DES PERMAFROSTES

► Das Schwinden großer Teile der Permafrostlandschaft wird sich nicht mehr aufhalten lassen. Zu diesem Schluss kommt eine Forschergruppe um Richard Fewster von der University of Leeds, nachdem sie die Auswirkungen der Klimaerwärmung auf die Böden simulierte.

Heute erstrecken sich noch ausgedehnte Permafrostmoore entlang der nördlichen Ränder Skandinaviens sowie über weite Teile Westsibiriens. Dort ist der Boden in der Tiefe dauerhaft gefroren. Pflanzen, die im kurzen arktischen Sommer wachsen, verrotten kaum. Dadurch bleibt Kohlenstoffdioxid, das normalerweise beim Abbau des pflanzlichen Materials entsteht, im Boden gebunden. Doch in Zukunft drohen diese Böden aufzutauen. Schuld daran ist der Klimawandel, der in solchen Gebieten steigende Temperaturen und mehr Regen mit sich bringt. In der Folge zersetzt sich das

organische Material, und es werden große Mengen der Treibhausgase CO_2 und Methan frei, die ihrerseits den Klimawandel verstärken.

Fewster und sein Team ermittelten zunächst, welche klimatischen Bedingungen für den Erhalt von Permafrostböden gegeben sein müssen. Dann simulierten sie mit Hilfe aktueller Klimamodelle, wo diese Bedingungen in der Zukunft noch zu finden sein werden. Dabei legten sie unterschiedliche Entwicklungsszenarien zu Grunde: In den optimistischen gelingt es der Menschheit, den CO_2 -Ausstoß drastisch zu mindern, um die Erwärmung auf unter zwei Grad zu begrenzen; in den pessimistischen wird der Ausstoß kaum oder gar nicht gedrosselt.

In keinem Fall, so das Ergebnis, liegen nach 2040 im Norden Skandinaviens und Finnlands noch klimatische

Bedingungen vor, unter denen sich Permafrost halten kann. Diese Böden werden also unweigerlich tauen. Im optimistischsten Szenario schrumpft die Landfläche, die für Permafrostmoore geeignet ist, um fast 60 Prozent. In den pessimistischen bleibt sie nur noch im Norden Westsibiriens erhalten. Allerdings bietet das organische Material eine gewisse Isolation, so dass beim Auftauen nicht sämtlicher Kohlenstoff in die Atmosphäre entweicht, schreiben die Forscher.

Wie sich das Tauen der Permafrostböden auswirken wird, ist nicht bis ins letzte Detail verstanden. Denn dabei überlagern sich viele gegenläufige Effekte. Die meisten Fachleute halten den Verlust des Permafrostes jedoch unterm Strich für einen starken weiteren Treiber des Klimawandels.

Nature Climate Change 10.1038/s41558-022-01296-7, 2022



VOM KLIMAWANDEL BEDROHT Permafrostlandschaft in Sibirien.

VADIMIR MELNIK / STOCK.ADOBE.COM

ASTRONOMIE VERSCHMELZENDE FLECKEN AUF EINEM NEUTRONENSTERN

► Das NASA-Röntgenteleskop NICER, das außen angebracht an der Internationalen Raumstation (ISS) die Erde umrundet, hat Flecken mit extrem starker Röntgenstrahlung registriert, die sich über einen Neutronenstern hinwegbewegen und dabei verschmelzen. Drei solcher Flecken auf dem Himmelskörper SGR 1830-0645 ließen sich mit dem Teleskop verfolgen, berichten Forscherinnen und Forscher um George Younes vom Goddard Space Flight Center der NASA.

NICER soll helfen, den inneren Aufbau von Neutronensternen besser zu verstehen. Jene Himmelskörper strahlen sehr aktiv im Röntgenbereich des elektromagnetischen Spektrums. Sie entstehen, wenn ein massereicher Stern am Ende seines Lebens zu einer dichten Kugel kollabiert. Unsere Sonne

beispielsweise würde dabei auf rund 20 Kilometer Durchmesser schrumpfen, wäre sie nicht zu massearm für diesen Vorgang. Es entsteht ein Gebilde ähnlich einem gigantischen Atomkern, dessen Dichte so hoch ist, dass ein Teelöffel davon auf der Erde so viel wiegen würde wie ein Gebirge.

Magnetare sind Neutronensterne mit extrem starken Magnetfeldern. Ihre Oberfläche kann wegen der gewaltigen magnetischen Flussdichte mancherorts regelrecht aufschmelzen, wie das Team um Younes beschreibt. Bei einem solchen Vorgang hätten sich die Flecken auf dem Magnetar SGR 1830-0645 gebildet, die NICER registrierte. Sie gehen wohl mit der Bildung magnetischer Schleifen einher, wie sie ähnlich auch über der Sonnenoberfläche erscheinen. Diese Schleifen

senden Röntgenstrahlung aus, die in den NICER-Messungen als periodische Intensitätsspitze erscheint und die Rotationsdauer des Magnetars anzeigt.

Zuvor hatten Fachleute entsprechende Strahlungsmaxima immer nur sporadisch bei verschiedenen Magnetaren zu unterschiedlichen Zeiten beobachtet. Jetzt ermöglichte es das NICER-Teleskop, die Flecken über einen mehrwöchigen Zeitraum zu verfolgen. Dabei zeigte sich, wie jeweils drei aufeinander folgende Intensitätsspitzen in immer geringerem zeitlichem Abstand auftraten und schließlich zu einer verschmolzen.

SGR 1830-0645 liegt im Sternbild Schild und ist schätzungsweise 13000 Lichtjahre von uns entfernt.

The Astrophysical Journal Letters 10.3847/2041-8213/ac4700, 2022

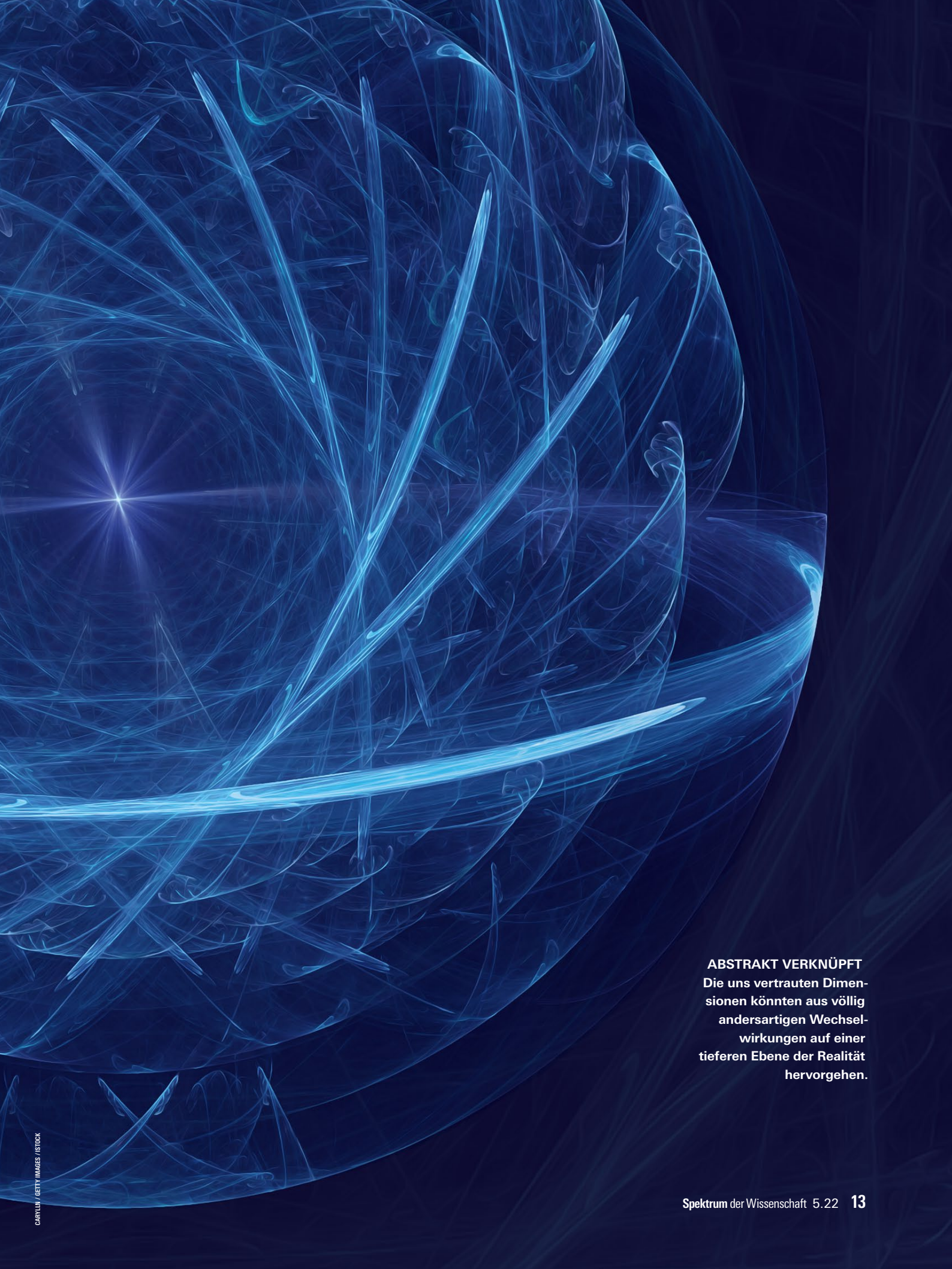
QUANTEN- GRAVITATION WORAUS BESTEHT DIE RAUMZEIT?

Raum und Zeit könnten aus fundamentalen Bausteinen hervorgehen, die von ganz anderer Art sind als die bekannten Teilchen und Wechselwirkungen. Auf einem Weg zu einer Quantentheorie der Schwerkraft gilt es herauszufinden, welche genau das sind.



Adam Becker ist promovierter Astrophysiker, Journalist sowie Buchautor und arbeitet als Wissenschaftskommunikator für das kalifornische Lawrence Berkeley National Laboratory.

» [spektrum.de/artikel/2000455](https://www.spektrum.de/artikel/2000455)



ABSTRAKT VERKNÜPFT
Die uns vertrauten Dimen-
sionen könnten aus völlig
andersartigen Wechsel-
wirkungen auf einer
tieferen Ebene der Realität
hervorgehen.

Wenn die theoretische Physikerin Natalie Paquette von der University of Washington in Seattle versucht, eine zusätzliche Dimension heraufzubeschwören, beginnt sie mit kleinen Kreisen. Sie sind überall in Raum und Zeit verstreut und führen mittels ihrer Krümmung immer wieder zurück zum Ausgangspunkt. Dann zieht Paquette die Schleifen zunehmend enger, und es kommt zu einer merkwürdigen Verwandlung: Die Extradimension erscheint plötzlich nicht mehr winzig, sondern wird riesengroß. »Wir schrumpfen eine Raumrichtung«, erläutert Paquette. »Aber wenn wir versuchen, das über eine bestimmte Grenze hinaus zu tun, entsteht eine neue, ausgedehnte Dimension.«

Paquette ist beileibe nicht die Einzige, die über solche seltsamen Verwandlungen nachdenkt. In zahlreichen Fachbereichen drehen sich unterschiedliche theoretische Ansätze um die Annahme, dass der Raum und sogar die Zeit keine fundamentalen Erscheinungen sind. Stattdessen könnten sie »emergent« sein, das heißt sich aus der Struktur und dem Verhalten noch grundlegenderer Komponenten ergeben. Auf dieser tieferen Ebene der Realität gäbe es auf Fragen nach dem Wo und dem Wann vielleicht überhaupt keine sinnvollen Antworten mehr. »Vielen physikalischen Beobachtungen zufolge ist die Raumzeit, so wie wir sie heute verstehen, nicht der Weisheit letzter Schluss«, bekräftigt Paquette.

Solche radikal erscheinenden Vorstellungen sind die jüngste Fortsetzung der seit einem Jahrhundert laufenden Suche nach einer Theorie der Quantengravitation. Diese soll die beste verfügbare Beschreibung der Schwerkraft, Albert Einsteins allgemeine Relativitätstheorie, mit der Quantenphysik vereinen. Erstere beschreibt, wie Masse das Gefüge aus Raum und Zeit verzerrt, Letztere dreht sich um die Eigenarten von subatomaren Teilchen. Beide Konstrukte haben sich bei zahllosen zunehmend ausgefeilten Experimenten bewährt, die zu ihrer Überprüfung entwickelt wurden. Man könnte meinen, sie müssten lediglich zusammengeführt werden und schon hätte man eine »Theorie von allem«.

AUF EINEN BLICK WETTBEWERB DER FORMELWERKE

- 1 Die Raumzeit könnte sich aus noch grundlegenden Komponenten als den bekannten Teilchen ergeben. Auf dieser Ebene wären vielleicht endlich Relativitäts- und Quantentheorie vereinbar.
- 2 Unter verschiedenen Herangehensweisen ist die Stringtheorie besonders populär. Sie offenbart Zusammenhänge zwischen Quanteninformationen und der Gravitation in einem Modelluniversum.
- 3 Gleichzeitig werden konkurrierende Ansätze weiter ausgearbeitet. Klare experimentelle Hinweise lassen auf sich warten. So bleibt nur die Hoffnung auf einen mathematischen Durchbruch.

Aber für die beiden Konzepte findet sich partout kein gemeinsamer Rahmen. Bei der Relativitätstheorie ergeben sich Widersprüche und unphysikalische Unendlichkeiten, sofern man versucht, sie auf den Skalen der Quantenphysik anzuwenden. Irgendwie gelingt es der Natur trotzdem, beide zusammenzubringen, denn nichts anderes muss in den ersten Momenten des Urknalls geschehen sein, und es passiert weiterhin im Inneren der Schwarzen Löcher. Wir Menschen haben bloß noch nicht verstanden, wie der Trick funktioniert. Ein Teil des Problems betrifft die Art und Weise, wie die Theorien mit Raum und Zeit umgehen. Während beide in der Quantenphysik als unveränderlich gelten, lassen sie sich in der allgemeinen Relativitätstheorie nach Belieben verzerren.

Eine Theorie der Quantengravitation müsste die unterschiedlichen Vorstellungen irgendwie miteinander in Einklang bringen. Eine Möglichkeit dazu wäre, das Problem an seiner Wurzel zu packen, der Raumzeit selbst, indem man diese aus etwas Fundamentalere entstehen lässt. Viel versprechende Ansätze und erste Erfolge bei Teilaspekten beleben seit einigen Jahren die Hoffnung auf einen Durchbruch. Wenn die Raumzeit emergent ist, dann könnte die Klärung der Frage, wie und woraus sie entsteht, der fehlende Schlüssel zu einer Theorie von allem sein.

Mathematische Brücken zwischen grundverschiedenen Welten

Die meisten Fachleute hängen heute der so genannten Stringtheorie an. Hierbei sind Vibrationen der namensgebenden Strings die Ursache jedweder Materie und Energie. Sie rufen die unzähligen subatomaren Partikel hervor, die in Teilchenbeschleunigern auf der ganzen Welt beobachtet werden können. Sie sind sogar für die Schwerkraft verantwortlich, da sie ein hypothetisches Teilchen erzeugen, das sie überträgt, das Graviton.

Doch die Stringtheorie ist schwer zu verstehen und bewegt sich auf einem komplizierten mathematischen Terrain, dessen Erkundung bislang schon Jahrzehnte gekostet hat. Und noch immer ist ein Großteil der Strukturen unerforscht. Die aktuellen Expeditionen in die weißen Flecken dieser Landkarte navigieren hauptsächlich mit Instrumenten, die sich Dualitäten nennen. Das sind Entsprechungen zwischen einer Art von System und einem anderen.

Ein Beispiel dafür ist die eingangs erwähnte Beziehung von kleinen und großen Dimensionen. Versucht man, eine Raumrichtung kompakt zusammenzupressen, so erhält man etwas, das identisch ist mit einer Welt, in der die Dimension stattdessen riesig ist. Der Stringtheorie zufolge sind beide Situationen austauschbar. Dann kann man rechnerisch hin- und herwechseln und Werkzeuge aus der einen Umgebung nutzen, um die andere besser zu verstehen.

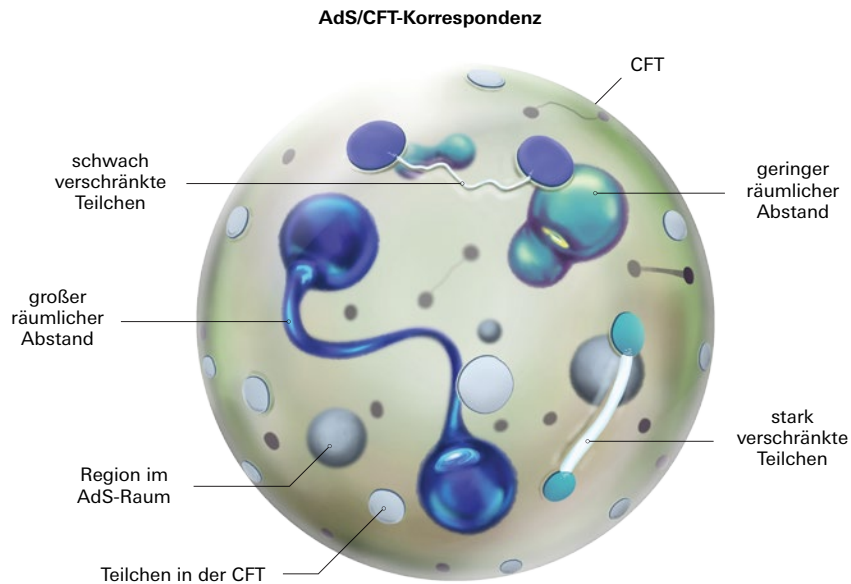
Für viele, die sich mit der Stringtheorie beschäftigen, ist eine spezielle Dualität ausgesprochen interessant. Sie legt nahe, dass der Raum selbst emergent ist. Die Idee entstand 1997, als Juan Maldacena vom Institute for Advanced Study in Princeton eine gut verstandene Quantentheorie namens konforme Feldtheorie (CFT) mit einer ungewöhnlichen Art

Wie Raumzeit entstehen könnte

Raum und Zeit gelten gemeinhin als Bühne, auf der sich alles im Universum abspielt. Doch hinter den Kulissen wirken womöglich noch fundamentalere Elemente, die völlig andere Eigenschaften haben. Aus deren Zusammenspiel würde die Raumzeit dann emergent hervorgehen. Im Lauf einer jahrzehntelangen Suche haben sich in Fachkreisen zwei grundverschiedene Modelle als besonders viel versprechend hervor getan: die Stringtheorie und die Schleifenquantengravitation. Dabei ist völlig offen, welche von ihnen der wahren Natur der emergenten Raumzeit nahekommt – oder ob womöglich beide danebenliegen.

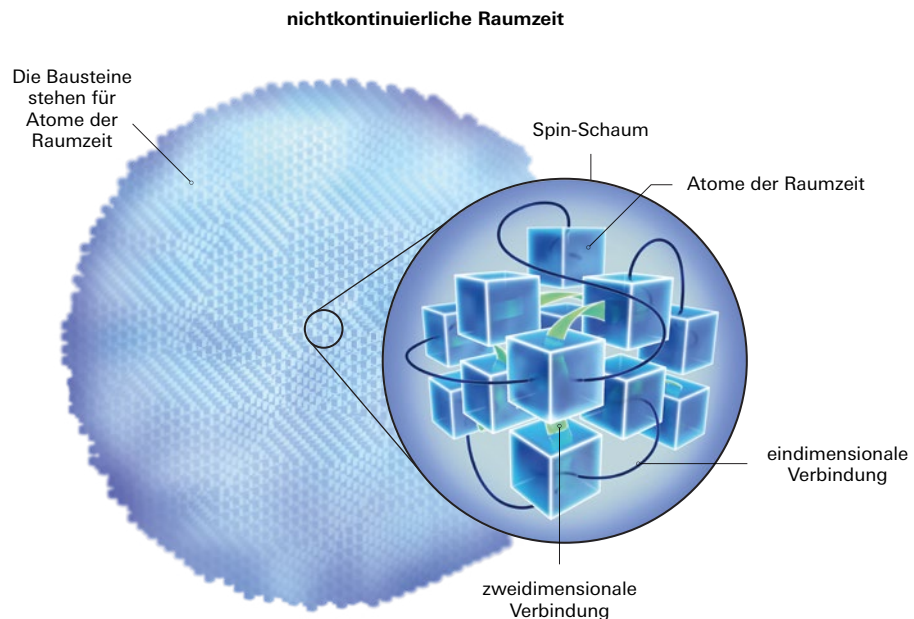
Emergente Raumzeit laut der Stringtheorie

Für ein AdS-Raum genanntes Modelluniversum lässt sich im Rahmen der Stringtheorie eine mathematische Äquivalenz zu einer Quantenfeldtheorie namens CFT bilden, die auf dem Rand des Raums gilt. Quantenmechanische Verschränkungen zwischen Elementen, die sich auf dem Rand aufhalten, entsprechen dann Raumregionen im Inneren. Stärker verknüpfte Teilchen in der CFT korrespondieren mit näher gelegenen Raumregionen im AdS-Raum.



Emergente Raumzeit laut der Schleifenquantengravitation

Raum und Zeit sind keine beliebig kontinuierlichen Dimensionen, sondern gehen, sofern man genau genug hinschaut, auf kleinste Atome der Raumzeit zurück. Die Bausteine sind mittels ein- und zweidimensionaler Fäden und Bänder verknüpft und erzeugen einen so genannten Spin-Schaum. Das Wirken des Netzwerks bringt auf großen Skalen die Raumzeit hervor.



ELENA HARTLEY / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2022

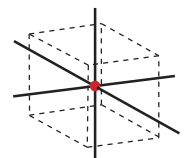
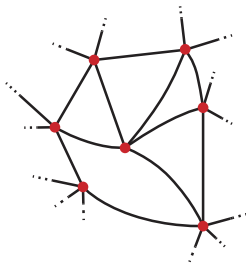
Viele Ansätze zur Quantengravitation

Zahlreiche Modelle sollen Quantenmechanik und Gravitation zusammenführen. Einige der am häufigsten diskutierten stellen wir hier vor.

Schleifenquantengravitation

Bei dem Modell erzeugen hypothetische gewundene Gebilde durch ihr Zusammenwirken die Raumzeit. Dadurch ist diese nicht mehr glatt, sondern durch Schleifen und deren Knoten in Größenordnungen der Plancklänge quantisiert. Die Knoten des Netzwerks ähneln mathematisch den Spins von Elementarteilchen, daher ist der Raum ein »Spin-Netzwerk«. Das auch Loop-Quantengravitation genannte Modell ist seit seinen Anfängen in den 1970er und 1980er Jahren bereits weit entwickelt und zählt zu den aussichtsreichsten Kandidaten für einen Durchbruch.

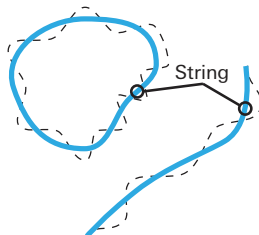
Spin-Netzwerke bestimmen die Geometrie des Raums



Das kleinstmögliche Volumen enthält gerade einen Knotenpunkt

Stringtheorie

Die Stringtheorie verwendet als fundamentale Objekte eindimensionale »Strings« (englisch für Saiten). Da es keine punktförmigen Objekte mehr gibt, werden unendlich große Werte automatisch vermieden. Typisch ist das Auftreten zahlreicher Extradimensionen neben den uns bekannten vier. Sie müssten dann auf Skalen »kompaktifiziert« (mathematisch eingerollt) werden, die wir experimentell noch nicht beobachten können. Es sollten weitere Teilchen vorkommen, etwa im Rahmen der »Supersymmetrie« verschiedene extrem schwere Partner der bereits bekannten Elementarteilchen. Der Nachweis solcher Objekte würde die Stringtheorie unterstützen, war aber bislang erfolglos.



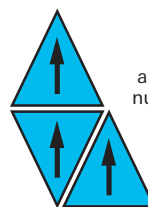
Alle Phänomene und Teilchen ergeben sich aus eindimensionalen Strings und deren Schwingungszuständen

Kausale dynamische Triangulation

Diese Theorie baut die Raumzeit aus vierdimensionalen Dreiecken als kleinsten Bausteinen auf (daher Triangulation). Dabei werden nur solche Dreiecke verknüpft, welche in die gleiche zeitliche Richtung weisen (daher kausal). Die einzelnen Elemente der Raumzeit organisieren sich dann von selbst. Das Modell erinnert an Strukturbildung, wie sie auf größeren Skalen in der Natur stattfindet, oder an eine Simulation in einem Computerprogramm, wo stark variable mikroskopische Elemente allein auf Grund gewisser Verknüpfungsvorschriften und Rahmenbedingungen am Ende in einen stabilen Zustand gelangen.

Wirkung

Der Raum wird aus Dreiecken aufgebaut. Es sind nur Kombinationen zulässig, deren Zeitrichtung übereinstimmt



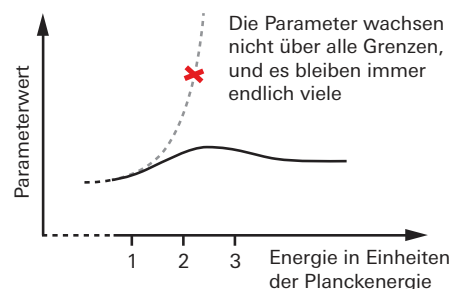
Ursache

Die wahrscheinlichste Form entsteht durch Überlagerung aller möglichen Anordnungen



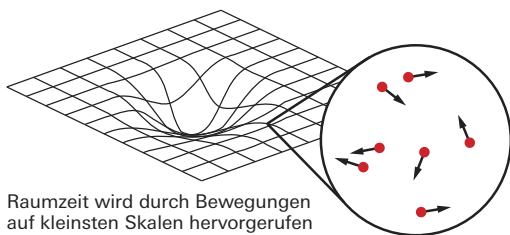
Asymptotisch sichere Gravitation

Wenn man, ähnlich wie bereits bei anderen Kräften, bei der Gravitation eine Quantenfeldtheorie verwendet, funktioniert das bei sehr hohen Energien nicht, denn es müssten unendlich viele Parameter bestimmt werden. Doch möglicherweise genügt es, selbst im Grenzfall unendlich hoher Energien nur eine endliche Anzahl von Werten zu ermitteln, die ihrerseits alle endlich bleiben. Die Theorie wäre dann »asymptotisch sicher«. Der Gedanke gewann mit Arbeiten der deutschen Physiker Christof Wetterich und Martin Reuter an Bedeutung, nachdem diese in den 1990er Jahren passende theoretische Werkzeuge entwickelten. Allerdings sind die prinzipiell erforderlichen unendlichdimensionalen Berechnungen nicht möglich, was Vereinfachungen nötig macht.



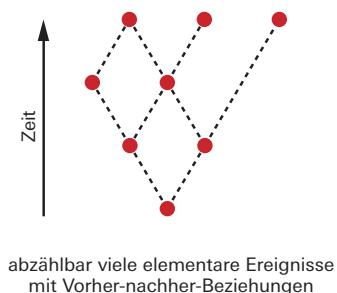
Emergente Gravitation

Das Verhalten von Flüssigkeiten, die aus unzähligen mikroskopischen Teilchen mit vielen Freiheitsgraden bestehen, lässt sich mit Hilfe der Strömungsmechanik beschreiben. Deren Gesetze haben mit den molekularen Komponenten des Systems nichts mehr zu tun. Der analoge Ansatz bei der emergenten Gravitation ist, die Raumzeit und ihre Krümmungen aus dem Zusammenspiel elementarer Bausteine und ihrer Kräfte herzuleiten. Die Idee geht auf den sowjetischen Physiker Andrei Sacharow zurück, der 1967 davon ausging, andere Felder würden die Schwerkraft durch Vakuumfluktuationen erzeugen – ähnlich wie beispielsweise ein magnetisches Feld elektrische Ströme induziert. Daher wird die Theorie auch induzierte Gravitation genannt.



Kausale Mengen

Bei kausalen Mengen ist die Raumzeit nicht kontinuierlich, sondern besteht aus vielen diskreten Punkten. Auf genügend kleinen Skalen verschwindet sie gewissermaßen. Physikalische Vorgänge lassen sich aus Ordnungsprinzipien innerhalb der Punktmengen herleiten. Elemente werden kausal miteinander verknüpft, so dass sich etwa für die möglichen Bewegungen von Teilchen eine Art Stammbaum ergibt. Das Volumen einer Raumregion wird durch einfaches Abzählen bestimmbar. Das Modell geht von relativ wenigen Voraussetzungen aus und führt dennoch zu überprüfbareren Ergebnissen. Beispielsweise sagten Anhänger der Theorie bereits in den 1990er Jahren eine kosmologische Konstante in der richtigen Größenordnung vorher – lange bevor die Expansion im realen Universum entdeckt wurde. Viele Detailfragen zur physikalischen Dynamik sind aber noch offen.



von Raumzeit verknüpfte, dem Anti-de-Sitter-, kurz AdS-Raum. Auf den ersten Blick scheinen die beiden Modelle grundverschieden zu sein. Die CFT enthält keinerlei Schwerkraft, während im AdS-Raum die Relativitätstheorie gilt. Dennoch können beide Welten auf eine gemeinsame Weise beschrieben werden. Die Entdeckung der »AdS/CFT-Korrespondenz« verband eine Quantentheorie mit einem hypothetischen Universum mit Gravitation.

Der AdS-Raum besitzt in dieser Dualität eine Dimension mehr als die Quantenwelt der CFT. Doch die Diskrepanz ist kein Problem, sondern vielmehr ein Glücksfall. Das passt nämlich zu einer anderen Art von Korrespondenz, die einige Jahre zuvor von den Physikern Gerard 't Hooft von der Universität Utrecht und Leonard Susskind von der Stanford University hergeleitet wurde und holografisches Prinzip heißt. Ausgehend von Überlegungen über Schwarze Löcher vermuteten 't Hooft und Susskind, die Eigenschaften eines Raumgebiets ließen sich vollständig durch seine Grenzen beschreiben. Das heißt, die zweidimensionale Oberfläche eines Schwarzen Lochs enthält alle Informationen, die man braucht, um Aussagen über sein dreidimensionales Inneres zu treffen. »Viele Leute hielten uns vermutlich für verrückt«, erinnert sich Susskind. »Wir mussten wirken wie zwei gute Physiker auf Irrwegen.«

Wie bei dem holografischen Prinzip codiert die vierdimensionale CFT in der AdS/CFT-Korrespondenz jedwede Information über den mit ihr verknüpften fünfdimensionalen AdS-Raum. Dieser ganze Bereich geht aus den Wechselwirkungen zwischen den Bestandteilen des Quantensystems hervor. Maldacena vergleicht den Prozess mit dem Lesen eines Romans. »Wenn man eine Geschichte erzählt, konstruiert man handelnde Figuren«, sagt er. »Doch eigentlich gibt es nur Textzeilen. Aus diesen wird abgeleitet, was die Charaktere tun.« Laut Maldacena wären die Figuren im Buch so etwas wie die AdS-Theorie, während die CFT dem Text entspricht.

Die Welt steht und fällt mit quantenmechanischen Verbindungen

Aber woher kommt der Raum im AdS-Raum, und wenn er emergent ist, woraus entsteht er dann? Die Antwort verbirgt sich in einer seltsamen Art der quantenmechanischen Verknüpfung: der so genannten Verschränkung, durch die Eigenschaften von Objekten miteinander korreliert werden. Das geschieht auf eine Weise, die sich weder dem Zufall zurechnen noch mit klassischer Physik erklären lässt, was Einstein dazu bewogen hat, sie als »spukhafte Fernwirkung« zu bezeichnen.

So unheimlich sie erscheinen mag, ist die Verschränkung doch ein zentrales Merkmal der Quantenphysik. Wenn zwei quantenmechanische Objekte miteinander interagieren, bleibt ihre Verschränkung bestehen, solange sie gut genug vom Rest der Welt abgeschirmt bleiben – egal, wie weit sie sich unterdessen voneinander entfernen. Mittlerweile haben Physiker bei Experimenten die Verschränkung zwischen Teilchen aufrechterhalten, die einen Abstand von mehr als 1000 Kilometern zueinander hatten, und sogar zwischen solchen, bei denen sich eines auf dem Erdboden und das andere in einem Satelliten in einer Erdumlaufbahn

befunden hat. Zumindest prinzipiell könnten zwei Teilchen quer durch die Galaxie oder sogar das Universum verbunden bleiben. Distanzen scheinen für den Effekt keine besondere Rolle zu spielen.

Falls der Raum jedoch emergent ist, wäre die Eigenart der Verschränkung, über große Entfernungen hinweg konserviert zu bleiben, vielleicht gar nicht so mysteriös – schließlich wären Abstände dann lediglich ein Konstrukt. 2006 legten die Theoretiker Shinsei Ryū von der Princeton University und Tadashi Takayanagi von der Universität Kyoto im Rahmen einer gemeinsamen Veröffentlichung nahe, dass es überhaupt erst die Verschränkung ist, die Entfernungen im AdS-Raum hervorruft. Eng beieinanderliegende Bereiche auf der AdS-Seite der Dualität entsprechen dann stark korrelierten Komponenten der CFT.

Möglicherweise gilt so eine Beziehung nicht nur für das AdS-Modelluniversum, sondern auch für unseren Kosmos. »Was hält den Raum zusammen und unterbindet seinen Zerfall in einzelne Unterregionen?«, fragt Susskind und vermutet: »Verschränkungen zwischen seinen Teilen.« Quantenmechanische Verknüpfungen könnten also erst für die geordnete Geometrie um uns herum sorgen. »Zerstörte man sie irgendwie, fiel der Raum auseinander«, fährt Susskind fort. »Wir würden quasi das Gegenteil von emergentem Verhalten beobachten.«

Sollte dem so sein, legt das eine einfachere Lösung des Rätsels der Quantengravitation nahe: Die Raumkrümmungen müssten dann nicht mehr auf die Quantenebene heruntergebrochen werden, weil der Raum selbst aus einem grundlegenden Quantenphänomen hervorgeht. Susskind vermutet, das ist der Grund, warum es so schwierig war, eine Theorie der Quantengravitation zu finden. »Das hat nicht gut funktioniert, weil man von zwei verschiedenen Dingen ausgegangen ist, der allgemeinen Relativitätstheorie und der Quantenmechanik, und versucht hat, beide zusammenzubringen«, führt er aus. »Dabei sind beide viel zu eng miteinander verbunden, um sie schadlos erst voneinander zu trennen und dann wieder zusammenzufügen. Es gibt keine Gravitation ohne Quantenmechanik.«

Doch der Raum ist nur die halbe Miete. Da er und die Zeit in der Relativitätstheorie eng miteinander zur Raumzeit verbunden sind, muss jede Erklärung beide berücksichtigen. »Zeit muss auch irgendwie emergent sein«, meint Mark Van Raamsdonk von der University of British Colum-

bia in Vancouver. Er gehört zu den Vordenkern einer Bewegung, die Raumzeit mit Hilfe von Verschränkungen konstruieren will. »Aber das ist noch nicht gut verstanden und ein aktives Forschungsgebiet.«

Zu den Objekten, die auf die Art näher untersucht werden, gehören auch die aus der Sciencefiction bekannten Wurmlöcher, hypothetische Verbindungen zwischen weit entfernten Regionen der Raumzeit. Früher hielten es viele Fachleute für ausgeschlossen, Objekte durch solche Abkürzungen hindurchzuschicken, und sei es nur in Gedanken spielen. Doch in den letzten Jahren wurden auf Basis der AdS/CFT-Korrespondenz und ähnlichen Modellen denkbare Wege aufgezeigt, Wurmlöcher zu konstruieren (siehe »Spektrum« Februar 2017, S. 12). »Wir wissen nicht, ob wir das in unserem Universum tun könnten«, räumt Van Raamsdonk mit Blick auf den Modellcharakter des AdS-Raums ein. »Aber immerhin erscheinen bestimmte Arten von tatsächlich durchquerbaren Wurmlöchern nun theoretisch möglich.« Für die Raumfahrt wären die Wurmlöcher trotzdem nicht nützlich. Susskind ist Autor mehrerer einflussreicher Untersuchungen auf dem Gebiet. Wie er betont, könne man sie »nicht schneller durchqueren, als das Licht für den langen Weg drum herum braucht«.

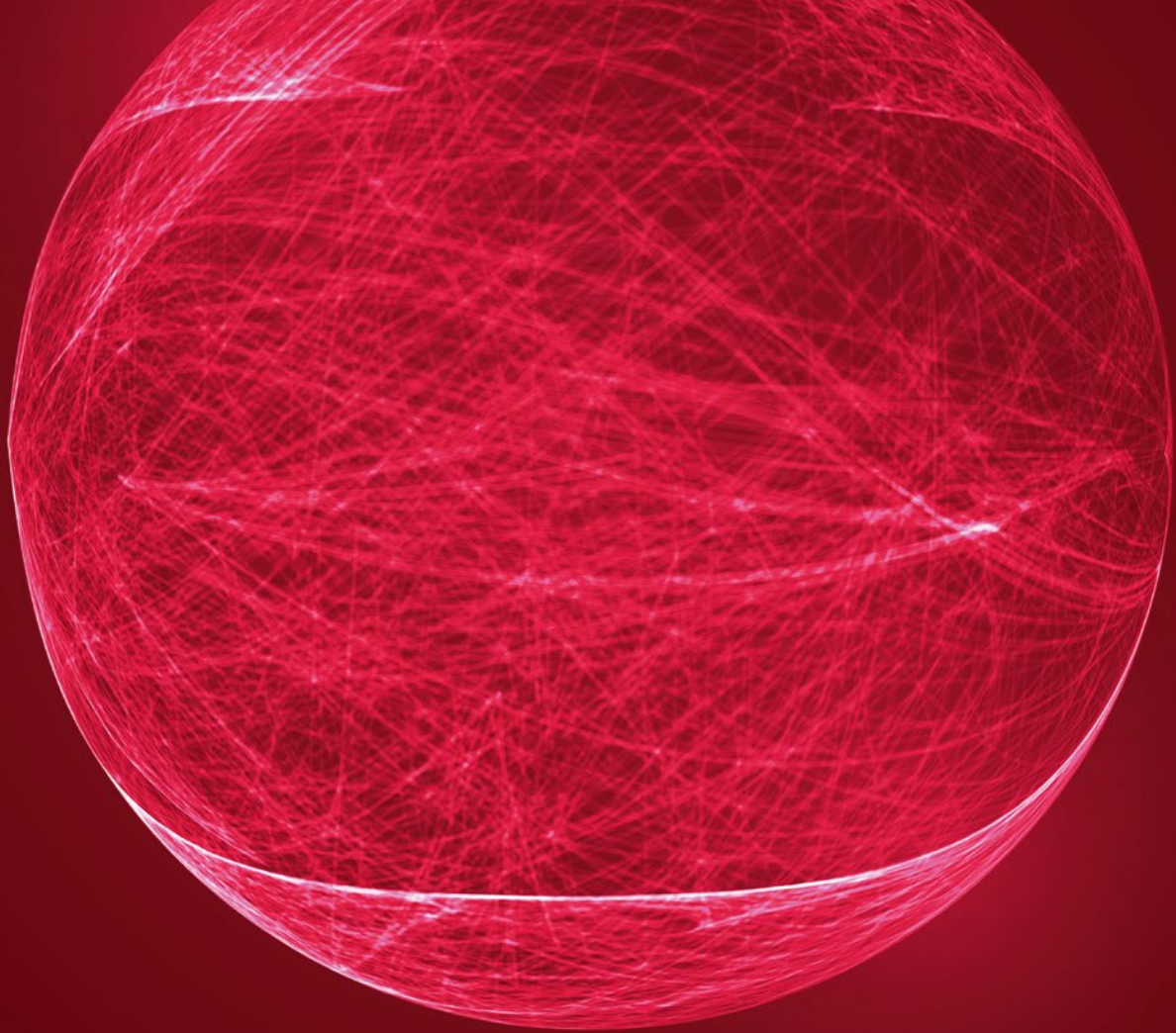
Die Frage, wie wir etwas jenseits von Raum und Zeit begreifen sollen, grenzt an Philosophie

Sollte die Stringtheorie richtigliegen, dann bestehen der Raum und eventuell auch die Zeit aus Quantenverschränkungen. Doch was genau soll das wiederum bedeuten? Wenn der Raum aus der Verschränkung zwischen Objekten gemacht ist, müssen diese dann nicht selbst irgendwo existieren? Und wie können sie miteinander verschränkt werden, sofern sie nicht prinzipiell Veränderung und somit Zeit erfahren? Wie sollen wir ihr Vorhandensein überhaupt begreifen, wenn die betrachteten Dinge weder Raum noch Zeit bevölkern?

Solche Fragen grenzen an Philosophie, und in der Tat beschäftigt sich dieses Fachgebiet intensiv damit. So betont Eleanor Knox, eine Philosophin der Physik am King's College London, eine emergente Raumzeit sei zwar unintuitiv. Aber das wäre kein Problem, denn »unsere Intuition liegt manchmal schrecklich daneben«. Sie habe sich »in der afrikanischen Savanne entwickelt, wo unsere Vorfahren mit makroskopischen Objekten, Flüssigkeiten und Tieren interagierten«. Das ließe sich nicht auf die Welt der Quantenmechanik übertragen. Wenn es um die Quantengravitation gehe, seien Fragen danach, wo sich etwas befinde, schlicht nicht zielführend.

Sicherlich nehmen Objekte im Alltag bestimmte Orte ein. Wie Knox und andere jedoch betonen, müssten Raum und Zeit deswegen noch lange nicht fundamental sein, sondern nur auf zuverlässige Weise aus dem entstehen, was eigentlich die Basis von allem ist. Der Wissenschaftsphilosoph Christian Wüthrich von der Universität Genf bemüht als Analogie eine Flüssigkeit. »Letztlich geht sie zurück auf Elementarteilchen wie Elektronen, Protonen und Neutronen oder, noch fundamentaler, Quarks und Leptonen. Haben Quarks und Leptonen flüssige Eigenschaften? Das ergibt doch keinen Sinn, oder? Aber wenn die Teilchen

Da Raum und Zeit eng miteinander verbunden sind, muss jede Erklärung beide berücksichtigen



HOLOGRAFISCH Vielleicht erzeugen Verknüpfungen den Raum wie eine 2-D-Struktur ein 3-D-Bild.

in ausreichender Zahl zusammenkommen und kollektiv auf eine bestimmte Weise auftreten, dann verhalten sie sich wie eine Flüssigkeit.« Analog mögen Raum und Zeit in der Stringtheorie und anderen Theorien der Quantengravitation zu Stande kommen. Insbesondere könnte sich die Raumzeit auf emergente Art aus den Dingen bilden, von denen wir normalerweise behaupten würden, sie bevölkerten das Universum, nämlich Materie und Energie selbst. »Es ist ja nicht so, dass wir ausgehend von Raum und Zeit diesen anschließend etwas Materie hinzufügen müssten«, erläutert Wüthrich. »Vielmehr kann etwas Materielles eine notwendige Bedingung für die Existenz von Raum und Zeit sein. Dann ist die Verbindung immer noch sehr eng, aber genau andersherum als ursprünglich gedacht.«

Es gibt allerdings auch andere Interpretationen der Erkenntnisse aus der AdS/CFT-Korrespondenz. Diese gilt zwar oft als Beispiel dafür, wie die Raumzeit aus einem Quantensystem hervorgehen könnte. Aber die Philosophin Alyssa Ney von der University of California in Davis hält den umgekehrten Fall für ebenso gerechtfertigt. »AdS/CFT dient als Übersetzungsanleitung zwischen Wissen über die

Raumzeit und über die Quantentheorie«, resümiert Ney. Dazu passe die Behauptung, Erstere sei emergent und Letztere fundamental – in der gegensätzlichen Richtung sei das jedoch genauso möglich. Die Korrespondenz könnte also gleichermaßen darauf hinweisen, dass die Quantentheorie emergent und die Raumzeit fundamental ist, oder sogar darauf, dass das für keine der beiden gilt und es eine noch grundlegendere Theorie gibt. Emergenz sei eine starke Behauptung, und Ney gibt sich offen dafür. »Aber wenn ich mir nur AdS/CFT anschau, reicht mir das noch nicht als überzeugendes Argument.«

Passt das Modell zur realen Welt?

Die wohl größere Schwierigkeit für solche stringtheoretischen Interpretationen steckt im Namen der AdS/CFT-Korrespondenz selbst. »Wir leben nicht in einem Anti-de-Sitter-Raum«, betont Susskind, »sondern in etwas, was viel eher einem De-Sitter-Raum entspricht.« Der De-Sitter-Raum beschreibt ein beschleunigt expandierendes Universum wie unseres. »Wir haben keinerlei Vorstellung davon, wie sich das holografische Prinzip darauf übertragen ließe«, räumt Susskind ein. Deswegen ist es eine der drängendsten Aufgaben für die Stringtheorie, herauszufinden, ob eine ähnliche Korrespondenz für einen Raum gilt, der dem tatsächlichen Weltall näher kommt.

»Wir werden einen besseren Zugang zu einer kosmologischen Version davon finden«, gibt sich Van Raamsdonk optimistisch.

Unterdessen hat sich noch bei keinem Experiment an Teilchenbeschleunigern irgendein Beweis für so genannte supersymmetrische Teilchen gefunden, auf die viele Versionen der Stringtheorie setzen. Laut der Supersymmetrie haben alle bekannten Teilchen ihren eigenen »Superpartner«. Dadurch würde sich die Anzahl der fundamentalen Teilchen verdoppeln. Am Large Hadron Collider des CERN bei Genf, auf den sich die Hoffnungen bei der Suche nach Superpartnern lange konzentrierten, gab es keine Anzeichen dafür. »Supersymmetrische Theorien bilden den Rahmen für alle präzise ausgearbeiteten Versionen der emergenten Raumzeit«, erklärt Susskind. »Gibt man die Supersymmetrie auf, verpufft jede mathematische Nachvollziehbarkeit der Gleichungen.«

Die Stringtheorie ist allerdings nicht der einzige Ansatz für eine emergente Raumzeit. Laut Abhay Ashtekar von der Pennsylvania State University in University Park hat sie »ihr Versprechen, Gravitation und Quantenmechanik zu vereinen, nicht eingelöst. Die Stärke der Stringtheorie liegt nun in ihrem extrem reichhaltigen Instrumentarium, das im gesamten Spektrum der Physik breite Anwendung findet.« Ashtekar ist einer der Begründer der populärsten Alternative zur Stringtheorie, der so genannten Schleifenquantengravitation. Dort sind Raum und Zeit nicht glatt und kontinuierlich wie in der allgemeinen Relativitätstheorie, sondern bestehen aus diskreten Komponenten. Ashtekar nennt sie »Stückchen oder Atome der Raumzeit«.



J.BOURJAI (COMMONS, WIKIMEDIA.ORG/PAIKI/FILE:CALABI_YAU.JPG) / PUBLIC DOMAIN

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/stringtheorie

Diese sind zu einem Netzwerk verbunden und spannen mittels ein- und zweidimensionaler Fäden und Bänder einen so genannten Spin-Schaum auf. Der Schaum ist zwar auf zwei Dimensionen beschränkt, dennoch ergibt sich daraus unsere vierdimensionale Welt. Ashtekar veranschaulicht die Situation mit einem Kleidungsstück: »Wenn Sie Ihr Hemd betrachten, wirkt es wie eine zweidimensionale Oberfläche. Unter einem Vergrößerungsglas sieht man, dass es aus eindimensionalen Fäden besteht. Aber weil sie so dicht gepackt sind, ist das Hemd für alle praktischen Zwecke zweidimensional. Entsprechend erscheint uns der Raum als ein dreidimensionales Kontinuum, das in Wirklichkeit von den Atomen der Raumzeit gewoben wird.«

Obwohl sowohl in der Stringtheorie als auch in der Schleifenquantengravitation die Raumzeit emergent sein soll, unterscheidet sich die Art der Emergenz bei beiden Theorien. Laut der Stringtheorie entsteht die Raumzeit oder

zumindest der Raum aus dem Verhalten eines davon anscheinend völlig losgelösten Systems aus Verschränkungen, ein wenig so, wie Straßenverkehr mit gelegentlichen Staus aus den kollektiven Entscheidungen einzelner Autofahrer hervorgeht. Die Autos sind nicht aus Verkehr gemacht, sie rufen ihn selbst erst hervor. In der Schleifenquantengravitation hingegen ist die Raumzeit eher mit einer Dünenlandschaft vergleichbar, die von der gemeinsamen Bewegung der Sandkörner im Wind geformt wird. Die Dünen sind aus dem gleichen Stoff, wenngleich sie weder so aussehen noch sich so verhalten wie die winzigen Körner.

Trotz solcher Unterschiede entsteht die Raumzeit sowohl bei der Schleifenquantengravitation als auch bei der Stringtheorie aus grundlegenden Komponenten. Andere Modelle einer Quantengravitation weisen ebenfalls in diese Richtung, etwa die »Kausalen Mengen« (siehe »Viele Ansätze zur Quantengravitation«). »Es ist wirklich auffällig, dass die meisten plausiblen Theorien heute in gewisser Weise die Aussage enthalten, die Raumzeit aus der allgemeinen Relativitätstheorie sei auf fundamentaler Ebene gar nicht mehr vorhanden«, merkt Knox an. »Zumindest in einer Sache scheinen die verschiedenen Herangehensweisen also übereinzustimmen. Bereits dieser Gedanke ist aufregend.«

Mangelnde experimentelle Daten erschweren die Suche nach einer Quantengravitation

Die moderne Physik ist zum Opfer ihres eigenen Erfolgs geworden. Sowohl die Quantenphysik als auch die allgemeine Relativitätstheorie machen in ihrem jeweiligen Geltungsbereich phänomenal präzise zutreffende Vorhersagen. Deswegen ist die Quantengravitation als Beschreibung nur in Extremsituationen vonnöten, bei denen enorme Massen auf unvorstellbar winzige Raumbereiche zusammengepresst werden. In der Natur kommen solche Bedingungen bloß an wenigen Orten vor, etwa im Zentrum eines Schwarzen Lochs. Insbesondere begegnet man ihnen nicht in Physiklabors, nicht einmal in den größten und leistungsfähigsten. Dieser Mangel an direkten experimentellen Daten ist ein wesentlicher Grund dafür, dass die Suche nach einer Theorie der Quantengravitation schon so lange andauert.

Angesichts dessen setzen viele ihre Hoffnungen auf einen Blick in den Himmel. Während seiner allerersten Augenblicke war das gesamte Universum unvorstellbar klein und dicht. Die Situation lässt sich nur mit Hilfe der Quantengravitation beschreiben, und Nachwirkungen davon könnten noch immer zu sehen sein. »Unsere besten Chancen liegen in der Kosmologie«, hofft Maldacena. »Vielleicht gibt es dort etwas, für das wir heute noch keine Vorhersagen treffen können, das sich aber auf Grundlage eines besseren theoretischen Verständnisses erschließen lässt.«

Zumindest indirekt könnten sich Laborexperimente trotzdem als nützlich erweisen. Beispielsweise will eine Arbeitsgruppe um Monika Schleier-Smith von der Stanford University Aspekte der AdS/CFT-Korrespondenz mittels Atomen in hochgradig verschränkten Quantensystemen

Die Frage, ob Zeit und Raum eine Illusion sind, prägt die Philosophie seit Jahrtausenden

untersuchen (siehe »Spektrum« Februar 2022, S. 64). Vielleicht erinnern Teile des Versuchsaufbaus in ihrem Verhalten dann an die Raumzeit. Solche Experimente könnten »einige, aber womöglich nicht alle Merkmale der Gravitation aufweisen«, meint Maldacena. »Das hängt auch davon ab, was genau man eigentlich als Gravitation bezeichnet.«

Werden wir jemals die wahre Natur von Raum und Zeit in Erfahrung bringen? Geeignete kosmologische Beobachtungsdaten werden vielleicht noch lange auf sich warten lassen. Laborversuche könnten weiterhin nichts ergeben. Und wie Philosophen nur zu gut wissen, sind die Fragen

nach dem Charakter von Raum und Zeit schon sehr alt. Vor 2500 Jahren hat Parmenides das Seiende als unteilbar und unveränderbar begriffen. Ihm zufolge ist der Wandel eine Illusion. Sein Schüler Zenon schuf berühmte Paradoxien, um den Standpunkt seines Lehrers zu beweisen und die Widersprüchlichkeiten aufzuzeigen, die Bewegungen innewohnen sollten. Solche Arbeiten warfen die Frage auf, ob Zeit und Raum nur Einbildung sind, und haben diese beunruhigende Perspektive der westlichen Philosophie aufgeprägt. »Die Tatsache, dass die alten Griechen Fragen nach Raum, Zeit und Veränderung stellten und dass wir das auch heute noch tun, heißt doch, dass es die richtigen waren«, sagt Christian Wüthrich. »Das Nachdenken darüber hat uns viel über die Physik gelehrt.« ◀

QUELLEN

Ryu, S., Takayanagi, T.: Holographic derivation of entanglement entropy from the anti-de Sitter space/conformal field theory correspondence. *Physical Review Letters* 96, 2006

Susskind, L., Zhao, Y.: Teleportation through the wormhole. *Physical Review D* 98, 2018

Van Raamsdonk, M.: Building up spacetime with quantum entanglement. *General Relativity and Gravitation* 42, 2010

Wüthrich, C. et al. (Hg.): Philosophy beyond spacetime: Implications from quantum gravity. Oxford University Press, 2021



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT JAHRGANG 2021 — CD-ROM —

Die **Spektrum**-CD-ROM enthält den kompletten Inhalt (inklusive Bildern) des Jahrgangs 2021 von **Spektrum der Wissenschaft** als PDF-Version. Die Artikel sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken.

Zur besseren Nutzung Ihres Heftarchivs finden Sie auf der CD zusätzlich das Register von 1978 bis 2021 als PDF-Datei.

Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland). Erscheinungstermin ca. Anfang April

Tel. 06221 9126-743
service@spektrum.de
Spektrum.de/sammeln

ELEKTROCHEMIE BOOSTER FÜR DIE ELEKTROLYSE

Die Anordnung der Wassermoleküle um eine Elektrode beeinflusst entscheidend, wie viel Wasserstoff per elektrischer Spaltung entsteht. Die Zugabe geeigneter Ionen kann diese Ordnung beeinflussen und die Gasproduktion ankurbeln.

Chemische Reaktionen lassen sich auf verschiedene Arten in Gang setzen oder beschleunigen. Bei der Elektrokatalyse taucht man dazu eine feste Elektrode in eine Flüssigkeit und erzeugt an der Grenzfläche ein elektrisches Potenzial. In der Folge läuft eine Reaktion ab, es wird also elektrische Energie in chemische umgewandelt. Mit Strom aus erneuerbaren Quellen ließe sich auf diese Weise etwa klimafreundlich Wasserstoff gewinnen. Damit könnte die Technik grundlegend zu einer nachhaltigen Wirtschaft beitragen.

Um die Reaktion besser und effizienter zu machen, muss man allerdings genau wissen, welche molekularen Prozesse an der Grenzschicht zwischen Wasser und Elektrode ablaufen. Eine Forschungsgruppe um Yao-Hui Wang von der Xiamen University und Shisheng Zheng von der Universität Peking (beide in China) ist jetzt der Lösung dieses Rätsels ein großes Stück näher gekommen. Nach ihren Erkenntnissen ist es für die Geschwindigkeit der Reaktion entscheidend, wie sich die Wassermoleküle direkt an der Grenzschicht zwischen Elektrode und wässriger Lösung (dem Elektrolyten) anordnen – und diese Ordnung lässt sich beeinflussen. Damit lassen sich möglicherweise elektrokatalytisch aktive Grenzflächen entwickeln, an denen Reaktionen selektiver ablaufen und die weniger Energie benötigen.

In flüssigem Wasser sind die einzelnen Moleküle über relativ schwache Anziehungskräfte, die Wasserstoffbrückenbindungen, miteinander zu einem Netzwerk verbunden (siehe »Elektrokatalytische Wasserspaltung«, a). Darauf basieren viele der physikalisch-chemischen Eigenschaften, die den Stoff so einzigartig machen. Jedes Wassermolekül kann vier solcher

spezieller Bindungen ausbilden, solange es sich inmitten von weiteren Wassermolekülen befindet. Direkt am Übergang zu einem Gas, Feststoff oder einer anderen Flüssigkeit hingegen hat es dafür weniger Bindungspartner zur Verfügung. Die Wasserteilchen, die direkt an der Grenzfläche und in den nächsten Schichten sitzen, haben daher andere »Nachbarn« als jene im großen Rest der Flüssigkeit. Fachleute sprechen von unterschiedlichen Strukturmotiven.

Dank spezieller spektroskopischer Techniken wissen wir heute einiges über die Struktur von Wasser an Grenzflächen. Mittels Infrarot- und Raman-Spektroskopie lassen sich Molekülschwingungen vermessen – das sind periodische Änderungen der Bindungslängen und Bindungswinkel. Analysiert man diese Schwingungen, kann man Aussagen dazu treffen, wie stark die Wasserstoffbrückenbindun-

gen sind und welche Struktur motive an der Grenzfläche vorliegen. Solche Experimente sind technisch anspruchsvoll. Nur mit ausgefeilten Methoden ist es möglich, gezielt einige wenige Wasserschichten nahe der Grenzfläche zu untersuchen. Darüber hinaus beeinflussen sich die Schwingungen in den Wassermolekülen gegenseitig und verkomplizieren dadurch das Auswerten der Spektren.

Ändert sich die Ladung an der Oberfläche der Elektrode von positiv zu negativ oder umgekehrt, orientieren sich die Wassermoleküle an der Grenzfläche zwischen Elektrolytlösung und Elektrode um. Das liegt daran, dass sie elektrische Dipole sind: Sie wechselwirken mit dem elektrischen Feld an der Grenzfläche, das durch die Oberflächenladung der Elektrode entsteht. Diese wiederum hängt von der Elektroden spannung ab. Bei hohen Spannungen konzentrieren sich an der Elektrode

Elektrokatalytische Wasserspaltung

a Enthält die Lösung nur wenige Natriumionen und ist das Elektrodenpotential vergleichsweise positiv, umgibt ein Netzwerk von Wassermolekülen, die über Wasserstoffbrückenbindungen miteinander verbunden sind, die Elektrode. Letztere besteht aus einer Schicht von Palladiumatomen auf einem Goldsubstrat.

b Bei höheren Konzentrationen an Natriumionen und vergleichsweise negativen Elektrodenpotentialen zieht die Elektrode Natriumionen an, die von einer Hülle aus Wassermolekülen umgeben sind (»hydratisierte Natriumionen«). Dadurch verkleinert sich der Abstand zwischen Palladium und den Wasserstoffatomen der Wassermoleküle. Elektronen werden daher schneller von der Elektrode auf die Wassermoleküle übertragen, die sich daraufhin in Hydroxidionen (OH^-) und Wasserstoffatome aufspalten. Die freien Wasserstoffatome heften sich zunächst an die Palladiumatome (sie adsorbieren) und vereinigen sich schließlich zu Wasserstoffmolekülen (H_2).

diejenigen Ionen aus der Lösung, deren Ladung der Elektrodenladung entgegengesetzt ist: Ist die Elektrode insgesamt positiv geladen, versammeln sich in ihrer Nähe vermehrt negativ geladene Anionen, ist sie negativ, häufen sich positive Kationen in ihrer Nachbarschaft. Die steigende Ionenkonzentration sollte eigentlich die Struktur des Grenzflächenwassers beeinflussen. Doch bei Spannungen, unter denen sich Wasser elektrokatalytisch zu Wasserstoff zersetzt, stören die entstehenden Gasblasen die empfindlichen Spektroskopie-Experimente, und so sind die Systeme während einer Reaktion mit solchen Methoden schwer zu untersuchen.

Schrittweiser Übergang

Um diesem Problem beizukommen, haben Wang und Zheng mit ihrem Team eine neue experimentelle Herangehensweise in Verbindung mit der Raman-Spektroskopie entwickelt. Sie nutzten eine Metallelektrode mit einer Oberfläche aus Palladiumatomen und katalysierten damit die Zersetzung von Wasser zu molekularem Wasserstoff (H_2) und Hydroxidionen (OH^-). Dabei beobachteten sie, wie die Wasserstruktur schrittweise von einem vergleichsweise ungeordneten Zustand zu einem mehr und mehr geord-

neten überging, je negativer das Potenzial an der Elektrode wurde.

Wie die spektroskopischen Auswertungen nahelegen, könnte dieser Übergang deshalb vonstattengehen, weil das Netzwerk an Wasserstoffbrücken geschwächt wird. Denn mit zunehmend negativem Potenzial werden Wassermoleküle mit vier Wasserstoffbrücken aus der Grenzschicht verdrängt, während sich dort solche anreichern, die mit positiv geladenen Natriumionen (Na^+) verbandelt sind. Sie bilden so genannte Hydrathüllen um die Ionen und stehen dadurch nur noch eingeschränkt für Wasserstoffbrückenbindungen zur Verfügung. Laut den Autorinnen und Autoren beschleunigt die Anreicherung hydratisierter Natriumionen die chemische Reaktion: Je mehr Wassermoleküle aus der Grenzschicht Hydrathüllen um die Ionen bilden, desto rascher entsteht Wasserstoff. Das war an verschiedenen untersuchten Palladiumoberflächen der Fall.

Um ein Bild davon zu bekommen, wie der geordnetere Zustand der Grenzschicht auf molekularer Ebene aussieht und welche Rolle er bei der Geschwindigkeit der Wasserstoffbildung spielt, simulierte die Gruppe die Struktur der Grenzschicht. Dabei zeigt sich, dass ein Wasserteilchen aus der

Hydrathülle eines Natriumions näher an die Elektrode rücken kann als ein freies. Ihren theoretischen Modellen zufolge werden die Elektronen durch den kürzeren Abstand zwischen der Hydrathülle und der Palladiumoberfläche leichter von der Elektrode auf das Wasser übertragen. Das beschleunigt die Spaltung von Wasser in molekularen Wasserstoff und Hydroxidionen (»Elektrokatalytische Wasserspaltung«).

Die Ergebnisse könnten bedeutsam für andere technisch wichtige elektrokatalytische Prozesse sein, bei denen Wassermoleküle gespalten werden: beispielsweise für die Umsetzung von CO_2 zu Kohlenwasserstoffen oder die Produktion von Ammoniak aus gasförmigem Stickstoff. In diesen Reaktionen muss man die Wasserspaltung genau kontrollieren, damit das richtige Produkt entsteht. Die Struktur des Wassers an der Grenzfläche – und damit seine Zersetzung – lässt sich also systematisch einstellen. Das funktioniert, indem man die Elektrodenoberfläche sowie die Art und Konzentration der Kationen in der Elektrolytlösung geschickt auswählt.

Offen bleibt, wie sich neben der Struktur die Bewegung von Wassermolekülen an der Grenzfläche verändert, wenn die Spannung sinkt. Das könnte entscheidend für die Frage sein, wie sich Wasserstoff bildet und wie genau Elektronen übertragen werden. Daher ist als Nächstes zu untersuchen, bis zu welchem Ausmaß sich die Bewegungen der Wassermoleküle an einer elektrokatalytischen Grenzfläche mit abnehmendem Elektrodenpotenzial verändern lassen. ◀

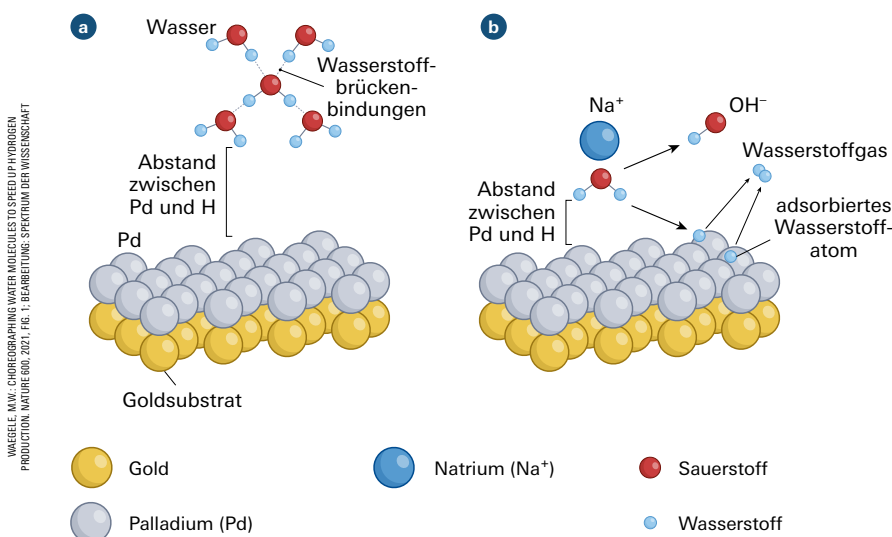
Matthias M. Waagele untersucht am Boston College in Chestnut Hill, Massachusetts (USA), elektrokatalytisch aktive Grenzflächen.

QUELLE

Wang, Y.-H. et al.: In situ Raman spectroscopy reveals the structure and dissociation of interfacial water. *Nature* 600, 2021

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
 Nature 600, S. 43–44, 2021



MEDIZIN SCHWANGERSCHAFTSVORSORGE DANK FREIER RNA

Ein neuer Bluttest für werdende Mütter hilft, das Risiko einer Präeklampsie zeitig zu ermitteln. Das ermöglicht es, gefährlichen Schwangerschaftskomplikationen vorzubeugen.

Die detaillierten Abläufe einer menschlichen Schwangerschaft sind schwer zu untersuchen. Zwar erlauben es invasive diagnostische Verfahren, DNA- oder RNA-Moleküle aus der Plazenta beziehungsweise dem Fötus zu gewinnen. Dieses Erbmaterial gewährt Einblicke in den momentanen Entwicklungsstand des heranwachsenden Kindes. Aus ethischen und praktischen Gründen kann man aber solche Proben nicht wiederholt nehmen, um die Schwangerschaft durchgängig zu überwachen.

Ein Team um Morten Rasmussen vom Unternehmen Mirvie, South San Francisco, hat nun bei zahlreichen Schwangeren spezielle RNA-Moleküle untersucht, die frei im Blutkreislauf zirkulieren – so genannte zellfreie RNA (cfRNA). Die insgesamt 1800 Frauen, die an der Studie teilnahmen, unterschieden sich hinsichtlich ihrer geografischen und ethnischen Herkunft, ihres Lebensalters, ihrer jeweiligen Schwangerschaftsphase und ihres Body-Mass-Index (das Verhältnis von Körpergewicht und -größe). Rasmussen und seine Arbeitsgruppe konnten aus den cfRNA-Analysen ableiten, wie sich die Genexpression in mütterlichem und embryonalem Körpergewebe während der Schwangerschaft normalerweise verändert. Anschließend nutzten die Forscherinnen und Forscher dieses Wissen, um frühzeitig zu erkennen, welche von den werdenden Müttern von einer potenziell gefährlichen Krankheit namens Präeklampsie bedroht sind.

Die Erkenntnis, wonach Mutter, Fötus und Plazenta diverse DNA- und RNA-Fragmente ins mütterliche Blut freisetzen, war ein bahnbrechender Fortschritt in der Schwangerschaftsdi-

agnostik. Heute sind Sequenzierungstechniken weit verbreitet, die zellfreie fetale DNA (cffDNA) im mütterlichen Blutplasma aufspüren. Mit ihnen lässt sich das heranwachsende Kind nichtinvasiv auf Chromosomenanomalien untersuchen. Nun erlauben es cffDNA-Analysen zwar, genetisch bedingte Erkrankungen des Fötus zu erkennen, aber die zellfreie RNA (cfRNA) reagiert dynamischer auf die kindliche Entwicklung: Sie bietet aktuelle Momentaufnahmen, welche Gene gerade exprimiert – also in Boten-RNA umgeschrieben – werden.

Präeklampsie liegt vor, wenn während der Schwangerschaft Bluthochdruck zusammen mit mindestens einer weiteren Organkomplikation (meist einer vermehrten Ausscheidung von Protein über den Urin) auftritt. Sie betrifft etwa acht Prozent aller Schwangerschaften, kann verschiedene Organe schädigen und schwere Erkrankungen verursachen – bis hin zum Tod der Mutter und ihres Kindes. Obwohl sich das Leiden oft erst während der letzten Schwangerschaftswochen manifestiert, nimmt es deutlich früher seinen Anfang, nämlich bereits, wenn die Plazenta angelegt wird. Trotz jahrhundertalten medizinischen Erfahrungen im Umgang mit Präeklampsie gab es bisher keinen Test, um das Erkrankungsrisiko in einem frühen Schwangerschaftsstadium verlässlich zu ermitteln. Ein solcher Nachweis würde es ermöglichen, zeitig Gegenmaßnahmen einzuleiten und so den Krankheitsverlauf positiv zu beeinflussen.

Forschungsarbeiten zu molekularen Markern für schwangerschaftsbedingte Komplikationen konzentrierten sich oft auf Proteine in Blut- oder Urinpro-

ben von der Mutter. Rasmussen und sein Team nahmen cfRNA in den Blick, die aus mütterlichem, fetalem oder plazentarem Gewebe stammt. Die Forscher analysierten das Spektrum der cfRNA-Moleküle im mütterlichen Blut, wobei sie 2539 Blutplasma-proben von 1840 Schwangerschaften untersuchten. Es ist die größte und umfassendste derartige Studie, die bisher durchgeführt wurde.

So präzise wie Ultraschalltests

Die Gruppe stützte sich auf frühere Arbeiten, laut denen cfRNA-Moleküle im mütterlichen Blutplasma das Schwangerschaftsalter (also den Entwicklungsstand des Fötus) abschätzen helfen. Rasmussen und seine Kollegen nutzten einen Ansatz des maschinellen Lernens, indem sie einen Computeralgorithmus an 1908 gemessenen cfRNA-Profilen trainierten und ihm so beibrachten, aus einem gegebenen Profil das Schwangerschaftsalter abzuleiten. Als sie den Algorithmus anschließend auf weitere 474 Blutplasma-proben anwendeten, bestimmte er die jeweils zugehörige Schwangerschaftsdauer auf 14,7 Tage genau. Der Präzisionsgrad entspricht dem einer Ultraschalluntersuchung im zweiten Schwangerschaftstrimester und könnte diese somit ersetzen, falls sie sich – aus welchen Gründen auch immer – nicht durchführen lässt. Die Möglichkeit, anhand der cfRNA den Entwicklungsstand des Fötus recht präzise festzustellen, erlaubt zudem eine Aussage darüber, welches Genexpressionsmuster in einem bestimmten Schwangerschaftsalter normal ist.

Rasmussen und sein Team haben spezielle Untergruppen der cfRNA-Moleküle im mütterlichen Blutplasma

definiert, die jeweils aus dem mütterlichen oder dem fetalen Organismus oder der Plazenta stammen. Aus den Ergebnissen ihrer Studie geht hervor, wie sich diese Untergruppen während der Schwangerschaft normalerweise verändern. So deuten die mütterlichen Moleküle auf eine erhöhte Aktivität von Genen hin, die für Strukturproteine wie die Kollagene kodieren – wichtigen Bestandteilen der Zwischenzellmatrix. Hierin spiegelt sich möglicherweise der Umbau innerhalb der Gebärmutter, der dabei hilft, die Belastungen von Schwangerschaft und Geburt zu bewältigen. Veränderungen bei jener

cfRNA wiederum, die mutmaßlich aus dem Fötus stammt, stimmen mit bekannten Entwicklungsverläufen überein. So nahm die Menge entsprechender Moleküle aus einem Teil der fetalen Niere, der mit fortschreitender Schwangerschaft schrumpft, allmählich ebenfalls ab. Die pränatale Entwicklung der kindlichen Organe lässt sich also anhand mütterlicher Blutproben verfolgen.

Als Nächstes untersuchte die Arbeitsgruppe, inwieweit das cfRNA-Profil im mütterlichen Blut bereits während des zweiten Trimesters verlässliche Vorhersagen darüber

gestattet, ob sich in den folgenden Wochen und Monaten eine Präeklampsie ausprägen wird. Zu der Zeit haben sich üblicherweise noch keine Symptome dieser Erkrankung manifestiert. Die Forscher verglichen cfRNA-Profile aus dem Blutplasma von 72 schwangeren Frauen, die eine Präeklampsie entwickelten, mit entsprechenden Profilen von 452 Schwangeren, bei denen die Krankheit nicht auftrat. Dabei entnahm das Team die Proben im Schnitt 14,5 Wochen vor der Entbindung. Der Vergleich förderte sieben Gene zu Tage, deren Aktivitäten sich deutlich zwischen Gesunden und Erkrankten unterschieden. Vier davon standen bereits zuvor unter Verdacht, mit Präeklampsie zusammenzuhängen.

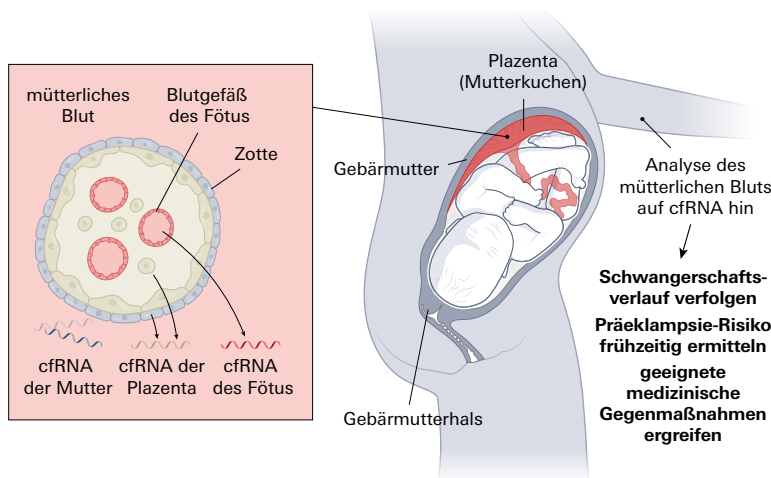
Ein mathematisches Modell der Forscher schätzt anhand des cfRNA-Profils ab, wie hoch das Risiko einer Präeklampsie ist. Den Ergebnissen zufolge besitzt es eine Sensitivität von 75 Prozent: Es erkennt drei von vier Schwangerschaften, bei denen ein erhöhtes Risiko besteht, korrekt. In einer Untergruppe der werdenden Mütter lieferte das Modell einen positiven Vorhersagewert (PPV) von 32 Prozent – das heißt, bei einer von drei Frauen, für die das Modell eine Präeklampsie prognostizierte, trat das Leiden später tatsächlich auf. Das ist ein deutlich höherer Vorhersagewert als beim nächstbesten prognostischen Test, der Blutdruck- und Blutflussmessungen mit einer Untersuchung auf den plazentalen Wachstumsfaktor und weiteren Größen kombiniert.

Erhöhter Vorhersagewert

Allerdings trat die Präeklampsie in dieser Untergruppe mit fast 14 Prozent deutlich öfter auf als im globalen Durchschnitt (2 bis 8 Prozent). Daher lag auch der PPV des Tests höher als in Gruppen mit niedrigeren Erkrankungsraten. Im Hinblick auf künftige klinische Anwendungen ist es wichtig, die Vorteile einer frühen Präeklampsie-Risikovorhersage gegen die Nachteile potenziell falsch-positiver Ergebnisse abzuwägen – etwa unnötige medizinische Eingriffe und die Verunsicherung betroffener Mütter.

Was RNA-Moleküle in mütterlichem Blut verraten

Körpergewebe der Mutter, des Fötus und der Plazenta (des »Mutterkuchens«) setzen RNA-Moleküle frei – hauptsächlich aus Zellen, die dem programmierten Zelltod zum Opfer fallen. Zellfreie RNA (cfRNA) aus dem Fötus kann ins mütterliche Blut eintreten, insbesondere über die so genannten Zotten der Plazenta, die dem Stoffaustausch zwischen Mutter und Kind dienen. Auch cfRNA von der Plazenta selbst gelangt über die Zotten in das Kreislaufsystem der Schwangeren. Sobald das geschehen ist, lassen sich die cfRNA-Moleküle im mütterlichen Blut nachweisen. Ein Test von mehr als 1800 schwangeren Frauen zeigte auf, wie sich das cfRNA-Profil im mütterlichen Blut während der Pränatalperiode normalerweise entwickelt. Anhand der Messdaten gelang es, das Risiko abzuschätzen, ob im späteren Schwangerschaftsverlauf eine Erkrankung namens Präeklampsie auftreten wird. Derartige Bluttests könnten es künftig ermöglichen, frühzeitig Veränderungen des cfRNA-Profils zu erkennen, die mit Schwangerschaftskomplikationen einhergehen. Das würde es den behandelnden Medizinern erlauben, zeitig und wirksam mit geeigneten Arzneistoffen gegenzusteuern.



Noch zu klären ist, ob cfRNA-Untersuchungen bereits während des ersten Trimesters ein erhöhtes Risiko für Präeklampsie anzeigen können. Denn die Behandlung mit niedrig dosiertem Aspirin, zurzeit die einzig verfügbare Prävention, ist wahrscheinlich effektiver, wenn sie vor der 16. Schwangerschaftswoche einsetzt. Die Wirksamkeit des Verfahrens schwankt bisher je nach Studie zwischen 2 und 30 Prozent. Die Bandbreite wundert wenig, denn es handelt sich um eine hoch variable Krankheit, die sich auf sehr unterschiedliche Weise manifestieren kann. Ein molekularer Test, der zeigt, wie sich eine Präeklampsie entwickelt, wäre ein wichtiger Schritt hin zu einer stärker personalisierten Pränatalmedizin. Daten, die Rückschlüsse auf die aktuelle Genaktivität in Geweben des Fötus,

der Mutter und der Plazenta erlauben, ließen sich zudem mit Datenbanken wie der »Connectivity Map« (einer Onlineresource mit Genaktivitäten diverser Zelltypen nach der Behandlung mit verschiedenen Arzneistoffen) abgleichen, um die verfügbaren Medikamente so gezielt und wirksam wie möglich einzusetzen.

Die Studie von Rasmussen und seinem Team ist aus mehreren Gründen aufschlussreich. Erstens erzielte sie ihre Untersuchungsergebnisse an einer großen und diversen Gruppe von Schwangeren. Zweitens weist sie den Weg zu einem Früherkennungstest für Präeklampsie. Und drittens ermöglicht sie es, Einblicke in typische Schwangerschaftsverläufe zu geben und die Entwicklung zielgerichteter Therapeutika voranzutreiben, die die Pränatalmedizin verbessern können.

Die Medizinerinnen **Lydia Shook** und **Andrea Edlow** arbeiten in der Abteilung für Geburtshilfe und Gynäkologie an der Harvard Medical School in Boston.

QUELLEN

Chiu, R. et al.: Non-invasive prenatal assessment of trisomy 21 by multiplexed maternal plasma DNA sequencing: large scale validity study. *British Medical Journal* 342, 2011

Edlow, A., Bianchi, D.: Tracking fetal development through molecular analysis of maternal biofluids. *Biochimica et Biophysica Acta* 1822, 2012

Rasmussen, M. et al.: RNA profiles reveal signatures of future health and disease in pregnancy. *Nature* 601, 2022

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 601, S. 319–320, 2022

MATHEMATIK DIE ZAHLEN-VERSCHWÖRUNG

Beeinflussen sich aufeinanderfolgende Primzahlen? Die Frage gehört zu den schwierigsten des Fachs, weshalb sich Forscherinnen und Forscher vor Jahrzehnten eine Aufwärmübung zu dem Thema ausgedacht haben. Doch wie sich herausstellte, war auch diese Nuss überaus schwer zu knacken.

 Könnten sich die natürlichen Zahlen verschworen haben und einem unerkannten Muster folgen? Ein neuer Beweis widerlegt diese Möglichkeit und liefert ein Werkzeug, um Primzahlen besser zu verstehen. Mit ihrer Arbeit haben Harald Helfgott von der Universität Göttingen und Maksym Radziwiłł vom California Institute of Technology eine Vermutung gelöst, die sich der Beziehung natürlicher Zahlen widmet. Demnach hat die Eigenschaft einer Zahl, über eine gerade oder ungerade Menge von Primfaktoren zu verfügen, keinen Einfluss darauf, ob die vorherige oder die nächste Zahl ebenfalls eine gerade oder ungerade Anzahl von Primteilern hat. Benachbarte Zahlen haben also nicht zwangsweise die gleichen grundlegenden arithmetischen Merkmale.

Diese Chowla-Vermutung ist mit einigen der größten ungelösten Fragen über Primzahlen verwoben und wurde als Aufwärmübung eingeführt. Doch jahrzehntelang schien selbst jene Aufgabe unlösbar. Erst vor ein paar Jahren gab es Fortschritte, als Terence Tao von der University of California in Los Angeles eine vereinfachte Version des Problems bewies. Obwohl die von ihm eingesetzte Technik viel versprechend schien, war sein Ergebnis nicht präzise genug, um es auf weitere Fälle anzuwenden. Die Fachwelt hoffte daher auf einen umfassenderen Beweis, der neue Möglichkeiten eröffnen könnte. Diesen haben Helfgott und Radziwiłł nun geliefert.

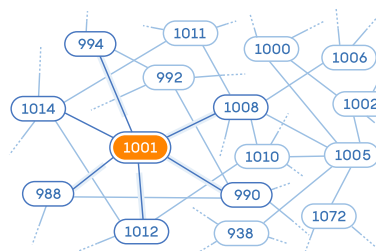
Wichtige Probleme der Zahlentheorie entstehen häufig dann, wenn man darüber nachdenkt, wie sich die

Addition in Bezug auf Primzahlen verhält. Die Primzahlzwillingsvermutung besagt beispielsweise, dass es unendlich viele Primzahlen gibt, die sich nur um 2 unterscheiden, wie 11 und 13. Eigentlich sollte ein Zusammenzählen die multiplikative Struktur einer Zahl vollständig verändern: Ob eine Zahl eine Primzahl ist (eine multiplikative Eigenschaft), dürfte nicht davon abhängen, ob die darauffolgende ungerade Zahl auch eine ist.

Zahlentheoretiker konnten bisher nicht beweisen, dass es eine derartige Verbindung gibt. Es ließ sich aber ebenso wenig ein Argument finden, das dagegen spricht. Daher kann man die Möglichkeit nicht ausschließen, dass irgendwo im Zahlenstrahl eine solche Verschwörung auftaucht. Um das Problem zu vereinfachen, formu-

Die Verschwörungstheorie

Man könnte argwöhnen, dass es verborgene Verbindungen zwischen den Primteilern aufeinanderfolgender Zahlen gibt. Laut der Chowla-Vermutung ist das aber nicht der Fall. Fachleute haben sie überprüft, indem sie verschiedene Netzwerke nutzten.

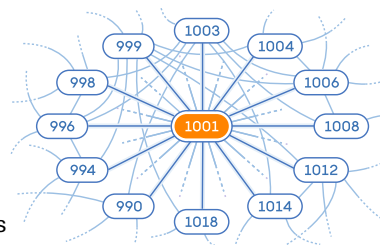


Wachsende Intrige

Im oberen Graph stehen die Knoten für Zahlen, die miteinander verbunden sind, falls sie sich um einen gemeinsamen Primteiler unterscheiden.

Eine neue Näherung

Harald Helfgott und Maksym Radziwiłł haben einen einfacheren Graphen entwickelt, in dem Zahlen nur dann verbunden sind, wenn sie sich um eine beliebige Primzahl unterscheiden. Die Mathematiker haben bewiesen, dass dieses Netzwerk den linken Graphen annähert.



lierte der Mathematiker Sarvadaman Chowla 1965 eine Aufgabe: Inwiefern beeinflusst die Tatsache, dass eine Zahl eine gerade oder ungerade Anzahl von Primfaktoren hat, die Menge der Primteiler ihrer Nachbarn?

Um dieses Problem anzugehen, wendet man sich der Liouville-Funktion zu. Durch sie erhält eine Zahl den Wert -1 , wenn sie eine ungerade Anzahl von Primfaktoren (wie $12=2 \cdot 2 \cdot 3$) hat, und $+1$ im anderen Fall (etwa $10=2 \cdot 5$). Gemäß Chowla sollten die Ausgaben der Liouville-Funktion für aufeinanderfolgende Zahlen nicht voneinander abhängen. Fachleute hofften, durch die Lösung dieser Frage Ideen zu entwickeln, die sich auf Probleme wie die Primzahlzwillingsvermutung anwenden lassen. Aber jahrelang blieben Fortschritte dazu aus – was sich jedoch 2015 schlagartig änderte.

Eine sprunghafte Funktion

Radziwiłł und die Mathematikerin Kaisa Matomäki von der finnischen Universität Turku wollten ursprünglich nicht die Chowla-Vermutung lösen, sondern das Verhalten der Liouville-Funktion in kurzen Intervallen untersuchen. Sie wussten bereits, dass die Funktion durchschnittlich in der Hälfte der Fälle die Werte $+1$ und in den anderen -1 annimmt. Dennoch wäre es möglich, dass es lange Abschnitte gibt, in denen sie konstant -1 oder $+1$ ist – was auf eine Verschwörung deuten würde.

Wie die beiden allerdings zeigten, treten solche Häufungen fast nie auf. Wählt man eine zufällige Zahl aus und betrachtet ihre 100 oder 1000 nächsten

Nachbarn, hat etwa die Hälfte eine gerade Menge von Primfaktoren und die übrigen eine ungerade Anzahl. Das war ein starker Hinweis darauf, dass es wohl keine Verschwörung gibt. Aber die Chowla-Vermutung geht weiter ins Detail und widmet sich direkt benachbarten Zahlen – und nicht großen Intervallen.

Hier kam Tao ins Spiel. Innerhalb weniger Monate baute er auf der Arbeit auf, um eine Version der Hypothese aufzugreifen, die etwas einfacher zu untersuchen ist: die logarithmische Chowla-Vermutung. Bei dieser Variante gewichtet man kleinere Zahlen stärker, damit sie mit der gleichen Wahrscheinlichkeit auftauchen wie große.

Tao hatte eine Idee, wie ein Beweis ablaufen könnte. Zunächst würde er annehmen, die Vermutung sei falsch: Es gäbe also einen Zusammenhang zwischen der Anzahl der Primfaktoren aufeinanderfolgender Zahlen. Dann würde er zeigen, dass sich die Verschwörung ausweiten lässt: nämlich entlang größerer Intervalle. Da das aber nach dem Ergebnis von Radziwiłł und Matomäki nicht sein kann, muss die ursprüngliche Annahme falsch sein – und die logarithmische Chowla-Vermutung somit wahr.

Damit ihm das gelang, musste sich Tao zunächst überlegen, wie er »verschworene« Zahlen miteinander verbinden könnte. Dafür nutzte er ein Merkmal der Liouville-Funktion L aus: Die Zahlen 2 und 3 haben beispielsweise je eine ungerade Anzahl von Primteilern und daher einen Liouville-Wert von -1 . Weil die Funktion multiplikativ ist ($L(a) \cdot L(b) = L(a \cdot b)$), folgen

Vielfache von 2 und 3 dem gleichen Vorzeichenmuster. Das hat weit reichende Auswirkungen. Wenn 2 und 3 wegen einer geheimen Verschwörung beide eine ungerade Anzahl von Primfaktoren haben, dann hängen auch 4 ($=2 \cdot 2$) und 6 ($=2 \cdot 3$) sowie 6 ($2 \cdot 3$) und 9 ($3 \cdot 3$) auf mysteriöse Art zusammen. Erstere unterscheiden sich nicht um 1, sondern um 2, und das zweite Zahlenpaar sogar um 3. Eine Verschwörung benachbarter Zahlen würde stets eine Verbindung zwischen den Paaren ihrer Vielfachen nach sich ziehen. »Für jede Primzahl breitet sich die Verschwörung aus«, erklärt Tao.

Falls also eine Zahl N und die darauffolgende $N+1$ zusammenhängen, dann tun das auch $a=N \cdot p$ und $b=(N+1) \cdot p$, wenn p eine Primzahl ist. a und b sind beide durch p teilbar und unterscheiden sich um die Primzahl p . Um das zu visualisieren, stellte Tao die Verbindungen von Zahlen a und b in einem Graphen dar. Jeder Knoten steht für eine Zahl a , die eine Kante zur Zahl b besitzt, wenn sich beide durch eine Primzahl unterscheiden, durch die sie jeweils teilbar sind. $1001 (= 7 \cdot 11 \cdot 13)$ ist beispielsweise mit $1008 (= 2^4 \cdot 3^2 \cdot 7)$, $1012 (= 2^2 \cdot 11 \cdot 23)$ und $1014 (= 2 \cdot 3 \cdot 13^2)$ sowie mit $994 (= 2 \cdot 7 \cdot 71)$, $990 (= 2 \cdot 3^2 \cdot 5 \cdot 11)$ und $988 (= 2^2 \cdot 13 \cdot 19)$ verbunden. Jede dieser Zahlen hängt wiederum mit vielen anderen Knoten zusammen. Die Kanten stehen daher für mögliche Verschwörungen.

Um die logarithmische Version der Chowla-Vermutung zu bestätigen, musste Tao zeigen, dass der Graph zu viele Kanten hat. Dann wäre die Liouville-Funktion nicht wie von Matomäki und Radziwiłł bewiesen in ihren Werten über große Intervalle ausgeglichen. Dafür musste Tao nachweisen, dass das Netzwerk ein »Expander« ist. Dabei handelt es sich um einen stark vernetzten Graphen, der im Vergleich zur Anzahl seiner Knoten nicht viele Kanten besitzt. Das macht es schwer, eine Gruppe verbundener Punkte zu bilden, die mit wenigen anderen Teilen des Netzwerks wechselwirken.

Willkürliche Schritte zum Ziel

Um einen Expander zu untersuchen, nutzt man häufig Random Walks: Man wandert entlang der Kanten des Graphen, wobei der Weg zufällig bestimmt wird, indem man etwa an jedem Knoten eine Münze wirft, um zu entscheiden, welcher Verbindung man folgt. In Expandern lassen sich auf diese Weise mit relativ wenigen Schritten so gut wie alle Punkte erreichen.

Die Wege in Taos Diagramm sind allerdings seltsam und umständlich. Man kann zum Beispiel nicht direkt von 1001 nach 1002 springen; dazu sind mindestens drei Schritte erforderlich. Man startet dafür stets bei einer ganzen Zahl, addiert oder subtrahiert einen ihrer Primteiler und landet auf dem Ergebnis. Ob sich auf diese Weise durch nur wenige Wiederholungen jeder beliebige Punkt erreichen lässt, ist unklar. Zudem weiß man für große Zahlen nicht, wie sich überhaupt zufällige Pfade erzeugen lassen, denn die Primfaktorzerlegung wird in diesem Fall untragbar schwierig.

Tao gelang es nicht zu zeigen, dass sein Graph ein Expander ist. Deshalb entwickelte er einen neuen Ansatz, der auf einem Maß für Zufälligkeit, der Entropie, basiert. So konnte er es umgehen, die Expandereigenschaft nachzuweisen – allerdings zu einem gewissen Preis. Seine Lösung ist weniger genau als gehofft. In einem idealen Beweis sollte die Unabhängigkeit von Zahlen selbst in kleinsten Intervallen offensichtlich sein. Aber bei Taos Arbeit muss man eine astronomi-

sche Anzahl von Zahlen abklappern. Außerdem lässt sich die Entropiemethode nicht direkt auf andere Probleme anwenden, was die ursprüngliche Motivation dafür war, sich der Chowla-Vermutung überhaupt zu widmen.

Fünf Jahre später gelang Helfgott und Radziwiłł, woran Tao scheiterte, indem sie einen anderen Graphen erzeugten. Tao hatte zwei Zahlen verknüpft, wenn sie sich um einen ihrer Primfaktoren unterschieden. Helfgott und Radziwiłł verbanden sie hingegen, sobald ihre Subtraktion eine beliebige Primzahl ergab.

Damit nimmt die Anzahl der Kanten explosionsartig zu. 1001 hat nicht nur sechs Verbindungen, sondern Hunderte. Ein Vorteil des Graphen ist, dass man bei einem Random Walk keine Kenntnisse über die Primteiler großer Zahlen braucht. Das und die zahlreichen Kanten erleichterten es, die Expandereigenschaft nachzuweisen.

Doch Helfgott und Radziwiłł mussten noch zeigen, dass ihr Graph Taos Version ähnelt. Denn dann wären sie in der Lage, Merkmale von Taos Netzwerk abzuleiten, indem sie stattdessen ihre Variante heranziehen. Und da sie bereits wussten, dass dieser ein lokaler Expander war, ließe sich daraus schließen, dass auch Taos Graph in die Kategorie fällt – und somit die logarithmische Chowla-Vermutung wahr ist.

Um die Ähnlichkeit beider Konstrukte nachzuweisen, wechselten Helfgott und Radziwiłł zwischen zwei Perspektiven hin und her. In der einen betrachteten sie die Netzwerke als Graphen, in der anderen als Matrizen, eine Liste von Zahlenwerten, welche die Verbindungen der Knoten codieren. Dann subtrahierten sie die Matrix, die ihren Graphen darstellt, von Taos Matrix. Die Mathematiker mussten beweisen, dass bestimmte Parameter (die so genannten Eigenwerte) der so erhaltenen Differenzmatrix alle klein waren. Denn ein wesentliches Merkmal eines Expanders ist, dass die zugehörige Matrix einen großen Eigenwert hat, während die übrigen deutlich geringer sind. Wenn Taos und der neue Graph also in diese Kategorie fielen, hätten sie deshalb je einen großen Eigenwert, der sich nach der

Subtraktion fast aufhebt. Die Eigenwerte waren aber schwer zu untersuchen. Daher wandelten die Forscher die Differenzmatrix wieder in einen Graphen um und zeigten, dass dieser nur wenige Random Walks enthält, die in einer Schleife zu ihren Ausgangspunkten zurückkehren. Das heißt, die meisten zufälligen Pfade in Taos Netzwerk entsprechen denen in Helfgotts und Radziwiłłs Version. Demnach lässt sich ersterer durch den letzten annähern, was beweist, dass beide Expander sind.

Die neue Lösung der logarithmischen Chowla-Vermutung hat Taos Resultat erheblich verbessert. Man muss nun viel weniger Zahlen abfragen, um zum gleichen Ergebnis zu kommen: Ob eine Zahl eine gerade oder ungerade Anzahl von Primfaktoren hat, hängt nicht von den Primteilern ihrer Nachbarn ab. Damit liefert die Arbeit den intuitiven Ansatz, auf den Tao gehofft hatte.

Expandergraphen haben bereits zu Entdeckungen in der Informatik, der Gruppentheorie und anderen Bereichen der Mathematik geführt. Mit ihrer neuen Arbeit haben Helfgott und Radziwiłł sie nun auch für Probleme der Zahlentheorie nutzbar gemacht. ◀

Jordana Cepelewicz ist Wissenschaftsjournalistin in New York.

QUELLEN

Matomäki, K., Radziwiłł, M.: Multiplicative functions in short intervals. *Annals of mathematics* 183, 2016

Radziwiłł, M., Helfgott, H.: Expansion, divisibility and parity. *ArXiv*: 2103.06853, 2021

Tao, T.: The logarithmically averaged Chowla and Elliott conjectures for two-point correlations. *Forum of Mathematics*, Pi 4, 2016

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzt und bearbeitete Fassung des Artikels »Mathematicians Outwit Hidden Number Conspiracy« 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.



SPRINGERS EINWÜRFE DEIN FREUND UND HELFER

Bleibt uns ein Ordnungshüter fremd, sind wir eher geneigt, über die Stränge zu schlagen.

Michael Springer ist Schriftsteller und Wissenschaftspublizist. Eine Sammlung seiner Einwürfe ist 2019 als Buch unter dem Titel »Lauter Überraschungen. Was die Wissenschaft weitertreibt« erschienen.

» spektrum.de/artikel/2000482

Mit der Polizei hatte ich – toi, toi, toi! – bisher wenig zu schaffen. Aber ich erfahre mit Genugtuung, dass die Aufklärungsquote bei Wohnungseinbrüchen in letzter Zeit zunimmt. Wenn ich in der Fußgängerzone auf dem Fahrrad erwischt werde, verhalte ich mich schuldbewusst und einsichtig. In meinem Bekanntenkreis ist niemand Polizeibeamter.

Damit bin ich gewiss kein repräsentativer Ausschnitt der sozialen Wirklichkeit. Die deutsche Kriminalitätsstatistik für das Jahr 2020 nennt rund 5,31 Millionen Straftaten, von denen etwas mehr als die Hälfte aufgeklärt wurde – obwohl eine drittel Million Polizeibeamte im Einsatz war. Lässt sich die kostspielige und personalintensive Verbrechensbekämpfung nicht effizienter gestalten?

Ein naheliegendes Mittel zur Prävention von Straftaten wäre erhöhte Präsenz. Unter den Augen eines Ordnungshüters sinkt die Bereitschaft, etwas Verbotenes anzustellen. Doch Uniformierte an jeder Ecke ließen nicht nur die Personalkosten explodieren, sondern erzeugten auch ein unangenehmes Gefühl fortwährender Überwachung. Geht es anders?

Eine Antwort kommt aus überraschender Richtung. Der Verhaltenspsychologe Anuj K. Shah von der University of Chicago und der Kriminologe Michael LaForest von der Pennsylvania State University wollten eigentlich die so genannte Symmetrieannahme untersuchen: Wir neigen dazu, einem Fremden, von dem wir einiges wissen, zu unterstellen, er wisse ebenso gut über uns Bescheid, selbst wenn das gar nicht der Fall ist (*Nature* 603, S. 297–301, 2022).

Zunächst erprobten die Forscher die Symmetrieannahme in Laborexperimenten. Anhand von Internetfragebögen gewannen Testpersonen fälschlich den Eindruck, sie würden ein anonymes Gegenüber – in Wirklichkeit ein Programm, das zufällige Antworten gab – recht gut kennen lernen. Danach gaben die Versuchspersonen an, der vermeintliche Vertraute

verstehe nun auch umgekehrt sie gut. Beispielsweise zögerten sie jetzt auffallend, ihren neuen Intimus übers Ohr zu hauen, obwohl ihnen für den Betrug sogar eine symbolische Belohnung angeboten wurde.

Dieses Testergebnis brachte die beiden Forscher auf die Idee, das Experiment mit echten Ordnungshütern anzustellen. Wie wäre es, wenn Angehörige der New Yorker Polizei sich schriftlich per Brief und Karte bei den Bewohnern ausgesuchter Wohnviertel vorstellten? Entstände so via Symmetrieannahme der Eindruck: Die Uniformierten kennen mich persönlich?

Die Briefe wurden bewusst intim gehalten. Sie enthielten sehr private Informationen wie: Ich stamme aus Sizilien, ich fische gern, ich übe meinen Beruf schon seit sechs Jahren aus, ich bin frisch verlobt, und so fort.

Diese Form der Kontaktaufnahme erwies sich als durchaus erfolgreich. Dort, wo die Briefe ankamen, sank die Kriminalität um fünf bis sieben Prozent gegenüber den »unbehandelten« Wohnvierteln, freilich nur ein paar Monate lang. Jedenfalls wirkte der Kontakt per persönlichem Brief nachweislich stärker als die üblichen Formen erhöhter Polizeipräsenz wie Besuche von Tür zu Tür oder ständige Anwesenheit an der nächsten Ecke.

Somit lässt sich die Symmetrieannahme hervorragend nutzen, um ohne exzessiven Personalaufwand und ohne aufdringliche Dauerpräsenz den Einwohnern das Gefühl zu geben: Ich kenne meine Polizisten – doch die kennen mich auch!

Um einen dauerhaften Effekt zu erzielen, reicht offensichtlich die einmalige Briefaktion nicht aus. Das wirft die Frage auf, ob wiederholte Initiativen der immer gleichen Art sich nicht abnutzen und einen gewissen Überdross erzeugen würden: Ja, ja, du gehst gern fischen ... Aber das Prinzip der Symmetrieannahme ist gewiss ausbaufähig. Also: Polizistinnen und Polizisten, seid erfinderisch!

KADAVERÖKOLOGIE LEBEN IM TOD

In europäischen Wäldern stößt man nur selten auf ein verendetes Tier, denn Kadaver werden meist schnell entsorgt. Dabei bietet Aas eine wichtige Nahrungsquelle für Insekten, Vögel oder Säugetiere. Wissenschaftler fordern hier mehr Toleranz.



REICH GEDECKTER TISCH
Zahlreiche Tierarten nutzen Aas. So freuen sich auch die als Allesfresser bekannten Rotfüchse (*Vulpes vulpes*) über einen toten Rehbock.

René Krawczynski ist promovierter Diplom-Ökologe und forscht als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Lehrbeauftragter an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg. Seit 2016 arbeitet er als Artenschutzspezialist bei der Firma Energiequelle in Zossen bei Berlin.



» spektrum.de/artikel/2000458



AUF EINEN BLICK LASST SIE LIEGEN!

- 1** Ein im Wald verendetes Tier bleibt nicht lange liegen. Tierkadaver werden heute auf Grund überzogener Hygienevorstellungen meist schnell entsorgt.
- 2** Das entzieht Aasfressern wie Raben, Adlern oder den einst bei uns heimischen Geiern die Lebensgrundlage. Für zahlreiche Insekten und deren Folgenutzer stellen Tierkadaver ebenfalls ein wertvolles Nahrungsnetz dar.
- 3** Zur Förderung der Biodiversität sollte man Tierleichen an Ort und Stelle belassen. Inzwischen gelockerte europäische Vorschriften erlauben auch das Auslegen von Haustierkadavern in Naturschutzgebieten.

► Schon als Schüler war ich begeisterter Pilzsammler und oft in Wald und Moor unterwegs. Soweit ich mich erinnere, stieß ich dabei lediglich ein einziges Mal auf einen Rehkadaver. Sonst entdeckte ich höchstens Überbleibsel von Vögeln oder kleineren Säugetieren wie Mardern oder Katzen.

Auf Grund strenger Hygieneregeln in der Landwirtschaft sind Tierkadaver bei uns ein seltener Anblick. Kaum ein Wildtier stirbt an Altersschwäche; vielmehr werden sie Opfer von der Jagd, von Seuchen wie der Afrikanischen Schweinepest und nicht zuletzt vom Straßenverkehr. So werden in Deutschland jährlich über eine Million Rehe geschossen und etwa 200 000 überfahren.

Seit wieder Wölfe in nennenswerter Zahl bei uns heimisch geworden sind, finde ich immerhin manchmal Überreste ihrer Beute. Doch all diese Kadaver werden früher oder später beseitigt. Dagegen gehört in anderen Ländern wie Indien der Anblick von verendeten Tieren zum Alltag. Und in letzter Zeit befassen sich auch Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im Rahmen des Fachs Kadaveröko-

logie – früher Aasökologie genannt – mit dem vermeintlich anrühigen Thema.

Was geschieht, wenn Kadaver wieder regelmäßig in der Landschaft liegen bleiben? Stellen sie womöglich ein gesundheitliches Risiko dar oder riechen sie einfach nur streng? Gibt es auch positive Effekte? 2005 begann ich damit, genau diese Dinge zu erforschen. Unser Wissensstand zur Kadaverökologie beschränkte sich damals in Deutschland fast nur auf kleine Tierleichen oder auf die Ökologie der Käfergattung *Nicrophorus* (Totengräber). Im November 2008 starteten wir an der Brandenburgischen Technischen Universität (BTU) Cottbus-Senftenberg zusammen mit dem Landesbetrieb Forst Brandenburg das Projekt »NECROS« – dankenswerterweise tatkräftig unterstützt von zahlreichen Studierenden.

Auf dem ehemaligen Truppenübungsplatz Lieberose etwa 30 Kilometer nördlich von Cottbus legten wir Unfallwild oder bei der Jagd bleifrei geschossene Tiere aus; hauptsächlich handelte es sich um Rehe, Rothirsche und Wildschweine. Abseits von der Zivilisation sollte sich hier niemand an dem Geruch stören oder – so glaubten wir – unsere Experimente beeinflussen. Letzteres erwies sich allerdings als naive Vorstellung: Technische Geräte wurden uns immer wieder gestohlen, Familien mit kleinen Kindern durchstöberten regelmäßig auf ihren Sonntagsspaziergängen die verwesenden Leichen.

THANATOPHILUS SINUATUS Der Gerippte Totenfreund, ein in Mitteleuropa häufiger Aaskäfer, ernährt sich ausschließlich von Kadavern. Auf seinem Rücken sitzende Milben nutzen den Käfer als Transportvehikel.



Geschickter hatten sich unsere Kollegen in den Niederlanden angestellt: Sie übersprangen die von uns initiierte Grundlagenforschung und gingen direkt zur Umweltbildung über. Bart Beekers von der Naturschutzorganisation ARK Natuurontwikkeling in Nimwegen führt regelmäßig Schulklassen zu ausgelegten Kadavern. In der Tat halte ich es für wichtig, den Tod von Tieren wieder als etwas Natürliches zu begreifen.

Doch zurück zu unserem Projekt: Im Gegensatz zu Forensikern, die möglichst standardisierte Kadaver von Hausschweinen einsetzen und diese vor Wirbeltieren durch Käfige oder Draht schützen, wollten wir erproben, was tatsächlich mit großen Tierkörpern passiert. Einige Kadaver, die keine offenen Wunden hatten, schnitten wir auch auf, um so die Einwirkung durch Wölfe oder andere Beutegreifer zu simulieren.

Fast alles, was wir im Vorfeld geglaubt hatten, erwies sich im Nachhinein als falsch! Wir fühlten uns an das Bonmot des englischen Biologen Thomas Henry Huxley (1825–1895) erinnert: Die große Tragödie der Wissenschaft ist das Erschlagen einer wunderschönen Hypothese durch eine hässliche Tatsache. So mussten wir als Erstes die naheliegende Idee opfern, dass ein Kadaver im Sommerhalbjahr durch das Zusammenspiel von Wirbeltieren, Insekten und Bakterien signifikant schneller abgebaut wird als im Winter: Das erste Wildschwein, das wir im November 2008 ausgelegt hatten, war bereits nach einer Woche komplett skelettiert.

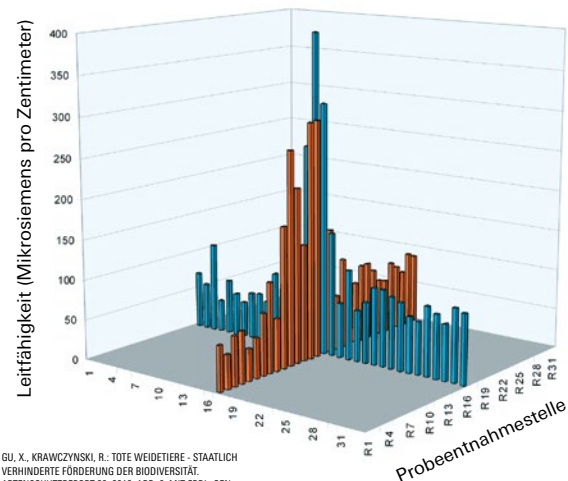
Mit Hilfe von Wildkameras konnten wir verfolgen, wie sich bis zu 25 Kollkraben (*Corvus corax*) und fünf Seeadler (*Haliaeetus albicilla*) gleichzeitig am Kadaver labten. Vor Ort gefressen hatten allerdings nur die Adler. Die zahlreichen Raben füllten sich stattdessen ihren Kropf, flogen davon und versteckten ihre Beute als Vorrat. Das wiederholten sie so lange, bis nichts mehr am Kadaver zu holen war. Bei jedem Besuch zogen sie geschickt mit ihren Krallen die Wildschweinhaut passend auseinander, um so die darunter liegende kostbare Fettschicht mit ihrem Schnabel abzuschaben. Am Ende blieb ein von außen nach innen gekehrter Balg übrig.

Käferkrabbeln am Kadaver

Mit nennenswerter Insektenaktivität im Winter hatten wir ebenfalls nicht gerechnet. Wir wussten lediglich, dass die Linsenfliege (*Thyreophora cynophila*), die lange als ausgestorben gegolten hat, im Winterhalbjahr ihre Eier an offene Markknochen legt. Aber auch der zu den Mistkäfern (Geotrupidae) gehörende Stierkäfer (*Typhaeus typhoeus*) gräbt seine Gänge unter dem Kadaver hauptsächlich im Winterhalbjahr. Andere Blatthornkäfer wie Dung- und Kotkäfer sammeln sich dagegen meist im Sommerhalbjahr in teils großer Zahl am Aas. Zunächst vermuteten wir, dass die Insekten von den Kotresten angelockt werden. Wir entdeckten sie allerdings ebenfalls bei aufgebrochenem Jagdwild, bei denen die Jäger die Innereien komplett entfernt hatten. Bis heute wissen wir nicht, was die Insekten an den Tierleichen machen. Mistkäfer graben ihre Tunnel und Brutkammern unterhalb der toten Tiere. Tragen sie dabei Kadaverstücke ähnlich wie Dung in die Kammern? Oder

Nährstoffinsel

Ein totes Wildschwein führt dem Boden erhebliche Mengen an Nährstoffen zu, wie sich anhand der Leitfähigkeit nachweisen lässt. Etwa einen Monat nach der Skelettierung liegt das Maximum der mobilisierten Nährstoffe im Zentrum unter dem Kadaver. Die Proben wurden mit einem Bodenstecher mit acht Zentimeter Durchmesser genommen.



leben die Larven von Pilzen und Mikroorganismen, die unter dem Aas gedeihen?

Trotz der uns überraschenden Winteraktivität bleibt das Frühjahr die große Zeit der Käfer, deren Individuenzahlen über den Sommer bis zum Herbst deutlich abnehmen. Erwartungsgemäß tummelten sich an den Tierleichen vor allem Aaskäfer (Silphidae). Als im Vorfrühling die ersten warmen Tage kamen, erschien zunächst die Rothsalsige Silphe (*Oiceoptoma thoracica*). Später fanden sich auch Larven der Gattung *Thanatophilus* ein, die in hoher Zahl offen auf den Kadavern lebten. Bei beiden handelt es sich nicht um Jäger, sondern sie ernähren sich direkt vom Aas.

An den großen Kadavern entdeckten wir zu unserem Erstaunen auch mehrere Arten von Totengräbern (*Nicrophorus*), die ebenfalls zur Familie der Aaskäfer zählen. Laut Lehrbuchwissen sollten sie eigentlich nur bei den Überresten kleinerer Tiere wie Mäuse anzutreffen sein. Wir fanden sie weitgehend verborgen unter den Tierkörpern oder im Innern wie in der ausgeräumten Bauchhöhle. Bei Störungen flüchteten sie sofort und vergruben sich. Offenbar hatten sie die Kadaver direkt angefliegen, während die anderen Aaskäfer wie der verwandte Ufer-Totengräber (*Necrodes littoralis*) auch in mehreren Metern Abstand vom Kadaver auftauchten. Durch seine verborgene Lebensweise scheint *Nicrophorus* nur selten von Folgenutzern gefressen zu werden, während das bei den anderen Aaskäfern und deren Larven regelmäßig geschieht.

Eine begehrte Beute für die beiden Aaskäfergattungen *Nicrophorus* und *Necrodes* stellen Fliegen beziehungsweise deren Maden dar. Diese werden auch gerne von Waldameisen gefressen; entsprechend stießen wir auf unseren Versuchsflächen regelmäßig auf die Blutrote Raubameise (*Formica sanguinea*). Nachdem sich im Lauf des Frühsommers die räuberischen Käfer immer mehr zurückzogen, hielten sich im Herbst fast nur noch Fliegen sowie deren Larven an den Kadavern auf. Sobald die Maden das dritte Larvenstadium erreicht hatten, verließen sie den Tierkörper, und die Käfer verkrochen sich im umliegenden Boden zur Verpuppung. Das fand im Umkreis von wenigen Zentimetern, aber auch in größerer Entfernung statt. Das von uns gemessene Maximum betrug 14 Meter.

Die Maden werden nicht nur von Insekten vertilgt, sondern auch von Wirbeltieren. Mehrere kleine Singvogelarten sowie vor allem Kolkkraben mögen sie gern. Vor die Wahl gestellt zwischen Wildschweinkadaver oder Maden entschieden sich die Raben im November 2012, lieber den Sandboden nach Letzteren zu durchwühlen als Aas zu fressen. Wiedehopfe (*Upupa epops*) hatten gelernt, dass der Boden rings um die toten Tiere voll Futter steckt. Dabei fraßen sie hauptsächlich Mistkäfer und suchten in der Erde nach weiterer Nahrung. Für alle Zugvögel fungiert der Futterplatz um das Aas als entscheidende Überlebenshilfe, wenn sie ausgezehrt aus dem Winterquartier zurückkehren und wegen eines späten Kälteeinbruchs keine sonstigen Insekten finden, wie wir Ende April 2016 beobachtet hatten. Da im Winter die Insektenmaden im letzten Larvenstadium verharren und sich erst im Frühjahr verpuppen, stellt der Boden rund um den Kadaver einen reich gedeckten Tisch für überwinternde Vögel dar. Davon machten zum Beispiel Waldschnepfen Gebrauch.

Wie viele Maden überwintern rund um das Aas? Um das herauszufinden, bestimmten wir deren Dichte im Boden und kamen hochgerechnet auf einen Wert von 400 000 Individuen, die es bis zum letzten Larvenstadium schaffen. Tatsächlich dürften es sogar wesentlich mehr sein, da doch etliche von den verschiedenen Räubern gefressen werden. So führten die schon erwähnten Waldameisen regelrechte Prozessionen vom Kadaver zum Nest durch, um erbeutete Maden einzutragen.

Neben den unzähligen Fliegenmaden müssen auch Käferlarven im Boden stecken. Von diesen sollten ebenfalls Maulwürfe profitieren. Wir rechneten allerdings nicht damit, dies jemals nachweisen zu können, bis es dem Naturschützer Dieter Haas in Baden-Württemberg gelang, einen Maulwurf zu fotografieren, der gerade zwischen den Knochen eines verendeten Tiers aus dem Boden schaute. Später entdeckten wir, dass Wildschweine nicht nur nach den tiefer vergrabenen Käferpuppen suchen, sondern auch nach den Wintermaden im Boden.

Der Spätsommer gilt als Hochsaison für Wespen. Vor allem die Gemeine (*Vespula vulgaris*) sowie die Deutsche Wespe (*Vespula germanica*) wussten den Kadaver zu nutzen, wobei sie das Fleisch für ihre Larven ins Nest trugen. Da sie offenbar immer wieder zur gleichen Stelle zurückkehrten, entstanden dabei regelrechte Tunnel. Hornissen hatten es weniger auf das Aas als vielmehr auf

APHANTOPUS HYPERANTUS Schmetterlinge wie der Braune Waldvogel lassen sich meist auf Pflanzen nieder. Doch überraschenderweise hat hier ein Exemplar an einem Hirschknöchel Gefallen gefunden.

Fliegen und die kleineren Wespenarten abgesehen, die sie um den Kadaver herum erbeuteten. Ebenfalls in großer Zahl ließen sich Grabwespen beobachten: Auf einem Wildschwein zählten wir bis zu 50 Individuen, die ausschließlich Goldfliegen (*Lucilia*) jagten.

Käfer und Fliegen sind als Aasfresser bekannt; bei anderen Insektengruppen wie den Hautflüglern (Hymenoptera) – zu denen Wespen und Ameisen zählen – war eine solche Nekrophagie nicht unbedingt zu erwarten. Doch die Waldameisen schleppten sogar ganze Fleischstücke vom Kadaver ins Nest und beseitigten nebenbei die Leichen anderer Insekten. Da einige Insektenarten direkt nach der Reproduktion sterben, bilden sie gleichsam ein zweites Nahrungsnetz aus toten Organismen. Als Opportunisten jagten die Ameisen auch die frisch aus dem Boden geschlüpften Fliegen, die ihnen ohne gehärteten Chitinpanzer wehrlos ausgeliefert waren.

Mit einer großen Zahl Blüten besuchender Insekten hatten wir ebenfalls nicht gerechnet. So saugte eine Reihe von Schmetterlingsarten an den Kadavern. Wenig appetitlich erscheint ein solches Verhalten bei Honigbienen (*Apis*), aber genau aus diesem Grund sollten Babys nicht mit Honig gefüttert werden, denen sonst Säuglingsbotulismus droht. Den Schmetterlingen geht es vermutlich um Spurenelemente wie Natrium, die sie für die Ausbildung der Flugmuskulatur brauchen.

Vermeintliche Vegetarier entpuppen sich als Aasfresser

Als strenge Vegetarier unter den Insekten gelten laut Literatur eine Reihe von Heuschreckenarten und Wanzen. Deshalb beachteten wir zunächst die Heuschrecken nicht, die wir ständig auf den Tierkörpern gesehen hatten, sondern hielten das für Zufall. Doch als ein Weibchen der Italienischen Schönschrecke (*Calliptamus italicus*) vor unseren Augen von einem Rehkadaver fraß, mussten wir abermals einen Teil unserer vermeintlich sicheren Weltsicht vergessen. Die häufig vorkommenden Feuerwanzen, deren Nahrung »eigentlich« aus Pflanzensamen bestehen sollte, saugten ebenfalls an den Kadavern, an toten Insekten oder – bei einem gesonderten Experiment – an einem Hühnerei.

Wirbeltiere können Kadaver auf dreierlei Weise nutzen – als Aasfresser, als Folgenutzer der zahlreichen Insekten oder als Sammler von Haaren für den Nestbau. Besonders beeindruckt haben mich die für ihre Intelligenz bekannten Meisen, die alle drei Möglichkeiten beherrschten: Im Winterhalbjahr fraßen sie direkt vom Aas, wobei sie teilweise kopfüber von den Rippen des toten Tieres hängend selbst die kleinsten Reste wegpickten. Sobald Insekten auftauchten, vertilgten sie auch diese, und das Fell von Rehen und Hirschen ergab wohl ein wunderbares Polster für das Vogelnest. Unsere niederländischen Kollegen haben wie-



derum Eichhörnchen beim Einsammeln von Rehhaaren gefilmt.

Amphibien und Reptilien nutzten ebenfalls Insekten am Kadaver als Nahrungsquelle. Direkt gesehen haben wir Teichfrösche und Zauneidechsen, aber es spricht nichts dagegen, dass dies für andere Froschlurche und Eidechsen genauso gilt. In den ersten Jahren des Projekts zeigten unsere Fotofallen noch eine zu schlechte Auflösung, um gut getarnte Eidechsen oder Mäuse nachzuweisen. Ich gehe jedoch davon aus, dass seltene Reptilienarten in entsprechenden Biotopen an Kadavern ebenfalls beobachtet werden können.

Dagegen wollten meine Partner vom Landesbetrieb Forst Brandenburg es schier nicht glauben, dass Wildschweine extrem selten das Fleisch der toten Tiere fressen. Lediglich dreimal konnten wir das dokumentieren, und zwar im Winter bei zum Teil hohem Schnee. Erst als ein Förster selbst ein Jahr lang solche Versuche durchgeführt hatte, sprach sich die neue Erkenntnis herum.

Die Wildschweine tauchten vielmehr am Ende des Zersetzungsprozesses auf, weil sie es auf die Knochen abgesehen hatten. Dabei kauten sie vor allem Rippen, die Dornfortsätze der Wirbel und die zarteren Knochenpartien an der Schnauze des Tierkörpers ab. Ähnlich wie Insekten müssen sich auch Säugetiere mit Spurenelementen versorgen. Die eher kargen Sandlandschaften Brandenburgs bieten dazu nur wenig Gelegenheit, so dass Skelettteile eine begehrte Mineralquelle darstellen.

Als Aasfresser bekannt sind Geier. In Deutschland waren einst vier Spezies heimisch – sie gelten aber mittlerweile als so gut wie ausgestorben. Wiederauswildierungsprojekte laufen unter anderem in der Schwäbischen Alb für den Gänsegeier (*Gyps fulvus*) sowie in den Bayerischen Alpen für den Bartgeier (*Gypaetus barbatus*). Bartgeier ernähren sich bis zu 80 Prozent von Knochen.

Wir beobachteten dagegen Rotmilane (*Milvus milvus*), die mit Schweinerippen davonflogen und diese einmal sogar vor unserer Kamera als Ganzes verschluckten. In der Arktis hatte man in Mägen von Strandläufern Skelettüberreste von Lemmingen gefunden. Natürlich jagen die kleinen Schnepfenvögel keine Lemminge, vielmehr picken sie die Knochen aus den Gewöllen von Schnee-Eulen heraus, die sich zuvor an den Wühlmäusen gütlich getan haben. Schnecken nutzen wiederum Skelettteile als Materialquelle für ihr Kalziumgehäuse.

Große Knochen spielen eine weitere, wenn auch kaum untersuchte Rolle: als Habitat. Auf den ostdeutschen Truppenübungsplätzen stößt man heute immer noch auf Rinderknochen aus Hausschlachtungen der Roten Armee. Diese inzwischen mehr als 30 Jahre alten Gebeine weisen eine kaum bekannte Vielfalt an Moosen und Flechten auf. Wie mein damaliger Kollege Hans-Georg Wagner von der BTU Cottbus beobachtete, sind darunter auch solche, die in kalkarmen Sandlandschaften generell nicht vorkommen – es sei denn, sie finden ein Trittsteinbiotop wie die großen Knochen. 2015 entdeckten wir dabei sogar eine neue

Schlauchpilzart, die wir auf den Namen *Pleurophoma ossicola* taufen.

Ohne große Knochen fehlt solchen noch unbekannten Zönosen die Lebensgrundlage. So wurde die eingangs genannte Linsenfliege, deren Maden sich im Winter in offenen Markknochen entwickeln, erst 2010 – nach mehr als 160 Jahren – in Spanien wiederentdeckt. Dort gab es bis zur BSE-Krise noch traditionelle Schindanger, auf denen die Landbevölkerung ihre Tierabfälle entsorgte. Das rettete nicht nur die letzte größere Geierpopulation in Europa, sondern auch die unscheinbaren Mitglieder des Nahrungsnetzes an Kadavern.



FOTOLIA / FRANK WASSERFÜHRER

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema:
spektrum.de/t/artenvielfalt-und-artensterben

Große Kadaver stellen eine Sammlung akkumulierter Nährstoffe dar, allen voran Stickstoff. Zersetzt sich ein Tierkörper langsam, ohne durch Aasfresser beseitigt zu werden, konzentrieren sich die Nährstoffe im darunterliegenden Boden (siehe »Nährstoffinsel«, S.33). Meist ergibt sich folgendes Bild: Während Knochen und Haare von dem verendeten Tier zurückbleiben – sofern sie nicht von Folgenutzern fortgetragen werden –, stirbt die Vegetation unmittelbar unter der Tierleiche durch die Beschattung und die zumindest zeitweise anaeroben Bedingungen ab. Gleichzeitig düngt und bewässert der Kadaver die direkt angrenzenden Pflanzen. Auf einen kargen Bereich folgt also ein Ring mit besonders üppigem Bewuchs. Später können Pflanzensamen auch innerhalb des ebenfalls aufgedüngten, vegetationslosen Zentrums ohne Konkurrenz keimen.

Bisons grasen an Stellen, an denen ein Artgenosse verendete

Davon profitieren Pflanzenfresser, wie Gene Towne von der University of Kansas in Manhattan 2000 beschrieb: Nordamerikanische Bisons halten sich häufig an Stellen auf, an denen einst ein Artgenosse verendete, da sie die hier besonders gut entwickelte Vegetation mögen. Dadurch setzen die Huftiere dort mehr Dung und Urin ab, so dass die Nährstoffinsel über längere Zeit erhalten bleibt. Bei Wisentkadavern in Polen beobachteten Forscher um Claudia Melis vom Norwegischen Institut für Naturforschung in Trondheim 2007 erhöhte Kalziumwerte im Boden.

Unterhalb eines Tierkörpers stiegen laut unseren Untersuchungen erwartungsgemäß die Stickstoff- und Phosphatgehalte an, was sich auch auf die Pflanzen auswirkte. So wiesen an den Kadaverstellen wachsende Exemplare des Land-Reitgras (*Calamagrostis epigejos*) etwa 100-mal höhere Stickstoffwerte auf als Kontrollpflanzen. Doch entgegen

unseren ursprünglichen Hypothesen konnten wir nie eine Humusakkumulation nachweisen. Im Gegenteil schien es bei den untersuchten organischen Böden (Niedermoor- und Ascheböden aus dem Braunkohletagebau) zu einem Abbau von organischer Substanz zu kommen. Auch der Säuregehalt verhielt sich anders als erwartet: Bei neutralen bis alkalischen Böden sank der pH-Wert (er wurde also saurer), bei eher sauren Böden stieg er jedoch – das Aas wirkte somit als Puffer.

Etwa ein Jahr nach der Zersetzung erreichten die Stickstoffwerte wieder ihr Ursprungsniveau, der Phosphatgehalt blieb dagegen nach mindestens zwei Jahren immer noch deutlich erhöht. Das nutzen Forensiker, um auch ohne Körperteile anhand der Bodenparameter Leichenliegeplätze nachzuweisen. Wenn allerdings ein Kadaver binnen kurzer Zeit von Folgenutzern aufgezehrt wird, bleiben diese Veränderungen aus, wie die Arbeitsgruppe von John Linnell vom Norwegischen Institut für Naturforschung 2020 anhand von Rehkörpern beobachtete. Das passiert nicht selten, wie wir selbst feststellen mussten: Gleich in der ersten Nacht verloren wir ein großes ausgelegtes Wildschwein an das damals sechsköpfige Lieberoser Wolfsrudel.

Verändern sich Bodenparameter durch einen Kadaver derart drastisch, dann nimmt die Diversität der Arten der Bodenfauna deutlich ab, die Individuenzahl steigt dagegen stark an. Beide Effekte konnten wir für Springschwänze und Milben nachweisen. Unterhalb eines Dachskadavers gehörten 95 Prozent der Springschwänze zur Spezies *Hypogastrura vernalis*, die sonst eher als selten gilt.

Wenn Aas eine solch wichtige ökologische Rolle spielt, warum werden dann verendete Tiere entsorgt? Als zu Beginn der 2000er Jahre der Rinderwahn BSE (bovine spongiforme Enzephalopathie) wütete, war zunächst rätselhaft, was die Krankheit auslöst und wie sie sich verbreitet. Schnell kristallisierte sich allerdings heraus, dass das Verfüttern toter Haustiere in Form von Tiermehl an Rinder und Schafe mit der Seuche in Verbindung stehen musste. Entsprechend erließ die Europäische Union 2002 scharfe Regeln zum Umgang mit toten Tieren.

Diese aus ökologischer Sicht verfehlte Hygienepolitik veränderte die Nahrungsnetze grundlegend: Hungernde Gänsegeier griffen Schafe an, und Braunbären fanden nach der Winterruhe nichts mehr zu fressen. Zum Glück ist die EU-Verordnung 1774/2002 inzwischen aufgehoben. Mit der Novelle 1069/2009 gestattet die EU, Wildtiere für wild lebende Vögel auszulegen, und seit 2011 sind mit der Durchführungsverordnung 142/2011 auch Haustierkadaver als Nahrung für Arten der FFH- und Vogelschutzrichtlinie ausdrücklich erlaubt. Die europäische Rechtslage hat sich entspannt, so dass es Aas- und Insektenfressern europaweit deutlich besser gehen sollte.

Deutschland, das sich immerhin rühmt, den größten Anteil an Rotmilan-Populationen weltweit zu beherbergen, hätte somit die Möglichkeit, diese Lockerungen zu übernehmen und das verschwundene Nahrungsnetz an Kadavern wiederzubeleben. Doch leider wird das hier nicht praktiziert. So heißt es immer noch in der Brandenburgischen Jagdverordnung: »Aufbrüche von erlegtem Wild und erlegtes Raubwild sind von den Erlegenden so zu

beseitigen, dass eine Aufnahme durch Greifvögel nicht möglich ist.«

Statt im Sinn des Erhalts der Biodiversität etwas für die vier europäischen Geierarten – die einst auch bei uns brühten – als Flaggschiffspezies zu tun, übernahm Deutschland die Empfehlung der Europäischen Arzneimittel-Agentur, das Schmerzmittel Diclophenac in der Behandlung von Haustieren nicht zu verbieten. Dessen katastrophalen Auswirkungen für nekrophage Vögel kennt man aus Indien und Afrika, wo die Geierpopulationen dramatisch einbrachen – mit der Folge, dass sich als Tollwutüberträger bekannte fakultative Aasfresser wie Füchse oder Ratten vermehrten. Es bleibt unverständlich, wieso man bei uns besseren Wissens in die nächste ökologische Katastrophe läuft.

Auch wenn Wildtierkadaver inzwischen zur Fütterung ausgelegt werden dürfen, ist der Umgang mit toten Tieren immer noch von Traditionen und Missverständnissen geprägt. Die Veterinärämter der Landkreise können bei begründetem Seuchenverdacht wie bei der Afrikanischen Schweinepest die Beseitigung von Wildtierkadavern anordnen. Dabei sollen die Körper mindestens 50 Zentimeter tief vergraben werden. Wer im Winter bei gefrorenem Boden einen 140 Kilogramm schweren Rothirsch so beseitigen soll, weiß, wie unpraktisch dieses Verfahren ist. Die Jäger vor Ort überlegen sich daher genau, ob sie etwa bei einem Wildunfall von ihrem Aneignungsrecht des Kadavers Gebrauch machen. Tun sie das nicht, liegt die Entsorgungs-

pflicht beim Ordnungsamt. In Brandenburg legt man mitunter Unfallwild, das nicht an die eigenen Hunde verfüttert wird, »für die Adler« aus. Das ist nicht nur pragmatisch, sondern auch ein wertvoller Dienst für eine gesunde Natur. Schließlich gehört der Tod zum Leben. ◀

QUELLEN

Beekers, B. et al.: Mitteleuropäische Wirbeltierarten an Kadavern. Säugetierkundliche Informationen 10, 2017

Gu, X., Krawczynski, R.: Tote Weidetiere – staatlich verhinderte Förderung der Biodiversität. Artenschutzreport 28, 2012

Gu, X. et al.: Carcass ecology – more than just beetles. Entomologische Berichten 74, 2014

Haas, D. G. et al.: Zur naturschutzfachlichen Relevanz von »Roadkills« und weiteren Tierkadavern – im globalen Stoffkreislauf mit Schwerpunkt Greifvögel. Ornithologische Mitteilungen 71, 2019

Krawczynski, R., Wagner, H.-G.: Leben im Tod. Tierkadaver als Schlüsselemente in Ökosystemen. Naturschutz und Landschaftsplanung 40, 2008

WEBLINK

www.b-tu.de/fg-oekologie/forschung/projekte/abgeschlossene-projekte/necros-projekt

Das Projekt »NECROS« der BTU Cottbus-Senftenberg mit Videos automatischer Wildkameras

Spektrum PLUS+

IHRE VORTEILE EINES SPEKTRUM-ABONNEMENTS



Im April erhalten alle Abonnentinnen und Abonnenten die Digitalpakete »Kryptografie«, »Hygiene« und »Schule und Lernen« zum reduzierten Preis

Weitere Vorteile und Download:

Spektrum.de/plus

EVOLUTIONSÖKOLOGIE

DIE BLÜTENBESTÄUBER VON ARIZONA

In den Chiricahua Mountains ernähren sich Kolibris und Fledermäuse von Nektar und befruchten dabei die Pflanzen – eine ökologische Rolle, die sonst von Insekten eingenommen wird. In einem koevolutiven Prozess passte sich die dortige Flora an ihre ungewöhnlichen Helfer an.



Theodore H. Fleming (links) ist emeritierter Professor für Biologie der University of Miami (USA). Mehr als 50 Jahre lang hat er die wechselseitigen Beziehungen zwischen Pflanzen und Tieren der Tropen erforscht. **M. Brock Fenton** ist emeritierter Professor für Verhaltensforschung und Ökologie der University of Western Ontario in London (Kanada) und gilt als ausgewiesener Fledermausspezialist. **Sherri Fenton** arbeitet dort am Department of Biology und fotografiert in ihrer Freizeit Fledermäuse, Vögel und Insekten.

» spektrum.de/artikel/2000464



AUF EINEN BLICK KOEVOOLUTION IN DEN BERGEN

- 1** In den Chiricahua Mountains im Westen der USA stößt die Lebenswelt der tropischen Zone auf die der gemäßigten. Das hat zu einer ungewöhnlichen Artenvielfalt mit entsprechenden Anpassungen geführt.
- 2** Im Sommer treten hier mehrere Kolibrispezies sowie zwei Fledermausarten als Pflanzenbestäuber auf. Den Winter verbringen die Tiere in der Regel in Mexiko.
- 3** Die Pflanzen und ihre Wirbeltierbestäuber haben sich über Jahrtausende bis Jahrmillionen in gegenseitiger Wechselwirkung gemeinsam entwickelt. Diese Koevolution lässt sich vor Ort besonders gut studieren.

► Über dem Cave Creek Canyon am östlichen Rand der Chiricahua Mountains im US-Bundesstaat Arizona geht die Sonne auf. Das melodische Pfeifen eines Zaunkönigs erfüllt die kühle Luft. Nun flutet das Morgenlicht die Schlucht. Kurz darauf schießen rote, smaragdgrüne, türkisfarbene und tiefblaue Blitze durch die Szenerie: Mehrere Kolibris liefern sich ein Geplänkel und jagen einander, während sie versuchen, die Leckereien einer Futterstation zu erreichen.

Vogelbeobachter aus aller Welt pilgern hierher, um diese Kolibris zu sehen, die in den Vereinigten Staaten nur in den Canyons Südarizonas vorkommen. Was aber wohl die wenigsten der Naturliebhaber ahnen: Die Futterspender locken auch Fledermäuse an, die in Mexiko überwintern. Dass mit den Vögeln und Säugern gleich zwei Wirbeltierklassen als Bestäuber gemeinsam an einem Ort auftreten, ist in den USA einzigartig und bietet die Gelegenheit, Unterschiede in der Biologie und der Evolutionsgeschichte sowohl der Nahrungspflanzen als auch ihrer ungewöhnlichen Helfer zu ergründen.

Die Chiricahua Mountains sind weltweit für ihre außerordentliche biologische Vielfalt bekannt, stoßen an diesem Gebirge doch die nördlichen Ausläufer der mittel- und südamerikanischen »Neotropis«-Region auf die gemäßigte Zone Nordamerikas. Je nach Jahreszeit tauchen hier mindestens 17 Kolibriarten auf, darunter 12 tropische Zugvögel, sowie 25 Fledermausspezies einschließlich zweier Vertreter Nektar fressender Blütenfledermäuse. Der Süden von Arizona bildet die nördliche Verbreitungsgrenze der beiden Fledermausarten und der meisten Kolibris, die sich saisonal vor Ort einfinden. Die botanische Diversität in den Chiricahuas liefert die Grundlage für die Zweckgemeinschaft zwischen den Pflanzen und ihren Bestäubern, die sich über Jahrmillionen hinweg in wechselseitiger Abhängigkeit entwickelt hat und die es sonst nirgendwo so auf der Welt gibt.

Mit einer Höhe von bis zu 2900 Metern ragen die Chiricahua Mountains aus einem Meer von Gräsern und Wüstengestrüpp im Südosten Arizonas auf und nehmen eine Fläche

FLUGKÜNSTLER
Ein Männchen des
Violett-kron-
Brillantkolibris zeigt
sein fliegerisches
Können.

von 64 mal 32 Kilometern ein, was etwa der Größe der Hawaii-Insel Maui entspricht. Die Berge sind meist vulkanischen Ursprungs und zwischen 25 und 27 Millionen Jahre alt. Der treffenderweise als Sky Islands (»Himmelsinseln«) bezeichnete Gebirgszug bildete einst die Heimat der Chiricahua-Apachen, die von weißen Siedlern Mitte bis Ende des 19. Jahrhunderts vertrieben wurden. Heute gehört das Gebiet zum Coronado National Forest.

Vier Ökozonen kreuzen sich hier: die Sonora- und die Chiricahua-Wüste sowie die Rocky Mountains und Mexikos Sierra Madre Occidental. In den Pflanzengemeinschaften der Chiricahuas dominieren Arten der nördlichen gemäßigten Zone mit Pappel- und Bergahornbeständen an Wasserläufen, parkähnlichen Eichen- und Wacholderhainen sowie Kiefern und Douglasien in größeren Höhen. Und im Spätsommer blühen die von den Kolibris bevorzugten alpinen Wiesen.

Von den tropischen Vögeln, die jahreszeitenabhängig hier auftauchen, wären neben den Kolibris vor allem Trogon, Bekarden oder der Schwefelmaskentyrann zu nennen. Zu den tropischen Säugetieren vor Ort zählen Ozelot, Jaguar, Wieselkatze, Nasenbär sowie Hauben- und Ferkelskunk. Auf Grund dieses Artenreichtums verwundert es kaum, dass die Chiricahuas als Mekka für Naturfreunde gelten. Infolge der geografischen Isolation entwickelten sich die Berge zu einem Gebiet, in dem man hervorragend ökologische Langzeitstudien zu Flora und Fauna an der Schnittstelle zwischen dem tropischen und dem gemäßigten Lebensraum durchführen kann. Genau wegen dieser Biodiversität gründete das American Museum of Natural History 1955 hier in 1646 Meter Höhe die Southwestern Research Station.

Im Spätsommer kann man an den fünf Futterstellen der Forschungsstation wenigstens vier häufige und bis zu sieben seltene ziehende Kolibriarten beobachten, bevor sie südwärts weiterwandern (siehe »Die Besucher der Southwestern Research Station«). Zu den häufigen zählen die beiden großen Spezies Blaukehlnymphe (*Lampornis clemenciae*) und Violett-kron-Brillantkolibri (*Eugenes fulgens*) sowie zwei kleinere Arten, der Schwarzkinnkolibri (*Archilochus alexandri*) und die Breitschwanzelfe (*Selasphorus platycercus*). Die selteneren sind dagegen allesamt klein und umfassen Beryllamazilie (*Amazilia beryllina*), Breit-schnabelkolibri (*Cyananthus latirostris*), Veilchenscheitelamazilie (*Amazilia violiceps*), Rotrücken-Zimtelfe (*Selasphorus rufus*) und Sternelfe (*Stellula calliope*). Sie alle besuchen die

Futterspender von Sonnenaufgang bis zum Sonnenuntergang. Sobald es dunkel wird, tauchen Ende August bis Anfang September zahlreiche Vertreter zweier Arten migrierender Fledermäuse auf: die Kleine Mexikanische Blütenfledermaus (*Leptonycteris yerbabuenae*) sowie die Langnasenfledermaus (*Choeronycteris mexicana*), die beide zur Unterfamilie der Blütenfledermäuse (Glossophaginae) aus der Familie der Blattnasen (Phyllostomidae) gehören.

Wenngleich Südarizona für die meisten Kolibris die nördliche Verbreitungsgrenze darstellt, erstreckt sich das Sommerbrutgebiet von vier Arten (Schwarzkinnkolibri, Breitschwanzelfe, Sternelfe und Rotrücken-Zimtelfe) weit in die gemäßigte Zone entlang der Pazifikküste und der Rocky Mountains und erreicht bei der Rotrücken-Zimtelfe sogar noch den Südosten von Alaska. Den Winter verbringen die Vögel in Mexiko und Mittelamerika. Allgemein gilt die Familie der Kolibris (Trochilidae) auf dem amerikanischen Kontinent und den Westindischen Inseln als weit verbreitet. Ihre größte Artenvielfalt erreicht sie in den nördlichen Anden in Ecuador, Peru und Kolumbien, wo bis zu 25 Spezies an einem Ort vorkommen können. Mit zunehmendem Breitengrad geht die Diversität zwar kontinuierlich zurück, ist in den Chiricahuas wegen der dortigen Pflanzenvielfalt jedoch immer noch beachtlich.

Zuverlässiger als Insekten

Wie der Lebensraum der Kolibris liegt auch derjenige der Blattnasen-Fledermäuse in den tropischen und subtropischen Habitaten Lateinamerikas und der Westindischen Inseln. Die beiden Arten unserer Forschungsstation kommen am häufigsten in Mexiko vor, wobei im Frühjahr einige Weibchen nach Norden ziehen, um in Südarizona Mutterkolonien zu gründen. Wie bei den Kolibris findet man die

REGES TREIBEN In den Chiricahua Mountains treffen in einzigartiger Weise Kolibris und Fledermäuse als Blütenbestäuber aufeinander. Von links nach rechts: Kleine Mexikanische Blütenfledermaus; drei Blütenfledermäuse am Futterspender; Männchen der Rotrücken-Zimtelfe.



größte Artenvielfalt dieser Nektar fressenden Fledermäuse in den Bergen im südlichen Mittelamerika und im nord-westlichen Südamerika, wo bis zu sechs Arten an einem einzigen Ort heimisch sind. Auch hier nimmt die Vielfalt mit zunehmendem Breitengrad ab, und das südliche Arizona bildet die nördliche geografische Grenze ihres Verbreitungsgebiets.

Beim Stichwort Pflanzenbestäubung denken die meisten Menschen wohl an Insekten. Das trifft aber nur bedingt zu. Vielmehr gelten Nektar fressende Vögel und Säugetiere weltweit als wichtige Bestäuber tropischer und subtropischer Gewächse. In deren Habitaten gibt es in der westlichen Hemisphäre zahlreiche Wirbeltiere, die sich von Nektar ernähren und dabei die Blüten befruchten. Unter den eher kalten Bedingungen in den Bergen der westlichen USA dürften sich warmblütige Vögel und Fledermäuse als zuverlässigere Bestäuber erweisen als wechselwarme Insekten. Entsprechend hängen Pflanzen in den Gebirgen der Neotropis mit zunehmender Höhe stärker von Kolibris als von Insekten ab.

Wann bildete sich die Lebensgemeinschaft zwischen Kolibris und ihren Nahrungspflanzen heraus? Bis zur Entwicklung molekularbiologischer Methoden zur Stammbaumanalyse blieb die Frage ungeklärt. Doch 2014 gelang Jimmy McGuire von der University of California in Berkeley und seinen Kollegen der Nachweis, dass sich die Kolibris vor etwa 22 Millionen Jahren in eine Vielzahl von Arten aufzuspalten begannen. Der erste bekannte Vertreter dieser Vogelfamilie ist 30 bis 32 Millionen Jahre alt und stammt überraschenderweise aus dem heutigen Baden-Württemberg. Das in einer Tongrube südlich von Wiesloch gefundene Fossil beschrieb 2004 der Paläontologe Gerald Mayr vom Senckenberg-Institut in Frankfurt am Main. Kolibris traten demnach wohl zunächst im tropischen Eurasien auf, wo auch ihre Schwesterfamilie ihren Ursprung hat: die Segler, zu denen unser Mauersegler zählt. Wie die Kolibris schließlich nach Amerika gelangten – vermutlich über die Beringstraße – und warum sie offensichtlich aus Eurasien und Afrika verschwanden, weiß man bis heute nicht.

Einmal in Südamerika angelangt, spalteten sich die Kolibris in neun unterschiedliche Entwicklungslinien (Kladen) auf. Die nordamerikanischen Vertreter gehören alle zu den drei jüngsten Kladen Lampornithini, Mellisugini und Trochilini, die erstmals vor 13 Millionen Jahren hier auftauchten. Die in den Chiricahua Mountains vorkommenden Arten sind 0,3 bis 7 Millionen Jahre alt und damit deutlich jünger als das Gebirge.



ALAMY / WITOLD SRYPCZAK

ÜPPIGE VEGETATION Die Pflanzenpracht der Chiricahua Mountains im Südosten des US-Bundesstaats Arizona offenbart sich besonders im Cave Creek Canyon an der Ostflanke des Gebirges. Die außerordentlich große Biodiversität der Region beruht darauf, dass hier die tropische Tier- und Pflanzenwelt Südamerikas auf die der gemäßigten Zone Nordamerikas trifft.

Ähnlich verhält es sich mit den vor Ort vertretenen Nektar fressenden Fledermäusen. Die auf Amerika beschränkten Blattnasen erschienen auf dem Kontinent vor zirka 30 Millionen Jahren. Vor 20 bis 10 Millionen Jahre spaltete sich diese Familie in elf Unterfamilien auf, die sich in ihrer Ernährung auf Insekten (ihrer ursprünglichen Nahrung), Blut (Vampire), Wirbeltiere, Nektar und Pollen sowie Früchte spezialisierten. Die Nektarfresser umfassen zwei Unterfamilien (Glossophaginae und Lonchophyllinae) mit insgesamt 56 Spezies, von denen die meisten in Mittel- und Südamerika heimisch sind. Im Gegensatz zu anderen Blattnasen besitzen diese Fledermäuse lang gezogene Schnauzen und Zungen sowie wenige und kleine Zähne, was die Spezialisierung auf die meist flüssige Kost widerspiegelt. Gemäß einer 2016 veröffentlichten Stammbaumanalyse des Teams um Danny Rojas an der portugiesischen Universidade de Aveiro begann die Evolution der Glossophaginae vor rund 20 Millionen Jahren. Wie bei den Kolibris erscheinen die an unserer Forschungsstation vorkommenden beiden nördlichen Fledermausarten mit einem Alter von etwa zwei Millionen Jahren als relativ jung.

Der wesentliche Grund, warum diese Vögel und Fledermäuse im Südosten von Arizona entwicklungsgeschichtlich gemeinsam auftraten, liegt in der außerordentlichen Vielfalt der dortigen Flora: Mindestens 1240 Pflanzenarten aus 103 Familien gedeihen in den Chiricahua Mountains. Unter ihnen gibt es zahlreiche Familien, die für Kolibris attraktive Blüten hervorbringen, darunter Kakteen (Cactaceae), Hülsenfrüchtler (Fabaceae), Lippenblütler (Lamiaceae) und Braunwurzgewächse (Scrophulariaceae). Doch nur eine einzige Pflanzenfamilie lockt in den Chiricahuas mit ihren Blüten sowohl Nektar suchende Fledermäuse als auch Kolibris an: die Agavengewächse (Agavaceae).

THEODORE H. FLEMING



Die Besucher der Southwestern Research Station

Im Spätsommer lassen sich an der Southwestern Research Station mindestens vier häufige und bis zu sieben seltene Kolibrispezies beobachten, bevor sie südwärts weiterziehen. Nach Sonnenuntergang tauchen zwei ebenfalls wandernde Fledermausarten an den Futterspendern auf und bleiben hier fast die ganze Nacht. Sie sind deutlich größer als die Kolibris.

Entsprechend der verhältnismäßig kurzen Entwicklungsgeschichte der Kolibris und Fledermäuse scheinen sich auch deren Nahrungspflanzen erst in jüngerer Zeit stärker aufgespalten zu haben. Hierzu zählen vor allem die ursprünglich von Bienen bestäubten Asteriden, eine Großgruppe von Blütenpflanzen mit vielen bekannten Vertretern wie Sonnenblume, Kaffee oder Kartoffel. Hinsichtlich ihrer Bestäubung hängen die meisten Blütenpflanzen von Tieren ab. Aber diese Zweckgemeinschaft kann viele Formen annehmen. Das Studium der Übergänge zwischen den verschiedenen Bestäubungssystemen – etwa von der Bienen- zur Kolibribestäubung – offenbart, wie die Symbiose funktioniert und wie sich im Lauf der Zeit neue Nischen herausbildeten. Die Evolution sorgt somit als treibende Kraft für die zunehmende Lebensvielfalt auf der Erde.

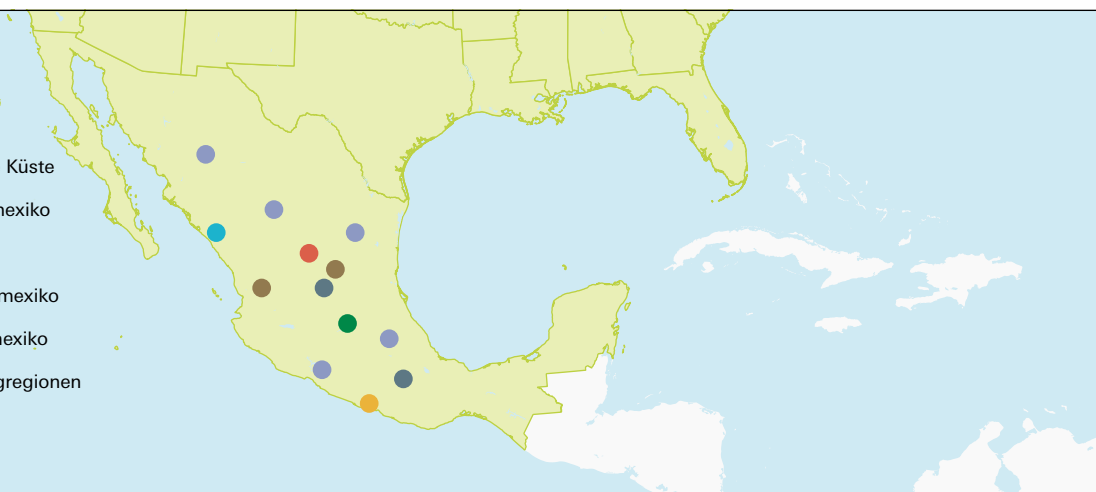
Wie die Botaniker Stefan Abrahamczyk von der Universität Bonn und Susanne Renner von der Ludwig-Maximilians-Universität München 2015 feststellten, ging in Nordamerika die Bestäubung durch Kolibris in den vergangenen fünf Millionen Jahren mindestens 70-mal aus der Bienenbestäubung hervor. Dieser evolutionäre Übergang benötigte wohl weniger als 500 000 Jahre und verlief damit recht schnell. Laut den entwicklungsgeschichtlichen Daten entstammen die meisten der von Kolibris besuchten nordamerikanischen Kräuter der gemäßigten Zone. Ihr geschätztes evolutionäres Alter reicht von einer halben Million bis zu sieben Millionen Jahre, was recht genau mit dem ihrer Bestäuber überein-

stimmt. Sobald die Kolibris auf der Bildfläche erschienen, reagierte die Flora offenbar rasch mit der Entwicklung neuer Bestäubungsangebote. Damit wichen die Pflanzen der Konkurrenz von durch Bienen bestäubten Spezies aus, wodurch die Gesamtartenzahl in den gemäßigten Habitaten der Gebirgsregionen der westlichen USA anwuchs.

Die Nahrungspflanzen der beiden Blütenfledermausarten unterscheiden sich deutlich von denen, welche die Kolibris bevorzugen. Ihre Vorläufer entwickelten sich eher in den tropischen und subtropischen Zonen als den nördlichen gemäßigten Gebieten. In den Chiricahuas laben sich die Fledermäuse ausschließlich an Agaven. Diese entwickelten

Kolibrispezies	Gewicht (Gramm)	Klade; ungefähres Alter (Millionen Jahre)	Überwinterungsgebiet
 Blaukehlnymphe (<i>Lampornis clemenciae</i>)	7 bis 8	Lampornithini; 5,2	●
 Violett-kron-Brillantkolibri (<i>Eugenes fulgens</i>)	6 bis 7	Lampornithini; 11,1	●
 Schwarzkinnkolibri (<i>Archilochus alexandri</i>)	3 bis 4	Mellisugini; 1,5	●
 Breitschwanzelfe (<i>Selasphorus platycercus</i>)	3 bis 4	Mellisugini; 1,8	●
 Rotrücken-Zimtelfe (<i>Selasphorus rufus</i>)	3 bis 4	Mellisugini; 1,0	●
 Sternelfe (<i>Stellula calliope</i>)	2 bis 3	Mellisugini; 0,6	●
 Luzifersternkolibri (<i>Calothrix lucifer</i>)	3 bis 4	Mellisugini; 2,2	●
 Breitschnabelkolibri (<i>Cynanthus latirostris</i>)	3 bis 4	Trochilini; 2,9	●
 Weißohrsaphir (<i>Hylocharis leucotis</i>)	3	Trochilini; 2,6	●
 Veilchenscheitelamazilie (<i>Amazilia violiceps</i>)	5 bis 6	Trochilini; 0,2	●
 Beryllamazilie (<i>Amazilia beryllina</i>)	4 bis 7	Trochilini; 0,3	●
Fledermauspezies	Gewicht (Gramm)	Familie/Unterfamilie; ungefähres Alter (Millionen Jahre)	Überwinterungsgebiet
 Kleine Mexikanische Blütenfledermaus (<i>Leptonycteris yerbabuenae</i>)	20 bis 27	Phyllostomidae/Glossophaginae; 2,0	●
 Langnasenfledermaus (<i>Choeronycteris mexicana</i>)	14 bis 19	Phyllostomidae/Glossophaginae; 2,0	●

- Zentralmexiko
- westmexikanische Küste
- südliches Zentralmexiko
- Südwestmexiko
- Zentral- und Westmexiko
- Zentral- und Südamerika
- mexikanische Bergregionen



sich wahrscheinlich vor acht bis sechs Millionen Jahren im heutigen Mexiko, wobei sich Blattnasenfledermäuse als wichtigste Bestäuber etablierten. In der Sonora-Wüste im Südwesten Arizonas und im Nordwesten Mexikos befruchten diese Tiere auch Säulenkakteen, eine weitere Gruppe großer tropischer Gewächse.

Obwohl die Nahrungspflanzen der Kolibris einer ganzen Reihe unterschiedlicher Familien angehören, haben sie eine ähnliche Blütenmorphologie entwickelt, wie es 1968 von Karen und Verne Grant und etwas später von James Brown und Astrid Kodric-Brown von der University of New Mexico beschrieben wurde. So passt die Länge der meist röhrenartigen und in der Regel rot gefärbten Blüten mit typischerweise 15 bis 25 Millimetern gut zu den 15 bis 21 Millimeter langen Vogelschnäbeln, und sie öffnen sich tagsüber. Die von Fledermäusen besuchten Agavenblüten sind zwar ebenfalls röhrenförmig, aber länger, weiter und robuster, und sie öffnen sich nachts (siehe »Blüten für Fledermaus und Kolibri«). Ferner handelt es sich bei den nordamerikanischen von Kolibris befruchteten Pflanzen meist um mehrjährige Kräuter oder Stauden, die ihre Blüten in Bodennähe entfalten, während die großen Agavenblüten gehäuft an den Enden horizontaler Zweige an kräftigen Stängeln auftreten, die mehrere Meter in den Himmel ragen. Auch die Nektarproduktion unterscheidet sich deutlich: Die Nahrungspflanzen der Kolibris erzeugen täglich nur einige wenige Mikroliter; bei den Agaven liegt die in jeder Nacht bereitgestellte Menge mehrere Größenordnungen darüber (siehe »Die Pflanzen und ihre Bestäuber«, S. 46). In diesen Unterschieden von Blütengröße und Nektarproduktion spiegelt sich wider, dass Kolibris und Fledermäuse in Körpergröße und Energiebedarf deutlich voneinander abweichen.

Der Nektar, den die Besucher aus den Blüten schlürfen, stellt mit einem Zuckeranteil von etwa 20 Gewichtsprozent eine wichtige Energiequelle dar. Wie physiologische Studien offenbaren, ist er sehr gut verdaulich; der Zucker gelangt damit rasch ins Blut und steht folglich innerhalb kurzer Zeit der energiehungrigen Flugmuskulatur zur Verfügung.

Die aktiven Tiere – ob Vögel oder Säuger – brauchen jedoch auch ausreichend Protein, wofür sie unterschiedli-

che Quellen anzapfen. Kolibris beziehen die benötigten Eiweißstoffe in erster Linie aus dem Verzehr kleiner Insekten; es handelt sich also um Insektenfresser, die zusätzlich Nektar konsumieren. Fledermausweibchen füttern ihre Jungen mit proteinreicher Milch. Die Nektarfresser unter ihnen haben allerdings mit ihren kleinen Zähnen und den langen, relativ schwachen Kiefern die ursprüngliche insektenreiche Kost im Prinzip aufgegeben. Stattdessen können sie mit ihrer biegsamen Zunge Pollenkörner aus ihrem Fell klaben, die sich dort verfangen haben. Im Verdauungstrakt setzen die Fledertiere die darin enthaltenen Aminosäuren als Eiweißvorstufen frei. Die Zungen der Kolibris sind dagegen zu starr, um Pollenkörner von ihrem Schnabel oder ihren Federn abzustreifen – und selbst wenn das den Vögeln gelingen sollte, sind sie außer Stande, den Blütenstaub zu verdauen und daraus Aminosäuren zu gewinnen. Pollen stellt somit eine wichtige Nahrungsquelle für Fledermäuse, aber nicht für Kolibris dar. Entsprechend überrascht es nicht, dass die von Fledermäusen befruchteten Blüten größere Staubbeutel hervorbringen und viel mehr Pollen produzieren als Blüten, die von Kolibris besucht werden.

Streit um die besten Plätze

Im Gegensatz zu vielen auf Kolibris spezialisierte Blüten sind Vogelfutterstellen auch für Fledermäuse zugänglich. Das bietet die Gelegenheit zu beobachten, wie sich die beiden Wirbeltiergruppen beim Fressen verhalten. Hierbei offenbaren sich evolutionäre Unterschiede im Sozialverhalten der Nektar fressenden Vögel und Säugetiere: Kolibris standen unter dem Evolutionsdruck, knappe Nahrungsressourcen verteidigen zu müssen – die Fledermäuse dagegen nicht. Infolgedessen treten die meisten Kolibris als Einzelgänger auf und sind territorial gebunden. Obwohl sich ihre hohe Verteidigungsbereitschaft eher gegen Artgenossen richtet, betrifft das soziale Gezänk, das regelmäßig bei den Futter Spendern ausbricht, alle Arten, die versuchen, dort fündig zu werden.

Bei diesen Auseinandersetzungen spielt die Körpergröße oft eine entscheidende Rolle. Folglich dominieren an den Futterstellen der Forschungsstation die beiden großen Spezies Violett-kron-Brillantkolibri und Blaukehl-Nymphe.

Kleinere Arten sehen sich deshalb oft gezwungen, zu anderen Futterspendern auszuweichen oder zu warten, bis sie an der Reihe sind. Eine Ausnahme macht hier die Rotrücken-Zimtelte. Sie gehört zwar zu den kleinsten Kolibris vor Ort, verhält sich aber äußerst aggressiv und vermag einen Futterplatz erfolgreich gegen alle anderen Kolibriarten zu verteidigen. Wenngleich viele Kolibris ihre Nahrung im Schwirrflug aufnehmen, lassen sich die größeren zum Trinken meist nieder. Das tun manchmal auch die kleineren unter ihnen, sobald die großen Arten von anderen vertrieben worden sind. Unabhängig ob schwebend oder sitzend, stecken die Vögel ihre lange Zunge zehn- bis zwölfmal pro Sekunde in den Futterbehälter. Der Fressvorgang kann mehrere Sekunden dauern; währenddessen tauchen die



ISTOCK / SULTANCICEKIL

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema:
[spektrum.de/t/wunderwelt-der-pflanzen](https://www.spektrum.de/t/wunderwelt-der-pflanzen)

Tiere wiederholt ihren Schnabel ein. Genauso verhalten sie sich auch an Blüten.

Zu den morphologischen Anpassungen der Vögel gehört ihre gefurchte Zunge, mit der sie das Futter blitzschnell aufnehmen können (siehe »Kolibri- und Fledermauszunge«). Dabei plattet der Vogel sie zunächst ab und streckt sie dann aus, bis ihre zweiteilige Spitze den Nektar berührt. Die beiden Zungenspitzenanteile weichen nun auseinander und saugen die Flüssigkeit ein. Die Zunge gewinnt daraufhin ihre gefurchte Form zurück, wobei sich die Rille mit Nektar füllt. Das geschieht viel umfangreicher und schneller, als wenn es über reine Kapillarkraft erfolgte. Demnach funktioniert die Kolibrizunge wie eine elastische Mikropumpe – ein 2015 von Forschern der University of Connecticut vorgeschlagenes Modell, das sich von der früheren, auf passiver Kapillarwirkung beruhenden Vorstellung unterscheidet.

Im Gegensatz zu den Kolibris sind die Fledermäuse größer, geselliger und nicht territorial. Tagsüber schlafen die nachtaktiven Säugetiere in Gruben oder Höhlen. Die Kolonien der Langnasenfledermaus wirken mit meist nur etwa

einem Dutzend Individuen eher überschaubar. Dagegen bestehen die der Kleinen Mexikanischen Blütenfledermaus häufig aus Tausenden von Tieren. Die beiden Arten zeigen keinerlei aggressives Verhalten, wenn sie kurz nach Sonnenuntergang an unserer Forschungsstation eintreffen. Vielmehr schwärmen oftmals gemischte Gruppen um die Futterstellen herum, wobei sich ein bis drei Tiere gleichzeitig am Zuckerwasser laben. Die meisten Besuche geschehen im Flug, bei dem die Fledermaus in der Luft oberhalb des Spenders innehält, bevor sie schnell ihre Zunge ausfährt und in die Futterquelle taucht.

Eine Zunge wie ein Wischmopp

Die Zunge der Nektar fressenden Fledermäuse unterscheidet sich morphologisch stark von der der Kolibris, und sie ist auch länger als bei anderen Fledermausarten derselben Familie. Die Zungenspitze wird mit ihren zahlreichen kurzen Papillen während der Nahrungsaufnahme ein einziges Mal für lediglich 0,4 Sekunden eingetaucht. Genauso kurz fällt der gesamte Blütenbesuch aus. Mit einer Länge von 60 bis 70 Millimetern im ausgestreckten Zustand passt die Zunge zur Dimension des Oberkiefers sowie der Blüte – ein weiteres Beispiel für Koevolution. Wie andere Säugetiere nehmen die Fledermäuse ihre Nahrung leckend auf. Dank der Papillen funktioniert die Zunge wie ein Wischmopp und arbeitet als muskuläre Hydraulikpumpe: Durch Muskelkontraktion verringert sich bei konstantem Volumen der Durchmesser der Zunge während ihrer Verlängerung. Die Blutgefäße werden so zusammengepresst, Blut schießt in die Papillen und richtet sie auf. Beim Zurückziehen der Zunge bleiben die Papillen an der Spitze stehen, die den Nektar ins Maul befördern. Die Fledermäuse können ihre Zunge binnen 50 Millisekunden ausstrecken und benötigen für das Einziehen weitere 50 Millisekunden. Doch oft sieht man, wie eine Fledermaus ihren Futterplatz mit hängender Zunge und heruntertropfendem Zuckerwasser verlässt.

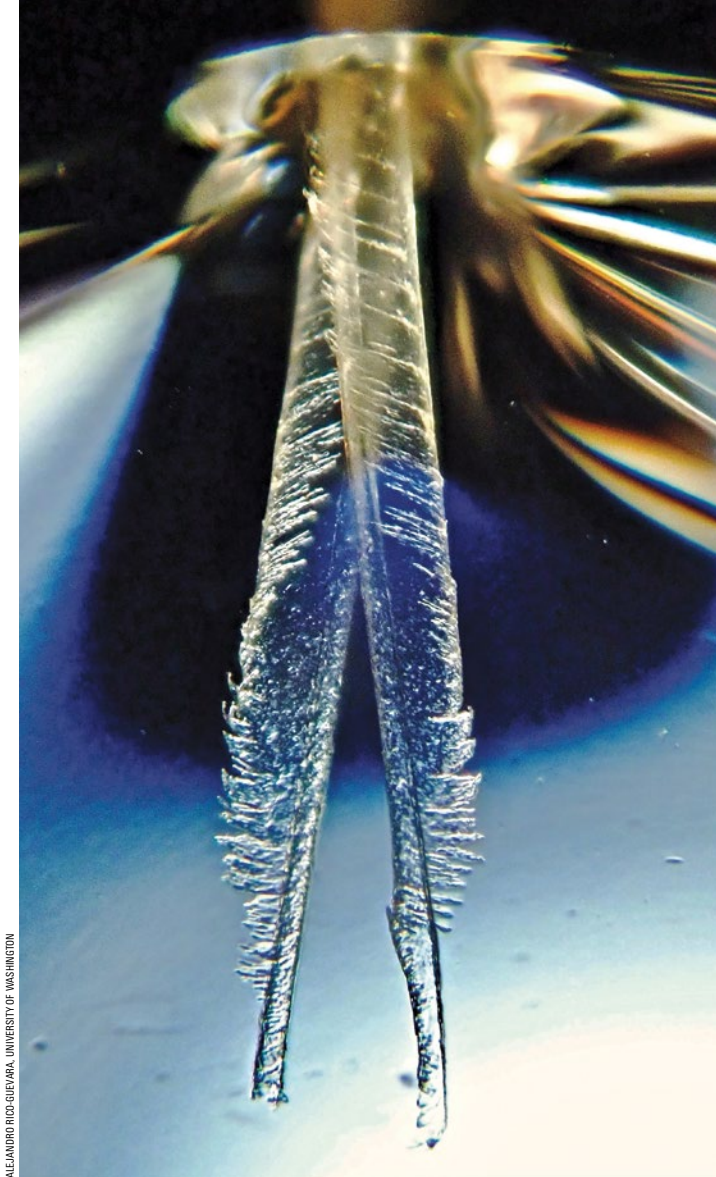
Ein anderer auffälliger Unterschied zwischen Kolibris und Blütenfledermäusen betrifft die Art und Weise, wie sie sich den Futterstellen nähern und diese wieder verlassen. Das beruht im Wesentlichen auf den morphologischen Eigen-

BLÜTEN FÜR FLEDERMAUS UND KOLIBRI Die Pflanzen der Chiricahua Mountains haben sich an ihre Bestäuber angepasst. Fledermausblüten wie bei *Agave palmeri* erscheinen robust und öffnen sich nachts (links). Die von Kolibris bestäubten Kräuter wie *Bouvardia glaberrima* tragen meist auffallend rote, röhrenförmige Blüten, die sich tagsüber präsentieren (rechts).

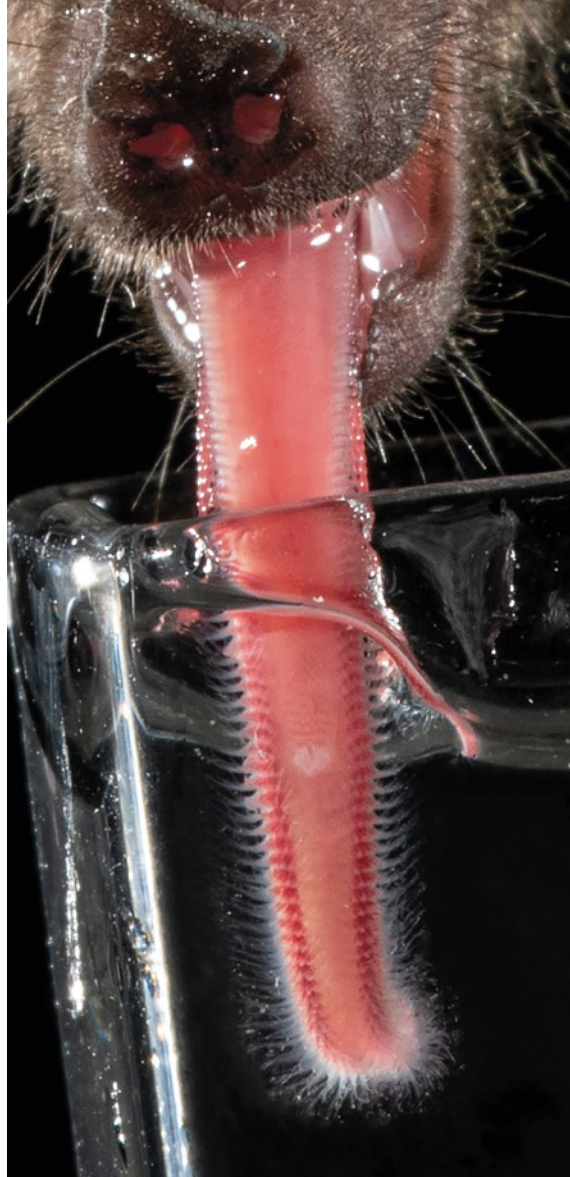


SHERA AND BRICK FENTON





ALEJANDRO RICO-GUEVARA, UNIVERSITY OF WASHINGTON



SILVER AND BRUCK FENTON

KOLIBRI- UND FLEDERMAUSZUNGE Die gefurchte Zunge eines Kolibris endet in einer gegabelten Spitze, die beim Saugen auseinanderweicht, so dass sie den zuckerreichen Blütennektar schnell aufnehmen kann (links). Eine Nektar fressende Fledermaus besitzt eine lange und biegsame Zunge mit zahlreichen kleinen Papillen, mit denen das Tier während seiner kurzen Besuche die Flüssigkeit aufleckt (rechts).

schaften des jeweiligen Flugapparats. Auf Grund ihrer langen, schmalen und mit relativ unbiegsamen Federn ausgestatteten Flügel sowie ihrer besonderen Schulteranatomie, die ein Vorwärts- und Rückwärtsfliegen erlaubt, wirkt das Verhalten der Kolibris beim An- und Abflug eher stereotyp. In der Regel fliegen sie eine Nahrungsquelle frontal an und entfernen sich, indem sie rückwärts startend senkrecht abheben. Ganz anders sieht das bei den Fledermäusen aus. Mit ihren breiten und sehr elastischen Flughäuten führen sie oft geradezu akrobatische Flugmanöver bei ihren Futterbesuchen aus. Dabei können sie aufrecht, seitwärts oder sogar in Rückenlage fliegen.

Wenn wir die Kolibris und die Nektar fressenden Fledermäuse im Süden Arizonas beobachten, werden wir einer

Koevolution über Abermillionen von Jahren zwischen Blütenpflanzen und den sie bestäubenden Wirbeltieren gewahr. Ein Großteil dieser Entwicklung fand weiter südlich in den Tropen statt, doch zumindest bei den Kolibris geschah das im Lauf der vergangenen fünf Millionen Jahre auch in den westlichen Gebirgsregionen Nordamerikas. Die Wechselbeziehungen verdeutlichen den dynamischen Charakter dieses Evolutionsprozesses, bei dem sowohl Pflanzen wie ihre Bestäuber auf Umweltveränderungen reagierten und sich über weite Landstriche ausbreiteten. Daraus resultierte die Entwicklung einer Reihe von ursprünglich durch Bienen bestäubten Pflanzen der gemäßigten Zone, denen mehrere Arten tropischer Kolibris tief nach Nordamerika hinein gefolgt sind. Obwohl es sich bei den meisten dieser Spezies um Zugvögel handelt, haben sich doch einige von ihnen in den Wüsten und Trockengebieten im Südwesten der USA und Mexikos dauerhaft etabliert.

Solche koevolutionären Beziehungen hängen letztlich von den Strategien der Nahrungssuche und der Nahrungswahl der Bestäuber ab. So wirken sich Unterschiede im Such- und Fressverhalten zwischen Kolibris und Fledermäusen fundamental auf ihre Nahrungspflanzen aus. Kolibris, die vor allem während der Brutzeit stark an ein Gebiet gebunden sind, verbreiten Pollen nur über kurze Distanzen.

Die Pflanzen und ihre Bestäuber

Von Kolibris bestäubte Pflanzen erzeugen täglich nur wenige Mikroliter Nektar. Dagegen liegt die Nektarproduktion der von Fledermäusen befruchteten Blüten meist um Größenordnungen darüber. Hier spiegeln sich die Unterschiede in Körpergröße und Energiebedarf der jeweiligen Bestäuber wider, an die sich die Gewächse angepasst haben.

Das Meiste davon verbleibt somit innerhalb der Territorien der Vögel. Das gilt vor allem dann, wenn die betreffenden Nahrungspflanzen in hoher Dichte auftreten, wie es bei Bergwiesen der Fall ist. Die nicht an ein Territorium gebundenen Fledermäuse durchstreifen dagegen bei ihrer Nahrungssuche große Gebiete und sorgen so für eine viel weitere Verbreitung. So vermag die Kleine Mexikanische Blütenfledermaus, deren Nahrungspflanzen wie Agaven oder Säulenkakteen bloß spärlich in Trockengebieten wachsen, den Pollen über weite Entfernungen von einer Pflanze zur anderen zu übertragen. Aus Untersuchungen mit Funksendern wissen wir, dass diese Fledermaus in einer Nacht ohne Weiteres 100 Kilometer und mehr zurücklegen kann, bevor sie zu ihrem Schlafplatz zurückkehrt.

Derartige Unterschiede in der Pollenverbreitung können wiederum die Geschwindigkeit der Artbildung beeinflussen: Pflanzenpopulationen, deren Blütenstaub etwa von Kolibris nur über kurze Distanzen weitergetragen wird, geraten eher in eine genetische Isolation voneinander und bilden dadurch leichter neue Arten als solche mit einer Pollenübertragung durch Fledermäuse über weite Strecken.

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Southwestern Research Station werden weiterhin das Vorkommen und das Verhalten von wandernden Kolibris und Nektar fressenden Fledermäusen beobachten und aufzeichnen. Im Zeitalter der Erderwärmung erscheint eine solche Erkundung wichtiger denn je – nicht zuletzt, um die Pflanzen und die sie bestäubenden Wirbeltiere für die Zukunft zu bewahren. ◀

Pflanzenpezies (Familie)	Bestäuber	Nektarproduktion in 24 Stunden (Mikroliter)
 <i>Ipomopsis aggregata</i> (Polemoniaceae)		7,6
 <i>Penstemon barbatus</i> (Scrophulariaceae)		7,2
 <i>Castilleja integra</i> (Scrophulariaceae)		5,5
 <i>Lonicera arizonica</i> (Caprifoliaceae)		4,1
 <i>Aquilegia triternata</i> (Ranunculaceae)		1,2
 <i>Silene laciniata</i> (Caryophyllaceae)		8,7
 <i>Agave chrysantha</i> (Agavaceae)		280
 <i>Agave palmeri</i> (Agavaceae)		660

BARBARA AULICINO / AMERICAN SCIENTIST NOV-DEZ 2020

QUELLEN

Abrahamczyk, S., Renner, S. S.: The temporal build-up of hummingbird/plant mutualisms in North America and temperate South America. *BMC Evolutionary Biology* 15, 2015

Fleming, T. H., Kress, W. J.: The ornaments of life. *Coevolution and conservation in the tropics*. University of Chicago Press, 2013

McGuire, J. A. et al.: Molecular phylogenetics and the diversification of hummingbirds. *Current Biology* 24, 2014

Rico-Guevara, A. et al.: Hummingbird tongues are elastic micropumps. *Proceedings of the Royal Society* 282, 2015

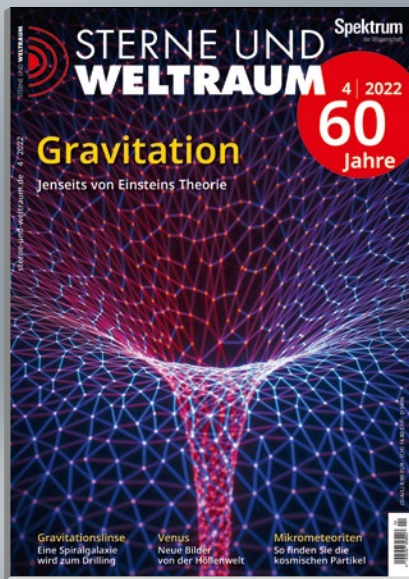
Rojas, D. et al.: Bats (Chiroptera: Noctilionoidea) challenge a recent origin of extant neotropical diversity. *Systematic Biology* 65, 2016

AMERICAN
Scientist

© American Scientist
www.americanscientist.org

Unsere Neuerscheinungen

Ob Naturwissenschaften, Raumfahrt oder Psychologie:
Mit unseren Magazinen behalten Sie stets den Überblick
über den aktuellen Stand der Forschung



Informationen und eine Bestellmöglichkeit
zu diesen und weiteren Neuerscheinungen:
service@spektrum.de | Tel. 06221 9126-743
[Spektrum.de/aktion/neuerscheinungen](https://www.spektrum.de/aktion/neuerscheinungen)

MEDIZINTECHNIK DER COMPUTER ALS OP-ASSISTENT

Chirurgische Eingriffe laufen präziser und verlässlicher ab, wenn sie computerunterstützt erfolgen. Die Maschine liefert dabei räumliche Informationen und hilft, Ungenauigkeiten zu vermeiden.





VectorVision



UKWB

Tobias Renkawitz arbeitet als Professor und ärztlicher Direktor an der Orthopädischen Universitätsklinik Heidelberg.

► spektrum.de/artikel/2000467

Stellen Sie sich vor, Sie müssten mit bloßem Auge schätzen, wie groß der Winkel α (alpha) oder die Entfernung zwischen den Punkten A und B ausfallen (siehe »Augenmass«). Wahrscheinlich gelingt Ihnen das recht gut und Sie liegen nur um ein paar Winkelgrad und wenige Millimeter neben den wahren Werten von 28° und 6,5 Zentimeter. Müssten Sie diese Schätzung aber in einem Operationssaal vornehmen und hätten es dabei mit einer Struktur zu tun, die im Körperinnern liegt und von Muskeln, Sehnen, Knochen und Bindegewebe bedeckt sowie durchblutet ist, wäre die Aufgabe ungleich schwerer.

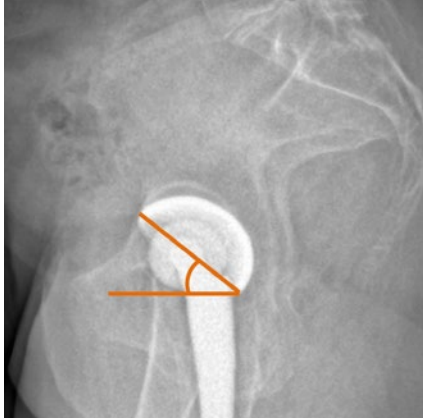
Weltweit stehen orthopädische Chirurginnen und Chirurgen täglich vor einer solchen Herausforderung, wenn sie verschlissene Gelenke ersetzen. Denn die dabei implantierten künstlichen Gelenke sollen nach dem Eingriff gut beweglich sein und sich möglichst optimal in den Organismus

HILFREICHE MASCHINEN

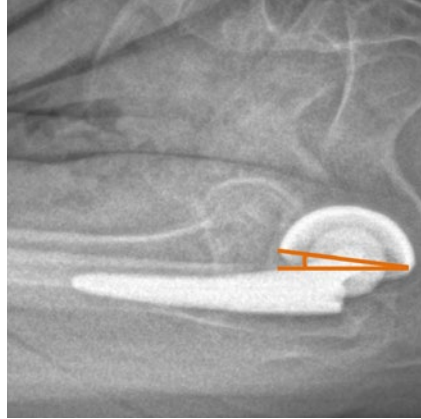
Computertechnik kann Chirurgen bei operativen Eingriffen unterstützen. Das führt zu messbar besseren Ergebnissen, wie der Autor und sein Team in Untersuchungen belegt haben. Das Bild zeigt ihn im OP-Saal.

AUF EINEN BLICK AKKURATE ELEKTRONIK

- 1 Computer- und roboterassistierte Verfahren sind in der Chirurgie zunehmend verbreitet.
- 2 Sie helfen immer öfter auch bei orthopädischen Eingriffen, wenn es darum geht, künstliche Knie- und Hüftgelenke einzusetzen.
- 3 Die digitale Unterstützung macht solche OPs genauer und verlässlicher, doch sie ist mit hohen Kosten verbunden und führt zu komplizierteren Arbeitsabläufen.



MIT FRIEDRICH VON TOBIAS RENKAWITZ



VERKIPPUNG Künstliche Hüftgelenke müssen stark wechselnden Belastungen standhalten. Der Kippwinkel der Hüftpfanne beispielsweise (orange) nimmt sehr unterschiedliche Werte an, während sich der Patient von einer stehenden (links) in eine sitzende (rechts) Position begibt.

einpassen, ohne dass übermäßige Belastungskräfte auf sie wirken. Zugleich sollen sie den individuellen Körpermerkmalen des jeweiligen Patienten, etwa seiner Beinlänge oder den Gegebenheiten seines Muskelapparats, möglichst präzise entsprechen. Nur so lässt sich ein dauerhaft zufrieden stellendes Ergebnis des Eingriffs sowie eine lange Haltbarkeit des Implantats erreichen. Hightech-Operationsmethoden wie Navigation und Robotik helfen heute orthopädischen Chirurgen, die Erfolgsquote beim Einsetzen künstlicher Knie- und Hüftgelenke zu verbessern.

Frankheiten und Fehlbildungen von Knochen, Muskeln und Sehnen zu lindern oder zu heilen, ist seit Jahrhunderten das Ziel der Orthopädie. Als Standeszeichen der Fachgesellschaften dient noch heute das Bild eines krummen Bäumchens, das an einem kräftigen, geraden Pfahl angebunden ist – geprägt im Jahr 1741 von dem Pariser Kinderarzt Nicolas Andry. Orthopäden erfüllen demnach die Funktion von »Gärtnern«, die Wachstumsprozesse lenken und gegebenenfalls korrigieren. Anfangs stand im Fokus der Disziplin, Kindern mit Fehlbildungen zu helfen. Von dort entwickelte sich das Fach weiter und nahm neben dem Behandeln von Tuberkulosekranken und Kriegsversehrten zunehmend operative Therapieverfahren und die Unfallmedizin in den Blick. Unter dem Dach der orthopädischen Chirurgie versammeln sich heute hochspezialisierte Tätigkeitsfelder wie die Hand- und Ellenbogen-, Fuß-, Schulter-, Wirbelsäulen-, Sport-, Kinder- und Tumororthopädie sowie der Ersatz von Gelenken, die Endoprothetik.

Mehr als 240 000 künstliche Hüftgelenke, so genannte Hüftendoprothesen, haben Ärzte 2019 allein in der Bundesrepublik eingesetzt. Der Eingriff gilt als erfolgreiches Verfahren in der orthopädischen Chirurgie. Dennoch bleibt es eine Herausforderung, die Prothesenteile – konkret den Hüftschaft mitsamt Hüftkopf und die aufnehmende künstliche Hüftpfanne im Becken – korrekt zu platzieren und das gewünschte räumliche Zusammenspiel zwischen ihnen zu

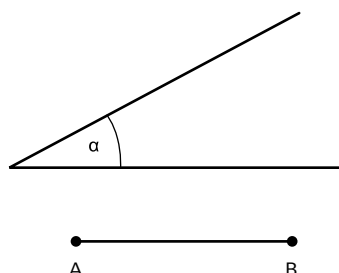
erreichen (siehe »Einsetzen eines künstlichen Hüftgelenks«). Gelingt dem Operateur dies nicht, dann stoßen die Komponenten bei Alltagsbewegungen gegeneinander und das Kunstgelenk »luxiert«, das heißt, der Prothesenkopf springt aus der Hüftpfanne. Für Betroffene ist das dramatisch, denn sie erfahren schlagartig Schmerzen und können nicht mehr laufen. Oft müssen sie sich dann einer erneuten, schwierigen Operation unterziehen, gefolgt von einer monatelangen Rehabilitation.

Selbst gestandene Routiniers verschätzen sich

Der Mediziner Kevin Bozic von der University of California in San Francisco und sein Team haben Gesundheitsdatenbanken analysiert und festgestellt, dass Kunstgelenkluxationen in den USA zwischen Oktober 2005 und Dezember 2006 bei etwa 11 500 Patienten auftraten. Insgesamt waren das rund 23 Prozent aller Fälle, in denen es nötig wurde, ein künstliches Hüftgelenk nochmals zu operieren. Das Problem: Beim Einsetzen eines künstlichen Hüftgelenks ist es erforderlich, dass die Spannung im Gelenk und die Ausrichtung seiner Komponenten optimal zusammenpassen, um eine Luxation zu verhindern. Der Chirurg muss darauf achten, dass sich das operierte Bein durch den Eingriff nicht allzu stark verkürzt oder verlängert. Hierfür ist er darauf angewiesen, Winkel und Distanzen dreidimensional abzuschätzen. Meine Kollegen an der Universitätsklinik Regensburg und ich haben untersucht, ob das Augenmaß eines erfahrenen Chirurgen dabei präziser ist als das eines auszubildenden. Wir fanden heraus, dass selbst Routiniers mit über 25-jähriger Berufserfahrung und tausenden Operationen bei ihrer Schätzung bis zu zehn Winkelgrad danebenliegen können.

Räumliche Positionen und Ausrichtungen im menschlichen Körper per Augenmaß zu beurteilen, hängt von vielen Faktoren ab. Wie der Patient auf dem OP-Tisch liegt, sieht der Chirurg nur zu Beginn des Eingriffs. Dann »verschwindet« der Behandelte aus hygienischen Gründen unter sterilen Tüchern, nur das Operationsfeld bleibt im Blick. Verändert sich die Patientenposition, beispielsweise durch Krafteinwirkung während der OP, kann das den Ärztinnen und Ärzten entgehen. Ein weiteres Problem: Die Gelenkstellungen unterscheiden sich bei liegenden, stehenden beziehungsweise gehenden Personen. Der Operateur orientiert sich naturgemäß am liegenden Patienten, muss aber berücksichtigen, wie sich sein operativer Eingriff in aufrechter Position und in Bewegung auswirken wird – besonders im Hinblick auf die Position der künstlichen Hüftpfanne.

AUGENMASS Die Strecke A-B oder den Winkel α im Bild zu schätzen, fällt nicht schwer. Solche Größen bei einem zu operierenden Gelenk zu überschlagen, ist deutlich diffiziler.



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT

Bildgebende Verfahren machen das deutlich. Indem Mediziner gleichzeitig zwei hochauflösende, digitale Röntgenbilder des ganzen Körpers von vorn und von der Seite aufnehmen und aus diesen ein räumliches Bild errechnen, erhalten sie einen dreidimensionalen Einblick. Schon die beispielhafte Messung eines einzelnen Kippwinkels der Hüftpfanne, verglichen zwischen stehendem und sitzendem Zustand, zeigt das komplexe Zusammenspiel von Körperposition, Wirbelsäulenstatik, Beckenkipfung und Ausrichtung des Implantats (siehe »Verkippung«).

Computerassistierte Operationsverfahren können Chirurgen helfen, die Herausforderungen beim Einsetzen von Kunstgelenken zu bewältigen. Anfangs auf die Neurochirurgie beschränkt, hat sich die orthopädische Navigationstechnologie auch beim Hüft- und Kniegelenkersatz etabliert. Mit Hilfe von Infrarotlicht, das an Markerkugeln zurückgeworfen wird, berechnet ein Computer während der Operation die räumliche Anordnung der Knochen und des Implantats (siehe »Navigationstechnik für chirurgische Eingriffe«, S. 54). Damit lassen sich Winkel und Distanzen virtuell

ermitteln; zudem können die Ärzte simulieren, wie sich eine bestimmte Orientierung der Prothese auswirkt. Dies ermöglicht es beispielsweise, die Beinlänge beim Einsetzen der Hüftprothese genau vorzugeben oder das komplexe Zusammenspiel zwischen den Becken- und Oberschenkelknochen exakt aufeinander abzustimmen.

Meine Teams an den Universitätskliniken Regensburg und Heidelberg haben ein navigationsgestütztes Operationsverfahren entwickelt, um während des Eingriffs die bestmögliche Stellung des künstlichen Hüftgelenks zu errechnen. Die Methode erlaubt, die Gelenkkomponenten besonders exakt anzupassen: Vergleichbar dem präzisen Einfügen eines Schlüssels in ein Schloss bilden bei der neuen OP-Technik alle Gelenkteile eine biomechanisch und räumlich optimierte Einheit. Die behandelten Patienten erreichen dadurch schneller Schmerzfreiheit, hohe Beweglichkeit und Belastungsfähigkeit im Alltag. In einer Studie an 135 Probanden verglichen wir unser Verfahren mit der herkömmlichen »Freihandmethode«. Wir fanden heraus, dass sich das Risiko schmerzhafter Anschlagphänomene,

Einsetzen eines künstlichen Hüftgelenks

Die Chirurgen bereiten den Oberschenkelknochen darauf vor, den Prothesenschaft aufzunehmen. Dazu verdichten sie das schwammartige Knochenmark, um Platz zu schaffen. Der anschließend eingesetzte künstliche Hüftschaft verwächst dank einer geeigneten, beispielsweise keramischen Oberflächenbeschichtung mit dem umgebenden Knochen. Falls das Gebein infolge einer Osteoporose bereits zu stark geschwächt ist, lässt sich der Schaft mit Knochenzement fixieren, etwa mit dem Kunststoff Polymethylmethacrylat.

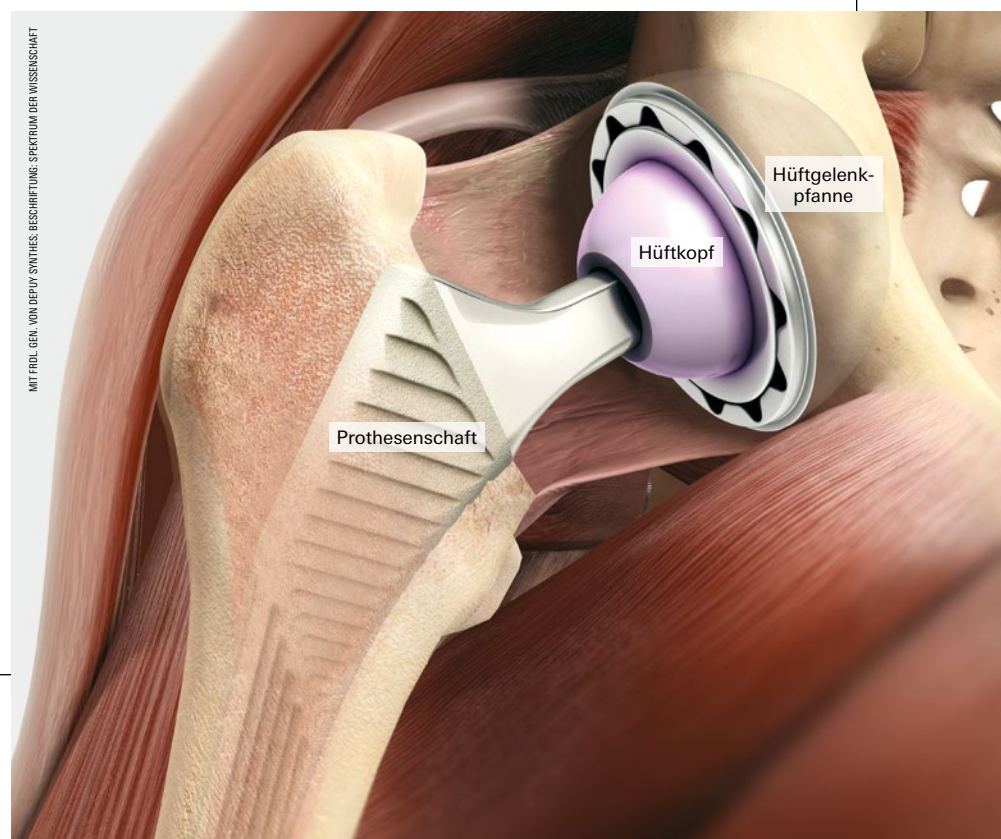
Der Prothesenschaft ist leicht konisch geformt. Auf ihn setzen die Chirurgen den Hüftkopf aus Metall oder Keramik auf und fügen ihn mit einem kräftigen Schlag fest (»verblocken«).

Im Beckenknochen befestigen die Operateure eine künstliche Hüftgelenkpfanne. Diese besitzt nach außen hin eine raue Oberfläche und ist mit Titanlegierungen beschichtet. Innerhalb mehrerer Wochen wächst sie in den umgebenden Knochen ein. Damit sie schon vorher hält, schlägt der

Chirurg sie in das aufgefäste und entknorpelte Gewebe ein, so dass sich eine ringförmige mechanische Spannung aufbaut, mit der sich die Gelenkpfanne gewissermaßen verkrallt. Zusätzliche Schrauben verleihen der Struktur weitere Stabilität, falls nötig.

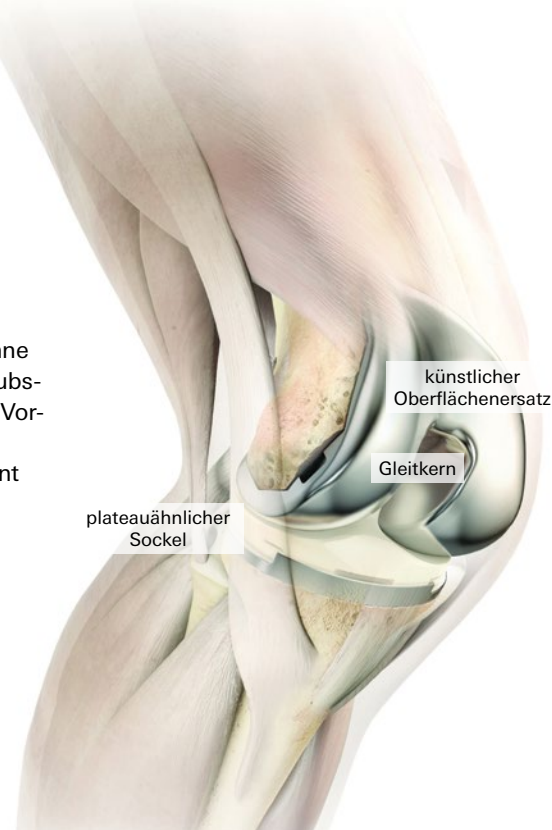
In der Hüftpfanne platziert das OP-Team einen speziell gehärteten

Kunststoff wie Polyethylen oder ein Keramik-Inlay. Darin gleitet der Hüftkopf. Wird die Implantation fachgerecht durchgeführt, hält eine Hüftendoprothese bei 85 bis 90 Prozent der Patienten mindestens 15 Jahre lang, und bei 70 bis 80 Prozent der Patienten wenigstens für 20 Jahre, wie Untersuchungen ergeben haben.



Einsetzen eines künstlichen Kniegelenks

Die Ärzte entfernen vom Oberschenkelknochen millimeterdünne Scheiben, um zerstörten Knorpel und angegriffene Knochensubstanz zu beseitigen. Darunter kommt tragfähiges Gewebe zum Vorschein, auf das sie einen künstlichen Oberflächenersatz aus Chrom-, Kobalt- und Molybdänlegierungen mit Knochenzement aufbringen. Auf dem Unterschenkel befestigen die Chirurgen einen plateauähnlichen Sockel, etwa aus einer Titanlegierung, und darauf einen Gleitkern aus speziell gehärtetem Kunststoff wie Polyethylen. In der Regel lassen sich dabei die stabilisierenden Seitenbänder des Patienten und sein hinteres Kreuzband erhalten. Statt das Kniegelenk komplett zu ersetzen, besteht auch die Möglichkeit eines Teilersatzes. Künstliche Kniegelenke halten bei 82 Prozent der Operierten (Vollersatz) beziehungsweise bei 70 Prozent der Operierten (Teilersatz) mindestens 25 Jahre lang.



MIT FRIOL. GEN. VON DEPUY SYNTHES. BESCHRIEBUNG. SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

also des Zusammenstoßen von Prothesenteilen, dank navigationsgestützter Technologie um 19 Prozent verringern lässt. Die Methode erleichtert es zudem, eine ausgeglichene Beinstellung zu erreichen und die Gelenkarchitektur präzise zu rekonstruieren. Eine nahezu unveränderte Beinlänge wiederherzustellen, gelang den computerunterstützten Chirurgen in 93 Prozent der Fälle, während es beim traditionellen Freihandverfahren in nur 54 Prozent glückte, wie wir in einer weiteren Studie belegten.

Zu den besonders häufigen Eingriffen der orthopädischen Chirurgie gehört ebenso der Ersatz des Kniegelenks. Mehr als 190 000 entsprechende Operationen nahmen Ärzte im Jahr 2019 in ganz Deutschland vor. Damit ein solcher Eingriff erfolgreich verläuft, muss er mit hoher Präzision und an jeden Patienten individuell angepasst erfolgen. Üblicherweise ersetzen Chirurgen, wenn sie ein künstliches Kniegelenk implantieren, die verschlissenen Oberflächen an Ober- und Unterschenkel (siehe »Einsetzen eines künstlichen Kniegelenks«). Sie führen mehrere Knochenschnitte durch und legen so fest, wie der spätere Oberflächenersatz orientiert sein wird. Zu beachten sind dabei die umgebenden Weichteilstrukturen wie Bänder und Sehnen: Beim Beugen und Strecken des Kniegelenks muss durchweg eine harmonische Anspannung des Muskel- und Sehnenapparats mit hinreichender Stabilität der Gesamtstruktur gewährleistet sein. Gelingt es nur unzureichend, die natürlichen Gelenklinien, Beinachsen und Stellungen des Kniegelenks zu rekonstruieren, dann

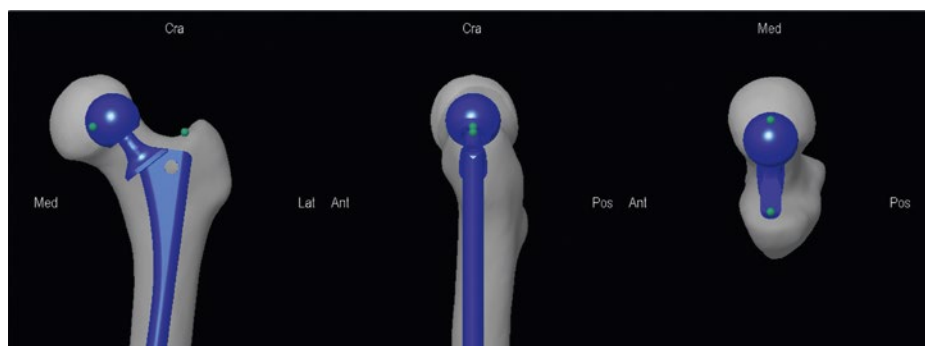
leiden Betroffene nach dem Eingriff weiterhin unter Schmerzen.

Der Mediziner Robert Bourne von der University of Western Ontario und sein Team haben dies beispielhaft in der Region Ontario, Kanada, an über 1700 Patienten untersucht. Der Anteil unzufriedener Personen, die nach der OP Beschwerden hatten, lag bei rund 20 Prozent. Andere nationale und internationale Studien ergaben

MIT FRIOL. GEN. VON TOBIAS REINWITZ



ÜBERWACHUNG AM BILDSCHIRM Elektronische Assistenzsysteme helfen Chirurgen, künstliche Hüftgelenke so einzusetzen, dass deren Teile gut zusammenspielen.



ähnliche Werte. Zum Glück bietet die orthopädische Navigationstechnologie auch hierfür Lösungen an. Computersysteme errechnen dreidimensionale Gelenkmodelle, nachdem das Chirurgenteam mittels Infrarotlicht und Markerkugeln das operierte Gelenk räumlich analysiert und die Daten in das System eingespielt hat. Wie sich der Eingriff auf die Bewegungsabläufe auswirken wird, kann man – ähnlich wie bei Hüft-OPs – für eine bestimmte Prothesenposition simulieren, bevor überhaupt ein Knochenschnitt stattgefunden hat.

Während die Operation läuft, lässt sich das Erreichte immer wieder neu kontrollieren. So kann das Chirurgenteam in Echtzeit prüfen, ob beispielsweise Abweichungen, weil sich das Sägeblatt in hartem Knochen verformt hat, noch im Toleranzbereich liegen oder gegebenenfalls korrigiert werden müssen. Andernfalls könnten sich kleine Diskrepanzen während aufeinander folgender OP-Schritte summieren und am Ende einen großen Fehler ergeben. Für den Operateur sind Unstimmigkeiten unterhalb eines bestimmten Ausmaßes mit bloßem Auge oder einem mobilen Röntgengerät kaum zu erkennen – erst computerunterstützte Verfahren machen Abweichungen von wenigen Millimetern oder in der Größenordnung eines Winkelgrads unter OP-Bedingungen sichtbar.

Medizinische Behandlung aus der Ferne

Roboterassistierte Verfahren sind in der Chirurgie mittlerweile weit verbreitet. Einer der am häufigsten genutzten OP-Roboter, das so genannte Da-Vinci-System, wurde in den 1980er Jahren erfunden – ursprünglich mit dem Ziel, verwundete US-Soldaten aus der Ferne behandeln zu können. Seither haben Mediziner und Techniker das System immer weiterentwickelt, so dass es sich heute ebenso in der klinischen Routine urologischer und allgemein-chirurgischer Eingriffe bewährt.

Parallel dazu wurden Roboterverfahren für die Hüft- und Kniechirurgie entwickelt. Als bekanntestes machte sich Ende der 1980er Jahre das »Robodoc«-System einen leider schlechten Namen. Robodoc sollte die Strukturen, die den Hüftprothesenschaft aufnehmen, selbstständig aus dem Oberschenkelknochen fräsen – anhand vorher eingespielter Daten aus einem Computerprogramm. Das endete in mitunter katastrophalen Ergebnissen. Der »Automatikmodus« des Roboters verursachte Kollateralschäden an den Muskeln und Weichteilen rund um das Gelenk, zudem arbeitete das System ungenau. Die betroffenen Patienten litten anschließend unter dem gefürchteten »Robodoc-Hinken«.

Neue Entwicklungen haben diesen Irrweg verlassen. In den zurückliegenden Jahren sind Roboterarme für den künstlichen Hüft- und Kniegelenkersatz entstanden, die den Operateur unterstützen und dabei für mehr Präzision sorgen. Im Unterschied zum Robodoc-Verfahren behält der Arzt hierbei die Kontrolle, die Maschine darf die OP-Schritte nicht selbstständig ausführen. Die ersten Roboterarm-Systeme für die orthopädische Chirurgie benötigten vor dem Eingriff genaue Bilddaten aus der Computer- oder Magnetresonanztomografie, um daraus ein 3-D-Modell zu erstellen, das während der Operation mit Hilfe von Naviga-



MIT FRÜH. GEN. VON DEPUY SYNTHES (CE-ZERTIFIZIERUNG NOCH AUSSTEHEND)

AUF ROLLEN Der »Velys«-Roboter gehört zu den neuesten Assistenzsystemen, um Knie-OPs zu unterstützen. Seine Zulassung steht noch aus.

tionsverfahren überprüft und verifiziert wurde. Bei künftigen, weiterentwickelten Versionen wird eine solche vorausgehende Bildgebung wohl nicht mehr nötig sein.

Erste Ergebnisse mit Roboterarm-Systemen lassen hoffen. Dank des Zusammenspiels von maschineller Präzision und Navigation lässt sich eine hohe Genauigkeit und ein individuell an den Patienten angepasstes Vorgehen erreichen. Der Robo-Arm erlaubt es unter anderem, orthopädische Werkzeuge wie Präzisionssägen ohne messbare Abweichung zu führen. Unebenheiten und lokale Unterschiede in der Knochenbeschaffenheit können solche Systeme automatisch ausgleichen. Langfristige Erhebungen dazu liegen aber noch nicht vor.

Computerassistierte Operationsverfahren bieten viele Vorteile. Trotzdem sind sie noch kein Standard in der orthopädischen Chirurgie. Das hat verschiedene Gründe. Zum einen müssen sie in den Operationsablauf eingebunden werden, machen ihn dadurch komplizierter und verlängern die Zeit eines Eingriffs um 10 bis 20 Minuten. Bei einem eng

Navigationstechnik für chirurgische Eingriffe

Das Grundprinzip der (optoelektrischen) Navigationstechnologie für roboterassistierte Operationen ist die so genannte Stereotaxie (lateinisch »räumliches Berühren«). Sie hat in der Neurochirurgie ihren Ursprung, dient heute aber ebenso in der orthopädischen Chirurgie. Eine im Operationssaal befindliche

Spezialkamera sendet Infrarotlichtsignale aus, die von Markerkugeln zurückgeworfen werden, welche die Mediziner zuvor an Knochen des Patienten und an OP-Werkzeugen befestigt haben. Ein Computer misst die Zeit bis zum Eintreffen der reflektierten Signale, berechnet daraus die entsprechenden Entfer-

nungen und erstellt ein virtuelles dreidimensionales Modell des Knochens und der damit verbundenen Strukturen. Das erlaubt es, das Operationsgeschehen in Echtzeit zu überwachen. In der Hüft- und Knieendoprothetik sind auf Infrarotlicht basierende Navigationssysteme heute weit verbreitet.

getakteten OP-Plan summiert sich das am Ende des Tages manchmal auf eine Stunde, die für eine mögliche weitere OP fehlt. Computersysteme sind zudem teuer in der Anschaffung und verlangen nach durchgehender Wartung und zusätzlichem Verbrauchsmaterial.

Leider bleiben die Ausgaben für derartig innovative Verfahren im deutschen System der Fallpauschalen oft unberücksichtigt. Kliniken erhalten pro Patient einen festen Betrag, der die tatsächlichen Aufwendungen weitgehend

Zusammenfassend lässt sich sagen: Computerassistierte Operationsverfahren erhöhen die Verlässlichkeit und die Präzision orthopädischer Eingriffe. Im Rahmen des Knie- und Hüftgelenkersatzes sind sie heute an ausgewählten Zentren im Einsatz und werden künftig weiter an Bedeutung gewinnen. Auch in der Wirbelsäulen- und Sportorthopädie, Traumatologie und vielen anderen Bereichen finden sie zunehmend Anwendung. Man darf aber nicht der Fehlannahme aufsitzen, der bloße Einsatz neuer Technologien mache entsprechende Eingriffe grundsätzlich »besser«. Das Computersystem selbst kann und soll nicht entscheiden, welches Vorgehen jeweils sinnvoll ist. Navigationstechnologie und Robotik ermöglichen es orthopädischen Chirurgen vielmehr, einen vorher ausgearbeiteten Plan präzise und reproduzierbar umzusetzen. Die Planung selbst, die Wahl der passenden OP-Technik und des konkreten Implantats bleiben in der Verantwortung des Arztes und bestimmen den Erfolg des Eingriffs. Die während der Operation gewonnenen Messwerte zu interpretieren und die richtigen Schlussfolgerungen daraus zu ziehen, erfordert langjährige Ausbildung, großes Verständnis für biomechanische Zusammenhänge und einen hohen Grad an Spezialisierung. Computerunterstützung allein macht noch keinen guten Operateur. ◀



METAMORWORKS / GETTY IMAGES / ISTOCK

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/roboter

ignoriert. Aus ökonomischer Sicht verursachen computerunterstützte OP-Verfahren daher vornehmlich Kosten. Um Krankenhausbetreiber dennoch von ihrem Einsatz zu überzeugen, ist es nötig, den Patientennutzen wissenschaftlich zu belegen. Empirisch sicher nachgewiesen ist, dass computerassistierte Chirurgie einen hohen Präzisionsgrad bietet und es damit erleichtert, vor dem Eingriff festgelegte Zielwerte verlässlich umzusetzen. Einige wissenschaftliche Untersuchungen zeigen, dass ihr Einsatz zu einer besseren Gelenkfunktion und einer längeren Haltbarkeit von Implantaten führt.

Meine Kollegen und ich haben beispielsweise 2017 in einer Untersuchung an 350 Patienten gezeigt: Zehn Jahre nach einem Kniegelenkersatz mussten nur 1,9 Prozent jener Prothesen gewechselt werden, die mit Hilfe von Navigationstechnologie eingesetzt worden waren. Bei den Freihandimplantaten waren es 6,4 Prozent. Das sieht nach einem deutlichen Effekt aus, allerdings konnten ihn andere Arbeitsgruppen nicht reproduzieren. Vermutlich liegt das daran, dass sich orthopädische OP-Verfahren ständig weiterentwickeln und ihre Zielwerte einer kontinuierlichen Anpassung unterliegen.

QUELLEN

Agarwal, N. et al.: Clinical and radiological outcomes in robotic-assisted total knee arthroplasty: A systematic review and meta-analysis. *The Journal of Arthroplasty* 35, 2020

Bourne, R.B. et al.: Patient satisfaction after total knee arthroplasty: Who is satisfied and who is not? *Clinical Orthopaedics and Related Research* 468, 2010

Bozic, K.J. et al.: The epidemiology of revision total hip arthroplasty in the United States. *The Journal of Bone and Joint Surgery* 91, 2009

Renkawitz, T. et al.: Impingement-free range of movement, acetabular component cover and early clinical results comparing »femur-first« navigation and »conventional« minimally invasive total hip arthroplasty: A randomised controlled trial. *The Bone & Joint Journal* 97-B, 2015

Woerner, M. et al.: Visual intraoperative estimation of cup and stem position is not reliable in minimally invasive hip arthroplasty. *Acta Orthopaedica* 87, 2016



FRANZ SCHÄDEL / FLORIAN FREISTETTER (F. PRESSE) / CC BY-SA 4.0 (CREATIVE COMMONS ORIGINALS BY SA 4.0 (LEGAL CODE))

FREISTETTERS FORMELWELT DER KREISEL UND DIE STERNZEICHEN

Einen Kreisel kann man nicht umwerfen – bloß seinen Drehimpuls ändern. Das macht ihn nicht nur zu einem spannenden Spielzeug, sondern bringt auch die Astrologie durcheinander.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«.

» spektrum.de/artikel/2000485

Kreisel faszinieren nicht bloß Kleinkinder. Das Objekt dreht sich weitgehend unabhängig davon, was man damit anstellt. Man kann ihn schubsen oder versuchen, ihn umzuwerfen, aber er wird in der Regel lediglich ein wenig schief weiterrotieren. Das Phänomen heißt Präzession und gehorcht folgender Formel:

$$\omega_P = \frac{mgr}{I_s \omega_S}$$

Versucht man, auf die Rotationsachse eines senkrecht stehenden, rotierenden Kreisels einzuwirken, wird dieser nicht umfallen. Stattdessen scheint er auf einmal eine Kraft zu spüren, die ihn in eine andere Richtung ablenkt. Die nun gekippte Drehachse beginnt sich zu drehen: Es sieht so aus, als würde sie entlang eines Kegels laufen, und die Spitze der Achse beschreibt einen Kreis.

Die Geschwindigkeit der Präzession wird durch die oben aufgeführte Formel beschrieben. Wenn sich ein Kreisel mit einer Winkelgeschwindigkeit ω_S bewegt, ein Trägheitsmoment I_s und eine Masse m hat und der Abstand zwischen Auflagepunkt und Schwerpunkt durch r gegeben ist, dann lässt sich daraus (mit der Erdbeschleunigung g) die Winkelgeschwindigkeit ω_P berechnen, mit der sich die Rotationsachse des Kreisels bewegt.

Ein ganz besonders großer Kreisel ist, zumindest in erster Näherung, die Erde. Sie dreht sich einmal am Tag um ihre Achse, die um 23,5 Grad aus der Senkrechten (in Bezug auf die Erdbahn) gekippt ist. Unser Planet ist keine perfekte Kugel; seine Masse ist unregelmäßig verteilt, und am Äquator ist er ein wenig ausgebeult. Genau dort greifen die Gezeitenkräfte von Sonne und Mond an und verursachen die Präzession der Erdachse.

Um einen kompletten Kreis von 360 Grad zu absolvieren, braucht die Spitze der Rotationsachse etwa 25 700 bis 25 800 Jahre.

Dieser erstaunlichen Tatsache war man sich bereits im antiken Griechenland bewusst. Als ihr Entdecker gilt der Astronom Hipparchos aus dem 2. Jahrhundert v. Chr., obwohl die Präzession vermutlich auch schon in der babylonischen Astronomie bekannt war. Hipparchos verglich eigene Positionsmessungen von Sternen mit Katalogen, die etwa 150 Jahre zuvor erstellt worden waren. Bei vielen Himmelskörpern entdeckte er eine signifikante Abweichung, die er auf eine Bewegung der Erdachse zurückführte.

Denn um die Position eines Sterns sinnvoll anzugeben, muss man das in einem mitrotierenden Koordinatensystem tun. Als Ursprung nutzt man dafür traditionell den Frühlingspunkt, also den Schnittpunkt zwischen der scheinbaren Bahn der Sonne und dem an den Himmel projizierten Äquator der Erde. Letzterer dreht sich aber mit der Erdachse mit, wodurch sich der Frühlingspunkt im Lauf der Zeit verschiebt.

Das hat verschiedenste Auswirkungen, nicht nur auf die Wissenschaft. Die Einteilung des Himmels in Sternzeichen reicht beispielsweise Jahrtausende zurück. Die Verschiebung der Erdachse hat jedoch dafür gesorgt, dass die reale Position der Himmelskörper heute nicht mehr mit den ursprünglichen astrologischen Vorstellungen übereinstimmt.

Wer als Wassermann etwa davon ausgeht, die Sonne hätte zum Zeitpunkt der Geburt im Sternbild Wassermann gestanden, muss enttäuscht werden. Denn das war vor Jahrtausenden der Fall. Tatsächlich war die Sonne aber im Januar beziehungsweise Februar der letzten Jahrzehnte in den Fischen.

Diesen neuen Blick auf das All ignoriert die Astrologie allerdings standhaft. Sie hält an ihrem geozentrischen Weltbild aus der Vergangenheit fest. Wer das Universum verstehen möchte, widmet sich deshalb besser auch weiterhin der Astronomie.

Das Periodensystem der Elemente steht seit über 100 Jahren für eine verlässliche Ordnung in der verwirrenden Vielfalt der chemischen Substanzen. Doch angesichts neuer Entdeckungen muss man sich fragen: Gibt es vielleicht etwas Besseres?

► spektrum.de/artikel/2000470



THOMAS ENDLER MRI MIS | EIDZIG

FEINCOVEON WIM / CETTY IMAGES / ISTOCK. BEARBEITUNG: SPELZTRIM DER WISSENSCHAFT

Links ein Turm, rechts ein Turm, dazwischen eine dicke Mauer: Kein Bild steht so ikonisch für die unverrückbare Ordnung der Elemente wie das berühmte Periodensystem. Es hat sich als derart erfolgreiches Ordnungs- und Vorhersageinstrument für chemische Substanzen erwiesen, dass Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler heute noch auf seiner Grundlage chemisch-physikalische Eigenschaften neuer Stoffe abschätzen. So hat ein Forschungsteam im Jahr 2018 etwa mit Hilfe neuronaler Netze und der Struktur des Periodensystems vorhergesagt, welche Energie frei wird, wenn sich bestimmte Verbindungen aus den Elementen bilden.

Doch die scheinbar unverrückbare Tabelle ist nur eines von vielen Systemen, die die Ordnung und Klassifizierung der 118 bislang bekannten Elemente widerspiegeln. In Wirklichkeit existieren zahlreiche Möglichkeiten, das periodische System darzustellen – so wie es Tausende von Selfies ein und derselben Person gibt. Jede von ihnen hat ihre eigenen Vorteile und hebt bestimmte Aspekte hervor,

beispielsweise die chemische oder elektronische Ähnlichkeit. Und je mehr Forscherinnen und Forscher über die Stoffe herausfinden, aus denen unsere Welt aufgebaut ist, desto mehr stößt das über 100 Jahre alte Konstrukt an seine Grenzen. Ist es also Zeit für eine neue Ordnung?

Ursprünglich ist das Periodensystem entstanden, weil Wissenschaftler chemische Verbindungen nach ihren Ähnlichkeiten klassifizierten. Als in den ersten Dekaden des 19. Jahrhunderts immer mehr Substanzen entdeckt wurden, erkannten sie auffallende Analogien, etwa zwischen Verbindungen des Natriums und des Kaliums. So kann man bekanntlich einen verstopften Abfluss mit einer Lauge von Natriumhydroxid wieder freilegen; genauso ginge das auch mit Kaliumhydroxid. Die große Anzahl an Verbindungen zwischen verschiedenen Elementen ermöglichte es, chemische Reaktionen zu studieren und zu beobachten, in welchen Verhältnissen die Elemente dort auftreten. Daraus entwickelten Chemiker das Konzept des »Atomgewichts«, das – einmal etabliert – die Basis dafür lieferte, empirische Formeln für Verbindungen zu formulieren und chemische Elemente von leicht nach schwer zu ordnen.

Etwa 11 000 Substanzen kannten Chemiker um 1860 herum (heute sind es rund 182 Millionen). Insbesondere Alexandre-Emile Béguyer de Chancourtois, John Alexander Reina Newlands, William Odling, Gustavus Detlef Hinrichs, Julius Lothar Meyer und Dmitri Iwanowitsch Mendelejew erkannten in jener Zeit, dass sich die Elemente logisch anordnen und gleichzeitig nach Ähnlichkeiten

GRUNDFESTE DER CHEMIE Sag mir, wo du bist, und ich sage dir, wie du dich verhältst: Ein Blick auf die Position im Periodensystem sagt Chemikerinnen und Chemikern einiges über die Eigenschaften eines Elements.

AUF EINEN BLICK PERIODENSYSTEM AUF DEM PRÜFSTAND

- 1 Alle Elemente haben im Periodensystem ihren Platz. Dort sind sie aufsteigend nach ihrer Kernladungszahl aufgelistet und bilden Gruppen mit ähnlichen Eigenschaften.
- 2 Die Logik des Ordnungssystems ist indes nicht so unanfechtbar. Inkonsistenzen und die exponentiell wachsende Zahl bekannter Substanzen stellen die Prinzipien der Elementtafel auf die Probe.
- 3 Nach derzeitigem Kenntnisstand ist ein geordneter Hypergraph die beste Art, die Elemente zu sortieren. Mit diesem Konzept ergeben sich aber neue Fragen.

					2 4.003 He Helium
5 10.811 B Boron	6 12.011 C Carbon	7 14.007 N Nitrogen	8 15.999 O Oxygen	9 18.998 F Fluorine	10 20.180 Ne Neon
13 26.982 Al Aluminum	14 28.086 Si Silicon	15 30.974 P Phosphorus	16 32.066 S Sulfur	17 35.453 Cl Chlorine	18 39.948 Ar Argon
31 69.723 Ga Gallium	32 72.631 Ge Germanium	33 74.922 As Arsenic	34 78.972 Se Selenium	35 79.904 Br Bromine	36 83.798 Kr Krypton
49 114.82 In Indium	50 118.71 Sn Tin	51 121.76 Sb Antimony	52 127.60 Te Tellurium	53 126.90 I Iodine	54 131.29 Xe Xenon
81 204.38 Tl Thallium	82 207.20 Pb Lead	83 208.98 Bi Bismuth	84 [209] Po Polonium	85 [210] At Astatine	86 [222] Rn Radon
113 [286] Nh Nihonium	114 [289] Fl Flerovium	115 [290] Mc Moscovium	116 [293] Lv Livermorium	117 [294] Ts Tennessine	118 [294] Og Oganesson
66 162.50 Dy Dysprosium	67 164.93 Ho Holmium	68 167.26 Er Erbium	69 168.93 Tm Thulium	70 173.05 Yb Ytterbium	71 174.97 Lu Lutetium
98 [251] Cf Californium	99 [252] Es Einsteinium	100 [257] Fm Fermium	101 [258] Md Mendelevium	102 [259] No Nobelium	103 [266] Lr Lawrencium

Geht man im Bild der Festung von links nach rechts, werden die Halogensalze der Lanthanoide löslicher. Die Dissoziationstemperaturen von Erdalkalicarbonaten nehmen mit steigender Kernladungszahl zu. Und die Löslichkeit von Eisen, Kobalt und Nickel in Quecksilber oder in geschmolzenem Natrium steigt von Eisen zu Nickel, ebenso die Löslichkeit ihrer Jodate in Wasser. In allen Fällen sind die Elemente durch die Kernladungszahlen geordnet; in der Gruppe der Erdalkalimetalle aber variiert sie in Sprüngen, während sie sich bei den Lanthanoiden sowie bei Eisen, Kobalt und Nickel in kleinen Schritten verändert.

Das zeigt, dass solche Familien nicht ausschließlich in den Spalten des festungsähnlichen Periodensystems zu finden sind: Im Unterschied etwa zu Erdalkalien sind Lanthanoide in horizontaler Richtung angeordnet, ebenso die Metalle Eisen, Nickel und Kobalt. Oft genug heißt es, besonders die Elemente innerhalb einer Spalte ähnelten sich. Viele Lehrbücher der Chemie, aber auch manche wissenschaftliche Arbeiten überbetonen die Ähnlichkeit innerhalb der Spalten der so genannten Gruppen des Periodensystems. Das ist umso bemerkenswerter, als bereits Mendelejew – im Original auf Russisch – schreibt: »In manchen Teilen des Systems sind die Ähnlichkeiten zwischen Elementen in horizontaler, in manch anderen Teilen aber in vertikaler Richtung zu sehen«.

Ähnlichkeiten zu einfach gedacht

Vermutlich hat sich die Vereinfachung, Analogien vorrangig in den Gruppen des Periodensystems zu verorten, aus den Beziehungen zwischen dem Periodensystem und der elektronischen Struktur der Elemente ergeben. Jedes Atom besitzt genauso viele Elektronen in seiner Hülle wie positiv geladene Protonen im Kern. Wie sich die Elektronen um den Kern herum anordnen – die Elektronenkonfiguration –, folgt den Gesetzen der Quantenmechanik (siehe »Choreografie der Elektronen«). Diese Anordnungsregeln führen dazu, dass sich die jeweils äußerste »Schale« der Elektronenhülle bei denjenigen Elementen gleicht, die untereinander in einer Spalte stehen: Sie haben dieselbe Anzahl an Außenelektronen, in der Fachsprache Valenzelektronen. Weil bei einer chemischen Reaktion im Prinzip nur diese äußersten Elektronen beteiligt sind, reagieren die Elemente vergleichbar.

Der Zusammenhang zwischen chemischer Ähnlichkeit und elektronischen Konfigurationen verknüpfte demnach die beobachtbare Welt chemischer Substanzen und ihrer Reaktionen mit einer fundamentalen atomaren Eigenschaft. Es wäre allerdings zu vereinfachend, elektronische Konfiguration und chemische Ähnlichkeit unmittelbar zu koppeln, denn in der komplexen Welt der Stoffe stößt diese einleuchtende Erklärung an ihre Grenzen.

Die ausgeprägten Analogien zwischen Eisen, Nickel und Kobalt sowie den Lanthanoiden untereinander lassen sich etwa nicht ohne Weiteres durch das Konzept der Valenzelektronen erklären. Sie haben vielmehr damit zu tun, dass sich neu hinzukommende Elektronen ab dem Element Scandium in der 4. Periode anders in der Atomhülle verteilen als bei den Elementen davor. So wie sich

Choreografie der Elektronen

Jedes Atom besitzt ebenso viele Elektronen in seiner Hülle, wie es Protonen im Kern hat – die Zahl der Elektronen entspricht also der Kernladungszahl. Geht man im Periodensystem von einem Element zum nächsten, kommt demnach ein Elektron hinzu. Die Elektronen umkreisen den Atomkern aber nicht willkürlich, sondern in festgelegten Abständen, die man oft vereinfacht als »Schalen« bezeichnet. Innerhalb der Schalen sind die Elektronen in bestimmten Bereichen, den Orbitalen, anzutreffen. Welchen Platz ein neu hinzukommendes Elektron einnimmt, ist durch die Gesetze der Quantenmechanik festgelegt. Sie bestimmt auch, dass in der Regel erst eine Schale des Atoms aufgefüllt wird, bevor ein Elektron in der nächstäußeren Platz nimmt. Bewegt man sich innerhalb des Periodensystems nun in einer Reihe (Periode) horizontal von links nach rechts, wird in diesem Verlauf eine Schale aufgefüllt: Das Element ganz links in der Reihe enthält genau ein Elektron in der äußersten Schale, das nächste zwei und so weiter, bis sie mit dem Erreichen der Edelgasgruppe ganz rechts vollständig gefüllt ist. Sobald man von einem Edelgas aus in die nächste Zeile voranschreitet, beginnt das Auffüllen der nächsten Schale. Das bedeutet, dass sich zwei untereinander stehende Elemente im Aufbau ihrer äußeren Schale gleichen.

Der springende Punkt für die Chemie ist nun, dass sich allein die äußeren Elektronen an einer chemischen Reaktion beteiligen. Daher betrachten die Fachleute im Grunde die abgeschlossenen, inneren Schalen nicht, sondern nur die »Valenzelektronen« genannten außen liegenden Elektronen. Haben zwei Elemente die gleiche Anzahl und Verteilung an Valenzelektronen, dann reagieren sie ähnlich.

hier deutlich sichtbar ein ganzer Block an Elementen zwischen die bereits vorhandenen Säulen schiebt, werden auch Elektronen »dazwischengeschoben«. Obwohl die Anzahl der Valenzelektronen also variiert, sieht die äußerste Schicht ganz ähnlich aus.

Ein analoger Bruch tut sich mit dem Element Lanthan in der 6. Periode auf, der mit dem Einschleichen der Lanthanoide und Actinoide sichtbar wird. Aus Platzgründen stehen diese beiden Zeilen meist separat unter dem Periodensystem. Das symbolisiert gleichzeitig ihre verblüffende Verwandtschaft: Manche Elemente unterscheiden sich so wenig voneinander, dass sie stets gemeinsam in Erzen vorkommen und nur schwer voneinander zu trennen sind.

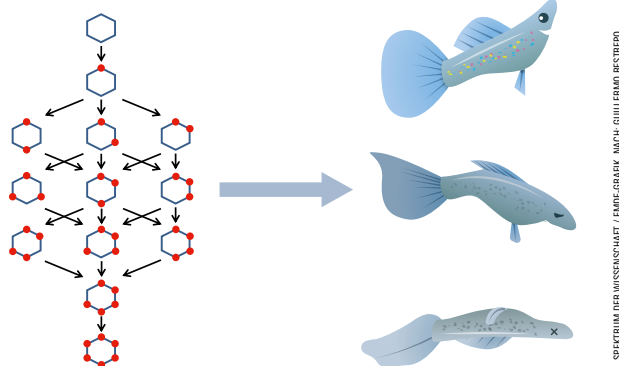
Ordnung der Substanzen

Der amerikanische Chemiker Douglas J. Klein hat im Jahr 2000 ein System vorgeschlagen, um Substanzen nach ihrer Struktur zu ordnen. Es lässt sich leicht am Beispiel des Benzols nachvollziehen. Das Molekül kann man sich als regelmäßiges Sechseck aus Kohlenstoffatomen vorstellen, die jeweils zusätzlich mit einem Wasserstoffatom verbunden sind (die Summenformel lautet entsprechend C_6H_6). Ersetzt man die Wasserstoffatome schrittweise durch Chloratome, so entsteht erst ein Monochlorbenzol, an-

schließend drei verschiedene Dichlorbenzole und so weiter – bis sämtliche Kohlenstoffatome des Sechsecks nicht mehr Wasserstoff, sondern jeweils ein Chloratom tragen (siehe Skizze unten). In der Reihe aller so erhaltenen Moleküle werden zwei Chlorbenzole mit einer um eins verschiedenen Zahl von Chloratomen dann durch eine Linie verbunden, wenn sich das eine durch Substitution aus dem anderen erhalten lässt. Man kann zeigen, dass diese

Relation den Gesetzen der partiellen Ordnung gehorcht. Klein wies nun nach, dass sich eine partielle Ordnung unter den Strukturisomeren des Systems $C_6H_{6-x}Cl_x$ (mit $x = 0, \dots, 6$) heranziehen lässt, um Eigenschaften abzuschätzen. So lassen sich die Chlorbenzole durch die partielle Ordnung nach ihrer Giftigkeit gegenüber Guppys (*Poecilia reticulata*) sortieren: Folgt man den Verbindungslinien von oben nach unten, werden die Substanzen immer giftiger.

ANORDNUNG VON STOFFEN und ihre Verwendung bei der Abschätzung von Eigenschaften. Hier der Zusammenhang zwischen Chlorbenzolen und ihrer Giftigkeit für Guppys (*Poecilia reticulata*). Das schwarze Sechseck stellt die Substanz Benzol dar (C_6H_6): Die Ecken entsprechen Kohlenstoffatomen, davon ist jedes zusätzlich mit einem Wasserstoffatom verbunden. An rot markierten Ecken ist Wasserstoff durch Chlor ersetzt.



Nicht zuletzt, weil die Klassifizierung der Elemente nach elektronischen Merkmalen nicht immer zielführend ist, stellen manche Wissenschaftler wieder die praktische Anwendung in den Mittelpunkt und entwickeln Systeme, die sich auf das beobachtbare Verhalten stützen. So hat der theoretische Chemiker Douglas J. Klein im Jahr 2000 eigene Ordnungsstrukturen entwickelt, anhand derer sich Vorhersagen über die Eigenschaften chemischer Verbindungen treffen lassen (siehe »Ordnung der Substanzen«).

Der theoretische Physiker David Pettifor wiederum kondensierte in den 1980er Jahren die zwei Dimensionen des Periodensystems auf eine einzige, indem er alle Elemente in eine lineare Sequenz transformierte. Nachdem er sie in eine logische Abfolge gebracht hatte, nummerierte er sie von Anfang bis Ende durch und trug sie in einander entgegengesetzter Reihenfolge auf die Achsen eines kartesischen Koordinatensystems auf: einmal von unten nach oben in aufsteigender Reihenfolge und von dort aus in aufsteigender Reihenfolge nach rechts. Jeder Punkt in Pettifors Koordinatensystem entsprach demnach einer Verbindung der Zusammensetzung AB (A und B stehen für zwei verschiedene Elemente). So wollte der Wissenschaftler eine Landkarte erstellen, die feste Stoffe mit ähnlichen

Eigenschaften zusammenfasst. Und tatsächlich: Frappierend liegen in dem so entworfenen System diejenigen beieinander, die dieselben Kristallstrukturen bilden. Anhand der Karte lassen sich demnach die Materialeigenschaften binärer Verbindungen vorhersagen.

Zahlreiche Personen haben Pettifors Methode anschließend zu verfeinern versucht. Allerdings stellt sich die Frage, ob nicht durch die Transformation auf eine absolute Ordnung – eine Sequenz der Elemente – Information verloren geht.

Ein neues mathematisches Konzept eröffnet vielseitige Möglichkeiten

Seit es das Periodensystem gibt, suchen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nach den grundlegenden Gesetzmäßigkeiten, wie die Elemente am besten anzuordnen sind. Ein neues mathematisches Konzept könnte hier Licht ins Dunkel bringen: das des geordneten Hypergraphen. Wie ich 2019 mit meinem Kollegen Wilmer Leal gezeigt habe, eignet es sich am besten, um Ordnung und Ähnlichkeit der Elemente darzustellen. Ein Hypergraph fasst Objekte zu verschiedenen Mengen zusammen, wobei sich diejenigen Mengen überschneiden, deren

Objekte etwas gemeinsam haben (siehe »Hypergraphen«). Befinden sich die Objekte außerdem in einer logischen Reihenfolge, spricht man von einem geordneten Hypergraphen. Damit lassen sich die chemischen Elemente und ihre Beziehungen wunderbar darstellen: Die Ordnung erfolgt anhand der Kernladungszahlen, die Zuordnung zu Teilmengen spiegelt chemische Beziehungen wider (siehe »Periodensystem als geordneter Hypergraph«).

Das relativ neue Konzept der geordneten Hypergraphen spielt nicht nur eine zentrale Rolle für die Chemie, sondern lässt sich wegen seiner allgemeineren mathematischen Konzeption auch in vielen anderen Wissensgebieten anwenden. Man könnte beispielsweise Länder analysieren: Anhand der Zahl der Einwohner werden sie geordnet, während ökonomische oder soziologische Informationen (etwa »Happiness-Indikatoren«) die Basis für die Ähnlichkeitsrelation bilden könnten. Der entscheidende Punkt ist aber nicht die formale Darstellung eines Systems anhand von Indikatoren und deren Beziehungen. Ausschlaggebend ist die Frage, inwieweit es Voraussagen ermöglicht

oder hilft, Beobachtungen zu interpretieren. Da die Mathematik geordneter Hypergraphen noch recht neu ist, könnten ihre zukünftigen Entwicklungen weitere Vorhersageinstrumente für die Chemie hervorbringen.

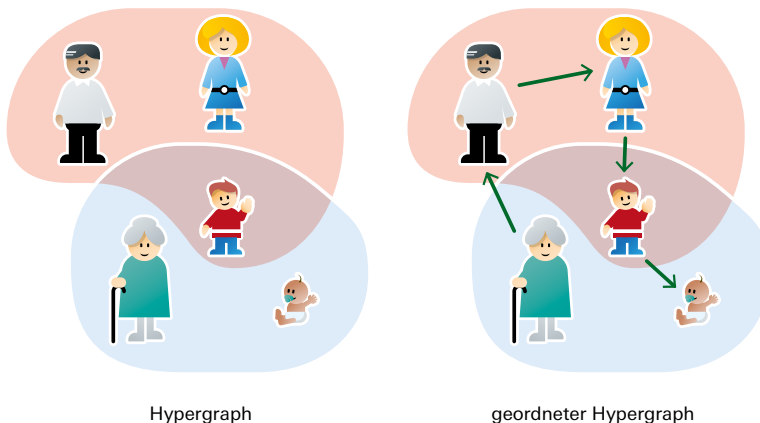
Während die Vorhersagekraft des Periodensystems unbestritten ist, kann es einen Anspruch nicht erfüllen, den vor allem sein Schöpfer Mendelejew stellte: Periodizität. Der Chemiker vermutete, dass »die Eigenschaften einfacher Substanzen, die Zusammensetzung ihrer Kombinationen sowie die Eigenschaften der Letzteren periodische Funktionen der Atomgewichte der Elemente sind«. Dem wird das System – trotz seines Namens – aus drei Gründen nicht gerecht, auch nach dem Austausch des Atomgewichts als ordnende Größe gegen die Kernladungszahl:

Erstens mögen zwar manche Eigenschaften im Periodensystem gewissermaßen oszillieren, aber sie verändern sich dabei nicht periodisch. Beispielsweise ist die Dichte der Elemente keine periodische Funktion der Kernladungszahl. Man kann allerdings bei einigen Eigenschaften von einer gewissen Periodizität sprechen, wenn man sich die

Hypergraphen

Hypergraphen sind Mengensysteme mit bestimmten Relationen, beispielsweise freundschaftliche Beziehungen. Personen werden verschiedenen Mengen zugeteilt, und zwar so, dass die Mitglieder einer Menge miteinander befreundet sind (linkes Bild). Ein geordneter Hypergraph entsteht, wenn sie zusätzlich geordnet sind, etwa nach ihrem Alter (rechtes Bild) oder nach dem Zeitpunkt, zu dem jede Person gegen Covid-19 geimpft wurde.

Etwas formaler ausgedrückt, ist ein Hypergraph ein Paar (X, E) , bestehend aus einer Grundmenge X (alle Personen) und einer Familie E von Teilmengen von X . Betrachtet man chemische Elemente, so ist X die Menge aller Elemente, und die Familien von Teilmengen werden auf der Grundlage ihrer Ähnlichkeit bestimmt. Beispiele dafür wären dann die Alkalimetalle, die Erdalkalimetalle oder die Halogene. Zusätzlich können die Elemente anhand der Kernladungszahl ausnahmslos geordnet werden. Wie solch ein



HYPERGRAPH mit zwei Teilmengen (links) und ein geordneter Hypergraph, beispielsweise Personen geordnet nach ihrem Alter.

geordneter Hypergraph für die Elemente praktisch aussehen könnte, zeigt die Grafik »Periodensystem als geordneter Hypergraph«. Dort sind die Elemente anhand nur eines Kriteriums eindeutig geordnet, so dass man von einer totalen Ordnung spricht. Es hindert uns aber nichts daran, wesentlich allgemeiner zu sein und neben der Kernladungszahl auch andere Größen heranzuziehen. Da die Ordnungen dann nicht mehr nur durch genau ein Kriteri-

um definiert werden, sind die entstehenden so genannten partiellen Ordnungen allgemeiner und damit flexibler als eine totale Ordnung, in der jedes Objekt mit jedem verglichen werden kann. Man könnte sich das Periodensystem also auch als geordneten Hypergraphen mit mehreren partiellen Ordnungen vorstellen. Dann wäre nicht jeder Punkt mit jedem verbunden, was bedeutet, dass sich eben nicht jedes Element mit jedem vergleichen lässt.

SPECTRUM DER WISSENSCHAFT / EMILIE GRAEF, IACI, GUILLERMO RESTREPO

Trends in einer längeren Reihe von Elementen (geordnet durch ihre Kernladungszahlen) ansieht. Ein Trend im ersten Teil einer solchen Sequenz wird in einem anderen Teil der Sequenz reproduziert, ohne dass deswegen die Zahlenwerte übereinstimmen müssen. Das tritt zum Beispiel bei der Elektronegativität auf.

Zweitens gibt es auch Eigenschaften der Elemente, die überhaupt nicht oszillieren. Beispiele sind der Aggregatzustand der Elemente bei Normalbedingungen, die Farbe sowie die Leitfähigkeit.

Drittens sind die Elemente, die wir unter dem periodischen Gesetz analysieren, abstrakte Konstruktionen. Das heißt, wenn wir vom Element Kohlenstoff sprechen, ist damit gemeint, was allen Kohlenstoffformen – Graphit, Diamant, Buckminsterfulleren, Graphen, Nanoröhren und so weiter – gemeinsam ist. Ist aber dann beispielsweise die Dichte des Elements Kohlenstoff noch definiert? Analoge Fragen ergeben sich bei vielen anderen Stoffen.

Vielleicht wissen wir auch zu wenig über die chemischen Verbindungen, um das von Mendelejew erhoffte periodische Gesetz zu erkennen. Man muss also über die Beziehung zwischen dem Periodensystem und dem so genannten chemischen Raum diskutieren:

Jedes Mal, wenn Wissenschaftlerinnen oder Wissenschaftler über neue Verbindungen berichten – sei es durch Extraktion, etwa aus Naturstoffen, oder durch Synthese, also die Herstellung im Labor –, wächst der chemische Raum. Er bezeichnet die Menge der bekannten Verbindungen sowie anhand einer Metrik deren Nähe zueinander. Man kann sich den chemischen Raum wie eine Punktwolke vorstellen, die in einigen Teilen dicht besetzt ist, während andere ihrer Bereiche nur dünn oder gar nicht »besiedelt« sind. Wie kommt es zu derartigen Unterschieden in der Dichte der Punktwolke? Zu einem guten Teil ist das der Tatsache geschuldet, dass Chemie eine lebendige, von Menschen gemachte Wissenschaft ist: So wird es Modeinteressen geben, also Fragen, denen viele Forschungsgruppen zur gleichen Zeit nachgehen. Beispielsweise führt die Nachfrage nach guten Antibiotika zur Entwicklung von Verbindungen, die – dem gemeinsamen Ziel entsprechend – nahe beieinanderliegen. Andere Argumente für die »Nähe« von Substanzen sind eher chemischer Natur, etwa, wenn sie einer gemeinsamen Reaktion angehören.

Exponentiell wachsendes chemisches Wissen und ein gleich bleibendes Periodensystem: Geht das?

Der chemische Raum wächst über die Zeit exponentiell an: Etwa alle 16 Jahre verdoppelt sich das chemische Wissen in Bezug auf die Verbindungen, die erstmalig in der Punktwolke auftreten, oft begleitet von einer neuartigen Reaktion oder manchmal von einem bis dahin unbekannten Reaktionstyp. Allein im Jahr 2015 wurden ebenso viele neue Verbindungen beschrieben wie in den 192 Jahren zwischen 1800 und 1992 insgesamt!

Wie also beeinflusst der rapide wachsende chemische Raum das Periodensystem der Elemente? Immerhin bildet er die Basis des Systems, und daher stellt jede hinzukommende Verbindung, jedes neu entdeckte Element, einen Prüfstein dar, der seine Prinzipien zu Fall bringen kann.

1869 lag es beispielsweise nahe, anhand der bekannten Verbindungen eine Ähnlichkeit zwischen den Alkalimetallen und Thallium zu konstatieren, wie es bereits Mendelejew und Meyer taten. Erst mit der weiteren Expansion musste diese Verwandtschaft abgeschwächt und schließlich aufgegeben werden. Denn im 20. Jahrhundert entdeckten Wissenschaftler neue Verbindungen für die Alkalimetalle sowie für Thallium. Heute ist die Analogie nur unter den Alkalimetallen einerseits und eine solche zwischen Thallium und Aluminium, Gallium sowie Indium andererseits etabliert. Betrachtet man den chemischen Raum von heute mit seinen 182 Millionen Verbindungen, gelten dann noch die Beziehungen aus den Zeiten von Meyer und Mendelejew? Müssen wir mit der Entdeckung neuer Stoffe Ähnlichkeiten aufgeben, die maßgeblich für die Entwicklung des Periodensystems waren? Muss man das Periodensystem unter der dynamischen Entwicklung des chemischen Raums anpassen? An solchen Fragen forschen wir aktuell in unserer Arbeitsgruppe.

Periodensystem als geordneter Hypergraph

Das theoretisch zu erwartende Periodensystem mit Elementen bis zur Kernladungszahl $Z = 172$, dargestellt als geordneter Hypergraph. Da noch keine Elemente jenseits von Oganesson bekannt sind, sind sie allein durch die Kernladungszahl repräsentiert.

Die Elemente sind entlang der Pfeile absteigend nach ihren Kernladungszahlen geordnet. Farbige Bereiche gruppieren Elemente mit ähnlichen Eigenschaften und können sich dabei überschneiden.

Das Element Vanadium (V) ist etwa zwei Klassen zugeordnet: einerseits einer Klasse mit Niob (Nb), Tantal (Ta) und Dubnium (Db), andererseits einer mit Stickstoff (N), Phosphor (P), Arsen (As), Antimon (Sb) und Bismut (Bi). Außer Db, für das keine Verbindungen bekannt sind, gehen alle diese Elemente X Verbindungen der Zusammensetzungen X_2O_5 , X_2S_3 und XCl ein und sind sich daher ähnlich (O steht für Sauerstoff, S für Schwefel und Cl für Chlor). Andererseits bilden unter ihnen nur V, Nb und Ta Anionen der Form $[X_2Cl_9]^{3-}$.

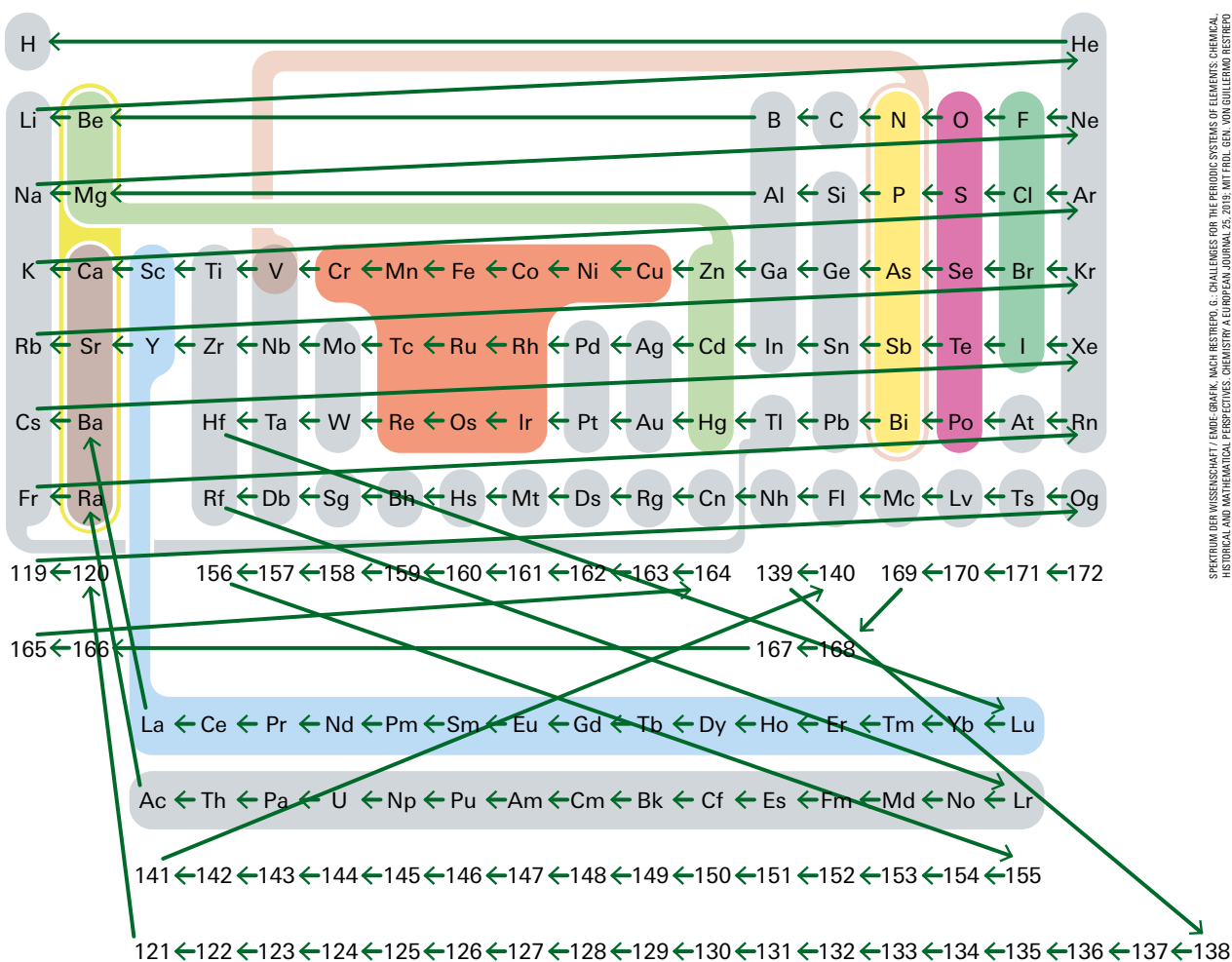
Auch andere Elemente gehören mehreren Klassen an, so etwa Beryllium (Be) und Magnesium (Mg). Einerseits gehen beide mit vielen Elementen ähnliche Verbindungen ein wie Kalzium (Ca), Strontium (Sr), Barium (Ba) und Radium (Ra), andererseits gleichen beispielsweise ihre Halogenide, Sulfide und Sulfate denen von Zink (Zn), Cadmium (Cd) und Quecksilber (Hg).

Vielleicht gibt es noch weitere Gründe, das Konzept »Periodensystem« in Frage zu stellen. Besonders kritisch sind in dieser Hinsicht neu entdeckte Elemente. Wo sind sie im Periodensystem einzusortieren? Will man ein neues Element akzeptieren, so sollte das entsprechende Nuklid mindestens eine Lebensdauer von 10^{-14} Sekunden haben. Diese Zeit ist notwendig, damit sich die dazugehörige Elektronenkonfiguration (siehe »Choreografie der Elektronen«) aufbauen kann. Bis jetzt ist das schwerste bekannte Element das Oganesson mit der Kernladungszahl 118. Seine Halbwertszeit liegt in der Größenordnung von 10^{-4} Sekunden, das ist ein wenig kürzer, als Licht braucht, um von Hamburg nach Berlin zu gelangen. Es ist aber sehr schwierig, mit Atomen von einer derartig kurzen Lebensdauer chemische Experimente durchzuführen, also das Bindungsvermögen näher zu untersuchen – denn eine Bindung aufzubauen dauert rund 1000-mal länger als eine Elektronenkonfiguration einzustellen. Trotz all solcher Schwierigkeiten kann man mit der derzeitigen Technik von »one-atom-at-a-time« (übersetzt etwa »Einzelatomreaktio-

nen«) einige wenige chemische Eigenschaften bestimmen. Diese Technologie erfordert Halbwertszeiten für das Nuklid von zirka ein bis zwei Sekunden und eine Produktionsrate von ein paar Atomen pro Tag. Das schwerste Element, das sich chemisch beurteilen lässt, ist aktuell Flerovium mit der Kernladungszahl 114. Daher ist die Rolle von Atomen mit einem höheren Atomgewicht momentan eher ein Feld für theoretische Studien.

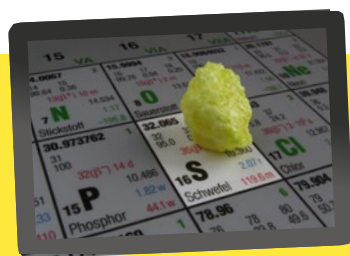
172 Elemente, die 9. Periode und eine erneute Ordnungsumkehr

Basierend auf relativistischen quantenmechanischen Berechnungen kann man erwarten, dass das Periodensystem Elemente bis zur Kernladungszahl 172 umfassen könnte. Versucht man, die hypothetische Reihe von Elementen anhand der Kernladungszahl Z zu ordnen und die Elektronenkonfiguration so anzunehmen, dass sie mit den bisherigen Erfahrungen bestmöglich übereinstimmt, so kommt es zu Umkehrungen in der durch die Kernladungszahl bestimmten Sequenz (siehe »Periodensystem als



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ENDE-GRAEF, NACH RESTREPO, G.: CHALLENGES FOR THE PERIODIC SYSTEMS OF ELEMENTS, CHEMICAL, HISTORICAL AND MATHEMATICAL PERSPECTIVES, CHEMISTRY A EUROPEAN JOURNAL 25, 2019, MIT FRIOL GEN, VON GUILLERMO RESTREPO

geordneter Hypergraph«): Die Elemente mit $Z = 156$ bis $Z = 164$ müssten noch vor denen mit der Kernladungszahl 139 und 140 eingeordnet werden. Anschließend sollten die Elemente mit $Z = 169$ bis $Z = 172$ folgen. Noch verwirrender ist es, dass die Elemente mit $Z = 165$ bis $Z = 168$ der 9. Periode angehören sollten. Wie oben ausgeführt, gab es bereits einmal eine Ordnungsumkehr in der Geschichte des Periodensystems. Müssen wir nun in analoger Weise eine andere Größe der Quantenmechanik an die Stelle der Kernladungszahl setzen, so wie diese im 20. Jahrhundert das Atomgewicht ablöste? Oder bestimmt gar nicht mehr eine einzige Größe das Ordnungsprinzip, sondern mehrere, so dass daraus eine partielle Ordnung entsteht? Das würde die grundsätzliche Struktur eines Hypergraphen nicht in Frage stellen. Wenn das so ist, was sind dann die Kriterien, die zu den ordnungsbestimmenden Größen führen?



NATROS / STOCK.ADOBE.COM

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema:
spektrum.de/t/periodensystem

Neben der zeitlichen Entwicklung des chemischen Raums gibt es weitere Gründe, das Periodensystem zu hinterfragen. Beispielsweise geht man normalerweise davon aus, dass Reaktionen bei Normalbedingungen (Atmosphärendruck und Raumtemperatur) ablaufen. Heute ist es aber nicht mehr so aufwändig, Reaktionen unter ganz unterschiedlichen Gegebenheiten durchzuführen. So können unter hohen Drücken neue Verbindungen mit ungewohnten Zusammensetzungen und Strukturen entstehen. Beispielsweise lassen sich NaCl_3 und Na_3Cl erhalten, wenn Druck und Temperatur sehr hoch gewählt werden (60 Gigapascal, 2000 Kelvin). Solche Drücke sind sechsmal höher als im Erdinneren, und die Temperatur übersteigt bei Weitem die Siedetemperatur von Blei! Könnten derart ungewohnte Verbindungen, die bei extremen Bedingungen entstehen, die Vorstellungen vom Periodensystem ändern?

Ein Fenster zwischen der beobachtbaren und der unsichtbaren Welt der Stoffe

Darüber hinaus kann der chemische Raum mit Antiverbindungen bevölkert werden. Das sind solche, die aus Antiatomen aufgebaut sind (Antiatome sind Atome, deren Kerne aus Antiprotonen bestehen; den Elektronen bei den Atomen entsprechen Positronen). Zurzeit kennt man nur zwei Beispiele, nämlich Antiwasserstoff und Antihelium. Sicherlich werden weitere Vertreter hinzukommen – gängige physikalische Theorien lassen aber erwarten, dass diese das Periodensystem mit seinen inhärenten Gesetzmäßigkeiten nicht ändern würden.

Das Periodensystem ist also nicht in Stein gehauen, vielmehr ist hinter der vermeintlichen Festung ein sich entwickelndes mathematisches System zu sehen. Die Struktur und ihre Interpretation werden sich mit neuen Substanzen, Reaktionen und Versuchsbedingungen weiterentwickeln. Obwohl sich das System im Lauf der Zeit als Folge des sich rasch ausdehnenden chemischen Raums verändert hat, scheint es einige durchgängige Ähnlichkeiten und Anordnungen chemischer Elemente zu geben. Vielleicht ist diese historisch erhaltene Struktur der Kern des gesuchten periodischen Gesetzes.

Stand heute stellt das System weiterhin ein allgemeines Abbild der Chemie dar, dem sich einige charakteristische Muster des chemischen und physikalischen Verhaltens von Elementen und ihren Verbindungen entnehmen lassen. Meyer sah es ursprünglich als eine Brücke an, die die Welt der Substanzen mit der der Moleküle verbindet. So gesehen ist das Periodensystem das Fenster, das den Blick in die zwei Welten erlaubt, die hinter der Chemie stehen: die Makro- und die Mikrowelt.

Dennoch müssen wir die Evolution des chemischen Raums und ihre Auswirkungen auf das Periodensystem kritisch verfolgen. Vielleicht existieren ja eines Tages Verbindungen, die es notwendig machen, das Periodensystem anzupassen. Verliert es seine Form, wenn ungewöhnliche Verbindungen wie Na_3Cl auftreten? Wie weit ist das Periodensystem letztlich davon entfernt, ein Zufallsprodukt zu sein?

Bis diese Fragen geklärt sind, passt Mendelejews Aussage von 1889 perfekt zum gegenwärtigen Stand der Forschung: Das Periodensystem »erscheint als ein Denkinstrument, das noch nicht modifiziert werden musste. Aber es braucht nicht nur neue Anwendungen, sondern auch Verbesserungen, Weiterentwicklungen und viel frische Energie«. ◀

QUELLEN

Cao, C. et al.: Understanding periodic and non-periodic chemistry in periodic tables. *Frontiers in Chemistry* 813, 2021

Gordin, M. D.: The textbook case of a priority dispute: D. I. Mendeleev, Lothar Meyer, and the periodic system. In: Biagioli M., Riskin J. (Hg.): *Nature Engaged*, 2012

Llanos, E. J. et al: Exploration of the chemical space and its three historical regimes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 116, 2019

Restrepo, G.: Challenges for the periodic systems of elements: chemical, historical and mathematical perspectives. *Chemistry – A European Journal* 25, 2019

Restrepo, G., Leal, W.: Formal structure of periodic system of elements. *Proceedings of the Royal Society A* 475, 2019

Zheng, X. et al.: Machine learning material properties from the periodic table using convolutional neural networks. *Chemical Science* 44, 2018

LINK

<https://mchem.bioinf.uni-leipzig.de/1868/main.html>

Wie entwickelt sich das Verständnis von den Elementen? Eine klickbare Darstellung von Meyer und Mendelejew bis heute.



10 Jahre
AcademiaNet

Sie möchten Lehrstühle oder Gremien mit Frauen besetzen? Sie suchen Expertinnen, Gutachterinnen oder Rednerinnen?

Finden Sie die passende Kandidatin in unserer **Datenbank mit über 3.300 Profilen** herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

Renommierete europäische Wissenschaftsorganisationen nominieren Wissenschaftlerinnen für **AcademiaNet**

www.academia-net.org

Folgen Sie uns:



Ein Projekt von

PHOTONIK NACH DEM VORBILD DER NATUR

Goldene Käfer, blaue Falter, grüne Fliegen – die Welt der Insekten schillert bunt. Die Farbenpracht beruht dabei auf winzigen Strukturen in den Panzern oder Flügeln der Tiere. Forscher lassen sich davon zu innovativen photonischen Bauteilen inspirieren.



Der Nanophysiker **Antoine Moreau** forscht und lehrt an der Universität Clermont-Auvergne und am Institut Pascal in Aubière, Frankreich. Die Physikerin **Pauline Bennet** promoviert am Institute Pascal in Aubière über optische Nanostrukturen und numerische Simulationen.

» spektrum.de/artikel/2000473

Das Spiel mit Licht und Farben ist in der Natur allgegenwärtig. Im Lauf der Evolution haben Pflanzen und Tiere leuchtende Farbtöne, metallische Reflexe und komplexe Muster entwickelt, mit denen sie auf sich aufmerksam machen oder Fressfeinde täuschen können. Häufig nutzen sie dazu Pigmente – Moleküle, die das Licht selektiv absorbieren. Aber es gibt auch einen anderen Mechanismus. Die großen metallgrünen Schmeißfliegen zum Beispiel haben keinerlei Pigmente auf ihrer äußeren Stützstruktur. Das Gleiche gilt für die Morphofalter, etwa *Morpho rhetenor* mit seinen großen blauen Flügeln, sowie für goldene Käfer wie *Aspidomorpha sanctaecrucis* (siehe »Goldener Panzer«).

Auf ihren Flügeln oder ihrer äußeren Hülle haben diese Insekten statt Farbmolekülen winzige Nanostrukturen, die mit den einfallenden Lichtstrahlen wechselwirken. Auf Grund der Wellennatur des Lichts ergeben sich dadurch Interferenzen und Beugungseffekte mit erstaunlichen Resultaten: beispielsweise der Reflexion einer einzelnen Wellenlänge, Totalreflexion mit Ausnahme einer einzigen

Wellenlänge, der gerichteten Emission von bestimmten Farben, dem so genannten Irlisieren, bei dem die Oberfläche je nach Perspektive in einer anderen Farbe erscheint, und vielem mehr. Die Analyse solcher Strukturen offenbart, dass relativ einfache Architekturen komplexe optische Phänomene hervorrufen können.

Entsprechend suchen Forscherinnen und Forscher in der Natur Inspiration, um neue, leistungsfähige photonische Geräte zu entwerfen. Dazu studieren sie zunächst die dort vorkommenden Systeme ausgiebig, um die zu Grunde liegenden Prinzipien zu verstehen. Das leuchtende Metallgrün der Goldfliege beruht zum Beispiel auf der Struktur ihres Außenpanzers aus Chitin, der für Insekten und andere Gliederfüßer typisch ist. Diese so genannte Cuticula besteht bei der Fliege aus einem Stapel von mehreren Schichten, die jeweils einige dutzend Nanometer dick sind. Obwohl jede Schicht für sich genommen durchsichtig ist, können sie im Paket Licht reflektieren. Denn wenn eine Lichtwelle durch eine Anordnung mehrerer transparenter Materialschichten läuft, wird an jeder Grenzfläche zwischen zwei Schichten ein Teil davon reflektiert (siehe »Insekten – Könige der Farben: Bragg-Spiegel«).

Um das resultierende Farbphänomen zu verstehen, stellen wir uns Licht als Wellen vor – also als Abfolge von Tälern und Bergen. Genauer gesagt handelt es sich um die periodisch schwingenden Amplituden der elektrischen und magnetischen Komponenten des Lichts. Jede einzelne Reflexion erzeugt nun wiederum ihr eigenes Wellensystem. Wenn die Berge beziehungsweise Täler all dieser reflektierten Wellen synchron laufen, addieren sie sich und bilden ein



GOLDENER PANZER Der Käfer der Gattung *Aspidimorpha* schimmert golden. Seine Farbe wird durch eine Nanostruktur erzeugt, die das gesamte sichtbare Licht mit Ausnahme von Blau reflektiert.

AUF EINEN BLICK NEUE PHOTONISCHE SYSTEME

- 1** Die moderne Kommunikations- und Computertechnik verarbeitet, speichert und überträgt Informationen anhand von optischen Verfahren und Technologien.
- 2** Solche photonischen Elemente sind mitunter unnötig komplex aufgebaut. Das zeigen vergleichsweise einfache Oberflächenstrukturen von Insekten und Vögeln, die besondere optische Eigenschaften aufweisen.
- 3** Der Wissenschaft liefern die natürlichen Systeme neue Ideen. Mit Hilfe von Optimierungsalgorithmen entwickeln Forschungsgruppen neuartige und effizientere photonische Systeme nach dem Vorbild der Natur.

Insekten – Könige der Farben

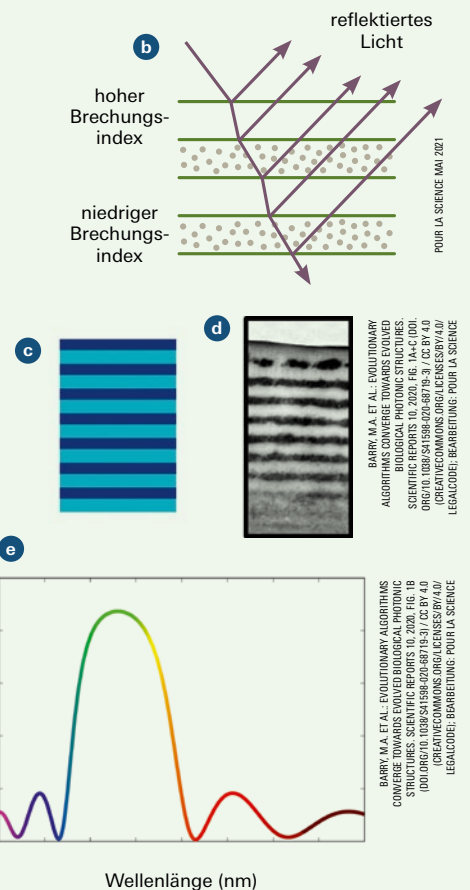
Zahlreiche optische Effekte verleihen dem Exoskelett oder den Flügeln von Insekten und anderen Organismen intensive Farben. Die Phänomene beruhen auf Strukturen im Nanometerbereich – zu den am häufigsten vorkommenden zählen: der Bragg-Spiegel, ein Stapel von Schichten gleicher optischer Dicke, die abwechselnd einen niedrigen und einen hohen Brechungsindex aufweisen; ein Gradientenspiegel, bei dem die Dicke der Schichten mit der Tiefe variiert; und Beugungsgitter, zum Beispiel das des Morphofalters, bei dem sich eine weihnachtsbaumartige Struktur regelmäßig wiederholt.

Bragg-Spiegel

Bei der metallgrünen Goldfliege **a** führt ein Stapel an Schichten mit unterschiedlichen Brechungsindizes zu einer Reflexion an jeder Grenzfläche **b**. Diese Struktur gleicht einem Bragg-Spiegel, bei dem sich Schichten mit einem hohen optischen Brechungsindex und Schichten mit niedrigem Index abwechseln. Eine bestimmte Wellenlänge wird bei senkrechtem Einfall maximal reflektiert, wenn die Schichten ein Viertel dieser Wellenlänge dick sind. Das liegt daran, dass es beim Übergang von niedrigem zu höherem Brechungsindex bei der Reflexion an der Grenzfläche zu einer Phasenverschiebung von einer halben Wellenlänge kommt. Die optische Weglänge des reflektierten Strahls beträgt dann eine halbe Wellenlänge (Hin- und Rückweg), was zusammen mit dem Phasensprung eine ganze Wellenlänge ergibt.

Der Strahl interferiert also konstruktiv mit dem an der vorherigen Grenzfläche reflektierten Anteil. Beim Übergang von hohem zu niedrigem Brechungsindex kommt es hingegen zu keinem Phasensprung. Beträgt auch hier die optische Weglänge des Hin- und Rückwegs durch die Schicht eine halbe Wellenlänge, interferiert der reflektierte Strahl wiederum konstruktiv mit dem an der vorherigen Schicht reflektierten. Denn dieser ist ja auf Grund des Phasensprungs um genau eine halbe Wellenlänge verschoben.

Diese Struktur der Goldfliege lässt sich numerisch simulieren **c** und mit Mikroskopieaufnahmen des Insekts vergleichen **d**. Die Anordnung reflektiert vor allem die Farbe Grün **e**.



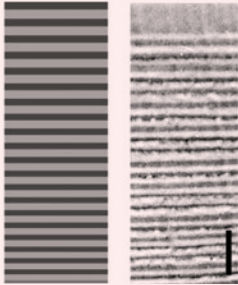
Beugungsgitter des Morphofalters

Mehrere Morpho-Schmetterlingsarten zeigen eine wunderschöne metallisch blaue Farbe **a**. Sie geht auf Strukturen zurück, die an einen Weihnachtsbaum erinnern **b**. Gemeinsam bilden sie ein Beugungsgitter, das die verschiedenen Wellenlängen des Lichts in einem bestimmten Winkel und unterschiedlich effizient zurückwirft. Im Spektrum **c** ist zu sehen, wie blaues Licht stark gebeugt wird. Die zweite Kurve stellt die isotrope Spiegelreflexion dar, also den Spiegeleffekt, der aus allen Betrachtungswinkeln gleich aussieht. Die reflektierte Komponente ist hier stark abgeschwächt. Wenn Algorithmen versuchen, ein optisches System so zu optimieren, dass es die Eigenschaften der Schmetterlingsflügel nachbildet, finden sie ein regelmäßiges interdigitales Gitter **d**, das dem des Schmetterlings nur entfernt ähnelt. Setzt man jedoch gewisse Einschränkungen voraus, wie zum Beispiel eine geringere Flügelmasse, ergibt sich tatsächlich eine Struktur mit tannenbaumartigen Komponenten **e**.

Gradientenspiegel

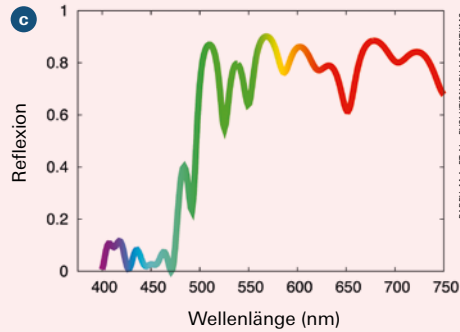
Wenn sich die Dicke der Schichten mit der Tiefe ändert (a, simuliert und real), entsteht eine goldene Farbe wie bei *Aspidimorpha sanctaecrucis* (b). Das simulierte Spektrum zeigt, dass alle Farben außer Blau reflektiert werden (c). In einer Simulation kann man sehen, dass Blau bis tief in die Struktur vordringt, während Grün, Orange und Rot an verschiedenen Schichten reflektiert werden (d).

a



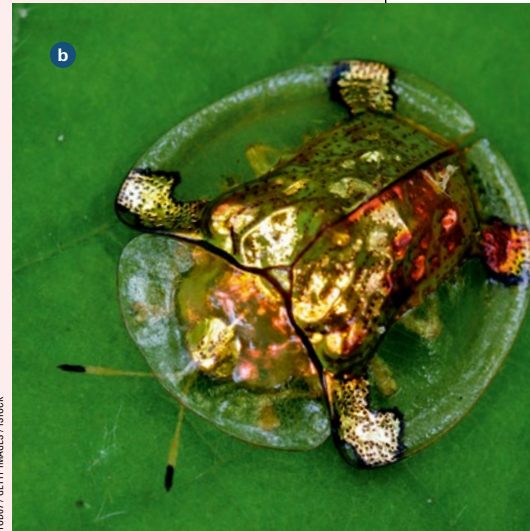
BARRY, M.A. ET AL.: EVOLUTIONARY ALGORITHMS CONVERGE TOWARDS EVOLVED BIOLOGICAL PHOTONIC STRUCTURES. SCIENTIFIC REPORTS 10, 2020, FIG. 2C-B (DOI:10.1038/S41598-020-68719-3) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/ BY4.0/LEGALCODE) BEARBEITUNG: POUY LA SCIENCE

c



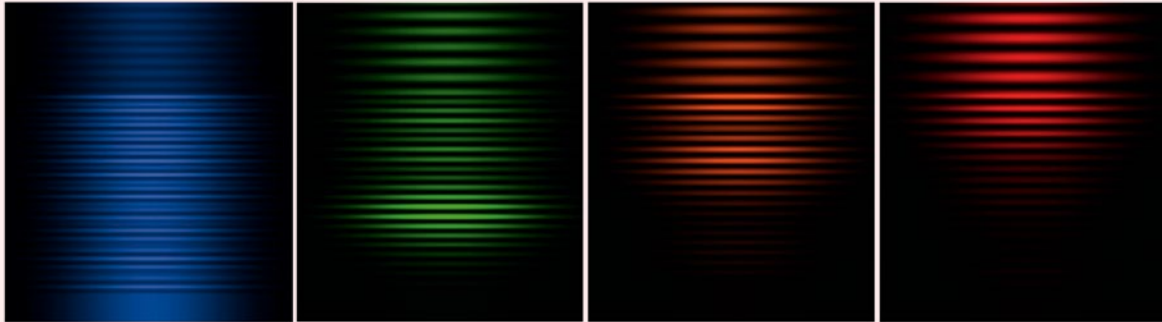
BARRY, M.A. ET AL.: EVOLUTIONARY ALGORITHMS CONVERGE TOWARDS EVOLVED BIOLOGICAL PHOTONIC STRUCTURES. SCIENTIFIC REPORTS 10, 2020, FIG. 2D DOI:10.1038/S41598-020-68719-3 / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/ BY4.0/LEGALCODE)

b



YODER / BETTY IMAGES / ISTOCK

d



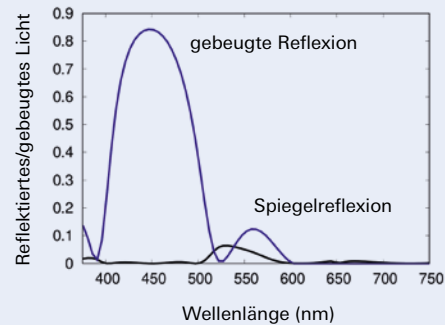
BARRY, M.A. ET AL.: EVOLUTIONARY ALGORITHMS CONVERGE TOWARDS EVOLVED BIOLOGICAL PHOTONIC STRUCTURES. SCIENTIFIC REPORTS 10, 2020, FIG. 2E DOI:10.1038/S41598-020-68719-3 / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/ BY4.0/LEGALCODE) BEARBEITUNG: POUY LA SCIENCE

b



VUKSIC, P. ET AL.: QUANTIFIED INTERFERENCE AND DIFFRACTION IN SINGLE MORPHO BUTTERFLY SCALES. PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY B 266, 1999, FIG. 3B; BARRY, M.A. ET AL.: EVOLUTIONARY ALGORITHMS CONVERGE TOWARDS EVOLVED BIOLOGICAL PHOTONIC STRUCTURES. SCIENTIFIC REPORTS 10, 2020, FIG. 2C (DOI:10.1038/S41598-020-68719-3) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/ BY4.0/LEGALCODE)

c



PAULINE BENNETT UND ANTOINE MOREAU



a

VIAIMIR18 / BETTY IMAGES / ISTOCK
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

d

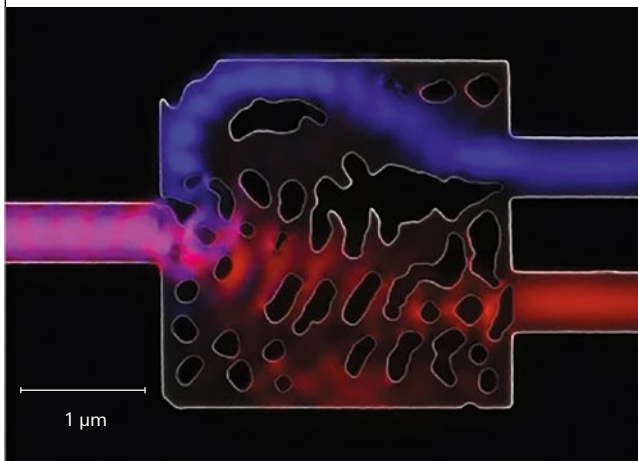


e

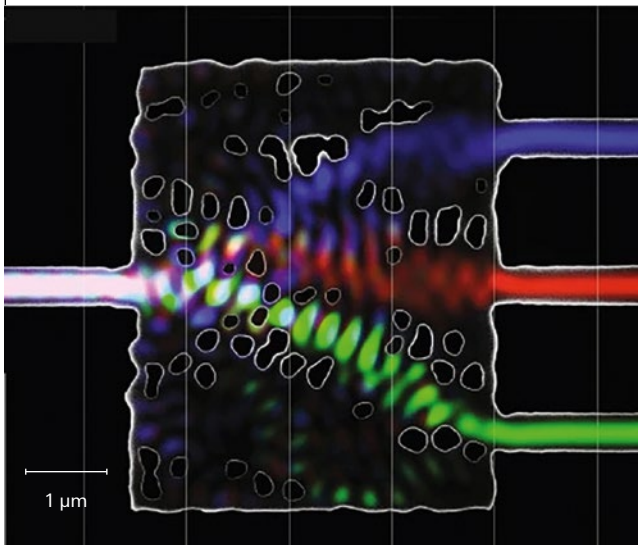
BARRY, M.A. ET AL.: EVOLUTIONARY ALGORITHMS CONVERGE TOWARDS EVOLVED BIOLOGICAL PHOTONIC STRUCTURES. SCIENTIFIC REPORTS 10, 2020, FIG. 2C (DOI:10.1038/S41598-020-68719-3) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/ BY4.0/LEGALCODE)

Licht auftrennen

Mit Hilfe der Optimierungsmethode des so genannten Gradientenabstiegs lassen sich photonische Bauelemente wie Multiplexer mit zwei (oben) oder drei (unten) Kanälen entwerfen. Im ersten wird das einfallende violette Licht in Rot und Blau aufgeteilt, wobei jede der Lichtkomponenten in einen anderen Kanal geht. Das zweite splittet das weiße Licht in Blau, Rot und Grün auf. Mittels Rasterelektronenmikroskopie kann man die durch Optimierung erhaltene Struktur erkennen. Sie ist allerdings nicht sehr gleichmäßig und lässt sich nur schwer im industriellen Maßstab fertigen. Außerdem könnten einige Bestandteile überflüssig sein, wie etwa diejenigen Strukturen in den linken Ecken des Dreikanal-Multiplexers, die wenig bis nichts zur Lichtaufspaltung beitragen.



MOLESKY, S. ET AL.: INVERSE DESIGN IN NANOPHOTONICS. NATURE PHOTONICS 12, 2018, FIG. 6A+C; NUTZUNG GENEHMIGT VON SPRINGER NATURE / CCC



verstärktes Wellensystem. Man sagt, dass die Strukturen phasengleich sind und die Wellen konstruktiv interferieren.

Je nach Eigenschaften der Struktur addiert sich allerdings nur eine ganz bestimmte Wellenlänge konstruktiv – im Fall der Fliege liegt sie etwa bei 530 Nanometern, was der Farbe Grün entspricht. Bei der großen Mehrheit der Lichtwellenlängen ist die Amplitude der reflektierten Welle hingegen sehr klein – in der Cuticula der Fliege gilt das etwa für Rot und Blau. Das Grün der Fliege ist also ein gutes Beispiel dafür, dass sich durch eine bestimmte Anordnung eigentlich transparenter Nanomaterialien Licht vergleichsweise einfach beeinflussen lässt.

Historisch versuchten Optiker Lichtstrahlen zunächst zu manipulieren, um die Sehkraft zu verbessern. Nach und nach erkannten die Fachleute aber, dass Lichtstrahlen auch als Medium dienen können, mit dem sich Informationen übertragen oder Energie transportieren lässt. Von entscheidender Bedeutung waren in diesem Zusammenhang Entdeckungen in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts, die zeigten, wie man mit Hilfe von Strukturen im Nanometerbereich bestimmte Lichteffekte erzielen kann.

Heutzutage werden mehrschichtige Strukturen – also Stapel aus transparenten Materialien – etwa verwendet, um mit einer einzigen optischen Brechung verschiedene Farben herauszufiltern. Solche Bündel unterschiedlicher Wellen überqueren dann beispielsweise den Atlantik, bevor sie am Zielort wieder aufgespalten werden. Dieses so genannte Multiplexing erhöht den Durchsatz in Unterwasserkabeln, so dass keine zusätzlichen Kabel verlegt werden müssen. Fotovoltaikmodule wiederum sind mit Antireflexionsschichten überzogen, die konstruktive Interferenzen in Richtung des absorbierenden Materials erzeugen und so mehr Licht in Elektrizität umwandeln.

Eine aktuelle Herausforderung besteht darin, photonische mit elektronischen Bauteilen zu kombinieren – also solche, deren Funktionsweisen auf Photonen (Licht) beziehungsweise auf Elektronen (Strom) beruhen. Ziel ist es, die Kommunikation zwischen Prozessoren und Speichereinheiten zu verbessern, um die Datenraten zu erhöhen und die Verarbeitungsgeschwindigkeit zu steigern. Die Entwicklung solcher Geräte ist jedoch alles andere als einfach. Zwar können Computerprogramme inzwischen simulieren, wie sich Licht in einem bestimmten System verhält. Gleichwohl gibt es kein allgemein gültiges Rezept, wie die Architektur eines photonischen Bauteils auszusehen hat, damit es die gewünschten Funktionen erfüllt.

Effiziente Stapelung

Hier könnte ein Blick ins Tierreich helfen. Natürliche photonische Strukturen ermöglichen es beispielsweise Insekten, entweder viel oder sehr wenig Licht für ganz bestimmte Farben oder aber für fast das gesamte sichtbare Spektrum zu reflektieren. Einige dieser eleganten Architekturen sind bereits gut erforscht. Die Struktur der Goldfliege, die grünmetallisch glänzt, ist beispielsweise ein Bragg-Spiegel. Bei ihm wechseln Schichten mit einem hohen optischen Brechungsindex, in denen sich das Licht langsamer ausbreitet, und Schichten mit niedrigem Index ab, in denen das Licht schneller wandert. An jeder Grenzfläche wird nun ein Teil



EKO BUDI UTOMO / GETTY IMAGES / ISTOCK

Das Tiefschwarz der Paradiesvögel

Nicht nur bei Insekten erzeugen photonische Effekte spektakuläre Farben. Bei verschiedenen Paradiesvögeln mit tiefschwarzem Federkleid, beispielsweise dem männlichen Fadenhopf (*Seleucidis melanoleucus*), haben Teile des Gefieders einen Absorptionskoeffizienten für sichtbares Licht zwischen 99,69 und 99,95 Prozent. 2018 zeigten Dakota McCoy von der Harvard University und ihre Kollegen, dass die Federbärte Lamellen mit mikrome-tergroße Noppen haben. Dieses dichte Netz fängt das Licht mit extrem hoher Effizienz ein, vergleichbar mit der von künstlich optimierten Materialien.

der Lichtwellen gespiegelt. Eine maximale Reflexion einer Wellenlänge ergibt sich, wenn die Schichten genau ein Viertel dieser Wellenlänge dick sind (siehe »Insekten – Könige der Farben: Bragg-Spiegel«). Die Struktur spiegelt daher das Licht der zugehörigen Farbe wider; und die Effizienz wird umso größer, je mehr Schichten man hinzufügt. Die Anordnung wird zum Beispiel zum Reflektieren eines Laserstrahls verwendet, weil sie sich im Gegensatz zu einem Metallspiegel nicht erhitzt.

Andere Insekten wiederum reflektieren den gesamten Bereich des optischen Spektrums von Grün bis Rot, nicht aber Blau. Die Panzer solcher Krabbeltiere funkeln golden, wie etwa beim Käfer *Aspidimorpha sanctaerucis*. Die Struktur, die diesen Effekt bewirkt, ähnelt einem Bragg-Spiegel, dessen Schichtdicke sich allmählich ändert: Die verschiedenen Teile der Komposition reflektieren dann unterschiedliche Wellenlängen des Lichtspektrums. Mit denselben Materialien und einer regelmäßigen, aber aperiodischen Architektur lässt sich also ein ganz anderes optisches Verhalten erzielen.

Eine weitere für natürliche photonische Systeme typische Struktur findet sich auf den Flügeln der Morphofalter.

Das intensive Blau beruht auf einer bestimmten Form der Überlagerung der Lichtwellen. Die zugehörige Architektur ist allerdings viel komplexer als der beschriebene mehrschichtige Aufbau. Hier handelt es sich eher um eine Netzwerkstruktur, also eine ganze Ansammlung von periodischen Mustern, die bei *Morpho rhetenor* an die Form eines Tannenbaums erinnern (siehe »Insekten – Könige der Farben: Beugungsgitter des Morphofalters«). Zwar bestehen diese ebenfalls aus transparentem Chitin, die resultierende Reflexion unterscheidet sich aber maßgeblich von jener auf Grund mehrerer Schichten. Letztere reflektieren Licht wie ein Spiegel; man spricht daher von einer spiegelnden Reflexion. Etliche Materialien, etwa Wasser, Kunststoff oder sogar Holz, können eine solche Spiegelung erzeugen. Sie ist stets ungerichtet, und man sieht daher dieselbe Farbe, egal aus welchem Winkel die Oberfläche betrachtet wird. Bei einem Gitter hingegen ist die Reflexion gerichtet; Fachleute sprechen von gebeugtem Licht.

Eine CD zum Beispiel hat eine Netzwerkstruktur, die darauf beruht, dass die Daten periodisch in konzentrischen Kreisen auf die Scheibe gebrannt werden. Zunächst fällt die spiegelnde Eigenschaft des Tonträgers auf, da die Reflexion wegen der Beschichtung stark ausgeprägt ist. Unter gewissen Winkeln lassen sich jedoch einzelne leuchtende Farben sehen, weil das Muster die zugehörigen Wellenlängen in eine andere Richtung schickt. Derartige Strukturen lassen sich relativ einfach herstellen, indem man sie auf Kunststoff »druckt«. Man findet sie auf Verpackungen, Schuhen, Geldscheinen oder Bankkarten; sie werden oft als Hologramme bezeichnet. Das Netzwerk auf dem Flügel des Morphofalters ist aber nochmals deutlich komplexer. Es verhält sich wie ein Gitter, das mit einem Bragg-Spiegel kombiniert ist: Es reflektiert nämlich lediglich die Farbe Blau. Darüber hinaus ist die Struktur nicht perfekt und weist einen gewissen Grad an Unordnung auf, weshalb das Blau aus jedem Winkel zu sehen ist.

Aus evolutionärer Sicht bieten natürliche photonische Architekturen stets einen Vorteil für das jeweilige Lebewesen. Sie sorgen etwa dafür, dass es von Artgenossen besser gesehen und geortet werden kann, was zum Beispiel die Fortpflanzungschancen erhöht. Gewisse Farbmuster können außerdem mögliche Fressfeinde täuschen. Daher hat die natürliche Selektion im Lauf von Millionen von Jahren die Entstehung der Strukturen begünstigt und diese fortwährend optimiert.

Die Anforderungen an photonische Komponenten für Computer sind jedoch in der Regel weit von denjenigen der Lebewesen entfernt. Für die meisten von ihnen haben wir in der Natur noch keine exakten Lösungen gefunden, was aber nicht unbedingt heißt, dass sie nicht existieren. So wurden die in den 1950er Jahren entdeckten Bragg-Spiegel in der Photonik eingesetzt, lange bevor man feststellte, dass sie in der Natur reichlich vorkommen. Da das optimale Design vieler technischer Bauteile aber bislang noch offen ist, könnten die »Erfindungen« der Evolution hier entscheidende Ideen liefern.

Heutzutage sind Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit leistungsfähigen Computern ausgestattet, um das optische Verhalten einer bestimmten Struktur zu be-

rechnen. So können sie vorhersagen, wie Licht mit einem bestimmten System interagiert. Auf diese Weise lassen sich viele kleine Parameteränderungen vornehmen, um zu testen, mit welcher Architektur ein Gerät am besten funktioniert. Nur solche Änderungen, die tatsächlich einen Mehrwert bringen, werden übernommen. Die schrittweise Verbesserung ähnelt dem Vorgehen der natürlichen Evolution. Fachleute sprechen von digitaler Optimierung.

Innerhalb der letzten Jahre hat diese Technik in den Computerwissenschaften eine wesentliche praktische Bedeutung erlangt. So ist etwa in künstlichen neuronalen Netzen die Lernphase eine Form der digitalen Optimierung. Aber auch andere Bereiche verwenden den Ansatz. Beispielsweise dient er in der Mechanik dazu, leichtere Strukturen mit gleich bleibender Festigkeit zu finden. Im Jahr 2017 entwickelten Ole Sigmund von der Technischen Universität Dänemark und sein Team etwa eine Methode, mit der das Gewicht eines Flugzeugflügels um zwei bis fünf Prozent gesenkt werden kann, ohne an Festigkeit zu verlieren. Damit ließen sich im Jahr 40 bis 200 Tonnen Treibstoff pro Flugzeug sparen.

Kostenoptimierung: Die Suche nach dem globalen Minimum

Um ein System zu optimieren, bewertet man zunächst eine bestimmte Konfiguration. Das gelingt mit einer so genannten Kostenfunktion. Sie ist vor allem bekannt aus den Wirtschaftswissenschaften, wo sie den Zusammenhang zwischen der Produktionsmenge und den dafür anfallenden Kosten beschreibt. Die Herangehensweise lässt sich aber auf fast beliebige Systeme übertragen, und es gilt: Je höher die Kosten, desto schlechter ist die Konfiguration. Man versucht also, einen Satz von Parametern zu finden, der die Kostenfunktion minimiert. Bei einem Fotovoltaikmodul kann die Kostenfunktion die reflektierte Lichtmenge sein. Wenn man diese minimiert, verbessert sich der Wirkungsgrad des Solarpanels, da es mehr Licht absorbiert und in Elektrizität umwandelt.

Im Allgemeinen geht ein Optimierungsalgorithmus von einer oder mehreren potenziellen Lösungen aus und erzeugt neue, bessere Lösungen. Stellt man sich ein Optimierungsproblem als eine Landschaft mit Bergen und Tälern vor, spielt die Funktion der Höhe die Rolle der Kostenfunktion, in der man den tiefsten Punkt sucht. Die Koordinaten sind die Parameter, auf die man Einfluss nehmen kann, um das System zu optimieren. Ausgehend von einem beliebigen Anfangszustand kann man beschließen, dem steilsten Weg so lange abwärts zu folgen, bis man sich in einer Senke wiederfindet. Dieser sehr natürliche und intuitive Ansatz beruht auf dem Prinzip des so genannten Gradientenabstiegs (siehe »Optimierungsalgorithmen«). Bei solchen Algorithmen landet man zwar sicher in einem Minimum. Aber es gibt keine Garantie dafür, dass das nächstgelegene Tal auch wirklich das tiefste überhaupt ist. Da man also nicht zwangsläufig im globalen Optimum landet, wird die Optimierungsmethode als lokal bezeichnet.

In den 1960er Jahren schlug John Holland von der University of Michigan das Konzept der genetischen Algorithmen vor. Dieses Vorgehen orientiert sich stärker an der

Natur und der darin stattfindenden Evolution. Die Algorithmen betrachten zunächst eine Reihe von Punkten in der Landschaft, ähnlich einer aus einer Anfangspopulation bestehend Art. Nun wird gemischt, um eine neue Generation von »Individuen« zu erzeugen. Das Programm behält nur die Besten – in dem Fall die tiefsten Punkte – ähnlich der natürlichen Auslese. Auf diesem Weg lässt sich das globale Optimum finden.

Die Art und Weise, wie dabei neue Individuen entstehen, ist das Herzstück des Algorithmus. Die ersten entwickelten genetischen Algorithmen orientierten sich direkt an der natürlichen Evolution und behandelten die Koordinaten eines Punkts wie seinen genetischen Code. Dieser wurde in eine binäre Zahl umgewandelt, die leichter zu manipulieren ist. Da das willkürliche Verändern von Bits nur selten eine verbesserte Lösung erzeugt, ist der Ansatz allerdings wenig effizient. Daher wurde er durch »evolutionäre Algorithmen« ersetzt, die Merkmale jeder Lösung kombinieren, um neue Lösungen zu erzeugen.

Einige jener Algorithmen ähneln der Evolution von Bakterien: Wenn eine Mutation auftritt, wird sie an die Nachkommen weitergegeben, ohne großen Informationsaustausch zwischen den Individuen einer Generation. Andere Programme ähneln eher der sexuellen Evolution, da Informationen zwischen Individuen ausgetauscht werden – wie bei einer Befruchtung, die genetisches Material zusammenführt. Ende der 1990er Jahre entwickelten die beiden Ingenieure Kenneth Price und Rainer Storn eine Methode, die auf dem letztgenannten Ansatz beruht, genannt differenzielle Evolution (siehe »Optimierungsalgorithmen«).

Um photonische Strukturen zu entwerfen, haben sich die Optimierungstechniken vor allem von denen in der Mechanik inspirieren lassen, die hauptsächlich auf Gradientenmethoden beruhen. Diese Ansätze erweisen sich als sehr effizient und führen zu neuen und überraschenden Architekturen. Allerdings sind die resultierenden Strukturen oft unregelmäßig und komplex, und es ist nicht immer einfach, die Rolle der einzelnen Elemente des Systems zu verstehen. Manche wirken mitunter überflüssig und könnten entfernt werden, ohne die Funktion zu beeinträchtigen. Darüber hinaus ist die Komplexität der Berechnungen in einigen Fällen hinderlich für die industrielle Umsetzung. Hier geht die Wirksamkeit der Ansätze auf Kosten der Einfachheit. Die Strukturen, die wir in der Natur beobachten, sind jedoch üblicherweise simpel und elegant. Wie lässt sich dieser Unterschied erklären? Möglicherweise liegt es daran, dass ein biologisches System eher sinnvolle, regelmäßige Strukturen hervorbringt, da es verschiedenen Beschränkungen unterliegt.

Um die Hypothese zu testen, wollten wir mit unseren Kollegen herausfinden, ob es möglich ist, die in der Natur beobachteten Strukturen zu finden, wenn bestimmte Bedingungen den Optimierungsalgorithmus einschränken. Wir starteten mit einer einfachen Frage: Welche mehrschichtige Struktur reflektiert das Licht bei einer bestimmten Wellenlänge am besten? In den 1990er Jahren war dieses Problem bereits mit den damaligen genetischen Algorithmen erforscht worden. Die dabei erzielten Struktu-

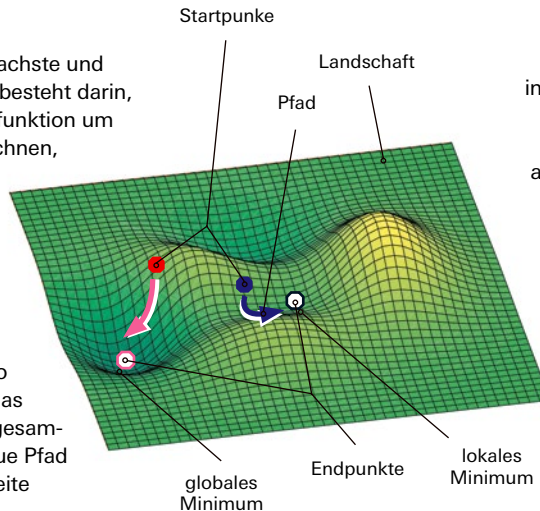
Optimierungsalgorithmen

Um die Optimierungsmethoden zu veranschaulichen, betrachten wir ein System, das von zwei Parametern abhängt, und definieren eine Kostenfunktion, die zu optimierende Größe. Wir können das Problem dann als »Landschaft« visualisieren, bei der die beiden Variablen die Koordinaten sind und die Kostenfunktion die Höhe.

Ein Punkt auf dieser Landschaft entspricht einer Konfiguration des Systems – und je niedriger seine Höhe ist, desto optimierter ist das System. Das Problem läuft darauf hinaus, das Minimum in einer Landschaft zu finden, die natürlich nicht a priori bekannt ist. In den letzten Jahrzehnten wurden dazu verschiedene Optimierungsansätze entwickelt.

Gradientenabstieg

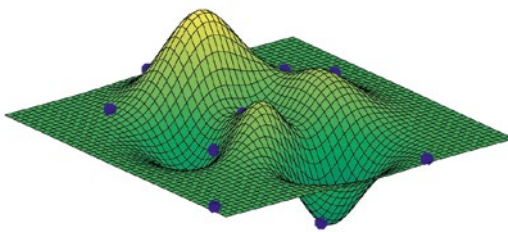
Dieser Algorithmus ist der einfachste und am häufigsten verwendete. Er besteht darin, die Veränderungen der Kostenfunktion um den Startpunkt herum zu berechnen, wenn man die Parameter variiert. Das ist so, als würde man dem steilsten Abhang in der Landschaft folgen. Ein »Tal« – also ein Minimum der Funktion – wird so zwar stets gefunden. Doch dabei handelt es sich um ein so genanntes lokales Minimum, das vielleicht nicht das tiefste der gesamten Landschaft ist, wie der blaue Pfad auf der gegenüberliegenden Seite veranschaulicht.



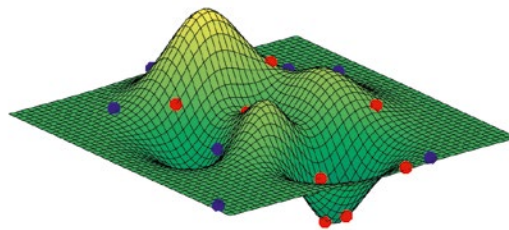
Genetischer Algorithmus

Dieser Ansatz ist von der Biologie inspiriert. Man beginnt mit einer Population an Orten in der Landschaft. Deren Parameter codiert man nun binär, also als eine Abfolge von Nullen und Einsen. Derart ergibt sich eine Art DNA. Das »genetische Material« der Population wird anschließend so kombiniert, dass neue Individuen entstehen, von denen man nur diejenigen behält, die die Kostenfunktion verbessern – also an tieferen Punkten in der Landschaft liegen. Da man bei der Mischung der Merkmale recht willkürlich vorgehen kann, ist diese Art von Algorithmus meist nicht sehr effizient.

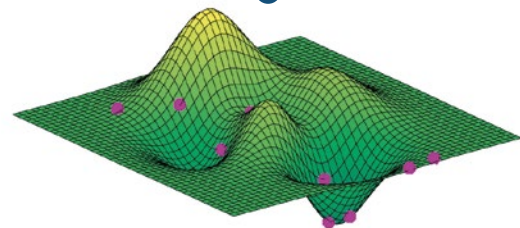
Initialisierung der Bevölkerung ①



Generation neuer Individuen ②



Auswahl der neuen Generation ③



Evolutionärer Algorithmus

Eine Population von Elternindividuen wird zufällig über die Landschaft verteilt ①. »Mutierte« Individuen entstehen, indem ein Elternteil um einen Schritt in die Richtung des bis dato besten Individuums und um einen Schritt in eine Richtung bewegt wird, die von zwei zufällig ausgewählten Individuen inspiriert wird ②. Das Vorgehen tendiert zu einer bereits effizienten Lösung und erkundet gleichzeitig die Landschaft auf zufällige Weise. Wenn das neue Individuum, »das Kind«, besser ist als das Elternteil, ersetzt es dieses ③. Der Prozess wird so lange wiederholt, bis eine optimale Lösung erreicht ist. Durch den Austausch von Informationen zwischen Individuen imitiert der Ansatz Merkmale der Evolution auf Basis sexueller Fortpflanzung.

- ursprüngliche Bevölkerung
- neue Individuen
- konservierte Individuen mit einer besseren Kostenfunktion

PAULINE BENNETT UND ANTOINE MOREAU

ren wiesen jedoch keine besondere Regelmäßigkeit auf. Wir nahmen nun die neuesten evolutionären Algorithmen (Varianten der differentiellen Evolution) und gaben eine einzige Einschränkung vor: Brechungsindizes in einem Bereich, der dem von biologischen Materialien entspricht. Das Ergebnis war rasch gefunden und eindeutig: Die bestmögliche Struktur innerhalb der von uns vorgegebenen Grenzen ist ein Bragg-Spiegel, dessen äußerste Schicht den höchsten Brechungsindex aufweist.

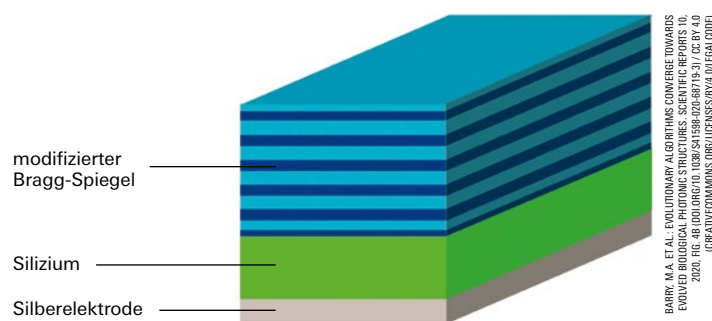
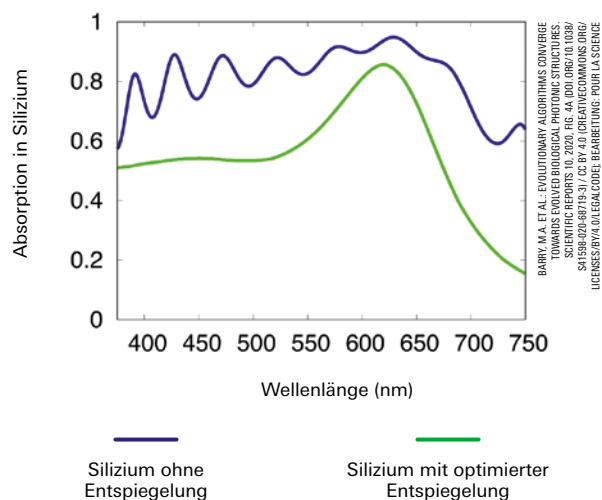
In dieser Studie haben wir die Anzahl der Schichten der zu optimierenden Struktur schrittweise erhöht. Bei bis zu 20 Schichten war das Ergebnis perfekt; bei mehr als 20 Schichten entstand eine gewisse Unordnung, ein Zeichen dafür, dass sich die Algorithmen schwertaten, das Problem zu lösen. Das ist nicht verwunderlich, da sie dabei ein Optimum in einem 40-dimensionalen Raum finden müssen – zwei Parameter für jede Schicht, nämlich Dicke und Brechungsindex.

Unerwartete Erkenntnisse

Als wir den Algorithmen vorgaben, einen Spiegel zu entwerfen, der eine bestimmte Wellenlänge reflektiert und bei dem die erste Schicht des Stapels den niedrigsten Brechungsindex hat, erhielten wir ein erstaunliches Ergebnis: Bragg-Spiegel mit einer ersten Schicht, die doppelt so dick wie die weiteren Schichten war. Bei genauerer Betrachtung ist die Anordnung jedoch nachvollziehbar. Denn im Allgemeinen wird eine dünne Schicht mit einem niedrigen Brechungsindex, der zwischen demjenigen von Luft und einem höheren Index des nachfolgenden Mediums liegt, als Entspiegelung genutzt. Auf Brillengläsern wendet man genau dieses Prinzip an, indem man eine dünne Schicht aus Magnesiumfluorid auf die Vorder- und Rückseite der Brillengläser aufdampft. Ihre Dicke wird so gewählt, dass sich die an den beiden Grenzflächen reflektierten Strahlen destruktiv überlagern, also auslöschen. Eine Entspiegelung auf einem Bragg-Spiegel würde allerdings dem eigentlichen Ziel entgegenwirken, da sie die Reflexion und somit die Farbgebung einschränkte und die Transmission erhöhte.

Ist die erste Schicht aber ausreichend dick, in dem Fall ungefähr so dick wie die halbe Wellenlänge, ist sie aus optischer Sicht kaum relevant. Denn nun überlagern sich die reflektierten Strahlen konstruktiv, was letztlich dem Fall entspricht, bei dem die Schicht nicht existent ist. Und tatsächlich findet sich genau diese Struktur bei einigen farbenreichen Käfern, darunter *Chrysochroa fulgidissima* mit roten und grünen Farbmustern. Wahrscheinlich muss der Käfer aus biologischen Gründen mit einem Medium beginnen, das einen niedrigen Brechungsindex aufweist.

Mit dem gleichen Intervall an Brechungsindizes suchten wir anschließend nach einem mehrschichtigen System, das ein breiteres Farbspektrum reflektiert als ein Bragg-Spiegel. Auch hier fanden die Algorithmen einen Gradientenspiegel als Lösung – genau wie beim golden schimmernden Käfer. Diese Struktur ist deshalb äußerst interessant, weil sie typischerweise modular aufgebaut ist: Die verschiedenen Wellenlängen, aus denen sich das weiße Licht zusammensetzt, werden an unterschiedlichen Stellen der Struktur reflektiert (siehe »Insekten – Könige der Farben: Bragg-Spie-



SOLARPANEL Um die Effizienz eines Fotovoltaikmoduls mittels einer Antireflexionsstruktur zu verbessern, verwendeten die Autoren und ihre Kollegen einen evolutionären Algorithmus. Ihre Berechnungen ergaben einen leicht modifizierten Bragg-Spiegel (unten), der lange Wellenlängen (Infrarot, ab 780 nm) gut reflektiert und sichtbares Licht durchlässt (oben). Letzteres wird auf diese Weise in der Siliziumschicht maximal absorbiert und in Elektrizität umgewandelt.

gel«). Jedes Teil des Systems übernimmt hier eine individuelle Rolle, auch wenn es nicht vollkommen unabhängig von der Gesamtkonstruktion ist.

Die Farbgebung des Morphofalters haben wir ebenfalls ausgiebig analysiert (siehe »Insekten – Könige der Farben: Beugungsgitter des Morphofalters«). Mit einfachen numerischen Methoden lässt sich berechnen, wie periodische Strukturen das Licht reflektieren, etwa die tannenbaumförmigen Strukturen auf den Flügeln des Schmetterlings. Die Gebilde betrachteten wir dazu als Stapel aus Chitinblöcken unterschiedlicher Dicke und Breite. Mit Hilfe der Algorithmen untersuchten wir, wie sich solche Blöcke periodisch so anordnen lassen, dass die Farbe Blau maximal reflektiert und gebeugt wird, während für alle andere Farben das Gegenteil gilt.

Unsere Berechnungen führten zu einer Struktur, bei der regelmäßige Stapel von Chitinblöcken nebeneinanderliegen. Man spricht von einer interdigitalen Anordnung. Sie

unterdrückt effizient Spiegelreflexionen. Bei der Wellenlänge des blauen Lichts von 450 Nanometern ist die Struktur aber in der Lage, 98 Prozents des Lichts zu reflektieren, allerdings ausschließlich in Beugungsmustern und nur einen vernachlässigbaren Anteil in der sonst dominierenden Spiegelreflexion. Aus optischer Sicht ist die von uns gefundene Architektur viel besser als die des Schmetterlings. Wir stellten uns also die Frage, welche Bedingungen zu der Architektur des Morphofalters führen.

Wir verringerten daher den Einfluss der optischen Bedingungen und bezogen andere Kriterien mit ein, unter anderem ein geringes Gewicht der Struktur und eine bestimmte Art der Architektur; denn die Blöcke müssen ja beispielsweise übereinanderliegen, um zusammenzuhalten. Gewissermaßen erzwangen wir also einen Kompromiss zwischen optischen und mechanischen Eigenschaften. Und tatsächlich ergaben sich auf diese Weise Strukturen, die denen des Morphofalters ähnelten.

Die numerische Optimierung kann also als Werkzeug dienen, um natürliche Strukturen besser zu verstehen und Hypothesen über ihre Entstehung zu überprüfen: Wenn sich mittels der Algorithmen eine in der Natur vorkommende Struktur ergibt, haben wir wahrscheinlich die richtigen Einschränkungen gewählt. Doch kann die Methode auch praktikable ingenieurstechnische Lösungen präsentieren? Um diese Frage zu beantworten, widmeten wir uns einem Problem, das bei der Entwicklung eines photonischen Systems auftreten kann. Wir wollten eine mehrschichtige Struktur finden, welche die Umwandlung von Licht in Elektrizität in einem Fotovoltaikmodul verbessern würde. Dazu sollte sie denselben Einschränkungen hinsichtlich der optischen Brechungsindizes unterworfen werden, wie sie in natürlichen Strukturen vorkommen. Kurz gesagt, wir wollten erraten, was die Natur mit den ihr zur Verfügung stehenden Möglichkeiten täte, müsste sie eine Fotovoltaikzelle entspiegeln.

Eine weitere Besonderheit des Bragg-Spiegels liefert extrem leistungsfähige Fotovoltaikzellen

Die Berechnungen ergaben eine Variation des Bragg-Spiegels. Das ist paradox, weil ein Bragg-Spiegel das Licht sehr gut reflektiert – man kommt also eigentlich nicht auf die Idee, ihn als »Entspiegelung« zu verwenden. In diesem Fall ist die Struktur jedoch so beschaffen, dass sie nur infrarotes Licht effektiv reflektiert, den sichtbaren Anteil hingegen durchlässt. Damit erhöht sich die durch das Silizium absorbierte Lichtmenge im Vergleich zu Systemen mit einer Standardentspiegelung. Wir haben die Struktur hergestellt und untersucht – und tatsächlich ist sie sehr effizient: Der theoretische Wirkungsgrad steigt von 56 Prozent ohne Entspiegelung auf 74 Prozent mit einer einfachen und 80 Prozent mit unserer neuen Entspiegelung. Gleichwohl ist die Struktur komplex und teurer in der Herstellung als herkömmliche Verfahren. Der tatsächliche Nutzen der gefundenen Struktur ist also fragwürdig. An unserer Schlussfolgerung in Bezug auf das Experiment ändert das jedoch nichts: Die digitale Optimierung ist ein wertvolles Werkzeug – mit ihr lassen sich effektive Strukturen entdecken, anschließend analysieren und als Inspirationsquelle nutzen.

Ein Nachteil der globalen Optimierungsmethode ist derzeit noch, dass sie deutlich mehr Rechenzeit benötigt als ein Gradientenabstieg. Daher ist sie noch nicht in der Lage, komplexe photonische Bauelemente zu entwerfen, die es zum Optimieren von Prozessoren braucht. Gleichwohl kommt es auf dem Gebiet zu rasanten Fortschritten, und wir sind daher zuversichtlich, dass dies mit der Methode eines Tages gelingen wird.

Die Natur hat uns also Beispiele für photonische Systeme geliefert, die uns als Leitfäden und Vorbilder für unsere Optimierungsprogramme dienen. Dabei ist das effektivste Vorgehen zum Erzeugen regelmäßiger und eleganter Strukturen die differenzielle Evolution, die sich an der geschlechtlichen Fortpflanzung orientiert, indem sie Informationsaustausch zwischen Individuen fördert. Solche Algorithmen eignen sich gut für modulare Probleme, wie sie in der Photonik häufig vorkommen. Das liegt daran, dass sie Elemente aus verschiedenen Strukturen kombinieren und sie nahezu unabhängig voneinander optimieren.

Natürlich bildet eine Optimierung durch einen evolutionären Algorithmus nicht die natürliche Evolution realitätsgetreu nach. Unsere Ergebnisse zeigen jedoch, dass der natürliche Entwicklungsprozess ähnlich abläuft wie ein Optimierungsverfahren. Die Evolution hat tatsächlich zu echten idealen Lösungen im mathematischen Sinn geführt, wie etwa dem Bragg-Spiegel. Und so können die Ergebnisse aus dem Bereich der theoretischen Photonik vielleicht ein neues Licht auf ein noch immer nicht vollständig gelöstes Problem in der Biologie werfen: Warum gibt es überhaupt sexuelle Fortpflanzung?

Eine Hypothese, die vor allem die beiden Genetiker Ronald Fisher und Hermann Muller in den 1930er Jahren aufgestellt haben, scheint in die Richtung dessen zu gehen, was man bei der Optimierung in der Photonik feststellt: Populationen mit sexueller Reproduktion entwickeln sich schneller. Diese Art der Fortpflanzung ermöglicht es, Gene zwischen Individuen auszutauschen und beschleunigt so die evolutionäre Lösung modularer Probleme. Unter anderem hat das in der Natur außergewöhnliche photonische Strukturen und ein wahres Farbspektakel hervorgebracht. ◀

QUELLEN

Barry, M.A. et al.: Evolutionary algorithms converge towards evolved biological photonic structures. *Scientific Reports* 10, 2020

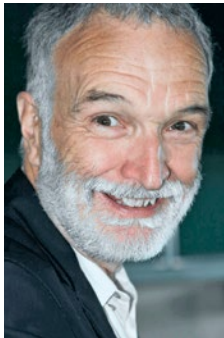
Bennet, P. et al.: Analysis and fabrication of antireflective coating for photovoltaics based on a photonic-crystal concept and generated by evolutionary optimization. *Physical Review B* 103, 2021

Berthier, S.: Des insectes à la photonique. *Pour la Science* 401, 2011

Gondarenko, A.: Spontaneous emergence of periodic patterns in a biologically inspired simulation of photonic structures. *Physical Review Letters* 96, 2006

Molesky, S. et al.: Inverse design in nanophotonics. *Nature Photonics* 12, 2018

SCHLICHTING! BESTÄUBTE REGENTROPFEN



Auf Pflanzenblättern sammeln sich Pollen und anderer feiner Staub. Ein Regenschauer wirkt reinigend und hinterlässt manchmal Tropfen, die einiges über die physikalischen Vorgänge bei der Schmutzbeseitigung verraten.

H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. Seit 2009 schreibt er für »Spektrum« über physikalische Alltagsphänomene.

» spektrum.de/artikel/2000488

Es regnete so stark, daß alle Schweine rein und alle Menschen dreckig wurden

Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799)

Manche Pflanzen verteilen ihre Pollen so verschwenderisch, dass andere in ihrer Nachbarschaft regelrecht mit einer Schicht aus Blütenstaub eingedeckt werden. Das kann die betroffenen Blätter in ihrer Photosynthese einschränken. Zum Glück sorgen ab und zu Regenschauer wieder für klare Verhältnisse. An Wassertropfen, die an den Blättern hängen bleiben, kann man nachvollziehen, wie die Reinigungsvorgänge physikalisch ablaufen.

Das zeigt sich zum Beispiel an Maiglöckchen (siehe »Maiglöckchenblatt«). Nach einem heftigen Regenschauer sind bei anschließendem Sonnenschein auf waagrecht ausgerichteten, leicht konkaven Blättern einige liegen gebliebene Wassertropfen zu sehen. An dem größten von ihnen lassen sich die wesentlichen

Aspekte des Reinigungsvorgangs rekonstruieren. Neben einer kleinen Spiegelung der Sonne fällt ein größerer heller Fleck auf der höchsten Stelle des Tropfens auf. Wie man an seinem Schatten auf dem Blatt erkennen kann, hat er einen materiellen Ursprung: eine nahezu kreisförmige Ansammlung von Pollenkörnern, die der Regen beim Gleiten über das ehemals bestaubte Blatt eingesammelt hat.

Wenn Regentropfen auf Bäumen oder anderen Pflanzen landen, hängt ihr Schicksal vor allem von der Beschaffenheit der Blattoberfläche ab. Bei Wasser liebenden (hydrophilen) Flächen ist für eine gemeinsame Grenzfläche zwischen Wasser und Blatt weniger Energie nötig als zwischen Wasser und Luft. Die Tropfen breiten sich also möglichst ausladend auf dem Blatt aus. Bei Wasser abweisenden (hydrophoben) Flächen ist hingegen

MAIGLÖCKCHENBLATT Auf dem größten der liegen gebliebenen Tropfen ist eine kreisförmige Staubsammlung zu erkennen, die einen Schatten aufs Blatt wirft.



H. JOACHIM SCHLICHTING



KUGELFLOSS Auf einer konvex über einem Trinkglas aufgewölbten Wasseroberfläche driften Styroporkügelchen zur Mitte.

verhältnismäßig viel Energie erforderlich, und die gemeinsame Grenzfläche zwischen Blatt und Wasser bleibt daher vergleichsweise klein.

Ein Maß für die Benetzbarkeit ist der so genannte Kontaktwinkel, der sich zwischen Festkörper und Flüssigkeit einstellt. Von Hydrophobie spricht man, wenn er größer ist als 90 Grad. Das ist bei den Maiglöckchen offenbar der Fall. Insbesondere die kleinen Tropfen erscheinen fast kugelförmig. Bei ihnen macht sich der Einfluss der Schwerkraft weniger stark bemerkbar als bei den deutlich abgeflachten voluminöseren Exemplaren.

Sobald Regentropfen auf dem Maiglöckchenblatt landen, nehmen sie die Pollen auf, mit denen sie in Kontakt geraten. Die Pollen sind hydrophil und bleiben deswegen am Wasser haften. Interessanterweise versammeln sie sich entgegen der Schwerkraft an der höchsten Stelle der Tropfen und ordnen sich nahezu kreisförmig an.

Die Vorgänge lassen sich auf einfache Weise in einem Freihandexperiment nachvollziehen. Dazu füllt man ein Trinkglas vorsichtig so voll mit Wasser, dass es sich über den Rand hinaus aufwölbt – die Oberflächenspannung und die Hydrophilie des Glases verhindern ein Überlaufen. Die höchste Stelle des konvexen Wasserspiegels liegt dann in der Mitte. Gibt man nun einige Styroporkügelchen auf die Oberfläche, driften sie sofort dorthin und ziehen sich gegenseitig an (siehe »Kugelfloß«). Sie tendieren dazu, gemeinsam eine hexagonale Form mit minimalem Umfang anzunehmen. Bei einer größeren Anzahl kleiner Teilchen wie den Pollen erscheint das als Kreis.

Durch die Benetzung werden die Kügelchen ein wenig tiefer ins Wasser gezogen, als es ihrem Gewicht entspricht. Ähnlich wie bei einem im Schwimmbad herabgedrückten Ball provoziert das eine zusätzliche Auftriebskraft. Bei der erstbesten Gelegenheit nehmen die Teil-

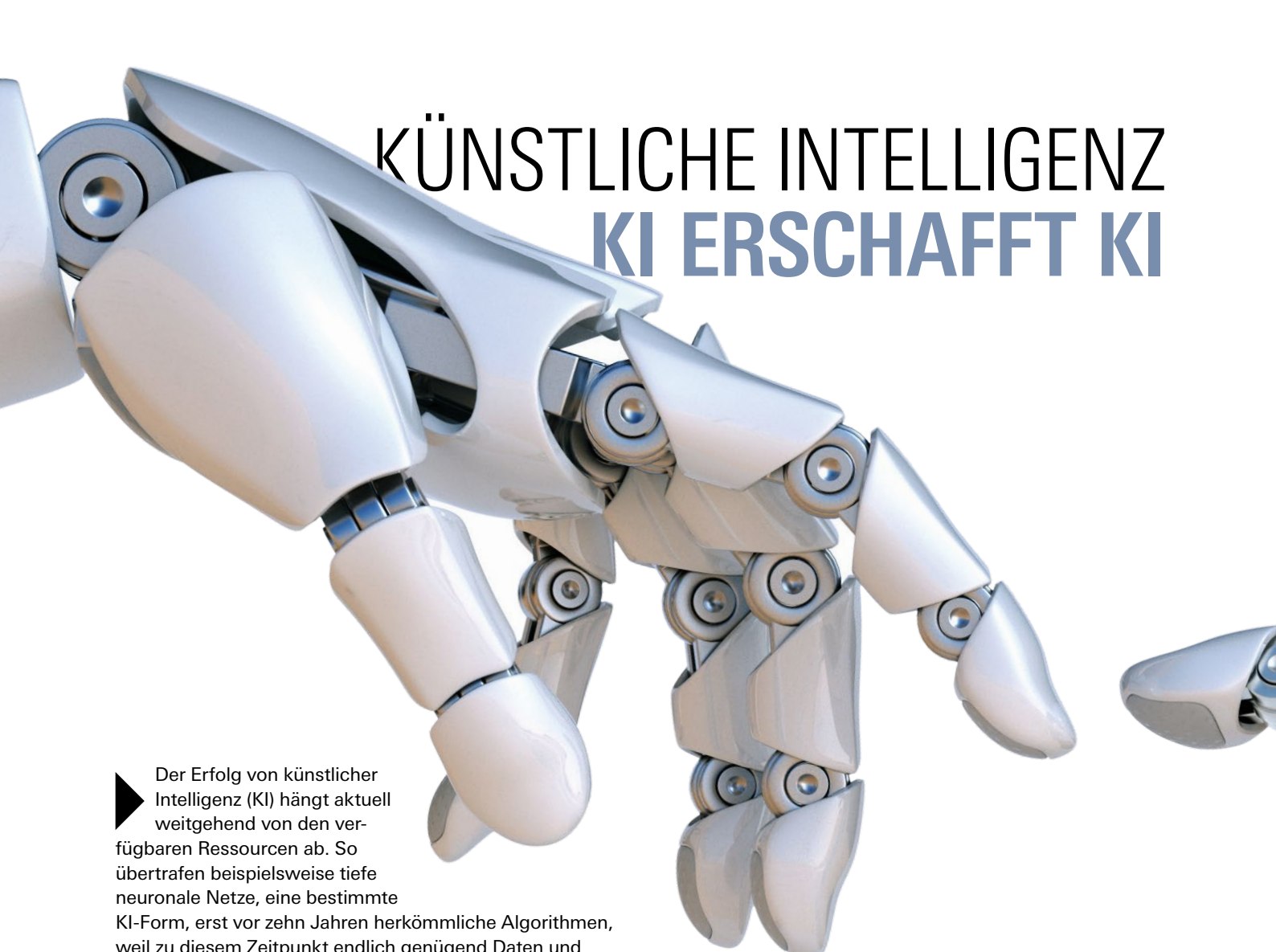
chen daher den jeweils höchsten Platz ein. Somit wandern die Pollen am Tropfen und die Styroporkügelchen die gewölbte Wasseroberfläche im Trinkglas empor. Die gegenseitige Anziehung erfolgt aus demselben Grund. Sobald ein Teilchen in die Reichweite des konkaven Meniskus eines anderen kommt, steigen sie jeweils darin auf, bis nur noch eine schmale Wasserlamelle zwischen beiden besteht.

Der reinigende Effekt durch Staubpartikel einsammelnde Tropfen ist am stärksten bei hydrophoben Blättern ausgeprägt, also solchen, die von Wasser nur wenig benetzt werden. Da die Lospflanze das Phänomen sehr eindrucksvoll zeigt, spricht man auch vom Lotuseffekt. Er hat seine Ursache in einer besonderen mikroskopischen Struktur und wird häufig als Paradebeispiel für die Bionik genannt, bei der es darum geht, natürliche Phänomene technisch nachzubilden. So reinigen sich speziell beschichtete Oberflächen bei einem Regenguss selbst.

Aber sogar bei hydrophilen Pflanzenblättern kann es bei größeren Schmutzansammlungen zu einer Art Hydrophobisierung kommen. Indem die aufprallenden Tropfen sich mit einer Staubschicht umgeben, haben die Blätter weniger direkten Kontakt zum Wasser, und die Hydrophilie nimmt ab. Den Effekt kann man ebenfalls durch ein einfaches Experiment nachvollziehen. Träufelt man etwas Wasser auf Bärlappsporen, so werden die Tropfen nahezu vollständig damit überzogen, während sie über das Puder kullern (siehe »Staubschicht«). Jetzt erfolgt der Kontakt mit dem Untergrund nur noch über die Staubschicht, und so werden die ummantelten Tropfen praktisch hydrophob. Sie rollen bei der kleinsten Neigung vom Blatt herunter und hinterlassen schließlich eine mehr oder weniger saubere Unterlage.



STAUBSCHICHT Lässt man Wassertröpfchen auf Bärlappsporen fallen, so überziehen sie sich damit und werden vollkommen hydrophob.



KÜNSTLICHE INTELLIGENZ

KI ERSCHAFFT KI

► Der Erfolg von künstlicher Intelligenz (KI) hängt aktuell weitgehend von den verfügbaren Ressourcen ab. So übertrafen beispielsweise tiefe neuronale Netze, eine bestimmte KI-Form, erst vor zehn Jahren herkömmliche Algorithmen, weil zu diesem Zeitpunkt endlich genügend Daten und Rechenleistung zur Verfügung standen, um das Potenzial der Programme voll auszuschöpfen.

Heutige KI-Software ist sogar noch hungriger nach Informationen und Leistung als ihre älteren Versionen. Um sie zu trainieren, muss man die Werte von Millionen oder gar Milliarden von Parametern sorgfältig aufeinander abstimmen. Denn diese Variablen charakterisieren die riesigen Netzwerke, sie entsprechen unter anderem der Stärke der Verbindungen zwischen den künstlichen Neuronen. Ziel ist es, nahezu ideale Werte zu finden, damit das Programm eine bestimmte Aufgabe bestmöglich meistert. Dieser als Optimierung bekannte Prozess erweist sich allerdings als überaus schwierig. Es ist sehr aufwändig, die Netze bis zu diesem Punkt zu trainieren. »Das kann Tage, Wochen oder sogar Monate dauern«, so Petar Veličković, wissenschaftlicher Mitarbeiter bei DeepMind in London.

Das könnte sich bald ändern. Denn Boris Knyazev und Graham W. Taylor von der kanadischen University of Guelph in Ontario ist es zusammen mit Michal Drozdal und Adriana Romero-Soriano von Facebook AI Research nun gelungen, ein so genanntes Hypernetzwerk zu entwickeln und erfolgreich zu trainieren. Dabei handelt es sich um eine Art übergeordnete Instanz für neuronale Netze, die den Trainingsprozess erheblich beschleunigen könnte. Das Hypernetz kann innerhalb von Sekundenbruchteilen die

SELBSTOPTIMIERUNG Dazu sind nun auch KI-Algorithmen in der Lage: Sie entwerfen eigens Programme, die schneller laufen.

Parameter für einen anderen untrainierten Algorithmus voraussagen, der eine bestimmte Aufgabe meistern soll. Theoretisch könnte das Training damit künftig sogar gänzlich wegfallen. Doch die Arbeit der Informatikerinnen und Informatiker könnte darüber hinaus noch weitere Anwendungen finden, da sie eine KI geschaffen haben, die extrem komplexe Muster in den Designs tiefer neuronaler Netze erkennen kann.

Eine übergeordnete KI entwirft neuronale Netze

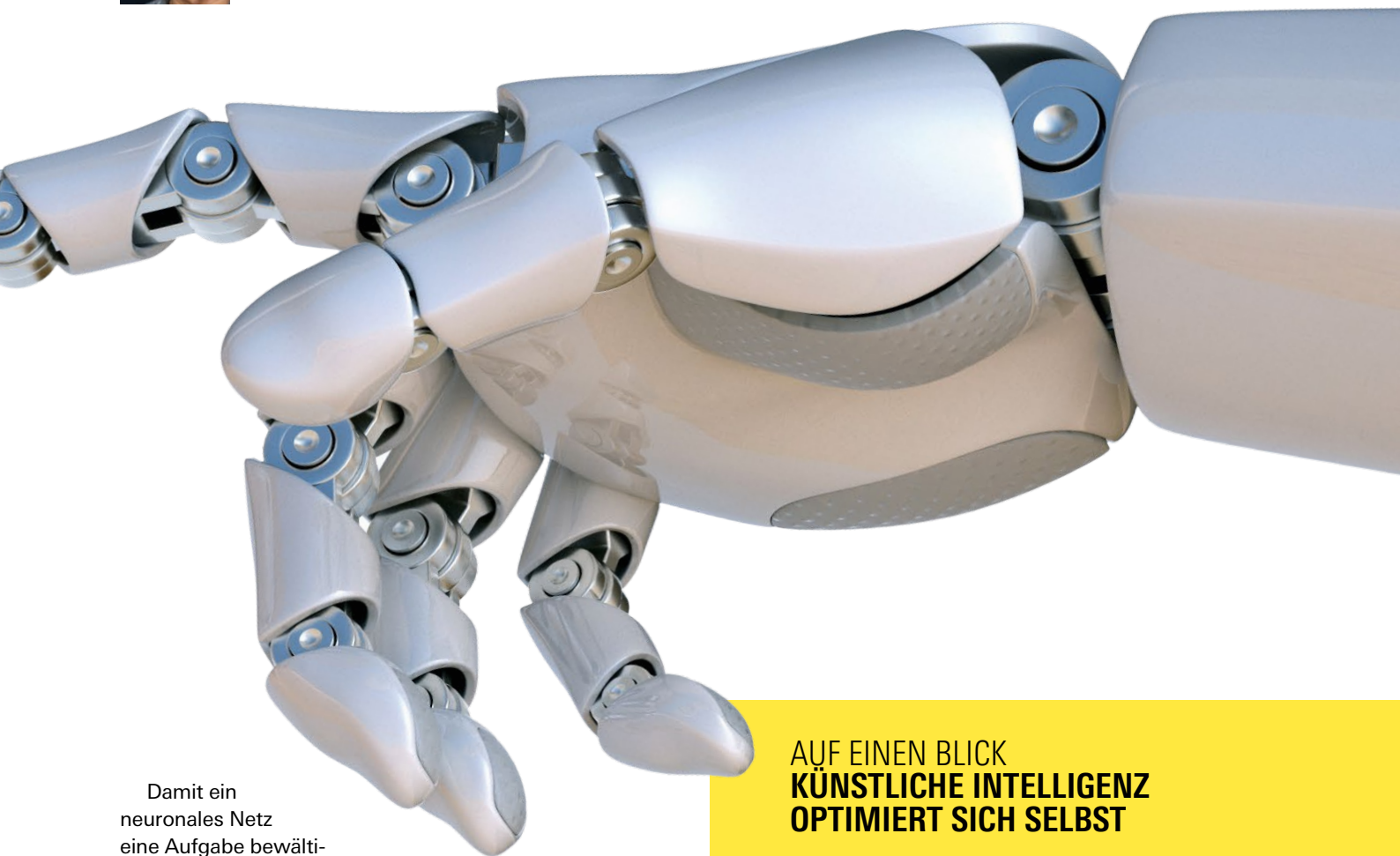
Bislang hat das Hypernetzwerk in bestimmten Situationen bereits erstaunlich gute Leistungen vollbracht, aber es ist noch ausbaufähig – was angesichts der weit reichenden Anwendungsgebiete nicht überrascht. Wenn das gelingen sollte, »wird es für den gesamten Bereich des maschinellen Lernens von großer Bedeutung sein«, prophezeit Veličković.

Schon lange versucht man, neuronale Netze zu entwickeln, die keine oder nur wenige Trainingsdaten benötigen. Das ist dank übergeordneter KI-Programme, die den Aufbau von Netzwerken optimieren, nun gelungen.



Anil Ananthaswamy ist freier Wissenschaftsjournalist mit den Schwerpunkten maschinelles Lernen und Physik.

» spektrum.de/artikel/2000476



Damit ein neuronales Netz eine Aufgabe bewältigen lernt, muss man es trainieren. Dafür liefert man große Mengen von Eingabedaten und vergleicht die Ausgabe mit dem gewünschten Ergebnis. Das Training dient dazu, die Fehler zu minimieren, die das Netz etwa bei der Bilderkennung macht. Die derzeit besten Methoden dafür basieren auf einer Technik namens stochastischer Gradientenabstieg (englisch: stochastic gradient descent, kurz: SGD).

Ein SGD-Algorithmus geht viele beschriftete Eingangsdaten (zum Beispiel Bilder mit der Aufschrift »Katze« oder »keine Katze«) durch und passt dabei die Parameter des Netzes so an, damit das Ergebnis möglichst häufig der ge-

AUF EINEN BLICK KÜNSTLICHE INTELLIGENZ OPTIMIERT SICH SELBST

- 1** Gewöhnliche neuronale Netze verschlingen Ressourcen und Daten: Es ist unheimlich viel Rechenleistung und Zeit nötig, um sie für eine Aufgabe zu trainieren.
- 2** Das Problem liegt darin, dass man den Aufbau der Netzwerke und deren dazugehörige Parameter optimieren muss, was sehr aufwändig ist.
- 3** Übergeordnete KI-Programme können dabei helfen, die geeignetsten Einstellungen für eine Aufgabe zu bestimmen. Selbst untrainierte Algorithmen können dann etwa Bilder erkennen.

wünschten Ausgabe entspricht. Die Anzahl der Fehler sind in einer so genannten Verlustfunktion codiert, die man daher minimieren möchte. Das SGD-Verfahren ist ein iterativer Prozess, bei dem man die Werte der Verlustfunktion schrittweise senkt, bis ein ausreichend guter (oder manchmal sogar der bestmögliche) Parameterwert erreicht ist. Denn nicht immer findet man das tatsächliche Minimum der Funktion.

Diese Technik funktioniert jedoch nur, wenn bereits eine Netzwerkstruktur vorliegt, die man optimieren möchte. Um das eigentliche Netz zu entwerfen und den Aufbau der künstlichen Neurone und der Verbindungen zwischen ihnen zu bestimmen, müssen sich Ingenieure auf ihre Intuition und ein paar Faustregeln verlassen. Üblicherweise besteht ein Netz aus mehreren Schichten künstlicher Neurone, wobei die erste der Eingabe- und die letzte der Ausgabeschicht entspricht. Die dazwischenliegenden Recheneinheiten übermitteln und verarbeiten die Informationen auf ihrem Weg durch das Netz. Allerdings kann sich unter anderem die Anzahl der Schichten sowie die Anzahl der Neurone pro Schicht je nach Algorithmus unterscheiden. Woher weiß man, welche Struktur sich für eine bestimmte Aufgabe am besten eignet?

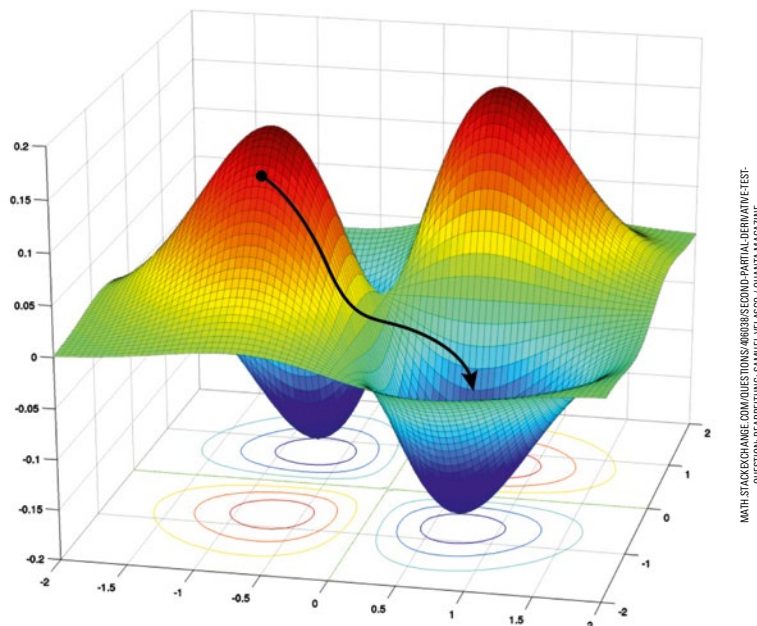
Theoretisch könnte man mit vielen verschiedenen Architekturen beginnen, dann jede einzelne optimieren und die beste für ein Problem auswählen. »Aber das Training nimmt eine Menge an Zeit in Anspruch«, erklärt Mengye Ren, derzeit Gastforscher bei Google Brain. Es wäre unmöglich, jeden denkbaren Aufbau zu trainieren und zu testen. »Das lässt sich nicht gut umsetzen, vor allem, wenn man die Millionen möglichen Designs berücksichtigt.«

2018 versuchte Ren daher zusammen mit seinem damaligen Kollegen Chris Zhang von der University of Toronto und ihrer ehemaligen Betreuerin Raquel Urtasun einen anderen Ansatz. Sie entwarfen ein so genanntes Graph-Hypernetzwerk (GHN), um die beste Architektur für tiefe neuronale Netze zu finden, die eine bestimmte Aufgabe lösen sollen. Für das Beispiel, das sie auswählten, kamen tatsächlich verschiedene Designs in Frage – es stand also noch nicht fest, welcher Aufbau gewinnen würde, was ihr Experiment umso spannender machte.

Den optimalen Kandidaten finden

Die Forscherin und ihre Kollegen nutzten dabei aus, dass sich die Struktur eines tiefen neuronalen Netzes als mathematischer Graph darstellen lässt: eine Sammlung von Knoten, die durch Kanten verknüpft sind. Die Knoten stehen für mehrere Recheneinheiten (in der Regel eine gesamte Schicht eines Netzwerks) und die Kanten für die Art und Weise, wie diese miteinander verbunden sind.

Und so lautet die zu Grunde liegende Idee: Man startet mit einem beliebigen Aufbau, dem so genannten Kandidaten, der optimiert werden muss, und stellt ihn als Graph dar. Das Hypernetzwerk versucht dann, die idealen Parameter vorherzusagen. Diese Werte setzt das Team anschließend in einem tatsächlichen neuronalen Netz ein und untersucht, wie gut es bei der herausgesuchten Aufgabe abschneidet.



DER GRADIENTENABSTIEG führt ein Netz durch seine »Verlustlandschaft«, wobei höhere Werte größere Fehler zwischen der Ausgabe des Programms und dem gewünschten Ergebnis darstellen. Der Algorithmus versucht, das globale Minimum zu finden, um den Fehler so klein wie möglich zu halten.

Das wiederholt man für verschiedene Kandidaten, die sich alle in ihrer Architektur unterscheiden. Auch wenn die Programme mit den vorhergesagten Parametern nicht perfekt funktionieren, lässt sich so dennoch eine Rangliste erstellen, die angibt, welcher Kandidat sich am besten für eine betrachtete Aufgabe eignet. Diesen kann man auswählen und auf herkömmliche Weise durch Gradientenabstieg trainieren.

Doch wie funktioniert die Methode im Detail? Der als Graph dargestellte Kandidat besteht aus Knoten, die jeweils Informationen über eine ganze Gruppe von Neuronen enthalten, welche eine gewisse Art von Berechnung durchführen. Die Kanten des Graphen bilden ab, wie die Daten von Knoten zu Knoten, von der Eingabe bis zur Ausgabe fließen.

Um den idealen Aufbau zu bestimmen, ist ein neuronales Netz erforderlich. Dieses ermöglicht Berechnungen auf dem ursprünglichen Kandidaten-Graphen: Es ändert die Eigenschaften der Knoten – etwa die Anzahl der enthaltenen Neurone und die Verbindungen zwischen ihnen. Um anschließend geeignete Parameter für den neuen Aufbau vorherzusagen, braucht man ein zweites Netz. Dieses erhält die aktualisierten Knoten als Eingabe und ermittelt daraus die passenden Variablen für die Recheneinheiten.

Natürlich muss man zuvor die beiden neuronalen Netzwerke, aus denen das Hypernetzwerk besteht, auch trainieren. Denn sie besitzen ebenfalls Parameter, die es zu optimieren gilt, bevor sie die Struktur und die Werte der Kandidaten korrekt vorhersagen können. Dafür braucht man Trainingsdaten: In diesem Fall wählten die Forscherinnen und Forscher eine zufällige Stichprobe möglicher Architekturen künstlicher neuronaler Netze (kNN). Jeden darin enthaltenen Aufbau wandelten sie in einen Graphen um und verwendeten dann das Hypernetzwerk, um die passendsten Parameter vorherzusagen. Anschließend setzten sie die Werte in den kNN-Kandi-

daten ein und ließen ihn eine bestimmte Aufgabe ausführen, zum Beispiel eine Bilderkennung. Wie beim klassischen maschinellen Lernen, berechneten sie die Verlustfunktion des kNN anhand der gemachten Fehler. Doch anstatt direkt die Parameter des Kandidatennetzes anzupassen, damit es bessere Vorhersagen trifft, änderten sie die Variablen des Hypernetzwerks, das den Aufbau und die ursprünglichen Werte überhaupt vorgeschlagen hat.

Dadurch schneidet das GHN beim folgenden Durchlauf besser ab. Den Vorgang wiederholt man für jedes Bild (oder andere Dateien, je nach Aufgabe) in einem beschrifteten Datensatz und mit allen Kandidaten aus einer zufälligen Stichprobe möglicher Architekturen. Derart verringert man nach und nach den Verlust, bis sich das GHN nicht weiter verbessern lässt. So erhielten die Informatikerinnen und Informatiker ein trainiertes Hypernetzwerk. Zwar ist dieses Training auch aufwändig, aber man muss es nur einmal durchführen und kann immer wieder darauf zurückgreifen. Damit kann man sich die komplizierte Suche nach passenden Designs sparen.

Zwei Fliegen mit einer Klappe

Als Knyazev und seine Kolleginnen und Kollegen von der Idee der Graph-Hypernetzwerke erfuhren, erkannten sie, dass sich die Methode erweitern lässt. In ihrer neuen Arbeit haben sie gezeigt, wie man mit GHNs nicht nur die beste Architektur aus einer Reihe von Kandidaten auswählen, sondern auch die Parameter für das passendste Netzwerk vorhersagen kann. Der letzte Teil ließ sich bisher nur durch anschließendes Training herausfinden. Denn in der Methode von Rens Team waren die vom GHN vorhergesagten Variablen nicht die bestmöglichen, aber immerhin gut genug, um einen geeigneten Aufbau für eine Aufgabe zu wählen.

Allerdings garantiert der weiterentwickelte Ansatz der Fachleute um Knyazev auch nicht, die perfekten Parameter zu berechnen. Doch wie sie herausfanden, waren sie zumindest so nah an den optimalen Werten, dass man die neuronalen Netzwerke anschließend – wenn überhaupt – nur noch mit weitaus weniger Daten trainieren musste. Dadurch lässt sich mit viel kleineren Datenmengen arbeiten, und man spart Zeit und weitere Ressourcen wie Rechenleistung ein.

Um das zu erreichen, griff das Team die zuvor entwickelten Ideen auf und schrieb die Software von Grund auf neu, da die Forschungsgruppe von Ren ihren Quellcode nicht veröffentlicht hatte. Dann verbesserten Knyazev und seine Kolleginnen und Kollegen das Programm, das sie GHN-2 nennen. Unter anderem identifizierten sie 15 Knotentypen in Graphen, die sich kombinieren lassen, um daraus fast jedes tiefe neuronale Netz zu konstruieren. Zudem haben sie einen einzigartigen Datensatz geschaffen, damit sie ihr Hypernetzwerk trainieren konnten. Damit wollten sie sicherstellen, dass GHN-2 für eine breite Palette von Netzwerkarchitekturen die Parameter zuverlässig vorhersagt. »Um unser Modell zu trainieren, haben wir zufällige Designs erstellt, die so vielfältig wie möglich sind«, so Knyazev. Dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass GHN-2 auch unbekannte Architekturen prognostizieren kann.

Der eigentliche Test bestand natürlich darin, GHN-2 auf praktische Probleme loszulassen. Nachdem Knyazev und sein Team das Programm darauf trainiert hatten, Parameter für eine gewisse Aufgabe vorherzusagen, etwa das Klassifizieren von Bildern in einem bestimmten Datensatz, testeten sie seine Fähigkeit, Variablen für beliebige Kandidaten zu bestimmen. Diese könnten ähnliche Eigenschaften besitzen wie die Millionen anderen Netze im Trainingsdatensatz – oder völlig verschieden sein, sozusagen Ausreißer. Im ersten Fall wäre die Zielarchitektur also »innerhalb der Verteilung«, im zweiten außerhalb. Tiefe neuronale Netze versagen oft bei Vorhersagen für letztere Situation, daher war es wichtig, GHN-2 an solchen Beispielen zu testen.

Mit einem vollständig trainierten GHN-2 sagte das Team die Variablen für 500 bisher unbekannte zufällige Designs

Neuronale Netze als Graphen

Damit ein Graph-Hypernetzwerk die Parameter eines neuronalen Netzes vorhersagen kann, muss man dieses zunächst in einen mathematischen Graphen umwandeln. Jeder Knoten entspricht dabei einer Recheneinheit, etwa einer Schicht künstlicher Neurone. Kanten stellen dar, wie sich Information zwischen diesen Einheiten fortbewegt. Hier sind einige Beispiele für geläufige Arten von neuronalen Netzen, wobei die farbigen Formen für verschiedene Schichten stehen.

breite Netzwerke

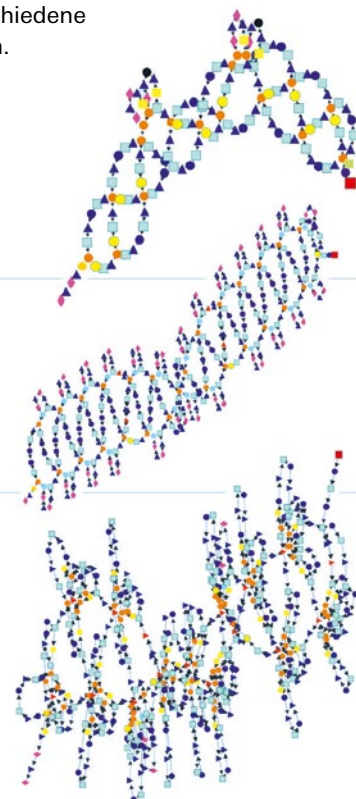
Jede Schicht besteht aus vielen Neuronen (nicht dargestellt)

tiefe Netzwerke

Information bewegt sich durch viele einzelne Schichten

dichte Netzwerke

In den meisten Schichten sind die Neurone mit fast allen anderen in benachbarten Schichten verbunden



SAMUEL VELASCO / QUANTA MAGAZINE NACH KNYAZEV A. ET AL. - PARAMETER PREDICTION FOR DEEP ARCHITECTURES. ARXIV 2110.13100, 2021; BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

voraus. Dann wurden diese entsprechend eingestellten Netzwerke mit Algorithmen verglichen, die man mit dem herkömmlichen stochastischen Gradientenabstieg trainiert hatte. Die Ergebnisse von GHN-2 hielten oft mit jenen von Programmen mit, die tausende Iterationen des SGD durchlaufen hatten. In manchen Fällen schnitt das Hypernetzwerk sogar besser ab.

Für ihre Analyse griffen die Fachleute auf einen der berühmtesten Datensätze der Bilderkennung zurück: CIFAR-10, das handgeschriebene Ziffern enthält. Für diese Aufgabe lag die mittlere Trefferquote von GHN-2 bei Designs innerhalb der Verteilung bei 66,9 Prozent, während Netze, die mit 2500 SGD-Iterationen trainiert wurden, eine durchschnittliche Erfolgsquote von 69,2 Prozent erreichen. Bei Architekturen außerhalb der Verteilung schnitt GHN-2 mit einer Genauigkeit von etwa 60 Prozent erstaunlich gut ab. Selbst bei der tiefen neuronalen Netzwerkarchitektur ResNet-50 produzierte es in 58,6 Prozent der Fälle korrekte Resultate. »Die Verallgemeinerung auf ResNet-50 ist überraschend gut, wenn man bedenkt, dass es etwa 20-mal größer ist als unsere durchschnittliche Trainingsarchitektur«, erklärte Knyazev auf der Konferenz NeurIPS 2021, einer der wichtigsten Veranstaltungen in der Branche.

Deutlich niedrigere Energiekosten

Bei ImageNet, einem wesentlich größeren Bilddatensatz, schnitt GHN-2 allerdings nicht so gut ab: Im Mittel lag es nur bei etwa 27,2 Prozent der Fälle richtig. Aber auch mit der herkömmlichen Methode erreicht man bloß eine durchschnittliche Präzision von 25,6 Prozent, wenn man die gleichen Netze mit 5000 SGD-Schritten trainiert. Natürlich kann man den Gradientenabstieg beliebig häufig – allerdings unter beträchtlichen Kosten – anwenden, um letztlich eine Genauigkeit von 95 Prozent und mehr zu erlangen.

Entscheidend ist jedoch, dass GHN-2 die ImageNet-Vorhersagen in weniger als einer Sekunde getroffen hat, während die SGD-Methode im Schnitt etwa 10000-mal länger, also mehrere Stunden, für eine vergleichbare Erfolgsquote braucht. Zudem muss man den Gradientenabstieg wegen seiner großen Datenmengen auf stromhungrigen Grafikkarten laufen lassen, und bei GHN-2 genügt ein gewöhnlicher Prozessor. »Das ist wirklich sehr beeindruckend«, sagt Veličković. »Sie haben die Energiekosten deutlich gesenkt.«

Wenn das Netzwerk, das GHN-2 aus einer Auswahl von Architekturen ausgewählt hat, noch nicht gut genug für eine Aufgabe ist, kann man es mit herkömmlichen Methoden weiter optimieren. Und man muss dabei nicht ganz von vorne anfangen, denn das Netz ist zumindest teilweise trainiert. Anstatt also die SGD-Technik auf ein Programm loszulassen, das mit zufälligen Werten initialisiert wurde, kann man die Vorhersagen von GHN-2 als Ausgangspunkt verwenden. »Im Grunde genommen imitieren wir damit eine Art Vortraining«, so Knyazev.

Trotz dieser Erfolge befürchtet der Informatiker, dass sich die Community zunächst gegen den Einsatz von Graph-Hypernetzwerken sträuben wird. Er vergleicht das mit dem Widerstand, dem tiefe neuronale Netze vor dem Jahr 2012 ausgesetzt waren. Damals zogen KI-Entwickler klassische Algorithmen den geheimnisvollen Netzwerken vor. Das

änderte sich jedoch, als man Letztere erstmals mit riesigen Datenmengen trainieren konnte und damit traditionelle Programme übertraf. Inzwischen ist diese Form des maschinellen Lernens eine der populärsten in der Informatik.

Was Hypernetzwerke angeht, sieht Knyazev noch viele Möglichkeiten für Verbesserungen. So kann man GHN-2 beispielsweise bisher nur darauf trainieren, Parameter für die Lösung einer einzigen Aufgabe vorherzusagen, wie die Klassifizierung von CIFAR-10- oder ImageNet-Bildern – aber nicht beides gleichzeitig. Der Computerwissenschaftler hofft, künftige Graphen-Hypernetzwerke so ausbauen zu können, damit man sie für eine größere Vielfalt von Architekturen und auf verschiedene Aufgabentypen trainieren kann, die etwa Bilderkennung, Spracherkennung und Verarbeitung natürlicher Sprache umfassen.

Ein weiterer Vorteil, der sich durch die erfolgreiche Umsetzung von GHNs ergeben würde, ist die »Demokratisierung des Deep Learning«: Die Entwicklung neuartiger tiefer neuronaler Netze wäre dann nicht mehr auf finanzstarke Unternehmen mit Zugang zu großen Datenmengen beschränkt. Jeder könnte sich daran beteiligen.

Veličković weist jedoch auf ein mögliches Problem hin, das auftaucht, falls Ansätze wie GHN-2 jemals zur Standardmethode für die Optimierung von KI-Programmen werden. Bei Graphen-Hypernetzwerken, so Veličković, »hat man ein neuronales Netz – im Grunde eine Blackbox –, das die Parameter eines anderen Netzwerks vorhersagt. Wenn es also einen Fehler macht, hat man keine Möglichkeit, ihn zu erklären.«

Kipf begeistert hingegen, dass GHN-2 Muster in extrem komplizierten Inhalten finden kann. Normalerweise identifizieren neuronale Netze solche Informationen in Bildern, Texten oder Audiosignalen, also in strukturierten Daten. GHN-2 entdeckt sie aber in den Graphen völlig zufälliger Architekturen, die wesentlich komplexer aufgebaut sind.

Und doch kann GHN-2 extrapolieren – das heißt, es kann vernünftige Vorhersagen von Parametern für unbekannte Netzwerkarchitekturen treffen. »Diese Arbeit zeigt uns, dass viele Muster in verschiedenen Designs irgendwie ähnlich sind. Ein Modell kann lernen, wie man das Wissen von einem Aufbau auf einen anderen überträgt«, so Kipf. »Das ist etwas, das eine neue Theorie für neuronale Netze inspirieren könnte.« ◀

QUELLEN

Knyazev, B. et al.: Parameter prediction for unseen deep architectures. ArXiv 2110.13100, 2021

Zhang, C. et al.: Graph hypernetworks for neural architecture search. ArXiv 1810.05749, 2018

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Researchers Build AI That Builds AI« 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.



Wissenschaft vor 100 und vor 50 Jahren – aus Zeitschriften der Forschungsbibliothek für Wissenschafts- und Technikgeschichte des Deutschen Museums

80 000 JAHRE LANG BLUTKÖRPERCHEN ZÄHLEN

1922

»Legt man die roten Blutkörperchen eines Erwachsenen wie Geld nebeneinander, so ergibt sich eine Strecke von 187 000 km (4,7 mal den Umfang des Äquators). Zählt man in jeder Sekunde 10 auf, so braucht man rund 80 000 Jahre ununterbrochener Arbeit, um die 25 Billionen Rote in den 5 l Blut des Menschen zu zählen. Mit den roten Blutkörperchen zweier Menschen kann man eine Brücke auf den Mond bauen. Ein D-Zug mit 70 km Geschwindigkeit braucht rund 110 Tage, um die Blutkörperchenlänge abzurasiert.« *Die Umschau* 21, S. 332

RAUMWUNDER KÜCHENTISCH

»Ein außerordentlich praktischer Küchentisch, der Küchengegenstände auf kleinstem Raum vereinigt, wurde auf der Frankfurter Frühjahrsmesse gezeigt. Sein Vorteil fällt bei der heutigen Wohnungsnot und den teuren Anschaffungspreisen doppelt ins Gewicht. Der Tisch enthält eine Kochkisteneinrichtung; in dem Holzkasten haben 2 bis 3 Töpfe Platz, ein als Kuchenbrett verwendbarer Holzdeckel schließt die Kiste. Unter der Tischplatte ist ein Bügelbrett befestigt. Man kann die Teile ineinanderschieben und den Tisch als Kaffeetisch benutzen. Er wirkt sehr hübsch und keineswegs plump.« *Die Umschau* 19, S. 303



Der halbe Haushalt in einem Tisch.

GROSSSTÄDTÄRZTE BRAUCHEN ALKOHOL

»In den Vereinigten Staaten ist ein Gesetzesverbot hinsichtlich Herstellung und Verkauf von Alkohol, aber dessen beschränkter Zulassung für ärztliche und wissenschaftliche Zwecke erlassen worden. Interessant ist nun das Ergebnis einer Umfrage bei den Ärzten. Darnach ist etwa die Hälfte der Ärzte in kleinen Städten und auf dem Lande gegen Alkohol als Arzneimittel, die andere Hälfte in den Großstädten dafür. Interessant ist, daß das Verbot außer zu Umgehungen auch zur Herstellung von minderwertigem Alkohol geführt hat, was Todesfälle und ernsthafte Erkrankungen zur Folge hatte.« *Die Umschau* 19, S. 300

ES IST ZU HELL, UM DEN WELTRAUM ZU SEHEN

1972

»Über eine wenig bekannte Art der Umweltverschmutzung klagen die Astronomen der auf verschiedenen Bergen um Tucson (Arizona) gelegenen fünf Observatorien. Die Beleuchtung der gegenwärtig 300 000 Einwohner zählenden Stadt bildet im Verein mit der Luftverschmutzung einen Schleier, der es den Astronomen unmöglich macht, schwache Lichtquellen wie weitentfernte Galaxien oder Quasare auszumachen. Das bekannte Observatorium auf dem Mt. Wilson über Los Angeles fiel deshalb bereits 1930 für Beobachtungen von schwachen Lichterscheinungen aus.«

Kosmos 5, S. *158

LASER MESSEN LUFTVERSCHMUTZUNG

»Zwei Arten von Lasern, der Halbleiter-Laser und der mit einem Rubin-Laser gekoppelte Flüssigkeitslaser, sind so weit entwickelt worden, daß sie als Detektoren zur Bestimmung von Luftverschmutzungen eingesetzt werden können. Beide Laser, die im infraroten Bereich zwischen 2 µm und 20 µm arbeiten, haben Linienbreiten, die schmal genug sind, um selbst die schmalsten Absorptionslinien schwerer Moleküle im Freien zu ermöglichen. Neben einem Einsatz im Laboratorium ist auch die Verwendung im Freien möglich.« *Naturwissenschaftliche Rundschau* 5, S. 201

GRÖSSTES WASSERKRAFTWERK DER WELT

»An dem Grand-Coulee-Staudamm am Columbia River im US-Staat Washington ist ein Projekt im Bau, welches nach seiner Fertigstellung in den 80er Jahren zum wirtschaftlichen Wachstum der westlichen USA und Teilen Kanadas beitragen soll. Das Wasserkraftwerk erhält 12 Generatoren mit einer Gesamtkapazität von 9770 MW. (Zum Vergleich: das größte Wasserkraftwerk der Bundesrepublik Deutschland im Hotzen-

wald hat eine Kapazität von 360 MW.) Für das geplante Kraftwerk müssen 14,5 Mio. m³ Erde und Granitgestein bewegt werden, um den benötigten Platz für diese gigantische Anlage zu erhalten.«

Die Umschau 10, S. 306

Riesige Baustelle am Columbia River.



MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN KRUMMES ORIGAMI

Papierfalten entlang gekrümmter Knicklinien erzeugt eine erstaunliche Vielfalt von Formen und findet – mit anderen Materialien – sogar Anwendung in der Architektur.



Christoph Pöppe war Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«, zuständig vorrangig für Mathematik und Informatik.

» spektrum.de/artikel/2000479

► Unter einem Kegel stellt man sich in der Mathematik eher nicht einen Pflock vor, den man aufstellt, um ihn aus der Ferne mit einer rollenden Kugel umzuwerfen. Eine traditionelle Obst- oder Pommestüte oder auch eine Eiswaffel kommt da der Sache schon deutlich näher.

Der klassische Kegel (genauer: der gerade Kreiskegel) ist definiert als die Menge aller Geraden, die durch einen Punkt, die »Spitze« des Kegels, gehen und einen konstanten Winkel bilden mit einer weiteren Geraden, die auch durch die Spitze verläuft: der »Achse« des Kegels. Normalerweise interessiert man sich nicht für Geraden in ihrer unendlichen Länge, sondern beschränkt sich auf das Stück von der Spitze bis zu einer Ebene, die senkrecht zur Achse steht. Dort hat der Kegel seine kreisförmige Grundfläche.

Für die Hersteller von Tüten interessant ist die Tatsache, dass die Mantelfläche eines Kegels abwickelbar ist, das heißt, dass man sie knitterfrei aus einem Stück Papier herstellen kann (siehe »Kegel«). Das gilt bei Weitem nicht für jede Fläche (siehe »Abwickelbare Flächen«, S. 87). Man versuche nur einmal, eine kugelförmige Süßigkeit oder ein Bonbon glatt in ein Papier einzuwickeln, oder betrachte, wie unbeholfen die Hersteller von Wasserbällen die Kugelform durch acht irgendwie verklebte Segmente aus Plastik anzunähern versuchen.

Wenn man einen geraden Kreiskegel – sagen wir eines dieser rot-weiß gestreiften Hütchen, mit denen die Polizei auf die Schnelle den Straßenverkehr regelt – auf den Boden stellt und ihm mit einem horizontal geführten Messer die Spitze abschneidet, dann passt Letztere auf den Kopf gestellt genau in das Loch. (Natürlich denken wir uns, wie in der Mathematik üblich, den Kegelmantel unendlich

dünn.) Um jedoch einen Kegel mit derart einwärts gestülpter Spitze aus Papier herzustellen, muss man gar nicht so brutal vorgehen. Es genügt, den Kreissektor, aus dem man den Kegel bastelt, entlang einer kreisrunden Linie zu knicken, bevor man ihn zusammenklebt. Wenn man mehrere Knicklinien verwendet, kann man aus einem einzigen nicht zerschnittenen Stück Papier einen verallgemeinerten mexikanischen Hut machen (siehe »Huffman-Cone«, S. 89).

Damit sind wir bei einer der einfachsten Übungen im »krummen Origami«. Während es beim klassischen Origami darum geht, durch Falten entlang von geraden Linien aus einem Stück Papier die unglaublichsten Figuren herzustellen, dürfen in diesem Fall die Knicklinien gekrümmt sein. Leider ist hier das ehrgeizige Ziel der klassischen Papierfalter, ihre Linien nach euklidischer Art nur aus bereits vorhandenen Punkten zu konstruieren (siehe »Spektrum« September 2015, S. 64), nicht realisierbar. Man muss sich die Knicklinien aufs Papier zeichnen (lassen) und sehr sorgfältig nachritzen. Oder – die professionelle Methode – man programmiert einen Laser, der die krummen Linien ins Papier brennt, oder auch einen so genannten Schneideplotter. Das ist eigentlich ein computergesteuertes Zeichengerät, bei dem der Stift durch ein geeignetes Messer ersetzt wird.

Mit der neuen Freiheit kommt eine enorme Vielfalt an neuen Formen, die sich auf diese Weise erzeugen lassen. Die erste Erkenntnis: Papier ist wirklich geduldig. Dem Versuch, es entlang irgendeiner gekrümmten Linie zu knicken, leistet es bereitwillig Folge, vorausgesetzt, die Linie ist nicht allzu krumm.

Damit geben sich allerdings mathematisch wie künstlerisch gesinnte Menschen nicht zufrieden. Man möchte den Faltprozess kontrollieren mit dem Ziel, dass das Ergebnis zumindest ansehnlich ist, oder besser noch, man möchte ermitteln, wie die Faltlinien zu ziehen sind, damit ein beabsichtigtes Ergebnis herauskommt. Und das ist überraschend schwierig.

Eine abwickelbare Fläche muss zwar aus lauter Geradenstücken bestehen (siehe »Die drei Typen abwickelbarer Flächen«, S. 87), kann diese Bedingung aber auf drei wesentlich verschiedene Weisen erfüllen:



GEFALTETE KUNST Martin und Erik Demaine, Vater und Sohn und beide Professoren am MIT, ritzen Papier mit konzentrischen Kreislinien und falteten es entlang diesen Linien abwechselnd in die eine und in die andere Richtung. Nachdem sie mehrere derart präparierte Papiere geschickt aneinanderklebten, nahm das Gesamtkunstwerk nur durch die Elastizität des Materials seine Endform an.



PLATONISCHE KÖRPER Klara Mundilova hat die fünf platonischen Körper (von links nach rechts) Tetraeder, Würfel, Oktaeder, Dodekaeder und Ikosaeder so umgestaltet, dass sie aus jeweils einem einzigen Stück Papier mit krummen Knicklinien zusammengefoldet werden können.

- Alle Geraden gehen durch einen Punkt. Dann nennt man die Fläche einen Kegel, was auf eine sehr großzügige Verallgemeinerung dieses Begriffs hinausläuft. Die Kegelspitze, also der Punkt, in dem sich die Geraden treffen, muss nicht unbedingt zur Fläche gehören; man würde also auch den Schirm der deutschen Standardstehlampe einen Kegel nennen. Aber es kann noch viel schlimmer kommen. Wenn man durch einen klassischen Kreiskegel eine Ebene legt, die nicht gerade durch dessen Spitze verläuft, erhält man eine der Kurven, die entsprechend Kegelschnitte heißen: Kreis, Ellipse, Parabel und Hyperbel. Tut man dasselbe mit einem verallgemeinerten Kegel, so darf der »Kegelschnitt« eine ziemlich beliebig gekrümmte Kurve sein. Sie darf sich nur nicht selbst überschneiden – Selbstdurchdringung funktioniert mit Papier nicht – und muss überall eine Tangente haben. Wo das nicht der Fall wäre, hätte das Papier einen Knick, und man würde die Teilflächen beiderseits als verschieden ansehen.

- Alle Geraden sind parallel zueinander. Für diese Flächen nimmt man eine ebenso weit reichende Verallgemeinerung eines biederer Begriffs vor, indem man sie alle Zylinder nennt. Das passt schon irgendwie; auch beim klassischen Zylinder, realisiert zum Beispiel in jeder Konservendose, ist die Mantelfläche abwickelbar, was die Dosenhersteller schätzen, weil sie ihr Produkt ohne großen Aufwand aus einem ebenen Stück Blech zurechtbiegen können. Dass man auch ein Wellblech oder die mittlere Papierschicht einer Wellpappe einen Zylinder nennen kann, ist allerdings schon eher gewöhnungsbedürftig. Und die meisten Zwiebelturmdächer bestehen aus acht Zylinderstücken; die Geraden liegen waagrecht. Da sind die Gemeinsamkeiten mit einer Konservendose weniger offensichtlich.

- Die Geraden halten sich an keine der beiden Vorschriften, gehen also weder alle durch denselben Punkt noch weisen sie in dieselbe Richtung. Ein einigermaßen bekanntes Beispiel ist das von Paul Schatz erfundene Oloid. Mit den Freiheiten, die sich die Geraden nehmen können, ist es trotzdem nicht weit her. Sie müssen sämtlich Tangenten an ein und dieselbe Raumkurve sein, die so genannte Gratlinie. Damit die Fläche nicht eine langweilige Ebene ist, darf die Gratlinie nicht in einer Ebene liegen, muss also nicht nur gekrümmt, sondern auch verwunden sein. Allem Anschein nach hilft diese Kurve einem allerdings kaum beim Verständnis der Fläche, die sie definiert.

Der abstrakte Baukasten für das krumme Origami enthält also sozusagen drei Typen elementarer Bauklötze. Jetzt geht es darum, sie zusammenzufügen, so dass zum Beispiel

ein Stück Zylinder und ein Stück Kegel, nur durch eine krumme Knicklinie voneinander getrennt, aus einem einzigen Stück Papier entstehen.

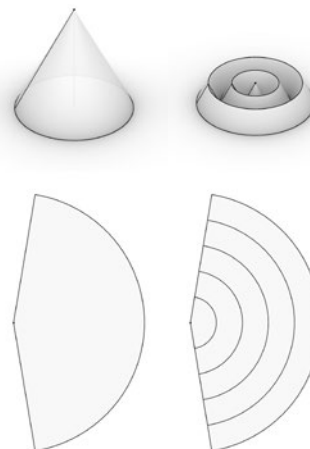
Eine allgemeine Theorie dazu gibt es offenbar noch nicht. Man nähert sich dem Thema über verschiedene Spezialfälle, gezieltes Herumprobieren und manchmal einen glücklichen Zufall.

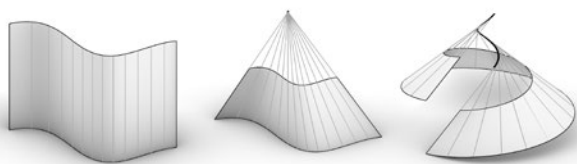
Die Künstlerin Susan Latham aus Santa Fe (New Mexico) entdeckte, dass man die so genannte Vesica piscis (»Fischblase«) elegant und knitterfrei zusammenfalten kann, und das aus Papier wie aus Bronzeblech (siehe »Bronzeskulptur«). Es handelt sich um zwei gleich große Kreise, deren Mittelpunkte auf dem Umfang des jeweils anderen Kreises liegen. Die Figur diente nicht nur in Euklids »Elementen« zur Konstruktion eines gleichseitigen Dreiecks, sondern findet auch Anwendung in der Sakralarchitektur und der esoterischen »heiligen Geometrie«.

Ausgerechnet in einer Folge der populären Fernsehserie »Breaking Bad« war im Hintergrund eine solche Skulptur zu sehen. Die erregte das Interesse des Londoner Produktdesigners Tony Wills, der seinerseits mit abwickelbaren Flächen umfangreiche Experimente angestellt hatte. Insbesondere hatte er entdeckt, dass man zwei gleiche Ellipsen aus Papier, beliebig gegeneinander verdreht, an ihren Umfängen zusammenkleben kann und dabei glatte abwickelbare Flächen erhält. Er nennt diese Gebilde »D-Forms«, weil zwei um 90 Grad gegeneinander verdrehte Ellipsen einen Körper ergeben, dessen Querschnitt wie der Buchstabe D aussieht. Darüber hinaus fügen sich erfahrungsgemäß zwei beliebige Flächenstücke zu einem Paar abwickelbarer Flächen zusammen, wenn ihre Randkurven nicht allzu wild gekrümmt und vor allem gleich lang sind. Inzwischen gibt es sogar einen Beweis dafür, unter der zusätzlichen Voraussetzung, dass die beiden Flächenstücke konvex, das heißt, frei von Eindruckungen und knickfrei sind.

Diese theoretischen Mittel standen Tony Wills damals jedoch nicht zur Verfügung. Insbesondere konnte er die Vesica piscis, die sich aus Papier ohne größere Mühe falten lässt, so beschreiben, dass er die gefaltete Form beispielsweise mit einem 3-D-Drucker hätte herstellen können. Daraufhin wandte er sich an den Wiener Mathematiker und Geometriespezialisten Helmut Pottmann. Dessen Studentin Klara Mundilova hatte in ihrer Diplomarbeit die theoreti-

KEGEL Indem man die beiden Kanten eines Kreissektors aneinanderlegt, biegt sich dieser zum Kreiskegel (links). Für die Praxis muss man sich eine Kleblasche, die beide Kanten zusammenhält, dazudenken. Mehrere »Scheiben« eines Kegelmantels, abwechselnd aufwärts und abwärts orientiert, lassen sich aus einem einzigen Stück Papier zusammenbauen (rechts).





DIE DREI TYPEN ABWICKELBARER FLÄCHEN Zylinder, Kegel und Tangentenfläche.

schen Grundlagen für das Origami mit krummen Faltlinien erarbeitet. Mit diesem Werkzeug konnte sie nachweisen, dass die Innenfläche des »Papageienschnabels« in der gefalteten Vesica piscis zylindrisch und die Außenflächen kegelförmig sind – jeweils im generalisierten Sinn.

Von der Vesica piscis aus arbeitete sich Klara Mundilova verallgemeinernd weiter vor. Denken Sie sich ein Stück Papier auf dem Tisch, das entlang einer gekrümmten Linie abgeschnitten ist. Zusätzlich ist auf dem Papier eine Schar von Geraden eingezeichnet, die bei der nun folgenden Auffaltung Geraden bleiben sollen. Nun heben Sie das Papier am anderen Ende langsam an, derart dass die Randkurve stets auf dem Tisch bleibt. Dabei muss sich das Papier krümmen, und zwar unter Einhaltung der Vorschrift

Abwickelbare Flächen

Man kann ein Stück Papier mühelos in eine Richtung verbiegen, aber nicht in mehrere zugleich; beim Versuch würde es alsbald zu knittern beginnen. Anders ausgedrückt: Ist das Papier irgendwie gekrümmt, bleibt ihm nichts anderes übrig, als in der anderen Richtung – genauer: in der Richtung, die auf der Richtung maximaler Krümmung senkrecht steht – ungekrümmt zu bleiben.

Die mathematische Idealisierung einer Papierfläche, eine »abwickelbare Fläche«, muss daher aus lauter Geradenstücken bestehen. Jeder Punkt der Fläche ist in einer Geraden enthalten, die ganz in der Fläche liegt – jedenfalls bis zum Rand der möglicherweise begrenzten Fläche. Und nicht nur das: Die Tangentialebene, die man an jeden Punkt der Fläche anlegen kann, muss entlang einer solchen Geraden stets dieselbe bleiben.

Das wird augenfällig an einer abwickelbaren Fläche wie dem Oloid. Wenn dieses mit seiner charakteristischen Wackelbewegung auf einem schräg gestellten Tisch bergab rollt, berührt in jedem Moment eines dieser Geradenstücke vollständig die Tischfläche.

Im Gegensatz dazu besteht eine Fläche wie das hyperbolische Paraboloid zwar aus lauter Geraden, aber entlang jeder Geraden ändert sich die Tangentialebene.

für die Geraden. Klara Mundilova gelang es, diesen Prozess mathematisch zu beschreiben. Er funktioniert nur, wenn sich die Krümmung der vorgegebenen Randkurve in gewissen Grenzen hält, die man gleichfalls ausrechnen kann.

Jetzt denkt man sich das Papier nicht mehr abgeschnitten, sondern nur an der bisherigen Schnittlinie eingeritzt, so dass es sich entlang dieser Linie bereitwillig falten lässt. Auf die Teilflächen beiderseits dieser Linie kann man die genannten Berechnungen anwenden – und unter günstigen Voraussetzungen auch umkehren. Das heißt: Statt zu gegebener Faltlinie die Formen zu berechnen, die sich durch Auffalten ergeben, stellt man Bedingungen an die aufgefaltete Fläche und erhält daraus Bedingungen für die Faltkurve (siehe »Zylinder und Kegel aus einem Stück«). Dabei ergibt es sich, dass die Flächen beiderseits der Kurve – genauer: ihre Tangentialebenen – in jedem Punkt gleiche Winkel mit der Ebene bilden müssen. Inzwischen sind diese Konstruktionen in Form eines Zubehörs (»plug-in«) namens »Lotus« zur Geometrie-Software Rhino/Grasshopper allgemein verfügbar.

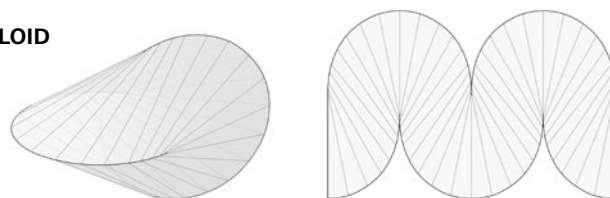
Unter Anwendung der beschriebenen Techniken gelang es Mundilova, gerundete, abwickelbare Formen der fünf platonischen Körper zu finden. Die Technik ist auf weitere geometrische Körper (Polyeder) verallgemeinerbar; sie funktioniert am überzeugendsten, wenn das Polyeder sich sauber in eine umgebende Kugel einfügt. Dann kann man es nämlich gewissermaßen aufblasen, bis seine Kanten auf der Oberfläche der Kugel verlaufen. Und zwar handelt es sich um Stücke von Großkreisen, das sind Kreise auf der Kugel, deren Mittelpunkt mit dem Kugelmittelpunkt zusammenfällt.

Nun wickelt man in Gedanken die Kugel in Papier ein, und zwar knickfrei. Das Einwickelpapier wird also zu einer zylindrischen Hülle, welche die Kugel gerade in einem solchen Großkreis berührt. Von dem gedachten Einwickelpapier behält man nur einen schmalen Streifen übrig, der gerade eine Kante des aufgeblasenen Polyeders bedeckt, mit etwas Überlapp. Wo sich in einer Ecke des Körpers mehrere Kanten treffen, liegen die zugehörigen Papierstreifen teilweise übereinander. Diesen Zwickel ersetzt man durch ein ebenes Stück Papier.

Nachdem derart das Kantengerüst des Polyeders hergestellt ist, gilt es seine Flächen zu füllen. Das gelingt mit Kegeln, die man mit Mundilovas Techniken über geeignete Knicklinien beiderseits an die zylindrischen Streifen ansetzen kann. Dabei können die Kegelstücke, die an benachbarten Kanten angeschlossen sind, so geformt werden, dass sie lückenlos, wenn auch nicht knickfrei, zusammenpassen und eine gemeinsame Spitze haben.

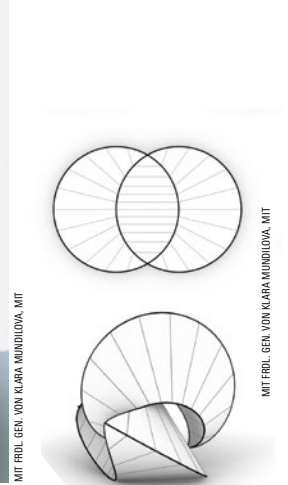
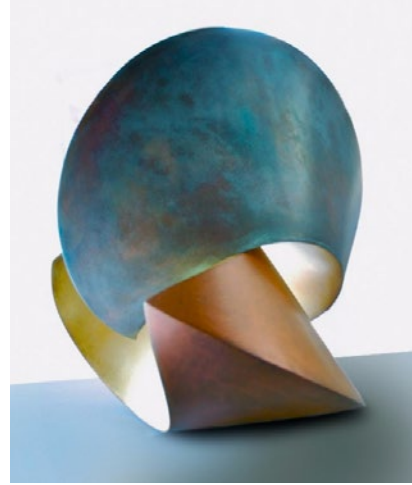
Allerdings weisen diese Spitzen unvermeidlich nach innen. Wo das ursprüngliche Polyeder seine Flächenmittel-

OLOID





KLARA MUNDILOVA (rechts) hat ein Kunstwerk von Susan Latham (links) mathematisch analysiert.



BRONZESKULPTUR von Susan Latham, rechts: Die »Fischblase« in der Ebene und in zusammengefügter Form.

punkte hatte, gähnen hier ziemlich tiefe und unschöne Krater. Aber dem ist abzuhelpen. Mit dem eingangs geschilderten Verfahren macht man aus jedem Krater einen verallgemeinerten mexikanischen Hut, und die ursprüngliche Form des Polyeders ist schon fast wiederhergestellt.

Prinzipiell kann man einen solchen Körper aus einem einzigen Stück Papier herstellen. Das trägt allerdings zahlreiche krumme Knicklinien und muss an vielen Stellen zusammengeklebt werden, nicht anders als sein gewöhnliches, von ebenen Flächen begrenztes Gegenstück.

Inzwischen promoviert Klara Mundilova am Massachusetts Institute of Technology. Dort stieß sie zu einer Gruppe, die von einem gänzlich anderen Ausgangspunkt aus an das krumme Origami geriet.

Eigentlich kennt die Fachwelt David Huffman (1925–1999) als einen Pionier der Informationstheorie. Er erfand Anfang der 1950er Jahre ein Verfahren zur sparsamen Codierung, mit dem er das Prinzip des klassischen Morsealphabets verallgemeinerte: Man verwendet kurze Zeichenfolgen für die häufigen Buchstaben und lange für die selte-

Zylinder und Kegel aus einem Stück

Auf dem Tisch sei eine Kurve $C(s)$ gezeichnet. Stellen Sie sich ein Blatt Papier vor, das aufrecht auf dem Tisch steht und dessen (gerade) Unterkante genau auf der Kurve C verläuft. Dann bildet das Papier einen (verallgemeinerten) Zylinder. Wenn die Kurve C speziell ein Kreisbogen ist, handelt es sich sogar um einen herkömmlichen Kreiszylinder.

An diesen Zylinder soll jetzt ein Kegel angesetzt werden, derart dass beide Flächen aus demselben Stück Papier gefaltet werden können. Es stellt sich heraus, dass man innerhalb gewisser Grenzen sowohl bestimmen kann, wo im Raum die Spitze V des Kegels liegen soll, als auch, wo auf dem Papier der Punkt v liegen soll, der im gefalteten Zustand zu V wird. (Allgemein bezeichnen Großbuchstaben die Größen im räumlich gefalteten Gebilde, Kleinbuchstaben die

entsprechenden Größen auf dem flach liegenden Papier.) Damit ist die Dispositionsfreiheit allerdings schon erschöpft. Insbesondere liegt mit der Wahl von V und v (sowie der Bodenkurve C) die Gestalt des Kegels bereits fest.

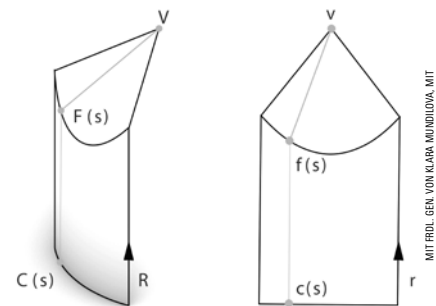
Der Abstand von der Kegelspitze zu jedem Punkt der zu findenden Faltlinie $f(s)$ beziehungsweise $F(s)$ muss nämlich im flachen wie im gefalteten Zustand derselbe sein:

$$|F(s) - V|^2 = |f(s) - v|^2$$

Für die Höhe $h(s)$ der Faltlinie $f(s) = (s, h(s))$ über der Unterkante des Papiers läuft das nach einigen Umformungen auf die Gleichung

$$h(s) = \frac{1}{2} \frac{|v - c(s)|^2 - |V - C(s)|^2}{v_y - V_z}$$

hinaus. Dabei ist v_y die y -Koordinate der Kegelspitze v auf dem Papier



und V_z die z -Koordinate der Kegelspitze V im Raum.

An dieser Formel werden einige der Einschränkungen sichtbar, die man bei der Wahl von V und v einhalten muss. So darf der Nenner nicht null werden; es muss sogar v_y größer als V_z sein, damit die Faltlinie nicht »unter den Tisch« rutscht, das heißt negative y -Werte annimmt. Wer den Zylinder von außen sieht, dem zeigt sich der Kegel zwangsläufig von innen. Und nur unter speziellen Wahlen von C , V und v kommt tatsächlich ein Kreiskegel heraus.

HUFFMAN-CONE Aus einem Kegel lässt sich ein mexikanischer Hut basteln.



CHRISTOPH RÜPPE

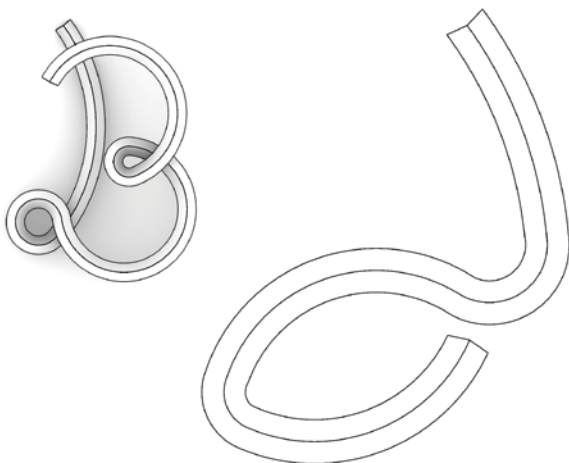
neren, und zwar derart, dass das Ende jeder solchen Zeichenfolge für den Empfänger der Nachricht erkennbar ist. Dadurch minimiert man die Zahl der insgesamt zu übermittelnden Zeichen.

Nebenher befasste sich Huffman intensiv mit den Formen, die man mit gekrümmten Knicklinien aus Papier erzeugen kann (siehe »Huffman-Cone«). Veröffentlicht hat er kaum etwas zu dem Thema, aber der Nachwelt eine umfangreiche Sammlung an Werken und Notizen hinterlassen.

An deren Aufarbeitung arbeitet ein Mensch, dessen ungewöhnliche Karriere bereits einiges Aufsehen erregt hat: Erik Demaine, Jahrgang 1981. Er ist nie zur Schule gegangen, sondern erhielt von seinem Vater Unterricht, bis er mit 12 Jahren sein Studium aufnahm, mit 20 promovierte und unmittelbar darauf zum Professor am MIT berufen wurde. Hauptsächlich forschen nun Vater und Sohn über Themen der theoretischen Informatik. Nebenher haben sie sich durch ihre Skulpturen aus in Kreislinien gefaltetem Papier (siehe »Gefaltete Kunst«, S. 85) auch als Künstler einen Namen gemacht.

Gemeinsam mit Mundilova haben sie nun einen wesentlichen Schritt zu dem eingangs genannten Ziel getan: Finde die krumme Faltlinie mit der Eigenschaft, dass das entlang dieser Linie gefaltete Papier eine vorgegebene Form annimmt. Für den Fall, dass diese Form ihrerseits ein Wall mit dreieckigem Querschnitt ist, also eine ebene Kurve mit einem Stück Böschung zu beiden Seiten, haben die drei einen Algorithmus geschrieben, der die zugehörige Faltkurve auf dem ebenen Papierstück errechnet (siehe »Zu einer gefalteten Form«). Das lässt sich auf den Fall verallgemei-

ZU EINER GEFALTETEN FORM (links), die aussieht wie der Buchstabe B – geschwungen geschrieben, damit die fertige Kurve überall eine Tangente hat –, ist die Faltkurve auf dem flachen Papier (rechts) deutlich weniger gekrümmt als das Endergebnis. Berechnet mit dem Algorithmus »Curved Crease Designer« von Demaine, Demaine und Mundilova.



MIT FRIEDRICH VON KLARA MUNDILOVA, MIT



MIT FRIEDRICH VON JEANNINE MOSELY

DIE KNOSPE der Künstlerin Jeannine Mosely ist mit krummen Faltlinien, aber im Übrigen getreu der Origami-Tradition aus einem quadratischen Stück Papier gefaltet. Die Faltlinien sind in der Urversion (hinten, rot) Kreisbögen; das Design erlaubt jedoch beträchtliche Variationen. Klara Mundilova hat die Urform mit der Software »Lotus« rekonstruiert.

nern, dass das fertig gefaltete Produkt nicht auf dem Tisch aufliegt, sondern sich schraubenförmig in die Höhe windet. Unter <http://erikdemaine.org/fonts/curvedcrease/design.html> können Sie Ihre eigene Kurve mit Böschung entwerfen und sich die zugehörige Faltkurve ausrechnen lassen.

Ist das alles einfach eine nette Spielerei? Nicht nur. Architekten interessieren sich für abwickelbare Flächen, vor allem dann, wenn es um gekrümmte Wände oder Dächer geht. Das kunstvoll geformte Dach eines spektakulären Gebäudes soll nicht nur attraktiv aussehen; gleichzeitig sollen auch die Kosten nicht ausufern. Da bieten sich abwickelbare Flächen an, weil sie ebenso wie Papier aus flächigen Materialien wie Blech, transparentem Kunststoff oder sogar – in Grenzen – Sperrholz zurechtgebogen werden können. Gemeinsam mit dem Architekten Rupert Maleczek und dem Mathematiker Tomohiro Tachi aus Tokio hat Mundilova ihr Verfahren für die platonischen Körper verallgemeinert: Aus einem Entwurf, in dem ebene Flächen in einer Kante zusammentreffen, wird eine abgerundete, abwickelbare Gesamtfläche aus Ebenen-, Zylinder- und Kegelsegmenten, die an jeder Stelle eine Tangentialebene hat. ◀

QUELLEN

Demaine, E. D. et al.: Design of circular-arc curved creases of constant fold angle. Bridges 2020 Conference Proceedings, 2020

Huffman, D. A.: Curvature and creases: A primer on paper. IEEE Transactions on Computers C-25, 1976

Mundilova, K., Wills, T.: Folding the vesica piscis. Bridges 2018 Conference Proceedings, 2018

Mundilova, K.: On mathematical folding of curved crease origami: Sliding developables and parametrizations of folds into cylinders and cones. Computer Aided Design 115, 2019

Sharp, J. et al.: D-Forms: Surprising new 3-D forms from flat curved shapes. Tarquin Publications, 2009

REZENSIONEN



GRÜNER STROM Auf welche Technologie sollte man künftig setzen, um grünen Strom zu produzieren?

ENERGIEWENDE EINE (NOTWENDIGE) ZUMUTUNG

Das Autorenpaar Cornelia und Volker Quaschnig bringt kompakt auf den Punkt, welche Maßnahmen auf dem Weg zu einer klimaneutralen Energieversorgung nötig sind. Ganz unbekannt sind die meisten Aspekte nicht – der Mehrwert ergibt sich aus der gebündelten Zusammenstellung.

► Das Buch ist ein Appell, der schon auf der ersten Seite mit der lautes-ten aller möglichen Alarmglocken beginnt: »Bekommen wir die Klimakri-se nicht in den Griff, wird sie voraus-sichtlich unsere komplette Zivilisation zerstören.« Das muss man erst mal sacken lassen. Ähnlich apokalyptische Worte findet man im weiteren Buch nicht, klare Mahnungen ziehen sich aber wie ein roter Faden durch das gesamte Werk: »kommenden Genera-tionen eine Chance geben«, »die Welt retten«, »ein lebenswerter Zustand«, »nicht mehr warten« sind nur einige Beispiele dafür.

Nach einer grundsätzlichen Ab-handlung der naturwissenschaftlichen Hintergründe des Klimawandels und der internationalen sowie nationalen Klimapolitik (die nicht gut wegkom-men) beschäftigen sich die Informati-kerin Cornelia Quaschnig und ihr Mann Volker Quaschnig, Professor für Regenerative Energiesysteme, in zehn weiteren Kapiteln mit verschie-densten Technologien. Sie untersu-chen unter anderem, ob diese geeig-net sind, um einen Ausweg aus der

Klimakrise zu bieten. Thematisiert werden etwa Fotovoltaik und Wind-energie, Wasserstoff, Elektromobilität sowie Energieimporte. Dabei sprechen die Autoren auch andere Aspekte wie die individuelle Ernährung an.

Das Duo bringt die relevanten Themen auf den Punkt und rechnet aus, was machbar ist und was sich eher als Wunschtraum entpuppen dürfte. Unter dem Strich ergibt sich ein eindeutiges Fazit. Es braucht vor allem Wind- und Solarenergie. Die Quasch-nings machen unmissverständlich klar, dass ein Wiederaufleben der Kernener-gie keine Lösung ist und aktuell nur drei Prozent des gesamten Endener-giebedarfs in Deutschland deckt. Nein, auch das Entziehen von Kohlendioxid aus der Luft und unterirdisches Spei-chern sei keine Option. Ebenso wenig sei Wasserstoff eine Lösung für Pkw. Stattdessen sollte sich die Technologie auf begrenzte Einsatzgebiete wie Langzeitstromspeicherung, Industrie sowie Flug- und Schiffsverkehr be-schränken. Und ja: Es brauche bessere Wärmedämmung und Wärmepumpen, Elektromobilität mit echtem grünem Strom aus erneuerbaren Energien, eine Ausweisung von zwei Prozent der Landesfläche für Windenergie und ver-änderte Ernährungsgewohnheiten. Das Duo rechnet vor, wie das möglich ist, ohne dass alles teurer wird. Im Gegenteil, Strom aus neuen Kernkraft-werken, so schreiben sie, sei sogar zwei- bis dreimal so teuer wie jener aus modernen Fotovoltaikanlagen.

Der Appell ist zweifelsohne richtig, und den Wegen, die die Quaschnings aufzeigen, sollte man folgen. Sie schreiben nicht nur darüber, sondern leben ihre Überzeugungen. Sie ver-sorgen ihr Elektroauto mit eigenem Solarstrom, ernähren sich vegan und haben ihr Haus energieeffizient aufge-stellt. Zum Teil wirken Sätze wie »Wir würden heute auch nie wieder in ein schlecht gedämmtes Gebäude ohne automatische Lüftung ziehen wollen« oder »Wir fliegen deshalb seit einiger Zeit nicht mehr ... Es ist erstaunlich, dass viele Menschen das Fliegen toll finden. Vermutlich bedient es die Sehnsucht nach verklärten Reisezie-len« etwas elitär. Auf lange Sicht

rechnet sich die perfekte Dämmung sicherlich, aber die Grundinvestition muss man sich erst einmal leisten können. Ganz zu schweigen von Mietern, die froh sind, überhaupt eine bezahlbare Wohnung zu finden – dann tritt die automatische Lüftungsanlage auf der Prioritätenliste wahrscheinlich etwas in den Hintergrund.

Obwohl das Buch das inzwischen durchaus vorhandene Klimabewusst-sein der Menschen an der einen oder anderen Stelle unterschätzt, ist es lesenswert und zeigt die notwendigen Schritte klar auf. Jetzt müssen sie nur noch gegangen werden.

Tim Haarmann ist Geograf und arbeitet in Bonn.

GESCHICHTE VON GIFTMISCHERN, SPIONEN UND UNTER- DRÜCKTEN FRAUEN

»Dark Rome« widmet sich den Skandalen und Intrigen im Römi-schen Reich – und lässt dabei nicht das echte Leben der Römer außer Acht.

► Die römische Geschichte ist reich an Exzessen, Intrigen, menschli-chen Abgründen, Brot und Spielen: Da ist Kaiser Nero, der sich am brennen-den Rom ergötzt und ein Lied vom Untergang Trojas angestimmt haben soll. Und hat er nicht das Feuer viel-leicht sogar selbst gelegt?! Und Kaiser Elagabal, der gern in Frauenkleidern durch die Gegend getanzt ist, bis er dann mit Anfang 20 ermordet wurde. So weit, so normal.

Bei oberflächlicher Betrachtung könnte man das Buch »Dark Rome« von Michael Sommer für eine Samm-lung der saftigsten Skandale halten: Auf dem Titel ist ein Totenkopf-Mosaik abgebildet. »Das geheime Leben der Römer« heißt der Untertitel.

Und in der Tat wird den Leserinnen und Lesern einiges vorgesetzt: Wie Kaiser Tiberius nach zehn Jahren im Amt die Regierungsgeschäfte satt-hatte, sich nach Capri zurückzog und seiner Sexlust frönte. Von überall ließ

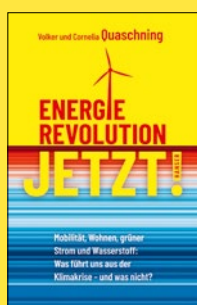
Volker Quaschnig,
Cornelia Quaschnig

ENERGIEREVO- LUTION JETZT!

Mobilität, Wohnen,
grüner Strom und
Wasserstoff: Was
führt uns aus der
Klimakrise – und was nicht?

Hanser, München
2022

288 S., € 20,–



er wohl junge Mädchen und Lustknaben herbeischaffen, die sich dann vor seinen Augen zu vergnügen hatten. Wie sein Nachfolger Caligula sich bei Gastmahlen die Frauen vornehmer Senatoren habe vorführen lassen, mit denen er anschließend selbst verschwand, um später – an den Tisch zurückgekehrt – von ihren körperlichen Vorzügen und Nachteilen zu berichten. Auch über die Ehefrauen der Kaiser gibt es wüste Geschichten. So soll sich Claudius' Frau Messalina nachts regelmäßig aus dem Palast geschlichen haben, um sich als Prostituierte zu verdingen. Angeblich.

Sommer weidet sich aber nicht an den kolportierten Skandalgeschichten. Vielmehr rückt er sie in den rechten

herrschenden Kaiser konnten sich häufig gänzlich ungebremst ihren Gelüsten hingeben. Und wer Macht hatte, konnte sich selbst als Frau eher über die geltenden Moralkodizes hinwegsetzen.

Grundsätzlich aber hatten Ehefrauen – anders als Männer – treu und sittsam zu sein und dem Staat möglichst viel Nachwuchs zu gebären. Sommer, der an der Universität Oldenburg Professor für Alte Geschichte ist und zur Mentalitäts- und Sozialgeschichte forscht, macht diese moralischen Doppelstandards deutlich. Und wirft so ein kurzes Schlaglicht auf die Schicksale der römischen Frauen, die in der Geschichtsschreibung sonst kaum eine Rolle spielen. Auch in anderen Kapiteln geht es darum, hinter den Herrschernamen und Jahreszahlen echte Menschen und Lebensverhältnisse aufscheinen zu lassen.

Eine besondere Form der Alltagsgeschichte, auf die der Autor ausführlich eingeht, hat sich in kleinen Bleitafeln, so genannten »defixiones«, erhalten. Darauf wurden konkrete Bitten an die Götter (aber auch Verwünschungen) festgehalten: Auf einem Täfelchen aus dem 5. Jahrhundert, das in Syrien gefunden wurde, werden die »Blauen« verwünscht, die im Pferderennen gegen die »Grünen« antreten. Auf einer anderen Tafel erbittet ein junger Mann von den Göttern, dass eine gewisse Euphemia ihn »mit wahnsinniger Liebe liebt, mit Zuneigung und mit Sex«. Manche Schreiber der Täfelchen erbitten sich Unterstützung in einem Gerichtsprozess; eine Sklavin wünscht sich inständig, nicht an ein Arbeitshaus für Sklaven verkauft zu werden; ein anderer Sklave hofft, vor dem Tod in seine griechische Heimat zurückkehren zu können.

Michael Sommer hat mit »Dark Rome« ein Buch geschrieben, das die Neugier vieler Leserinnen und Leser auf das Menschliche und Allzumenschliche im Alten Rom durchaus bedient. Weil er dabei auch Nebenschauplätze, Randaspekte und Einzelschicksale beleuchtet, haucht er der bis heute hauptsächlich durch Zahlen und Namen übermittelten Geschichte neues Leben ein.

Ralf Stork arbeitet als Naturjournalist und Buchautor in Berlin. Einmal im Monat erscheint auf »Spektrum.de« seine Kolumne »Storks Spezialfutter«.

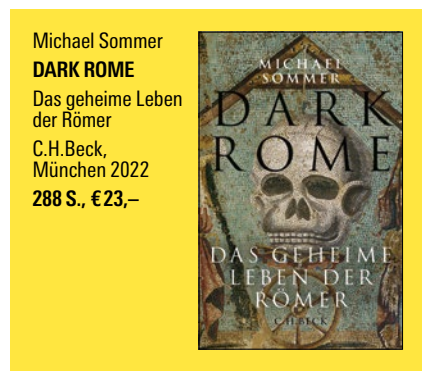
DIGITALISIERUNG SCIENCE UND FICTION

Wie wird sich KI auf unser Leben im Jahr 2041 auswirken? Kai-Fu Lee und Quifan Chen präsentieren dazu zehn realistische Kurzgeschichten mit anschließendem Faktencheck.

► Eine KI-Versicherung überwacht die Handlungen ihrer Kunden und bemisst so den zu zahlenden Beitrag: Darum geht es in der ersten von zehn Zukunftsvisionen für das Jahr 2041, die der Informatiker Kai-Fu Lee zusammen mit dem Sciencefiction-Schriftsteller Quifan Chen verfasst hat. Die futuristische Versicherung bringt einige Vorteile mit sich, wie die Autoren am Fall einer fiktiven indischen Familie verdeutlichen. Sie hören mit dem Rauchen auf, ernähren sich gesünder – und sparen dadurch Geld. Doch nicht alles entwickelt sich positiv: Als die Tochter sich mit einem Jungen aus einem ärmlichen Viertel anfreundet, funkt die KI immer wieder dazwischen, denn bei einem Besuch in der neuen Umgebung erhöht sich die Gefahr für Unfälle, Gewaltverbrechen und Krankheiten. Wie sich herausstellt, scheint die KI vorurteilsbehaftet.

Die neun weiteren Kurzgeschichten sind ähnlich wie dieses Beispiel gehalten. Es handelt sich weder um Zukunftsdystopien, die neue Technologien verteufeln, noch zeigen sich die Autoren uneingeschränkt euphorisch, was künftige Möglichkeiten angeht. Sie versuchen stets, einen sachlichen Blick zu behalten, indem sie sowohl die Vor- als auch die Nachteile der beschriebenen KI-Technik aufzeigen.

Die Kurzgeschichten sind dennoch abwechslungsreich gestaltet und spielen in unterschiedlichen Teilen der Welt: von Südostasien und dem Nahen Osten über Westafrika bis nach Europa, Australien oder Amerika. Dabei decken sie verschiedenste gesellschaftliche Themen ab wie die Pandemiebekämpfung, die automatisierte Arbeitswelt,



Zusammenhang. Fast immer geht es um Macht. Wer seinen Gegnern mit Hilfe von Gerüchten und übler Nachrede moralische Verderbtheit anhängt, kann ihren Ruf nachhaltig zerstören. Das klappt bis heute. Was bei politischen Widersachern zu Lebzeiten gelingt, funktionierte bei den sakrosankten Kaisern meist erst posthum. Ob ein Herrscher gut oder schlecht war, darüber entschied die Nachwelt – allein schon, weil ein kritisches Urteil sonst lebensgefährlich sein konnte. Kam die Gesellschaft zu dem Schluss, der verstorbene Kaiser sei bei den schlechten Herrschern einzuordnen, wurden alle finsternen und schlüpfrigen Geschichten hervorgekramt und etliche dazuerfunden.

Der Autor lässt keinen Zweifel daran, dass an vielen der Erzählungen etwas dran ist. Für die Männer war es sowieso in Ordnung, sich sexuell auszutoben. Die gottgleichen, allein

Kai-Fu Lee, Qiufan Chen

KI 2041

Zehn Zukunfts-
visionen

campus,
Frankfurt 2022

534 S., € 26,–



ein bedingungsloses Grundeinkommen, Kryptografie und Datenschutz sowie Glücksforschung. Die Geschichten sind spannend und lebendig geschrieben, bisweilen fällt es schwer, das Buch aus der Hand zu legen.

Im Anschluss an jede Erzählung findet sich ein Faktencheck. Darin beschreiben Lee und Chen die Technologien, die in der Kurzgeschichte auftauchen, und ordnen sie ein. Die

vorgestellten KI-Systeme sind dabei keineswegs völlig aus der Luft gegriffen, sondern bauen stets auf heutigen Konzepten auf. Daher erklären Lee und Chen zunächst, was die Technik aktuell schon vermag – und welche Möglichkeiten sich höchstwahrscheinlich in 20 Jahren eröffnen werden.

In ihrem Vorwort beschreiben die Autoren ihr ungewöhnliches Vorgehen zur Entstehung des Werks. Lee trat mit der Idee für das Buch an Chen heran und bat ihn um Hilfe für den kreativen Teil. Er sollte fesselnde Geschichten um die trockenen Technikthemen spannen. Den Beginn der Arbeit machte allerdings Lee, indem er eine Technologiekarte entwarf, die vorher-sagt, wann welche Systeme marktreif wären. Dabei kann Lee auf ein breites Sachverständnis und viel Erfahrung zurückgreifen: Er forscht seit 40 Jahren an KI-Themen und war an Projekten bei zahlreichen Unternehmen wie Apple, Microsoft und Google beteiligt.

Tatsächlich erscheinen die Geschichten durchaus realistisch. Vor allem, wenn man bedenkt, wie sich die Technologie in den letzten 20 Jahren entwickelt hat. Die kurzen Anhänge über die KI-Grundlagen lesen sich gut und verschaffen einen umfassenden Überblick zu den wichtigsten Themen des Gebiets, von neuronalen Netzen, Computer Vision, Sprachassistenten, aber auch GANs und spezielle Beispiele wie GPT-3. An manchen Stellen würde man allerdings gern mehr erfahren; leider haben die Verfasser auf ein Literaturverzeichnis verzichtet.

Das ist nur ein kleines Manko für ein sonst hervorragendes Buch. Es spricht gleichermaßen Laien wie in dem Fach bewanderte Personen an, denn es macht Spaß, den Zukunftsvisionen von Chen und Lee zu folgen. Das Werk lässt sich als Wegweiser nutzen, der aufzeigt, welches Potenzial in den Technologien steckt, aber auch mahnt, die möglichen Auswirkungen der Nutzung

Die Spektrum eLearningFlat



Mit der **eLearningFlat** erhalten Sie Zugriff auf eine Auswahl von sechs bis zu 40-minütigen E-Learning-Kursen aus dem Programm von iversity/SpringerNature.

Jeden Monat wird ein Kurs ausgetauscht, so dass Sie jährlich auf bis zu zwölf Kurse zugreifen können.

€ 99,– im Jahresabo oder € 8,99 im jederzeit kündbaren Monatsabo.

[Spektrum.de/aktion/elearningflat](https://www.spektrum.de/aktion/elearningflat)



genauer zu hinterfragen. Denn wie die Autoren immer wieder verdeutlichen: Die eigentliche Gefahr geht nicht von der Technologie aus, sondern von den Menschen, die sie nutzen.

Manon Bischoff ist Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«, vorrangig für die Bereiche Mathematik und Informatik.

BIOGRAFIE WAS AFFEN MIT HOFFNUNG ZU TUN HABEN

Das Buch der Verhaltensforscherin Jane Goodall und des Autors Douglas Abrams ist eine Kombination aus Interview und Roman, gewürzt mit Fakten über unsere Umwelt sowie voller philosophischen Überlegungen.

Die Frage nach Hoffnung ist aktueller denn je. Doch was ist damit überhaupt gemeint? Diese und ähnliche Themen stehen im Zentrum des »Buchs der Hoffnung« vom Schriftsteller Douglas Abrams und der Verhaltensforscherin Jane Goodall. Herausgekommen ist eine Biografie der Wissenschaftlerin, als Kombination aus Interview und Roman, gewürzt mit Informationen über unsere Umwelt sowie ethisch-philosophischen Überlegungen.

Jane Goodall, 1934 in London geboren, gilt als eine der bedeutendsten Forscherinnen und ist inzwischen weltbekannte Umweltaktivistin. Sie sieht sich jedoch lieber als Naturforscherin, die sich nicht bloß auf Fakten und Messbares konzentriert. Wie man lesen kann, hat sie sich ihre Kenntnisse selbst erarbeitet – als einfache Büroangestellte wurde sie quasi zufällig damit betraut, mitten in Tansania das Verhalten der Schimpansen zu studieren. Es folgte ein Leben mit vielen Hindernissen und persönlichen Schicksalsschlägen. Ihr Buch soll allerdings eine Einladung zur Hoffnung sein, heißt es im einleitenden Kapitel. Es soll zeigen, wie wir selbst in schweren Zeiten den Mut nicht verlieren. Jane – im Werk sind die Leserinnen und Leser mit ihr und ihrem Koautor per du – hat dafür vier Gründe.

Jane Goodall,
Douglas Abrams
**DAS BUCH DER
HOFFNUNG**
Goldmann,
München 2021
273 S., € 22,–



Da ist zunächst einmal der menschliche Intellekt, der sich wesentlich von den Fähigkeiten von Tieren unterscheidet. So wie im Rest des Buchs spürt man immer wieder, dass sie sich mit solchen Fragestellungen ausführlich auseinandergesetzt hat. Insbesondere bei der Rettung der Umwelt seien die Herausforderungen groß, macht Jane bewusst. Doch Menschen hätten schon so vieles geplant, erschaffen und entwickelt – sollten sie nicht auch dafür Lösungen finden können? Mit Sätzen wie »Ich empfinde Ehrfurcht und Faszination für diese Welt (...) Aber wir zerstören sie, bevor wir sie ganz verstanden haben« kommen Doug und Jane automatisch zu ihrem zweiten Hoffnungsgrund: die Widerstandskraft der Natur.

Zu den Beispielen gehört die erstaunliche Geschichte vom »Survivor Tree«: Einige Wochen nach dem Terroranschlag auf das World Trade Center 2001 wurde bei Aufräumarbeiten in der Verwüstung die Hälfte einer verkohlten Chinesischen Birne gefunden, an der noch ein kleiner, unversehrt Ast hing. Der Baum bekam eine neue Chance; man versuchte, ihn in einer Baumschule aufzupäppeln – und schaffte es. Er wurde wieder an seinen Heimatort versetzt und trägt nun alljährlich Blüten.

Dem Willen zum Leben kann der Mensch also entgegenkommen. Und wir sind schließlich von einer gesunden Natur abhängig, weiß Jane. Während der Zeit im afrikanischen Gambia habe sie gelernt, dass jedes Lebewesen eine Rolle spielt und alles miteinander verwoben ist, »wie bei einem Teppich. Jedes Mal, wenn eine Art

ausstirbt, bekommt dieser Teppich ein Loch. Je mehr Löcher entstehen, desto schwächer das ganze Ökosystem.«

Jane Goodall ist nicht nur begeistert von Tieren und Pflanzen, sondern ebenso von Kindern. Für sie ist die junge Generation der dritter Punkt, der Hoffnung spendet. Das erfährt man im nächsten Kapitel und lernt damit zugleich den Beginn eines weiteren Lebensabschnitts der unermüdlichen Frau kennen. 1991 rief sie die Jugendorganisation Roots & Shoots in Tansania ins Leben. Die Bewegung ist inzwischen mit Gruppen in vielen Ländern der Welt vertreten und setzt sich ebenso für soziale Themen wie auch für die Umwelt ein. Für Jane steht dahinter die Botschaft, dass jeder, egal ob jung oder alt, Spuren auf diesem Planeten hinterlässt – doch man könne bestimmen, wie diese aussehen.

Dazu passt der vierte Aspekt, der unbeugsame Kampfgeist aller. Jane bezeichnet damit innere Stärke und den Mut, selbst bei miserablen Chancen ein bestimmtes Ziel zu verfolgen. Persönlichkeiten wie Martin Luther King Jr. oder Mahatma Gandhi hätten diesen Kampfgeist vorgelebt. Aber genauso erkennt sie ihn in vielen anderen nicht bekannt gewordenen Menschen, die etwa eine schwere Krankheit bekämpfen. Zugleich macht sie bewusst, wie sehr wir einander brauchen und wie hilfreich gegenseitige Unterstützung sowie sozialer Rückhalt sind.

Mit einem Gedankenaustausch darüber, wie es ihr gelingt, ihre Hoffnung zu bewahren, beginnen die letzten Seiten des Buchs. Es bleibt das lebendig charakterisierte Bild einer bemerkenswerten Frau, zusammen mit vielen Gedankenanstößen und einprägsamen Beispielen. Darunter findet sich etwa Goodalls »Kreislauf der Hoffnung«: Hoffen sei eng mit aktivem Tun verbunden, das zu weiterer Hoffnung führe, meint sie angesichts der Klimakrise. »Wir können hoffen, dass es für eine Umkehr noch nicht zu spät ist. Aber wir wissen auch, dass diese Umkehr nicht stattfinden wird, wenn wir tatenlos bleiben.«

Bettina Pabel ist promovierte Lebensmittelchemikerin und Wissenschaftsjournalistin in Aschaffenburg.

VIELSEITIGES ERDMODELL

Der Geodynamiker Nicolas Coltice berichtete von Computersimulationen, die gleichzeitig die inneren und äußeren Prozesse des Planeten darstellen. (»Das Henne-Ei-Problem der Plattentektonik«, »Spektrum« Februar 2022, S. 50)

Ernst Haugeneder, per E-Mail: Obwohl das nicht explizit erwähnt wurde, nehme ich an, bei den Berechnungen wurden die Einflüsse der Gravitation und der Erdrotation auf die Mantelkonvektion berücksichtigt. Da die Entstehung der Erde vermutlich nicht einbezogen werden konnte, mussten Anfangsbedingungen definiert werden. Welche waren dies?

Den angegebenen Literaturziten habe ich entnommen, dass die verwendete Software auf dem so genannten Yin-Yang-Grid basiert. Das ist, wenn ich es richtig verstanden habe, ein Finite-Differenzen-Verfahren. Auf Grund der großen Unterschiede der Festigkeiten, Zähigkeiten und der relativ schmalen Ränder zwischen den tektonischen Platten erschiene mir ein Finite-Elemente-Verfahren zunächst naheliegender. Wurde in diese Richtung auch überlegt?

Antwort des Autors Nicolas Coltice:

Die Gravitation haben wir einbezogen. Glücklicherweise konnten wir sie bei unseren Berechnungen innerhalb des Mantels als konstant betrachten. Auch die Erddrehung macht sich physikalisch nicht bemerkbar, da die Corioliskraft bei den sehr langsamen Strömungen zu vernachlässigen ist. Um die Anfangsbedingungen zu setzen, lassen wir das Modell bei ortsfesten Kontinenten über eine lange Zeit laufen. Nach mehr als zwei Jahrmilliarden hat die Mantelkonvektion ihre frühesten Zustände gewissermaßen vergessen, und es stellt sich ein Quasi-Gleichgewicht ein.

Wir nutzen ein Finite-Volumen-Verfahren, das den finiten Differenzen in der Tat sehr ähnelt. Die Finite-Elemente-Methode hingegen ist bei solchen Aufgaben oft rechenintensiver. Sie wird durchaus ebenfalls angewendet. Ich kann hier nicht für meinen Kollegen Paul Tackley sprechen, der für die Wahl und die wesentliche Entwicklung verantwortlich war, aber insgesamt sind finite Volumen vielseitig, leicht anpassbar und stellen die Erhaltung wichtiger physikalischer Größen sicher. Übrigens sind die Plattengrenzen in den Konvektionsmodellen keinesfalls unendlich dünn, sondern Regionen niedriger Viskosität.

Kristian Sudmann, per E-Mail: Etwas gewundert hat mich, dass das Ostafrikanische Grabensystem keine Erwähnung findet. Außer im Norden ist die afrikanisch-somalische Platte seit mindestens 70 Millionen Jahren von divergenten Plattenrändern umgeben, die auf den afrikanischen Kontinent keine Zugspannung in Ost-West-Richtung ausüben sollten. Dennoch hat sich diese tausende Kilometer lange Bruchstruktur von Norden nach Süden entwickelt, die stellenweise auch heute noch recht eindrucksvolle Spreizungsraten verzeichnet. Kann man das nicht als Indiz dafür

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. Oder kommentieren Sie im Internet auf 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. Leserbriefe werden in unserer gedruckten und digitalen Heftausgabe veröffentlicht und können so möglicherweise auch anderweitig im Internet auffindbar werden.

sehen, dass zumindest hier Mantelkonvektionskräfte dominieren, während Zugspannungen von weit entfernten Subduktionszonen kaum eine Rolle spielen?

Antwort des Autors Nicolas Coltice:

Für die Somaliplatte trifft das tatsächlich zu. Im Fall der Afrikanischen Platte gibt es Zugspannungen. Deswegen braucht es beim Grabenbruch, bei dem es um die relative Bewegung der zwei Platten geht, beide Komponenten.

OHNE HOHLRAUM KEIN SCHNIPPGERÄUSCH

Unser Kolumnist H. Joachim Schlichting erläuterte, wie beim Zusammendrücken von Daumen und Mittelfinger Energie elastisch gespeichert und schließlich schlagartig freigegeben wird. (»Spektrum« März 2022, »Fingerschnippen mit Knalleffekt«, S. 72)

Michael Modschiedler, per E-Mail: Die Aussage, dass typische Geräusch entstehe erst dadurch, »dass der Finger auf den Handballen unterhalb des Daumens auftritt« müsste vollständigshalber ungefähr lauten: »dass der Finger beim Aufprall auf dem Daumenballen einen Impuls auf eine Luftsäule erzeugt, die sich in der Handhöhle durch die auf dem Ballen aufliegenden Finger bildet«. Wie signifikant diese oft nicht erkannte Luftsäule zum Schnippgeräusch beiträgt, kann dadurch einfach verifiziert werden, indem man mit einem Finger einer Hand kräftig auf den Daumenballen der anderen schlägt, wobei dort alle Finger ausgestreckt bleiben. Auf die Weise kann man nur Patschklänge herstellen.

Nimmt aber eine Hand wieder die für das Schnippen typische Fingerhaltung ein, dann kann man sogar schon dadurch deutlich laute Geräusche erzeugen, dass der Mittelfinger nur durch eine rasche Eigenbewegung auf den Ballen trifft, ohne dabei den Schnalzipuls aus dem Effekt des Übergangs von der Haftreibung zur Gleitreibung zu nutzen. Das gilt auch, wenn man einfach mit einem Finger der anderen Hand in die offen stehende Lücke schlägt. Wer es fertigbringt, beim Schnippen außerdem den kleinen Finger so eng an den Handballen anzulegen, dass sich der ergebende Luftkanal maximal verlängert, kann sehr laute und tiefe Töne erzeugen.

Was der Wind weiß

Kolonisierung mit Hindernissen. Eine Kurzgeschichte von Beth Cato

Der Wind weiß alles. Selbst während er tost, hört er zu. Er versteht jeden Grashalm, jedes Staubkorn, er begreift sogar die Schwere der heimischen Ackererde. Doch in erster Linie möchte er, dass seine Welt überlebt.

Er weiß, dass das Mädchen aufmerksam bereitsteht, mit blinzelnden Augen, während das Shuttle der Gebieterin dort aufsetzt, wo sich einmal der Hauptplatz der Siedlung befand.

Das Mädchen ist der letzte Mensch, der von dieser aufgegebenen Kolonie noch übrig ist. Vor kaum 15 Jahren kamen die Pioniere an, entschlossen, die entlegene Welt zu zähmen. Das Mädchen war das erste hier geborene Kind; es tat auf dem Planeten, den die Menschen Tantalus nennen, seinen ersten Atemzug. Dieser Umstand veränderte das Mädchen in einer Weise, die ihm bis vor wenigen Monaten verborgen geblieben war.

Die Gebieterin steigt aus dem Shuttle, von einer Abordnung Soldaten begleitet.

Das Mädchen geht ihnen entgegen. Es ist schlaksig und so braun wie der Himmel.

»Maribel Rodriguez.« Die Stimme der Gebieterin wird durch eine Maske verstärkt, mit der sie sich zugleich vor der Lungenentzündung schützt, die vom allgegenwärtigen Staub droht. »Du wurdest zu deiner eigenen Sicherheit aus Tantalus ausgewiesen. Bitte komm mit uns an Bord.«

»Nein.« Der Wind senkt seine Stimme, damit die des Mädchens gehört werden kann. Es hat Angst. Es wünscht sich, seine Lieben stünden ihm zur Seite.

»Deine Eltern sind tot. Die Kolonie wurde ausgelöscht.« Das Gesicht der Gebieterin hinter der Maskenscheibe ist freundlich. »Ein wahres Wunder, dass du noch keine schwere Pneumonie entwickelt hast. Die Ärzte werden dich auf der Raumstation untersuchen.«

Die Raumstation der Gebieterin, der Planet der Gebieterin – als könnte sie alles so einfach besitzen! Ihr Konzern hat eine autarke landwirtschaftliche Kooperative geschaffen, um zu untersuchen, wie sich der neue Planet am besten nutzbar machen lässt.

»Verschone mich mit Wundern.« Einst hat das Mädchen gefleht, man möge seine Familie am Leben lassen. Jetzt begreift es, dass der Wind zwar alles weiß, aber nicht alles kontrolliert – nicht einmal die einheimischen Sporen.

Sogar der Wind ist überrascht, dass das Mädchen so lange überlebt hat.

Die Gebieterin gibt ihren Soldaten ein Zeichen. Einer feuert einen Pfeil ab, der ein Betäubungsmittel enthält. Der Wind lässt das Geschoss zu Boden fallen.

»Wie ...«, beginnt die Gebieterin.

»Du hast uns befohlen, riesige Landstriche umzupflügen«, sagt das Mädchen. Die Worte stammen nicht aus

seinem eigenen Kopf; das ist ärgerlich. »Unsere Administratoren wandten ein, solche Methoden hätten schon daheim auf der Erde katastrophale Folgen gehabt. Du befahlst trotzdem, die automatischen Pflüge in Gang zu setzen.«

»Bei dem Krieg, der gegenwärtig auf der Erde herrscht ...«

»Du wusstest, der Verlust der tief verwurzelten einheimischen Gräser würde wahrscheinlich eine Staubwüste erzeugen und dadurch die Menschen krank machen.«

»Ich wollte doch nicht, dass den Kolonisten ein Leid geschieht.« Die Gebieterin ist durch die Anklage sichtlich fassungslos. »Aber es stimmt, ich regte aggressive Produktionsziele an, damit wir die Bevölkerung aufteilen und mit dem Bergbau beginnen können. Die Erde benötigt diese Mineralien, um ...«

»Wir gingen allmählich zu Grunde, aber das war dir egal.«

»Natürlich machte ich mir Sorgen.«

»Nicht genug, um uns zu helfen. Außerdem wurden die Aufzeichnungen der Administratoren gelöscht, sobald sie starben.«

Der Wind spürt das Beben, mit dem das Herz der Gebieterin gegen ihre Anzugshülle schlägt. »Dafür hast du keine Beweise.« Sie gibt den Soldaten ein Zeichen.

Deren Kommandant meldet sich über einen privaten Kanal. »Gebieterin, sie ist keine unmittelbare Bedrohung und außerdem noch ein Kind. Nach den intergalaktischen Statuten ...«

»Sie fabuliert konfus über Dinge, von denen sie nichts versteht. Sie braucht therapeutische Behandlung. Wir müssen sie unter Einsatz von Gewalt evakuieren.«

Das Mädchen bricht fast in hysterisches Kichern aus, während es die vermeintlich private Unterhaltung mithört; es versucht, einen bösen Hustenanfall zu unterdrücken.

»Der Planet möchte, dass ihr verschwindet. Ihr könnt diese Welt nicht nach Belieben umgraben und ihre Minerale abtransportieren.«

Die Gebieterin runzelt die Stirn. »Woher weißt du ... Was soll das heißen, du willst für den gesamten Planeten sprechen? Du leidest ja an Wahnvorstellungen!«

Auch das Mädchen glaubte zu halluzinieren, als der Wind mit ihr zu sprechen anfang, als er zum ersten Mal die Stimme der verstorbenen Mutter annahm – und danach die so vieler anderer. »Tantalus ist nicht die Erde. Ihr könnt diesen Planeten nicht genauso beherrschen und missbrauchen.« Die Worte kommen von den Lippen des Mädchens, nicht aus seinem Kopf, aber es stimmt völlig mit dem Inhalt überein.

Der Wind wählt diesen Moment, um sich zu einem heulenden Wirbelsturm zu steigern. Die Siedlungsstätte verschwindet in einer undurchdringlichen braunen Staubsäule.

»Wir fliegen nicht ohne sie ab«, schreit die Gebieterin.
»Hier geht etwas Ungewöhnliches ...«

»Dieser spontane Tornado hat einen Durchmesser von fast 200 Kilometern, mit uns im Zentrum, und nimmt an Stärke zu. Unsere erste Pflicht ist Ihre Unversehrtheit, Gebieterin. Wir müssen sofort starten.« Ohne Rücksicht auf die Proteste der Gebieterin zerren die Soldaten sie fort.

Der Wind hat ein gewisses Verständnis für menschliche Begriffe wie Gnade und Gerechtigkeit. Er ignoriert die Soldaten, lüftet aber die Maske der Gebieterin gerade so weit, dass sie mit dem nächsten Atemzug ein paar Sporen inhaliert. Mit der Zeit werden sie ihre Wirkung tun.

Das Shuttle hebt ab. Der Wirbelsturm legt sich. Das Mädchen kauert auf allen vieren und hustet. In den letzten Wochen hat sich die schlimme Lungenkrankheit gebessert. Das Mädchen wird – anders als alle anderen – überleben. Manchmal bedauert es das.

»Du hättest mir erlauben sollen, alles mit meinen eigenen Worten zu sagen.« Das Mädchen zieht es vor, laut zu sprechen. »Das ist noch nicht das Ende, bald werden sie mehr Shuttles schicken, mehr Maschinen ...«

»Du hattest Angst.« Die Stimme des Planeten wird vom Wind getragen, und als leises Echo kommt das mehrstimmige Flüstern der Eltern und Nachbarn hinzu. Sie sind mit dem Planeten verschmolzen, auf dem sie starben, nur das Mädchen blieb – trotz seiner ungewöhnlichen Verbindung mit dieser Welt – am Leben. Während sein Blick dem fernen Lichtpunkt des Shuttles folgt, schluckt das Mädchen

seine kindliche Sehnsucht nach einem Wiedersehen mit der Erde hinunter.

Es trauert und vermisst schmerzlich die Gesellschaft wirklicher Menschen an Stelle dieser miteinander verschwimmenden Gespenster – aber es muss dableiben. Tantalus ist seine Heimat. Es wird den Planeten retten.

»Ich bin ein Mensch. Es ist normal, dass ich mich fürchte«, sagt das Mädchen zum Wind. »Aber ich muss allein zurechtkommen. Weißt du, vielleicht muss ich eines Tages an Bord der Raumstation Verhandlungen führen.«

Der Wind weiß von dieser Möglichkeit, und er kennt die Furcht. Die Menschheit hat diese Welt gelehrt, was es heißt, Angst zu haben. Das Mädchen spürt die Stimmung des Winds, und es streichelt die Brise, als wollte es sie beruhigen.

Gemeinsam beobachten sie, wie das Shuttle entschwindet, und gemeinsam sind sie auf alles gefasst. ◀

DIE AUTORIN

Beth Cato lebt in Arizona. Sie ist Autorin der Science-fiction-Serien »Clockwork Dagger« und »Blood of Earth«. Ihre Novelle »Wings of Sorrow and Bone« wurde 2016 für den Nebula Award nominiert.

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 474, S. 446, 2019

Spektrum der Wissenschaft

Chefredaktion: Dr. Daniel Lingenhöhl (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleitung: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Manon Bischoff, Dr. Andreas Jahn, Dr. Karin Schlott, Dr. Frank Schubert, Verena Tang, Mike Zeitz (stellv. Redaktionsleiter);
E-Mail: redaktion@spektrum.de

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Claus Schäfer, Oliver Gabriel, Anke Heinzlmann, Natalie Schäfer

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Lt.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Lt.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Redaktionsassistent: Andrea Roth

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

Assistenz Geschäftsleitung: Stefanie Lacher

Herstellung: Natalie Schäfer

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

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

Übersetzungen: An diesem Heft wirkte mit: Dr. Ingrid Horn

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, 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

Bezugspreise: Einzelheft € 9,30 (D/A/L), CHF 14,-; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 98,40; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 75,-. PDF-Abonnement € 63,-, ermäßigt € 48,-.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder von ABSOLVENTUM MANNHEIM e. V., des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio), des VCBG und von Mensa e. V. erhalten Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.

Anzeigen: E-Mail: anzeigen@spektrum.de, Tel.: 06221 9126-600

Druckunterlagen an: Natalie Schäfer, E-Mail: schaefer@spektrum.de

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 43 vom 1.1. 2022.

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 nachstehenden 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: © 2022 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

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: Laura Helmut
Executive Vice President: Michael Flore
President: Kimberly Lau



Erhältlich im Zeitschriften- und Buchhandelsbuchhandel und beim Pressesachhändler mit diesem Zeichen.



VORSCHAU



SAURITK / GETTY IMAGES / ISTOCK BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

WIE WIR ALTERN

Menschen altern unterschiedlich – abhängig vom Lebensstil, der Ernährung, dem Stresspegel, dem sozialen Umfeld und weiteren Faktoren. Zwar lässt sich die Lebensdauer nicht beliebig verlängern: Die 120 zu überschreiten, ist unwahrscheinlich. Beeinflussen lässt sich aber, wie lange wir agil bleiben. Angesichts weltweit alternder Gesellschaften bekommt das zunehmend Bedeutung.



KULJI YODAN

GIFTIGE ALGEN

Alaskas Küsten werden immer öfter von toxischen Algenblüten heimgesucht. Denn mit dem Klimawandel steigen dort die Wassertemperaturen, was die Vermehrung solcher Organismen begünstigt. Indigene Gemeinschaften versuchen, der wachsenden Vergiftungsgefahr mit wissenschaftlichen Initiativen zu begegnen.



VOLKER SPINGEL / MAX PLANCK INSTITUTE FOR ASTROPHYSICS ET AL

RÜTTELN AM KOSMOLOGISCHEN PRINZIP

Moderne Modelle des Weltraums beruhen auf der Annahme, dass er im Großen und Ganzen überall gleich beschaffen ist. Manche Beobachtungen scheinen dem allerdings zu widersprechen.



DETLEV MÜLLER, MIT FRIEDRICH VON PETER FRÖHLICH, TU BERGAKADEMIE FREIBERG

WERTVOLLES ABWASSER

Ab 2029 dürfen Landwirte ihre Felder nicht mehr mit Klärschlamm düngen. Um die Versorgung mit dem unabdingbaren Nährstoff Phosphor zu sichern, braucht es daher neue Technologien, die das Element aus Klärschlamm und dessen Aschen zurückgewinnen.

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](https://www.spektrum.de/newsletter)

Jetzt **Spektrum** der Wissenschaft abonnieren
und keine Ausgabe mehr verpassen!



Sie haben die freie Wahl

Ob Print, digital oder beides in Kombination:
12 Ausgaben im Jahresabo – für Sie selbst oder
als Geschenk. Mit einem Abo profitieren Sie zudem
von den exklusiven Vorteilen und Angeboten
von **Spektrum** PLUS – wie kostenlosen Downloads,
Vergünstigungen und Redaktionsbesuchen.



Jetzt bestellen:

Telefon: 06221 9126-743

E-Mail: service@spektrum.de

Spektrum.de/aktion/sdwabo

DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.



Spektrum
der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR **11**
17.03.2022

- > Erfolgreicher Test für das erste JWST-Testbild
- > Ist Kaspersky wirklich ein Problem?
- > Studie sieht Permafrostböden kurz vor Kippunkt

TITELTHEMA: PUTINS ATOMWAFFENDROHUNG

Niemand schläft ruhig unter einem nuklearen Schirm

Seit 1945 wurde keine Atomwaffe mehr in einem Krieg eingesetzt. Es ist nicht sehr wahrscheinlich, dass Putin zu nuklearen Waffen greift. Doch allein seine Drohung ist inakzeptabel. Ein Gastbeitrag

TIPPS ZUM ENERGIESPAREN
Energiewende zum Selbermachen

»RUSSISCHE GRIPPE«
Was für eine Coronapandemie im 19. Jahrhundert spricht

ARTENSCHUTZABKOMMEN CITES
Der Jumbo-Kuhhandel

Mit ausgewählten Inhalten aus **nature**

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im monatlich kündbaren Abonnement € 0,92 je Ausgabe; ermäßigt sogar nur € 0,69.

Jetzt abonnieren und keine Ausgabe mehr verpassen!

[Spektrum.de/aktion/wocheabo](https://www.spektrum.de/aktion/wocheabo)

