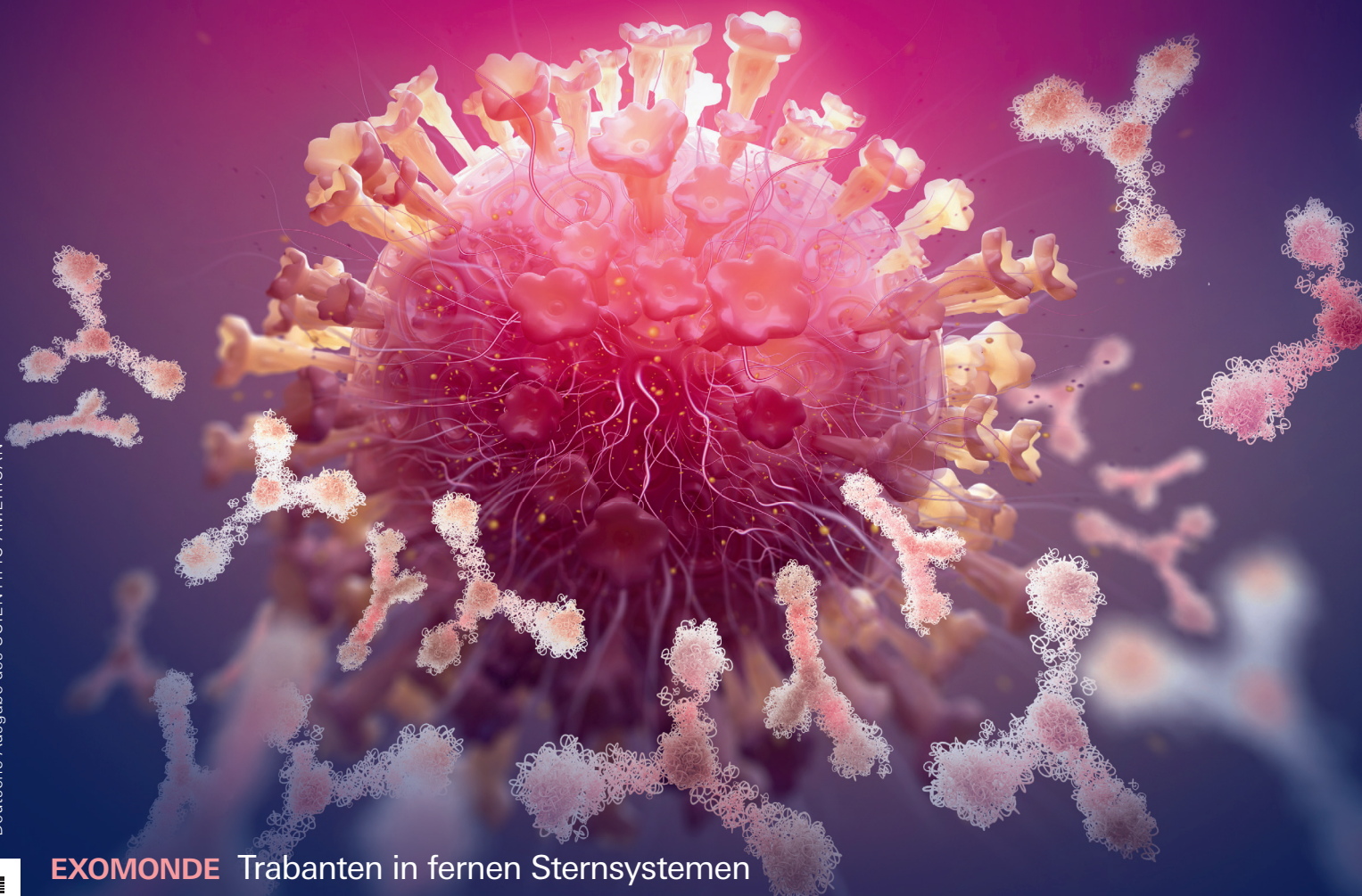


Spektrum

der Wissenschaft

Die Geheimnisse der Immunabwehr

Wie Impfungen wirken



EXOMONDE Trabanten in fernen Sternsystemen

PILZINFEKTIONEN Eine tödliche Gefahr verbreitet sich weltweit

BEWUSSTSEIN Integrated Information Theory

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)



EDITORIAL SCHUTZ AUF DAUER

Hartwig Hanser, Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

► Anfang Juni war es so weit: Ich bekam meine erste Impfdosis gegen Sars-CoV-2. Leichte Schmerzen im Arm und Müdigkeit am nächsten Tag zeigten mir, dass mein Immunsystem darauf wohl wie vorgesehen reagierte. Doch was geschieht eigentlich genau in unserem Körper bei einer solchen Impfung? Und vor allem: Wie können Vakzine eine oft jahrzehnte- bis lebenslange Immunität gegenüber einem Erreger bewirken, wo die meisten Körperzellen eher kurzlebig sind?

Solchen Fragen geht Marc Hellerstein von der University of California in Berkeley in der Titelgeschichte dieser Ausgabe ab S. 12 nach. Er entwickelte neue methodische Ansätze, um herauszufinden, wie sich nach einer Konfrontation mit Keimen das Gedächtnis unseres Immunsystems herausbildet. Denn dieses spielt eine zentrale Rolle für den künftigen Langzeitschutz vor der Erkrankung. Normalerweise leben die für die Immunabwehr entscheidenden Lymphozyten aber nur einige Tage bis Wochen. Geben sie womöglich nach einer Infektion oder Impfung Informationen über den jeweiligen Erreger an Nachfolgerzellen weiter, bevor sie das Zeitliche segnen? Es wäre aber auch denkbar, dass die zellulären Träger des Immungedächtnisses einfach ungewöhnlich ausdauernd sind. In einem Experiment konnte der Autor nachweisen, dass einige der spezifisch reagierenden Immunzellen, die sich nach einer Gelbfieberimpfung gebildet hatten, tatsächlich noch nach mehreren Jahren im Körper vorhanden waren. Derartige Langlebigkeit kennt man sonst nur noch von Nervenzellen im Gehirn – übrigens dem einzigen anderen System unseres Körpers, das ebenfalls über ein Gedächtnis verfügt.

Neben Einblicken in das Wunderwerk unserer Körperabwehr skizziert Hellersteins Artikel die Erfolgsgeschichte der Impfungen – wohl die größte Errungenschaft der Medizin und an Bedeutung mit technischen Entwicklungen wie Elektrizität oder Internet zu vergleichen. Man vergisst leicht, welches Leid früher etwa die Kinderlähmung, Diphtherie oder Pocken verbreiteten. Allein an Letzteren starben noch im 20. Jahrhundert laut Schätzungen an die 300 Millionen Menschen. Dank Impfungen haben diese Seuchen ihre Schrecken verloren.

Auch in der aktuellen Covid-19-Pandemie weisen uns Impfungen den Weg zurück zur Normalität. Derzeit laufende Versuche sollen ans Licht bringen, wie dauerhaft sich auf Sars-CoV-2 spezialisierte Lymphozyten in unserem Körper halten. Dies könnte deutlich länger der Fall sein als bei den Antikörpern gegen das Virus, die bisher vorwiegend untersucht wurden. Dann würde mich meine Impfung womöglich auf viele Jahre vor einer Erkrankung schützen können.

Optimistisch gestimmt grüßt Ihr



NEU AM KIOSK!

In **Spektrum GESCHICHTE** 3.21 blicken wir nach Persien – zu den Mumien aus einem Salzbergwerk, und was uns die Toten über ein Grubenunglück vor 2400 Jahren verraten.

IN DIESER AUSGABE



MATTHEW BROWN, ADAM MARSH

Die beiden texanischen Paläontologen zeichnen ab S. 32 anhand aktueller Fossilienfunde ein neues Bild eines altbekannten Monsters aus »Jurassic Park«.



XAVIER BARCONS, JUAN CARLOS GONZÁLEZ, AUGUSTIN SÁNCHEZ LAVEGA

Die drei Wissenschaftler koordinieren den Bau des weltweit größten Teleskops, das bald den Nachthimmel absuchen wird (ab S. 56)



JOHANNES KLEINER

Der Physiker und Mathematiker hat mit Kollegen die Association for Mathematical Consciousness Science gegründet. Diese hat es sich zum Ziel gesetzt, Forschende zusammenzubringen, um das jahrtausendealte Rätsel des Bewusstseins zu lösen (S. 76).

INHALT

- 3 EDITORIAL
- 6 SPEKTROGRAMM
- 24 FORSCHUNG AKTUELL
Keine exotische Materie in Neutronensternen
Astronomische Messungen dämpfen Spekulationen.
Blätter nutzen Phosphor aus Wüstenstaub
Ungewöhnliche Phosphatquelle einiger Nutzpflanzen.
Gruppentheorie
Mathematiker widerlegt eine 80-jährige Vermutung.
- 31 SPRINGERS EINWÜRFE
Großmut aus Egoismus
Die Welt braucht gerecht verteilte Impfstoffe.
- 66 SCHLICHTING!
Wenn Papier zum Spiegel wird
Raue Oberflächen können Licht geordnet reflektieren.
- 75 FREISTETTERS FORMELWELT
Das Beinahe-Rad
Mit einem Gleichdick rollt es sich nicht ganz so leicht.
- 84 REZENSIONEN
- 93 ZEITREISE
- 94 LESERBRIEFE
- 95 IMPRESSUM
- 96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE
- 98 VORSCHAU

12 MEDIZIN **GESCHÜTZT AUF LEBENSZEIT**

Unser Immunsystem erinnert sich erstaunlich lange an Krankheitserreger – manchmal über viele Jahrzehnte hinweg. Wie gelingt ihm das, und was bedeutet es im Hinblick auf Covid-19-Impfstoffe?

Von Marc Hellerstein

32 PALÄONTOLOGIE **ENTZAUBERUNG EINES FILMBÖSEWICHTS**

Die bisher umfassendste Studie über einen der populärsten Dinosaurier aus »Jurassic Park« dürfte Filmfans ernüchtern: Der echte Dilophosaurus hat mit der Leinwandkreatur wenig zu tun.

Von Matthew A. Brown und Adam D. Marsh

42 MYKOSEN **VERKANNTEN GESUNDHEITSGEFAHR**

Serie: Pilze (Teil 2) Weltweit erliegen jährlich mehr als 1,5 Millionen Menschen einer Pilzinfektion. Die Mikroorganismen stellen eine zunehmende Bedrohung dar – auch auf Grund von Umweltveränderungen.

Von Maryn McKenna

52 CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN **EINE HAARIGE ANGELEGENHEIT**

Dauerwellen erlauben es, ein wichtiges Teilgebiet der Chemie alltagsnah zu vermitteln: Redoxvorgänge, bei denen die Reaktionspartner Elektronen austauschen.

Von Matthias Ducci und Marco Oetken

56 TECHNIK **DAS GRÖSSTE AUGE DER WELT**

Von den Jupitermonden im Sonnensystem bis zu den ersten Sternen des Universums – das Extremely Large Telescope wird den Kosmos in noch nie da gewesenem Detail zeigen.

Von Xavier Barcons, Juan Carlos González und Augustin Sánchez Lavega

68 ASTRONOMIE **DIE SUCHE NACH FERNEN MONDEN**

Das Rennen um die Entdeckung eines ersten Trabanten außerhalb unseres Sonnensystems nimmt Fahrt auf.

Von Rebecca Boyle

76 INTEGRIERTE INFORMATIONSTHEORIE **MATHEMATISIERUNG DES BEWUSSTSEINS**

Serie: Bewusstsein (Teil 2) Die Meinungen über die Rolle der Mathematik in der Bewusstseinsforschung gehen auseinander. Dennoch könnten abstrakte Konzepte dabei helfen, eines der ältesten Rätsel der Menschheit zu lösen.

Von Johannes Kleiner



12

TITELTHEMA
IMMUNABWEHR

DESIGN CELLS / GETTY IMAGES / ISTOCK

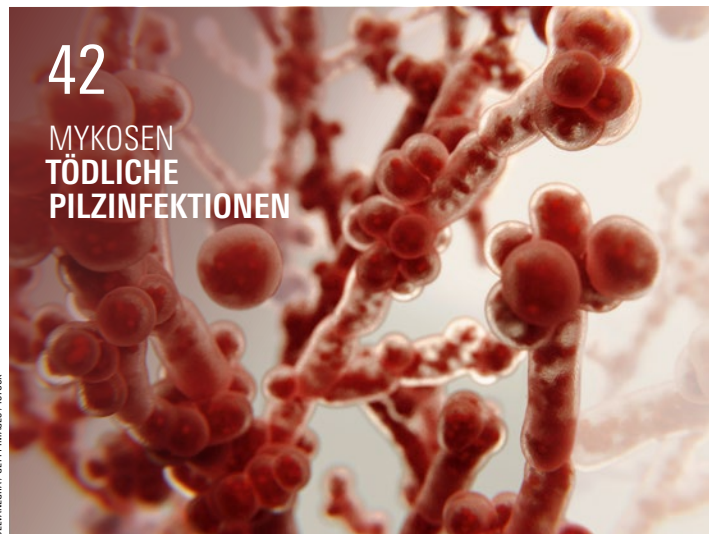


32

PALÄONTOLOGIE
ENTZAUBERUNG EINES
FILMBÖSEWICHTS

CHASE STONE / SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2021

SELVANIGRA / GETTY IMAGES / ISTOCK



42

MYKOSEN
TÖDLICHE
PILZINFEKTIONEN



56

TECHNIK
EXTREMELY
LARGE TELESCOPE

ESOL CALCALDA (WWW.ESOL.ORG/PUBLIC.GERMANY/IMAGES/ESOL72507/CC BY 4.0) (CREATIVE COMMONS ORG/LICENSING/RY/4.0/LEGALCODE)



76

INTEGRIERTE
INFORMATIONSTHEORIE
MATHEMATISIERUNG
DES BEWUSSTSEINS

MONISTU / GETTY IMAGES / ISTOCK BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



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

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

DER RIESE VON CERNE ABBAS

► Im Südwesten Englands erstreckt sich auf 55 Meter Länge das Bild eines nackten Keulenschwingers. Die Figur ist einst mit Hacken in die Grasnarbe geschlagen und anschließend mit Kreide verfüllt worden. Mit breiter Brust und deutlich erigiertem Glied prangt sie auf einem Hang bei Cerne Abbas in der Grafschaft Dorset. Das berühmte Scharrbild hat erstmals 1694 ein Kirchenvorsteher in einem Dokument erwähnt – er hatte es restaurieren lassen –, die genaue Entstehungszeit war bisher jedoch unbekannt.

Nun haben Archäologinnen und Archäologen des englischen National Trust mit Hilfe naturwissenschaftlicher Datierungsmethoden festgestellt, dass das Kunstwerk irgendwann zwischen 700 und 1100 angelegt wurde. Die Forscher nahmen Sedimentproben aus den tiefsten Schichten der Konturen und bestimmten deren Alter mittels optisch stimulierter Thermolumineszenz.

Mit dem Ergebnis hatte die Fachwelt nicht gerechnet. »Viele Archäologen und Historiker gingen davon aus, dass (das Scharrbild) entweder prähistorisch oder nachmittelalterlich ist, aber nicht mittelalterlich«, sagt der am Projekt beteiligte, freischaffende Geoarchäologe Mike Allen. Im Jahr 987 und damit ungefähr zu der Zeit, als die Figur entstand, gründeten Christen nahebei das Kloster von Cerne. »In einigen Quellen klingt die Vermutung an, dass die Abtei errichtet wurde, um die Einheimischen vom Glauben an einen frühen angelsächsischen Gott namens Heil oder Helith abzubringen«, sagt Martin Papworth, Archäologe beim National Trust. Womöglich sollte der Riese von Cerne Abbas ursprünglich diesen Gott darstellen.

Damit die riesige Figur nicht zuwächst, wird sie regelmäßig freigelegt und erneuert. Zuletzt kratzten Arbeiter des National Trust zusammen mit Freiwilligen im Jahr 2019 die Konturen frei und brachten neue Kreide aus.

Pressemitteilung vom National Trust, 12. Mai 2021





KOSMOLOGIE

SELBST DIE GRÖSSTEN STRUKTUREN IM UNIVERSUM ROTIEREN

Im Weltall dreht sich praktisch alles: etwa der Mond, die Erde sowie die Sonne um sich selbst; darüber hinaus der Mond um die Erde, die Erde um die Sonne und die Sonne ums galaktische Zentrum. Sogar die Milchstraße als Ganzes rotiert. Ob Drehbewegungen auch noch auf deutlich größeren Skalen stattfinden, ist bisher allerdings wenig untersucht worden. Einem Team um Peng Wang vom Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam zufolge lautet die Antwort Ja: Selbst die Filamente des kosmischen Netzes scheinen zu rotieren.

Der Ausdruck »kosmisches Netz« beschreibt, dass die großräumige Materieverteilung im Universum einem Fischernetz ähnelt. Lang gezogene Galaxienfilamente verbinden

Galaxienhaufen und Superhaufen miteinander; zwischen ihnen liegen riesige Leerräume namens Voids. Man kann sich die Filamente wie Fäden vorstellen, die von einem Galaxienhaufen zum nächsten verlaufen – mitunter über hunderte Millionen Lichtjahre hinweg.

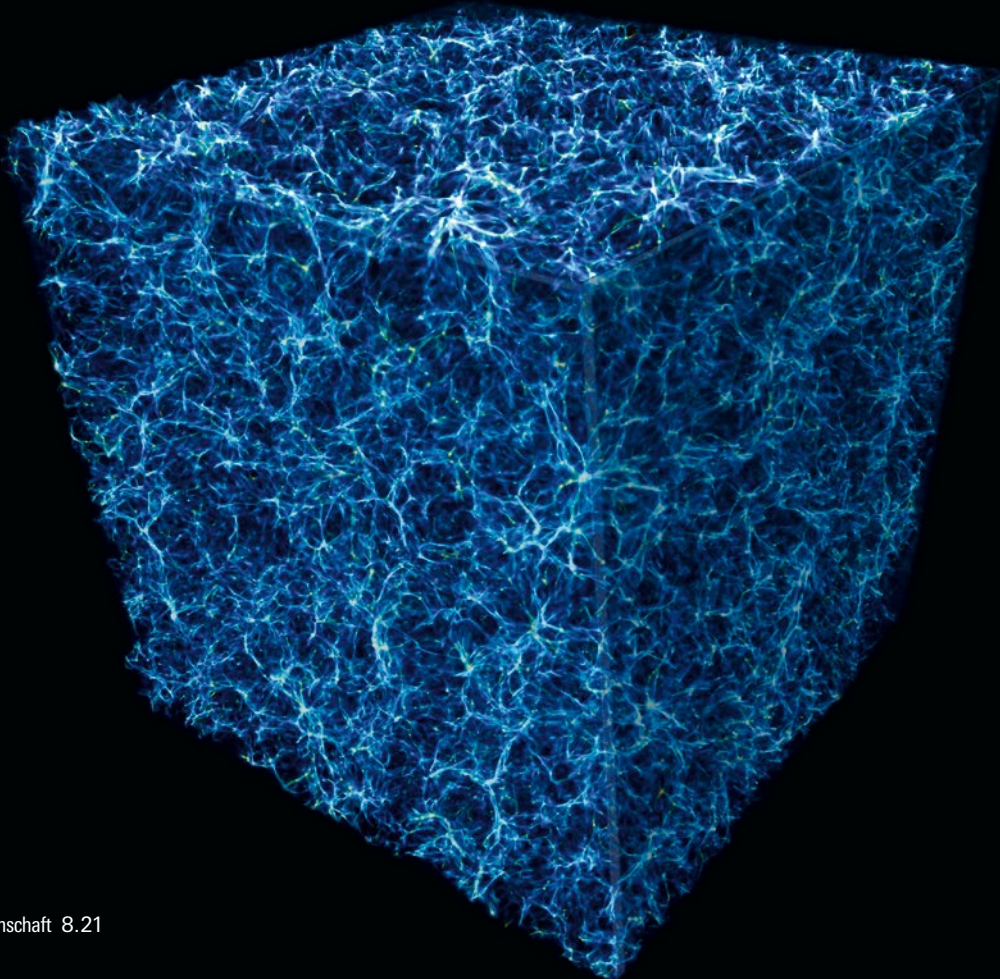
Wang und seine Kollegen haben untersucht, ob die Filamente um ihre Längsachse rotieren. Dazu verglichen sie die Rotverschiebungen von Galaxien ober- und unterhalb jener Achse. Aus der Rotverschiebung geht hervor, ob ein Himmelskörper von uns weg- oder auf uns zuwandert. Sollten die Galaxienfilamente nicht rotieren, dürften sich, aus seitlicher Perspektive betrachtet, die Rotverschiebungen ihrer Galaxien beiderseits der Achse nicht unterscheiden.

Da wir nicht alle Filamente im Universum aus demselben Winkel sehen, hat das Forscherteam tausende solcher Strukturen beobachtet, um Hinweise auf Rotationssignale zu finden. Und sie wurden fündig: Tatsächlich scheinen sich die kosmischen Fäden um ihre Längsachse zu winden – was messtechnisch am stärksten auffällt, wenn wir senkrecht auf sie blicken. Denn dann haben die Galaxien beiderseits der Achse eine besonders ausgeprägte Bewegung von uns weg oder auf uns zu.

Laut diesen Ergebnisse besitzen auch die größten Strukturen im All einen Drehimpuls. Wie genau er entsteht, ist allerdings unbekannt.

Nature Astronomy 10.1038/s41550-021-01380-6, 2021

FÄDEN UND KNOTEN Simulationen der Materieverteilung im Kosmos liefern ein gigantisches Netzwerk aus Galaxienhaufen und -filamenten.



MEDIZIN DIE GEFAHREN DER FETTLLEIBIGKEIT

► Menschen, die nach klinischen Maßstäben fettleibig (»adipös«) sind, tragen ein deutlich erhöhtes Risiko für Atemwegserkrankungen, Diabetes und Herzversagen – sogar dann, wenn ihre Stoffwechselwerte im Normalbereich liegen. Zu diesem Ergebnis kommen Forscherinnen und Forscher um den Epidemiologen Frederick Ho von der University of Glasgow (Schottland).

Starkes Übergewicht führt oft zu Komplikationen wie erhöhtem Blutdruck und Blutzucker, Fettstoffwechselstörungen, systemischen Entzündungen sowie einer nachlassenden Wirkung des Hormons Insulin, die häufig in einen Diabetes mündet. Es gibt aber adipöse Menschen, bei denen die entsprechenden Messwerte lange Zeit im Normbereich liegen. Diese Personen gelten vielfach als metabolisch gesund.

Ho und seine Kollegen verfolgten im Rahmen einer großen Studie, des UK-Biobank-Projekts, rund 380 000 Menschen aus dem Vereinigten Königreich über durchschnittlich

elf Jahre hinweg. Die Teilnehmer wurden auf Größe, Körpermasse, Blutdruck und verschiedene Blutwerte hin untersucht; Selbstauskünfte und ärztliche Gespräche dienten dazu, ihren gesundheitlichen Zustand zu erfassen. Als fettleibig oder adipös galt, wessen Körpermasseindex bei 30 oder darüber lag.

In statistischen Auswertungen stellten die Forscher fest: Metabolisch gesunde Adipöse haben ein mehr als vierfach erhöhtes Risiko, an Diabetes zu erkranken, verglichen mit nicht fettleibigen gesunden Menschen. Zudem sind sie fast doppelt so oft von Herzversagen betroffen und erleiden deutlich mehr Atemwegskomplikationen einschließlich der chronisch obstruktiven Lungenerkrankung. Schlaganfälle und Herzinfarkte treten bei ihnen ebenfalls häufiger auf. Ihr Risiko, während des Untersuchungszeitraums zu sterben, war um rund 20 Prozent erhöht.

Eine Untergruppe der Teilnehmer, etwa 8500 Personen, ließen Ho und sein Team im Schnitt viereinhalb Jahre nach einer ersten gründlichen Untersuchung abermals einen kompletten Gesundheitscheck durchlaufen. Dabei zeigte sich: Rund 30 Prozent der Adipösen, die anfangs metabolisch



RISIKO
Auch bei unauffälligen Stoffwechselwerten ist starkes Übergewicht eine Gesundheitsgefahr.

gesund gewesen waren, litten nun an typischen Folgeerkrankungen der Fettleibigkeit.

Metabolisch gesunde Adipositas sei ein instabiler Zustand und möglicherweise ein Übergangsstadium hin zur Krankheit, interpretieren die Forscher diese Ergebnisse. Das Körpergewicht zu kontrollieren, sei für alle Betroffenen von Vorteil, unabhängig von ihren Stoffwechselwerten.

Diabetologia 10.1007/s00125-021-05484-6, 2021

KULTUR ENTDECKTEN MAORI DIE ANTARKTIS?

► Neuseeländische Forscherinnen und Forscher gehen davon aus, dass Seefahrer der Maori bereits im 7. Jahrhundert die Antarktis oder zumindest die umliegenden Gewässer erreicht haben. Damit wären die Polynesier mehr als 1000 Jahre vor den ersten Europäern am südlichsten Kontinent gewesen. Ein Team um die Biologin Priscilla Wehi vom neuseeländischen Institut Manaaki Whenua Landcare Research hat mündliche und bildliche Überlieferungen der Maori untersucht, die in der Wissenschaft zuvor relativ wenig beachtet worden waren.

Eine wichtige Figur unter den Maori-Entdeckern sei Hui Te Rangiora

gewesen, schreiben die Wissenschaftler. Der polynesischer Häuptling sei im 7. Jahrhundert mit einer Crew gen Antarktis gefahren. Damals hatten die Indigenen das heutige Neuseeland noch nicht besiedelt – das geschah erst im 13. Jahrhundert.

In traditionellen Geschichten der Maori geht es häufig um Wanderwege von Buckelwalen, denen die Maori-Seefahrer folgten. Diese Routen verbinden den tropischen und gemäßigten Ozean mit der Antarktis. Überlieferte Berichte der Maori erwähnen Eisberge, antarktische Pflanzen und Tiere oder handeln von »gefrorenem Ozean«. Wie weit die Polynesier nach Süden vorstießen und ob sie tatsäch-

lich die antarktische Landmasse sichteten oder gar erreichten, lässt sich nicht zweifelsfrei belegen. Sicher ist aber, dass sie im 13. Jahrhundert auf den Aucklandinseln in der Subantarktis waren. Dort haben Archäologen vor einigen Jahren die Überreste eines Maori-Stützpunkts entdeckt. Das erste europäische Schiff legte 1806 dort an. 1820 sichteten dann der irische Seefahrer Edward Bransfield (1785–1852) und der deutsch-baltische Offizier Fabian von Bellingshausen (1778–1852) antarktisches Land.

Journal of the Royal Society of New Zealand 10.1080/03036758.2021.1917633, 2021

MOTDRITON / GETTY IMAGES / ISTOCK (SYMBOLBILD MIT FOTOMODELL)

ÖKOLOGIE IST GRÖNLANDS KIPPPUNKT ERREICHT?

► Statistische Warnzeichen deuten darauf hin, dass Grönlands Eisschild unumkehrbar schrumpfen wird. Die jährlichen Schwankungen in der Eisschmelze Westgrönlands zeigten ein »Critical Slowing Down«, berichten Niklas Boers vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) und Martin Rypdal von der Arktischen Universität Norwegen in Tromsø. Dieses statistische Phänomen tritt ein, wenn ein bisher stabiles System instabil wird und in einen neuen Zustand übergeht.

Die Ursache ist vermutlich eine Rückkopplung zwischen der Gletscherdicke und dem Eisverlust durch Schmelzen. Je dicker und massereicher der Eisschild auf Grönland, umso schneller fließt und kalbt er, desto mehr Eis verliert er also pro Zeiteinheit. Bei einer gegebenen Durchschnittstemperatur stellt sich deshalb eine stabile Dicke ein, bei der die Verluste den jährlichen Zuwachs durch Schneefall kompensieren. Steigt die Tempera-

tur jedoch über einen kritischen Wert, dann beginnt die Schmelze an der Oberfläche des Eises den Masse-schwund zu bestimmen. Und da es mit abnehmender Höhe immer wärmer wird, schmilzt der Eispanzer umso schneller, je dünner er wird – ein Teufelskreis, der erst mit dem vollständigen Abtauen endet.

Laut Boers und Rypdal befinden sich Grönlands Gletscher am Übergang zu diesem Verhalten. Betrachte man die zeitliche Entwicklung der Eisschmelze, seien Varianz und Autokorrelation der Datenreihe seit Mitte des 20. Jahrhunderts deutlich gestiegen. Die Varianz beschreibt die Bandbreite der Messwerte; die Autokorrelation sagt aus, wie ähnlich sich das System von einem Zeitpunkt zum nächsten ist. Nehmen beide Werte zu, weicht das System immer stärker vom

Normzustand ab und braucht gleichzeitig immer länger, um sich von Schwankungen zu erholen.

Ein solches Verhalten erwarten Fachleute an den so genannten Kippunkten des Klimasystems, an denen Systeme wie der grönländische Eisschild nach Störungen nicht mehr in den vorigen Zustand zurückpendeln, sondern in einen neuen stabilen Status »kippen« – in diesem Fall ein weitgehend oder vollständig eisfreies Grönland und ein mehrere Meter höherer Meeresspiegel. Das Ergebnis passt zu unabhängigen Vorhersagen auf der Basis von Klimamodellen, laut denen der Eispanzer Grönlands schon bei einer weltweiten Erwärmung um weniger als drei Grad Celsius einen kritischen Punkt erreicht.

PNAS 10.1073/pnas.2024192118, 2021

HIRNFORSCHUNG IN PAUSEN ÜBT DAS GEHIRN IM SCHNELLDURCHLAUF

► Beim Erwerben neuer Fähigkeiten findet der eigentliche Lernprozess offenbar gerade dann statt, wenn wir eine kurze Pause einlegen, wie Forscherinnen und Forscher der US-amerikanischen National Institutes of Health berichten. Sie fanden heraus, dass während einer Ruhephase die gleichen Hirnaktivitätsmuster auftreten wie während des Übens – allerdings dreimal so häufig und mit 20-fach erhöhter Geschwindigkeit.

Das Team ließ 30 Versuchspersonen wiederholt die Zahlenfolge 41324 auf einer Computertastatur abtippen. In 36 Übungseinheiten von je zehn Sekunden Dauer sollten sie lernen, die Tastenkombination so schnell wie möglich einzugeben. Nach jeder Einheit folgte eine genauso lange

Pause. Währenddessen zeichneten die Wissenschaftler die elektrische Hirnaktivität ihrer Probanden mittels Magnetenzephalografie auf.

Während der ersten elf Einheiten stieg die Lernkurve der Versuchsteilnehmer steil an: Die Zeit, um die Zahlenfolge einmal korrekt einzugeben, halbierte sich. Dabei wurden die Teilnehmer nicht in den Übungszeiten schneller, sondern tippten jeweils nach den Pausen in plötzlich erhöhtem Tempo. Der enorme Lernfortschritt in dieser Versuchsphase spiegelte sich in einer besonders großen Anzahl neuronaler Wiederholungen.

Das dabei aktive neuronale Netzwerk erstreckte sich über Hirnbereiche wie den Hippocampus und den entorhinalen Kortex, die mit Gedächtnis-

funktionen assoziiert sind. Um die neuronalen Wiederholungen nachzuweisen, nutzte das Team eine spezielle Software. Diese lernte mit Hilfe der in den Übungseinheiten gewonnenen Daten, anhand der Hirnaktivität zu erkennen, wann welche Taste gedrückt wurde. In der Hirntätigkeit während der Pausenzeiten suchte die Software dann nach Mustern, die einer Tastenbetätigung entsprachen. Dabei zeigte sich, wie oft und wie schnell das Gehirn die entsprechenden Abläufe quasi im Leerlauf durchspielte. Die Wissenschaftler möchten künftig testen, ob es einen kausalen Zusammenhang gibt zwischen den neuronalen Wiederholungen und dem Lernfortschritt.

Cell Reports 10.1016/j.celrep.2021.109193, 2021



TEUFELSKREIS
Die Eisschmelze auf Grönland könnte sich un-aufhaltsam beschleunigen.

ASTRONOMIE OZEAN AUF EUROPA KÖNNTE VULKANE BEHERBERGEN

► Das Innere des Jupitermonds Europa ist vermutlich heiß genug, um Vulkanismus zu ermöglichen. Zu diesem Schluss kommen Marie Běhounková und ihre Kollegen anhand eines numerischen Modells, das die Wärmeentwicklung im Inneren des Himmelskörpers simuliert. Wie das Team von der Karls-Universität in Prag schreibt, verformt sich der Mond durch Jupiters Gezeitenkräfte so stark, dass dabei reichlich Magma entsteht.

Besonders in den Zeiten, wenn Europa sich auf einer stark elliptischen Bahn bewegt, erzeugen die Gezeitenkräfte viel Reibung und damit Wärme in seiner Kruste. Dann könnte sich die Gesteinsschmelze in den Ozean ergießen, den man auf dem Jupitermond vermutet. Wahrscheinlich würden diese Ausbrüche den irdischen Flutbasalten ähneln, die in kurzer Zeit große

Lavamengen freisetzen. Europas Vulkanismus könnte aber auch heiße Quellen am Meeresgrund speisen. Die gibt es auf der Erde ebenso und werden hier als mögliche Orte der Entstehung des Lebens diskutiert.

Europa besitzt einen Eispanzer, der von dunklen Bruchlinien durchzogen ist. Verschiedene Indizien deuten auf die Existenz eines darunter liegenden, kilometertiefen Wasserozeans. Damit er Leben hervorbringen sowie erhalten könnte, bräuchte es nach Ansicht der meisten Fachleute Vulkane. Diese würden Energie und chemische Substanzen liefern, ohne die eine Evolution von Lebensformen nicht möglich ist.

Ob es wirklich aktive Vulkane unter dem schrundigen Eispanzer gibt, lässt sich aber nicht mit Sicherheit sagen. Während nämlich der Jupitermond Io dank der Gezeitenkräfte seines Mutter-

planeten genug innere Hitze entwickelt, um sogar von der Erde aus sichtbare Vulkane zu speisen, ist das bei Europa fraglich. Nicht nur kreist er mehr als anderthalbmal so weit entfernt um den Jupiter wie Io, er ist auch deutlich kleiner als sein Brudermond. Die Gezeitenwirkung heizt ihn also weniger stark auf, und er verliert die gewonnene Wärme schneller wieder.

Die Modellrechnungen des Prager Teams deuten darauf hin, dass Europa gerade eben heiß genug wird, um Gestein aufzuschmelzen. Vermutlich tritt der Vulkanismus dort phasenweise auf. Laut den Simulationen sollte sich das vulkanische Geschehen auf die Pole des Trabanten konzentrieren, wo die Verformung am stärksten ist.

Geophysical Research Letters
10.1029/2020GL090077, 2021

LANDWIRTSCHAFT INVASIVE ARTEN SCHADEN AFRIKAS AGRARSEKTOR

► Invasive Tier- und Pflanzenarten kosten Afrikas Landwirtschaft jährlich 3,6 Billionen US-Dollar. Das hat eine umfassende Studie zum ökonomischen Einfluss invasiver Spezies ergeben. Die Geldsumme entspricht etwa dem Bruttoinlandsprodukt Deutschlands. Sie errechnet sich aus den entstandenen Ernteverlusten und den durch die Schädlinge verursachten zusätzlichen Arbeitskosten. Ein Forscherteam der Organisation Centre for Agriculture and Bioscience Interna-

tional (CABI) hat die entsprechenden Werte mit Hilfe von Befragungen und Materialrecherchen ermittelt.

Eingewanderte Schadinsekten, die in Afrika nicht heimisch sind, fressen dort an verschiedenen Nutzpflanzen. Am stärksten leiden Maniok, Zitrusfrüchte und Tomaten. Die Tomatenminiermotte etwa verursacht Kosten von 11,45 Milliarden Dollar, beim Maischädling *Spodoptera frugiperda* sind es 9,4 Milliarden Dollar. Besonders aber schaden eingeschleppte Ackerunkräuter: Die Mehrkosten, die durch zusätzliches Unkrautjäten anfallen, belaufen sich auf 3,43 Billionen Dollar.

Im Schnitt verliert jedes afrikanische Land rund 70 Milliarden Dollar

jährlich durch invasive Arten – bei enormen Unterschieden zwischen den Staaten. Djibouti, Äquatorialguinea und Guinea-Bissau büßen je zirka 100 Millionen Dollar ein; Nigeria erleidet Ernteverluste im Wert von über eine Billion Dollar.

Die invasiven Arten verursachen nicht nur ökonomische und ökologische, sondern auch gesellschaftliche Probleme. Vor allem Frauen und Kinder kümmern sich darum, eingeschleppte Unkräuter zu jäten. Knapp 70 Prozent der Kinder aus landwirtschaftsnahen Haushalten in Ländern südlich der Sahara müssen saisonal in der Unkrautbekämpfung helfen, statt zur Schule zu gehen. Josefa Sacko, Landwirtschaftsbeauftragte der Kommission der Afrikanischen Union, zieht den Schluss: »Invasive Arten zu managen, ist unabdingbar, wenn die Landwirtschaft Afrikas ... die wachsende Bevölkerung ernähren soll. Diese wird sich bis voraussichtlich 2050 auf zweieinhalb Milliarden Menschen verdoppeln.«

CABI Agriculture and Bioscience
10.1186/s43170-021-00038-7, 2021

MAISSCHÄDLING
Eine Raupe der
Schmetterlingsart
S. frugiperda.



MEDIZIN GESCHÜTZT AUF LEBENSZEIT

Unser Immunsystem erinnert sich verblüffend lang an Krankheitserreger. Wie funktioniert das, und was bedeutet es im Hinblick auf Covid-19-Impfstoffe?



Marc Hellerstein ist Professor an der University of California in Berkeley sowie an der University of California in San Francisco. Er forscht über Endokrinologie, Stoffwechsel und Ernährung.

► spektrum.de/artikel/1886752



FESTUNG MENSCH Ohne Immunsystem würden wir von Fremdorganismen überrannt. Unsere Körperabwehr sorgt dafür, dass das nicht geschieht.

Wie unser Gehirn kann auch unsere Körperabwehr frühere Erfahrungen abrufen. Das funktioniert bei beiden im Prinzip ähnlich – wir durchleben ein Ereignis und speichern die Erinnerung daran in einem Gedächtnis, aus dem sie sich später abrufen lässt. Allerdings muss man das Ereignis dazu erst einmal überstanden haben.

Bevor es Schutzimpfungen gegen Krankheitserreger gab, war der Erwerb eines Immungedächtnisses eine gefährliche Angelegenheit. Es gelang keinesfalls immer, die Begegnung mit dem jeweiligen Krankheitserreger beziehungsweise die von ihm ausgelöste Erkrankung zu überleben. Im Fall einer Genesung hatten die Patienten eine Widerstandsfähigkeit erhalten, die sich mit einer Narbe vergleichen lässt, welche von einer Verletzung zurückgeblieben ist. Dagegen spannen die heute verfügbaren Impfungen auf viel sicherere Weise einen Schutzschirm gegen potenziell tödliche Mikroorganismen auf. Sie ermöglichen es unserer Körperabwehr, sich an fremde Eindringlinge zu erinnern, ohne je dem Risiko einer natürlichen Infektion ausgesetzt gewesen zu sein.

Über lange Zeit war das Immungedächtnis allerdings ein Rätsel. So gut wie alle Zellen des Körpers sterben irgendwann ab und werden durch neue ersetzt. Bei Lymphozyten beispielsweise, wichtigen Blutzellen des Immunsystems, beträgt die Lebensdauer mitunter nur Tage bis Wochen. Wie kann sich unsere Körperabwehr dann 50 Jahre oder sogar länger an Begegnungen mit Keimen erinnern?

Ich möchte hier zwei Geschichten erzählen, eine gesellschaftlich-historische und eine biologische. Die großen Seuchen der zurückliegenden beiden Jahrhunderte bis hin zur aktuellen Covid-19-Krise wurden meist von Viren verursacht. Sie ließen sich mit Hilfe von Impfungen bekämpfen – der wohl größten Errungenschaft der Medizin. Vakzine begleiten uns schon seit mehr als 200 Jahren, und dennoch ist ihr Potenzial längst nicht ausgereizt, wie die aktuellen Entwicklungen rund um das neue Coronavirus belegen. An Impfstoffen lässt sich zeigen, was wir über die Immunab-

AUF EINEN BLICK FASZINIERENDES KÖRPERGEDÄCHTNIS

- 1** Verheerende Krankheiten, die einst unzählige Menschenleben forderten, stellen dank Schutzimpfungen heute praktisch keine Bedrohung mehr dar.
- 2** Unser Immunsystem erinnert sich mitunter lebenslang an frühere Erreger oder Impfbestandteile. Wie das funktioniert, lässt sich mit Hilfe von molekularen Markierungen aufklären.
- 3** Die Körperabwehr besteht aus vielen Akteuren, die auf unterschiedliche Weise zum Immunschutz beitragen. Ihre jeweilige Rolle zu verstehen, ist wichtig, um wirksame Impfstoffe zu entwickeln.

wehr im Allgemeinen und über die Eindämmung von Covid-19 im Besonderen gelernt haben.

Das Immunsystem der Säugetiere stützt sich auf ein Arsenal spezialisierter Zellen, die von Stammzellen hervorgebracht werden. Es untergliedert sich in die angeborene sowie die adaptive oder erworbene Immunantwort (siehe »Spektrum« März 2021, S. 44). Letztere schießt sich im Lauf des Lebens auf spezifische Keime ein, mit denen sie in Kontakt kommt, und lässt sich ihrerseits in zwei Arme unterteilen (siehe »Zwei Arme des Immunsystems« S. 21). Zur so genannten humoralen Komponente der adaptiven Immunabwehr gehören B-Zellen: weiße Blutkörperchen, die Proteine namens Antikörper freisetzen. Antikörper kann man sich wie Lenkraketen mit einem Sucherkopf vorstellen, die die B-Zellen auf Krankheitserreger abfeuern. Sie koppeln gezielt an bestimmte Strukturen (Antigene) des jeweiligen

LÄCHERLICH GEMACHT In England kamen Schutzimpfungen zu Beginn des 19. Jahrhunderts auf – und wurden von Anfang an politisch ausgeschlachtet. Die Karikatur aus dem Jahr 1802 zeigt den Arzt Edward Jenner, der erstmals das Kuhpockenvirus als Vakzin gegen die (menschlichen) Pocken einsetzte. In der dargestellten Szene verletzt er eine ängstliche Frau mit einem Messer, während ringsherum geimpfte Menschen zu sehen sind, denen rinderähnliche Missbildungen wachsen.

Keims und machen diesen entweder direkt unschädlich oder leiten seine Vernichtung durch andere Immunzellen ein. Der zweite Arm der erworbenen Immunabwehr, die zellvermittelte Immunantwort, funktioniert mit Hilfe eines weiteren Typs von Blutzellen, der T-Lymphozyten. Diese erkennen ebenfalls spezielle Antigene, bekämpfen sie aber auf erheblich komplexere Weise.

Genauso wie natürliche Infektionen aktivieren Impfungen beide Arme der adaptiven Immunabwehr. Welche Rolle dabei jeweils die B- und die T-Zellen spielen, unterscheidet sich von Impfstoff zu Impfstoff und von Erreger zu Erreger.

Die von B-Zellen produzierten und ausgeschütteten Antikörper zirkulieren im Blutkreislauf und greifen dort körperfremde Strukturen an. T-Lymphozyten hingegen spielen oft eine Schlüsselrolle beim Bekämpfen infektiöser Prozesse, die sich innerhalb unserer Zellen abspielen. Die beiden Systeme ergänzen sich, denn Antikörper können nicht ins Zellinnere eindringen, um dort Viren oder Bakterien zu attackieren; T-Lymphozyten dagegen erkennen Körperzellen, die fremde Moleküle wie virale Proteine enthalten, und zerstören sie. Diese Mechanismen sind wichtig, wenn man verschiedene Ansätze der Impfstoffentwicklung gegen Covid-19 betrachtet und vergleicht.

Es existieren mehrere Untertypen von T-Lymphozyten mit unterschiedlichen Funktionen. Die so genannten Effektor-T-Zellen teilen sich rasch und attackieren eindringende Keime auf verschiedene Arten, sterben aber recht bald ab.

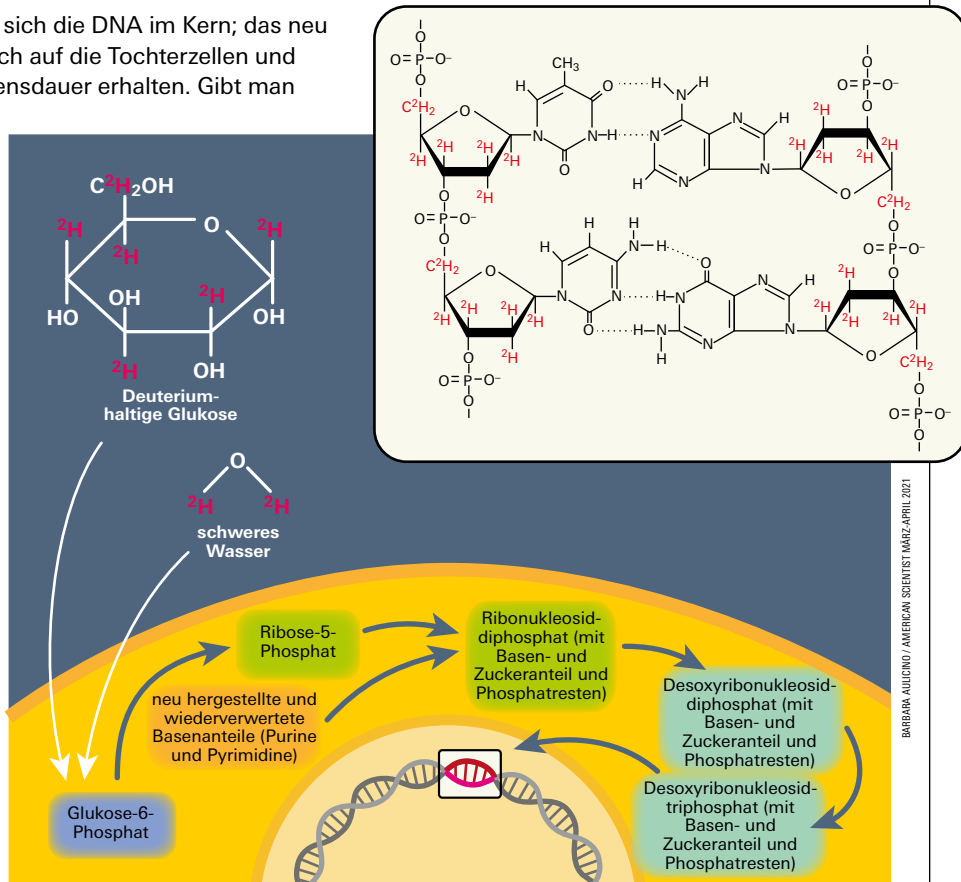


WELLCOME COLLECTION / EDWARD JENNER VACCINATING PATIENTS IN THE SMALLPOX AND INOCULATION HOSPITAL AT ST. PANCRA'S, THE PATIENTS DEVELOP FEATURES OF COWS. COLOURED ETCHING, 1802, AFTER J. GILCHRIST, 1802 / CC0 1.0 (CREATIVECOMMONS/PUBLICDOMAIN/ZERO 1.0)

The Cow-Pock — or — the Wonderful Effects of the New Inoculation! — Nite. — the Publications of y^e Anti-Vaccin^e Society.

Dem Immungedächtnis auf der Spur

Bei einer Zellteilung verdoppelt sich die DNA im Kern; das neu gebildete Erbmaterial verteilt sich auf die Tochterzellen und bleibt über deren gesamte Lebensdauer erhalten. Gibt man während der Teilung Deuterium (^2H)-haltige Glukose beziehungsweise schweres Wasser hinzu (im Bild rot), werden Atome dieses Isotops in den neu entstehenden DNA-Strang eingebaut und etikettieren ihn damit. Die Markierungen gehen wieder verloren, wenn die Tochterzellen sterben und ihr Erbmaterial zerfällt. Teilen sich die Zellen hingegen später und verteilt sich ihr Erbgut dabei auf die nächste Generation, werden die markierten DNA-Bausteine entsprechend verdünnt. Indem man ermittelt, wie sich die Menge der DNA-Marker in einer Zellpopulation zeitlich entwickelt, kann man etwas über die Lebensdauer der Zellen herausfinden.



Es gibt auch langlebigere Varianten, die Gedächtnis-T-Zellen, die im Körper verweilen und Krankheitserreger bei späteren Begegnungen wiedererkennen. Deren Geheimnisse zu lüften, war mein ursprünglicher Antrieb, in das Forschungsgebiet einzusteigen – inmitten einer Viruspandemie, der Millionen Menschen zum Opfer fielen.

Die Ressourcen der Körperabwehr erschöpft

In den 1990er Jahren war Aids die größte globale Gesundheitskrise. Der Arzt und Virologe David Ho, der heute am Aaron Diamond Aids Research Center in New York City arbeitet, hat maßgeblich dazu beigetragen, den Mechanismus der Erkrankung zu verstehen. Er postulierte, dass von dem Erreger HIV (Humanes Immundefizienz-Virus) infizierte T-Zellen rasch untergehen, was allmählich die Ressourcen der Körperabwehr erschöpft und letztlich zu Immunschwäche führt. Entsprechend dieser Erkenntnis konzentrierten sich die behandelnden Mediziner schon bald darauf, die Vermehrung des Virus im Körper so weit wie möglich zu unterdrücken, um den Zusammenbruch der körpereigenen T-Zell-Reserven zu verhindern.

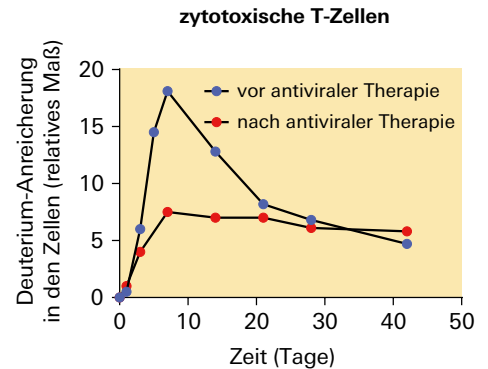
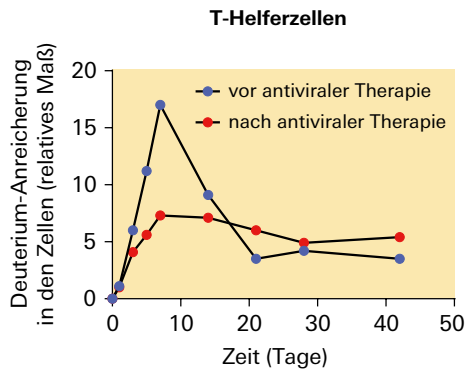
Es gab damals aber keine direkten Daten zur Lebensdauer von T-Lymphozyten beim Menschen, egal ob mit HIV

infiziert oder gesund. Zellteilungs- und Sterberaten ließen sich zu jener Zeit nicht verlässlich messen, weil es dafür keine hinreichend sicheren und genauen Methoden gab. Dieser Mangel an Evidenz bewegte mich dazu, selbst auf dem Gebiet zu forschen.

Ich brachte ein wenig Vorerfahrung mit, denn ich hatte schon seit einiger Zeit untersucht, wie sich die Teilungsrate von Körperzellen im lebenden Menschen messen lässt. Zudem befasste ich mich mit dem Glukosestoffwechsel in der menschlichen Leber. Von besonders großem Interesse schien mir die Frage zu sein, wie viel von der Glukose, die die Leber freisetzt, aus Vorläufersubstanzen erzeugt wird, die nicht zu den Kohlenhydraten zählen. Eines Tages kam mir schlagartig die Idee, dass es mit Hilfe von Zuckermolekülen möglich sein müsste, Zellteilungs- und Zelltodereignisse nachzuerfolgen.

Um etwas über die Lebensdauer einer Zelle zu erfahren, markiert man am besten zelleigene Moleküle, die zusammen mit ihr entstehen und während ihrer gesamten Existenz erhalten bleiben. Die einzige Substanz, die diese Anforderung erfüllt, ist die DNA im Zellkern. Proteine, Lipide, Kohlenhydrate und andere Moleküle werden ständig erneuert, die DNA hingegen entsteht unmittelbar vor dem Teil-

DAS TEMPO HERAUS-NEHMEN Immunzellen mit Deuterium zu markieren und nachzuverfolgen, lässt sich dazu nutzen, um die Lebensdauer verschiedener T-Zell-Typen bei Aidspatienten zu messen – vor und nach einer antiviralen Therapie. Steil ansteigende Kurven repräsentieren eine hohe Teilungs- und Entstehungsrate; ein starker Abfall steht für den massenhaften Untergang von Zellen. Flache Kurven dagegen zeigen Langlebigkeit an. Eine antivirale Therapie vermindert die Geburts- und Sterberaten der T-Lymphozyten, bremst so ihren übermäßig schnellen Umsatz und ermöglicht es, dass langlebige Exemplare ein Immungedächtnis ausbilden.



lungereignis, das die neue Zelle hervorbringt, und bleibt dann bis zu ihrem Untergang im Kern. »Neue Kern-DNA« bedeutet automatisch »neue Zelle« – und wenn diese stirbt, verschwindet die DNA wieder.

Die DNA ist ein langer Doppelstrang aus Untereinheiten, die den Zucker Desoxyribose ebenso wie Purin- und Pyrimidinbasen und Phosphatreste enthalten. Wenn eine Zelle stirbt, werden die Basenanteile ihrer DNA-Stränge manchmal, aber nicht immer von anderen Zellen wiederverwertet, um neue DNA aufzubauen. Wissenschaftler haben versucht, Entstehung und Tod von Zellen nachzuverfolgen, indem sie deren Nukleinsäurebasen markierten. Doch die Ergebnisse waren chaotisch und schwer zu interpretieren. Die Desoxyribose dagegen stammt verlässlich aus Glukosemolekülen, wird jedes Mal neu aus diesen hergestellt und nicht recycelt. Teilt sich eine Zelle, wandelt sie Glukose in Desoxyribose um, die zum Aufbau neuer DNA dient. Das ist ein wichtiger Grund, warum Krebszellen, die sich rasch vervielfältigen, viel Traubenzucker benötigen. Manche Methoden der Krebsdiagnose nutzen das aus, etwa PET-Scans (Positronen-Emissions-Tomografie), die mit radioaktiv markierten Glukoseeinheiten arbeiten.

Unsere Erbsubstanz ist allerdings der schützenswerteste Bestandteil unserer Körperzellen, deshalb kommt es nicht in Frage, sie mit potenziell schädlichen Markierungen zu versehen. Meine Kollegen und ich hatten daher die Idee, Glukose mit Deuterium zu etikettieren, einem natürlichen Isotop des Wasserstoffs, das keine radioaktive Strahlung aussendet, aber eine relativ hohe Atommasse aufweist, da es im Kern ein Neutron besitzt. Mit Hilfe von Deuteriummarkierten Glukosemolekülen, so der Plan, könnten wir messen, wie viel neu hergestellte Desoxyribose die gesammelte DNA einer Zellpopulation enthält. Das würde uns eine Aussage darüber erlauben, welcher Anteil dieser Zellen aus kürzlich zurückliegenden Teilungen hervorgegangen ist und wie hoch somit ihre mittlere Lebensdauer ist. Damit hatten wir ein Werkzeug an der Hand, um die Entstehungs- und Sterberaten von menschlichen T-Lymphozyten zu ermitteln.

T-Zellen lassen sich über spezifische Proteine auf ihrer Oberfläche identifizieren. Es war damals aber nicht möglich, anhand dieser Eiweiße die kurzlebigen Effektor- von den langlebigen Gedächtniszellen zu unterscheiden. Als meine Mitarbeiter und ich die DNA von gesunden T-Lymphozyten mit Deuterium-haltiger Glukose markierten und die Lebensdauer der Zellen bestimmten, erhielten wir zwei deutlich verschiedene Messkurven, die klar erkennbar die Effektor- beziehungsweise die Gedächtniszellen repräsentierten. Das war eine schöne Bestätigung dafür, wie leistungsfähig unser Ansatz ist. Als wir die Methode nutzten, um die T-Zellen von Aidskranken zu untersuchen, stellten wir fest, dass deren Organismus nur eingeschränkt in der Lage ist, langlebige T-Zellen hervorzubringen. Gemeinsam mit Mike McCune von der University of California in San Francisco und David Ho zeigten wir: Eine antivirale Therapie führt bei den Betroffenen dazu, dass kurzlebige T-Lymphozyten weniger oft untergehen und mehr langlebige Zellen entstehen. Das war eine bedeutsame Erkenntnis, die zur Entwicklung erfolgreicher Aidsbehandlungen beitrug.

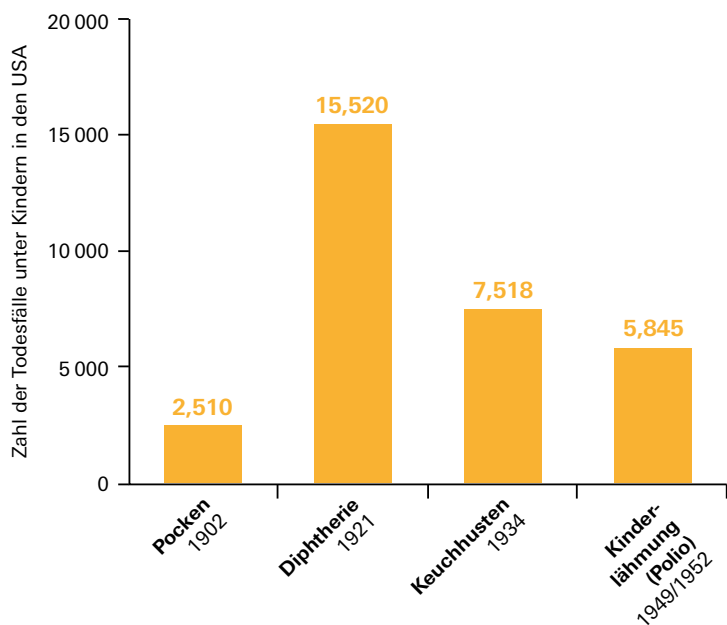
Medizinische Behandlung verschafft den weniger aggressiven Erregern einen Vorteil

Die antivirale Therapie führte nämlich bei vielen Aidspatienten zu einer gemischten Reaktion: einer unvollständig blockierten Virusreplikation bei gleichzeitig erhöhten T-Zell-Zahlen. Was das klinisch zu bedeuten hat, darüber gingen damals die Ansichten auseinander. Manche Mediziner neigten zu der Interpretation, die Behandlung müsse fortgesetzt werden, da sich die Zahl der T-Lymphozyten verbessert habe. Andere meinten, die Medikamente könnten den Erreger offenbar nicht vollständig kontrollieren und verursachten Nebenwirkungen; der Eingriff müsse folglich abgebrochen werden. Zusammen mit Steven Deeks und Robert Grant von der University of California in San Francisco zeigte mein Team: Die T-Zellen wiesen bei behandelten Patienten beinahe normale Entstehungs- und Sterberaten auf, obwohl die Arzneistoffe das Virus nicht vollständig unterdrückten. Der Erreger beeinflusste also die mittlere Lebensdauer der T-Lymphozyten offenbar nicht nennenswert, obgleich er vorhanden und aktiv war. Wir folgerten daraus, dass die antivirale Therapie den nicht so aggressiven Virusstämmen einen Selektionsvorteil verschafft: Sie büßen ihre Zerstörungskraft größtenteils ein, um dadurch weniger empfindlich gegenüber der Behandlung zu werden.

Weitere Untersuchungen bestätigten das; ein Fortsetzen der Therapie trotz unvollständiger Virusblockade hat sich klinisch als der richtige Ansatz erwiesen.

Heute, 25 Jahre später, hält ein anderes Virus die Welt in Schach – und wieder stehen die T-Zellen im Fokus, diesmal im Zusammenhang mit Impfstoffen. Um die derzeitige Situation besser einordnen zu können, ist es nützlich, sich die bemerkenswerte Geschichte der Schutzimpfungen und die Funktionsweise verschiedener Vakzine vor Augen zu führen.

Auf alten Friedhöfen in den USA, wo sich Gräber aus früheren Jahrhunderten erhalten haben, fallen häufig die kleinen Grabsteine für Kinder ins Auge, die sich um die ihrer Eltern scharen. Noch im 19. Jahrhundert starben zwischen 40 und 50 Prozent der Kinder, bevor sie die Pubertät vollendet hatten – meist an Infektionskrankheiten. Das blieb bis weit ins 20. Jahrhundert hinein so. Keine der damals so tödlich wütenden Krankheiten bereitet uns heute mehr Sorgen. Ihre praktisch vollständige Eindämmung mit Hilfe von Impfstoffen ist fast zu schön, um wahr zu sein. Zwischen 2004 und 2006 gab es in den USA keinen einzigen Todesfall durch Diphtherie, Masern, Kinderlähmung (Polio), Röteln, Mumps oder Pocken. In Deutschland kommen Pocken und Polio-Fälle seit Jahrzehnten nicht mehr vor; die Röteln gelten hier zu Lande als weitgehend eliminiert, und auch Mumps- und Diphtherie-Tote wurden in den zurückliegenden Jahren laut Robert Koch-Institut nicht mehr gemeldet. Berücksichtigt man den Anstieg der Bevölkerungszahl in den USA, retten Impfungen

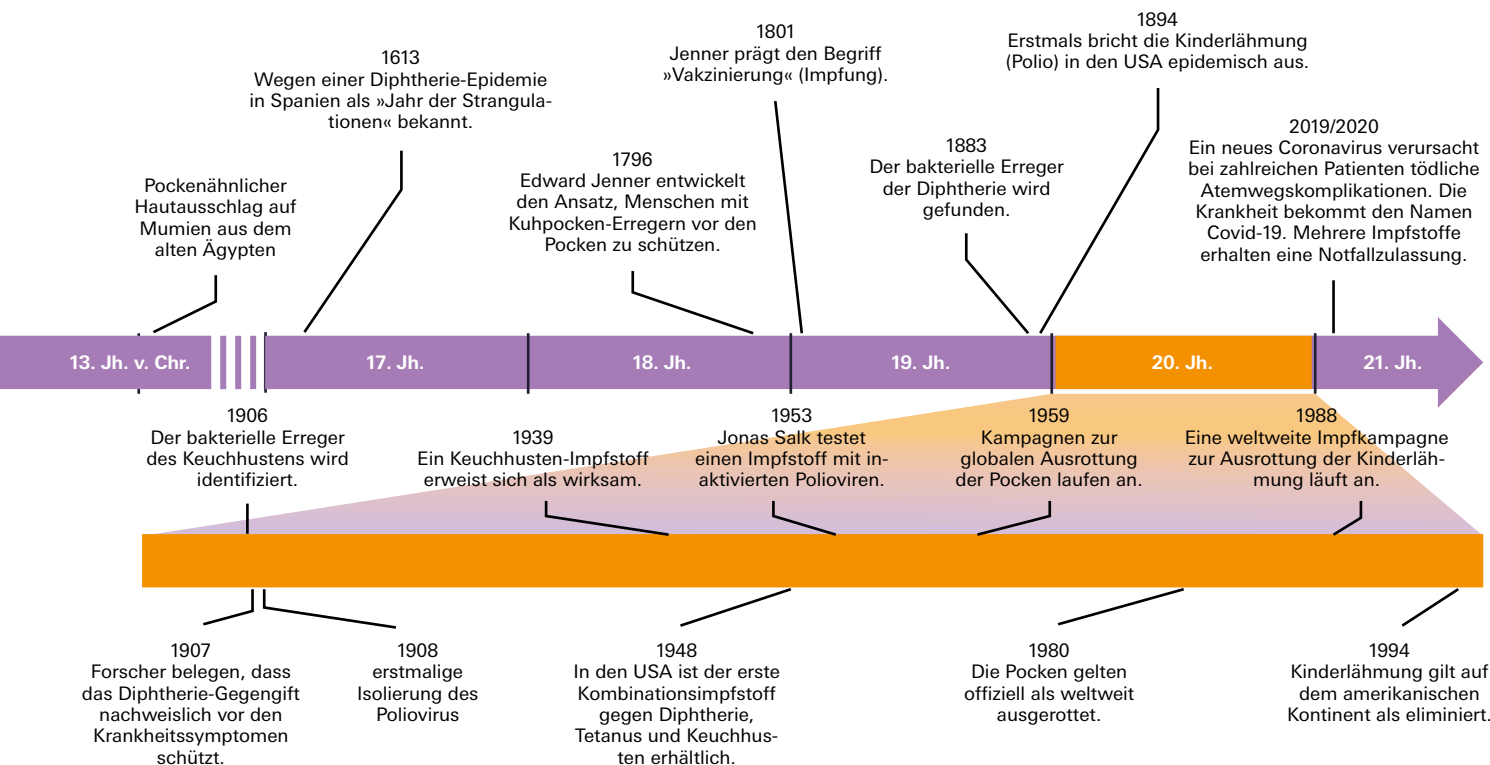


Krankheit und Jahr mit den meisten Fällen

BARBARA AULICINO / AMERICAN SCIENTIST MÄRZ/APRIL 2021; BEARBEITUNG SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

SPUR DES TODES Viele Kinderkrankheiten, die früher weit verbreitet waren und oft tödlich endeten, spielen heute praktisch keine Rolle mehr. Die Grafik zeigt jeweils das Jahr der meisten Todesfälle unter Kindern in den USA.

SIEGESZUG DES WISSENS Mit wachsendem Verständnis davon, wie Erreger und Immunsystem zusammenwirken, gelingt es immer schneller, wirksame Impfstoffe gegen neu auftauchende Krankheitskeime zu entwickeln.



BARBARA AULICINO / AMERICAN SCIENTIST MÄRZ/APRIL 2021

gen dort derzeit pro Jahr mehr als 100 000 Kinderleben. Anders ausgedrückt: Gäbe es die Schutzimpfungen nicht, läge die Zahl der jährlichen Todesfälle unter Kindern heute sechsmal so hoch.

Vakzine haben es ermöglicht, verheerende Krankheiten, die früher Angst und Schrecken verbreiteten, nahezu vollständig zurückzudrängen — ein beispielloser Erfolg. Schon ein kurzer geschichtlicher Rückblick führt uns ihre enorme gesellschaftlich-politische Bedeutung vor Augen. Manche dieser Impfstoffe wirken hauptsächlich über Antikörper, andere eher über T-Zellen.

Diphtherie

Viele jüngere Ärzte kennen Diphtherie nur noch aus dem Lehrbuch. Seit 2004 wurden in den gesamten USA nur zwei Fälle gemeldet. Bevor es die Schutzimpfung gab, verzeichneten Mediziner dort allein im Jahr 1921 rund 206 000 Fälle; die Zahl der Kinder, die daran starben, erreichte mit mehr als 15 000 damals ihren Höchststand. In Deutschland liegt die Zahl der jährlich übermittelten Krankheitsfälle seit Jahren im niedrigen zweistelligen Bereich.

Beim Verursacher des Leidens handelt es sich um das Bakterium *Corynebacterium diphtheriae*. Hauptsächlich von Diphtherie betroffen sind Kinder im Alter bis zu fünf Jahren, von denen etwa jedes fünfte die Krankheit nicht überlebt. Der Erreger befällt Nase und Rachen, wird durch Tröpfcheninfektion (Husten, Niesen, Sprechen) oder direkten Kontakt leicht übertragen und produziert einen Giftstoff, der die Proteinsynthese im Körper blockiert und jene

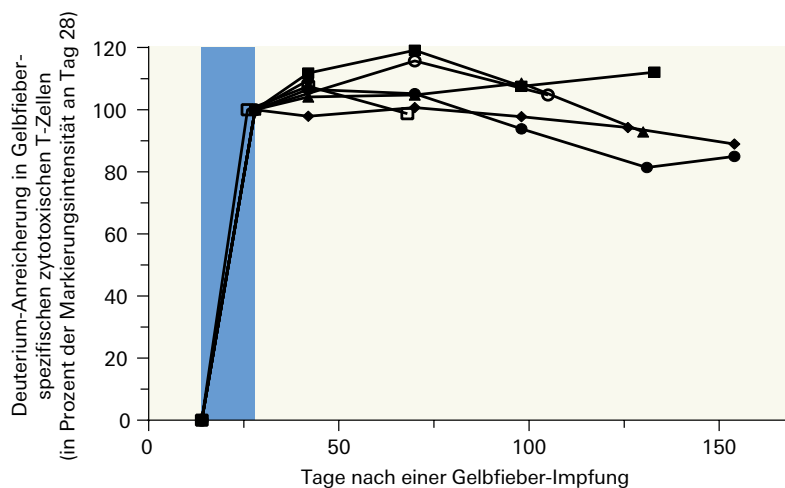
Zellen abtötet, die den Rachen auskleiden. Es bildet sich eine dicke Schicht abgestorbenen Materials, die den Atemweg verengt und oft zu einem grausamen Erstickungstod führt – daher die Bezeichnungen »Halsenge« und »Würgeengel der Kinder«.

Es gibt zahlreiche Horrorgeschichten rund um die Diphtherie. So besuchte im Jahr 1903 die Familie O'Marra eine Beerdigung in Hartford, Kansas. An der Veranstaltung nahm ein Cousin teil, der vermutlich symptomlos infiziert war und den Erreger an die anderen weitergab. Innerhalb von acht Tagen starben sechs von neun Kindern der O'Marras. Ein ortsansässiger Arzt verabreichte den verbliebenen drei sowie der Mutter ein noch heute gängiges Diphtherie-Gegengift; dennoch erlagen später zwei weitere Kinder der Krankheit. Die vormals elfköpfige Familie war auf drei Personen geschrumpft.

Der Diphtherie-Impfstoff richtet sich nicht gegen das Bakterium selbst, sondern dessen Toxin. Er stimuliert die Produktion von Antikörpern, die sich spezifisch an den Giftstoff binden und ihn neutralisieren. Im Jahr 1901 ging der erste Nobelpreis für Physiologie oder Medizin an den deutschen Immunologen Emil von Behring für die Entdeckung der Serumtherapie. Die Behandlung erfolgte mit Antikörpern, die aus dem Blut von Pferden gewonnen wurden, nachdem die Tiere das Diphtherie-Toxin gespritzt bekommen hatten. Dieses so genannte Antiserum erwies sich als hochwirksam, indem es die Symptome zuverlässig unterband; freilich musste zuvor die Krankheit korrekt diagnostiziert worden sein.

Langlebige Gedächtnis-T-Zellen

Menschliche Versuchsteilnehmer erhielten einen Gelbfieber-Impfstoff, der lang anhaltende Immunität erzeugt, und tranken an den folgenden 14 Tagen jeweils eine vorgegebene Menge an schwerem Wasser ($^2\text{H}_2\text{O}$). Der blau eingefärbte Bereich in dem Diagramm zeigt die zunehmende Anreicherung von Deuterium-Markierungen in neu entstandenen, Gelbfieber-spezifischen zytotoxischen T-Zellen, die während der ersten 28 Tage nach der Impfung aus dem Blut der Probanden gewonnen wurden. Die dargestellten Messkurven erfassen das zeitliche Überleben der markierten T-Lymphozyten in verschiedenen Patienten. In dem Maß, in dem die Zellen absterben,



sinkt die Anreicherung der Markierungen wieder; die mittlere Halbwertszeit dieses Vorgangs betrug etwa 460 Tage. Die Teilungsrate der markierten Zellen lag bei unter Eins pro Jahr. Zusammengefasst zeigen diese

Ergebnisse: In den ersten beiden Wochen nach der Impfung erfolgte eine intensive Vermehrung von T-Lymphozyten, bei der Gelbfieber-spezifische Zellen entstanden, die sich als bemerkenswert langlebig erwiesen.

Pocken – und ein Geschenk von Kühen

Mit einer Sterblichkeitsrate von 30 bis 50 Prozent galten die Pocken einst als weltweit tödlichste Infektionskrankheit. Die Erkrankung wird von Viren verursacht und hauptsächlich mittels Husten oder Niesen durch die Luft übertragen, ebenso durch Körperflüssigkeiten, Kleidung oder Bettwäsche. Von europäischen Siedlern in die Neue Welt gebracht, tötete sie schätzungsweise 30 Prozent der amerikanischen Ureinwohner; mitunter fielen ihr ganze Dörfer und Stämme zum Opfer. Fast jede Siedlerstadt hatte ihren eigenen Pocken-Friedhof. Bei Ausbrüchen kam es vor, dass komplette Städte unter Quarantäne gestellt wurden.

Bei Kühen verlaufen entsprechende Infektionen milder. Sie können Menschen zwar mit dem Kuhpocken-Virus infizieren, was bei diesen aber nur relativ leichte Symptome auslöst. Melkerinnen, die an Kuhpocken erkrankten, bekamen typischerweise Pusteln an Händen und Armen. Als der englische Landarzt Edward Jenner zufällig eine Milchbäuerin erzählen hörte, wie froh sie sei, einen solchen Infekt gehabt zu haben, da sie nun keine hässlichen Pocken-Narben im Gesicht bekäme, brachte ihn das auf eine Idee. Im Jahr 1796 entwickelte er den Ansatz, gesunden Menschen den Eiter aus Kuhpocken-Pusteln zu injizieren – mit dem Ziel, diese Personen resistent gegen die menschliche Variante der Erkrankung zu machen. Aus heutiger Sicht war das eine rabiate und erstaunlich unethische Methode, aber sie erwies sich als wirksam: Der Kontakt mit dem Kuhpocken-Material verhinderte Krankheitsfälle durch den menschlichen Erreger. 1801 veröffentlichte Jenner seine Erkenntnisse unter dem Titel »On the Origin of the Vaccine Inoculation« (sinngemäß »Über das Entstehen der Vakzin-Einbringung«). Der Begriff »Vakzin« bezog sich auf das lateinische Wort »vacca« für Kuh. Der Landarzt prophezeite, seine Methode würde letztlich zur Auslöschung der Pocken, der wohl grausamsten Geißel der Menschheit, führen.

Jenners Entdeckung machte ihn weltberühmt; politisch jedoch waren Impfungen von Anfang an ein aufgeladenes Thema. Kirchenleute warnten davor, sich mittels Vakzinierung in die »göttliche Schöpfung« einzumischen. Die Überschreitung der Artenbarriere wurde kritisiert (als hätte der Mensch nicht seit Jahrtausenden ständig tierische Produkte verzehrt und sich überall mit tierischen Erzeugnissen umgeben). Mancher Politiker bezeichnete die Impfung gar als »schmutzige Hexerei«. Allein: Sie rettete Leben, und zwar in unvorstellbarer Zahl. An den Pocken starben im 20. Jahrhundert schätzungsweise 300 Millionen Menschen, doch seit 1979 gab es weltweit dank der Schutzimpfung keinen einzigen bekannten Fall mehr. Damit hatte sich Jenners Prophezeiung bewahrheitet.

Dauerhaft geschützt

Wie können Impfungen eine solche Wirkung entfalten? Sind dieselben Immunzellen, die das Vakzin aktiviert hat, noch Jahrzehnte später vorhanden? Oder übergeben Gedächtniszellen ihre »Erinnerung« kontinuierlich an jene Zellen, die sie ersetzen? Um herauszufinden, wie das Immungedächtnis viele Jahre lang intakt bleibt, mussten wir weitere fortschrittliche Techniken hinzuziehen. Eine davon widmete sich der Frage, wie sich die starke Spezialisierung

von Immunzellen erfassen lässt und wie man T-Zellen isolieren kann, die auf spezifische Fremdmoleküle reagieren, etwa auf virale Antigene.

T-Lymphozyten prüfen andere Körperzellen daraufhin, welche Antigene diese auf ihrer Außenseite präsentieren. Dazu zerlegen jene Zellen Eiweiße aus ihrem Inneren in kleinere Fragmente, befördern sie an ihre Oberfläche und lassen sie dort von einem Ensemble aus Proteinen, dem Haupthistokompatibilitätskomplex (MHC), quasi ausstellen. Erkennt ein T-Lymphozyt die derart dargebotenen Proteinbruchstücke als fremd – etwa weil es sich um Elemente eines Virus handelt –, wird er aktiv und löst eine Immunantwort aus.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



TIMOTHY TRICHE, NATIONAL CANCER INSTITUTE, 1976

Untersuchen lässt sich der Vorgang mit Hilfe von künstlich hergestellten »Tetrameren«, das sind Molekülkomplexe aus vier MHC-Bestandteilen und dem jeweils interessierenden Eiweißfragment. Diese gibt man in Teströhrchen zu T-Lymphozyten, die aus der Blutprobe eines Versuchsteilnehmers stammen. Falls darunter T-Zellen sind, die spezifisch auf das Proteinfragment ansprechen, lassen sie sich mit der Methode erkennen und sammeln.

Zudem benötigten wir ein Verfahren, um langlebige Zellen wie Gedächtnis-T-Lymphozyten in menschlichen Proben zu markieren und über größere Zeiträume zu verfolgen. Die Markierung mit Deuterium-haltiger Glukose ist teuer und unpraktisch, wenn es um mehr als Tage oder Wochen geht. Zur Lösung dieses Problems trug wieder maßgeblich eine fachübergreifende Zusammenarbeit bei.

Wissenschaftler wie Joe Katz, Bernie Landau und Harlan Woods hatten in den 1950er und 1960er Jahren gezeigt, dass es bei jedem Schritt des Glukosestoffwechsels zum Austausch von Wasserstoffatomen zwischen dem Zucker und dem Wasser im Körper kommt. Daraus folgte eine Idee, die ich faszinierend fand: Die Analyse des spezifischen Wasserstoff-Markierungsmusters eines Moleküls verrät uns etwas darüber, woher dieses Molekül stammt und wann der komplexe Körperstoffwechsel es hervorgebracht hat. Ich erkannte, dass sich die Desoxyribose der DNA, die der Stoffwechsel aus Glukose erzeugt, mit Wasserstoff aus Körperflüssigkeiten etikettieren lässt.

Dieser Ansatz war ein Durchbruch. Er bedeutete, dass wir mit Hilfe von schwerem Wasser verschiedene T-Zell-Typen kennzeichnen, ihr Schicksal verfolgen und ihre Lebensdauer ermitteln konnten. Schweres Wasser enthält statt der üblichen Wasserstoffatome Deuterium. Das Isotop ist durch das zusätzliche Neutron im Kern massereicher als normaler Wasserstoff, hat aber die gleiche elektrische Ladung und zeigt das gleiche chemische Verhalten. Schwe-

res Wasser lässt sich somit gefahrlos über Wochen und Monate hinweg täglich trinken und muss nicht intravenös verabreicht werden.

All diese Techniken ermöglichten es uns, endlich die Frage anzugehen, wie Impfstoffe unser Immungedächtnis auf Jahrzehnte hinaus prägen können. Und die Ergebnisse waren weit interessanter, als wir gehofft hatten!

Ein Vakzin gegen Gelbfieber

Der bislang einzige Nobelpreis für die Entwicklung eines antiviralen Impfstoffs ging 1951 an den US-amerikanischen Bakteriologen Max Theiler. Der Forscher hatte ein Gelbfieber-Vakzin kreiert, das noch heute eingesetzt wird. Von dem Wirkstoff ist bekannt, dass er die Bildung von T-Zellen triggert und einen lang anhaltenden Immunschutz hervorbringt. Einst starben weltweit zirka 200 000 Menschen pro Jahr an Gelbfieber, die Sterblichkeitsrate bei Infizierten lag zwischen 20 und 50 Prozent. Unter anderem dank der Schutzimpfung ist die Zahl der jährlichen Todesopfer global auf etwa 30 000 gesunken.

Auf der Fahrt zu einem Diabetes-Symposium besuchte ich im Jahr 2014 den Immunologen Rafi Ahmed an der Emory University in Atlanta, der maßgeblich zum Verständnis des Immungedächtnisses beigetragen hatte. Wir beschlossen, unsere Kräfte zu bündeln und anhand des Gelbfieber-Impfstoffs und der neu entwickelten Techniken zu erforschen, wie langlebige T-Zellen einen dauerhaften Immunschutz erzeugen.

Frisch geimpfte Versuchsteilnehmer erhielten von uns schweres Wasser, von dem sie dreimal täglich jeweils ein paar Teelöffel trinken sollten. Ihr körpereigener Stoffwechsel baute daraufhin Deuterium in die Desoxyribose der DNA ihrer T-Zellen ein. Wir verfolgten solcherart markierte T-Lymphozyten im Blut, die auf das Virus reagierten, über längere Zeit hinweg und stellten fest: Die für das Gelbfieberevirus spezifischen Effektor-T-Zellen vermehrten sich nach der Impfung zunächst rasch, drosselten vier Wochen später aber ihre Teilungsrate. Sie starben dann nicht ab, sondern zeigten eine lange Lebensdauer – mit einer Halbwertszeit von durchschnittlich 460 Tagen.

Eine kleine Untergruppe dieser Zellen, die in den ersten beiden Wochen nach der Impfung entstehen, gibt es sogar noch sieben bis zehn Jahre später, wie die Daten zeigen. Derart lange Lebensdauern kommen bei menschlichen Zellen äußerst selten vor; wir kennen sie allenfalls von Hirnneuronen, die das ganze Leben überdauern können. Auch wenn der ursprüngliche Kontakt mit dem Gelbfieberevirus beziehungsweise dem Vakzin schon lange zurückliegt, entstehen zudem in geringer Zahl weiterhin neue Gelbfieberspezifische T-Zellen, die langanhaltend im Blut zirkulieren und für einen 50 Jahre oder länger währenden Schutz sorgen.

Die DNA in diesen T-Zellen weist epigenetische Markierungen (siehe »Spektrum« Juni 2017, S. 36) auf, die von der Konfrontation mit dem Virus herrühren. Jener »Fingerabdruck« bleibt Jahre, mitunter Jahrzehnte erhalten und sorgt dafür, dass Gene, die an einer schnellen Immunreaktion beteiligt sind, quasi auf Abruf bleiben und sich bei Bedarf sofort aktivieren lassen. Im Lauf der Zeit entwickeln sich die T-Lymphozyten allmählich zu einem ungewöhnlichen

Zelltyp. Dieser trägt spezifische Moleküle, die normalerweise in sich nie teilenden naiven Zellen vorkommen, reagiert auf virale Antigene aber mit rascher Vermehrung und weist besondere Genexpressionsmuster auf. Tatsächlich unterscheidet sich dieser Typus von allen Zellen, die aus der immunologischen Forschung bis dahin bekannt waren.

Wie altdienste Soldaten, die getarnt auf dem Schlachtfeld verharren und neue Fähigkeiten erwerben, ohne ihre früheren Erfahrungen zu vergessen, sind diese stammzellähnlichen Gedächtnis-T-Lymphozyten bereit, sofort in Aktion zu treten, sobald das Virus wiederkehrt. Ein faszinierender Mechanismus, der sicherstellt, dass eine Untergruppe der langlebigen T-Zellen im Bedarfsfall rasch zum Angriff übergehen kann. Die Ergebnisse zeigten: Mit unserem neuen Methodenarsenal hatten wir nun leistungsfähige Werkzeuge an der Hand, um Immunzellen zu markieren, monatelang zu verfolgen und die langfristigen Effekte von Impfungen zu untersuchen.

Covid-19-Impfstoffe

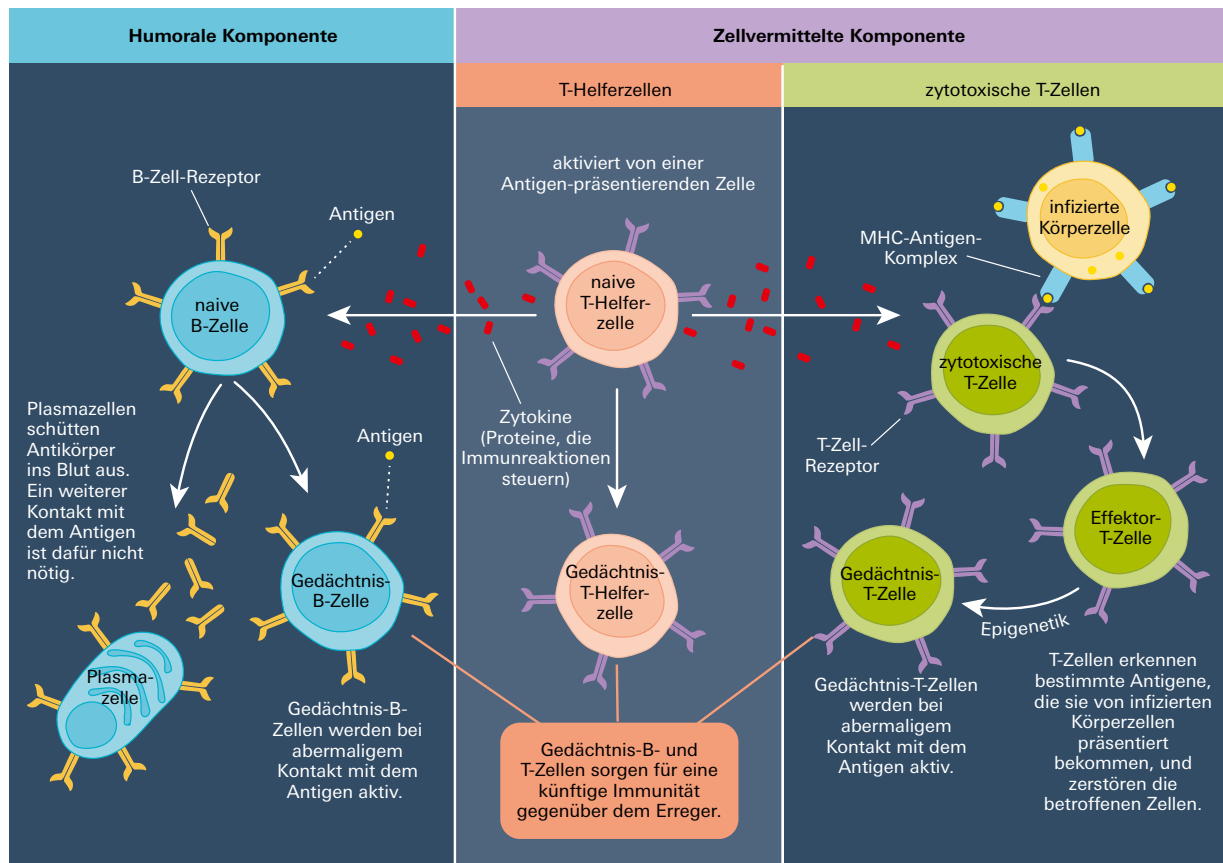
Die derzeitigen Covid-19-Vakzine erzeugen in der Regel eine Immunreaktion gegen das Stachel- oder Spikeprotein des Virus Sars-CoV-2. Im Hinblick darauf, was wir über andere Mitglieder dieser Virusfamilie wissen, ist bei dem Ansatz einiges zu bedenken, was den Immunschutz vor Coronavirus-Infektionen betrifft.

So hat sich bei natürlichen Coronavirus-Infektionen die Antikörperreaktion generell nicht als besonders empfindlich oder lang anhaltend erwiesen. Die T-Zell-Reaktion war bei Sars-CoV-1- und Mers-Fällen (beides Coronavirus-Erkrankungen) ein verlässlicherer Krankheitsmarker. Unter den Überlebenden der Sars-Pandemie 2002/2003 ließen sich drei Jahre später nur noch bei jeder zweiten Person Antikörper gegen das Virus nachweisen, sechs Jahre später bei keiner mehr. Bei Mers-Überlebenden war die Antikörperantwort gering bis gar nicht vorhanden, sofern die Krankheit mild verlaufen war. Auch bei Covid-19-Patienten scheint die Antikörperreaktion eher kurzlebig zu sein. In markantem Gegensatz dazu werden erregerspezifische T-Zellen bei Coronavirus-Infektionen oft auf breiter Front aktiviert; bei Sars-Überlebenden beispielsweise waren sie noch 17 Jahre nach der Erkrankung nachweisbar.

Zudem deutet manches darauf hin, dass bei Coronavirus-Infektionen eine starke Antikörperantwort mit einem schwereren Krankheitsverlauf einhergeht, eine ausgeprägte T-Zell-Antwort hingegen eher mit milden Symptomen (siehe »Spektrum« März 2021, S. 44). Mers-Überlebende mit höheren Antikörperspiegeln mussten länger intensivmedizinisch behandelt und häufiger beatmet werden als Patienten, bei denen keine Antikörper nachweisbar waren. Bei Covid-19 könnten Antikörper beziehungsweise Autoantikörper, die sich gegen körpereigene Proteine richten, ebenso eine kritische Rolle spielen. Spezifische T-Zellen dagegen scheinen die Viruslast und die Krankheitsschwere effektiv zu vermindern. Wenn bei natürlichen Coronavirus-Infektionen der Antikörperspiegel deutlich erhöht ist, könnte das die Begleiterscheinung einer schwachen T-Zell-Reaktion sein.

Zu einer »Antikörper-abhängigen Verstärkung« (Antibody-Dependent Enhancement, ADE) der Krankheit kann es

Zwei Arme des Immunsystems

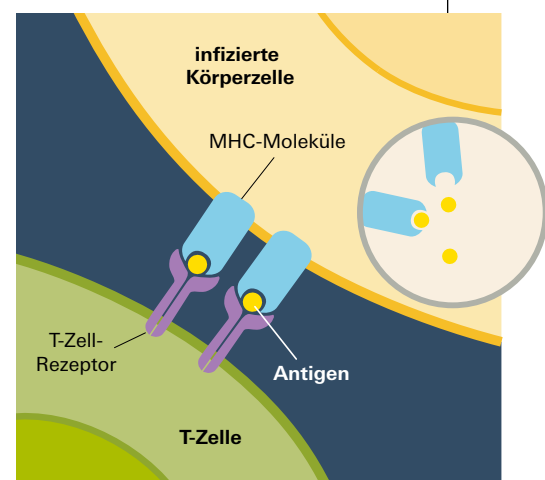


BARBARA AULICINO / AMERICAN SCIENTIST MÄRZ/APRIL 2021

Je nach Art des eindringenden Mikroorganismus reagiert unser Immunsystem auf verschiedene Weise. An vorderster Front kämpfen die Truppen der angeborenen Immunabwehr; etwas langsamer, aber gezielter reagiert die erworbene oder adaptive Immunantwort. Letztere untergliedert sich in zwei Komponenten – erstens die »humorale«, an der B-Lymphozyten beteiligt sind, die im Körper zirkulieren. Erkennen »naive« B-Zellen, die zuvor keinen Antigen-Kontakt hatten, bestimmte Bestandteile von Erregern, die »Antigene«, werden sie aktiv und entwickeln sich zu Plasma- sowie Gedächtnis-B-Zellen (siehe »Spektrum« Januar 2021, S. 23), dabei unterstützt von T-Helferzellen, die Substanzen namens Zytokine ausschütten. Plasmazellen produzieren Antikörper, die sich

gegen Antigene richten, während Gedächtnis-B-Zellen für eine zukünftige Immunität gegenüber dem Erreger sorgen.

Die zweite Komponente der adaptiven Immunantwort wird als »zellvermittelt« bezeichnet. Bei ihr treten zytotoxische T-Lymphozyten in Erscheinung, und zwar dadurch, dass sie von anderen Körperbestandteilen bestimmte Antigene präsentiert bekommen. Dabei kann es sich etwa um Virusbestandteile handeln, die im Innern einer befallenen Körperzelle produziert werden; die betroffene Zelle zeigt sie mit Hilfe eines Molekül-Ensembles namens »Haupthistokompatibilitätskomplex« (MHC) an ihrer Oberfläche. Wenn das geschieht, entwickeln sich die zytotoxischen T-Lymphozyten mit Unterstützung von T-Helferzellen zu Effektor-T-Zellen,



die infizierten Körperzellen erkennen und deren Zerstörung einleiten. Sie können jahrelang als Gedächtnis-T-Zellen im Blut zirkulieren und bei erneutem Kontakt mit dem jeweiligen Erreger rasch in Aktion treten.

kommen, wenn die Antikörper nicht wirksam oder zahlreich genug sind, um die Viren zu neutralisieren. Unter diesen Bedingungen können sie den Erregern sogar helfen, auf alternativen Wegen in die Körperzellen zu gelangen. So wird die feline infektiöse Peritonitis, eine Coronavirus-Erkrankung bei Katzen, durch vorheriges Verabreichen von Antikörpern oder manche vorangegangene Impfungen verschlimmert. Das könnte daran liegen, dass die Antikörperreaktion eine kurze Halbwertszeit hat, der Antikörperspiegel somit rasch fällt und schon nach kurzer Zeit nicht mehr für eine Neutralisierung der Erreger reicht, was bei ausbleibender T-Zell-Antwort zu schwereren Verläufen führt. Bei den Covid-19-Impfungen gibt es aber keinen Hinweis auf einen solchen Mechanismus.

Die derzeit zugelassenen Covid-19-Vakzine verleihen einen guten Immunschutz, allerdings haben wir einstweilen nur Daten für einen relativ kurzen Zeitraum nach der Impfung von einigen Monaten. Um langfristige Immunität hervorzurufen, müsste die Schutzimpfung das Immungedächtnis prägen. Bei den momentan eingesetzten Impfstoffen lassen sich grob zwei Ansätze unterscheiden: RNA-Vakzine, die den genetischen Bauplan zur Herstellung eines antigenen Virusproteins direkt in Körperzellen einbringen (siehe auch »Spektrum« März 2021, S. 52), und Adenovirus-basierte Impfstoffe, welche diesen Bauplan mit Hilfe von modifizierten, für uns harmlosen Viren in den Organismus einschleusen. In beiden Fällen stellt der Körper das Virusantigen selbst her, was eine Immunreaktion dagegen auslöst.

Rätselhafte T-Zell-Reaktion

Wichtig ist die Frage, ob RNA- beziehungsweise Adenovirus-basierte Impfstoffe eine effektive viruspezifische T-Zell-Antwort gegen Sars-CoV-2 hervorrufen und wie lang diese anhält. Dan Barouch von der Harvard University hat kürzlich gezeigt: Das Ausschalten zytotoxischer T-Lymphozyten in nichtmenschlichen Primaten verringert den Impfschutz gegen Sars-CoV-2. Das verdeutlicht, wie wichtig jene Zellen für den Organismus sind, um eine Coronavirus-Infektion zu kontrollieren. Daten von anderen viralen Impfstoffen, etwa gegen HIV, deuten darauf hin, dass die T-Zell-Reaktion bei RNA-Vakzinen schwächer ausfällt als bei auf Adenoviren basierenden. Inwieweit sich das auf die Covid-19-Immunsierung übertragen lässt, wissen wir nicht.

Die Markierung und Nachverfolgung von T-Zellen könnte helfen, diese Frage zu beantworten. Rachel Rutishauser von der University of California in San Francisco hat kürzlich Blutproben von Covid-19-Genesenen mit der Tetramer-Methode analysiert. In jeweils 10 Millilitern – das entspricht einer Menge von etwa zwei Teelöffeln – wies sie mehr als 2000 Coronavirus-spezifische T-Zellen nach. Damit genügen weniger als 50 Milliliter Blut, um mit Hilfe der Zellmarkierung die Lebensdauer der Lymphozyten zu bestimmen.

Für Hoffnung sorgt der historische Rückblick auf Fälle, in denen Schutzimpfungen vollständig erfolgreich waren. Ein herausragendes Beispiel ist der Polio-Impfstoff. Wir machen uns heute keine Vorstellung mehr von dem Schrecken, den die Kinderlähmung einst verbreitete. Betroffene Kinder wachten eines Morgens mit Erkältungssymptomen auf, konnten wegen einer örtlichen Lähmung aber schon

bald ein Bein nicht mehr bewegen. Bei manchen entwickelte sich daraus eine »bulbäre« Verlaufsform, die auf die Nerven übergriff, welche das Atmen und Schlucken koordinierten, was in der Regel tödlich endete. Selbst wenn die kleinen Patienten überlebten, behielten sie oft lebenslang verkümmerte Gliedmaßen zurück.

Allein im Jahr 1952 verzeichneten die USA 58 000 Polio-Fälle; 3000 davon mit tödlichem Ausgang. Kurz darauf entwickelte Jonas Salk, ein junger Arzt aus Pittsburgh, den Ansatz, das Virus chemisch zu inaktivieren und damit Menschen zu immunisieren. In einer placebokontrollierten Studie mit zwei Millionen Kindern führte dies zu einem dramatischen Rückgang an Polio-Erkrankungen, was die amerikanische Öffentlichkeit wie einen gewonnenen Krieg feierte. Der Impfstoff und andere, weiter entwickelte Vakzinen wurden schon bald breit eingeführt. Seit 1979 gab es in den USA keinen Ausbruch von Kinderlähmung mehr – abgesehen von Fällen unter streng gläubigen Amischen, die Impfungen aus religiösen Gründen ablehnen. In Westeuropa ereignete sich die letzte Polio-Epidemie im Jahr 1992; in Deutschland wurde die letzte Ansteckung 1990 verzeichnet. Weltweit ist die Zahl der Fälle seit den 1980er Jahren um 99 Prozent gesunken. Man kann sich kaum einen größeren medizinischen Triumph vorstellen als diesen Sieg über die Kinderlähmung, den die Schutzimpfung ermöglicht hat.

Der weltweite Handel und Reiseverkehr bräche rasch zusammen, würde die Welt alle paar Jahre von Pandemien – meist viralen Ursprungs und ohne wirksame Behandlungsmöglichkeiten – heimgesucht. Wie wäre das Jahr 2020 verlaufen, ohne die Hoffnung auf einen Covid-19-Impfstoff, der für anhaltende Immunität sorgt? Wenn wir über technologische Errungenschaften des industriellen und postindustriellen Zeitalters sprechen, denken wir meist an Elektrizität, Verbrennungsmotor, Telekommunikation, Abwassersysteme, Flugzeuge, Computer oder Internet. Wir sollten hier aber ebenso Schutzimpfungen nennen, und zwar an prominenter Stelle und unter besonderer Würdigung des T-Zell-vermittelten Immungedächtnisses. Dass wir diesen Punkt häufig übersehen, liegt an dem Erfolg von Vakzinierungen: Sie haben grauenhafte Krankheiten aus der Welt geschafft und uns so ihren Schrecken vergessen lassen. Jedenfalls so lange, bis eine neue Seuche auftaucht. Es ist ein großes Glück, dass sich das Immunsystem über Jahrzehnte hinweg an frühere Erreger erinnert – oft erheblich länger als unser persönliches Gedächtnis. ◀

QUELLEN

Barouch, D.H. et al.: Correlates of protection against SARS-CoV-2 in rhesus macaques. *Nature* 590, 2020

Hellerstein, M. et al.: Origin and differentiation of human memory CD8 T cells after vaccination. *Nature* 552, 2017

Hellerstein, M. et al.: Measurement of cell proliferation by heavy water labeling. *Nature Protocols* 2, 2007

AMERICAN
Scientist

© American Scientist
www.americanscientist.org

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)



UNSPLASH / ALES NESTRIH (unsplash.com/photos/m72j4ctkg)

Die Spektrum eBookFlat



Mit der **Spektrum eBookFlat** erhalten Sie Zugriff auf eine Auswahl von zwölf E-Books (PDF-Format) des Sachbuchprogramms von **Springer Spektrum** aus den Bereichen Mathematik und Naturwissenschaften.

Jeden Monat wird ein Buch ausgetauscht, so dass Sie im Jahr auf bis zu 24 Bücher zugreifen können. € 99,- im Jahresabo oder € 8,99 im jederzeit kündbaren Monatsabo.

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



ROUDESIGN / BETTY IMAGES / ISTOCK



ASTROPHYSIK KEINE EXOTISCHE MATERIE IN NEUTRONENSTERNEN

Theoretisch könnte im Kern der ultrakompakten Überreste von Sternexplosionen eine seltsame Materieform aus Elementarteilchen entstehen. Doch nun verpassen neue astronomische Messungen solchen Spekulationen einen Dämpfer.

Kein anderes bekanntes Objekt im Universum ist mit einem Neutronenstern vergleichbar. In diesen aus Supernovae hervorgegangenen Himmelskörpern ist die Masse eines Sterns auf den Durchmesser einer Großstadt zusammengepresst. Um sie herum und in ihnen spielen sich deswegen extreme physikalische Vorgänge ab. Einige Fachleute mutmaßen sogar, die unvorstellbaren Drücke im Inneren könnten besonders seltsame Materieformen hervorbringen. Doch es ist unmöglich, in Neutronensterne hineinzublicken, um das direkt zu untersuchen. Also müssen sich Astronomen und Astronomen auf die Eigenschaften verlassen, die sie prinzi-

piell messen können, nämlich die Masse und Größe der Objekte.

Bloß ist es alles andere als einfach, den exakten Durchmesser von etwas zu bestimmen, das Tausende von Lichtjahren entfernt und nur wenige zehn Kilometer groß ist. Ein erster Durchbruch ist 2019 mit dem NASA-Instrument Neutron star Interior Composition Explorer (NICER) gelungen, das zwei Jahre zuvor auf der Internationalen Raumstation installiert worden war. Mit dem Röntgenteleskop hat ein Team um Coleman Miller von der University of Maryland den Durchmesser eines Neutronensterns namens J0030 bestimmt, der 1000 Lichtjahre von der Erde entfernt ist und 1,4 Son-

nenmassen hat. Er ist etwa 26 Kilometer groß. Auf Basis weiterer NICER-Daten haben nun zwei Arbeitsgruppen, eine davon erneut um Coleman Miller, unabhängig voneinander eine entsprechende Analyse für einen anderen Neutronenstern durchgeführt – mit überraschendem Ergebnis.

Das als J0740 bezeichnete Objekt befindet sich in einem Abstand von 3000 Lichtjahren von der Erde. Mit 2,1 Sonnenmassen gehört J0740 zu den schwersten bekannten Neutronensternen. Obwohl er 50 Prozent mehr Masse besitzt als J0030, scheinen beide etwa gleich groß zu sein: Die Analysen lieferten für J0740 einen Durchmesser von 24,8 beziehungs-

ULTRAKOMPAKT Ein Neutronenstern besitzt mehrere Sonnenmassen, ist dabei aber nur so groß wie eine Stadt – in dieser Illustration Hannover.

weise 27,4 Kilometer. Die übliche unabhängige Begutachtung der Ergebnisse steht noch aus; beide Veröffentlichungen erfolgten im Mai 2021 vorab beim Preprint-Server arxiv.org.

Neutronensterne entstehen, wenn ein Stern mit der zirka 8- bis 20-fachen Masse unserer Sonne am Ende seines Lebens seinen Brennstoff verbraucht. Ohne diesen kann er nicht mehr dem Druck der Schwerkraft standhalten und stürzt in sich zusammen. Supernova-Explosionen schleudern seine Hülle ins All. Nur ein ultradichter Rest bleibt zurück.

Ein Neutronenstern hat eine dünne Kruste aus Ionen und Elektronen. In den darunter liegenden Schichten werden Protonen und Elektronen regelrecht ineinandergedrückt, woraufhin Neutronen entstehen, die bis zu 99 Prozent seiner Zusammensetzung ausmachen. In Richtung des Zentrums steigt die Dichte immer weiter, und dann passieren möglicherweise noch seltsamere Dinge. »Unter den einzelnen Neutronen und Protonen könnte ein Meer aus ihren Bestandteilen liegen, den Quarks«, erklärt Coleman Miller. »Wo sich ein solcher Übergang befände, ist allerdings nicht klar.«

Ausbleibender Phasenübergang

Bisher sagten einige Modelle voraus, hinreichend massereiche Neutronensterne – vielleicht bereits J0740 mit seinen 2,1 Sonnenmassen – würden wegen ihrer immensen Dichten die Neutronen und Protonen in ihre Bestandteile zerlegen. Und eine solche Quark-Materie ließe sich vergleichsweise gut zusammendrücken. Darum sollte beim Übergang von relativ normaler, atomkernähnlicher Materie »der Radius schrumpfen«, meint Anna Watts von der Universität Amsterdam, Zweitautorin der anderen Veröffentlichung.

Die neuen Befunde sprechen nun gegen die Hypothese. So absonderlich

die Objekte sind – ganz so bizarr verhalten sie sich dann offenbar doch nicht. »Es scheint so, als würden diese sehr exotischen Materiezustände im Kern eines Neutronensterns nicht vorkommen«, kommentiert der theoretische Physiker Jorge Piekarewicz von der Florida State University.

Dann würde der Phasenübergang zur Quark-Materie – falls es ihn überhaupt gibt – erst kurz vor der kritischen Grenze stattfinden, ab der ein Neutronenstern unaufhaltsam zu einem Schwarzen Loch kollabiert. Der genaue Wert dafür ist nicht bekannt, vermutlich liegt er bei etwa drei Sonnenmassen. »Die Frage ist«, so Watts, »wenn bei hoher Dichte ein seltsamer Stoff existiert, wann genau bildet er sich?«

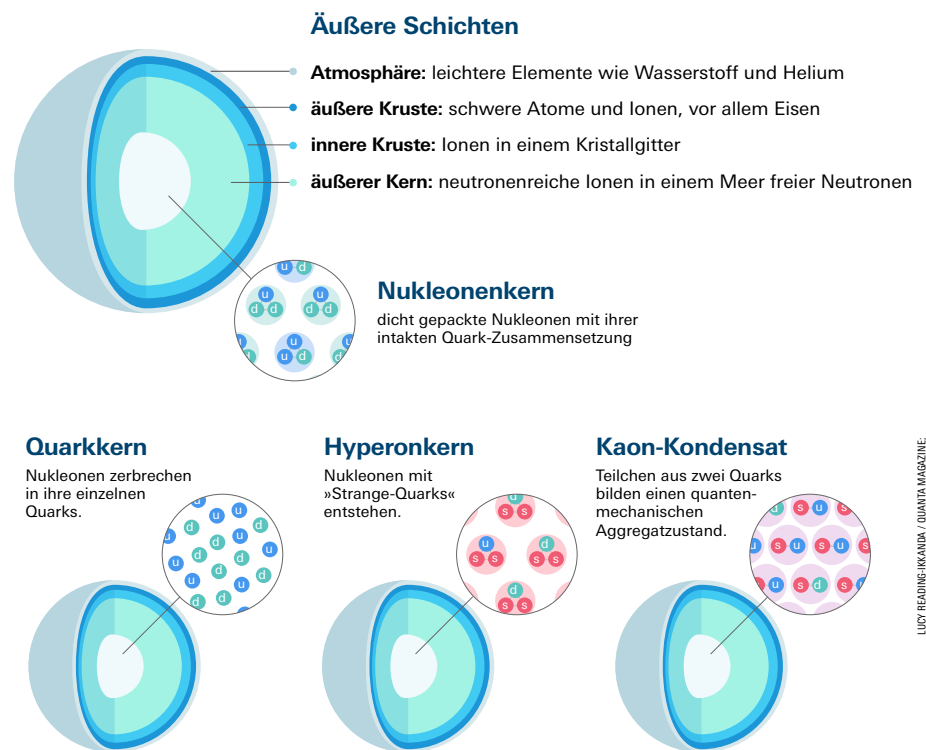
Falls J0740 diesen Phasenübergang durchlaufen hätte und mehr leichter komprimierbare Quark-Materie enthielte, sollte er Watts zufolge eher zwi-

schen 9 und 16 Kilometer groß sein. Doch, selbst wenn man die Messunsicherheiten berücksichtigt, läge laut Miller bei 22 Kilometer Durchmesser eine ziemlich klare untere Grenze.

Das bedeutet, wenn Neutronensterne überhaupt Quark-Materie hervorbringen, dann erst irgendwann jenseits von 2,1 Sonnenmassen. Ebenso gut könnten Protonen und Neutronen selbst auf den extremsten Skalen einfach erhalten bleiben. »Es sieht auf jeden Fall so aus, als wären einige der Modelle damit jetzt ausgeschlossen«, kommentiert Watts.

Dass Messungen der Größe von Neutronensternen grundsätzlich möglich sind, liegt an einer Eigenart der Himmelskörper. Sie drehen sich schnell, und mit ihnen rotieren Flecken auf ihrer Oberfläche, von denen starke Magnetfelder ausgehen und die Röntgenlicht ins All schicken. Auf Grund der enormen Gravitationswirkung der

DAS SELTSAME HERZ EINES NEUTRONENSTERNS Die extreme Gravitation eines Neutronensterns komprimiert dessen Kern stärker als alles, was im Labor erzeugt oder theoretisch genau berechnet werden kann. Deswegen ist unklar, wie die Materie im Kern aussieht. Wir stellen einige der wichtigsten Ideen vor.



LUCY BEARNE/STARR, QUANTUM MACHINES BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

kompakten Objekte wird sogar Strahlung, die auf der anderen Seite des Neutronensterns entsteht, durch die Schwerkraft gebeugt und in unsere Richtung gelenkt. Mit NICER lassen sich die Ankunftszeiten der Röntgenblitze hochpräzise registrieren. Das erlaubt Rückschlüsse auf den Durchmesser.

In die Diskussionen um die Größe von Neutronensternen mischt sich ein weiteres aktuelles Messergebnis, dieses Mal ein irdisches. Das Team des Lead Radius Experiment (PREx) am Jefferson Lab in Virginia hat einen Elektronenstrahl auf Blei geschossen. Dabei untersuchte es die so genannte Neutronenhaut, die als dünne neutrale Schicht über den positiv geladenen, an Protonen reichen Kern schwerer Atome hinausragt.

Anscheinend nimmt die Neutronenhaut etwas mehr Raum ein als gedacht, Neutronen drängen sich also nicht so eng zusammen wie erwartet. Der Unterschied zu bisherigen theo-

retischen Annahmen ist winzig, aber hochgerechnet auf die Dimensionen eines Neutronensterns sollten die kosmischen Objekte bis zu zwei Kilometer größer sein als bisher vorhergesagt. Jorge Piekarewicz, der zum PREx-Team gehört, hält die Ergebnisse für »völlig konsistent mit NICER«.

Ebendie mit NICER gewonnenen Resultate befinden sich indes noch in einem frühen Stadium der Auswertung. Anstehende Messungen des Radius eines dritten Neutronensterns könnten eine wichtige Rolle bei der Bestätigung oder Widerlegung spielen. Bewahrheitet sich die neue Interpretation, wären selbst Neutronensterne – nach Schwarzen Löchern die dichtesten Ansammlungen im Universum – nicht außergewöhnlich genug, um einige hypothetische Formen von exotischer Materie zu produzieren. ◀

Jonathan O'Callaghan ist Wissenschaftsjournalist in London und schreibt vor allem über Astronomie- und Raumfahrtthemen.

QUELLEN

Adhikari D. et al.: Accurate determination of the neutron skin thickness of ^{208}Pb through parity-violation in electron scattering. *Physical Review Letters* 126, 2021

Miller, M. C. et al.: The radius of PSR J0740+6620 from NICER and XMM-Newton data. arXiv:2105.06979, 2021

Riley, T.E. et al.: A NICER view of the massive pulsar PSR J0740+6620 informed by radio timing and XMM-Newton spectroscopy. arXiv: 2105.06980, 2021

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Squishy Neutron Star Setback Dampens Hopes of Exotic Matter« 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.



PFLANZENPHYSIOLOGIE BLÄTTER NUTZEN PHOSPHOR AUS WÜSTENSTAUB

Phosphat gehört zu den wichtigsten Nährstoffen der Pflanzen und muss oft über Dünger dem Boden zugefügt werden. Einige Nutzpflanzen haben jedoch eine weitere Quelle erschlossen, um drohendem Phosphatmangel vorzubeugen: Wüstenstaub.

► Phosphor ist ein Lebenselixier. Das Element steckt in unserer Erbsubstanz DNA, wirkt über das Molekül Adenosintriphosphat als Energiewährung unseres Stoffwechsels und hält in Form von Phospholipiden die Struktur der Zellmembran aufrecht. Über Pflanzen gelangt es in der Regel als Phosphate in die Nahrungsnetze der Erde. Phosphatmangel hemmt die Fotosyntheseleistung, so dass die Pflanze weniger Kohlenstoffdioxid (CO_2) fixiert und dadurch weniger Biomasse aufbaut. Die Menge an bioverfügbarem, also für Organismen nutzbaren Phosphor begrenzt daher in vielen Ökosystemen sowie auf landwirtschaftlichen Flächen das Pflanzen-

wachstum. Laut Lehrbuchwissen können Pflanzen Phosphorverbindungen lediglich fast ausschließlich im Boden über ihre Wurzeln nutzen, um ihren Bedarf zu decken.

Wie ein Forscherteam um Avner Gross von der israelischen Ben-Gurion-Universität des Negev nun entdeckte, erschließen sich jedoch manche Gewächse eine weitere Phosphorquelle: Wüstenstaub. Durch Winderosion können Stäube, also Feststoffpartikel von wenigen Mikrometern Größe, über beträchtliche Distanzen transportiert werden. So lagert sich in Mitteleuropa immer wieder Saharastaub ab, der durch den Wind in unsere Gefilde gelangte.

Schätzungsweise 1000 bis 3000 Milliarden Tonnen Wüstenstaub werden jährlich um den Globus geblasen, die zudem relativ große Mengen an Phosphorverbindungen enthalten, vor allem in Form schwer löslicher Kalziumphosphatminerale.

Die israelische Forschungsgruppe wollte wissen, ob auf Blätter aufgetragener Wüstenstaub das Pflanzenwachstum fördern kann. Als Versuchsobjekte dienten in Töpfen gezogene Keimlinge von Kichererbse (*Cicer arietinum*), Mais (*Zea mays*) und Weichweizen (*Triticum aestivum*). Den Staub stellte die Truppe um Gross aus dem Sand der israelischen Wüste Negev her, indem sie diesen in mehre-

ren Schritten siebten. Ferner teilten die Forscher die Pflanzen jeder Spezies in zwei Gruppen auf, die entweder mit genügend oder mit unzureichend Phosphor versorgt wurden. Den gesiebten Staub trugen sie dann in regelmäßigen Abständen von wenigen Tagen auf die Blätter der Versuchsgewächse auf und maßen anschließend die Trockenmassen der verschiedenen Gruppen.

Das Ergebnis war erstaunlich: Unter Phosphatmangel führte aufgetragener Wüstenstaub bei Kichererbsen und Weizen zu einem deutlichen Biomassezuwachs. Dabei blieb der relative Anteil von Phosphor an der Gesamtbiomasse konstant – was bedeutet, dass das chemische Element von außen, in diesem Fall also über die Blätter, zugeführt worden sein muss. Laut den Beobachtungen des Teams konnten die Versuchsgewächse bis zu einem Drittel des aufgetragenen, schwer löslichen Phosphors aufneh-

TROCKEN UND STAUBIG Die Wüste Negev umfasst nahezu die komplette Südhälfte Israels. Im südlichsten Teil bei der Stadt Eilat fällt mitunter über das ganze Jahr lang kein Regen.

men. Die Maispflanzen waren nicht dazu in der Lage und wiesen keinen signifikanten Biomassezuwachs auf.

Die Wissenschaftler führten ihre Beobachtung auf physiologische und strukturelle Anpassungen der Blätter zurück: Die Kichererbsen- und Weizenpflanzen senkten den pH-Wert an der Oberfläche ihrer Blätter deutlich herab, wodurch die Löslichkeit der Kalziumphosphatminerale um ein Vielfaches anstieg – die Phosphorverbindungen wurden somit mobilisiert und für den Organismus nutzbar gemacht. Vergleichbares geschieht im Einflussbereich der Wurzeln: Auch diese säuern den Boden an, indem sie Wasserstoffionen und CO_2 ausscheiden, das wiederum im Boden mit Wasser reagiert und Kohlensäure bildet. Bei Wurzeln gilt der Prozess als gut untersucht; bei Blättern wurde er indes noch nie beobachtet.

Ferner akkumulierten die Blätter unter Phosphatmangel wesentlich mehr Staub als die der gut ernährten Kontrollgewächse. Bei den Kichererbsen stieg die Anzahl sowie die Dichte der Trichome – das sind haarähnliche Strukturen – an den Blattoberflächen signifikant an. Dies galt auch für Drüsenhaare, mit denen die Pflanzen

Fettsäuren, Alkohole und Zucker ausscheiden. Das steigerte offensichtlich die Bindung des Wüstenstaubs sowie die Mobilisierung der Phosphorverbindungen. Zudem vergrößerte sich durch eine erhöhte Anzahl an Trichomen die Oberfläche der Blätter drastisch, wodurch die Pflanze ebenfalls mehr Staub auffangen und halten konnte. Das erinnert abermals an Wurzeln, die mit ihren Wurzelhaaren im Spitzenbereich die Oberfläche vergrößern und so die Stoffaustauschrate zwischen Boden und Organismus erhöhen.

Eintrittspforten

2020 klärten dänische Wissenschaftler um Søren Husted von der Universität Kopenhagen durch Markierungsexperimente auf, über welche Pfade Phosphorverbindungen in Blätter eindringen. Demnach nehmen Gerstenblätter (*Hordeum vulgare*) das Element vor allem über Faserzellen – die als Stützgewebe ähnlich wie Armierungseisen in Stahlbeton fungieren – sowie über Spaltöffnungen auf.

Warum versagte der Mais bei der Nutzung des Wüstenstaubs? Die Forscher vermuten einen Zusammenhang zu den ursprünglichen Verbrei-





GERBRENNO / GETTY IMAGES / ISTOCK



VIJCH / GETTY IMAGES / ISTOCK



SCHAD1983 / GETTY IMAGES / ISTOCK

VERSUCHSGEWÄCHSE

Kichererbsen (*Cicer arietinum*, oben links) und Weichweizen (*Triticum aestivum*, links) können über ihre Blätter Phosphorverbindungen aus Staub aufnehmen. Dem ursprünglich aus den Regenwäldern Mittelamerikas stammenden Mais (*Zea mays*, oben rechts) fehlt diese Eigenschaft.

tungsgebieten der untersuchten Nutzpflanzen: Weizen und Kichererbsen stammen aus der Region des Fruchtbaren Halbmonds nahe der Syrischen Wüste. Im Lauf der Evolutionsgeschichte haben offensichtlich beide Arten ihre Blätter dergestalt angepasst, dass sie Phosphor aus Wüstenstaub gewinnen können. Der Ursprung des Mais liegt hingegen in den Regenwäldern Mittelamerikas, wo es nie Wüsten gab. Somit fehlte der Selektionsdruck, Phosphor aus Staub zu gewinnen. Um zu überprüfen, ob diese Erklärung tatsächlich zutrifft, muss man allerdings noch weitaus mehr Pflanzenarten testen.

Die Entdeckung der israelischen Forschungsgruppe kann angesichts der sich abzeichnenden weltweiten Phosphorkrise von beträchtlichem Nutzen sein. Als nicht erneuerbare

Ressource wird das Element durch den Abbau von Phosphatgestein gewonnen. Doch nach derzeitigen Schätzungen werden die globalen Vorräte in 50 bis 300 Jahren erschöpft sein. Gleichzeitig weisen etwa 30 Prozent aller landwirtschaftlich genutzten Flächen einen Phosphatmangel auf und müssen deshalb gedüngt werden. Wüstenstaub stellt eine bisher ungenutzte Phosphorquelle dar, die gezielt für Nutzpflanzen wie Weizen oder Kichererbsen eingesetzt werden könnte.

Unklar bleibt, wie weit die Fähigkeit zur Nutzung von Wüstenstaub im Pflanzenreich verbreitet ist und welche Mechanismen dabei genau ablaufen. Auf Grund der Bedeutung der Landwirtschaft für die Ernährung der Weltbevölkerung sind hier weitere Untersuchungen gefordert. Doch

vielleicht hat die israelische Forschergruppe die Tür zu einem möglichen Ausweg aus zukünftigen Ernährungsengpässen einen kleinen Spalt weit geöffnet. ◀

Michael Denk ist Biologe in Berlin und interessiert sich vor allem für Pflanzenmorphologie und Evolutionsbiologie. An der Freien Universität Berlin ist er derzeit im Masterstudiengang »Ökologie, Evolution und Biodiversität« eingeschrieben. Außerdem wirkt er an einem Renaturierungsprojekt des Aueninstituts Neuburg der Katholischen Universität Eichstätt mit.

QUELLEN

Arsic, M. et al.: Bioimaging techniques reveal foliar phosphate uptake pathways and leaf phosphorus status. *Plant Physiology* 183, 2020

Gross, A. et al.: Direct foliar uptake of phosphorus from desert dust. *New Phytologist* 230, 2021

GRUPPENTHEORIE

80 JAHRE ALTE VERMUTUNG WIDERLEGT

Durch enormen computergestützten Aufwand gelang es einem Mathematiker, eine hartnäckige Hypothese aus der Welt der Algebra zu falsifizieren – womit er den Weg zu weiteren spannenden Ergebnissen geebnet hat.

Am 22. Februar 2021 hielt der Geometer Giles Gardam von der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster einen einstündigen Onlinevortrag über die so genannte Einheitsvermutung, eine grundlegende algebraische Frage, die seit mehr als 80 Jahren unbeantwortet blieb. Zunächst referierte er ausführlich den geschichtlichen Hintergrund und legte Verbindungen zu anderen mathematischen Bereichen dar. Und schließlich, in den letzten Minuten seines Vortrags, kam die Überraschung, mit der kaum einer seiner Zuhörer gerechnet hatte: »Ich bin überglücklich, heute erstmals verkünden zu können, dass die Einheitsvermutung falsch ist.«

Gardam wollte zu diesem Zeitpunkt noch nicht verraten, wie er zu dem lang ersehnten Ergebnis kam. Er bestätigte bloß, dass er bei der Suche nach einem geeigneten Gegenbeispiel auf die Unterstützung eines Computers gesetzt hat. In ein paar Monaten würde er mehr Details bekannt geben, versprach er, aber im Moment sei er noch daran, weitere Resultate auszuarbeiten.

Die Einheitsvermutung dreht sich um folgende Frage: Welche Objekte besitzen multiplikative Inverse? Damit sind zum Beispiel Zahlenpaare wie 7 und $\frac{1}{7}$ gemeint, so genannte Einheiten, deren Produkt eins ergibt. Die Vermutung bezieht sich allerdings nicht auf gewöhnliche Zahlen, sondern betrifft Elemente einer so genannten Gruppenalgebra – einer Struktur, die ein Zahlensystem (etwa die reellen Zahlen) mit einer Gruppe (einer Sammlung von Objekten wie Matrizen) verbindet.

Innerhalb einer solchen Struktur, so vermutete man vor mehr als acht Jahrzehnten, besitzen nur die einfachsten Elemente multiplikative Inverse. Um

das zu überprüfen, durchkämmten Mathematikerinnen und Mathematiker Mitte des 20. Jahrhunderts Gruppenalgebren auf der Suche nach komplizierten Einheiten – wurden dabei jedoch nicht fündig. Genauso wenig gelang es ihnen aber, die Hypothese zu beweisen. Im Lauf der Jahrzehnte sah man eine definitive Klärung der Einheitsvermutung schließlich als hoffnungslosen Fall an, so der Mathematiker Dawid Kielak von der University of Oxford.

Erstaunlicherweise gelang es Gardam nun doch, den jahrzehntealten Verdacht eindeutig zu widerlegen, indem er Beispiele für komplexe Objekte mit dazugehörigen Inversen innerhalb einer bestimmten Gruppenalgebra vorgelegt hat.

Die vielfältige Welt der Gruppen

Die Hypothese stützt sich auf das riesige Universum der Gruppentheorie, einen Bereich der Algebra, der die Verknüpfung von Elementen einer Menge untersucht, etwa die Multiplikation von Zahlen. Damit sich eine Sammlung als Gruppe qualifiziert, muss sie jedoch weitere Voraussetzungen erfüllen: Unter anderem benötigt sie ein neutrales Element (meist durch 1 symbolisiert), das alle anderen unverändert lässt, zudem muss zu jedem Element g ein Inverses (geschrieben g^{-1}) existieren, wobei g mal g^{-1} gleich 1 ist. Ein Beispiel für eine Gruppe sind die reellen Zahlen ohne die Null (da sie kein Inverses besitzt) mit der Multiplikation als Verknüpfung.

Die Welt der Gruppen ist erstaunlich vielfältig: Sie können Zahlen enthalten, Matrizen und Symmetrietransformationen. Einige erfassen wiederum die Anzahl der Löcher in einer geometrischen Figur oder die verschiedenen Anordnungen eines

Kartenspiels, während andere in der Physik, der Kryptografie und der Chemie auftreten.

Viele Gruppen enthalten nur eine einzige arithmetische Operation als Verknüpfung, zum Beispiel das gewöhnliche Produkt bei reellen Zahlen. Betrachtet man aber Sammlungen von Matrizen, gibt es mehrere Möglichkeiten, mit ihnen zu rechnen: Man kann sie miteinander oder mit einer einfachen Zahl multiplizieren. Zudem lassen sich die Objekte addieren. Wegen ihrer vielfältigen Eigenschaften erkannten Mathematikerinnen und Mathematiker früh, dass es sinnvoll sein kann, Gruppenelemente abstrakter Gruppen (etwa von Symmetrietransformationen) durch Matrizen darzustellen.

Das führte zu der Idee, das dazugehörige mathematische Konzept zu erweitern. Wenn sich Elemente durch Matrizen darstellen lassen, warum sollten sie nicht die gleichen Eigenschaften wie diese besitzen? Anders ausgedrückt: Man könnte auch allgemein die Summe von Gruppenelementen bilden oder sie mit Koeffizienten aus einem Zahlensystem multiplizieren. Sind a und b zwei Elemente einer Gruppe, lassen sich zumindest Terme wie $12a + 7b$ oder $4a^3 - 2ab^2$ aufschreiben.

Solche Ausdrücke haben nicht immer eine Bedeutung – es ist beispielsweise wenig sinnvoll, über die Hälfte einer Anordnung eines Kartenspiels plus siebenmal eine andere Mischvariation zu sprechen. Dennoch lassen sich damit algebraische Manipulationen durchführen, weshalb Mathematiker die Sammlung solcher Summen, die eine Gruppe mit den Koeffizienten eines Zahlensystems verweben, als Gruppenalgebra bezeichnen.

In vielerlei Hinsicht ähneln die Elemente einer Gruppenalgebra vertrauten Polynomen wie $x^2 - 4x + 5$ oder $3x^3y^5 + 2$, denen man bereits in der Schule begegnet. In einem zentralen Punkt unterscheiden sie sich jedoch davon. Multipliziert man zwei gewöhnliche Polynome miteinander, heben sich womöglich einige Terme auf, aber der Teil mit dem höchsten Exponenten wird den Prozess immer überleben. Das Produkt $(x - 1)(x + 1)$ zum Beispiel ergibt ausmultipliziert $x^2 + x - x - 1$; x und $-x$ heben sich auf, doch x^2 und -1 bleiben bestehen. In einer Gruppenalgebra können die Beziehungen zwischen Gruppenelementen hingegen zu schwer vorhersehbaren Ergebnissen führen – häufig verschwinden nach dem Ausmultiplizieren zahlreiche Terme.

Was bleibt am Ende übrig?

Ein Beispiel dafür bietet die Gruppe der Symmetrietransformationen des Buchstabens A. Sie enthält nur zwei Elemente: die Transformation, die jeden Punkt unverändert lässt (die 1), und die Spiegelung an der vertikalen Achse (r). Spiegelt man das Symbol zweimal hintereinander, landen alle Punkte wieder an ihrer ursprünglichen Position, so dass $r \cdot r = r^2 = 1$ ist. Diese Eigenschaft führt zu unerwarteten Ergebnissen in der Gruppenalgebra. Multipliziert man etwa $r + 2$ mit $-\frac{r}{3} + \frac{2}{3}$, hebt sich fast alles auf, und es bleibt nur 1 übrig: $(r + 2)(-\frac{r}{3} + \frac{2}{3}) = -(r^2)/3 + \frac{2}{3}r - \frac{2}{3}r + \frac{4}{3} = -(r^2)/3 + \frac{4}{3} = 1$. Daher bilden $r + 2$ und $-\frac{r}{3} + \frac{2}{3}$ eine Einheit, sie sind multiplikative Inverse.

1940 stellte der Algebraiker Graham Higman in seiner Doktorarbeit die gewagte Einheitsvermutung auf: Das stärkste Ausmaß an Aufhebungen, so schlug er vor, tritt nur dann ein, wenn die dazugehörige Gruppe Elemente enthält, die potenziert 1 ergeben, wie r im obigen Beispiel. In allen anderen Fällen, postulierte er, könnten zwar einfache Objekte aus nur einem Term (wie $7a$ oder $8b$) Inverse besitzen, aber Summen wie $r + 2$ oder $3r - 5s$ nicht.

Lange Zeit fand man keinerlei Hinweise, die auf die Richtigkeit oder Falschheit der Vermutung hindeuteten.

Wenn überhaupt, gab es einen philosophischen Grund, sie anzuzweifeln: Wie der berühmte Mathematiker Mikhael Gromov beobachtet haben soll, sind Gruppen so vielfältig, dass jede allgemeine Aussage über sie fast immer falsch ist – außer es gibt einen offensichtlichen Grund, warum sie wahr sein muss. Aber niemand konnte ein Beispiel finden, das der Hypothese widersprach. Deshalb gingen viele davon aus, es müsste ein tiefgründiges mathematisches Prinzip geben, aus dem die Einheitsvermutung folgt.

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts schien sich ein Kandidat dafür herauszukristallisieren: die K-Theorie – ein riesiges Gebilde, das die Algebra mit vielen anderen Bereichen wie der Topologie und der Zahlentheorie vereint. Mit Hilfe dieser Theorie lässt sich besagte Vermutung etwa mit der Frage verbinden, wann sich eine topologische Figur durch vorgeschriebene Verformungen in eine andere umwandeln lässt. Wegen solcher Zusammenhänge versuchte man, die Einheitsvermutung aus unbewiesenen Thesen der K-Theorie zu folgern – in der Hoffnung, diese irgendwann zu beweisen – doch alle Bemühungen scheiterten.

Also widmeten sich Fachleute konkreten Fallbeispielen, indem sie bestimmte Klassen von Gruppen untersuchten. Wie sie zeigen konnten, besitzen diese eine Eigenschaft, die es verhindert, dass sich komplexe Terme aufheben, ähnlich den höchsten Exponenten in Polynomen. Für solche Spezialfälle ließ sich die Vermutung beweisen. Allerdings sind auch Gruppen bekannt, denen ebenjenes Merkmal fehlt, darunter die so genannte Hantzsche-Wendt-Gruppe. Diese beschreibt die Symmetrien einer Figur, die Physiker einst als mögliche Form des Universums in Betracht zogen. Sie entsteht durch das Zusammenkleben der Seiten eines dreidimensionalen Kristalls. Gardam sah die Hantzsche-Wendt-Gruppe daher als passenden Startpunkt an, um die Einheitsvermutung zu prüfen. Weil die Gruppe aber unendlich groß ist, gestaltete sich das schwer – denn dadurch gibt es unendlich viele Möglichkeiten, Summen zu

bilden. 2010 zeigten zwei Mathematiker, dass sich unter den einfachsten Termen der Gruppe kein Gegenbeispiel der Vermutung (falls überhaupt eines existiert) befindet.

Leistungsstarke Computer auf der Suche nach Inversen

Doch Gardam ist es nun gelungen, eine Einheit mit jeweils 21 Summanden in einer Gruppenalgebra zu finden, die aus den Elementen der Hantzsche-Wendt-Gruppe aufgebaut ist. Bei der Suche war er auf leistungsstarke Computerunterstützung angewiesen. Zu verifizieren, dass es sich wirklich um Inverse handelt, gestaltet sich hingegen wesentlich einfacher. Man muss dafür bloß die entsprechenden Summen miteinander multiplizieren und sicherstellen, dass sich die entstehenden 441 Terme auf die Zahl 1 vereinfachen lassen – das lässt sich auch ohne Rechner bewerkstelligen.

Sobald Gardam die Details seines Algorithmus veröffentlicht, ist die Jagd für Mathematiker eröffnet: Sie können sich daran machen, die Hantzsche-Wendt-Gruppe und möglicherweise auch andere Strukturen zu erforschen. ◀

Erica Klarreich hat in Mathematik promoviert und ist Wissenschaftsjournalistin in Berkeley (Kalifornien).

QUELLEN

Gardam, G.: A counterexample to the unit conjecture for group rings. ArXiv: 2102.11818, 2021

Higman, G.: The units of group-rings. Proceedings of the London Mathematical Society 1, 1940

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzt und bearbeitete Fassung des Artikels »Mathematician disproves 80-year-old algebra conjecture« 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.



SPRINGER'S EINWÜRFE GROSSMUT AUS EGOISMUS

Die Menschheit hat im Rekordtempo Impfstoffe gegen die Coronavirus-Pandemie hergestellt. Jetzt gilt es, die Vakzine richtig zu verteilen.

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/1886773

Das Kunststück, in unglaublich kurzer Zeit ein ganzes Arsenal an Impfstoffen gegen die Krankheit Covid-19 zu entwickeln, zu testen und millionenfach zu produzieren, macht dem aktuellen Niveau biologischer Wissenschaft und medizinischer Technik höchste Ehre. So pathetisch es sich anhören mag: Einer intelligenten Spezies anzugehören, die es versteht, auf eine lebensbedrohliche Attacke derart schlagfertig zu reagieren, erfüllt mich mit Stolz.

In das Behagen mischen sich freilich, je länger der Kampf gegen die Pandemie andauert, immer öfter Gefühle wie Sorge, Ungeduld, ja Scham. In Staaten wie den USA und Brasilien, welche die Seuche allzu lang auf die leichte Schulter nahmen, haben die Todeszahlen die Halbmillionengrenze überschritten. Der indische Subkontinent erlitt einen schweren Rückfall, auf den hin sich nun die ganze Welt um eine neue Virusmutante sorgt. In Afrika erlaubt die Datenlage kaum verlässliche Schätzungen, aber von einer effektiven Strategie gegen Covid-19 ist man dort jedenfalls weit entfernt.


Die globale Statistik bietet ein hässliches Bild extremer Unterschiede. Die weltweite Durchschnittsquote von etwas mehr als 30 verabreichten Impfdosen pro 100 Menschen mutet zwar ansehnlich an, sie nivelliert aber monströse Ungleichheit. Mehr als drei Viertel der verabreichten Dosen entfielen auf nur zehn reiche Nationen, die zusammen für 60 Prozent der globalen Wirtschaftsleistung aufkommen. 130 arme Länder mit 2,5 Milliarden Einwohnern bekamen gar nichts. In den wohlhabendsten Staaten leben nur 16 Prozent der Erdbevölkerung, doch sie kauften mehr als die Hälfte aller Ampullen.

Das ist nicht nur unfair, sondern einfach dumm, argumentiert sinngemäß der Gesundheitsforscher Gavin Yamey von der Duke University in Durham

(US-Bundesstaat North Carolina). Eine Pandemie lässt sich mit nationalen Egoisten nicht niederkämpfen. Wenn sie anderswo weiter grassieren darf, entstehen dort Virusmutanten, die den bereits sanierten Regionen erneut gefährlich werden. So kann die Pandemie noch jahrelang wüten. Dabei erleidet eine derart infizierte Weltwirtschaft Schäden in Billionenhöhe infolge wegfallender Nachfrage und kollabierender Lieferketten (*Nature 590*, S. 529, 2021).

Yamey hat 2020 an einer spieltheoretischen Studie mitgewirkt, die untersuchen sollte, wie sich knappe Impfstoffe gerechter verteilen lassen. Auf den ersten Blick handelt es sich um ein reines Nullsummenspiel: Was ich hergebe, fehlt mir; also bleibe ich Egoist. Das ändert sich erst, wenn ein Hersteller Produktionslizenzen für ärmere Länder vergibt. Beispielsweise stellt das Serum Institute of India bereits den britischen AstraZeneca-Impfstoff her, und brasilianische Firmen erzeugen Vakzine nach chinesischem Rezept. In die gleiche Richtung weist auch die – zunächst folgenlose und nicht überall goutierte – Ankündigung von US-Präsident Biden, den einschlägigen Patentschutz zu Gunsten wirtschaftlich schwacher Staaten zu lockern. So etwas müsste allerdings, um zu wirken, mit Kapitalspritzen für den Bau örtlicher Pharmafabriken einhergehen.

Einen wichtigen Faktor, der Hoffnung auf bessere Verteilung weckt, nennt Yamey gar nicht: die so genannte Impfdiplomatie. Der Westen kann wohl nicht lange tatenlos zusehen, wie China – das unterdessen Tag für Tag 20 Millionen seiner Bürger zu impfen vermag – den Schwellen- und Entwicklungsländern in großem Stil seine Vakzine andient. Hier zeichnet sich ein politischer Wettstreit ab, der ausnahmsweise wirklich allen zum Vorteil gereichen kann.



PALÄONTOLOGIE ENTZAUBERUNG EINES FILMBÖSEWICHTS

Die bisher umfassendste Studie über einen der populärsten Dinosaurier aus »Jurassic Park« dürfte Filmfans ernüchtern: Der echte *Dilophosaurus* hat mit der Leinwandkreatur wenig zu tun.

URZEITLICHER JÄGER

Dilophosaurus stand an der Spitze der Nahrungspyramide in seinem einstigen Lebensraum und erbeutete auch andere Dinosaurier.



Matthew A. Brown (links) ist Direktor der Texas Vertebrate Paleontology Collections und hält an der University of Texas in Austin Vorlesungen über Arbeitsmethoden in paläontologischen Laboratorien und Museen. Daneben erforscht er den Umgang von Museen mit Fossilien, um sie als Quellen wissenschaftlicher Erkenntnisse nutzbar zu machen. **Adam D. Marsh** ist leitender Paläontologe des Petrified Forest National Park und forscht an den Texas Vertebrate Paleontology Collections und dem Museum of Northern Arizona. Seine wissenschaftliche Arbeit zielt auf eine gesamtheitliche Sicht der Wirbeltierpaläontologie, Stratigraphie und Geochronologie von Gesteinen des frühen Erdmittelalters.

» [spektrum.de/artikel/1886755](https://www.spektrum.de/artikel/1886755)

► Auch am späten Nachmittag brannte uns die Sonne noch gnadenlos auf den Rücken. Wir befanden uns im Herzen des Dinosaurierlandes auf dem Colorado Plateau im nördlichen Arizona. Inmitten der Navajo Nation waren dort zuvor zwei Skelette des *Dilophosaurus wetherilli* entdeckt worden. Deren genaues Alter wollten wir nun anhand geologischer Daten bestimmen.

Wir hatten diesen heißen Tag im Juni 2014 damit verbracht, auf und ab durch die unwirtlichen Badlands zu stapfen, das felsige Terrain zu vermessen und die mitgebrachten Rucksäcke mit Gesteinsproben zu füllen. Nun hieß es ausgraben – aber nicht etwa ein Saurierskelett, sondern unseren Geländewagen, der sich in den Dünen festgefahren hatte. Um ihn wieder frei zu bekommen, mussten wir den Sand, in dem er bis zu den Achsen steckte, mühsam mit Schaufeln und bloßen Händen beiseiteräumen.

Das Leben eines durch die Welt streifenden Feldforschers ist keineswegs so abenteuerlich, wie viele denken, sondern vor allem von profanen Dingen geprägt: Genehmigungen beantragen, Notizen machen, Mahlzeiten kochen, im Camp abwaschen, im Schein des Lagerfeuers die Daten des Tages sichten. Aufregende Erlebnisse sind selten – anders als bei Indiana Jones oder Alan Grant aus Steven Spielbergs Film »Jurassic Park«, die kaum je in die Verlegenheit kommen, ihren festgefahrenen Pick-up ausbuddeln zu müssen.

Im Sommer 1993 eroberten Dinosaurier und Paläontologen die Kinoleinwände in aller Welt. Der Blockbuster »Jurassic Park«, nach dem Roman von Michael Crichton aus dem Jahr 1990, machte zuvor kaum bekannte Saurier über Nacht zu Stars und blutrünstigen Monstren. Namen wie *Velociraptor* und *Dilophosaurus* waren neben *Tyrannosaurus* und *Triceratops* plötzlich in aller Munde.

Davor hatten die Dinosaurier in Abenteuerfilmen meist wenig gemeinsam mit den Tieren, die Wissenschaftler von Fossilfunden her kennen. Doch »Jurassic Park« und seine Fortsetzungen stützten sich auf die neuesten Erkenntnisse aus Paläontologie und Gentechnik, die sie auf erzählerische Weise verarbeiteten. Autor Crichton und Regisseur Spiel-

berg gewährten dem breiten Publikum damit erstmals Einblicke in die moderne Dinosaurierforschung. Ihre Darstellung der urtümlichen Echsen als agile, intelligente Tiere wirkt bis heute nach.

Allerdings gestatteten sich die Filmmacher künstlerische Freiheiten, um eine fesselnde Story zu erzählen. Sie dramatisierten nicht nur das Leben der Wissenschaftler, sondern auch die Saurier selbst. *Dilophosaurus* ist die Echse, deren filmisches Porträt am meisten von den fossilen Befunden abweicht. Im Kino ist sie so groß wie ein Golden Retriever, trägt eine ausklappbare Halskrause und spuckt giftigen Speichel, mit dem sie den Programmierer und Dinoembryonen-Schmuggler Dennis Nedry tötet. Doch was für ein Tier war der echte *Dilophosaurus*?

Als er zum Filmstar wurde, hatten die Paläontologen im Grunde noch keine klare Vorstellung von seiner Anatomie und Lebensweise. In den fast drei Jahrzehnten seither haben Forscher aber weitere fossile Exemplare geborgen und mit immer raffinierteren Methoden analysiert. Daher können wir Aussehen und Verhalten von *Dilophosaurus*, seine stammesgeschichtliche Position und die Welt, in der er lebte, inzwischen detailliert rekonstruieren. Damit verfügen wir zugleich über das bisher genaueste Porträt eines Dinosauriers aus der Epoche des frühen Juras. Zudem zeigte sich, dass der echte *Dilophosaurus* nur wenig Ähnlichkeit mit seinem Gegenstück auf der Leinwand hatte.

Das echte Tier im Vergleich zum Hollywood-Unhold

Dilophosaurus war ein über sieben Meter langer zweibeiniger Fleischfresser mit zwei charakteristischen parallelen Kämme aus sehr dünnen Knochen entlang der Oberseite seines Kopfes (sein Name ist von den griechischen Wörtern *sauros* für Echse und *lophos* für Kamm abgeleitet). Als das Tier 1954 zum ersten Mal in der wissenschaftlichen Literatur auftauchte, trug es noch einen anderen Namen. Samuel Welles, ein Paläontologe der University of California in Berkeley, stellte in einer Serie von Artikeln die Ergebnisse seiner Untersuchungen an zwei fossilen Skeletten vor, die Jesse Williams, ein Navajo aus der Gegend von Tuba City in Arizona, gefunden hatte. In den fragmentarischen Überresten waren die Knochenkämme nicht erkennbar. Welles nannte das Tier *Megalosaurus wetherilli*, weil er glaubte, es handele sich um eine neue Spezies aus der bereits bekannten Gattung *Megalosaurus*. Doch 1964 fand er ein weiteres Exemplar, bei dem der obere Teil des Schädels mit seinen beiden Kämmen erhalten war. Das zeigte, dass es sich um eine zuvor unbekannte Gattung handelte, und so änderte Welles den Namen in *Dilophosaurus wetherilli*.

In den damaligen fossilen Überresten wirkten einige der Verbindungen zwischen den Knochen der Zahnleiste vorne im Oberkiefer schwach und gering belastbar. Deshalb vermutete Welles, dass die Echse ein Aasfresser war oder ihre Beutetiere mit den Klauen tötete.

Auf seiner anatomischen Beschreibung von 1984 sowie musealen Rekonstruktionen des Skeletts und zeichnerischen Darstellungen in dem 1988 erschienenen Buch »Predatory Dinosaurs of the World« des Paläontologen Gregory S. Paul basiert der grundlegende Körperbau des

AUF EINEN BLICK DER WAHRE *DILOPHOSAURUS*

- 1 Die Macher des Abenteuerfilms »Jurassic Park« orientierten sich bei ihren Dinosauriern am damaligen Wissensstand – so auch bei *Dilophosaurus*. Allerdings gestatteten sie sich gewisse künstlerische Freiheiten.
- 2 Dank neuer Fossilien und Analysen ist *Dilophosaurus* inzwischen der am besten charakterisierte Dinosaurier aus der Epoche des frühen Juras.
- 3 Im Licht der neuen Erkenntnisse hat sich das Bild der urzeitlichen Echse gewandelt: Mit ihrer imposanten Statur und dem kräftigen Gebiss war sie der Topräuber in einer Flussoase innerhalb einer Sandwüste.



AUSGEBURT DER FANTASIE
 Die *Dilophosaurus*-Darstellung im Dinosaur Park, Wales, beeindruckt wie im Film »Jurassic Park« aus dramaturgischen Gründen mit einer Furcht erregenden Halskrause.

ALAMY / NIKREATES

Dilophosaurus in »Jurassic Park«. Doch wich seine Gestalt in mehreren wichtigen Punkten vom wissenschaftlichen Vorbild ab. Vor allem war die filmische Echse nur knapp halb so groß wie der echte *Dilophosaurus*, um einer Verwechslung mit *Velociraptor* vorzubeugen, einem weiteren mordgierigen Unhold im Leinwandepos. Außerdem stateten die Filmemacher sie mit zwei fiktiven Merkmalen aus, die allein der Schockwirkung dienten: Sie spuckt giftigen Speichel und trägt eine abspreizbare Halskrause.

Vorbild für Ersteres waren Speikobras, die aus den Kanälen ihrer Giftzähne in gezieltem Strahl toxisches Sekret über zwei Meter weit spritzen können und dabei versuchen, die Augen des Beutetiers zu treffen. Die Anregung für die ausklappbare Halskrause stammt dagegen von der Kragenechse (*Chlamydosaurus kingii*), einer in Australien und Neuguinea verbreiteten Agame. Ein Gerüst aus knorpeligen Stäben, das vom Hals ausgeht, bewegt bei ihr den von einer Hautmembran gebildeten Schirm. In den Fossilfunden von *Dilophosaurus* finden sich keinerlei Hinweise auf eine solche Struktur.

In anderer Hinsicht entsprach »Jurassic Park« allerdings dem neuesten Stand der damaligen Wissenschaft. In den frühen 1980er Jahren setzte sich unter Paläontologen die Überzeugung durch, dass die modernen Vögel von den Dinosauriern abstammten. Daher verwarfen die Filmemacher ihre ersten Animationen des *Velociraptor*, in denen er

sich noch schlängelnd fortbewegte. Stattdessen ließen sie ihn auf Empfehlung ihres wissenschaftlichen Beraters, des Paläontologen Jack Horner, wie einen Vogel auf zwei Beinen laufen. Mit der Darstellung der Dinosaurier als schnelle, intelligente Tiere statt wie zuvor als schwerfällige, reptilienähnliche Kreaturen führte der Film erstmals einer breiten Öffentlichkeit ihre Verwandtschaft mit den Vögeln vor Augen.

Doch auch in wissenschaftlicher Hinsicht hat sich das Bild von *Dilophosaurus* seit der Premiere von »Jurassic Park« erheblich geändert. Das ist kein Wunder; denn schon vor dem Erscheinen von Buch und Film erlebte die Paläontologie einen enormen Umbruch. Fortschritte der Computertechnik eröffneten ganz neue Möglichkeiten zur Untersuchung von Fossilien; insbesondere ließen sich nun riesige Datenmengen auf eine Weise verarbeiten, die bei der Entdeckung von *Dilophosaurus* noch unvorstellbar war.

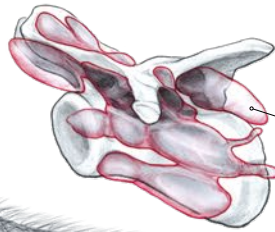
Ein Beispiel ist die kladistische Analyse. Sie identifiziert charakteristische erbliche anatomische Merkmale von Fossilien und wertet ihr Vorkommen statistisch aus. Paläontologen können heute dank der enorm gesteigerten Rechenleistung sehr viel mehr solche Merkmale in sehr viel kürzerer Zeit analysieren und so fundiertere Modelle der stammesgeschichtlichen Verwandtschaft von Dinosauriern und ihrer Evolution erstellen. Die Fortentwicklung der medizinischen und industriellen Computertomografie (CT)

Porträt eines Räubers

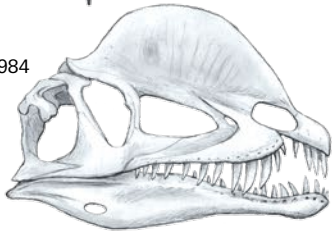
Der doppelte Schädelkamm enthielt Luftsäcke, die wahrscheinlich mit Keratin ummantelt waren. Die auffällige Struktur könnte beim individuellen Erkennen von Artgenossen oder bei der Partnerwahl eine Rolle gespielt haben.

Erste Untersuchungen an Skelettfragmenten von *Dilophosaurus* ließen vermuten, dass das Tier nur schwache Kieferknochen hatte und daher wahrscheinlich entweder ein Aasfresser war oder seine Beute mit den Krallen tötete. Neueste Analysen der Gesamtheit aller bekannten Fossilien zeichnen jedoch das Bild eines Furcht erregenden Räubers. Demnach hatte *Dilophosaurus* wohl nicht nur einen viel kräftigeren Biss als zuvor angenommen, sondern war trotz seiner Größe auch schnell und wendig. An der Spitze der Nahrungspyramide seines Ökosystems stehend, machte er sogar Jagd auf andere Raubsaurier.

Luftsäcke in den Wirbeln
Luftgefüllte Aussackungen der Lunge in den Wirbeln machten das steife Skelett leichter und ermöglichten eine unidirektionale Atmung – was mit einer hohen Stoffwechselrate und gesteigerter körperlicher Leistungsfähigkeit einherging.



1984



heute



Gewandelte Sicht

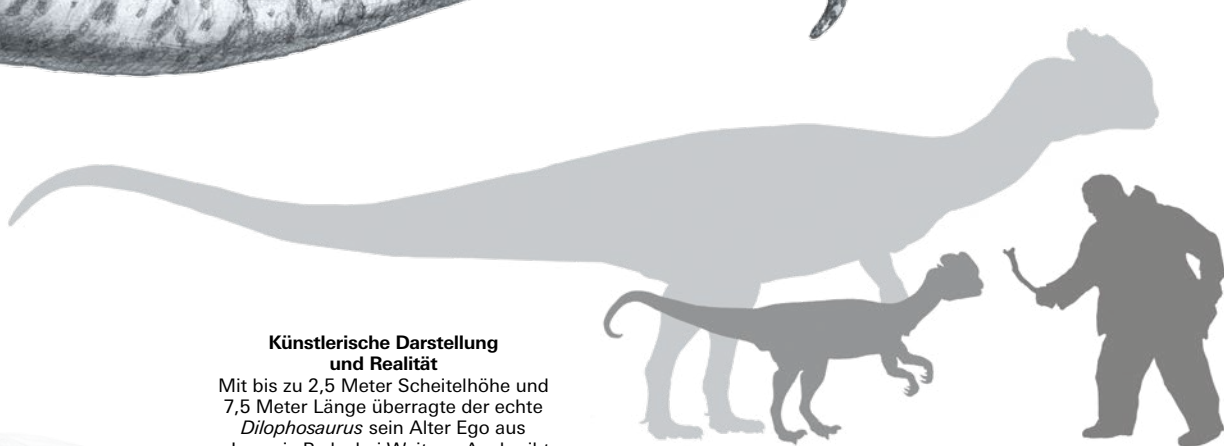
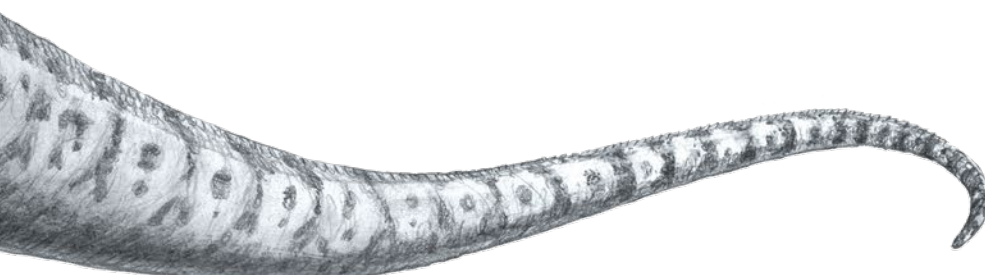
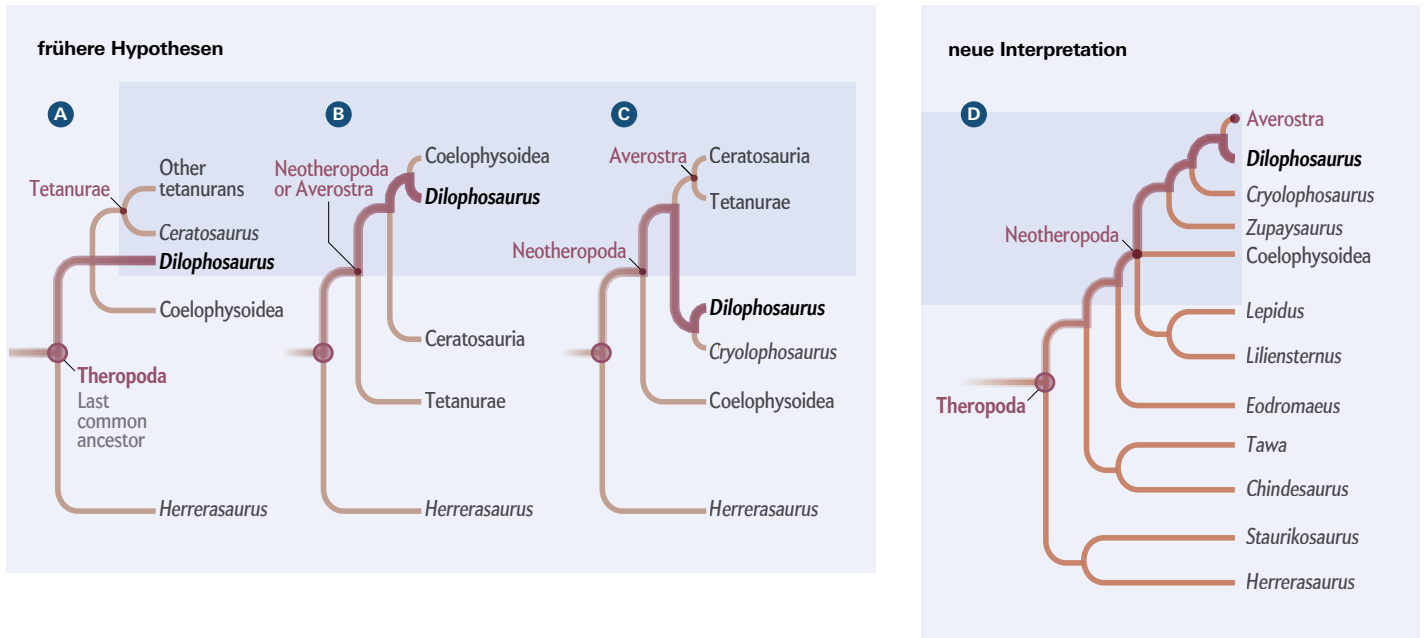
Nach heutiger Kenntnis war die Knochenbrücke vorn am Oberkiefer von *Dilophosaurus* massiver und auch der Unterkiefer größer als ursprünglich vermutet. Demnach verfügte das Tier sehr wohl über einen tödlichen Biss. Wie das obere Ende der beiden Käme aussah, ist nach wie vor unbekannt, da es sich in keinem Fossil bisher erhalten hat. Die Auswüchse könnten also größer gewesen sein als hier dargestellt.

Mit langen, muskulösen Hinterbeinen und klauenbewehrten, kräftigen Vordergliedmaßen war *Dilophosaurus* ein exzellenter Beutegreifer.

Revision des Stammbaums

Lange rätselten Paläontologen über die Verwandtschaft von *Dilophosaurus* mit anderen Dinosauriern. Frühere Studien legten nahe, dass er am engsten mit den Coelophysoideen **A**, den Ceratosauriern **B** oder anderen kammtragenden Theropoden **C** verwandt war. Samuel Welles, der die ersten Beschreibungen von *Dilophosaurus*-Fossilien veröffentlichte, war noch der Meinung, die verschiedenen Funde repräsentierten mehrere Dinosauriergattungen. Gemäß der neuesten, umfassenden Analyse charakteristischer anatomischer Merkmale gehören sie jedoch zu einer einzigen Art. Der Vergleich dieser Merkmale mit denen anderer Dinosaurier aus der ganzen Welt zeigte zudem, dass *Dilophosaurus* den großen Theropoden des Juras am nächsten stand **D**. Doch besteht eine große evolutionäre Distanz zwischen beiden Gruppen. Deshalb dürften noch engere, bisher unentdeckte Verwandte existiert haben.

ILLUSTRATION: BRIAN ENGH; STAMMBAUM: DASY CHUNG. FRÜHERE HYPOTHESEN NACH MARSH, A. D., IRVING, T. B.: A COMPREHENSIVE ANATOMICAL AND PHYLOGENETIC EVALUATION OF DILOPHOSAURUS WETHEILLI (DINOSAURIA, THEROPODA) WITH DESCRIPTIONS OF NEW SPECIMENS FROM THE KAVENTA FORMATION OF NORTHERN ARIZONA. JOURNAL OF PALEONTOLOGY 94, DOI.ORG/10.1017/JPA.2020.14, 2020, FIG. 7 / SCIENTIFIC AMERICAN, JANUAR 2021; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Künstlerische Darstellung und Realität

Mit bis zu 2,5 Meter Scheitelhöhe und 7,5 Meter Länge überragte der echte *Dilophosaurus* sein Alter Ego aus »Jurassic Park« bei Weitem. Auch gibt es keine Hinweise, dass er wie im Film eine ausklappbare Halskrause trug oder Gift speien konnte.

ermöglicht es zugleich, mit hoher Auflösung zerstörungsfrei in das Innere von fossilhaltigem Gestein oder Fossilien selbst zu blicken und darin verborgene anatomische Strukturen auszumachen.

Zum Wandel im Bild von *Dilophosaurus* trugen auch neue Fossilfunde bei: 1998 entdeckte ein Team der University of Texas in Austin in der ursprünglichen Fundregion im Norden Arizonas weitere Fossilien der Echse. Darin ließen sich Teile der Anatomie gut erkennen, die in den früheren Skelettresten fehlten oder stark deformiert waren.

Fossilien werden normalerweise zusammen mit umgebendem Gestein geborgen und vorsorglich mit Gips ummantelt, damit sie den Transport ins Labor unbeschadet überstehen. Dort machen sich Paläontologen dann mit zahnstocherähnlichen Werkzeugen, feinen Meißeln und miniaturisierten Pressluftschlämmern daran, das Gestein vorsichtig zu entfernen und die eingeschlossenen Körperteile freizulegen. Nach Millionen von Jahren haben sich Fossilfunde unter dem Einfluss von geologischen Prozessen wie hohem Druck und Verwitterung indes meist nicht unverändert erhalten, sondern sind deformiert und fragmentiert. Manchmal lösen Paläontologen dann Skelettteile aus dem Gestein und setzen sie passend neu zusammen, oder sie versuchen, die ursprüngliche Anatomie durch Vergleich mit eng verwandten Tieren zu rekonstruieren.

Als Wann Langston junior und seine Kollegen um das Jahr 1950 an der University of California in Berkeley die ersten *Dilophosaurus*-Skelette präparierten, ergänzten sie fehlende Bereiche des Schädels mit Abgüssen vom Skelett eines besser erhaltenen, Fleisch fressenden Dinosauriers aus dem Jura. Nicht mehr vorhandene Teile des Beckens modellierten sie frei aus Gips. Niemand wusste, wie diese Abschnitte wirklich ausgesehen hatten.

Ein Raubtier mit tödlichem Gebiss

Später entdeckte Fossilien zeigten allerdings, dass die Schnauze und der Kiefer des Tieres viel massiver waren als ursprünglich angenommen. Die Oberkieferknochen wiesen keine Schwachstellen auf, wie es die fragmentarischen Erstfunde hatten vermuten lassen. Stattdessen sprachen sie für einen kräftigen Schädel, mit dem der Saurier sehr wohl Beutetiere durch Bisse töten konnte. Die Unterkiefer enthielten stabile Knochenleisten, an denen wahrscheinlich Muskeln ansetzten. Bei modernen Reptilien dienen solche Leisten als Widerlager für eine starke Kaumuskulatur.

Tatsächlich weist das Skelett eines anderen an der Grabungsstätte der Wissenschaftler aus Austin gefundenen Dinosauriers – des Pflanzen fressenden *Sarhsaurus* –, Bissspuren von einem großen Raubtier auf, dessen Kiefer und Zähne stark genug waren, um sich durch Knochen zu bohren. Demnach verfügte *Dilophosaurus* offenbar über einen kraftvollen Biss und tötete seine Beute nicht nur mit den Krallen, wie Welles vermutet hatte.

Außerdem hatte er eine beachtliche Größe, besonders für Dinosaurier jener Zeit. In der späten Trias – nur 20 Millionen Jahre früher – waren die meisten solchen Echsen im westlichen Nordamerika nur etwa so groß wie ein Truthahn oder Adler. *Dilophosaurus* hätte dagegen mit seiner Länge



EINSTIGES VERBREITUNGSGEBIET Die Fossilien des *Dilophosaurus* stammen alle von zwei Fundorten im nördlichen Teil des heutigen Arizona nahe Flagstaff. Die Tiere lebten im frühen Jura kurz nach dem Auseinanderbrechen des ehemaligen Superkontinents Pangäa.

von über sieben und einer Scheitelhöhe von bis zu 2,5 Metern im ausgewachsenen Zustand einen Menschen weit überragt. Er besaß viel längere und stärkere Arme als andere große Raubsaurier wie *Allosaurus* oder *Ceratosaurus* und auch längere Beine im Verhältnis zur Gesamtgröße.

Auf Grund der ersten, unvollständigen Fossilien hatten die Wissenschaftler eine enge Verwandtschaft von *Dilophosaurus* mit den Carnosauriern *Allosaurus* und *Streptospondylus* vermutet und so nach deren Anatomie die fehlenden Teile des Beckens rekonstruiert. In den besser erhaltenen späteren Skelettfunden ähnelte die Beckenanatomie dagegen eher einer Zwischenform von *Coelophysis* aus der späten Trias und *Allosaurus* aus dem späten Jura.

Wie viele frühe Dinosaurier und alle heutigen Vögel hatte *Dilophosaurus* sackartige Erweiterungen der Lunge in den Wirbeln. Diese Pneumatisierung verlieh dem Skelett hohe Festigkeit bei geringem Gewicht. Dank des Luftsacksystems bewegte sich zudem die Atemluft wie bei den heutigen Vögeln und Krokodilen nur in einer Richtung durch die Lunge. Das versorgte den Saurier mit mehr Sauerstoff als die alternierende Atmung der Säugetiere, bei der die Luft auf demselben Weg erst in die Lunge hinein- und dann wieder herausströmt. Tiere mit unidirektionaler Atmung erreichen hohe Stoffwechselraten und damit beachtliche körperliche Ausdauerleistungen. *Dilophosaurus* war also wahrscheinlich ein schneller, agiler Jäger.

CT-Aufnahmen zeigten auch in den Knochen des Hirnschädels luftgefüllte Hohlräume, die mit den Nebenhöhlen im Schnauzenbereich in Verbindung stehen. Bei den meisten Raubsauriern überdachte ein knöcherner Grat ein charakteristisches Knochenfenster vor den Augenhöhlen, die so genannte *Fenestra antorbitalis*. Bei *Dilophosaurus* verläuft die betreffende Öffnung entlang seiner namensgebenden Knochenkämme, was darauf hindeutet, dass diese ebenfalls Hohlräume enthielten. Höchstwahrscheinlich waren sie mit Keratin überzogen, jenem Material, das auch Hörner, Klauen und Haare bildet. Vielleicht spielten die auffälligen Kämme bei der Balz und der individuellen Wiedererkennung eine Rolle. Ob die Pneumatisierung für diese oder andere Funktionen wichtig war, ist bisher jedoch unklar.

Zu den Aufgaben der Evolutionsforschung zählt zudem die Abgrenzung der anatomischen Variabilität innerhalb und zwischen taxonomischen Gruppen. Welles vertrat die Auffassung, dass die verschiedenen Skelette, die wir heute *Dilophosaurus* zuordnen, mehrere Gattungen repräsentieren. Einer von uns (Marsh) testete diese Hypothese mit den neuesten kladistischen Methoden. Er charakterisierte an jedem einzelnen Fossil Hunderte von anatomischen Merkmalen und verglich die individuellen Ausprägungen miteinander. Dieser statistischen Analyse zufolge ähneln sich alle bekannten Vertreter von *Dilophosaurus* – entgegen der Vermutung von Welles – in ihrem Körperbau so stark, dass sie nicht nur einer Gattung, sondern sogar derselben Art angehörten.

Marsh bettete seine Stichprobe von *Dilophosaurus*-Skeletten zudem in einen wesentlich größeren Datensatz ein, um Vergleiche mit anderen Saurierspezies aus der ganzen Welt anzustellen. Dadurch gewann er neue Einblicke in die Evolutionsgeschichte und biogeografische Verteilung diverser Dinosauriergruppen und konnte *Dilophosaurus* genauer im Stammbaum des Lebens verorten. Dabei zeigte sich eine beträchtliche evolutionäre Lücke zwischen ihm und seinen nächsten bekannten Verwandten. Demnach gibt es wohl noch etliche Saurier zu entdecken, die ihm näher stehen.

Einblick in die Lebenswelt des frühen Juras

Aber nicht nur über den Körperbau des *Dilophosaurus* wissen wir mittlerweile genauer Bescheid, sondern auch über die Welt, in der er lebte. Der Abstieg von den Adeii-Eichii-Klippen in den *Dilophosaurus*-Steinbruch ist eine Reise zurück durch 183 Millionen Jahre Erdgeschichte bis in die Zeit des frühen Juras. Dinosaurier durchstreiften damals diese Landschaft und hinterließen Fußabdrücke, die sich im Sandstein des Colorado-Plateaus teils bis heute erhalten haben.

Befestigte Straßen enden schon meilenweit vor der felsigen Anhöhe. Danach fährt man auf überwucherten, tief zersetzten Pisten durch die losen Dünenfelder, die auf geologischen Karten als QAL (Quartäres Alluvium, neuzeitlicher Schwemmboden) verzeichnet sind. In diesen Sandverwehungen waren unsere Geländewagen 2014 stecken geblieben. Den Untergrund der Dünen bildet Navajo-Sandstein, eine versteinerte 180 Millionen Jahre alte Wüste. Die roten Felsen der Ward Terrace, wie die Region auch genannt wird, erstrecken sich bis zum westlichen Horizont, wo sie auf die viel jüngeren vulkanischen San Francisco Peaks von Flagstaff (Arizona) treffen. Im Nordwesten öffnet sich der Grand Canyon, eine der spektakulärsten geologischen Formationen der Welt.

Von dem Sand, in den unser Pick-up auf der Ward Terrace eingesunken war, bis hinunter zum Vishnu-Schiefer – dem schwarzen Gestein am Grund des Grand Canyon, in das sich der Colorado River unermüdlich hineinfrißt – präsentiert diese Landschaft einen Großteil der Gesteinsschichten der letzten 1,8 Milliarden Jahre. Als Paläontologen interessieren wir uns für die Organismen, deren Überreste in den Gesteinen eingeschlossen sind. Zugleich

versuchen wir, anhand geologischer Informationen und biologischer Befunde die Lebenswelten längst vergangener Zeitalter zu rekonstruieren.

Die *Dilophosaurus*-Fossilien entstammen der Kayenta-Formation. Deshalb wollten wir deren Alter möglichst exakt bestimmen. Das Gesteinsmaterial dieser Formation wurde von Flüssen, Seen und Bächen östlich eines Bogens von Vulkanen abgelagert, die Asche und feinkörnige Partikel in der Region verteilten. Die Vulkanasche half einst, die *Dilophosaurus*-Knochen zu konservieren, und lässt sich heute zur genaueren Datierung der Kayenta-Formation heranziehen.

Dazu zermahlten wir die 2014 gesammelten Gesteinsproben und pickten Zirkonkristalle heraus. Diese enthalten gewöhnlich Uran, dessen Isotop U-238 mit konstanter Geschwindigkeit über mehrere Zwischenstufen zu Blei zerfällt. Indem wir die Kristalle per Laser verdampften und im Massenspektrometer das Mengenverhältnis von Uran zu Blei bestimmten, konnten wir ermitteln, wann sich die Gesteinsschicht abgelagert hatte. Bei der fraglichen *Dilophosaurus*-Fundstelle ergab sich ein Alter von etwa 183 Millionen Jahren, mit einem Unsicherheitsbereich von wenigen Millionen Jahren.

Dilophosaurus lebte also während des frühen Juras, rund 5 bis 15 Millionen Jahre nach dem Massensterben am Ende der Trias, bei dem etwa drei Viertel aller damaligen Lebensformen ausgelöscht wurden – einschließlich der meisten großen Reptilien, die mit den frühen Dinosauriern um Nahrung und Lebensraum konkurrierten. Auslöser der Katastrophe war vermutlich das beginnende Auseinanderbrechen des Superkontinents Pangäa, in dessen Verlauf sich das Nordatlantikbecken wie ein vulkanischer Reißverschluss öffnete.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



BASTOS / STOCK.ADOBE.COM

Während der späten Trias und des frühen Juras bewegte sich die nordamerikanische Platte aus einem subtropischen Klimagürtel nordwärts in eine semiaride Zone. Dadurch verschob sich der Lebensraum des *Dilophosaurus* vom Breitengrad des heutigen Costa Rica auf die Höhe von Nordmexiko. Die Landschaft, in der sich die Schichten der Kayenta-Formation ablagerten, war saisonal trocken, wobei regelmäßig Sanddünen in feuchtere Zonen mit florierender Tierwelt vordrangen und sich wieder zurückzogen. Welche Rolle *Dilophosaurus* in seinem Ökosystem spielte, geht aus mit ihm zusammen abgelagerten Fossilien anderer Organismen hervor. Demnach stand er an der Spitze der Nahrungspyramide in einer lang gestreckten Flussoase, einem von Nadelbäumen gesäumten Wasserlauf durch ein Meer aus Sand.

Ein *Dilophosaurus*-Skelett, das an der University of Texas in Austin aufbewahrt wird, stammt aus demselben Steinbruch wie zwei Exemplare des schon erwähnten langhalsigen Pflanzenfressers *Sarahsaurus*. Beide Spezies lebten hier zusammen mit dem kleineren Fleisch fressenden *Megapnosaurus* und dem noch kleineren, gepanzerten *Scutellosaurus*. Das am häufigsten in der Kayenta-Formation gefundene Tier ist die frühe Schildkröte *Kayentachelys*, die sich den Flusslauf mit stark geschuppten Knochenfischen, Süßwasser-Quastenflossern und Lungenfischen teilte. Urtümliche Verwandte der Säugetiere, darunter die biberähnlichen Tritylodontiden und die rattenähnlichen Morganucodontiden, standen wohl ebenfalls auf dem Speiseplan von *Dilophosaurus*.

Im Film »Jurassic Park« kommt nach vorsichtigem Abbürsten eines ausgegrabenen Fossils ein komplett erhaltenes *Velociraptor*-Skelett zum Vorschein. Diese Szene hat mit der realen Welt wenig zu tun. Da finden Forscher meist nur schwer identifizierbare Fragmente – und an einem Glückstag vielleicht einmal einen einzelnen weitgehend vollständigen Knochen. Zwar ist *Dilophosaurus* seit der Veröffentlichung von Marshs umfassender anatomischer Studie im Sommer 2020 der weltweit am besten dokumentierte Dinosaurier aus dem frühen Jura. Doch hat es Jahrzehnte gedauert, bis nach dem ersten Skelettfund weitere Fossilien zu Tage kamen, die sukzessive Klarheit über seine genaue Anatomie brachten. Und es brauchte mehrere Generationen von Paläontologen, um die Knochenfunde richtig zu deuten.

Naturkundemuseen im Dienst der Wissenschaft

Hilfreich bei dieser Arbeit sind die Naturkundemuseen. Von der Öffentlichkeit als Orte eindrucksvoll gestalteter Ausstellungen wahrgenommen, erfüllen sie ihre Hauptfunktion hinter den Kulissen im Dienst der Wissenschaft. Diese Institutionen beherbergen große Sammlungen von Fundstücken, die als Material für die Forschung dienen. Teams von spezialisierten Konservatoren, Archivaren und Kuratoren dokumentieren und konservieren alle Stücke sorgfältig, um sie für die Wissenschaft dauerhaft verfügbar zu halten.

Wiederholbarkeit ist ein Grundprinzip wissenschaftlicher Arbeit: Andere Forscher müssen die Möglichkeit haben, frühere Ergebnisse und Schlussfolgerungen zu überprüfen. In der Paläontologie bedeutet dies, die Fossilien sicher und zugänglich aufzubewahren, damit zukünftige Generationen von Wissenschaftlern die Fundstücke erneut begutachten können.

Die Navajo Nation kooperiert mit Museen, die vor Ort ausgegrabene Fossilien konservieren und alle zugehörigen Dokumente sichern. Als wir 2015 dorthin zurückkehren wollten, wo Jesse Williams 1940 die ersten Überreste von *Dilophosaurus* entdeckt hatte, trafen wir durch einen glücklichen Zufall auf John Willie, einen seiner nachgeborenen Verwandten. Der Navajo führte uns zur Fundstelle und betonte, welch große Bedeutung die Diné, wie sich sein Volk selbst nennt, ihren einzigartigen Naturschätzen beimäßen. Das Territorium der Navajo Nation gehört zu den weltweit wichtigsten Orten, um Gesteinsformationen aus dem Erdmittelalter zu erkunden. Das dortige Minerals

Department unterstützt wissenschaftliche Untersuchungen, indem es unter anderem Genehmigungen für die Feldforschung erteilt, Fossilien als Leihgaben zur Verfügung stellt oder Manuskripte begutachtet.

Wissenschaftlicher Fortschritt kommt dadurch zu Stande, dass Forscher auf früheren Ergebnissen aufbauen, sie gegebenenfalls neu bewerten und als Folge manchmal überkommene Vorstellungen korrigieren. Interessant wird es, wenn derart mühsam erarbeitete wissenschaftliche Erkenntnisse Eingang in die Welt der Unterhaltung finden. Tatsächlich reicht die enge Verbindung der Paläontologie mit dem Kino bis in die Anfänge der bewegten Bilder zurück. Die Idee zu Winsor McCays Animationsfilm »Gertie, der Dinosaurier« aus dem Jahr 1914 wurde im American Museum of Natural History in New York City geboren, wo der Comiczeichner und Karikaturist mit ein paar Freunden das Skelett eines Sauropoden betrachtete. Aus einer Laune heraus wettete er, das Tier zum Leben erwecken zu können. Das Ergebnis war der erste Dinosaurierfilm. Für seine »Gertie«-Rekonstruktion zog McCay die Paläontologen des Museums zu Rate.

Später beriet Barnum Brown, der Entdecker des *Tyrannosaurus rex*, Walt Disney bei der Produktion des 1940 erschienenen Zeichentrickfilms »Fantasia«. Und das Filmteam, das 1954 »Godzilla« drehte, ließ sich für die Gestaltung des riesigen Monsters von dem 1947 entstandenen Wandgemälde »Das Zeitalter der Reptilien« von Rudolph Zallinger inspirieren, das im Peabody Museum der Yale University in New Haven (Connecticut) ausgestellt ist. Wenn 2022 wie geplant als sechster Teil der Jurassic-Park-Reihe »Jurassic World: Dominion« in die Kinos kommt, dürfen wir gespannt sein, wie stark sich die urweltliche Menagerie dort an den neuesten Erkenntnissen der Paläontologie orientiert.

Übrigens fließt manchmal auch die Filmkultur in die Wissenschaft ein, und das sogar buchstäblich. So erzählte Langston junior, die Paläontologen hätten bei der Restaurierung von Fossilien an der University of California in Berkeley in den 1930er und 1940er Jahren Filmstreifen aus Zelluloseacetat in Aceton aufgelöst, um Kleber herzustellen – statt den damals viel teureren »Duco Cement« auf Nitrozellulosebasis zu kaufen. Einerseits hat es *Dilophosaurus* also zum Filmstar gebracht, doch andererseits steckt offenbar auch ein wenig Film in seinen imposanten, aus fossilen Knochen zusammengeklebten Skeletten in den Museen. ◀

QUELLEN

Marsh, A. D., Rowe, T. B.: A comprehensive anatomical and phylogenetic evaluation of *Dilophosaurus wetherilli* (Dinosauria, Theropoda) with descriptions of new specimens from the Kayenta Formation of northern Arizona. *Journal of Paleontology* 94 (S78), 2020

Welles, Samuel P.: New Jurassic dinosaur from the Kayenta Formation of Arizona. *Bulletin of the Geological Society of America* 65, 1954

Welles, Samuel P.: *Dilophosaurus* (Reptilia: Saurischia), a new name for a dinosaur. *Journal of Paleontology* 44 (5) 1970

Welles, Samuel P.: *Dilophosaurus wetherilli* (Dinosauria, Theropoda), osteology and comparisons. *Palaeontographica Abteilung A* 185, 1984

Spektrum PLUS+

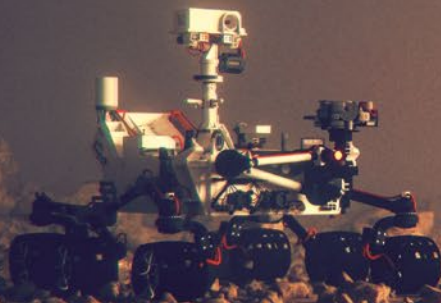
Ihre Vorteile im Abonnement

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

- ▶ Download des Monats (kostenfrei): im Juli **Spektrum** KOMPAKT »Magnetismus«
- ▶ Reduzierte digitale Produkte: im Juli »Supraleiter«, »Biofilme« und »Tod und Trauer«
- ▶ Regelmäßige Einladungen zum digitalen Redaktionsbesuch oder zu Vorträgen (kostenfrei):
3. 8. 2021: Digitaler Vortrag »Besuch auf dem Mars: Neues von Sonden, Rovern und einem Helikopter«, Andreas Müller (Chefredakteur **Sterne und Weltraum**)
- ▶ Monatliche Verlosung von Büchern und **Spektrum**-KOMPAKT-Ausgaben
- ▶ Vergünstigungen und Rabatte bei Partnerangeboten:
Onlinekurs: **Spektrum**-Schreibwerkstatt (Preisnachlass)
Spektrum-Hörbücher von Fliegenglas (reduzierter Abopreis)
Englischkurs von Gymglish (zwei Monate kostenlos)
iversity-Onlinekurse (Preisnachlass): »Die Toolbox für Deine Karrieregestaltung«, »Psychological Pricing in Practice« und »So gelingt Mitarbeitermotivation wirklich«

Weitere Informationen und Anmeldung:

Spektrum.de/plus





SERIE

Pilze – Die unterschätzten Schädlinge

Teil 1: Juli 2021
Bedrohte Ernte
Thomas Miedaner

Teil 2: August 2021
Verkannte Gesundheitsgefahr
Maryn McKenna

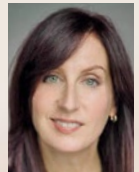
Teil 3: September 2021
Erreger auf Reisen
Kerstin Viering

MYKOSEN VERKANNT GESUNDHEITSGEFAHR

Weltweit erliegen jährlich mehr als 1,5 Millionen Menschen einer Pilzinfektion. Die bislang wenig beachteten Mikroorganismen stellen eine zunehmende Bedrohung dar – auch auf Grund von Umweltveränderungen.

Die US-amerikanische Wissenschaftsjournalistin **Maryn McKenna** schreibt vor allem über medizinische Themen.

► spektrum.de/artikel/1886758



GEFÄHRLICHE KEIME Hefepilze der Gattung *Candida* lauern in Krankenhäusern, wo sie Immungeschwächte Patienten befallen.

► Ende Juni 2020 startete Tom Chiller erschrocken auf seinen Computer. Normalerweise überwacht der Arzt und Epidemiologe bei den US-amerikanischen Centers for Disease Control and Prevention (CDC) in Atlanta die Gesundheitsgefahren durch Pilze. Dieses Spezialgebiet hatte er allerdings im März 2020 vorerst verlassen müssen, als sich die Bedrohung durch das neuartige Coronavirus Sars-CoV-2 herauskristallisierte und die CDC fast alle ihrer tausenden Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter ins Homeoffice geschickt hatte. Seitdem war Chiller eingebunden in die frustrierenden und immer wieder torpedierten Bemühungen der CDC, die rasante Ausbreitung des Virus in den USA einzudämmen. Inzwischen rollte über das Land die zweite Welle der Covid-19-Pandemie; mehr als 2,4 Millionen US-Amerikaner hatten sich bereits infiziert, und 125000 waren gestorben.

Doch nun machte eine weitergeleitete E-Mail Chiller stutzig. Krankenhäuser in der Nähe von Los Angeles, die mit den rasch steigenden Coronafallzahlen zu kämpfen hatten, meldeten ein neues Problem: Einige ihrer Intensivpatienten litten zusätzlich unter schweren Infektionen mit einem Pilz namens *Candida auris*.

Chiller kennt den Hefepilz wahrscheinlich besser als jeder andere in den Vereinigten Staaten. Just vier Jahre zuvor hatte er im Namen der CDC eine dringende Warnung

zu *C. auris* an amerikanische Kliniken gesandt. Der Pilz war zwar bis dahin in den USA noch nicht aufgetreten, doch Chiller hatte von Kollegen aus anderen Ländern erfahren, was diesen Erreger so gefährlich macht, wenn er sich in Krankenhäusern ausbreitet: Er ist unempfindlich gegen fast alle der wenigen Medikamente, die bei schweren Pilzinfektionen zum Einsatz kommen. Er gedeiht auf kalten, glatten Oberflächen und widersteht den meisten Reinigungsmitteln, so dass manche Kliniken sogar ihre Geräte entsorgen und Wände herausreißen mussten, um ihn zu eliminieren. Und er verursacht rasch um sich greifende Ausbrüche, denen bis zu zwei Drittel der infizierten Patienten erliegen.

Nicht lange nach Chillers Warnung tauchte *C. auris* in den USA auf. Bis Ende 2016 infizierten sich insgesamt 14 Menschen mit dem Keim, vier von ihnen starben. Seitdem beobachten die CDC die Ausbreitung des Pilzes genau; er gehört zu den wenigen Infektionserregern, deren Nachweis Ärzte und Gesundheitsämter der Behörde melden müssen. Bis zum Ende des Jahres 2020 wurden mehr als 1500 Fälle in 23 Staaten der USA erfasst.

Dann schlug Sars-CoV-2 zu, überschwemmte die Hospitäler mit Schwerkranken und lenkte alle Ressourcen des Gesundheitswesens auf Covid-19. Doch schon zu Beginn der Pandemie hatte Chiller das ungute Gefühl, dass das neue Virus eine gefährliche Allianz mit pathogenen Pilzen eingehen könnte.

Eine Pilzepidemie, die sich der viralen Corona-Pandemie überlagert

Die ersten Berichte über Covid-19, die chinesische Wissenschaftler in internationalen Fachzeitschriften veröffentlicht hatten, beschrieben schwerstkranke Patienten auf Intensivstationen im künstlichen Koma, die maschinell beatmet wurden und über Infusionsschläuche Medikamente erhielten, um Entzündungen und Infektionen mit weiteren Erregern zu verhindern. Diese einschneidenden Maßnahmen bewahrten die Betroffenen womöglich vor dem Tod, doch die Immunsuppressiva unterdrückten ihre Abwehr, und die Antibiotika vernichteten ungewollt auch nützliche Bakte-

rien, die gefährliche Mikroorganismen in Schach halten. Kritisch erkrankte Covid-19-Patienten waren also außerordentlich anfällig für jeden weiteren Erreger.

Chillers Team fragte Kollegen in den USA und Europa, inwieweit Covid-19 wohl auch tödlich verlaufende Pilzinfektionen begünstigen könnte. Tatsächlich trafen aus Indien, Italien, Kolumbien, Deutschland, Österreich, Belgien, Irland, den Niederlanden und Frankreich Berichte über solche Mykosen bei Coronafällen ein. Und dieselben gefährlichen Pilze traten nun bei US-amerikanischen Patienten auf. Damit lagen die ersten Anzeichen einer Pilzepidemie vor, die sich der viralen Pandemie überlagerte. Dabei handelte es sich nicht nur um Infektionen mit *Candida auris*. Weitere potenziell todbringende Erreger – Schimmelpilze der Gattung *Aspergillus* – forderten ebenfalls schon erste Opfer. »Das wird sich überall ausbreiten«, mahnt Chiller. »Und wir sind nicht darauf vorbereitet.«

Wohl die meisten Menschen halten das Gefährdungspotenzial von Pilzen für überschaubar: Mehltau auf Blumen, verschimmeltes Brot, Giftpilze im Wald. Falls wir sie überhaupt wahrnehmen, ahnen wir kaum, dass sie Teil eines verborgenen, den ganzen Planeten umfassenden Systems sind. Pilze bilden ein eigenes Organismenreich mit etwa sechs Millionen Arten, von der gewöhnlichen Bäckerhefe bis hin zu exotischsten Gebilden. Sie unterscheiden sich wesentlich von anderen Lebewesen. Anders als bei Tieren sind ihre Zellen von Zellwänden umgeben. Im Gegensatz zu Pflanzen können sie keine Energie aus Licht gewinnen. Und anders als Bakterien besitzen sie echte Zellkerne sowie zahlreiche Organellen. Pilze brechen Gestein auf und ernähren Pflanzen, ihre Sporen werden durch die Luft verbreitet, sie besiedeln unsere Haut und unseren Darm – eine unbemerkte Vielfalt, die um uns und in uns lebt.

Diese Koexistenz gerät mittlerweile aus den Fugen. Mit dem Klimawandel drängen Pilze aus ihren angestammten Lebensräumen in neue Regionen vor und entwickeln innovative Strategien, zwischen mehreren Wirtsarten zu wechseln. Als gefährlichere Krankheitserreger bedrohen sie so die menschliche Gesundheit auf zuvor ungeahnte Weise und mit ungewohnter Härte.

Schwere Pilzinfektionen werden statistisch nur lückenhaft erfasst, und entsprechende Zahlenangaben liegen wahrscheinlich viel zu niedrig. Eine globale Schätzung geht davon aus, dass bis zu 300 Millionen Menschen an Pilzkrankungen leiden und jedes Jahr 1,6 Millionen daran sterben – mehr als an Malaria und vergleichbar viele wie an Tuberkulose. Allein in den USA, so schätzen die CDC, müssen wegen einer Pilzinfektion jährlich 8,9 Millionen Menschen ambulant, 75000 sogar im Krankenhaus behandelt werden, was das amerikanische Gesundheitswesen etwa 7,2 Milliarden US-Dollar pro Jahr kostet.

Laut klassischer Lehrmeinung sollten wir eigentlich vor Pilzen gefeit sein – nicht nur wegen unserer leistungsfähigen Immunabwehr, sondern auch als Säugetiere mit einer Körpertemperatur, die höher liegt als der von Pilzen bevorzugte Bereich. Die kühleren, äußeren Zonen des Körpers sind zwar dem Risiko begrenzter Pilzattacken ausgesetzt – man denke an Fußpilz, genitale *Candida*-Infektionen oder Ringelflechte –, doch wirklich gefährliche

AUF EINEN BLICK TÖDLICHE PILZE

- 1 Pilzsporen gibt es überall. Medizinisch galten sie lange als überschaubares Gesundheitsrisiko, das lediglich bei immungeschwächten Personen lebensbedrohlich werden kann.
- 2 Doch mittlerweile registrieren Ärzte eine Zunahme an gefährlichen Pilzinfektionen, die sich nur schwer behandeln lassen.
- 3 Umweltveränderungen sowie die Klimakrise fördern die Ausbreitung pathogener Pilze. Derweil steckt die Forschung an Impfstoffen erst in den Kinderschuhen.

Mykosen treten bei Menschen mit gesundem Immunsystem eher selten auf.

Das verführt zu Leichtsin. »Wir haben hier einen enormen blinden Fleck«, betont der Arzt und Mikrobiologe Arturo Casadevall von der Johns Hopkins University in Baltimore (USA). »Fragen Sie mal die Leute auf der Straße, vor welchen Krankheitserregern sie sich fürchten. Sie werden hören: vor Bakterien oder Viren. Aber Pilze? Niemand hat Angst, an einer Pilzinfektion zu sterben.«

Ironischerweise machten uns gerade unsere medizinischen Erfolge verwundbar. Pilze nutzen jede Gelegenheit, die ihnen eine beeinträchtigte Immunabwehr bietet. Bis Mitte des 20. Jahrhunderts lebten Menschen mit ausgeprägter Immunschwäche meist nicht sehr lange. Seitdem

TORRENCE IRVIN Im September 2018 glaubte der Lagerverwalter, er hätte sich eine hartnäckige Erkältung zugezogen. Doch in Wirklichkeit litt er an Talfieber, einer Pilzinfektion, die ihn beinahe das Leben gekostet hätte.

TIMOTHY ARCHIBALD (TIMOTHYARCHIBALD.COM)



hat sich die Medizin enorm weiterentwickelt, und es gelingt, Patienten auch dann am Leben zu halten, wenn ihr Immunsystem durch Krankheit, Krebstherapie oder Alter bloß eingeschränkt funktioniert. Des Weiteren lässt sich das Immunsystem gezielt unterdrücken, um Transplantatabstoßungen zu verhindern oder um Autoimmunerkrankungen wie Lupus erythematoses und rheumatoide Arthritis zu behandeln. Es gibt also viele Menschen, die recht anfällig für Pilzkrankungen sind. Nicht umsonst war es eine Pilzinfektion der Lunge, die *Pneumocystis*-Pneumonie, die Ärzte vor 40 Jahren auf die ersten Aidsfälle aufmerksam machte.

Es liegt jedoch nicht nur an der hoch entwickelten Medizin. Weitere menschliche Aktivitäten haben wichtige Grenzen zwischen der Welt der Pilze und unserer eigenen verschwimmen lassen: Wir roden Land für Ackerbau oder neue Siedlungen und stören dabei das einst stabile Gleichgewicht zwischen Pilzen und ihren Wirten. Wir transportieren Waren und Tiere durch die ganze Welt, und Pilze reisen mit (siehe dazu Teil 3 der Serie im Septemberheft). Wir besprühen Nutzpflanzen mit Fungiziden und züchten dabei resistente Keime (siehe Teil 1 der Serie, »Spektrum« Juli 2021, S. 38). Wir erwärmen das Klima, und die Pilze passen sich an und verringern so den Abstand zwischen ihrer bevorzugten Umgebungstemperatur und unserer Körpertemperatur, der uns bisher vor vielen gefährlichen Infektionen geschützt hat.

Pilze sind nicht aus irgendeiner exotischen Welt zu uns vorgedrungen. Sie waren schon immer da, untrennbar verbunden mit unserem Leben, unserer Umwelt und unserem Körper. Jeden Tag atmet ein Mensch mindestens 1000 Pilzsporen ein. Wir können uns nicht vom Reich der Pilze abschotten. Daher versuchen Wissenschaftler nun genauer zu verstehen, wodurch wir unsere Abwehr gegen diese vielfältigen Mikroorganismen beschädigt haben und wie wir sie wieder aufbauen können.

Globale Erntevernichter

Eigentlich ist es erstaunlich, wie wenig wir uns von Pilzen bedroht fühlen, obwohl wir seit Jahrhunderten wissen, dass sie ganze Ernten vernichten können. In den 1840er Jahren befielen pilzähnliche Mikroorganismen der Spezies *Phytophthora infestans* die Kartoffelfelder Irlands; schätzungsweise eine Million Menschen verhungerten, ein Achtel der Bevölkerung. In den 1870er Jahren rottete der Kaffeerost *Hemileia vastatrix* die Kaffeepflanzen in ganz Südasiens aus. Die koloniale Landwirtschaft in Indien und Sri Lanka wandelte sich daraufhin grundlegend, und der Kaffeeanbau verlagerte sich nach Mittel- und Südamerika. Pilze sind die Ursache dafür, dass in den 1920er Jahren mehr als drei Milliarden Kastanienbäume aus den nordostamerikanischen Wäldern verschwanden (siehe »Spektrum« Januar 2015, S. 66) und dass in den 1940er Jahren Millionen absterbende Ulmen in amerikanischen Städten gefällt werden mussten. Jedes Jahr vernichten Pilze weltweit ein Fünftel der Ernten.

»Pflanzenpathologen und Landwirte nehmen Pilze sehr ernst und haben das auch schon immer getan«, betont der Epidemiologe Matthew Fisher vom Imperial College London, der sich auf die Identifizierung neuer Gefahren durch

Ein resistenter Killer

Der Hefepilz *Candida auris* tauchte erstmals in den späten 1990er Jahren auf und verbreitete sich seitdem über den ganzen Erdball. Er verursacht tödlich verlaufende Infektionen, wobei zwei Drittel der Infizierten sterben. 2020 wurde *C. auris* in 19 Ländern auf fünf Kontinenten nachgewiesen. Die verschiedenen Stämme der Pilzspezies lassen sich vier Kladen zuordnen. Jede von ihnen erwies sich als resistent gegen mindestens ein Antimykotikum aus den drei großen Substanzklassen der Azole, Polyene und Echinocandine. Etliche Pilzisolatete widerstehen zwei Mitteln, und einige aus der Klade I sogar dreien.

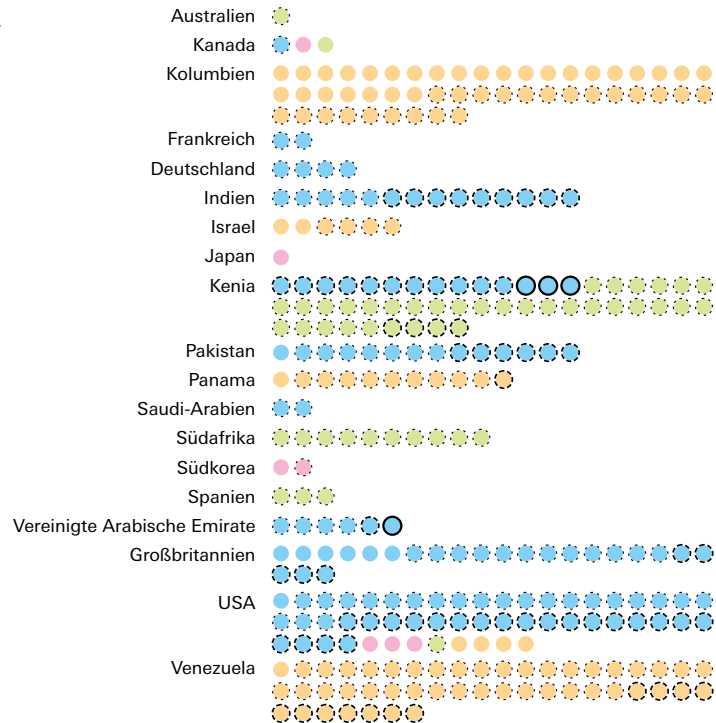
Herkunftsländer der getesteten Isolate von *C. auris*



Jeder Punkt steht für ein individuelles *C. auris*-Isolat.

Die Farbe zeigt die Klade an I II III IV

Die Umrandung symbolisiert die Zahl der Antimykotika, gegen die der jeweilige Pilz resistent ist. 0 1 2 3



Pilze spezialisiert hat. »Doch von Pilzen verursachte Krankheiten bei Mensch und Tier werden ignoriert.«

So kümmerte sich zunächst niemand darum, als in Rio de Janeiro verwilderte Katzen in Scharen erkrankten. Die Streuner haben ohnehin ein hartes Leben. Sie schnorren sich durch, liefern sich erbitterte Kämpfe und vermehren sich rasch. Aber im Sommer 1998 zeigten erst Dutzende und dann Hunderte von Hauskatzen erschreckende Symptome: nässende Wunden an Pfoten und Ohren, trübe, geschwollene Augen sowie tumorartige Geschwüre am Kopf. Die Katzen von Rio leben eng mit Menschen zusammen: Kinder spielen mit ihnen, und besonders in armen Vierteln locken Frauen sie an, um der Ratten und Mäuse Herr zu werden. Schon bald erkrankten einige Kinder und auch ihre Mütter. An ihren Händen brachen rundliche, verkrustete Wunden auf, und sie entwickelten streifenförmig verteilte, harte rötliche Knoten an den Armen.

Im Jahr 2001 zählten Wissenschaftler des Forschungsinstituts der Fundação Oswaldo Cruz in Rio de Janeiro 178 Menschen, meist Mütter und Großmütter, die im Verlauf von drei Jahren wegen ähnlicher Knoten und nässender Wunden behandelt worden waren. Fast alle hatten täglichen Kontakt mit Katzen. Bei deren Untersuchung in

einer nahe gelegenen Tierklinik stießen die Forscher auf Pilze der Gattung *Sporothrix*.

Die verschiedenen *Sporothrix*-Arten leben normalerweise im Boden und auf Pflanzen. Gelangen Pilzfäden von *Sporothrix* über offene Wunden in den Körper eines Tiers oder eines Menschen, wandeln sie sich auf Grund der höheren Temperatur in eine hefeartige Wuchsform um. Bislang galt diese als nicht direkt übertragbar, bei dieser Epidemie war es jedoch anders. Die Katzen infizierten sich gegenseitig sowie ihre menschlichen Betreuer: Aus Wunden und Speichel sprang der Erreger von Katze zu Katze, die ihn mit ihren Krallen und Zähnen sowie beim Streicheln auf den Menschen übertrugen. Die Infektion verbreitete sich von der Haut in die Lymphknoten, den Blutkreislauf und erreichte die Augen sowie die inneren Organe. In einer Fallsammlung aus Brasilien fanden sich gar Berichte über Pilzzysten, die sich im Gehirn von Infizierten festgesetzt hatten.

Der neue Erreger erhielt den Artnamen *Sporothrix brasiliensis*. Bis 2004 behandelte die Fundação Oswaldo Cruz 750 Patienten, im Jahr 2011 waren es 4100, und 2020 wurde die Infektion in Brasilien bei mehr als 12000 Menschen in einem Umkreis von über 4000 Kilometern diagnostiziert. Und sie breitete sich noch weiter aus bis nach Paraguay,

Argentinien, Bolivien, Kolumbien und Panama. »Diese Epidemie kennt kein Halten«, sagt der Arzt Flávio de Queiroz Telles Filho von der brasilianischen Universidade Federal do Paraná in Curitiba, der die Infektion seit 2011 beobachtet.

Wie es aber zu diesem Ausbruch kam, blieb zunächst rätselhaft. Verwilderte Katzen streunen zwar herum, aber sie legen nicht Tausende von Kilometern zurück. Chiller und seine Kolleginnen und Kollegen bei den CDC glauben die Antwort zu kennen: In Brasilien und Argentinien wurde die Sporotrichose nicht bloß bei Katzen, sondern auch bei Ratten beobachtet. Die infizierten Nager könnten auf Lkws und Güterzügen mitreisen, deren Fracht dann in Schiffscontainer geladen wird. Millionen solcher Container erreichen jährlich US-amerikanische Häfen. »In dicht besiedelten Zentren, wo es viele verwilderte Katzen gibt, könnten sich so immer mehr schwer kranke Tiere auf den Straßen tummeln«, erklärt der Tierarzt John Rossow von den CDC, der wahrscheinlich als Erster die Bedrohung durch *Sporothrix* für die USA erkannte. »Und da wir Amerikaner uns nun mal gern um streunende Tiere kümmern, werden wir wohl zahlreiche Infektionen auch beim Menschen sehen.«

Eine scheinbar harmlose Erkältung, die nicht wieder weggehen will

Für den Mykologen Chiller sind solche Phänomene eine Warnung: Das Reich der Pilze ist erwacht, es überschreitet alte Grenzen und nutzt jeden möglichen Vorteil auf der Suche nach neuen Wirten. Vermutlich helfen wir selbst dabei mit. »Pilze leben und passen sich an«, sagt er. »Unter den Millionen Pilzarten kennen wir nur etwa 300, die Krankheiten beim Menschen verursachen – bis jetzt. Es steckt ein enormes Potenzial an Innovationskraft und Differenzierungsfähigkeit in Lebewesen, die es schon seit einer Milliarde Jahren gibt.«

Torrence Irvin war 44 Jahre alt, als sein Pilzproblem begann. Der große, kräftige Mann, der in der Highschool und im College ein guter Sportler gewesen war, lebt in Patterson, einer ruhigen Stadt im kalifornischen Central Valley. Etwa zwei Jahre zuvor hatte er ein Haus in einer Neubausiedlung gekauft, um dort mit seiner Frau Rhonda und seinen beiden Töchtern zu leben. Er arbeitete als Lagerverwalter für ein Einzelhandelsunternehmen und engagierte sich in seiner Freizeit als Stadionsprecher bei Football-Spielen der örtlichen Jugend.

Im September 2018 fühlte sich Irvin krank – scheinbar eine Erkältung, die nicht wieder wegging. Er besorgte sich ein übliches Mittel zur Behandlung der Symptome, doch im Lauf der Wochen wurde er immer schwächer und kurzatmiger. Eines Tages im Oktober brach er im Schlafzimmer zusammen. Seine Tochter fand ihn, und seine Frau rief sofort einen Krankenwagen.

Die Ärzte vermuteten eine Lungenentzündung. Sie entließen Irvin mit Antibiotika und dem Rat, weiter rezeptfreie Medikamente zu nehmen. Dennoch ging es ihm schlechter, und er konnte keine Nahrung mehr bei sich behalten. Er konsultierte andere Ärzte, aber es half nichts. Zur Kurzatmigkeit kam Nachtschweiß, er nahm 55 Kilogramm ab und wog am Ende nur noch 70. Endlich brachte

eine weitere Untersuchung die Diagnose: Kokzidioidomykose – eine Pilzinfektion, die in den USA als Talfieber (valley fever) bekannt ist. »Ich hatte vorher noch nie etwas davon gehört«, erzählt Irvin.

Der Patient wurde in das 150 Kilometer entfernte Davis an die dortige University of California überwiesen, die sich auf die Behandlung von Talfieber spezialisiert hat. Die Krankheit tritt hauptsächlich in Trockengebieten der US-Staaten Kalifornien, Arizona, New Mexiko, Nevada und Texas sowie von Mittel- und Südamerika auf. Die Erreger, *Coccidioides immitis* und *Coccidioides posadasii*, infizieren hier jedes Jahr etwa 150 000 Menschen. In anderen Regionen kennt man sie dagegen kaum. »Den Krankheitserreger gibt es nicht überall. Man steckt sich damit nicht in unseren dicht besiedelten Großstädten wie Boston, New York oder Washington an«, erklärt der Arzt George Thompson, der Irvin in Davis behandelte. »Deshalb halten selbst Ärzte die Kokzidioidomykose für irgendeine exotische Krankheit. Doch in den Endemiegebieten ist sie sehr häufig.«

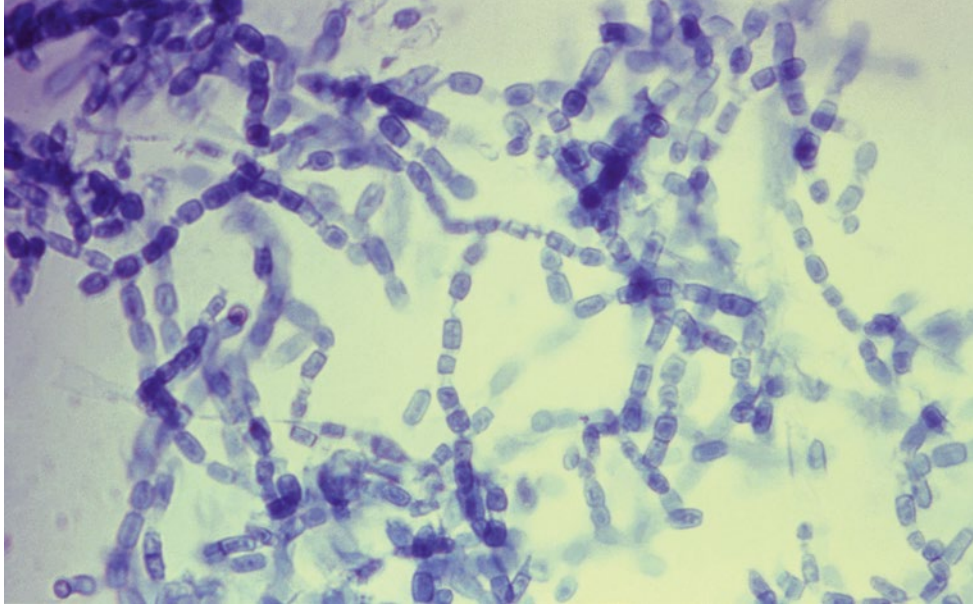
Ähnlich wie *Sporothrix* ist *Coccidioides* ein dimorpher Pilz, das heißt, er tritt in zwei umweltabhängigen Formen auf. Im kühlen Boden wächst er als Myzel, dessen zarte Fragmente leicht zerfallen und dann mit dem Wind über Hunderte von Kilometern verstreut werden können. Irgendwann nachdem Irvin ins Central Valley gezogen war, muss er solche Partikel eingeatmet haben. Auf Grund der höheren Temperatur im Körper war der Pilz in das parasitäre Stadium übergegangen und hatte sich dabei in zahlreiche sporengefüllte Gebilde umgewandelt, so genannte Sphärulen. Diese Sporen verteilten sich mit dem Blutstrom und drangen in Irvins Schädelknochen und Wirbelsäule ein. Als Abwehrmaßnahme vernarbte seine Lunge und wurde dadurch unelastisch.

Als Thompson Irvins Behandlung sechs Monate nach dessen ersten Zusammenbruch übernahm, atmete der Patient lediglich mit 25 Prozent seiner ursprünglichen Lungenkapazität. Es war lebensbedrohlich. Dennoch hatte Irvin Glück im Unglück: In etwa einem von 100 Fällen bildet der Pilz gefährliche Wucherungen auch in anderen Organen sowie in den Hirnhäuten.

Irvin hatte bereits sämtliche zur Behandlung von Pilzinfektionen zugelassenen Medikamente erhalten. Es gibt bloß fünf Klassen von Antimykotika – wenig im Vergleich zu den mehr als 20 Klassen von Antibiotika gegen bakterielle Infektionen. Weil Pilze im Gegensatz zu Bakterien auf zellulärer Ebene Menschen so sehr ähneln, stellt es eine große Herausforderung dar, Medikamente zu entwickeln, die Pilze abtöten, ohne dem menschlichen Körper schwer zu schaden.

Seit Mitte des letzten Jahrhunderts kam lediglich etwa alle 20 Jahre eine neue Klasse von Antimykotika auf den Markt: in den 1950er Jahren die Polyene mit Amphotericin B, in den 1980er Jahren die Azole und 2001 die Echinocandine. Des Weiteren gibt es verschiedene Antimykotika für Haut- und Nagelpilz wie Terbinafin oder den Wirkstoff Flucytosin, der meist zusammen mit anderen Antimykotika verabreicht wird.

Bei Irvin half keines richtig. »Ich war nur noch Haut und Knochen«, erinnert er sich. »Mein Vater kam zu Besuch und



EIN TÖDLICHES DUO
Coccidioides immitis (links) verursacht das Talfieber. Sein Verbreitungsgebiet reicht bereits weit über die südwestlichen Bundesstaaten der USA hinaus, wo er erstmals entdeckt wurde. *Aspergillus fumigatus* (unten) kommt praktisch überall in der Umwelt vor und kann tödlich verlaufende Infektionen bei Patienten mit Influenza oder Covid-19 auslösen.

saß da mit Tränen in den Augen. Meine Kinder wollten mich gar nicht sehen.«

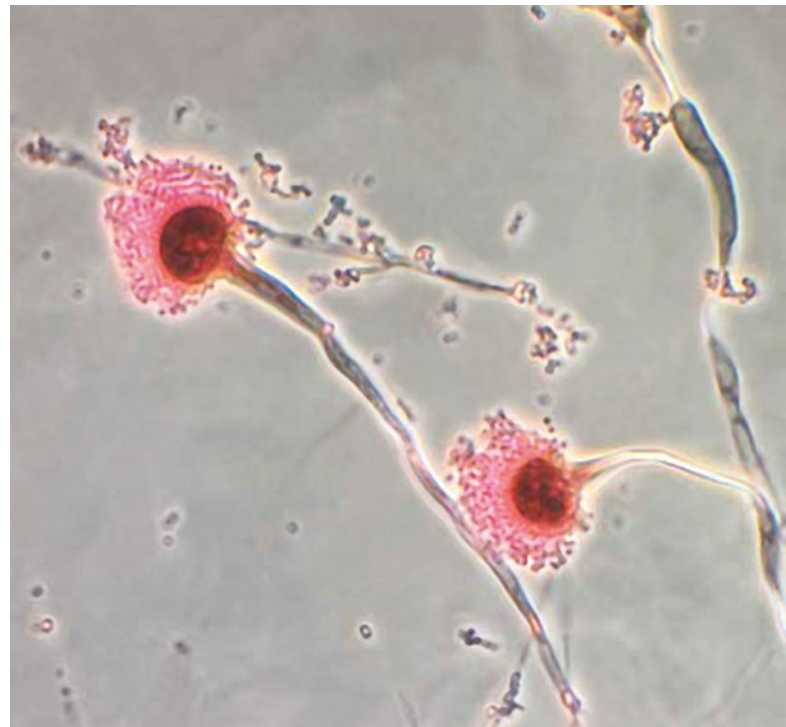
In einem letzten verzweifelten Versuch besorgte Thompsons Team ein experimentelles Antimykotikum namens Olorofim. Es wird in Großbritannien hergestellt, ist aber noch nicht zugelassen. Irvin konnte jedoch an einer klinischen Studie für Patienten teilnehmen, bei denen alle anderen Antimykotika versagt hatten. Kurz nach Beginn der Behandlung ging es mit ihm bergauf. Sein Gesicht wurde voller. Er kam wieder auf die Beine und konnte sich mit einer Gehhilfe selbstständig fortbewegen. Nach einigen Wochen wurde er aus der Klinik nach Hause entlassen.

Das Talfieber tritt heute achtmal häufiger auf als noch vor 20 Jahren. In der Zwischenzeit zogen viele Menschen in den Südwesten und an die Westküste der USA, zahlreiche Häuser wurden gebaut, es gab mehr Erdarbeiten, und auf Grund der Klimakrise wurde es heißer und trockener.

»*Coccidioides* fühlt sich vor allem in feuchtem Boden wohl. Er bildet dann keine Sporen und ist daher nicht besonders ansteckend«, erklärt Thompson. »In Trockenphasen produziert er aber zahlreiche Sporen. Und im letzten Jahrzehnt war es bei uns verdammt trocken.«

Das Talfieber breitet sich aus

Da sich das Talfieber ursprünglich auf Wüstenregionen beschränkte, gingen Wissenschaftler davon aus, dass dies auf Dauer so bleiben würde. Dem ist aber nicht so. Im Jahr 2010 erkrankten 1500 Kilometer weiter nördlich im östlichen Teil des US-Bundesstaats Washington drei Menschen an Kokzidioidomykose: ein zwölfjähriger Junge, der in einer Schlucht gespielt und dort vermutlich Pilzsporen eingeatmet hatte, ein 15-Jähriger, der von einem Quad gefallen war und sich über offene Wunden infizierte, sowie ein 58-jähriger Bauarbeiter, bei dem die Pilzinfektion sogar das Gehirn erreichte. 2019 veröffentlichte Forschungsarbeiten zeigen, dass solche Fälle nun wohl häufiger auftreten werden. Morgan Gorris, Geowissenschaftlerin an der University of California in Irvine, hat anhand von Klimaszenarien errechnet, welcher Anteil der USA bis zum Ende dieses Jahrhunderts zum geeigneten Lebensraum für *Coccidioides* avancieren könnte. Im Szenario mit dem höchsten Temperaturanstieg reicht das Gebiet mit für den Erreger günstigen Bedingungen – eine Jahresmitteltemperatur von 10,7 Grad



Celsius sowie ein Jahresniederschlag von weniger als 600 Millimetern – bis zur kanadischen Grenze und umfasst den größten Teil des Westens der Vereinigten Staaten.

Irvin hat sich in den letzten zwei Jahren allmählich von seiner Infektion erholt. Er nimmt noch immer sechs Tabletten Olorofim täglich und wird dies wohl auf unbestimmte Zeit weiter tun müssen. Er hat wieder zugenommen und ist kräftiger geworden, dennoch wurde er wegen seiner dauerhaft geschädigten Lunge frühverrentet. »Allmählich gewöhne ich mich daran«, sagt er. »Schließlich werde ich den Rest meines Lebens damit umgehen müssen.«

Sporothrix fand neue Übertragungswege. *Coccidioides* profitiert vom Zuwachs seines Verbreitungsgebiets. Und *Candida auris* half das Chaos der Corona-Pandemie. Dieser Pilz ist ein extrem übler Bursche. Er verhält sich nicht wie andere pathogene Hefen, die lange harmlos im menschlichen Darm bleiben und erst dann im Blut oder auf den Schleimhäuten auftauchen, wenn das Immunsystem aus

dem Gleichgewicht gerät. Irgendwann in der ersten Dekade dieses Jahrhunderts erlangte *Candida auris* die Fähigkeit, direkt von Mensch zu Mensch überzugehen. Der Pilz passte sich an Metall und Kunststoffe, aber auch an die rauen Oberflächen von Textilien und Papier an. Als im Zuge der ersten Covid-19-Welle Einwegmasken und -schutzkittel knapp wurden, war das Krankenhauspersonal gezwungen, diese wiederzuverwenden, statt sie nach jedem einzelnen Patienten auszutauschen. *C. auris* nutzte seine Chance.

Nach der Lektüre der ersten Coronafallberichte wurde der indischen Ärztin und Mikrobiologin Anuradha Chowdhary von der Universität Delhi klar, dass Covid-19 in gleichem Maß eine Atemwegserkrankung wie eine entzündliche Krankheit ist. Üblicherweise werden überschießende Entzündungsreaktionen mit Steroiden behandelt. Auf Grund der dadurch abgeschwächten Immunreaktion steigt jedoch das Risiko einer Pilzinfektion. *C. auris* tauchte als potenziell tödlicher und zudem recht widerstandsfähiger Keim bereits in Krankenhäusern in 40 Ländern auf allen Kontinenten außer der Antarktis auf (siehe »Ein resistenter Killer«). Wenn das Klinikpersonal den Erreger unwissentlich auf wiederverwendeter Schutzkleidung durch die Stationen trägt, muss es zu schweren Ausbrüchen kommen. »Ich dachte: Die Intensivstationen werden so überfüllt sein, dass jede Infektionskontrolle hoffnungslos bleibt«, sagt Chowdhary. »Das wird verheerend.«

Schon zu Beginn der Pandemie 2020 veröffentlichte sie eine entsprechende Warnung an ihre Kollegen. Wenige Monate später schrieb sie den nächsten Artikel: Auf einer Intensivstation in Neu-Delhi hatte es einen Ausbruch von *C. auris* gegeben. Sechs von zehn Covid-19-Patienten, die sich mit dem Pilz infiziert hatten, waren gestorben. Inzwischen warnte die indische Regierung die Bevölkerung vor der Ausbreitung von Pilzinfektionen im Zusammenhang mit der Corona-Pandemie.

In den USA wurden mehrere Hundert derartiger Fälle in Krankenhäusern und Pflegeeinrichtungen gemeldet. Ein Hospital in Florida verzeichnete allein 35 betroffene Patienten. Für Kliniken, die nur wenige Fälle registriert hatten, gingen die CDC von in Wirklichkeit viel höheren Fallzahlen aus, weil Routinetests auf Pilzinfektionen wegen der Überlastung des Klinikpersonals durch Covid-19 aufgegeben wurden.

Damit nicht genug. Ärzte, die sich mit Pilzen auskennen, treibt eine noch größere Sorge um: die Ausbreitung eines weiteren Erregers, dem Sars-CoV-2 ebenfalls zum Vorteil gereichen könnte: *Aspergillus fumigatus*.

In freier Natur wirkt der Schimmelpilz als Recycling-Dienstleister. Er zersetzt tote Pflanzenteile und bewahrt die Welt davor, in abgestorbener Vegetation zu versinken. In der Medizin sind Pilze der Gattung *Aspergillus* jedoch ebenfalls als Erreger opportunistischer Infektionen gefürchtet. Diese entstehen, sobald ein geschwächter menschlicher Körper die Pilzsporen nicht mehr loswerden kann. Bei Schwerkranken erreicht die Sterblichkeit bei einer invasiven Lungenaspergillose nahezu 100 Prozent.

Während der H1N1-Influenza-Pandemie 2009 fanden Aspergillen neue Opfer: In den Niederlanden wurden Influenzapatienten mit Atemversagen und Schock ins

Krankenhaus eingeliefert. Sie starben binnen weniger Tage. Bis 2018 trat die invasive Lungenaspergillose bei einem von drei kritisch erkrankten Influenzapatienten auf und tötete bis zu zwei Drittel von ihnen.

Dann kam Sars-CoV-2. Das Virus greift die Lunge auf ähnliche Weise an wie der Influenzaerreger. Überwachungsnetzwerke von Infektiologen und Mykologen aus China, Frankreich, Belgien, Deutschland, den Niederlanden, Österreich, Irland, Italien und dem Iran meldeten Aspergillose-Fälle bei Covid-19-Patienten. Bei allem Respekt für *Candida auris* – *Aspergillus* ist gefährlicher. *C. auris* lauert in Krankenhäusern, *Aspergillus* überall. Es ist unmöglich, die Sporen aus der Umwelt zu entfernen oder sie nicht einzuatmen.

Es gibt nur wenige Antimykotika – und die wirken zunehmend schlechter

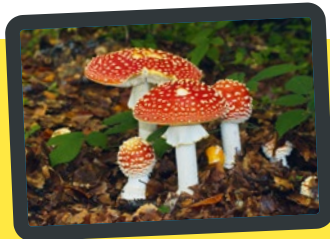
Pathogene Pilze zu bekämpfen, ist auch deshalb so schwierig, weil sie sich gut gegen Wirkstoffe zur Wehr setzen. Die Situation ähnelt dem Problem der antibiotikaresistenten Bakterien. Medikamentenentwickler versuchen immer wieder, den evolutionären Ausweichmanövern zuvorzukommen, mit denen sich Bakterien vor Antibiotika schützen. Bei den Pilzen sieht es sogar noch schlimmer aus. Sie werden ebenfalls unempfindlich gegen Substanzen zu ihrer Eindämmung – es gibt aber eine viel geringere Auswahl an Antimykotika, da man die Bedrohung erst spät erkannte.

Torrence Irvin wurde in die Olorofim-Studie aufgenommen, weil keines der zugelassenen Medikamente gegen sein Talfieber half. *Candida auris* zeigt bereits Resistenzen gegen Substanzen aus allen drei großen Antimykotika-Klassen. Viele *Aspergillus*-Stämme sind inzwischen unempfindlich gegen Azolwirkstoffe, weil sie ihnen ständig ausgesetzt sind. Azole verwendet man überall auf der Welt – nicht nur in der Landwirtschaft zur Bekämpfung von Pflanzenkrankheiten, sondern auch zur Schimmelprophylaxe in Farben, Kunststoffen und Baumaterialien.

Neue Wirkstoffe sind somit dringend nötig, unter anderem weil viele der zugelassenen Substanzen – die mitunter über viele Monate, wenn nicht Jahre eingenommen werden müssen – toxisch wirken. Doch die beste Strategie gegen schwere Mykosen wäre Prävention. Allerdings gibt es bislang keinen einzigen Impfstoff gegen Pilzerkrankungen.

Dass das Talfieber nicht noch häufiger auftritt – immerhin leben zehn Prozent der US-Bevölkerung in einem Endemiegebiet –, beruht auf der lebenslangen Immunität, den man nach einer Infektion gegen den Erreger erwirbt. Damit sollte die Entwicklung eines Impfstoffs möglich sein, und seit den 1940er Jahren haben Forscher das auch immer wieder versucht. Ein Vakzinprototyp aus abgetöteten, mit Sporen gefüllten Pilzspährulen von *Coccidioides* schützte Mäuse hervorragend, scheiterte dann aber kläglich bei einer klinischen Studie in den 1980er Jahren. »Wir haben das Projekt damals mit minimalem Budget durchgezogen, und jeder hoffte inständig auf einen Erfolg«, erinnert sich John Galgiani, der vor 40 Jahren daran beteiligt war und heute als Direktor des Valley Fever Center for Excellence an der University of Arizona in Tucson arbeitet.

Anfällig für das Talfieber sind vor allem Hunde, die ja die ganze Zeit auf dem Boden herumschnüffeln. In einigen Bezirken von Arizona erkranken jährlich etwa zehn Prozent der Vierbeiner, und das Risiko für eine schwere Lungenentzündung liegt bei ihnen sogar höher als beim Menschen. Sie leiden schrecklich, und die Behandlung ist langwierig und teuer. Doch diese Anfälligkeit macht sie – neben den niedrigeren Zulassungsstandards für Veterinärmedikamente – zu einem geeigneten Modellsystem für die Prüfung möglicher Impfstoffe.



U. GERINHOEFER / STOCK.ADOBE.COM

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Galgiani und seine Gruppe in Tucson arbeiten inzwischen an einem neuen Vakzin, unterstützt von Spenden hunderter Hundehalter sowie staatlichen und privatwirtschaftlichen Fördermitteln. Statt eines Totimpfstoffs setzen die Forscher auf lebende Pilzzellen, denen ein für die Fortpflanzung essenzielles Gen namens *CPS1* (Carbamoylphosphat-Synthetase I) fehlt. Damit können sich die verimpften Pilzzellen nicht im Körper ausbreiten. Das Gen hatte der Pflanzenpathologe Marc Orbach von der University of Arizona 2016 bei *Coccidioides* identifiziert. Nachdem er und sein Team eine *CPS1*-Mangelmutter des Pilzes erzeugt hatten, impften sie und Galgians Arbeitsgruppe damit Labormäuse eines Stamms, der für die Pilzinfektion besonders empfänglich ist. Die Impfung erzeugte eine starke Immunreaktion und aktivierte vor allem T-Helferzellen vom Typ 1, die eine dauerhafte Immunität aufbauen. Die Mäuse überlebten sechs Monate lang und zeigten keinerlei Talfiebersymptome, obwohl das Team sie wiederholt mit vermehrungsfähigen *Coccidioides*-Pilzen infizierte. Bei Sektionen am Ende des Beobachtungszeitraums fanden die Wissenschaftler praktisch keine Pilzzellen in den Lungen der Versuchstiere. Dieser lang anhaltende Infektionsschutz macht die Mangelmutante zum besten Kandidaten für einen Impfstoff seit Galgians ersten Arbeiten in den 1980er Jahren. Ein für Hunde entwickeltes Vakzin für den Menschen anzupassen, ist allerdings kein leichtes Unterfangen.

»Wir müssen das Flugzeug fliegen, während wir es noch bauen«

Die Zulassung für Tierimpfstoffe fällt in den Vereinigten Staaten unter die Zuständigkeit des US-amerikanischen Landwirtschaftsministeriums; eine Anwendung beim Menschen müsste hingegen die Food and Drug Administration (FDA) genehmigen. Die Aufsichtsbehörde würde klinische Studien verlangen, die sich wahrscheinlich über Jahre erstrecken und Tausende von Teilnehmern erfordern – statt der kleinen Anzahl von Tieren, an denen der Impfstoff für Hunde geprüft wurde. Anders als der erste

Impfstoffkandidat aus den 1980er Jahren enthält das neue Vakzin lebende Zellen. Und da es keine zugelassenen Impfstoffe gegen Pilzkrankungen gibt, existiert bisher kein klar definierter Begutachtungsprozess, dem die Entwickler und die Behörde folgen könnten. »Wir müssten sozusagen das Flugzeug fliegen, während wir es noch bauen«, sagt Galgiani. Er schätzt, dass die Entwicklung eines Talfieberimpfstoffs für Menschen fünf bis sieben Jahre dauern könnte bei Gesamtkosten von etwa 150 Millionen US-Dollar – angesichts unsicherer Gewinnerwartungen eine erhebliche Investition.

Doch ein erfolgreicher Impfstoff verspricht großen medizinischen Nutzen, denn er schützt nicht nur die ansässige Bevölkerung des amerikanischen Südwestens, sondern auch sonnenhungrige Amerikaner, die Jahr für Jahr dem nördlichen Winter entfliehen. Einer Schätzung zufolge könnte ein Talfieberimpfstoff dem Gesundheitssystem jährlich Kosten in Höhe von 1,5 Milliarden US-Dollar einsparen. »Vor zehn Jahren habe ich nicht geglaubt, dass es je einen Impfstoff geben würde«, erklärt Galgiani. »Inzwischen bin ich zuversichtlich.«

Die Entwicklung eines solchen Pilzimpfstoffs für Menschen könnte den Weg für weitere Mykosevakzine ebnen. Etablierte Impfstoffe sollten uns davor bewahren, uns ständig vor möglichen Attacken aus dem Reich der Pilze in Acht nehmen zu müssen. Wir könnten angstfrei und sicher mit und neben ihnen leben.

Bis dahin werden allerdings noch Jahre vergehen, während die Pilze ihre Strategien weiterentwickeln, indem sie sich an neue Habitate anpassen und Gelegenheiten wie die Coronakrise bei der Suche nach neuen Opfern nutzen. Tom Chiller bleibt auf der Hut. »Seit etwa fünf Jahren sieht es so aus, als würde sich die Welt der Pilze in nie zuvor geahnter Weise verändern«, erläutert er. »Wie sollen wir da mithalten? Wie können wir auf neue Entwicklungen rechtzeitig reagieren? Wir untersuchen solche Ausbrüche von Pilzinfektionen nicht aus rein akademischem Interesse, sondern weil sie uns zeigen, was wir in Zukunft zu erwarten haben. Wir müssen auf weitere Überraschungen gefasst sein.« ◀

QUELLEN

Chong, W. H., Neu, K. P.: Incidence, diagnosis, and outcomes of COVID-19-associated pulmonary aspergillosis (CAPA): A systematic review. *Journal of Hospital Infection* 113, 2021

Chowdhary, A., Sharma, A.: The lurking scourge of multidrug resistant *Candida auris* in times of Covid-19 pandemic. *Journal of Global Antimicrobial Resistance* 22, 2020

Du, H. et al.: *Candida auris*: Epidemiology, biology, antifungal resistance, and virulence. *PLOS Pathogens* 16, 2020

Gorris, M. E. et al.: Expansion of coccidioidomycosis endemic regions in the United States in response to climate change. *GeoHealth* 3, 2018

Lockhart, S. R. et al.: Endemic and other dimorphic mycoses in the Americas. *Journal of Fungi* 7, 2021

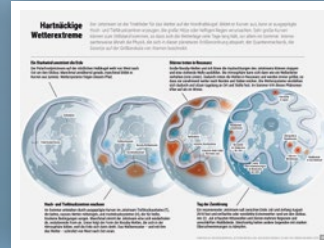
Rossow, J. A. et al.: A one health approach to combatting *Sporothrix brasiliensis*: Narrative review of an emerging zoonotic fungal pathogen in South America. *Journal of Fungi* 6, 2020

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)

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN EINE HAARIGE ANGELEGENHEIT

Dauerwellen erlauben es, ein wichtiges Teilgebiet der Chemie alltagsnah zu vermitteln: Redoxvorgänge, bei denen die Reaktionspartner Elektronen austauschen.



Matthias Ducci (links) ist Professor für Chemie und ihre Didaktik am Institut für Chemie an der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe. **Marco Oetken** ist Abteilungsleiter und Lehrstuhlinhaber in der Abteilung Chemie der Pädagogischen Hochschule Freiburg.

► spektrum.de/artikel/1886770

Wenn glatte Haare beim Friseur künstlich gewellt oder gelockt werden, spielen sich hochinteressante chemische Umsetzungen ab. Damit die Formveränderung dauerhaft ist, müssen chemische Bindungen in ihrem Innern gespalten und neu geknüpft werden. Haare bestehen hauptsächlich aus dem Protein Keratin. Darin sind Aminosäuren durch Peptidbindungen zu langen Kettenmolekülen verknüpft, die sich schraubenartig zu so genannten Helices winden. Nebeneinanderliegende Helices halten durch Quervernetzungen zusammen. Dabei unterscheidet man im Wesentlichen drei Typen:

- ▶ Disulfidbindungen (kovalente Bindungen)
- ▶ Wasserstoffbrücken (Dipol-Dipol-Wechselwirkungen)
- ▶ elektrostatische Wechselwirkungen zwischen Ionen

Disulfidbindungen bilden die stabilsten Brücken in Proteinen. Verantwortlich dafür sind gewöhnlich schwefelhaltige Aminosäuren wie Cystein. Als kovalente Bindungen lassen sich diese Brücken durch Wasser weder lockern noch spalten. Sie müssen aber aufgebrochen werden, damit Haare dauerhaft ihre Form ändern können. Das geschieht reduktiv durch Ammoniumthioglykolat, das seit der Patentanmeldung im Jahr 1934 für Dauerwellen verwendet wird. Um die Disulfidbindungen anschließend neu zu knüpfen und damit die Locken im Haar zu fixieren, bedarf es dagegen eines Oxidationsmittels. Als solches dient meist eine zweiprozentige Lösung von Wasserstoffperoxid.

Mit den nachfolgend beschriebenen Experimenten lassen sich das Spalten und Neuknüpfen der Disulfidbindungen ohne großen Aufwand veranschaulichen. Zugleich

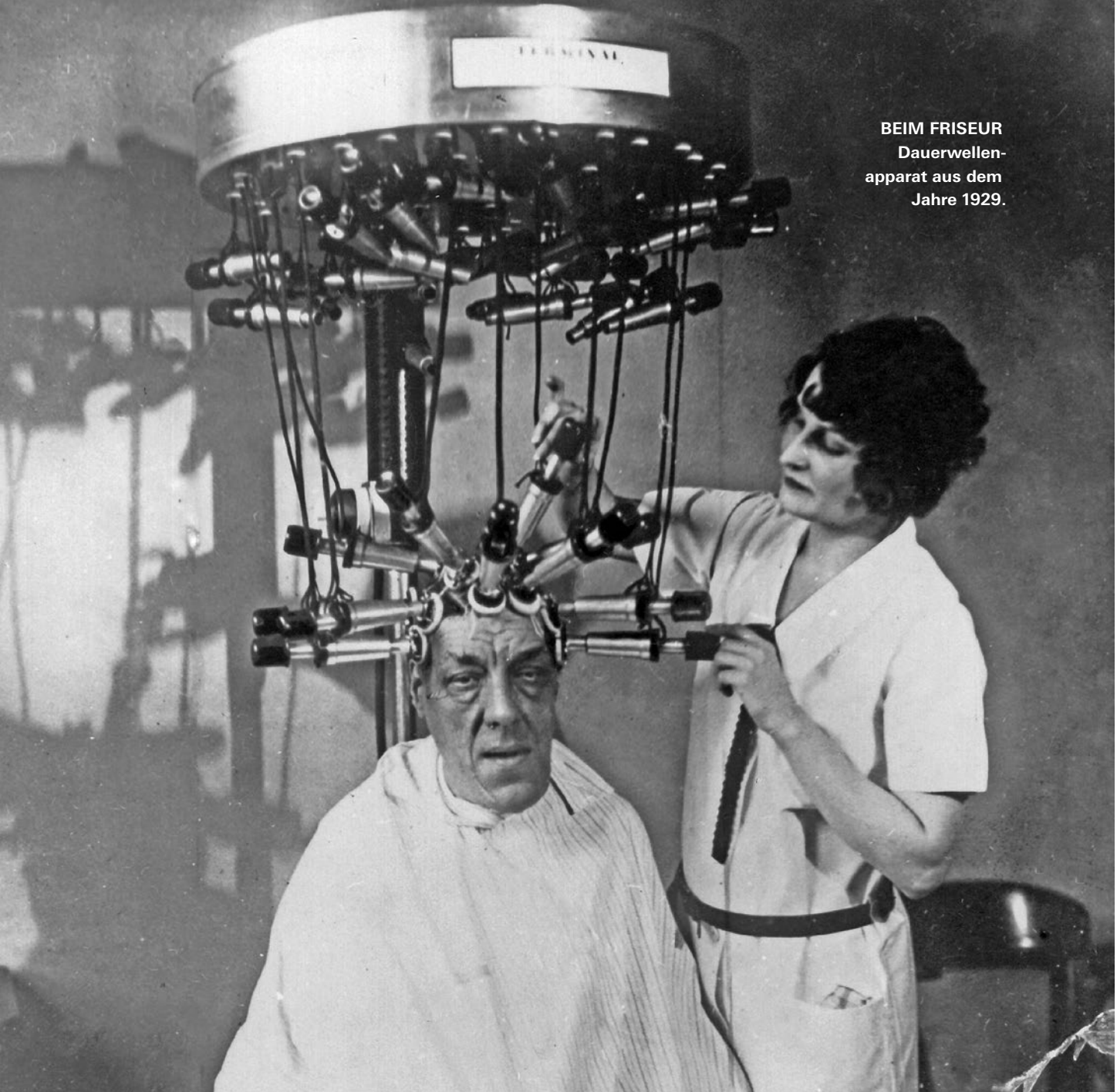
vermitteln die entsprechenden Reaktionsgleichungen ein tieferes Verständnis der zu Grunde liegenden Prozesse von Oxidation und Reduktion. Außerdem bieten die Vorgänge bei der Dauerwelle eindrucksvolle Einblicke in den für die Chemie grundlegenden Zusammenhang zwischen Struktur und Eigenschaften.

Hier sind die Versuche nur kurz skizziert. Ausführliche Beschreibungen stehen in der Onlineergänzung zu dem Artikel. Die benötigten Chemikalien finden sich in Schulabors. Wer keinen Zugang dazu hat, kann die Versuche zwar nur theoretisch nachvollziehen, wird dabei aber trotzdem viel Interessantes erfahren.

Abweichend von der normalen Reihenfolge wollen wir zunächst den Fixierungsschritt bei der Dauerwelle experimentell nachvollziehen. Geben Sie dafür eine gehäufte Spatelspitze Natriumcarbonat (Soda) zu 20 Milliliter Wasser in einem Becherglas und fügen einen Kristall Nitroprussidnatrium hinzu. Rühren Sie so lange, bis eine klare Lösung entstanden ist. Diese hat vom Nitroprussidnatrium eine gelbe Farbe. Außerdem ist sie durch das Natriumcarbonat leicht alkalisch.

Füllen sie nun in vier Reagenzgläser jeweils zehn Milliliter Phosphatpuffer-Lösung, so dass der pH-Wert bei den nachfolgenden Umsetzungen konstant bleibt, und lösen in jedem ein Gramm Cystein. In das erste Glas schütten Sie anschließend zwei bis drei Milliliter der sodaalkalischen Nitroprussidnatrium-Lösung. Die Flüssigkeit färbt sich daraufhin tiefviolett (siehe »Aufschlussreiche Reaktionen«).

In das dritte und vierte Reagenzglas geben Sie fünf Tropfen zweiprozentiges Wasserstoffperoxid. Nach 15 bis 30 Sekunden bildet sich ein weißer Niederschlag. Wenn



BEIM FRISEUR
Dauerwellen-
apparat aus dem
Jahre 1929.

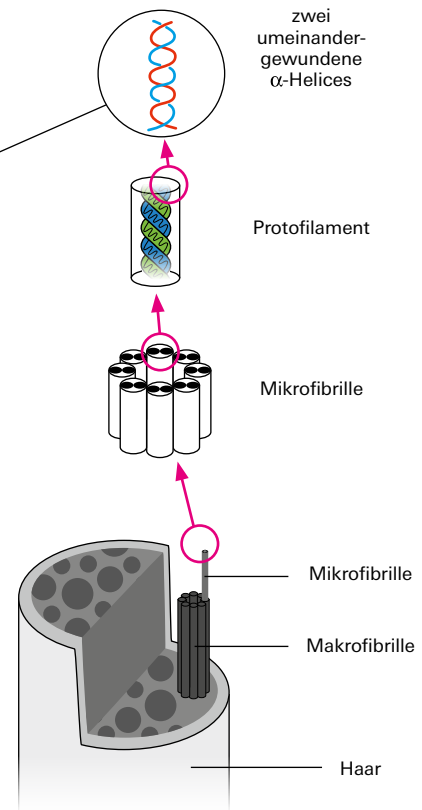
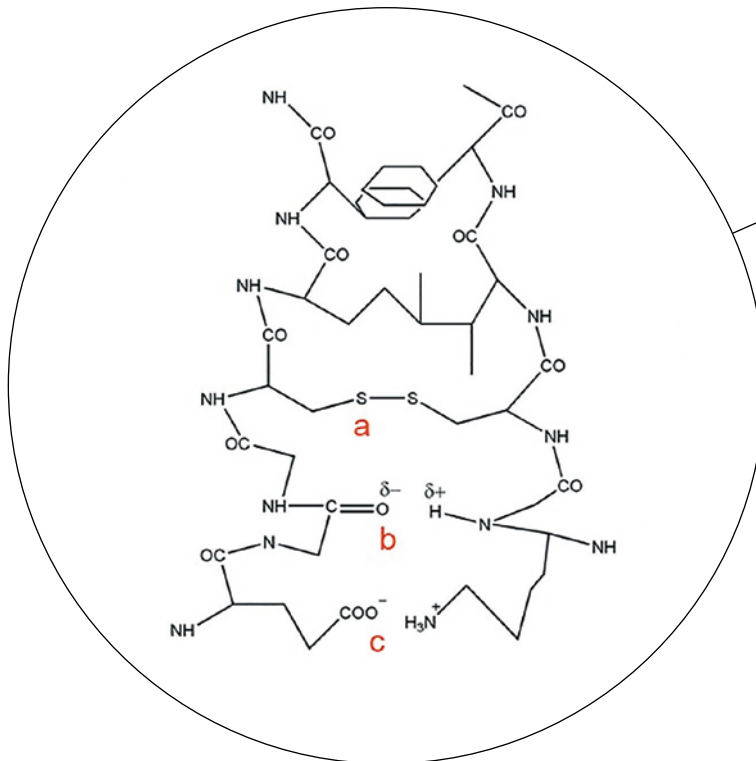
UULSTEM BILD / PICTURE ALLIANCE

Sie zu der Suspension im vierten Reagenzglas nun noch zwei bis drei Milliliter der Nitroprussidnatrium-Lösung hinzufügen, so bleibt diese unverändert gelb.

Prussiate (systematischer Name: Pentacyanoferrate) sind Verbindungen, bei denen eine Cyanogruppe im Hexacyanoferrat- oder $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ -Ion des gelben Blutlaugensalzes durch andere Gruppen ersetzt ist. Sie heißen so, weil sie mit dem Farbstoff Preußischblau verwandt sind. Nitroprussidnatrium ($\text{Na}_2[\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO}]$, systematischer Name Natriumpentacyano-nitrosylferrat(II)) dient allgemein als Nachweisreagens für Sulfide (-SH) und damit auch für die Aminosäure Cystein, die ebenfalls eine SH-Gruppe enthält. Es bildet mit ihnen in schwach alkalischem Milieu einen violetten Komplex, der die Lösung in Reagenzglas 1 entsprechend färbt (siehe »Chemie der Dauerwelle« A).

In Reagenzglas 4 tritt diese Färbung jedoch nicht auf. Dort kann also kein Cystein mehr vorhanden sein. Es wurde vielmehr vom zugesetzten Wasserstoffperoxid in die Aminosäure Cystin umgewandelt, die in Wasser unlöslich und deshalb als weißer Niederschlag ausgefallen ist. Bei dieser Reaktion hat das Cystein zwei Elektronen abgegeben, was einer Oxidation entspricht (siehe »Chemie der Dauerwelle« B) Die beiden Elektronen sind auf das Wasserstoffperoxid übergegangen, das dadurch zu normalem Wasser reduziert wurde (siehe »Chemie der Dauerwelle« C). Es handelt sich also um eine Kombination aus Reduktion und Oxidation, wofür sich der Ausdruck Redoxvorgang eingebürgert hat.

Im nächsten Experiment wollen wir nun den ersten Schritt der Dauerwelle im Friseursalon nachvollziehen. Dabei wird durch Spalten der Disulfidbrücken des Cystins

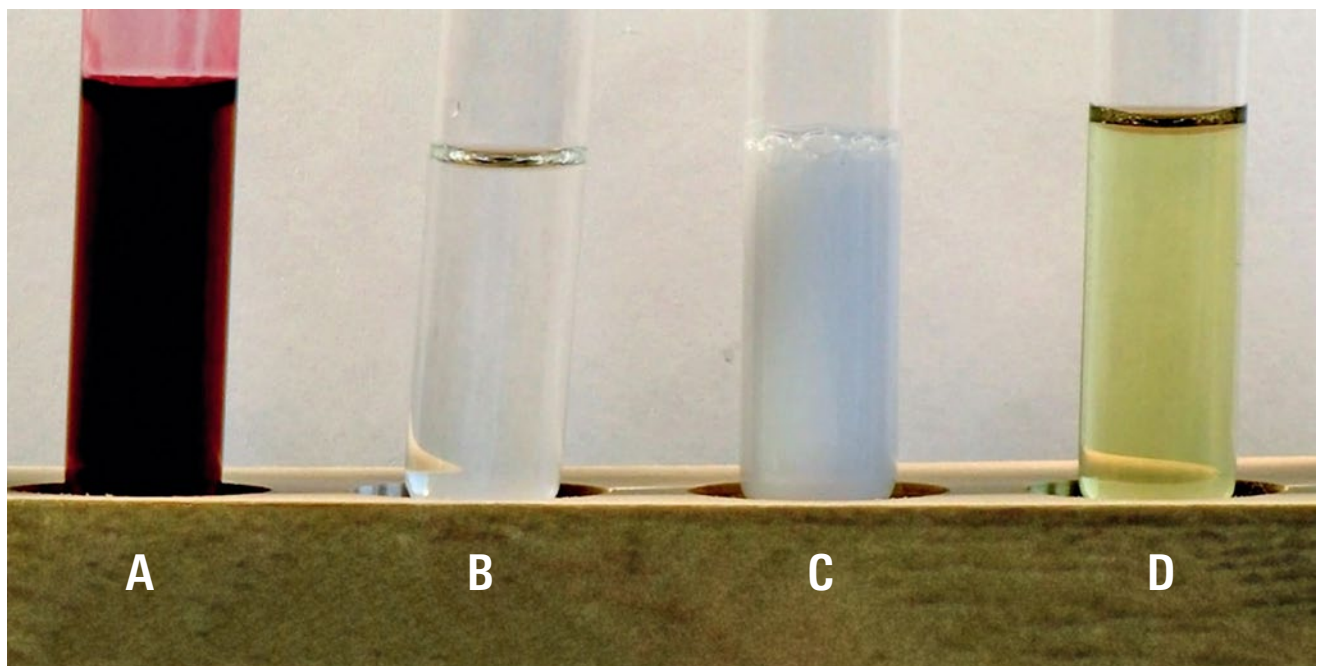


AUFBAU DES HAARINNERN Das Keratin des Haares besteht aus Filamenten, in denen schraubenförmig gewundene Aminosäureketten (α -Helices) durch Disulfidbindungen (a), Wasserstoffbrücken (b) und elektrostatische Wechselwirkungen zwischen Ionen (c) miteinander verknüpft sind.

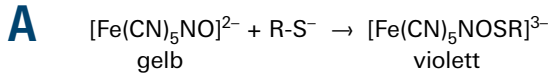
AUFSCHLUSSREICHE REAKTIONEN Cystein bildet in Wasser eine klare Lösung (B), die sich beim Zufügen von gelber, sodahaltiger Nitroprussidnatrium-Lösung tiefviolett färbt (A). Wird dagegen Wasserstoffperoxid zugetropft, fällt das Oxidationsprodukt Cystin als weiße Substanz aus (C und D). Bei anschließender Zugabe von Nitroprussidnatrium unterbleibt die Violettfärbung, weil alles Cystein oxidiert wurde (D).

das Haar in seiner natürlichen Proteinstruktur verändert und verformbar gemacht. Es schrumpft in der Länge geringfügig, quillt dafür aber im Durchmesser um bis zu 100 Prozent auf und nimmt bereitwillig die Form des Lockenwicklers an.

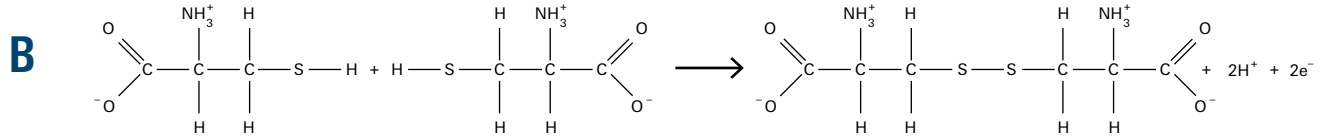
Für das Experiment verwenden Sie am besten das dritte Reagenzglas aus dem vorigen Versuch, das den weißlichen Cystin-Niederschlag enthält, geben vier Milliliter Ammoniumthioglykolat-Lösung hinzu und stellen es in ein mindestens 60 Grad warmes Wasserbad. Nach ein bis zwei Minuten (je nach Temperatur) klart die Lösung auf. Die Hälfte davon überführen Sie anschließend in ein anderes Reagenzglas. In dieses geben Sie zwei bis drei



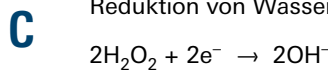
Nachweis von Cystein (R-S⁻) durch Nitroprussid



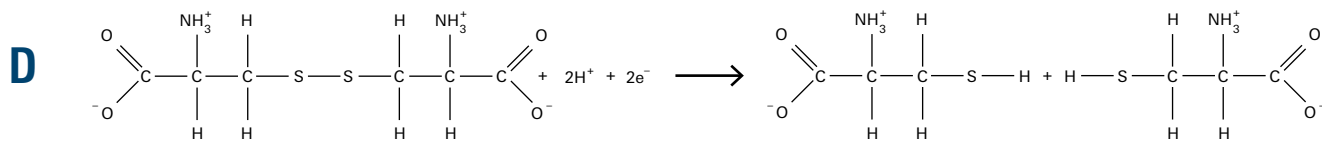
Oxidation von Cystein zu Cystin



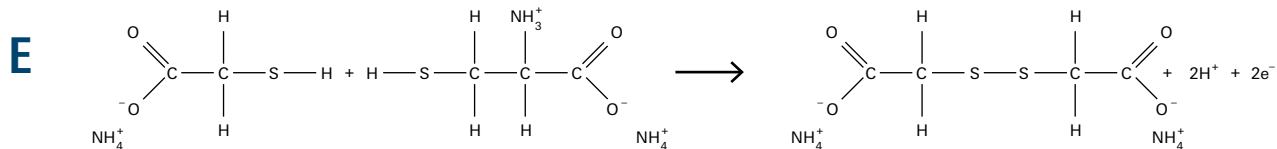
Reduktion von Wasserstoffperoxid (H₂O₂) in neutraler Lösung



Reduktion von Cystin zu Cystein



Oxidation von Ammoniumthioglykolat zu 2,2'-Dithiobisammoniumacetat



CHEMIE DER DAUERWELLE Bei den im Text beschriebenen Versuchen, welche die Vorgänge bei einer Dauerwelle nachvollziehen, spielen sich die hier aufgeführten Reaktionen ab (A bis E).

Milliliter der sodaalkalischen Nitroprussidnatrium-Lösung: Es tritt eine violette Färbung auf.

Das beweist, dass das Cystin wieder zu Cystein reduziert wurde. Dabei hat es die beiden im Versuch zuvor verlorenen Elektronen zurückerhalten. Diese stammen von dem Ammoniumthioglykolat, das im Gegenzug zu Dithiobisammoniumacetat oxidiert wurde, wobei auch hier zwei SH-Gruppen zur Disulfidbrücke verschmelzen und die betreffenden Moleküle sich zum Dimer verbinden (siehe »Chemie der Dauerwelle« D und E). Wieder haben wir es folglich mit einem Redoxvorgang zu tun.

Doch damit sind wir noch nicht am Ende. Durch Zugabe von Wasserstoffperoxid lässt sich das Cystein nämlich erneut in Cystin umwandeln. Oxidation und Reduktion sind also jeweils reversibel, und man kann die »Dauerwelle im Reagenzglas« daher mehrmals wiederholen.

Am Schluss bleibt noch die Frage zu klären, warum wir den normalen Ablauf im Friseursalon umgedreht haben. Das hat einen ganz praktischen Grund. Um die Dauerwelle in der richtigen Reihenfolge nachzustellen, hätten wir zuerst das Cystin mit Ammoniumthioglykolat reduzieren und das dabei entstehende Cystein anschließend mit Wasserstoffperoxid wieder oxidieren müssen. Die Reduktion von käuflichem Cystin dauert jedoch mehrere Stunden, weil es sehr grobkörnig und damit reaktionsarm ist. Selbst nach Mörsern hat es noch einen ziemlich geringen Zerteilungsgrad. Das frisch ausgefällte Cystin besteht dagegen aus ganz kleinen Kristallen, so dass die Reduktion schnell abläuft. ◀

QUELLEN

Pfeifer, P.: Chemie mit Haaren. Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie 14/75, 2003

Zahn, H.: Das Haar aus der Sicht des Chemikers. Chemie in unserer Zeit 23/5, 1989

Erweiterte Version des Artikels

www.spektrum.de/artikel/1886770



TECHNIK DAS GRÖSSTE AUGE DER WELT

Von den Jupitermonden im Sonnensystem bis zu den ersten Sternen des Universums – das Extremely Large Telescope wird den Kosmos in noch nie da gewesendem Detail zeigen.



Xavier Barcons (links) ist Generaldirektor der ESO. **Juan Carlos González** (Mitte) ist Leiter der Anlagentechnik für das Bauprojekt des ELT. **Augustin Sánchez Lavega** ist Professor für angewandte Physik an der Universität des Baskenlandes in Bilbao und Mitglied des wissenschaftlichen Teams des ELT.

► [spektrum.de/artikel/1886761](https://www.spektrum.de/artikel/1886761)

RIESENTELESKOP Die Europäische Südsternwarte errichtet in der chilenischen Atacama-Wüste gerade ein Observatorium, das nach Fertigstellung das größte optische Teleskop der Welt sein wird.

Seit Galileo Galilei zu Beginn des 17. Jahrhunderts sein nur wenige Zentimeter breites Teleskop in den Nachthimmel richtete, ermöglichen immer präzisere und ausgeklügeltere Systeme zunehmend tiefe Blicke ins Universum. Anfang des 20. Jahrhunderts lieferten Beobachtungen mit dem 2,5-Meter-Teleskop am Mount Wilson Observatory die Entfernung zahlreicher Galaxien. Seitdem war klar, dass sich der Kosmos ausdehnt. In den späten 1950er Jahren half das 5-Meter-Teleskop am Mount Palomar bei der Entdeckung von Quasaren, jenen aktiven galaktischen Kernen, die beinahe punktförmig erscheinen und uns mit ihrer immensen Leuchtkraft die Weiten des beobachtbaren Alls erkunden lassen. Das in Chile erbaute Very Large Telescope (VLT) lieferte dank seiner 8,2 Meter großen Spiegel 2004 das erste Bild eines Planeten außerhalb unseres Sonnensystems.

Das sind nur wenige Beispiele für die weit reichenden Ergebnisse der beobachtenden Astronomie. Jede neue Generation von Teleskopen hat unsere Auffassung des Universums verändert. Deshalb hat die Europäische Südsternwarte (ESO) vor zwei Jahrzehnten mit der Planung des

EIN IDEALER STANDORT Das ELT wird auf dem Gipfel des Cerro Armazones in der chilenischen Atacama-Wüste gebaut. Auf einer Höhe von mehr als 3000 Metern gelegen, zeichnet sich der Ort durch einen außergewöhnlich klaren und dunklen Nachthimmel aus.

größten optischen Teleskops der Geschichte begonnen: des Extremely Large Telescope, kurz ELT.

Das gigantische Observatorium wird auf dem Cerro Armazones in der chilenischen Atacama-Wüste errichtet und soll von 2025 an den Nachthimmel abtasten. Am bemerkenswertesten wird – neben der hochmodernen technischen Ausstattung – der Hauptspiegel sein, mit einem Durchmesser von fast 40 Metern.

Solche Dimensionen sind in der Astronomie bisher beispiellos. Heutige Großteleskope haben Spiegel mit einem Durchmesser von etwa zehn Metern. Zwei davon befinden sich am Keck-Observatorium auf Hawaii. Sie waren bis 2007 die größten ihrer Art und wurden vom Gran Telescopio Canarias (GTC) auf La Palma abgelöst.

Die Fläche des ELT wird die der jetzigen Geräte um mehr als das Zehnfache übersteigen. Dadurch fängt es eine größere Menge Licht ein und hat ein besseres Auflösungsvermögen. Ersteres ermöglicht es, Objekte zu beobachten, die sehr weit entfernt sind. Die erhöhte Auflösung verleiht dem Teleskop hingegen die Fähigkeit, zwei nah erscheinende Himmelskörper voneinander zu unterscheiden. Gemäß den Gesetzen der Optik nimmt die Menge des aufgenommenen Lichts mit der Fläche des Spiegels zu, während die Auflösung mit dem Radius steigt.

Das geplante Teleskop wird für den sichtbaren und den Infrarotbereich des elektromagnetischen Spektrums empfindlich sein. Damit fällt es in das Gebiet der optischen Astronomie, die sich besonders gut dafür eignet, Sterne



oder Galaxien zu untersuchen. Die Forschungsziele des ELT sind ebenso zahlreich wie vielfältig – sie betreffen sowohl unsere direkte kosmische Umgebung wie unser Sonnensystem als auch Galaxien, die sich in den entferntesten Winkeln des Universums befinden.

Unter anderem werden Forscherinnen und Forscher mit dem ELT in der Lage sein, die Atmosphäre von Exoplaneten zu analysieren und nach Hinweisen für biologische Aktivität zu suchen. Zudem hoffen sie, die Struktur und Zusammensetzung entfernter Galaxien sowie die Auswirkungen von supermassereichen Schwarzen Löchern in deren Zentrum zu beobachten. Und nicht zuletzt ist eine genauere Messung der Beschleunigung der kosmischen Ausdehnung für die Forscherteams interessant.

Die Verwirklichung eines Projekts dieser Größe geht mit zahlreichen technischen Herausforderungen einher. Die wissenschaftlichen Fortschritte der letzten Jahre sollten es ermöglichen, das hochgesteckte Ziel sowohl finanziell als auch technologisch zu erreichen. Doch ohne die Zusammenarbeit mehrerer Staaten wäre der Bau undenkbar.

Seit der Wettlauf ins All zwischen den Großmächten nachgelassen hat, schließen sich internationale Gruppen immer häufiger zusammen, um große Observatorien zu errichten. Europa ergriff 1962 die Initiative mit der Gründung der ESO, die heute 16 Mitgliedsländer zählt.

Im Bereich der bodengebundenen Astronomie ist Europa inzwischen weltweit führend. Wegweisend war hierbei der leistungsstärkste optische Astronomiekomplex, das VLT, das aus vier Teleskopen mit einem Durchmesser von je 8,2 Metern besteht. Die ESO errichtete das Observatorium im Cerro Paranal in der Atacama-Wüste, der trockensten Region auf der Erde.

Im Bereich der Radiowellenastronomie zeigen sich die Erfolge internationaler Zusammenarbeit ebenfalls: Das aus 66 Antennen bestehende Teleskop Alma (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) entstand aus einer Kollaboration zwischen Europa, Nordamerika (USA und Kanada) und Asien (Japan, Taiwan und Südkorea). Die seit 2013 betriebene Anlage bietet einzigartige Einblicke ins vergleichsweise kalte Universum, etwa in interstellares Gas und Staub oder protoplanetare Scheiben.

Zwei Riesenteleskope, nur 20 Kilometer voneinander entfernt

Doch der Trend setzte sich nicht fort, und bei der neuen Generation optischer Teleskope sind die Staatenverbände nicht mitgewachsen. Derzeit sind drei Riesenteleskope mit Spiegeln von über 20 Meter Durchmesser geplant: Zwei davon, das Giant Magellan Telescope (GMT) und das Thirty Meter Telescope (TMT), finanzieren verschiedene US-amerikanische Forschungsinstitute, während Europa das ELT entwickelt.

Nach langer Vorarbeit entschied sich die ESO für ein System, dessen Hauptspiegel 39,3 Meter misst. 2010 wurde beschlossen, das Teleskop auf dem Cerro Armazones zu installieren. Die chilenische Regierung stellt das auf 3060 Meter Höhe gelegene Grundstück zur Verfügung. Neben den ausgezeichneten Sichtverhältnissen unter dem dortigen Himmel ist ein weiterer Vorteil, dass es weniger als

AUF EINEN BLICK EIN BLICK IN DIE TIEFEN DES ALLS

- 1** In der chilenischen Atacama-Wüste hat die Europäische Südsternwarte (ESO) mit dem Bau des größten optischen Teleskops in der Geschichte der Astronomie begonnen.
- 2** Das ELT wird seine Beobachtungen voraussichtlich ab 2026 aufnehmen und extrem weit entfernte Objekte mit noch nie da gewesener Präzision auflösen.
- 3** Der Bau und Betrieb eines so großen Teleskops stellt die Forscherteams vor viele Herausforderungen, die sich dank modernster Technik jedoch bewältigen lassen.

20 Kilometer vom Paranal-Observatorium entfernt ist, wo sich das VLT befindet. Damit lassen sich einige Einrichtungen gemeinsam nutzen.

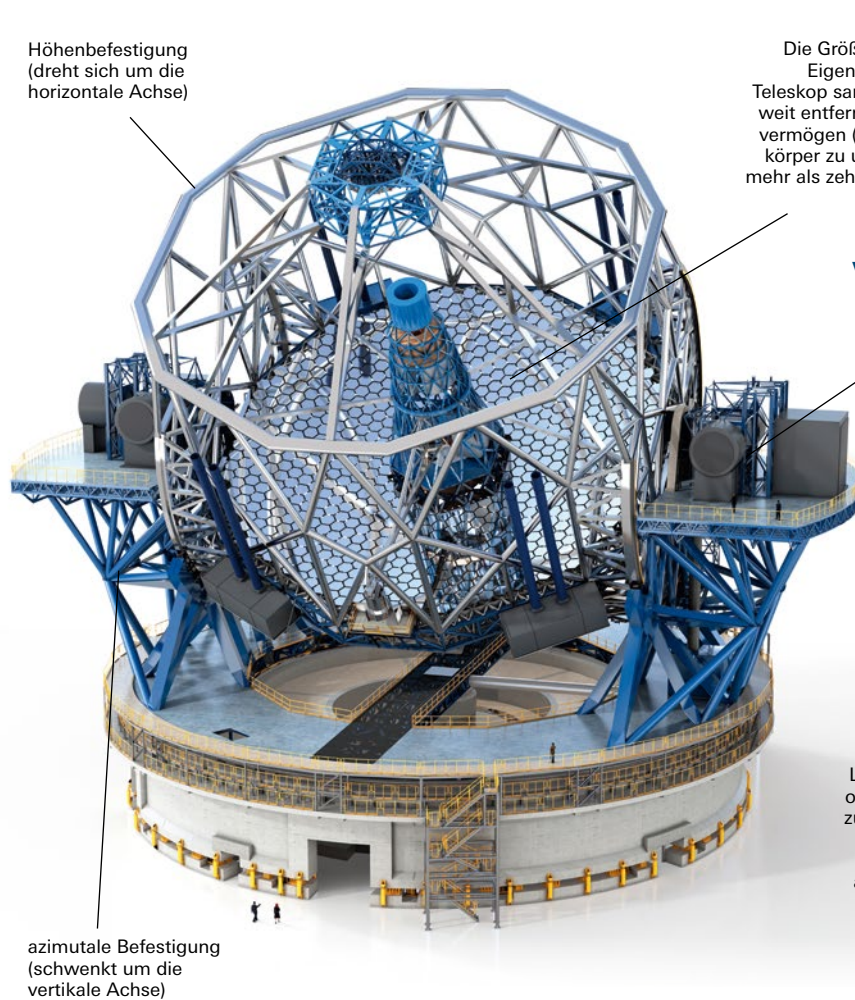
Die Kosten des Projekts werden auf 1,2 Milliarden Euro geschätzt, welche die ESO-Mitgliedsländer tragen. Im Gegensatz zu den US-Teleskopen begann der Bau des ELT erst 2014, als 90 Prozent der Finanzierung gesichert waren. Ein Jahr später gab es eine Zufahrtsstraße zum Cerro Armazones, und die Erdarbeiten konnten starten. Auf dem 2018 fertig gestellten Fundament soll später die Kuppel thronen, in der sich das Teleskop befinden wird – das eigentliche Herzstück des ELT. Seine optischen und mechanischen Systeme stellen eine der größten technischen Herausforderungen dar. Die europäische Industrie produziert die benötigten Komponenten, darunter Spiegel, Halterungen, Aktuatoren, Sensoren und vieles andere. Erste Kalibrierungen sind für 2025 geplant, so dass die Anlage voraussichtlich 2026 den wissenschaftlichen Betrieb aufnehmen kann.

Das ELT wird aus dem Teleskop, den Instrumenten und den dazugehörigen Stützstrukturen bestehen. Es wird das sichtbare und infrarote Licht, das vom Himmel zu uns herunterscheint, mit Hilfe von sechs Spiegeln (dem Primär- und fünf Sekundärspiegeln) bündeln, um ein Bild zu erzeugen. Das Sichtfeld wird zehn Bogenminuten am Himmel entsprechen, zirka einem Drittel des Vollmonddurchmessers. Anschließend verarbeiten die Instrumente das erzeugte Bild.

Das Observatorium wird über acht verschiedene Messstationen verfügen, die jeweils unterschiedlichen Forschungsschwerpunkten dienen. Allerdings kann immer nur ein System aktiv sein. Das Teleskop und seine tragenden Strukturen werden während der gesamten Nutzungsdauer (typischerweise mehrere Jahrzehnte) gewartet, die Instrumente haben hingegen eine kürzere Lebensdauer in der Größenordnung von zehn Jahren. Das ist nicht zwingend ein Nachteil: Indem sie immer wieder neue Apparate anbringen müssen, verwenden die Forschungsteams stets die modernsten Technologien.

Funktionsweise eines 40-Meter-Teleskops

Das Hauptmerkmal des ELT wird der riesige Hauptspiegel mit einem Durchmesser von 39,3 Metern sein. Die Instrumente werden es ermöglichen, das Licht des Nachthimmels zu analysieren. Wegen seiner enormen Größe besteht die schwierigste Herausforderung darin, verschiedenen Störungen entgegenzuwirken, denen das Teleskop ausgesetzt sein wird. Die Grafik zeigt den inneren Aufbau – ohne die schützende Kuppel – des Observatoriums.



Primärspiegel

Die Größe des Hauptspiegels ist für wichtige technische Eigenschaften entscheidend: die Lichtmenge, die das Teleskop sammeln kann (um auch schwach leuchtende und weit entfernte Objekte zu beobachten) und das Auflösungsvermögen (um zwei nebeneinander erscheinende Himmelskörper zu unterscheiden). Für das ELT werden diese Werte mehr als zehn- beziehungsweise viermal höher sein als beim größten derzeit betriebenen optischen Teleskop.

wissenschaftliche Instrumentierung

Sobald das Licht eines Himmelskörpers eingefangen wurde, analysieren es verschiedene Instrumente, um mehr über dessen Eigenschaften herauszufinden. Die ersten Geräte, die installiert werden, sind eine Infrarotkamera, ein Spektrograf für den sichtbaren Bereich sowie ein Infrarotspektrograf.

Störungen

Durch seine Größe reagiert das ELT sehr empfindlich auf Störungen. Sie entstehen durch das Eigengewicht der Höhenmontierung, Temperaturschwankungen oder Wind. Ein automatisiertes System erkennt und korrigiert die unerwünschten Effekte in Echtzeit, indem es die Spiegel verschiebt und verformt.

adaptive Optik

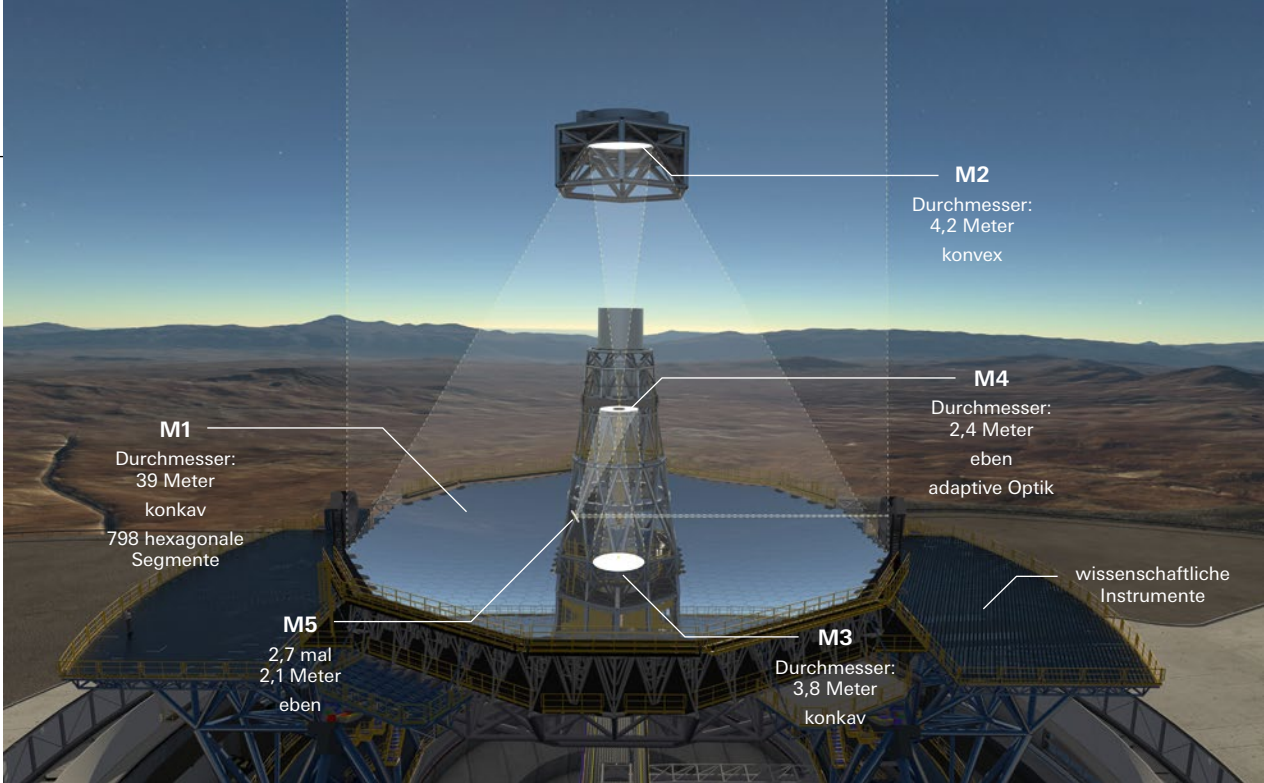
Luftströmungen brechen das Licht von Himmelsobjekten, bevor es das Teleskop erreicht. Um das zu vermeiden, verfügt das ELT über eine adaptive Optik: Ein Spiegel mit verformbarer Oberfläche korrigiert in Echtzeit Verzerrungen, die durch atmosphärische Turbulenzen verursacht werden.

Dank des riesigen Hauptspiegels wird das ELT in der Lage sein, Himmelskörper zu unterscheiden, die von uns aus gesehen nur fünf Millibogensekunden voneinander entfernt sind – das entspricht in etwa dem Winkel, unter dem uns eine Strecke von zehn Metern auf der Mondoberfläche erscheint. Damit wird es ein zirka 12000-mal höheres Auflösungsvermögen als das menschliche Auge besitzen, das Hubble-Weltraumteleskop um den Faktor 16 und das Großteleskop auf den Kanarischen Inseln um den Faktor 4 übertreffen.

Was die Menge des gesammelten Lichts angeht, welche die Empfindlichkeit des Geräts bestimmt, wird das ELT eine Sammelfläche von 978 Quadratmetern haben, während das

TMT 655, das GMT 368, das GTC 74 und Hubble 4,5 Quadratmeter fassen.

Die Größe des Spiegels bringt aber auch Nachteile mit sich, was die Kosten sowie die technischen Schwierigkeiten angeht. Die größten derzeit betriebenen Teleskope lassen sich in zwei Gruppen einteilen: jene mit einem einzigen Spiegel, wie das VLT im Mount Paranal, und solche mit einem segmentierten Hauptspiegel, der sich aus Teilstücken zusammensetzt. Zur zweiten Kategorie gehören die Geräte des Keck-Observatoriums, das GTC und das künftige ELT. Ab einer bestimmten Größe ist es technisch unmöglich, einen Spiegel aus einem einzigen Guss zu produzieren. Daher fertigt man mehrere Segmente und setzt diese



M1
Durchmesser:
39 Meter
konkav
798 hexagonale
Segmente

M2
Durchmesser:
4,2 Meter
konvex

M4
Durchmesser:
2,4 Meter
eben
adaptive Optik

wissenschaftliche
Instrumente

M5
2,7 mal
2,1 Meter
eben

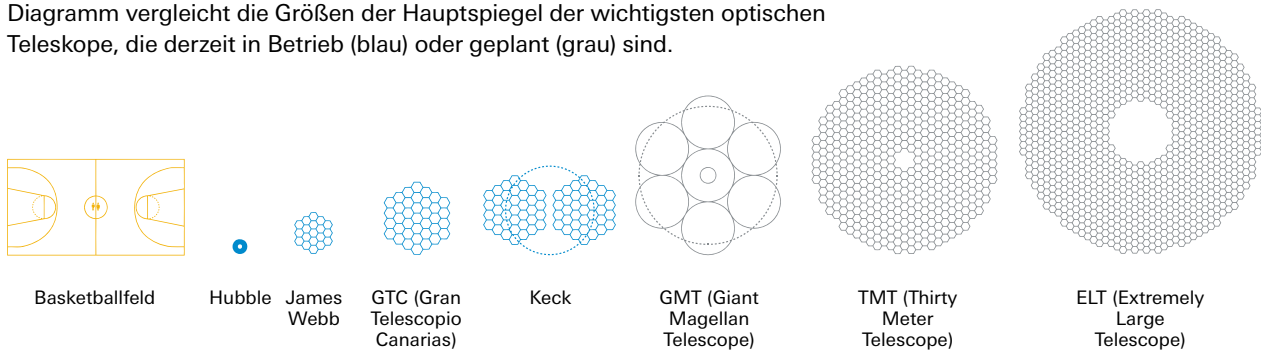
M3
Durchmesser:
3,8 Meter
konkav

Bildentstehung

Das ELT verfügt über sechs Spiegel, welche die Lichtstrahlen (gestrichelte Linien) fokussieren. Die Abbildung zeigt die ersten fünf Spiegel (M1 bis M5). Der sechste (M6, nicht abgebildet) befindet sich auf der wissenschaftlichen Plattform, wo er das Licht auf eines der dort installierten Instrumente lenkt. Das Teleskop wird zwei solcher Plattformen besitzen, mit je einem M6.

Eine neue Generation von Teleskopen

Das ELT wird das größte einer neuen Generation von Riesenteleskopen sein. Das Diagramm vergleicht die Größen der Hauptspiegel der wichtigsten optischen Teleskope, die derzeit in Betrieb (blau) oder geplant (grau) sind.



anschließend zusammen. Man muss sie jedoch so anordnen und montieren, dass sie sich wie ein einzelnes riesiges Objekt verhalten.

Das ELT wird daher aus 798 sechseckigen Spiegeln bestehen, die jeweils einen Durchmesser von etwa 1,4 Metern haben (gemessen zwischen zwei gegenüberliegenden Scheitelpunkten des Hexagons). Jeder Teil wird mit zwölf Sensoren und drei Aktuatoren sowie weiteren Mechanismen ausgestattet, um die Position exakt einstellen zu können. Das macht den Hauptspiegel zum komplexesten Bauteil der Sternwarte. Der maximale vertikale Versatz zwischen zwei benachbarten Segmenten darf bloß einige zehn Nanometer betragen, zudem dürfen die Oberflächen

Unebenheiten von höchstens 20 Nanometern aufweisen. Das erfordert einen extrem langen und teuren Polierprozess, der etwa sechs Jahre dauert. Für die übrigen Spiegel, die nicht zum Hauptspiegel gehören, gelten vergleichbare Anforderungen. Ihre Herstellung gestaltet sich daher ebenfalls schwierig, selbst wenn sie aus einem Stück sind.

Die größte technische Herausforderung wird allerdings darin bestehen, die sechs Spiegel nach der Montage in der richtigen Form und Position zu halten. Das muss man bei allen Teleskopen beachten, aber für Riesenteleskope ist die Aufgabe besonders schwer. Denn einerseits gibt es externe Störungen durch Schwerkraft, Wind oder Temperaturänderungen, andererseits erschweren interne Faktoren wie

Forschungsziele des ELT

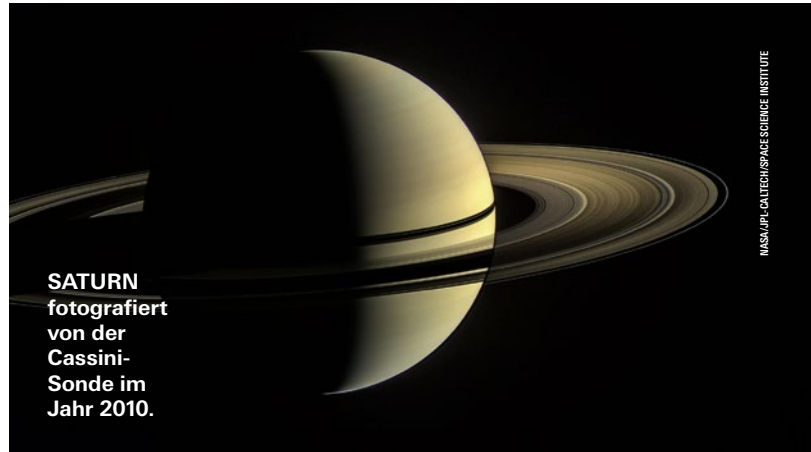
Das ELT wird mit großer Präzision alle Arten von Himmelskörpern untersuchen – sowohl nahe gelegene Planeten, Exoplaneten und protoplanetare Scheiben als auch weit entfernte Galaxien und Schwarze Löcher sowie die ersten Sterne unseres Universums.

Sonnensystem

Angesichts der vielen Weltraummissionen könnte man annehmen, ein Teleskop auf der Erde habe wenig Neues beizutragen. Durch die Fülle und Vielfalt der Himmelskörper, die sich im Lauf der Zeit verändern und manchmal in den abgelegensten Ecken des Universums liegen, gibt es aber noch vieles zu entdecken.

Asteroiden, Kometen, transneptunische Objekte und Co. können wertvolle Informationen über die Vergangenheit unseres Sonnensystems liefern. Das ELT wird sie live verfolgen und untersuchen – darunter die Methanwolken und Ozeane des Titan (ein Saturnmond), die vulkanische Aktivität von Io (ein Jupitermond) sowie die Geysire von Europa (Jupiter) und Enceladus (Saturn), die insbesondere für die Astrobiologie interessant sind.

Da vor 2030 keine Raumfahrtmissionen zu Uranus oder Neptun geplant sind, wird das ELT das Wetter, das Klima, die Winde und die Atmosphäre der fernen Welten untersuchen.

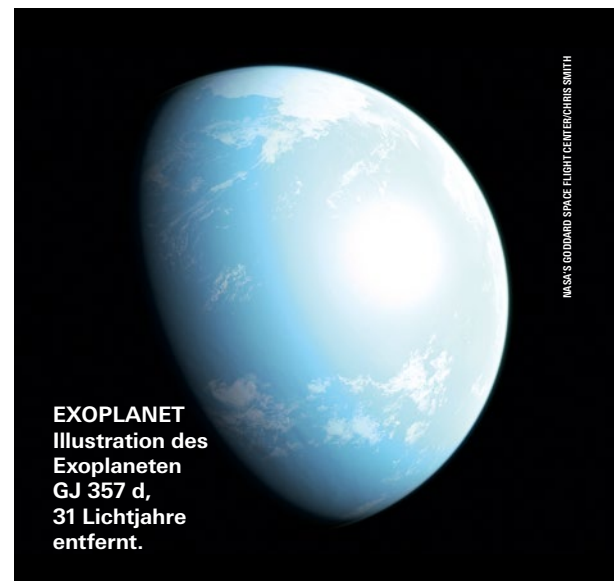


Exoplaneten

Seit der ersten Entdeckung von Exoplaneten im Jahr 1995 haben Astronomen und Astronominnen inzwischen mehr als 4000 Planeten katalogisiert, die andere Sterne umkreisen. Die Objekte erwiesen sich als erstaunlich vielfältig: Anhand ihrer Umlaufbahnen, Massen und Größen lässt sich ableiten, ob es sich um felsige, gasförmige oder gefrorene Himmelskörper handelt. Allerdings ist bloß wenig über ihre physikalischen Eigenschaften bekannt. Nur bei großen Exoplaneten konnten Forscherteams bestimmte chemische Verbindungen oder Höhennebel nachweisen.

Daher sind viele Forscherinnen und Forscher gespannt auf die Ergebnisse des ELT, denn es wird wahrscheinlich in der Lage sein, die atmosphärischen Merkmale zahlreicher Exoplaneten preiszugeben. Das ehrgeizigste Ziel – und einer der Gründe, warum man das Teleskop baut – ist, erdähnliche Planeten zu charakterisieren, insbesondere solche, die sich in einer habitablen Zone befinden.

Dazu wird das ELT mit einem Instrument ausgestattet, das den dazugehörigen Stern abdeckt, um das vom Exoplaneten reflektierte Licht besser erkennen zu können. Dadurch sollte es möglich sein, dessen Atmosphäre zu analysieren und die dort herrschenden Temperaturen zu bestimmen. Das Teleskop wird zudem nach Spuren von Wasserdampf, Sauerstoff und anderen Biomarkern wie Methan und Lachgas Ausschau halten. Die Suche nach »Lebenszeichen« ist eines der Hauptziele des ELT.



Planetensysteme

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt des ELT ist die Entstehung von Planetensystemen. Das Alma-Observatorium in der Atacama-Wüste untersucht bereits die Struktur protoplanetarischer Scheiben um junge Sterne. Durch die hohe spektrale und räumliche Auflösung wird das Teleskop in der Lage sein herauszufinden, wie sich Materie in dieser Umgebung zu Planeten formt, und die Verteilung von Gas und Staub zu bestimmen.



Galaxien und Schwarze Löcher

Ein viertes Ziel des ELT ist, die Geheimnisse der Galaxienentstehung und -entwicklung zu lüften. Die hohe Auflösung wird es erlauben, das Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße und diejenigen anderer naher Galaxien zu untersuchen. Das Teleskop wird die Bewegungen der Sterne im galaktischen Zentrum analysieren, um zu verstehen, wie Schwarze Löcher entstehen und wie sie die Galaxien beeinflussen.

Zudem wird sich das ELT auch den äußersten galaktischen Bereichen widmen. Es wird in der Lage sein, auf tausende Sterne in Kugelsternhaufen zu fokussieren, die wie Satelliten um große Galaxien kreisen. Vor allem interessiert sind die Forscherteams an den Strukturen im Virgo- und im Fornax-Haufen, die 54 beziehungsweise 62 Millionen Lichtjahre von uns entfernt sind.

Das ferne Universum

Mit Hilfe hochauflösender Spektroskopie wird das ELT das Licht weit entfernter Supernovae analysieren, die sich ereigneten, als das Universum zwischen 1 und 6 Milliarden Jahre jung war (das aktuelle Alter wird auf etwa 13,8 Milliarden Jahre geschätzt). Das Teleskop soll Informationen über die Galaxien dieser frühen Epoche sammeln, ihre chemische Entwicklung und die Sternentstehungsmechanismen untersuchen.

Das ELT wird sogar noch weiter in die Vergangenheit blicken können. Forscherinnen und Forscher hoffen, dort weit entfernte Objekte zu beobachten, als das Universum zwischen 200 und 500 Millionen Jahren alt war. Damals sandten die ersten Sterne Photonen aus, Wasserstoff wurde ionisiert, und es erschienen erstmals Protogalaxien. Die heute verfügbaren Teleskope können lediglich die hellsten Galaxien aus jenen Zeiten erkennen.

Beschleunigung der kosmischen Expansion

Seit 25 Jahren wissen Astrophysiker und Astrophysikerinnen, dass sich das Universum nicht nur ausdehnt, sondern das immer schneller tut. Zu diesem unerwarteten Ergebnis kamen Forschergruppen, als sie einen bestimmten Supernova-Typ beobachteten, dessen Leuchtkraft konstant bleibt, wodurch sich seine Entfernung direkt über die Helligkeit bestimmen lässt. Die Entdeckung der beschleunigten Expansion brachte Saul Perlmutter, Adam Riess und Brian Schmidt 2011 den Nobelpreis ein.

Die detaillierte Untersuchung des Phänomens ist eines der Hauptziele der modernen Kosmologie. Das ELT wird daher die Fluchtgeschwindigkeiten vieler Galaxien mit großer Präzision messen. Indem man die Daten aus verschiedenen Epochen des Universums vergleicht, wird es hoffentlich gelingen, die Beschleunigung der kosmischen Expansion genauer zu bemessen.

Grundlagenphysik

Das ELT soll dabei helfen, einige offene Fragen der Grundlagenphysik zu beantworten: etwa ob die Stärke der elektromagnetischen Kraft zwischen den Elementarteilchen oder das Verhältnis zwischen den Massen des Protons und des Elektrons seit der Geburt des Universums gleich geblieben sind. Indem man Strahlung weit entfernter Quasare untersucht, lässt sich die Feinstrukturkonstante bis zur zehnmillionsten Nachkommastelle genau bestimmen. So könnten Forscherteams herausfinden, ob der Wert von der Entfernung zur Quelle – und damit vom Alter des Alls – abhängt.



GALAXIEN Die 300 Millionen Lichtjahre entfernte Galaxie UGC1810, fotografiert vom Hubble-Weltraumteleskop.

NASA, ESA AND THE HUBBLE HERITAGE TEAM (STSC/ESA)
ESA/HUBBLE ORIGINALS DIRECT/07A/CC BY 4.0
CREATIVE COMMONS BY/NC/ND/3.0



GALAKTISCHER HAUFEN CL J10001, der am weitesten entfernte bekannte Galaxienhaufen. Wegen seiner Distanz reicht das Bild tief in die Vergangenheit, als das Universum 2,7 Milliarden Jahre alt war.

NONTECH: NASA/ESA/COSMOS/PIRELLA GÖTTSCHEW ET AL.
INFRA-01/ESO/TRANSIT/PADOV: ESO/MAGUI/IRADIANA



BLICK IN DIE VERGANGENHEIT Einige der am entlegensten und ältesten bekannten Galaxien, fotografiert vom Hubble-Weltraumteleskop.

NASA, ESA AND THE JUST FRONTIER FIELDS TEAM (STSC)
ESA/HUBBLE ORIGINALS DIRECT/12A/CC BY 4.0
CREATIVE COMMONS BY/NC/ND/3.0



QUASAR 3C273 Sein Licht braucht 2,5 Milliarden Jahre, um uns zu erreichen.

ESA/HUBBLE & NASA/ESA/HUBBLE ORIGINALS/PROT/13/6A/0/CC BY 4.0 (CREATIVE COMMONS BY/NC/ND/3.0)

thermische Unterschiede zwischen verschiedenen Bauteilen oder Vibrationen den Betrieb. Ein Teleskop steht nämlich niemals still. Ähnlich wie eine Kanone zielt es auf ein Objekt am Himmel: Die »Azimut-Montierung« dreht sich um die vertikale, die »Höhen-Montierung« um die horizontale Achse. Die Justierung ist in der Regel unproblematisch und innerhalb weniger Minuten erledigt. Sobald das Ziel jedoch anvisiert ist, muss man die Erdrotation während der gesamten Beobachtungszeit kompensieren, typischerweise in der Größenordnung von Minuten oder Stunden.

Doch die Bewegung bringt unerwünschte Effekte mit sich: Die Struktur verformt sich durch ihr Eigengewicht. Wie stark, hängt von ihrer Ausrichtung bezüglich der Vertikalen ab. Das gilt insbesondere für die 2000 Tonnen schwere Höhenmontierung, deren Position sich durch die Arbeit des Teleskops deutlich verändert. Dadurch verschieben sich die Spiegel aus ihrer ursprünglichen Lage, zudem verformen sie sich ebenfalls durch ihr Gewicht. Unkompensiert würde all das zu Bildverzerrungen führen.

Unerwünschte Effekte

Hinzu kommen Temperaturschwankungen von außen sowie zwischen verschiedenen Teilen des Teleskops, wodurch sich die Materialien ausdehnen oder zusammenziehen, was zu Ausrichtungsfehlern und verschlechterter Bildqualität führt. Außerdem ist Wind bei den meisten Observatorien problematisch, da an Standorten mit hervorragender atmosphärischer Qualität häufig starke Luftströmungen herrschen. Schließlich entstehen noch Störungen durch den Betrieb. Viele Instrumente wie Wasserkühler oder Ölpumpen in hydrostatischen Lagern erzeugen hochfrequente Schwingungen, die ebenso die Spiegel erfassen.

Glücklicherweise lassen sich – abgesehen von internen Vibrationen – alle Effekte auf ein akzeptables Maß reduzieren. Das Teleskop wird mit Aktuatoren ausgestattet, die

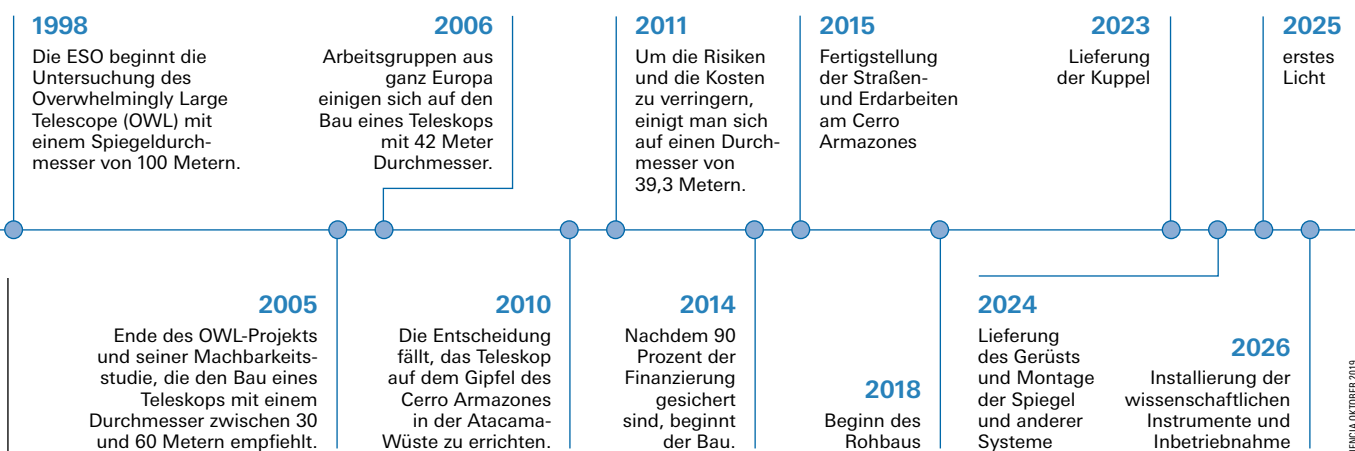
sowohl die Form als auch die Position der Spiegel verändern können. Mehrere Kameras, die bestimmte Referenzobjekte am Himmel anvisieren, steuern die Aktuatoren und gleichen Verformungen in Echtzeit aus. Die Schwingungen lassen sich damit aber nicht kompensieren, ihre Bewegung ist zu schnell. Deshalb muss man versuchen, diese Störung möglichst klein zu halten, etwa indem man Antivibrationssysteme einbaut.

Auch die Erdatmosphäre kann für Probleme sorgen. Turbulenzen und ungleichmäßige Temperaturverteilungen können den Brechungsindex lokal verändern, was die Lichtstrahlen weit entfernter Objekte ablenkt und das entstehende Bild verzerrt. Das ist einer der Nachteile gegenüber Weltraumobservatorien wie Hubble.

Glücklicherweise lässt sich der störende atmosphärische Effekt ausgleichen, zumindest in Bezug auf das Auflösungsvermögen. Das ermöglicht eine so genannte adaptive Optik: Spiegel mit verformbaren Oberflächen wirken den verursachten Verzerrungen entgegen. Obwohl die Technik schon lange existiert, kann man sie nicht in einen 39,3 Meter großen Spiegel einbauen. Deshalb wird nur der vierte, 2,4 Meter lange und zwei Millimeter dicke Spiegel des ELT über diese Technologie verfügen. 5300 Aktuatoren machen ihn zu einem der wichtigsten und empfindlichsten Elemente des ELT.

Die Ursprünge der adaptiven Optik reichen bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts zurück, doch sie fand erst in den 1990er Jahren mit zunehmender Rechenleistung ihren Weg in die Astronomie. Verschiedene Observatorien haben die Technologien weiterentwickelt. Zum Beispiel ist eines der 8,2-Meter-Teleskope, aus denen das VLT besteht, mit einem eigens dafür entwickelten deformierbaren Spiegel ausgestattet. Anfangs ließen sich mit der Technik jedoch nur manche Himmelsregionen untersuchen. Sie mussten einen Stern enthalten, der sehr hell ist, so dass er als Referenz

Chronologie des ELT



KÜNSTLICHE STERNE

Moderne Teleskope korrigieren durch atmosphärische Turbulenzen verursachte Bildverzerrungen in Echtzeit. Dazu fokussieren sie auf helle Referenzpunkte, und man verändert die Position der Spiegel, bis ein scharfes Bild entsteht. Das ELT wird über acht Laser verfügen, um ebenso viele künstliche Leitsterne zu erzeugen.



ESO/L. CALZADA (WWW.ESO.ORG/PUBLIC/GERMANY/IMAGES/ESOT/1601/CC BY 4.0) (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)

renzpunkt für die Verzerrung durch die Atmosphäre dienen konnte. Adaptive optische Systeme nehmen permanent Bilder der Objekte auf, analysieren sie und senden anschließend Befehle an die Aktuatoren, um die Spiegel so zu positionieren, dass sich die Störungen aufheben. Die Referenzsterne müssen dafür hell genug sein, was in den meisten Teilen des Himmels leider nicht der Fall ist. Die Einschränkung ist dank so genannter Laserleitsterne inzwischen obsolet. Diese regen Natriumatome in der Mesosphäre in 80 Kilometer Höhe an und erzeugen dort helle Lichtpunkte. Das ELT wird über acht Laser verfügen, die ebenso viele Leitsterne bilden können.

Wie bei allen Großprojekten traten bereits einige unerwartete Probleme auf, dennoch verläuft der Bau des ELT planmäßig. Was wird das größte Auge der Welt nach seiner Fertigstellung für uns bereithalten? Die Liste der Entdeckungen wird auch davon abhängen, in welcher Reihenfolge die Instrumente an der Sternwarte installiert werden. In jedem Fall wird der kathedralenhohe Bau unser Verständnis des Universums beträchtlich erweitern – so wie es bisher bei jedem technologischen Meilenstein seit Galileo Galilei der Fall war. ◀

QUELLEN

ESO: The science case for the ESO: European Extremely Large Telescope: The next step in mankind's quest for the universe. www.eso.org/public/products/books/book_0003, 2010

ESO: The E-ELT construction proposal. www.eso.org/public/products/books/book_0046, 2011

Ramsay, S. et al.: The ESO Extremely Large Telescope instrumentation programme. *Advances in Optical Astronomical Instrumentation 2019, 2020*

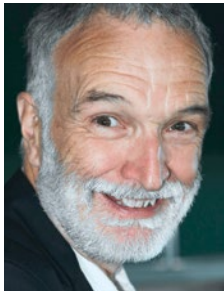
Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/sterne-und-supernovae



NASA/JPL/CALTECH/B. WILLIAMS (NCSU)

SCHLICHTING! WENN PAPIER ZUM SPIEGEL WIRD



Nicht nur glatt polierte Oberflächen spiegeln das Licht. Auch raue Gegenstände, die es normalerweise diffus in alle Richtungen streuen, können es geordnet reflektieren.

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/1886776

Mein Spiegelbild, das aus jeder hellgeschliffenen Fläche mir entgegentritt

E. T. A. Hoffmann (1776–1822)

▶ Spiegelbilder kennen wir nicht nur aus dem Badezimmer, sondern von vielen glatten Gegenständen: von blank polierten Autokarosserien über Fensterfronten bis hin zu Fliesenböden. Die Umgebung ist voll von Reflexionen unterschiedlicher Herkunft, die ein Nebeneffekt der Oberflächenbeschaffenheit sind – oft gewollt, manchmal unerwünscht.

Alltagsobjekte erreichen dabei in den meisten Fällen nicht die Wiedergabetreue, die wir vom Badezimmer-Spiegel gewohnt sind. Vielmehr gibt es zwischen perfektem Pendant und strukturlosem Widerschein einen nahezu kontinuierlichen Übergang. Physikalisch werden die beiden Enden des Spektrums als spiegelnde beziehungsweise diffuse Reflexion bezeichnet.

Unter Ersterer versteht man den Idealfall, bei dem das Licht, das auf die Oberfläche trifft, nach dem bekannten Reflexionsgesetz geordnet abprallt: Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel. Auf diese Weise wird die gesamte visuelle Information sozusagen nur umgelenkt und bleibt erhalten, abgesehen lediglich von einer teilweisen Absorption im Material.

Wird das Reflexionsgesetz nicht erfüllt, wirft die Fläche dagegen das Licht unabhängig von der Einstrahlrichtung unter beliebigen Winkeln zurück. Dann spricht man von diffuser Reflexion oder auch von Streuung. Eine weiß getünchte raue Wand oder ein Blatt weißes Papier erfüllen die Voraussetzungen dafür relativ gut. Zwischen beiden Idealtypen der Reflexion gibt es allerdings eine

ganze Klasse interessanter und manchmal die physikalische Intuition herausfordernder Zwischenformen von Oberflächen. Sie reflektieren das auftreffende Licht teilweise spiegelnd, teilweise diffus.

Wer beispielsweise die vorliegende »Spektrum«-Ausgabe zur Hand nimmt, aus einer schattigen Position heraus sehr flach über das Cover schaut und dabei einen am besten von der Sonne angestrahlten Gegenstand anvisiert, stellt fest: Dieser erscheint auf dem Heft mehr oder weniger gut gespiegelt (siehe »Papierglanz«). Je besser das gelingt, desto weniger sieht man gleichzeitig vom aufgedruckten Motiv. Normalerweise ist die Wahrnehmung der Schrift und der Bilder kein Problem, da man bei der Lektüre relativ steil (also annähernd rechtwinklig) auf die Druckseiten blickt. Hält man sie stärker angewinkelt, kann das Licht heller Gegenstände allerdings das Leseerlebnis stören. Das gilt nicht nur für Hochglanz-

PAPIERGLANZ Die Frontseite von »Spektrum« 5.21 spiegelt unter großem Winkel einen im Sonnenlicht liegenden Garten.

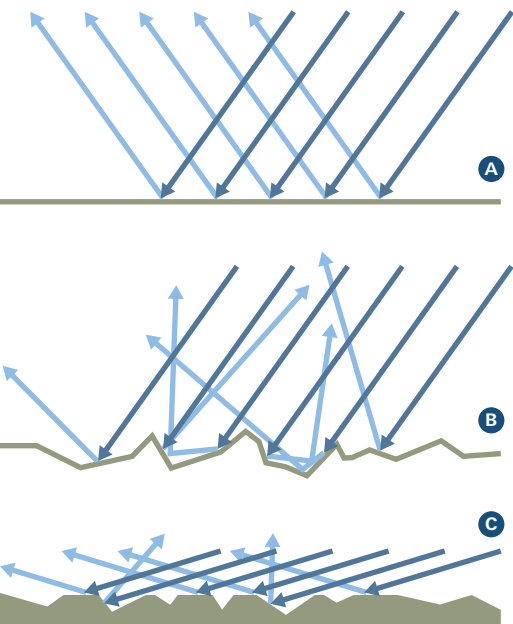


H. JOACHIM SCHLICHTING



FLIESENSPIEGEL Ein glatter Boden in einem Gebäude stellt die Außenwelt auf den Kopf.

H. JOACHIM SCHLICHTING



SPIEGELND UND DIFFUS Einen glatten Untergrund verlassen Strahlen unter dem gleichen Winkel **A**. Eine raue Oberfläche wirft sie hingegen in alle Richtungen **B**. Doch selbst hier wird die Reflexion bei flachem Einfallswinkel oftmals wieder teilweise spiegelnd **C**. Denn nun treffen viele Strahlen nur noch ähnlich hohe, geglättete Plateauspitzen.

H. JOACHIM SCHLICHTING

papier. Bei genügend starken Lichtquellen kann man bei streifendem Blick so manches weiße Blatt dazu bringen, Dinge zumindest schemenhaft spiegelnd zu reflektieren.

Die Oberflächen weiterer Alltagsgegenstände können auf gleiche Weise reflektieren. So wirken polierte Fliesenfußböden aus der Ferne fast wie perfekte Spiegel (siehe »Fliesenspiegel«). Wenn sie den umgebenden Raum reflektieren, entsteht dadurch aus der Entfernung zuweilen eine scheinbare Spiegelwelt unterhalb des Bodens mit dem irritierenden Eindruck eines Abgrunds. Beim normalen Gehen über so eine Fläche stört das indes nicht. Schaut man dabei vor sich nach unten, merkt man kaum noch etwas davon (siehe »Steinboden«).

Besonders deutlich ist dieses Vermögen zur Spiegelung mit Hilfe eines Laserpointers zu erkennen. Wenn man dessen Strahl flach auf ausgewählte raue Oberflächen auftreffen lässt, kann man etwaige Reflexe auf einer senkrecht dazu aufgestellten Projektionsfläche auffan-



STEINBODEN Blickt man senkrecht auf die Fliesen, ist vor allem deren eigene Struktur zu sehen.

H. JOACHIM SCHLICHTING

gen. Es ist erstaunlich, in welchem Maß sich selbst bei solchen Objekten, von denen man es gar nicht erwartet hätte, eine deutliche Richtungsabhängigkeit des abprallenden Lichts feststellen lässt.

Das Strahlenmodell der Optik macht die Zusammenhänge plausibel (siehe »Spiegelnd und diffus«). Eine ideal glatte Fläche reflektiert Licht unter einem gleich großen Winkel – parallele Strahlen bleiben parallel. Geht man davon aus, dass eine raue Oberfläche im Unterschied dazu unregelmäßig strukturiert ist und aus Elementen mit verschiedenen Neigungen besteht, dann lässt sich die diffuse Reflexion auf die spiegelnde zurückführen. Die einfallenden Lichtstrahlen kommen aus derselben Richtung und werden auf Grund weitgehend zufällig geneigter Flächenstücke in diverse Richtungen reflektiert. Von der Parallelität des einfallenden Lichts bleibt nichts mehr übrig. Der diffuse Anteil ist umso stärker, je rauer der Untergrund ist.

Im Rahmen des Modells ist auch erklärbar, weshalb mit zunehmendem Einfallswinkel bis hin zu streifendem Licht die spiegelnde Reflexion zunimmt. Die Strahlen treffen dann nur noch die oberen Kanten der Flächenelemente. Diese sind meist durch das Herstellungsverfahren abgeplattet und liegen auf ähnlicher Höhe. Dadurch wirkt die Oberfläche stückweise eben, und es gelangen vor allem die spiegelnd reflektierten Lichtbündel ins betrachtende Auge. Wenn zudem die reflektierende Fläche selbst im Schatten liegt, minimiert das den Anteil des Lichts, das direkt von oben einfällt. Dann wird die im Diffusen sonst gut sichtbare Eigenfärbung des Objekts weitgehend unsichtbar (bei Papier etwa die Texte und Abbildungen) und von der streifenden Reflexion vollends überstrahlt.

ASTRONOMIE DIE SUCHE NACH FERNEN MONDEN

Das Rennen um die
Entdeckung eines ersten
Trabanten außerhalb
unseres Sonnensystems
nimmt Fahrt auf.



Rebecca Boyle ist Wissenschaftsjournalistin im US-amerikanischen Bundesstaat Colorado.

» [spektrum.de/artikel/1886764](https://www.spektrum.de/artikel/1886764)



WELTEN FÜR SICH Bisher sind tausende Planeten bekannt, die um andere Sterne kreisen (hier eine Illustration), doch wurden in deren Orbit noch keine Monde gefunden. Diese wären wissenschaftlich ebenfalls höchst interessant.

1655 richtete Christiaan Huygens ein selbst konstruiertes Teleskop auf den Saturn. Der holländische Astronom wollte seine Annahme überprüfen, der Planet sei von einem einzigen festen Ring umgeben, dessen Ausrichtung sich im Lauf der Jahre verändert. Dabei entdeckte Huygens den riesigen Mond Titan. Fortan war Saturn neben Erde und Jupiter der dritte Planet, von dem ein Trabant bekannt war. Heute wissen wir: Monde kommen in unserem Sonnensystem sogar noch weitaus häufiger vor als Planeten.

Aber gilt das gleichermaßen für den Rest des Weltalls? 2007 beobachtete ein Netzwerk von automatisierten Teleskopen einen etwa 433 Lichtjahre entfernten Stern im Sternbild Centaurus. Seine Helligkeit brach für 54 Tage merklich ein, anschließend nahm sie wieder zu. Die Ursache war ein riesiger, von 37 Ringen umgebener Gasplanet. Und wie Saturn hat auch diese J1407b genannte Welt eine Lücke in ihrem Ringsystem. Darin könnte sich ein Mond bewegen, der ungefähr die Masse der Erde hat.

Ob das wirklich so ist, ist unklar. Wenn nicht dort, müsste es jedenfalls im Orbit anderer Exoplaneten Monde geben. Seit den ersten Entdeckungen in den 1990er Jahren haben Astronominen und Astronomen inzwischen mehr als 4000 Planeten um ferne Sterne aufgespürt, insbesondere dank des 2009 gestarteten Kepler-Weltraumteleskops, das bis 2018 in Betrieb war. Exoplaneten scheint es überall und in fast jeder erdenklichen Größe zu geben.

Die Spekulationen über mögliche Trabanten begannen bereits in den frühen 2000er Jahren. Mittlerweile gibt es mehrere Kandidaten, aber noch keinen Beleg. Fachleute versprechen sich von entdeckten Exomonden nicht weniger als eine Neujustierung unserer kosmischen Perspektive. Von Monden in anderen Sternsystemen könnten wir in Erfahrung bringen, wie groß solche Himmelskörper in der Regel sind und wie sie sich gebildet haben. Daraus ließen sich dann Rückschlüsse ziehen, ob das Sonnensystem eher gewöhnlich oder ein Exot ist – und welche Rolle der Mond während der irdischen Entwicklung gespielt hat.

Bis heute ist unser Heimatplanet beispielsweise der einzige bekannte mit Plattentektonik. Außerdem besitzt die Erde eine Atmosphäre, die dick genug ist, um Wasser flüssig zu halten, verbunden mit einem milden, über Äonen stabilen Klima. All diese Bedingungen waren bei der Evolution des Lebens wichtig und lassen sich zumindest teilweise auf den Einfluss unseres Trabanten zurückführen.

Er betrat schon in den Kindertagen des Sonnensystems die Bildfläche, vor 4,5 Milliarden Jahren. Damals kollidierte vermutlich ein Himmelskörper von der Größe des heutigen Mars mit dem Vorläufer der Erde. Der gewaltige Crash hinterließ an ihrer Stelle einen glühenden, länglichen Klumpen und schleuderte eine brodelnde Gesteinsschmelze ins All, aus der sich bald darauf der Mond formen sollte.

In den folgenden Milliarden Jahren kühlte unser Trabant ab und entfernte sich dabei allmählich von der Erde. Diese wiederum wurde immer runder, je weiter sich der Mond zurückzog. Ihre Kruste spannte sich unter den resultierenden Gezeitenkräften – möglicherweise der Beginn der Plattentektonik. Das Abwandern des Mondes verlangsamte zudem die Erddrehung, wodurch sich unser Tag um fast zwei Millisekunden pro Jahrhundert verlängert.

Große Monde mit Wasser auf ihren Oberflächen könnten selbst lebensfreundlich sein

Der Einfluss des Mondes hängt mit seiner Schwere zusammen: Er besitzt 1,2 Prozent der Masse der Erde. Trabanten anderer Planeten sind relativ zu ihrem Mutterkörper deutlich leichter. Titan zum Beispiel hat, obwohl er fast 50 Prozent größer ist als der Erdmond, nur 0,02 Prozent von Saturns Masse. Die Anziehungskraft des Mondes hält die Erdachse in einer konstanten Neigung von 23,5 Grad zur Sonne. Die Konfiguration bewahrt unser Klima vor allzu raschen Veränderungen. Ganz anders etwa sieht es auf dem Mars aus, der nur zwei kleine Monde hat. Seine Achse schwankt alle paar Millionen Jahre zwischen null und 60 Grad, was zu dramatischen klimatischen Störungen führt.

Falls die irdische Vergangenheit ein Anhaltspunkt ist, sollten auch bei Exoplaneten Monde für stabilere Umweltbedingungen sorgen. Und selbst, wenn es auf den Planeten kein Leben gibt, sind womöglich die Exomonde ihrerseits geeignete Habitate. Unter dem gefrorenen Panzer von Eismonden wie Europa oder Enceladus vermuten Fachleute seit Langem günstige Voraussetzungen für einfache Lebewesen. Sogar bei Titan sind entsprechende Szenarien denkbar. Der Saturnmond ist mit Meeren aus Methan und Ethan bedeckt. Das ist auf den ersten Blick nicht mit Leben kompatibel, wie wir es von der Erde kennen. Aber der Mond hat eine dichte Atmosphäre, die Substanzen im flüssigen Aggregatzustand hält, und so besteht zumindest eine Chance für eine exotische Form von Biologie. Saturn dagegen wäre wegen seiner starken Schwerkraft und giftigen Wolken aus Ammoniak wohl kaum ein sicherer Hafen für Leben. Dasselbe gilt für Jupiters tödliche Strahlungsgürtel und Gasschichten, wohingegen seine Monde ruhiger sind.

»Aus unserem Sonnensystem wissen wir, dass Planeten vom Format des Jupiters große Monde besitzen, die potenziell Wasser auf der Oberfläche halten können«, bekräftigt Chris Fox von der Western University in Ontario. »Wenn

AUF EINEN BLICK UNAUFFÄLLIGE BEGLEITER

- 1** Im Sonnensystem sind Monde allgegenwärtig. Auch Planeten in der Umgebung anderer Sterne dürften Trabanten besitzen, nur ist noch kein Exemplar eindeutig identifiziert.
- 2** Unser Mond hat die Bedingungen auf der Erde vermutlich lebensfreundlicher gemacht. Entsprechend könnten Exomonde bessere Voraussetzungen für außerirdisches Leben schaffen – oder es gar beherbergen.
- 3** Fachleute hoffen, bald die ersten der verhältnismäßig kleinen Himmelskörper nachzuweisen. Voraussichtlich gelingt das jedoch nur mit der nächsten Generation leistungsfähiger Teleskope.



NASA

ERDMOND Unser Trabant, hier aus Sicht der internationalen Raumstation ISS, hat die Erde nachhaltig beeinflusst – und vielleicht sogar erst Leben ermöglicht.

solch ein Planet seinen Stern in der habitablen Zone umkreist, könnte es sogar Monde geben, die der Erde ähneln.« Falls Monde auch in anderen Sternsystemen weit häufiger sind als Planeten, sind sie womöglich der aussichtsreichste Ort für die Suche nach außerirdischen Organismen.

Lange bevor das Kepler-Teleskop seine ersten Aufnahmen gemacht hat, gingen Astronominnen und Astronomen davon aus, dass es überall im Kosmos Exomonde gibt. Schon 1999 schlugen Paola Sartoretti und Jean Schneider vom Pariser Observatorium vor, mit der so genannten Transitmethode nach Trabanten zu suchen. Himmelskörper verdunkeln ihren Stern ein wenig, wenn sie von der Erde aus gesehen daran vorüberziehen. Die Voraussetzung für solch einen Transit ist die Anordnung des Planetensystems in einer flachen Ebene, bei der wir von der Seite auf die Kante der Scheibe schauen.

Das Kepler-Teleskop hat die Methode ein Jahrzehnt lang genutzt, um Exoplaneten aufzuspüren. Sartoretti und Schneider vermuteten, man könne damit außerdem Monde nachweisen. Zumindest, wenn sie in großer Entfernung um ihren Planeten kreisen und sich zum Zeitpunkt des Transits gerade neben dem Planeten befinden. Der Stern würde dadurch während des Transits etwas dunkler erscheinen als erwartet.

Selbst wenn Exomonde enge Bahnen um ihren Planeten ziehen, könnte man die Trabanten wohl noch registrieren, erkannten Sartoretti und Schneider. Dazu müsste man

genau protokollieren, ob sich das periodische Transitmuster des Planeten im Lauf der Zeit verändert. Denn meist wiederholen sich die Verdunkelungen mit metronomähnlicher Präzision. Manchmal schwankt die Zeit zwischen zwei Transits etwas: Dann beginnen oder enden die Minifinsternisse ein wenig früher oder später als gedacht. Zu der so genannten Transit-Zeit-Variation kommt es normalerweise, wenn es mehrere Planeten im Orbit des Sterns gibt und diese mittels ihrer Schwerkraft aneinander zerren. Monde müssten einen prinzipiell ähnlichen Effekt hervorrufen.

Dazu muss man wissen, dass auch unser Mond nicht auf einer völlig kreisförmigen Bahn um die Erde wandert. Vielmehr umrunden beide Körper ihren gemeinsamen Schwerpunkt, das Baryzentrum. Es befindet sich in unserem Fall innerhalb der Erdkugel, aber nicht genau in deren Zentrum. Bei Exoplaneten und ihren Monden könnte das Schlingern ausgeprägt genug sein, um bei einer gezielten Suche aufzufallen.

2017 haben Alex Teachey vom Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics in Taiwan und David Kipping von der New Yorker Columbia University die Daten des Kepler-Teleskops nach Hinweisen auf Exomonde durchforstet. Sie analysierten dazu etwa 300 Planeten in der Hoffnung auf verdächtige Transitsignale. Am Ende stießen sie nur auf einen Kandidaten: Kepler-1625b.

Anschließend bewarben sich die beiden erfolgreich um Beobachtungszeit am Hubble-Weltraumteleskop. Ein Jahr lang analysierten sie die Messungen. Und tatsächlich begann der Transit von Kepler-1625b früher, als er sollte, was auf einen Mond hindeutete. In einem fünf Jahre umfassenden Datensatz verschob sich die Transitzeit außerdem um etwa 20 Minuten. »Damit ist klar, dass etwas den

Planeten herumschiebt«, sagt Kipping. »Wir denken, es handelt sich um einen Mond.«

Teachey und Kipping veröffentlichten ihre Arbeit im Oktober 2018. Demnach könnte der Exoplanet Kepler-1625b – der selbst deutlich größer als Jupiter ist – einen Mond vom Format des Neptuns haben. Eine Entdeckung beanspruchten die beiden Forscher jedoch nicht. »Ich glaube, einige Kollegen waren frustriert von der Art und Weise, wie wir unser Ergebnis präsentiert haben«, sagt Teachey. »Wir haben offenbar den Eindruck erweckt, einerseits auf die Anerkennung für eine Entdeckung aus zu sein, andererseits aber davor zurückschrecken, diese ernsthaft für uns zu beanspruchen. Ich verstehe, dass das frustrierend ist, schließlich fragen wir uns alle, ob da nun ein Mond ist. Es gibt einfach noch zu viele Unsicherheiten.« René Heller vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Göttingen hat kurz nach der Veröffentlichung einen Teil von Teachey's Ergebnissen reproduziert, fand aber insgesamt keine ausreichenden Beweise für einen Mond. Laura Kreidberg, die am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg die Atmosphäre von Exoplaneten untersucht, konnte einen wichtigen Teil der Resultate nicht bestätigen.

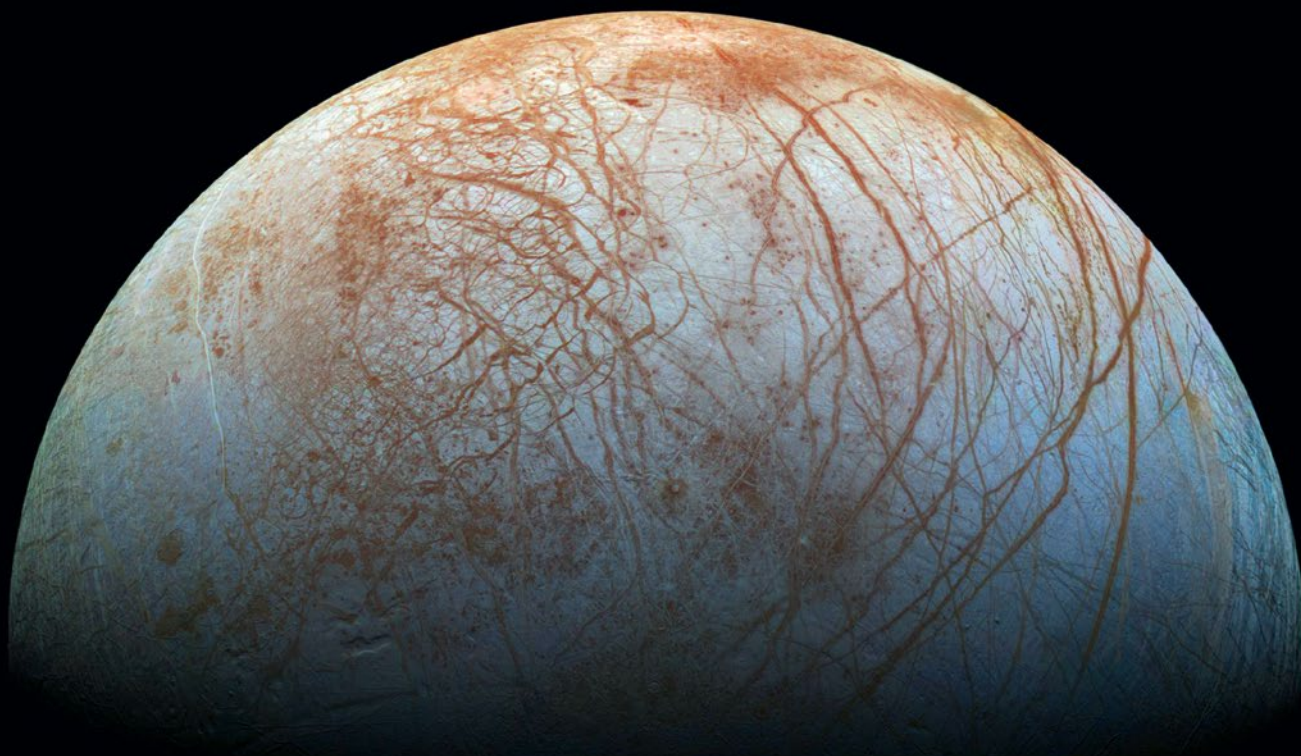
Unterdessen wuchs das Interesse an dem Thema. Schon bald durchsuchten weitere Teams die Kepler-Daten und

spürten von Monden ausgelösten Variationen der Transits nach. Andere wandten sich optischen Beobachtungssystemen wie dem Spectro-Polarimetric-High-contrast-Exoplanet-REsearch-Instrument (SPHERE) des Very Large Telescope zu. Cecilia Lazzoni von der Universität von Padua in Italien glaubt zum Beispiel, mit Hilfe von SPHERE-Daten einen riesigen Exomond gefunden zu haben. In einer in der Fachzeitschrift »Astronomy & Astrophysics« veröffentlichten Arbeit beschrieben sie und ihre Kollegen ihn als Begleiter eines sehr massearmen Braunen Zwergs. So nennen Astronomen ein schwach leuchtendes Objekt, das anders als ein Stern keinen Wasserstoff fusioniert, aber ein Vielfaches der Größe des Jupiters hat. Lazzonis Welt und ihr Begleitkörper entsprächen demnach eher zwei umeinander kreisenden Riesenplaneten als einer Welt mit Trabant. Sollten solche Paare häufiger vorkommen, wäre zu klären, wie man eigentlich definiert, was Planeten von Monden unterscheidet.

2019 analysierte Phil Sutton von der University of Lincoln in England den eingangs erwähnten Super-Saturn J1407b neu. Er wollte Beweise für Monde finden, die außerhalb des Rings liegen, wie es bei den meisten Saturnmonden der Fall ist. Also schaute er, ob die 37 Ringe von J1407b ähnlich wie bei dem Gasplaneten unseres Sonnensystems geformt sind. Sutton sah keine Hinweise auf Monde, mehr noch: Solche würden laut seiner Analyse die fragilen Ringe des Exoplaneten zerstören.

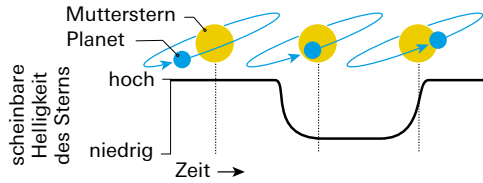
Im Sommer 2020 sah Chris Fox aus Ontario weitere Kepler-Daten durch. Zusammen mit seinem Kollegen Paul Weigert fand er in einer Auswahl von 13 mit dem Weltraumteleskop aufgespürten Planeten insgesamt acht mit Transit-

JUPITERMOND Europa verbirgt tief unter seiner Eishülle einen flüssigen Wasserozean. Möglicherweise bieten Monde um andere Planeten potenzielle Nischen für Leben.

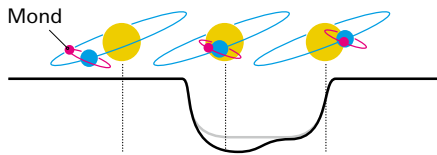


Die Transitmethode

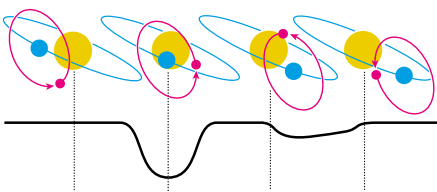
Zieht ein Planet vor seinem Mutterstern vorüber, fängt er einen Teil von dessen Licht ab. Auf die Weise wurden die meisten der bekannten Exoplaneten entdeckt.



Auf ähnliche Art wären auch Monde identifizierbar. Bewegt sich ein Himmelskörper auf einer engen Bahn um den Planeten, würde er das Signal leicht verstärken.



Bei einem größeren Abstand zwischen Mond und Planet könnte es sogar zu einem doppelten Transit kommen.

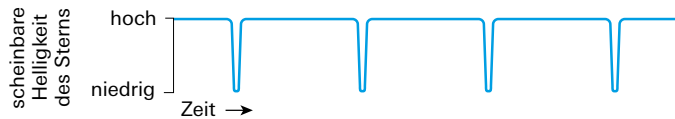


Wie man einen Exomond nachweist

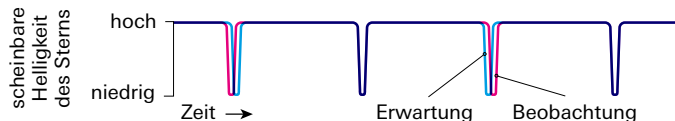
Es gibt zwei Strategien, um Exomonde zu finden: entweder mittels einer Verdunklung des Sterns, wenn ein Duo aus Mond und Planet vorüberzieht, oder über winzige Schwankungen in den Bahnbewegungen. Manche Forschungsteams meinen, ihnen sei auf die eine oder andere Weise bereits eine Entdeckung geglückt. Die Fachwelt ist allerdings noch skeptisch, denn die Messungen bewegen sich momentan an der Grenze des technisch Möglichen.

Transit-Zeit-Variation

Wenn ein Mond nicht das Licht des Sterns abfängt, könnten sich immer noch Unregelmäßigkeiten beim Transit von Planeten feststellen lassen. Normalerweise wiederholen sich die Mini-Finsternisse im strengen Gleichtakt.



Doch manchmal setzt ein Transit ein klein wenig früher ein als erwartet. Das kann auf Exomonde hinweisen, die ihren Planeten etwas um den gemeinsamen Schwerpunkt schlingern lassen. Das verschiebt den Zeitpunkt, an dem der Planet vor seinem Stern vorbeizieht.



JEN CHRISTIANSEV / SCIENTIFIC AMERICAN MÄRZ 2021; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Zeit-Variationen, die mit Exomonden erklärt werden könnten. Andere Ursachen sind allerdings ebenso denkbar, von veränderlicher Sternaktivität bis hin zu weiteren Planeten. »In vielen Fällen waren wir in der Lage, das Muster einem etwaigen Mond zuzuordnen, aber in allen Fällen ließ es sich genauso durch einen zweiten Planeten erklären«, resümiert Fox.

Widersprüchliche Analysen derselben Daten

Schließlich organisierte Kipping im November 2020 eine erste internationale Konferenz zu Exomonden, die virtuell abgehalten wurde und rund 80 Fachleute zusammenbrachte. Eine der Erkenntnisse: Die Entdeckung eines Exomonds lässt wohl auch deshalb noch auf sich warten, weil sich die Sache bislang an der Grenze des technisch Machbaren bewegt. Der winzige Helligkeitsunterschied bei einem Transit ist schon dann in vielen Fällen kaum nachweisbar, wenn er von einem Planeten herrührt. Die Messung des Transitzeitpunkts erfordert gleichfalls eine Präzision, die bisherige Instrumente nur gerade so eben liefern.

Das frustriert. Laura Kreidberg beispielsweise wurmt es, dass sie und Teachey bei der Analyse des Exomond-Kandidaten um Kepler-1625b nicht zur gleichen Antwort gelangt sind. Die beiden haben zwar ihre Analysen verglichen, konnten die Schlussfolgerungen aber einfach nicht in Einklang bringen. »Ich habe daraus eine Lehre gezogen: Wir stoßen wirklich an die Grenzen dessen, was das Hubble-Teleskop leisten kann«, sagt Kreidberg. »Es wurde entwickelt, um weit entfernte Galaxien zu beobachten, nicht vergleichsweise nahe Exoplaneten und ihre Monde.«

Andere Schwierigkeiten sind geometrischer Natur. Wegen der von Kepler und Newton formulierten grundlegenden Bewegungsgesetze sind die Bahnen von Monden immer dann stabil, wenn diese sich innerhalb eines bestimmten Abstands vom Planeten befinden, der so genannten Hill-Sphäre. Sonst läuft der Trabant Gefahr, von der Schwerkraft des Sterns aus seinem Orbit gekegelt zu werden. Das wird insbesondere bei einem geringen Abstand von Planeten und Zentralgestirn zum Problem. Bisher kreisen die meisten bekannten Exoplaneten jedoch sehr

eng um ihren Stern, oft näher als Merkur um die Sonne. Somit ist die Chance recht groß, dass sie ohne Begleiter unterwegs sind. »Die Planeten, die wir vor ihren Sternen vorüberziehen sehen, können wegen der ungünstigen Gravitationsverhältnisse meist wohl keine Monde an sich binden«, sagt Stephen Kane von der University of California in Riverside. Er veröffentlichte 2017 eine Arbeit, der zufolge auf engem Raum befindliche Planetensysteme wie das von TRAPPIST-1 mit seinen sieben erdähnlichen Planeten wahrscheinlich gar keine Trabanten beherbergen.

Planeten, die sich in größerer Distanz zu ihren Sternen befinden, wie Jupiter und Saturn, haben dagegen eher Monde, argumentiert Alice Quillen, eine Astronomin an der University of Rochester, die den Super-Saturn J1407b untersucht hat. Dafür spricht nicht nur der geringere Einfluss der Schwerkraft des Sterns weiter draußen. Planeten können an den Rändern eines Systems zudem eher verirrte Asteroiden und andere Himmelskörper einfangen, so wie es Neptun mutmaßlich mit seinem Mond Triton getan hat. Letzterer dürfte einst ein Zwergplanet wie Pluto gewesen sein, geriet dann aber irgendwann in den Einzugsbereich von Neptun.

Weit von ihrem Stern entfernte Exoplaneten sind allerdings schwierig aufzuspüren, auch weil sie sehr lang für einen Umlauf brauchen. Zum Vergleich: Jupiter benötigt dafür zwölf irdische Jahre. Es ist nötig, zwei oder mehr Transits beizuwohnen, um einen Planet sicher zu identifizieren. Obendrein lassen sich solche Signale nicht immer von denen aus Doppelsternsystemen unterscheiden, wo sich beide Partner in entsprechenden Abständen umkreisen und gegenseitig verdunkeln.



ISTOCK / SDECRET

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Zusätzlich erschweren die Sterne selbst die Arbeit. Unsere Sonne ist eine vergleichsweise ruhige Feuerkugel; andere hingegen neigen stärker zu Strahlungsausbrüchen, schleudern immer wieder Unmengen Materie ins All und bilden auf ihrer Oberfläche viele Flecken. »Je genauer man die Helligkeit eines Sterns vermessen kann, desto mehr sieht man von der stellaren Aktivität«, sagt Kane. Das Ganze gleicht dann einem Rauschen in den Daten, das mitunter größer ist als das Signal von etwaigen Monden. »Das schafft eine Empfindlichkeitsgrenze, von der nicht klar ist, ob sie sich überwinden lässt.«

Umso kreativer werden die Ideen für mögliche mathematische und instrumentelle Auswege. Apurva Oza von der Universität Bern beispielsweise hält Ausschau nach vulkanisch aktiven Monden, die sich leichter verraten könnten. Als Vorbild dient hier der Jupitertrabant Io; er ist einer der

vier Monde, die bereits Galileo Galilei entdeckt hat. Hobbyastronomen brauchen dafür nur ein gutes Fernglas. Für Profis mit der richtigen Ausrüstung ist Io eines der auffälligsten Objekte am Himmel. Die Schloten an seiner Oberfläche speien Natrium und Kalium ins All. Diese und andere Stoffe können sich bis in eine Distanz ausbreiten, die dem 500-Fachen des Jupiterradius entspricht.

Solch eine Signatur wäre auch aus einiger Entfernung aufspürbar, sogar unabhängig von einem zufällig passenden Transit. Denn dank an Teleskopen befestigten Spektrografen lassen sich Gase im Umfeld von Sternen nachweisen. So haben Messungen immer wieder Natrium, Kalium und andere verdächtige Elemente enthüllt, ohne dass es eine einfache Erklärung dafür gäbe. »Möglicherweise ist schlicht ein Mond dafür verantwortlich«, spekuliert Oza.

Bis leistungsfähigere Observatorien verfügbar sind, bleibt nur geschicktere Analyse vorhandener Daten

Für die Zukunft des Felds hoffen Astronominnen und Astronomen zunächst auf das James-Webb-Weltraumteleskop (JWST), das nach mehreren Verzögerungen Ende 2021 starten soll. Momentan sind keine passenden Instrumente in Betrieb. Somit bleibt vorerst nur ein Herumdoktern an der Datenverarbeitung. »Ein Teil unserer Arbeit besteht darin, bessere Methoden zu finden«, sagt Teachey. Entsprechend gleiche eine Entdeckung weniger einem klar definierbaren Heureka-Moment, wie ihn Laien oft vor Augen haben. Vielmehr gehe es darum, geduldig einen Test nach dem anderen durchzuführen. Am Ende komme dann vielleicht etwas Interessantes heraus, was jedoch weiter überprüft werden müsse.

Mittelfristig könnten auch Observatorien am Erdboden neue Daten für die Suche nach Exomonden liefern, etwa das Extremely Large Telescope, das derzeit in der chilenischen Atacama-Wüste gebaut wird. Das europäische Weltraumteleskop PLANetary Transits and Oscillations of Stars (PLATO) könnte ebenfalls bei der Suche helfen und soll 2026 starten. Für die 2030er Jahre sind dann viel versprechende Projekte wie der James-Webb-Nachfolger LUVOIR (Large UV/Optical/IR Surveyor) geplant.

»Im Augenblick bleibt uns bloß Hubble, bis endlich James Webb läuft«, sagt Kipping. Das gibt immerhin Zeit, um die Suchstrategien zu verfeinern. Laura Kreidberg ist zuversichtlich, mit JWST Signale von Exomonden zu empfangen, räumt aber ein, dass eine eindeutige Entdeckung noch eine Weile auf sich warten lassen könnte. »Man muss schon optimistisch veranlagt sein, um Exoplaneten zu erforschen.« Das gilt umso mehr für deren Monde. ◀

QUELLEN

Kipping, D.M., Teachey, A.: Evidence for a large exomoon orbiting Kepler-1625b. *Science Advances* 10.1126/sciadv.aav1784, 2018

Lazzoni, C. et al.: The search for disks or planetary objects around directly imaged companions: A candidate around DH Tauri B*. *Astronomy & Astrophysics* 641, 2020

Sutton, P.J.: Mean motion resonances with nearby moons: An unlikely origin for the gaps observed in the ring around the exoplanet J1407b. *MNRAS* 486, 2019



FREISTETTERS FORMELWELT DAS BEINAHE-RAD

Ein Gleichdick ist eine erstaunliche geometrische Form: Man kann mit ihr quadratische Löcher bohren, gleichzeitig rollt sie aber wie ein Rad – zumindest annähernd.

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

» spektrum.de/artikel/1886779

Wie der Name vermuten lässt, handelt es sich bei einem Gleichdick um eine Figur, die überall gleich dick ist. Dennoch sind ein bisschen mehr Details nötig, um das Konzept richtig zu verstehen: Mit »gleich dick« ist die Breite des Objekts gemeint, die durch zwei parallele Geraden definiert wird. Eine berührt die Figur, um die es geht, an einem Punkt, die zweite am jeweils gegenüberliegenden. Der Abstand zwischen den Geraden entspricht der Breite. Wenn diese immer denselben Wert hat, egal an welcher Stelle der Figur man die Parallelen anbringt, hat man ein Gleichdick vor sich.

Für solche Objekte gilt der Satz von Barbier:

$$U = b \cdot \pi$$

Der französische Mathematiker Joseph-Émile Barbier hat die Formel im 19. Jahrhundert niedergeschrieben. Sie besagt, dass der Umfang U eines Gleichdicks gleich seiner Breite b multipliziert mit der Zahl Pi ist. Damit entspricht der Umfang also dem eines Kreises mit Durchmesser b .

Das einfachste Beispiel für ein Gleichdick ist ein Reuleaux-Dreieck, das an ein Plektrum oder den Kolben eines Wankelmotors erinnert. Es lässt sich konstruieren, indem man ein gleichseitiges Dreieck zeichnet und dann von jedem Eckpunkt aus einen Kreisbogen zieht, der durch die beiden übrigen Ecken verläuft. Die drei Bögen bilden die erstaunliche Figur, mit der man viel Interessantes machen kann. Lässt man etwa ein solches Gleichdick rotieren, wird es stets alle vier Seiten eines Quadrats berühren und sich niemals außerhalb dessen befinden.

Das hat die Erfindung eines Bohrkopfs in Form eines Reuleaux-Dreiecks inspiriert, das ein fast quadratisches Loch bohren kann. Das Ergebnis ist jedoch nicht perfekt, weil die Kreisbögen in einem Winkel von 120 Grad

aufeinandertreffen und darum die rechtwinkligen Ecken nicht vollständig ausfüllen können.

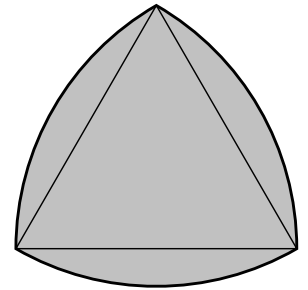
Für die meisten Anwendungen reicht diese Annäherung allerdings aus, weswegen es inzwischen Staubsaugerroboter in Form eines Gleichdicks gibt, damit sie möglichst weit in die Zimmerecken kommen.

Auch einige Bleistifte besitzen den Querschnitt eines Reuleaux-Dreiecks. Angeblich lassen sie sich besser greifen als runde oder sechseckige Modelle. Zudem rollen sie nicht so leicht vom Schreibtisch, da sich der Mittelpunkt der Form – und damit der Schwerpunkt des Stifts – bei einer Rollbewegung stärker auf und ab bewegt als etwa bei einem hexagonalen Querschnitt.

Das macht es wiederum schwer, ein Reuleaux-Dreieck als Ersatz für ein Rad zu verwenden. Es würde zwar rollen, aber die Fahrt wäre ziemlich holprig. Das hat den Sciencefiction-Autor Poul Anderson nicht daran gehindert, den Held seiner 1963 erschienenen Kurzgeschichte »Das dreieckige Rad« ein solches Gefährt erfinden zu lassen. Zweck war es, die religiösen Tabus einer fundamentalistischen Gesellschaft mitsamt Verbot von Rädern zu umgehen.

In der echten Welt hat es dagegen lange Zeit niemand für nötig befunden, Fahrräder mit derartigen eckigen Reifen zu entwickeln – bis 2009. Es sei anstrengend und unbequem zu fahren, berichtete der chinesische Erfinder, und eine Geschwindigkeit von mehr als sieben Kilometern pro Stunde sei nicht zu erreichen. Doch dafür eigne es sich gut als Trainingsgerät. Durchgesetzt hat es sich trotz aller mathematischen Finesse jedoch nicht.

Nützlicher erscheint hingegen das Gleichdick als Form für Münzen. Im Vergleich zu runden Geldstücken spart man ein wenig Material ein, während sie weiterhin gut durch Münzschlitze rollen. Es überrascht mich immer wieder, wie vielseitig die geometrischen Figuren mit dem seltsamen Namen einsetzbar sind.



INTEGRIERTE INFORMATIONSTHEORIE MATHEMATISIERUNG DES BEWUSSTSEINS

Ein Meilenstein in der Ergründung des menschlichen Geists oder Mathematik auf dem Holzweg? Die Meinungen über die Rolle der abstrakten Wissenschaft in der Bewusstseinsforschung gehen weit auseinander. Dennoch könnten mathematische Konzepte dabei helfen, eines der ältesten Rätsel der Menschheit zu lösen.



Johannes Kleiner ist Mathematiker und Physiker am Munich Center for Mathematical Philosophy der Universität München und Mitbegründer der Association for Mathematical Consciousness Science.

► spektrum.de/artikel/1886767

AUF EINEN BLICK GEHEIMNISVOLLE GEISTESZUSTÄNDE

- 1** Um den menschlichen Geist drehen sich zahlreiche Fragen, die teilweise seit Jahrtausenden unbeantwortet sind: Wie entsteht Bewusstsein? Ist es ausschließlich dem Menschen vorbehalten?
- 2** Inzwischen gibt es Ansätze aus unterschiedlichen Disziplinen, um kognitive Prozesse zu beschreiben. In der integrierten Informationstheorie werden mit Hilfe mathematischer Methoden selbst subjektive Erlebnisse von außen greifbar.
- 3** Kritik entzündet sich an den Grundannahmen und an deren Übertragung in mathematische Größen. Wissen wir überhaupt schon genug über bewusstes Erleben, um es in Formeln zu übersetzen?

SUBJEKTIVITÄT Eine Schwierigkeit bei der Erforschung des Bewusstseins ist, dass Erlebnisse subjektiver Natur sind. Die Mathematik könnte aber Abhilfe schaffen.

SERIE
Bewusstsein

Teil 1: Juli 2021
Der Geist in der Maschine
 Patrick Krauß, Andreas Maier

Teil 2: August 2021
Mathematisierung des Bewusstseins
 Johannes Kleiner

Teil 3: Juli 2021
Das große Experiment
 Manon Bischoff

Ohne die Sprache der Mathematik ist es unmöglich, das Universum zu verstehen. So lautete Anfang des 17. Jahrhunderts die damals gewagte These von Galileo Galilei, der damit die moderne Naturwissenschaft begründete. Heute, mehr als 400 Jahre später, ist seine Aussage allgemein akzeptiert. Mit Mathematik lassen sich Theorien formulieren, Vorhersagen treffen oder Experimente auswerten. Doch ein Phänomen entzieht sich diesem Formalismus nach wie vor: das Bewusstsein.

Seit Jahrtausenden beschäftigt Menschen auf der ganzen Welt, wie Geist und Materie zusammenhängen. Was genau ist Bewusstsein, und wie entsteht es? Während man derartige Fragen früher mit philosophischen Methoden anging, ermöglichten es die naturwissenschaftlichen Durchbrüche des 20. Jahrhunderts, das Forschungsthema neu zu ergründen.

Unter anderem entstand die Informationstheorie, die nicht nur den Weg zu Computern ebnete, sondern auch erste theoretische Modelle des Gehirns lieferte. Hinzu kamen neue bildgebende Verfahren wie Magnetresonanztomografie (MRT) oder Elektroenzephalografie (EEG), um die neuronale Aktivität von Lebewesen zu untersuchen. Diese Entwicklungen wälzten die bisherigen Vorstellungen von Geist und Materie um: Während sie bis dahin als zwei eigenständige Phänomene galten, ließen sich persönliche Wahrnehmungen plötzlich durch Prozesse im Gehirn erklären. Einige

Forscher schöpften die Hoffnung, den menschlichen Geist schon bald vollständig zu verstehen.

Viele Philosophen zeigten sich weniger optimistisch und verliehen einer wichtigen metaphysischen Frage neuen Auftrieb: Ist es überhaupt möglich, das Bewusstsein durch naturwissenschaftliche Methoden zu beschreiben? Die Schwierigkeit sahen sie vor allem in dessen subjektivem Charakter. Niemand kann detailliert nachvollziehen, wie es sich für eine andere Person anfühlt, eine bestimmte Emotion zu erleben. Diese Eigenschaft steht Disziplinen wie der Biologie oder der Physik entgegen, deren Theorien die Natur objektiv beschreiben (siehe »Steine in den Mühlen der Wissenschaft«).

Forschende ließen sich davon jedoch nicht entmutigen. Warum sollte man nicht zumindest versuchen, die neuronalen Aktivitäten, die mit kognitiven Prozessen zusammenhängen, in Gehirnen von Probanden mit bildgebenden Verfahren zu untersuchen, um daraus auf deren Bewusstseinszustand zu schließen?

Anfang der 1990er Jahre gab es Vorstöße aus unterschiedlichen Disziplinen, die sich dem Thema mit einer jeweils eigenen Methodik annahmen. Es entstanden Forschungsprogramme, die den menschlichen Geist auf physikalische Prozesse reduzieren sollten, aber auch »antiphysikalische« Agendas, um solche Bemühungen zu widerlegen. Heute – knapp 30 Jahre später – umfasst die

Steine in den Mühlen der Wissenschaft

Ist das Bewusstsein eine Funktion des Gehirns, ähnlich dem Betriebssystem eines Computers? Oder handelt es sich um etwas Eigenständiges, das über die Physik hinausgeht? Die allgemeinste Position, welche die erste Frage bejaht und die zweite Frage verneint, heißt »Physikalismus«. Laut ihm legen physikalische Tatsachen das bewusst Erlebte vollständig fest. Es gibt keine Änderung im Bewusstsein, wenn das physikalische Substrat, etwa das Gehirn, sich nicht regt.

In den 1970er und 1980er Jahren äußerten Philosophen eine Reihe von Argumenten, die den Physikalismus ins Wanken brachten. Eines der bekanntesten geht auf den Philosophen Thomas Nagel zurück, der 1974 erklärte, der subjektive Charakter von Bewusstsein passe nicht mit der objektiven Methode der Naturwissenschaften zusammen. Laut Nagel besitzen wir nicht

einmal die richtigen Konzepte, um den Physikalismus konkret zu formulieren. Die Wissenschaft sei wie ein Kind, das die Äquivalenz von Energie und Masse in Einsteins berühmter Formel $E = mc^2$ verstehen soll. So wie sich die Gleichung ohne mathematische Kenntnis nicht nachvollziehen lässt, könne die Wissenschaft nicht erklären, wie Bewusstsein und Physik einander entsprechen. »Physikalismus ist«, so Nagel, »eine Position, die wir nicht verstehen können, weil wir gegenwärtig keine Konzeption davon haben, wie er wahr sein könnte.«

Deutlich weiter geht ein 1982 von Frank Jackson veröffentlichtes Gedankenexperiment: Eine Wissenschaftlerin namens Mary kennt alle existierenden physikalischen Tatsachen, insbesondere ihr eigenes Gehirn betreffend. Allerdings lebt sie bis zu einem gewissen Zeitpunkt ihres Lebens in einem schwarz-wei-

ßen Raum und hat niemals eine Farbe wie Rot erblickt. Was passiert, wenn Mary ihr Zimmer verlässt und das erste Mal Farben wahrnimmt? Gemäß Jackson würde sie etwas Neues lernen, nämlich wie es sich anfühlt, rot zu sehen. Der Annahme folgend kennt sie aber schon alle physikalischen Fakten, daher muss die neue Erfahrung zu einer nicht-physikalischen Kategorie zählen.

Ob diese und ähnliche Argumente wirklich Sinn ergeben, hängt von den getroffenen Annahmen ab. Ist Nagels Verständnis von wissenschaftlicher Objektivität wirklich zutreffend? Und wie viel weiß Mary tatsächlich, wenn man voraussetzt, sie kenne alle physikalischen Tatsachen, habe aber nie eine Farbe gesehen? Fragen dieser Art werden bis heute diskutiert. Entsprechend herrscht immer noch keine Einigkeit darüber, ob sich Bewusstsein auf das Physikalische reduzieren lässt.

wissenschaftliche Erforschung des Bewusstseins weltweit hunderte Expertinnen und Experten, die noch immer zahlreiche verschiedene Theorien vertreten.

Einer der wohl populärsten und zugleich polarisierendsten Ansätze ist die so genannte integrierte Informationstheorie (IIT), die der Neurowissenschaftler Giulio Tononi seit 2004 entwickelt. Anders als in der Philosophie üblich betrachtet er das Bewusstsein nicht als rein menschliche Eigenschaft, sondern als graduelles Phänomen, das auch bei Tieren oder gar vernetzten Systemen auftreten kann.

Obwohl die IIT naturwissenschaftlich geprägt ist, setzt sie nicht voraus, dass die Modelle unserer Welt die Realität widerspiegeln: Nur weil die Chemie Moleküle, Atome und Elektronen beschreibt, müssen die Teilchen nicht wirklich existieren. Das Einzige, dessen wir uns wirklich sicher sein können, so Tononi, ist das Vorhandensein unseres eigenen Bewusstseins. »Die Existenz der physikalischen Welt ist eine Schlussfolgerung, obgleich natürlich eine höchst plausible«, so der Neurowissenschaftler. Dennoch spielen die naturwissenschaftlichen Modelle eine wichtige Rolle in der IIT – schließlich nehmen wir unsere Umgebung wahr, womit sie ein Teil unseres Bewusstseins ist.

Das Bewusstsein vermessen

Das Ziel der IIT ist, das subjektive Erleben eines jeden physikalischen Systems – vom einfachen Thermostat über das menschliche Gehirn bis hin zum gesamten Universum – mathematisch zu bemessen. Damit das gelingt, braucht man ein Modell des zu beschreibenden Systems, eine mathematische Darstellung des Bewusstseins sowie eine Verbindung zwischen beiden.

Der erste Punkt stellt meist kein Problem dar: Seit Jahrhunderten modellieren Naturwissenschaftler ihre Umwelt. Möchte man beispielsweise mit IIT herausfinden, ob ein Computer subjektive Erlebnisse besitzt, kann man die elektrischen Schaltkreise der Maschine untersuchen; um hingegen den Bewusstseinszustand eines Menschen zu einem bestimmten Zeitpunkt zu berechnen, braucht man neurowissenschaftliche Beschreibungen des Gehirns.

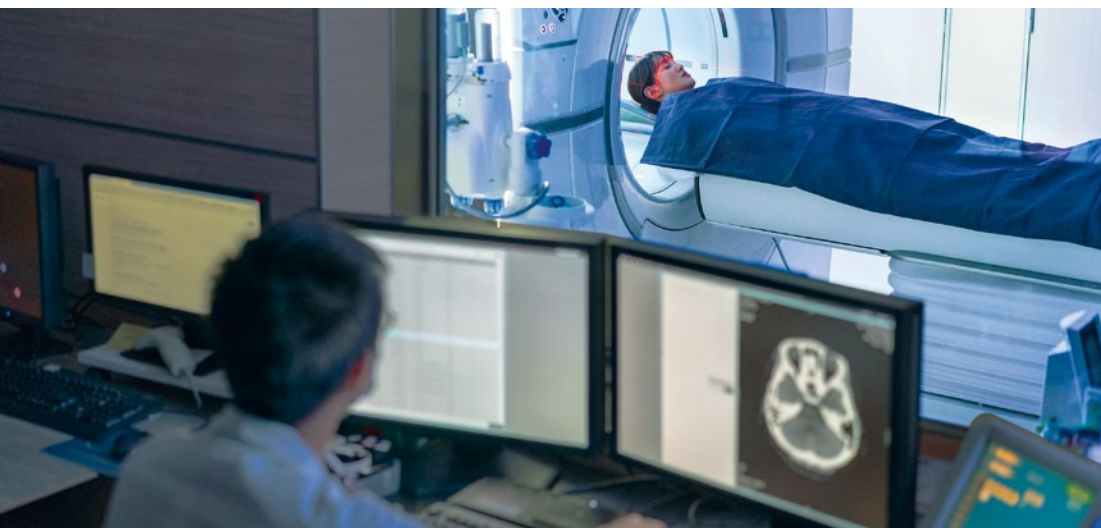
Interessanter ist die zweite Komponente, eine Mathematik des Bewusstseins. Die IIT legt dazu fünf Eigenschaften fest, so genannte Axiome, die ein bewusstes Erlebnis auszeichnen (siehe »Axiome der integrierten Informationstheorie«), etwa dass sich jede Erfahrung unterscheidet und von einem Subjekt intrinsisch wahrgenommen wird. An-

Bewusstsein aus Sicht der IIT

Die integrierte Informationstheorie (IIT) liefert für jedes physikalische System einen mathematischen Raum, der das bewusste Erleben des Systems nicht nur repräsentiert, sondern sogar mit diesem gleichgesetzt wird. Um den Raum für ein System (beispielsweise ein einfaches Thermostat oder das menschliche Gehirn) zu konstruieren, muss man zunächst zwei Eigenschaften kennen: Die Menge aller möglichen Zustände (etwa ein- und ausgeschaltet beim Thermostat oder die Gehirnzustände eines Menschen) sowie die Gleichungen, welche ihre zeitlichen Entwicklungen beschreiben.

Anschließend sucht man für jeden Bestandteil des Systems nach denkbaren Ursachen, die zu einem untersuchten Zustand geführt haben könnten und beschreibt diese mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Gleichzeitig sagt man voraus, wie die künftige Entwicklung des Systems aussehen könnte. Das führt zu möglichen Wirkungen, die mathematisch gesprochen ebenfalls Wahrscheinlichkeitsverteilungen sind. Damit lässt sich eine dritte Größe ϕ berechnen, die integrierte Information des Bestandteils.

Der Bewusstseinsraum der IIT besteht aus sehr vielen Bausteinen dieser Art, einem für jedes Teilsystem eines Systems. Dies lässt sich durch eine komplizierte mathematische Abbildung bestimmen, die unter anderem von den verschiedenen Systemzuständen und ihren Zeitentwicklungen abhängt. Im einfachsten Fall, etwa dem eines Thermostats, kann ein Computer die Aufgabe erledigen. Doch das menschliche Gehirn besteht aus Milliarden verschiedener, miteinander verbundener Einheiten. Um eine Aussage über die integrierte Information des gesamten Denkkorgans zu treffen, muss man alle möglichen Geisteszustände in Betracht ziehen – was nur approximativ umsetzbar ist.



BILDGEBUNG Es gibt zahlreiche Methoden, um das Gehirn abzubilden. Doch die Technologien sind noch nicht ausgereift genug, um alle neuronalen Prozesse vollständig zu untersuchen.

schließlich muss man im betreffenden System nach Strukturen suchen, die ein bewusstes Erleben nach dieser Definition ermöglichen. Daraus wird eine abstrakte Größe berechenbar, die so genannte integrierte Information. So, wie ein physikalisches Objekt mehr oder weniger Energie besitzt, lässt sich diesem eine integrierte Information zuschreiben, die ein Maß für dessen kognitive Fähigkeiten darstellt.

Je stärker ein System als Ganzes seine unmittelbare Zukunft und Vergangenheit beeinflussen kann, desto mehr integrierte Information besitzt es. Lässt es sich beispielsweise in zwei Teile zerlegen, ohne dass dies Folgen für seine zeitliche Entwicklung hat, dann ist die integrierte Information klein. Das ist bei einem Stein der Fall. Ein stark vernetztes System wie das Gehirn verfügt in der Regel hingegen über einen großen Wert.

Um die Größe konkret zu berechnen, nutzen Mathematiker eine Abbildung, die einem System einen so genannten Bewusstseinsraum mit vielen verschiedenen Zuständen zuordnet. Stellen Sie sich dazu vor, Sie sehen ein rotes Objekt vor sich, etwa einen Ball. Sie könnten ihn sich auch in anderen Farben vorstellen, blau, grün, hellblau, dunkelgrün oder dunkelrot, was jeweils einem anderen Zustand entspricht. Dieser lässt sich durch eine Zahl codieren – die verschiedenen Bewusstseinszustände mit den entsprechenden Werten bilden daher eine Menge.

Möchte man den unterschiedlichen Erlebnissen gerecht werden, genügt es allerdings nicht, sie bloß zu benennen. Zum Beispiel ähneln sich einige Bewusstseinszustände stärker als andere: Vermutlich gleichen sich solche, die zu roten, dunkelroten und rosa Kugeln gehören, mehr als die zu blauen und gelben. Aus mathematischer Sicht lässt sich

Axiome der integrierten Informationstheorie

Die integrierte Informationstheorie charakterisiert ein bewusstes Erlebnis durch fünf Axiome:

- ▶ Bewusstes Erleben ist real und existiert intrinsisch für sich – unabhängig von äußeren Beobachtern (A).
- ▶ Das Bewusstsein ist strukturiert, man kann einzelne Bestandteile eines Erlebnisses differenzieren, etwa die Wahrnehmung eines Buchs, dessen Farbe, Lage, Geruch und so weiter (B).
- ▶ Jedes Erlebnis ist einzigartig, es unterscheidet sich von anderen möglichen Erlebnissen (C).
- ▶ Jedes Erlebnis ist eine Einheit. Sieht man ein blaues Buch, kann man diese Erfahrung nicht auf die Wahrnehmung eines farblosen Buchs und der Farbe Blau reduzieren (D).
- ▶ Eine bewusste Erfahrung ist räumlich und zeitlich begrenzt, man kann nicht alle Details wahrnehmen (E).

Damit ein physikalisches System nach dieser Definition ein Bewusstsein besitzt, muss es gewisse Anforderungen erfüllen. Die IIT übersetzt die Axiome in mathematische Eigenschaften, die es besitzen sollte. Untersucht man beispielsweise logische Schaltungen, welche die Werte null oder eins annehmen können, lauten die Axiome:

- ▶ Damit ein physikalisches System existiert, muss es beeinflussbar sein und beeinflussen können – das heißt, es hat eine so genannte Ursache-Wirkungs-Fähigkeit. Damit es intrinsisch existiert, muss es sich selbst beeinflussen und von sich selbst beeinflusst sein.
- ▶ Schon einzelne Bestandteile des Systems müssen eine Ursache-Wirkungs-Fähigkeit haben. Hat man etwa drei Schaltungen XYZ, dann können sowohl X, Y, Z separat sowie XY, YZ, XZ oder ganz XYZ einen Mechanismus mit Ursache-Wirkung-Fähigkeit bilden.
- ▶ Die Ursache-Wirkungs-Struktur des Systems muss für jede Einstellung verschieden sein.
- ▶ Lässt man Teile des Systems weg, darf sich nicht dasselbe Gesamtbild ergeben. Das hat unter anderem zur Folge, dass jeder Teil des Systems durch den Rest beeinflussbar ist. Ein Maß für diese Eigenschaft liefert die Größe Φ , die angibt, wie sich die Ursache-Wirkungs-Struktur eines Systems ändert, wenn man es partitioniert.
- ▶ Wenn verschiedene Systeme zum gleichen Wert von Φ führen und sich räumlich überschneiden, dann hat nur dasjenige mit maximalem Φ Bewusstsein. Dasselbe gilt für verschiedene räumlich und zeitlich gemittelte Beschreibungen eines Systems.

das durch eine so genannte Metrik ausdrücken («Spektrum» November 2020, S. 74), eine Funktion, die zwei Zuständen eine Art Distanz zuweist. Für Rot und Dunkelrot ergibt sich wegen ihrer engeren Verwandtschaft ein kleiner Wert, während dieser für Rot und Blau größer ausfällt.

Das Bewusstsein als mathematischer Raum

Neben der Ähnlichkeit von Zuständen lassen sich weitere Beziehungen definieren. Man kann einzelnen Farberlebnissen etwa eine emotionale Wertigkeit oder eine Intensität zuschreiben. All solche Eigenschaften können verschiedene Größen erfassen, die zusammengenommen einen abstrakten Bewusstseinsraum aufspannen. Damit könnte man theoretisch für jede Person einen eigenen mathematischen Raum konstruieren, der die individuellen Farberlebnisse widerspiegelt.

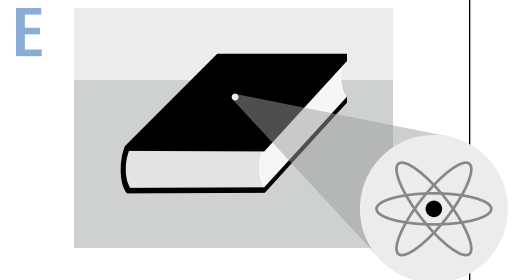
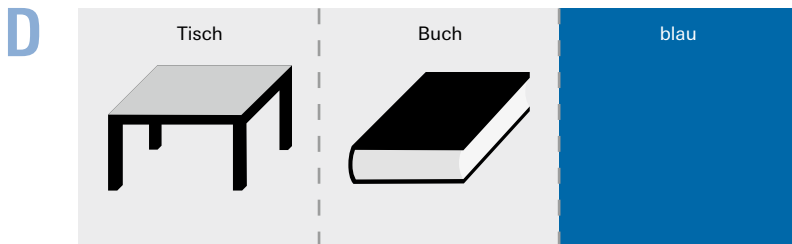
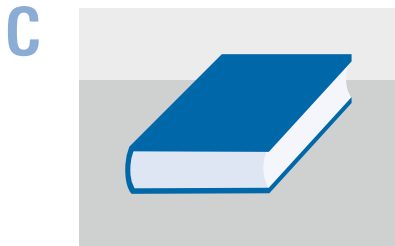
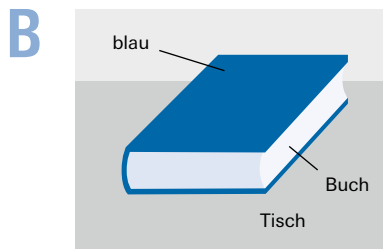
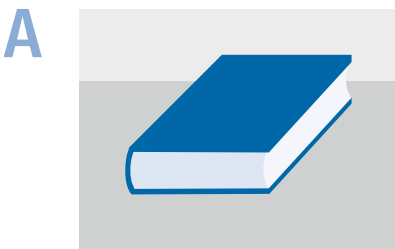
Das umzusetzen, ist allerdings gar nicht so einfach. Stellen Sie sich einen Probanden vor, der Bewunderung verspürt, während er sich Monets »Impression, Soleil levant« ansieht. Man könnte den dazugehörigen Bewusst-

seinszustand beispielsweise durch die Zahl 141 ausdrücken. Um daraus jedoch einen Bewusstseinsraum zu konstruieren oder das Erlebnis mit dem anderer Menschen zu vergleichen, muss man exakt wissen, was die Person dabei fühlt. Das kann der Proband allerdings nur ungenau umschreiben.

Eine zweite Person könnte versuchen, unter den eigenen Erlebnissen diejenigen auszuwählen, die am besten zur Schilderung passen. Dafür wird es höchstwahrscheinlich mehrere Möglichkeiten geben. Die in Frage kommenden Zahlen im Bewusstseinsraum der zweiten Person bilden eine Menge, die mit [141] bezeichnet werden kann. Jede Zahl in [141] passt zur Beschreibung von 141 der ersten Person. Doch das Erlebnis von Proband eins lässt sich nicht eindeutig abgleichen – was nicht weiter überrascht, schließlich ist das Bewusstsein etwas höchst Subjektives.

Weil Zustände wie 141 auf nichts Eindeutiges verweisen, macht es keinen Sinn, sie in einer wissenschaftlichen Theorie zu benutzen. Würde man beispielsweise untersuchen, welche Neurone das Erlebnis anregt, wäre man hinterher nicht schlauer und könnte das Ereignis immer

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



noch nicht von anderen Zuständen in [141] unterscheiden. Die grundlegenden Elemente einer Theorie des Bewusstseins müssen daher abgleichebare Mengen wie [141] sein, denn nur sie lassen sich empirisch untersuchen. Sie heißen intersubjektiv, also von außen einsehbar.

Mit Hilfe mathematischer Methoden ist eine Operation definierbar, die einen nicht abgleichebaren Zustand, etwa 141, auf die dazugehörige intersubjektive Menge [141] abbildet. Diese Operation lässt sich sogar auf ganze Bestandteile von Theorien anwenden. So ist es möglich, Modelle über den Zusammenhang von Bewusstsein und Physik zu formulieren, die jenseits des äußerlich Zugänglichen liegen (siehe »Mit Mathematik das Unbeschreibbare beschreiben«).

Mit Hilfe von Mathematik kann man also für jedes System einen intersubjektiven Bewusstseinsraum konstruieren. Somit ist es möglich, jedem Zustand (etwa einem aus- oder

eingeschalteten Thermostat oder einem Menschen, der ein Gemälde betrachtet) einen Punkt im Bewusstseinsraum zuzuordnen, der beschreibt, was das System im Moment erlebt (siehe »Bewusstsein aus Sicht der IIT«).

Allerdings lässt sich das nur in sehr einfachen Fällen tatsächlich umsetzen. Wollte man die integrierte Information des menschlichen Gehirns berechnen, bräuchte man dafür Tausende von Jahren. Dennoch gibt es für jedes noch so große System – theoretisch sogar für das ganze Universum – eine mathematische Anleitung, um die dazugehörigen Bewusstseinszustände zu bestimmen.

Aus Sicht der IIT hat sich die Mathematik als nützliche Sprache durchgesetzt, mit der man das Problem des Bewusstseins angehen kann. Dennoch warnen Experten wie der Philosoph Thomas Metzinger von der Johannes Gutenberg-Universität in Mainz, der die Association for the Scien-

Mit Mathematik das Unbeschreibbare beschreiben

Um das Bewusstsein mathematisch zu beschreiben, kann man Erlebnissen eine Zahl zuordnen, um einen so genannten Bewusstseinsraum zu konstruieren. Betrachtet ein Proband zum Beispiel das Gemälde »Impression, Soleil levant« von Claude Monet, könnte seine dabei empfundene Bewunderung die Zahl 141 tragen. Wenn er einer anderen Person sein Gefühl beschreibt, kann sie versuchen, unter den eigenen Erlebnissen diejenigen auszuwählen, die am besten zur Schilderung passen. Dafür wird es höchstwahrscheinlich mehrere Möglichkeiten geben, die eine Menge bilden und man abkürzend als [141] bezeichnen kann. Weil [141] mehr als einen Zustand enthält, lässt sich das Erlebnis des Probanden nicht genau abgleichen.

Da Zahlen wie 141 rein subjektive Empfindungen widerspiegeln, haben in der Praxis nur »intersubjektive« Größen, wie die Menge [141], Bedeutung. Abhilfe schafft eine mathematische Operation, die Zuständen im Bewusstseinsraum intersubjektive Mengen zuordnet. Dafür ergänzt man den Raum zunächst so, dass alle abgleichebaren Eigenschaften des Erlebten durch mathematische Strukturen definiert sind. Zum Beispiel führt

man eine Metrik ein, welche die Ähnlichkeit von Farben charakterisiert. Eine weitere Struktur, die so genannte Automorphismengruppe des Bewusstseinsraums, identifiziert dann die unabgleichebaren Zustände.

Um nachzuvollziehen, wie das funktioniert, muss man zunächst verstehen, was eine Gruppe ist: eine Sammlung von Elementen, die über eine bestimmte Verknüpfung miteinander in Beziehung stehen und gewisse Eigenschaften erfüllen. Verknüpft man zwei Objekte, ist das Ergebnis wieder Teil der Menge. Zudem gibt es ein neutrales Element, das alle anderen unverändert lässt. Und zuletzt existiert zu jedem Element ein Inverses, ihre Verknüpfung ergibt das neutrale Element. Ein Beispiel für eine Gruppe sind die ganzen Zahlen mit der Addition. Hier ist das neutrale Element die Null, das Inverse einer Zahl ist ihr Negatives. Gruppen können aber auch viel abstraktere Objekte als Zahlen enthalten, etwa Funktionen oder geometrische Figuren.

Die Automorphismengruppe eines Raums besteht aus allen Eins-zu-eins-Abbildungen des Raums auf sich selbst, welche die Struktur des Raums erhalten. Die

Verknüpfung zweier Abbildungen f und g ist ihre Hintereinanderausführung $f(g(x))$, und das Inverse ist deren Umkehrung.

Im Fall des Bewusstseinsraums sind Automorphismen also Abbildungen, die für jeden Bewusstseinszustand genau einen anderen Zustand ausgeben. Dabei müssen sie die mathematische Struktur des Bewusstseinsraums respektieren, das heißt, alle abgleichebaren Merkmale sind nach der Transformation eines Zustands durch die Abbildungen genauso wie zuvor. Ein Automorphismus verändert das Intersubjektive also nicht.

Eine derartige Abbildung bildet daher einen Zustand wie 141 auf einen anderen Zustand ab, der sich intersubjektiv nicht von 141 unterscheidet. Betrachtet man die gesamte Gruppe, also alle möglichen Automorphismen des Bewusstseinsraums, dann bilden sie 141 auf alle möglichen Zustände ab, die sich von einer außenstehenden Person nicht von 141 unterscheiden lassen: Das entspricht der Menge [141]. Die Automorphismengruppe nutzt demnach Beziehungen zwischen Bewusstseinszuständen auf geschickte Art, um das Unwissen über unbeschreibbare Zustände zu reduzieren.



WAHRNEHMUNG
Jeder empfindet etwas Einzigartiges während eines Erlebnisses, etwa beim Betrachten des Gemäldes »Impression, Soleil levant« von Claude Monet.

FINE ART IMAGES / HERITAGE IMAGES / PICTURE ALLIANCE

tific Study of Consciousness mitbegründet hat, vor allzu blindem Vertrauen: »Ein mathematisierter Ansatz als solcher schützt nicht davor, auf Holzwege zu geraten und sich zu verfahren.«

Die Theorie in der Kritik

Philosophen kritisieren vor allem die fünf Axiome, die den Ausgangspunkt der IIT bilden. »Es ist fraglich, ob es überhaupt irgendwelche nichttrivialen, aber grundlegenden Eigenschaften der subjektiven Erfahrung gibt, abgesehen von der Tatsache, dass es sich wie irgendetwas anfühlt, in einem speziellen Bewusstseinszustand zu sein«, moniert beispielsweise Tim Bayne von der Monash University in Australien.

Andere akzeptieren zwar die fünf Axiome, stören sich aber an der »Übersetzung« in Mathematik, also an den strukturellen Anforderungen, die man an ein System diesbezüglich stellt. Ließe sich etwa statt der integrierten Information eine andere mathematische Größe wählen, die ebenso gut die Anwesenheit und Ausprägung der Axiome im System bemisst? Die Physikerin Larissa Albantakis, die seit 2012 mit Tononi an der IIT arbeitet, hat darauf eine deutliche Antwort: »Es ist unklar, ob wir jemals genug über das Bewusstsein und die physikalische Welt wissen werden, um eine eindeutige Übersetzung in einen mathematischen Rahmen zu erreichen. Deswegen treffen wir Annahmen, die man experimentell testen muss.«

Dafür braucht man Vorhersagen, die bewusste Erlebnisse von Probanden mit ihrem Geisteszustand verknüpfen. Die Prognosen zu überprüfen, ist alles andere als einfach, denn das menschliche Gehirn ist extrem komplex. Selbst durch die besten Messverfahren sind nur winzige Bruchteile der Information über den Gehirnzustand experimentell zugänglich.

Einfacher ist es deswegen, verschiedene Theorien des Bewusstseins gegenüberzustellen. Aktuell sind mehrere Versuche dieser Art in Planung. So möchte Lucia Melloni vom Max-Planck-Institut für empirische Ästhetik in Frankfurt am Main zusammen mit ihren Kollegen die IIT mit der

ebenfalls weit verbreiteten »Global Neuronal Workspace Theory« vergleichen. Diese Theorie postuliert, das Bewusstsein entstehe, wenn neuronale Signale in eine Art Arbeitsspeicher des Gehirns gelangen. Demnach feuern die Neurone in dem Arbeitsspeicher schlagartig, sobald man einen Reiz wahrnimmt. Im Fall anhaltender Stimuli unterscheiden sich die Vorhersagen von denen der IIT – welches der beiden Modelle richtigliegt, lässt sich in einem Experiment herausfinden (siehe Teil 3 der Serie).

Wichtigstes Ziel der nächsten Jahre ist daher die Entwicklung neuer mathematischer Methoden zur Verbindung philosophischer und neurowissenschaftlicher Ansätze. Forschende wollen eine belastbare Grundlage schaffen, die den Naturwissenschaften das Handwerkszeug bereitstellt, um auch die problematischen Eigenschaften des Bewusstseins empirisch zu erforschen. »Die mathematische Untersuchung des Bewusstseins steht erst am Anfang«, betont Stephan Hartmann, Philosoph und Wissenschaftstheoretiker an der Ludwig-Maximilians-Universität München sowie Leiter des Munich Center for Mathematical Philosophy. »Wir müssen nach kreativen Wegen suchen, die verschiedenen Disziplinen zu kombinieren. Es zeigt sich schon jetzt, dass dies nicht ohne großen mathematischen, wissenschaftlichen und philosophischen Sachverstand möglich sein wird.« ◀

QUELLEN

Bayne, T.: On the axiomatic foundations of the integrated information theory of consciousness. *Neuroscience of Consciousness* 4, 2018

Kleiner, J., Tull, S.: The mathematical structure of integrated information theory. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*, 2020.

Kleiner, J.: Mathematical models of consciousness. *Entropy* 22, 2020

Oizumi, M. et al.: From the phenomenology to the mechanisms of consciousness: Integrated information theory 3.0. *PLOS Computational Biology* 10, 2014

REZENSIONEN

RESSOURCEN SAND FÜR SIRI, FRACKING UND CO.

Der Journalist Vince Beiser bietet einen Rundumblick auf den knapp werdenden Rohstoff Sand: von Bauten, dem Internet und tödlichen Folgen für Korallenriffe und Menschen.

► Beton sei die Hauptursache für die globale Sandkrise, schreibt der Autor. Wieso Krise? Suggestiert ein Sprichwort nicht unbegrenzte Vorräte: »Das gibt es wie Sand am Meer«? Tatsächlich werden ganze Inseln abgebaggert, riesige Areale Meeresboden abgesaugt und Korallenriffe zugeschlammt. Sogar von Friedhöfen in Flussnähe wird Sand geplündert,

um an den knapp werdenden Rohstoff zu kommen. Inzwischen protestieren Menschen gegen den Sandraub von ihren Lieblingsstränden, blockieren Straßen und fordern Maßnahmen gegen illegalen Abbau. Denn es ist nicht der »unendlich« erscheinende Wüstensand, der so begehrt ist: Die Körner aus Quarz müssen scharfkantig sein, nur so verleihen sie Baustoffen wie Beton die nötige Festigkeit. Sonst sei es, als würde man mit Murmeln anstatt mit Klötzen bauen wollen, erklärt der US-amerikanisch-kanadische Journalist Vince Beiser in seinem neuen Buch. Die kantige Form haben

Sandkörner aber bloß, wenn sie aus unterirdischen Lagerstätten oder aus dem Wasser stammen. In Wüsten werden die Körner mit großer Wucht hin und her gestoßen und regelrecht rund gerollt – das macht sie für stabile Bauwerke ungeeignet.

Inzwischen werden wegen Sand sogar Morde begangen. Zudem verursache der Abbau Umweltschützern Albträume, resümiert Beiser. Als Journalist ist er an viele Orte gereist, wo der Sandabbau verheerende Auswirkungen auf die Umwelt hat.

Er schildert, wie die »wichtigste feste Substanz auf Erden« die Gesellschaft verändert. So führten Autobahnen zum Entstehen einer Fastfood-Kultur, Glasflaschen prägten das Trinkver-



halten, und der Bau des Panamakanals aus Beton mit dem Zuschlagstoff Sand beeinflusse den internationalen Transport. Zwar wird Sand hauptsächlich für Beton benötigt, doch auch Glas und Implantate aus Silikon basieren auf dem Rohstoff. Und wenn Siri eine Bestellung aufnehmen soll, brauchen die Computerchips nicht nur Silizium. Die elektronischen Bausteine werden in hochreinen Quarztiegeln produziert, die ebenfalls viel Sand benötigen.

Mittlerweile verbraucht man weltweit um die 50 Milliarden Tonnen Sand jährlich. Und es kommt ein neuer Verbraucher hinzu: Gas- und Öl-Fracking. Der Fracking-Sand wird dabei in die unterirdischen Lagerstätten gepresst, um die künstlich aufgebroche-

ÜBERFLUSS Das gibt es doch wie Sand am Meer! Aber so einfach ist es leider nicht.

nen Risse durchlässig zu halten. Für diese Art der Förderung verschwinden tausende Hektar landwirtschaftliche Nutzfläche und Vogelschutzgebiete. In den Gegenden, in denen der Fracking-Sand gesammelt wird, gehen Menschen teilweise mit Atemschutzmaske vor die Tür. Denn der feine Quarzsand kann eine besonders schwere Lungenerkrankung verursachen, wenn die Maschinen viel Feinstaub aufwirbeln.

Beiser schreibt nicht nur sehr anschaulich, er bringt der Leserschaft die Fülle an Wissen zudem auf unterhaltsame Weise nahe. In seinen stimmungsvollen Berichten erzählt er beispielsweise, wie er Chuck, den Schichtleiter eines Sandwerks, im Kontrollraum besucht oder dass die Flanken von Hügeln aussehen wie mit einem Küchenmesser verstümmelt. Er öffnet den Lesenden die Augen, wo überall in unserer Umwelt Sand gefördert und benötigt wird und welche Folgen das hat, und wirft einen ganzheitlichen Blick auf die positiven sowie negativen Auswirkungen dieser »Gier« nach dem Rohstoff.

Dabei schildert der Autor nicht bloß die Folgen für die Natur, sondern auch die für uns Menschen. So steigen inzwischen die Preise für Sand, wodurch sich Slums weiter ausbreiten, da einige sich Bauten aus Sand und Beton nicht mehr leisten können. Beiser vergisst nicht die Arbeiter, meist Kinder, die durch Unfälle beim Sandabbau sterben oder wenn Überflutungen und Abbrüche von Flussufern ganze Siedlungen auslöschen. Oder diejenigen, die gegen den Abbau demonstrieren und deswegen bedroht oder gar getötet werden. Laut Beiser gibt es deutlich mehr als 70 Mordopfer allein in Indien, darunter Journalisten, Aktivistinnen und Polizeibeamte.

In vielen Industrieländern ist der Sandabbau mittlerweile verboten. Das führe aber nur dazu, dass das Problem dorthin exportiert wird, wo es laschere Gesetze gibt oder sich die Menschen weniger wehren können, so der Autor. Eine Lösung sei eine Art Fair-Trade-Bewegung ähnlich der für Textilien oder Kaffee – ebenso beim Import von Fracking-Gas.

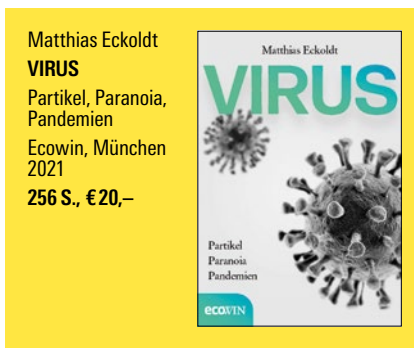
Katja Maria Engel ist promovierte Materialforscherin und Wissenschaftsjournalistin in Dortmund.

VIROLOGIE EXPEDITION IN DEN MIKROKOSMOS

Der Wissenschaftsautor Matthias Eckoldt legt ein neues Werk vor, in dem er die Geschichte über die Erforschung von Viren spannend und anschaulich vorstellt.

► Sie sind rund 10000-mal kleiner als ein Sandkorn, und es gibt 100-mal mehr von ihnen auf unserer Erde als Sterne im Weltall. Diese verblüffend anschaulichen Vergleiche sind Auftakt eines Buchs, das sich mit dem faszinierenden Universum der Viren beschäftigt: von den Gigaviren der Vorzeit bis hin zu den Typen, welche die Welt bis heute in Atem halten, wie HIV, Ebola, Krebs erzeugende Viren und natürlich das neue Coronavirus Sars-CoV-2.

Der vielfach ausgezeichnete Wissenschaftsautor Matthias Eckoldt legt sein Buch zur rechten Zeit vor, denn die aktuelle Pandemie entfacht ein nie gekanntes Interesse der breiten Öffentlichkeit an Fragen der Virologie. Anders als das Cover vermuten lässt, geht es erst im letzten der sechs Kapitel um Corona und Co – das tut der wissenschaftlichen Tiefe aber



keinen Abbruch. Bis dahin packt der Autor seine Leserschaft mit einer ungeheuren Vielfalt an Themen rund um die Virologie. Allesamt sind gut lesbar, doch mit Liebe zum Detail verfasst, so dass bei der Lektüre ein Grundverständnis und tieferes Interesse an Biomedizin von Vorteil ist.

So geht es um die evolutionäre Entstehung von Viren, um die ver-

schiedenen Arten und ihre parasitären Überlebensstrategien. Der Autor beschreibt die großen Pandemien und Epidemien der Menschheitsgeschichte von Pest und Pocken über die (Spanische) Grippe bis hin zur Kinderlähmung (Polio). Dabei begibt er sich auf eine Zeitreise durch die Jahrhunderte und lässt die Leserschaft an der nervenaufreibenden Suche nach dem Faszinosum Virus teilhaben, das sich – lange unsichtbar und namenlos – erst in den 1930er Jahren unter dem Elektronenmikroskop zu erkennen gibt.

»Im historischen Kontext wird entwickelt, was Forscher – oft unter Einsatz ihres Lebens (und des von anderen) – über Viren in Erfahrung gebracht haben«, kündigt Eckoldt im Vorwort an. Dabei sind es die Ausflüge in Politik und Zeitgeschichte der jeweiligen Epochen, insbesondere der Nazizeit, die das Buch so außergewöhnlich lesenswert machen. Stellenweise liest es sich wie ein Krimi, etwa wenn der Autor die ethisch zu verurteilenden Menschenversuche und Impfexperimente nicht nur der jüngeren Geschichte beschreibt. Eine beachtliche Zahl an Quellen und Literaturhinweisen ist am Ende aufgeführt. Auch ein Sach- und Personenregister bereichert das Buch, in das Leben und Werk etlicher großer Forscher mit einfließen, von der Antike bis zur Gegenwart. Abbildungen sind dagegen leider kaum zu finden.

Sind Krankheiten die Strafe Gottes? Können giftige Ausdünstungen, verunreinigte Luft oder elende Biestchen die Ursache sein? Von Hippokrates und Aristoteles und ihren Überlegungen zur Krankheitsentstehung bis hin zur Lichtmikroskopie, die Ende des 17. Jahrhunderts das Tor zur Welt der Mikroorganismen aufstieß, weil sie zumindest die viel größeren Bakterien sichtbar machte, war es ein weiter Weg, den Eckoldt sehr detailliert nachzeichnet.

Von Louis Pasteur, Robert Koch und vielen weiteren Wegbereitern der Mikrobiologie geht die Reise bis mitten hinein in die moderne Virologie und Gentechnik, die virale Vektoren als Gefahren nutzt, um die Erbanlagen

von Zielorganismen zu verändern. Eckoldt zeigt auf, was in Medizin und Landwirtschaft heute möglich ist, und referiert über optimierte Nutzpflanzen, transgene Mücken und erbgutbasierte Impfstoffe. Dabei macht er sich nicht zum Fürsprecher, sondern bleibt kritisch, wägt ab, diskutiert unabsehbare Folgen und warnt vor der Gefahr des Bioterrorismus. Er argumentiert erfreulich faktenorientiert und widerlegt aktuell kursierende Verschwörungstheorien.

Und noch etwas macht das Buch klar: Das Geschäft mit der Wissenschaft ist hart. Eckoldt kennt unterhaltsame Anekdoten um Forscherehrgeiz und Nobelpreis-Gerangel und das ewige Streben nach Ruhm und Geld. »Alle Bereiche des Lebendigen werden

Offenbar haben wir die Demut vor der Natur verloren

mehr und mehr dem Effizienzprinzip und der Gewinnmaximierung unterworfen«, beklagt er im Hinblick auf die Patentierung von genveränderten Organismen und – gerade aktuell – Impfstoffen. Er erinnert an Jonas Salk, der eine Patentierung seines Polio-Vakzins in den 1950er Jahren ablehnte, weil er »den Menschen gehöre« und »die Sonne auch nicht patentierbar sei«. Dieses moralische Vorbild müsste »den heutigen Protagonisten der gesamten Biotech-Branche eigentlich die Schamesröte ins Gesicht treiben«, so Eckoldt.

Offenbar haben wir die Demut vor der Natur verloren. Dass sich Viren nicht austricksen lassen und unsere Eingriffe in die Umwelt immer neue Mutationen und somit Pandemien provozieren, wird nach der Lektüre verständlich. Ein beunruhigendes Szenario, mit dem wir uns auseinandersetzen müssen.

Karin Henke-Wendt ist Diplombiologin und arbeitet als Wissenschaftsjournalistin.

PHYSIK VOM UNIVERSUM ZUM MULTIVERSUM

Auch wenn die Theorie bestens überprüft ist, bereitet die Deutung der Quantenmechanik vielen Physikern Probleme. In seinem neuen Buch präsentiert Sean Carroll seine Sichtweise.

Die Quantenmechanik ist eine experimentell extrem gut getestete Theorie, und gleichzeitig ruft sie zumindest ein Stirnrunzeln bei jedem Studierenden hervor. Zwar sind ihre mathematischen Rezepte etwas anspruchsvoller, aber das allein ist noch kein Grund zur Skepsis. Schwieriger ist hingegen die Interpretation dieser Konzepte. Der verbreitetsten Deutung zufolge besteht die Welt aus Wellenfunktionen, deren zeitliche Entwicklung deterministisch ist. Damit lässt sich zwar nicht direkt beschreiben, wie sich das Universum verändert, aber zumindest, wie sich die Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Ereignisse verhalten.

Wenn man sich Messungen in dieser Anschauung zuwendet, wird es allerdings rätselhaft: Die Wellenfunktion kollabiert demnach augenblicklich in einen Zustand, der dem Messergebnis entspricht. Doch das widerspricht dem Geist der Relativitätstheorie, da unter anderem sich eine anfangs unendlich ausgedehnte Wellenfunktion plötzlich auf einen Punkt komprimiert. Diese »spukhafte Fernwirkung«, wie Albert Einstein das Phänomen bezeichnete, wird insbesondere am berühmten Beispiel zweier verschränkter Quantenteilchen deutlich: Man präpariert sie so, dass sie gemeinsam den Drehimpuls null besitzen, und distanziert sie anschließend voneinander. Misst man dann den Spin eines Teilchens, kollabiert sofort auch die Wellenfunktion des anderen womöglich weit entfernten Partikels. Diese Eigenschaft betrachten viele Physiker als unschön.

Gibt es Auswege? Ja. Hugh Everett (1930–1982) entwickelte eine berühmte alternative Interpretation der Quantenmechanik, die Viele-Welten-Theorie.

Demnach kollabiert nicht die Wellenfunktion, sondern das Universum spaltet sich gemäß den Wahrscheinlichkeiten auf, so dass es nach dem Messvorgang (im einfachsten Fall) zwei unabhängige Kopien davon gibt. Wenn man an die Zahl der existierenden Teilchen denkt und wie viele Wechselwirkungen stattfinden, die jeweils zu zahlreichen verschiedenen Ausgängen führen können, erhält man eine Schwindel erregende Menge an Multiversen. Die Viele-Welten-Theorie ist also keine bequeme Alternative.

Das veranschaulicht, wie hart die Nuss ist, die es bei der Interpretation der Quantenmechanik zu knacken gilt. Der kalifornische Physiker Sean Carroll ist ein Verfechter der Viele-Welten-Deutung und begründet seine Haltung mit seinem neuen Buch »Was ist die Welt und wenn ja, wie viele?«.



Der 400 Seiten lange Text ist in drei Teile gegliedert. Der erste beschreibt die Quantentheorie und die zuvor erwähnte Lehrbuch-Interpretation, die so genannte Kopenhagener Deutung. Im zweiten Abschnitt stellt Carroll die Viele-Welten-Variante vor und diskutiert sie im Vergleich zur traditionellen Ansicht. Dem Autor zufolge ist die Viele-Welten-Theorie die konsequenteste Auslegung, sie nimmt demnach die Gesetze der Quantenmechanik vollkommen ernst. Die Diskussion möglicher Einwände hat er in ein fiktives Gespräch zwischen der jungen Quantenphysikerin Alice und ihrem Vater gepackt. Die Tochter geht klar als Siegerin aus dem Dialog hervor.

Ginge es Carroll bloß um die Interpretation der Quantenmechanik,

würde er wohl kaum als Physiker, sondern eher als Wissenschaftsphilosoph arbeiten – und sein Buch könnte nach dem zweiten Teil enden. Aber der Autor geht weiter und beschreibt im letzten Abschnitt seine eigentliche Forschung. Wie wäre es, wenn nicht Raum und Zeit die Bühne sind, auf der sich das Drama der Quantenphysik entfaltet, sondern der abstrakte Raum der Wellenfunktionen die grundlegende Entität der Welt wäre? Raum und Zeit wären demnach Phänomene, die erst aus den Eigenschaften und Wechselwirkungen der Quantenwelt entstehen. Mit so einer Weltsicht erscheinen verschiedene Interpretationen der Quantentheorie lediglich als umständliche Versuche, Raum und Zeit als fundamental anzusehen.

Carrolls Buch ist anspruchsvoll und richtet sich nicht an Laien, die einmal etwas über die Quantenmechanik lesen möchten. Wer hingegen Physik studiert hat und die diskutierten Theorien kennt, wird vor allem am dritten Teil seine Freude haben. Sollte man sich etwa fragen, warum jemand zu einer bestimmten Interpretation neigen, obwohl es für experimentelle Tests sowieso keinen Unterschied macht, findet die Leserschaft eine Antwort im letzten Abschnitt. Denn sieht man die Quantenwelt als fundamental an, lohnt es sich, die offenen Baustellen der Quantenphysik nochmals zu inspizieren: etwa Schwarze Löcher und ihre Ereignishorizonte oder den Urknall.

Leider ist das Buch etwas holprig übersetzt. Viele lange und verschachtelte Sätze erschweren es der Leserschaft, den Gedanken des Autors zu folgen. Und auch der deutsche Titel und Untertitel erscheinen weniger überzeugend als die englische Originalversion: »Something Deeply Hidden – Quantum Worlds and the Emergence of Spacetime« (Etwas tief Verborgenes – Quantenwelten und wie die Raumzeit entsteht) ist viel präziser und spannender formuliert.

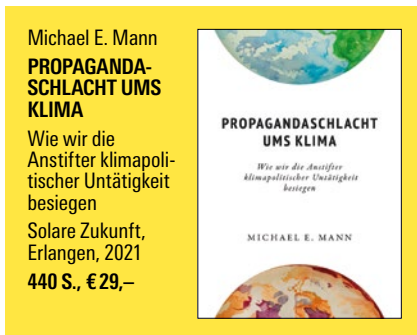
Stefan Gillissen ist promovierter Physiker und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik.

KLIMAWANDEL NACH DEM LEUGNEN

**Angriffe und Angreifer erkennen
und das Klima retten**

Der Klimaforscher Michael Mann entlarvt die Methoden, mit denen Klimaschutzverzögerer heute ihre monetären Interessen zu Lasten des Planeten wahren.

»Krieg«, »mächtiges Arsenal«, »gewaltige Waffen«, »Front« und der »Kampf um den Planeten« – im jüngsten Buch von Michael Mann, einem der renommiertesten und engagiertesten Klimaforschenden weltweit, geht es martialisch zu. »Propagandaschlacht ums Klima« heißt das umfangreiche Sachbuch, im Englischen sogar »The New Climate War«. Das wirkt auf den ersten Blick übertrieben, doch nach der Lektüre fallen die Vorbehalte gegen diese Wortwahl deutlich schwächer aus. Der deutsche wie der englische Titel beschreiben zusammen genau, worum es im Buch geht.



Oder mit den Worten des US-Autors: »Die Klimaschutzverhinderer wurden gezwungen, sich von der ›harten‹ Klimaleugnung auf eine ›weiche‹ Leugnung zurückzuziehen: Herunterspielen, Ablenken, Spalten, Verzögern und Verzweiflung schüren.« Wollte man dagegen antreten, müsste man die Strategien entlarven und überwinden.

Als Urheber der berühmten »Hockeystick-Kurve«, die den Verlauf der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre beschreibt, ist Mann seit mehr als zwei Jahrzehnten eines der Hauptziele jener Kräfte, die sich gegen angemessene

Reaktionen auf die Klimakrise wehren. So kann der Autor zahlreiche Beispiele aus eigener Erfahrung beisteuern. Dabei beschreibt er die Methoden, die durch fossile Brennstoffe reich gewordene Menschen gegen Personen aus Wissenschaft, Politik und Aktivismus anwenden, wenn diese naturwissenschaftliche Fakten betonen und konsequentes Handeln fordern. Man könnte nun befürchten, die »Opferrolle« des Autors habe zu einem unsachlichen oder polemischen Werk geführt. Doch Mann führt weit mehr als die eigenen Erfahrungen aus, und fast immer sind seine Aussagen durch öffentlich zugängliche Quellen belegt.

Wer »Die Machiavellis der Wissenschaft« von Erik M. Conway und Naomi Oreskes gelesen hat, wird im ersten Teil des Buchs so manches wiedererkennen: Mann zeigt zunächst die Parallelen auf, wie die teils gleichen Personen und Organisationen, die früher die Gefahren des Rauchens, des sauren Regens, des Ozonlochs und manches mehr heruntergespielt haben, heute versuchen, den Klimaschutz zu sabotieren.

Dabei präsentiert der Autor meist knapp und gut belegt die Fakten zu einem klimawissenschaftlichen Sachverhalt und entkräftet falsche Argumente und Behauptungen. Viel wichtiger aber: Danach setzt er sich mit den Methoden der jeweiligen Angriffe und den dahintersteckenden Personen auseinander. Das ist nicht nur spannend wie ein Krimi, sondern man lernt bei der Lektüre Schritt für Schritt, wie Manipulationen der öffentlichen Debatte die Wahrnehmung der Klimakrise verfälschen und dringende Maßnahmen verzögern. Darin liegt die erste große Leistung Manns: Wem diese Muster bewusst sind, ist immun dagegen. Die zweite große Leistung, bei welcher der Autor oft die Arbeit investigativer Journalistinnen und Journalisten zitiert, ist das Bloßstellen jener Kräfte, die im Hintergrund die Propagandaangriffe finanzieren und koordinieren.

So zeigt Mann, wie man konservative Kräfte einerseits durch Verharmlosung davon abhält, aktiv zu werden, und gleichzeitig Klimaschützer

BP propagierte das Konzept des CO₂-Fußabdrucks

durch Übertreibung der Folgen der Klimakrise dazu bringen möchte, zu resignieren und inaktiv zu werden. An anderer Stelle verspricht man Scheinlösungen wie Wasserstoff, CO₂-Speicherung (CCS) oder Geoengineering, wodurch man vor allem Liberale dazu verleitet, vorhandene Lösungen wie die erneuerbaren Energien zu ignorieren und auf Innovationen und scheinbare Marktmechanismen zu setzen, die viel zu spät greifen würden: »Wenn wir eine Erwärmung jenseits der kritischen Grenzen von 1,5 Grad Celsius abwenden wollen, haben wir nur noch ein Jahrzehnt Zeit, um die globalen CO₂-Emissionen um den Faktor zwei zu reduzieren. Das ist eine sehr kurze Brücke«, schreibt Mann unter Anspielung auf Propagandisten von Brückentechnologien.

Ganz besonders betont der Autor die Motive der Ablenkung und der Teilung: Er belegt, wie die Feinde des Klimaschutzes Forderungen nach individuellen Verhaltensänderungen unterstützen. »Der Ölkonzern BP propagierte Mitte der 2000er-Jahre das Konzept eines ›persönlichen CO₂-Fußabdrucks‹.« Denn solange nur Minderheiten Konsequenzen umsetzen, können die fossilen Industrien ihr Geschäft rentabel fortführen – anders, als wenn starke politische Mehrheiten Änderungen am System fordern würden: »Die Wahlfreiheit von Verbrauchern führt nicht zum Bau von Hochgeschwindigkeitszügen, zur Finanzierung von Forschung und Entwicklung im Bereich Erneuerbarer Energien oder zur Festsetzung einer CO₂-Steuer.« Obendrein entstehe so Streit in der Klimaschutzgemeinschaft darüber, welcher Weg richtig sei, und könnten Vordenkende diskreditiert werden, weil sie nicht in allen Aspekten konsequent handeln.

Milliardäre, die mit Rufmordkampagnen einflussreiche Forschende und

progressive Politikerinnen und Politiker angreifen, Troll- und Botarmeen, die Kinder und Jugendliche schikanieren und bedrohen, gekaufte Lobbyisten in Politik und Wissenschaft, millionenschwere Kampagnen, um Falschinformationen zu verbreiten und die Gesellschaft zu spalten – teils mit Hilfe des eigenen Medienimperiums: Die erschreckende Faktensammlung in »Propagandaschlacht ums Klima« lässt keinen Zweifel daran, dass wir uns in einem »neuen Kampf ums Klima« befinden, wie es im Original heißt. Vielleicht sind der große Umfang des Buchs und die Vielzahl an Beispielen erforderlich, um zu begreifen, dass eine kleine, schwerreiche Gruppe einen Krieg gegen den Rest der Menschheit führt. Manns jüngstes Werk kann dabei helfen, die Angriffe abzuwehren und optimistisch zu bleiben.

Björn Lohmann ist Wissenschaftsjournalist mit Schwerpunkten in den Lebens- und Umweltwissenschaften.

MATHEMATIK GEBALLTES WISSEN

Kit Yates präsentiert eine eindrucksvolle Sammlung von Beispielen, wo Mathematik in unserem Alltag eine Rolle spielt.

► Das Buch des jungen britischen Mathematikers Kit Yates hat es innerhalb weniger Wochen in die Bestsellerlisten geschafft: zunächst 2019 in Großbritannien und in den USA (»The Maths of Life and Death«) und nun auch bei uns. Inzwischen wurde es in 20 Sprachen übersetzt. Yates ist nicht der Erste, der sich bemüht, die breite Öffentlichkeit über die bedeutende Rolle der Mathematik in vielen Lebensbereichen aufzuklären. »Warum Mathematik (fast) alles ist« stellt einen weiteren und in großen Teilen gelungenen Beitrag dar, ist aber keine leichte Kost.

Im Vorwort kündigt der Autor an, das vorliegende Buch sei nicht für

Mathematiker geschrieben, man finde darin keine einzige Formel. Während Erstes zutrifft, kann man die zweite Aussage nur im eigentlichen Wortsinn bestätigen: Denn selbst Yates kommt nicht ohne Rechnungen aus, die er gemäß einem formelhaften Schema durchführt. Irritierend erscheint es hingegen, dass der vom Verlag gewählte Einband ausgerechnet die aus dem Mathematikunterricht bekannten Formeln des Satzes von Pythagoras und zur Lösung einer quadratischen Gleichung zeigt (die im Buch überhaupt keine Rolle spielen).

Yates ist Dozent am Department of Mathematical Sciences und am Centre for Mathematical Biology der University of Bath. Die besondere Beziehung des Autors zur Biologie wird bei der Auswahl der behandelten Themen durchgängig sichtbar. Den Anfang macht ein Kapitel über exponentielles Wachstum: Zahlenbeispiele zur Vermehrung von Milchsäurebakterien, Finanzbetrügereien



UNSPLASH / PPS (img) / ian.com/photos/24161016_01V3V1V2Z
UNSPASH / PPS (img) / ian.com/photos/24161016_01V3V1V2Z
UNSPASH / PPS (img) / ian.com/photos/24161016_01V3V1V2Z

REZENSIONEN

durch Schneeballsysteme, die Entwicklung eines menschlichen Embryos während der Schwangerschaft, Funktionsweise der Atombombe, das Unglück von Tschernobyl oder die Altersbestimmung durch Radiometrie verdeutlichen die typischen Eigenschaften von Vorgängen dieser Art. Am Beispiel der Bevölkerungsentwicklung geht er schließlich auf das logistische Wachstum ein.

Das zweite Kapitel widmet sich dem Thema »Sensitivität und Spezifität« von Gesundheitstests und der Tatsache, dass falsch positive und falsch negative Testergebnisse praktisch unvermeidbar sind. Anhand zahlreicher Einzelfälle schildert Yates, welche tragischen Folgen Fehlschlüsse haben können, und er rät zu Gelassenheit, wenn ein medizinischer Test



positiv ausfällt. Die zur Verdeutlichung erforderlichen Rechnungen begründet er durch Baumdiagramme und deren Umkehrung – also mit Methoden, wie sie heute im Mathematikunterricht der Abschlussklassen auftauchen.

Auch das dritte Kapitel, das sich insbesondere mit spektakulären Fehlurteilen der Justiz beschäftigt (wie Sally Clark oder Amanda Knox), enthält nicht gerade triviale Überlegungen zu Wahrscheinlichkeiten. Darunter findet sich der Ökologische Fehlschluss, bei dem man Merkmale einer Gruppe auf Individuen abbildet, oder das Simpson-Paradoxon, das von der Kombination von Ergebnissen verschiedener Gruppen handelt. Ähnliches gilt für die im nachfolgenden Kapitel erläuterten Beispiele anderer statistischer Fehlschlüsse und

stochastischer Paradoxien wie das bekannte Geburtstagsproblem.

Das fünfte Kapitel enthält eine Sammlung von Pannen, die durch Fehlberechnungen entstanden, etwa weil man unterschiedliche Einheitsysteme nutzte (wie bei der Mars-Orbiter-Katastrophe 1999) oder nicht genau genug rechnete. Letzteres war im ersten Golfkrieg fatal: Die Patriot-Raketen verfehlten die ankommenden feindlichen Flugkörper, weil man die Zeit mit einer Beschränkung auf 24 Stellen in Einheiten des Dualsystems berechnete. Die Hälfte der amerikanischen Toten sind auf diesen Fehler zurückzuführen.

Dass Optimierungsalgorithmen in unserer heutigen Welt eine große Rolle spielen, verdeutlicht Yates im sechsten Kapitel. Vom optimalen Sortieren von Daten über das Problem des Handlungsreisenden hin zum Rucksackproblem (optimales Packen) gelangt der Autor schließlich zur Grundsatzfrage, ob sich die Problemklassen vom so genannten Typ P beziehungsweise NP tatsächlich unterscheiden. Abschließend geht er auf automatisierte Preisanpassungen und die automatisierte Auswahl von Nachrichtentrends ein.

Offensichtlich hat Yates aus aktuellem Anlass für die deutsche Fassung noch kurzfristig einige Anmerkungen zu Covid-19 eingefügt, die im englischen Original nicht enthalten sind, da zum damaligen Erscheinungsdatum (September 2019) niemand etwas von der bevorstehenden Pandemie ahnte. Wer die ersten Abschnitte dazu durchliest, findet das gesamte Vokabular wieder, das in den letzten Wochen Nachrichten und Talkshows dominiert hat: Patient null, Reproduktionsrate, Herdenimmunität, Impfquote, Quarantäne, Inzidenz und so weiter.

Die Begriffe erläutert der Autor an zahlreichen Krankheiten, die sich in vergangenen Jahrhunderten (etwa Pest, Pocken, Malaria, Tuberkulose) oder den letzten Jahrzehnten (wie Masern, Röteln, HIV, HPV, Sars) ausgebreitet haben. Yates versucht dabei, an den vorgestellten Beispielen epidemische Entwicklungen und die

Wirkungen der jeweils gewählten Gegenmaßnahmen zu veranschaulichen. Anders als die vorigen Kapitel besitzt der letzte Abschnitt einen geringen Unterhaltungswert, was der Natur des Themas geschuldet ist.

Wenn man bedenkt, welche Themen allein in dieser Rezension aufgelistet sind, kommt man nicht umhin, den Klappentext des Buchs als irreführend oder zumindest als verharmlosend anzusehen: Dort werden nur »banale« Fragen wie die Auswahl der kürzesten Schlange vor einer Supermarktkasse angesprochen.

Wer an der eindrucksvollen Sammlung von Beispielen interessiert ist, sollte sich für ein vollständiges Verständnis genügend Zeit nehmen und bereit sein, die Erläuterungen zu den dahinterstehenden komplexen Sachverhalten durchzuarbeiten.

Heinz Klaus Strick (www.mathematik-istschoen.de) ist Autor des »Mathematischen Monatskalenders«.

ASTROPHYSIK DIE REVOLUTION DER SCHWARZEN LINIEN

Jürgen Teichmann erzählt in seinem Buch, wie die Fraunhoferlinien und mit ihnen die Spektroskopie eine neue Ära in der Astronomie einläuteten.

► Als der junge bayerische Optiker Joseph von Fraunhofer um das Jahr 1814 dunkle Linien im Lichtspektrum der Sonne und von Fixsternen entdeckte, brachte er in der Himmelsbeobachtung einen gewaltigen Stein ins Rollen. Doch zunächst maß man diesem Phänomen nichts Besonderes bei, sie schienen nebensächlich für die Astronomie. Vielleicht handelte es sich bloß um einen verschmutzenden Effekt, den die Erdatmosphäre beim Durchgang des Himmelslichts erzeugt, oder sie wurden durch einen Fehler in den Linsen der Teleskope hervorgerufen. Abgesehen davon würden die Linien bestenfalls in den Bereich der Physik fallen, die damals nichts mit Astronomie zu tun hatte.



Die Wissenschaftler täuschten sich. Es dauerte noch 40 Jahre, bis man die Bedeutung der Absorptionslinien verstand: Sie geben Auskunft über die chemische Zusammensetzung von Himmelskörpern. Ihre Entdeckung läutete eine Revolution in der Astronomie ein.

Ohne diese Linien wüssten wir heute nichts über die Gashüllen von Sternen – und kaum etwas über das Universum, schreibt Jürgen Teichmann in seinem Buch »Der geheime Code der Sterne«. Der Autor nimmt Fraunhofers bahnbrechende Entdeckung zum Anlass, die Geschichte der Spektroskopie zu erzählen und ihre Auswirkungen auf die Astronomie des 19. Jahrhunderts bis heute zu erklären. Teichmann ist Professor für die Geschichte der Naturwissenschaften an der Ludwig-Maximilians-Universität München und eng verbunden mit dem Deutschen Museum. Er gilt als bedeutender Wissensvermittler für Physik und Astronomie.

Zunächst bettet der Autor Fraunhofers Entdeckung in das Spektrum des

Das Buch ist eine reichhaltige Sammlung von Wissen rund um die Geschichte der Astronomie

großen Erkenntnisgewinns zu Beginn des 19. Jahrhunderts ein: Messgeräte wurden präziser; man war den Geheimnissen des Lichts auf der Spur und verstand es immer besser, Lichtstrahlen durch optische Geräte zu kontrollieren.

Die Möglichkeiten, die Rätsel des Universums mit Hilfe von Licht zu lüften, wurden ausgereifter. Teichmann berichtet über William Herschels Entdeckung des Infrarotbereichs und dessen Bemühungen, Planetarische Nebel zu beobachten. Er erzählt von der Vermessung von Himmel und Erde und erläutert, wie man auf den Gedanken kam, dass es – ebenso wie am roten Ende des sichtbaren Lichtspektrums – auch Strahlung am »kalten« Ende geben müsste und wie Johann Wilhelm Ritter diese ultraviolette Strahlung schließlich 1801 nachwies.

Etwas überraschend erscheint das Kapitel über Natur und Kunstwerk. Hier versucht Teichmann, eine Brücke von Fraunhofers handkolorierten Spektren zur Kunst und Malerei des 19. Jahrhunderts zu schlagen. So war vor allem Johann Wolfgang von Goethe an der Farbenlehre interessiert: Schon kurz nach der Veröffentlichung Fraunhofers untersuchte der berühmte Dichter die farbenprächtigen Spektren mit den dunklen Linien. Er zeigte sich beeindruckt von den Arbeiten, aber natürlich auch reserviert, wie Teichmann beschreibt. Zur gleichen Zeit begannen viele Maler, sich mit der Wirkung von Licht, Raum und Naturgewalten auseinanderzusetzen. Man stellte genaue Beobachtungen an und entwickelte ein Gespür dafür, wie sich Licht in der Natur verhält, wie es etwa an den einzelnen Farbübergängen verschwimmt, wie es gebrochen und absorbiert wird. Man wollte Naturerscheinungen mit ihren Farben und Schattierungen so realitätsnah wie möglich darstellen.

Teichmanns Buch ist eine reichhaltige und anspruchsvolle Ansammlung von Wissen rund um die Geschichte der Astronomie und einer ihrer wichtigsten Grundlagen, der Spektroskopie. Man sollte sich für das Werk allerdings Zeit nehmen und muss

wahrscheinlich einige Kapitel mehrmals durchgehen. Denn manchmal fällt es schwer, alle Informationen korrekt in den zeitlichen Kontext einzuordnen, da der Autor mitunter in seinen Erzählungen springt. Hervorzuheben ist die ansprechende Gestaltung des Buchs, es enthält viele farbige Abbildungen. Zudem lockern eingebettete Zitate der Protagonisten die geballte Informationsflut angenehm auf.

Gegen Ende der Lektüre geht Teichmann kurz auf die moderne Astronomie und ihre Erkenntnisse ein. Auch ein Ausblick auf das, was noch kommt, ist zu finden. So entsteht in Chile das erste Teleskop der Europäischen Weltraumbehörde ESO mit einem Spiegeldurchmesser von 40 Metern. Damit möchten Forschende Planeten in fernen Sonnensystemen beobachten. Das Extremely Large Telescope wird mehr als 10000-mal lichtstärker sein als das beste Teleskop, das Fraunhofer im 19. Jahrhundert erbaute.

Thorsten Naeser ist Diplomgeograf und arbeitet am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in München.

UMWELT WILDTIERE IN TÖDLICHER HITZEFALLE

Steigende Temperaturen und Wetterextreme: Die Biologin Lisa Warnecke erklärt, wovon die Anpassungsfähigkeit und das Überleben verschiedener Arten abhängen.

► Bei einem Massensterben im australischen Bundesstaat Queensland gingen im Januar 2014 mehr als 45000 Flughunde zu Grunde. Fast alle dieser großen Fledermäuse gehörten der gleichen Art an, so dass sich ihre Population an einem einzigen Tag halbierte. Was war passiert? Eine Hitzewelle hatte den Tieren zugesetzt, wie Lisa Warnecke in ihrem äußerst lesenswerten Buch »Tierisch heiß« berichtet. Die Biologin schlüsselt im Detail auf, wie Wildtiere auf die Klimakrise

REZENSIONEN

reagieren, wer sich vielleicht anpassen kann oder wie die Flughunde scheiterten.

Welche Arten können mit den veränderten Umweltbedingungen umgehen? Mit den steigenden Temperaturen und mit Wetterextremen wie Hitzewellen, die künftig weltweit vermehrt und wohl verstärkt auftreten werden? Pauschale Antworten kann es auf diese Fragen nicht geben. Zu viele verschiedene Faktoren spielen hier eine Rolle, die sich teilweise ergänzen und verstärken. Die physiologischen Vorgänge im Körperinneren sind ebenso entscheidend wie die Lebensweise und das Verhalten der Tiere.

Zwei Tatsachen lassen sich jedoch schnell feststellen: Hitzewellen sind grundsätzlich schwerer zu verkraften als langsam steigende Temperaturen, und Generalisten mit etwas Flexibilität haben bessere Chancen als Spezialisten. Wer kann, verlegt seine Aktivitäten vom heißer werdenden Tag in die Nacht oder verlagert seinen Lebensraum in kühlere Gefilde. Ein leichtes



Unterfangen ist das aber nicht, sind hier doch immer schon Fressfeinde und Konkurrenten etabliert, während vielleicht auch die Nahrung umgestellt werden muss.

Noch weiß man zu wenig von diesen Zusammenhängen. »Tatsächlich hat sich die Forschung lange vor allem mit den Folgen langsamer, gradueller Temperaturveränderungen auf Ökosysteme beschäftigt«, schreibt Warnecke. »Wetterextreme wurden eher als Ausnahme mit geringem Langzeiteffekt behandelt.«

Die Autorin zeigt die Klimakrise in all ihren Auswirkungen als Bedrohung für die biologische Vielfalt, stellt jedoch ebenfalls heraus, dass sie ein Stressfaktor neben vielen anderen wie dem Verlust an Lebensraum, Umweltgiften und Krankheiten ist.

Für Baumbewohner kann insbesondere die exponierte Lage zur Falle werden. Anders als Tiere in Höhlen und unterirdischen Bauten können sie sich bei einer Hitzewelle nicht in ein erträglicheres Mikroklima flüchten. »Wenn Kühlungsmechanismen nicht ausreichen und die Körpertemperatur über eine Toleranzgrenze hinweg ansteigt, hat das tödliche Folgen«, so Warnecke. Fledermäuse, Possums, Koalas und andere Tiere fallen tot von den Bäumen.

Zwar blieb die Hälfte der Flughundpopulation beim Massensterben in Queensland erhalten, die überlebenden Tiere waren aber höchstwahrscheinlich stark dehydriert. Das gefährdet ihren Fortpflanzungserfolg und damit den gesamten Bestand. Auch wenige Tage dauernde Wetterextreme können daher zu einem großen Problem für den Artenschutz und für Ökosysteme werden: Flughunde sind unter anderem als Bestäuber von Pflanzen unersetzlich.

Bei extremer Hitze können die Mechanismen zur Regulierung der Körpertemperatur an ihre Grenzen stoßen, beim Schwitzen geht zu viel kostbares Wasser verloren. Das Überleben kann dann von Schattenplätzen und Wasserquellen abhängen, die durch die Klimakrise aber immer knapper werden.

Das Problem wird übrigens auch für Menschen dringender. Zum Beispiel fehlt es vielerorts an kühlenden Stadtparks und Trinkwasser, worunter insbesondere ältere, kranke und sehr junge Personen leiden, weil sie extreme Hitze grundsätzlich schlecht tolerieren.

Warnecke greift auf ihre eigene Arbeit als Wildtierbiologin sowie auf Projekte von Kolleginnen und Kollegen zurück, um den Lesern den aktuellen Forschungsstand – mit offenen Fragen – nahezubringen. Dafür spannt sie den Bogen von der Wüste bis zum

Meer, wo die Tiere an den hohen Temperaturen, der veränderten Wasserchemie und an Sauerstoffmangel leiden. Der Untertitel »Wie Koala, Elefant und Meise auf die Klimakrise reagieren« greift also deutlich zu kurz.

An diesem wichtigen Werk sind nur die Zwischentitel zu bemängeln, die aus unerfindlichen Gründen mitten im Wort zweigeteilt sind.

»Wildtiere brauchen von uns Menschen unbedingt zwei Dinge: Raum und Zeit«

Lisa Warnecke

»IRRE PARABEL« etwa bezieht sich auf Schäden, die nicht gutzumachen sind. Das tut Warneckes Botschaft aber keinen Abbruch, dass wir die Überlebensmechanismen von Tieren und ihre komplexen Interaktionen im Ökosystem besser untersuchen müssen, um Vorhersagen für die Zukunft zu machen.

Noch eines ist der Autorin wichtig: »Wildtiere brauchen von uns zwei Dinge: Raum und Zeit«, so Warnecke. »Erstens müssen wir ihnen ausreichend Raum geben, sprich Ökosysteme intakt halten, renaturieren und vernetzen. Zweitens müssen wir Tieren durch schnelles Handeln in Klimafragen Zeit gewähren, damit ihre natürliche Anpassungsfähigkeit Schritt halten kann mit den Veränderungen der Umwelt.« Anders gesagt: Das Problem der hohen und extremen Temperaturen ist brandeilig.

Die Biologin Susanne Wedlich arbeitet als Wissenschaftsautorin in Münster und hat »Das Buch vom Schleim« geschrieben.

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

FERNLEITUNGEN HALTEN HÖCHSTSPANNUNG STAND

1921

»Als in den Vereinigten Staaten die erste Anlage mit 100000 Volt Übertragungsspannung dem Betriebe übergeben wurde, glaubte man an der Grenze des technisch Möglichen angelangt zu sein. In der Folgezeit wurden Werke dieser Art auch in Europa errichtet, Amerika führte dann Anlagen mit 150000 Volt aus, und jetzt wird neustens in Kalifornien mit dem Bau eines Kraftübertragungssystems für 220000 Volt begonnen. Vorversuche haben gezeigt, daß bei solchen Spannungen die Verluste durch Glimmentladungen zwischen Fernleitungsdrähten nicht so stark in Erscheinung treten.« *Technische Monatshefte 8, S. 190*

MAUS-ZWERGBEUTELRATTE: ZÄH, FAUL, WENIG POSSIERLICH

»Die Aeneasratte hat ihre Heimat in Südamerika und gehört zu den Beutelratten. Nach Brehm hat [sie] in den alten Naturgeschichten eine gewisse Berühmtheit erlangt. [Es wurde] von ihr erzählt, daß sie ihre Jungen auf dem Rücken trage wie der sagenberühmte Äneas seinen alten Vater. Zu dieser rührenden Schilderung gehört ein possierliches Bild, auf dem die Jungen alle ihre kleinen Wickelschwänze um den Schwanz der Alten geringelt hatten. Tatsächlich mag ja solche Situation einmal vorkommen; aber für gewöhnlich lassen es die Jungen dabei bewenden, sich am Felle und Leibe der Alten festzuhalten«. Wohl aber ist die Äneasratte unglaublich lebenszäh. Sonst verrät der Faulpelz wenig Intelligenz.« *Kosmos 8, S. 222*



Eher fiktive Illustration der Maus-Zwergbeutelratte, ehemals Äneasratte.

GOLD AUS MEERWASSER SCHÜRFEN

»Daß das Meerwasser feine Spuren von Gold enthält, ist schon seit langer Zeit bekannt. Vor kurzer Zeit hat sich die Siemens & Halste-Akt.-Ges. ein Verfahren [dafür] patentieren lassen. Hiernach wird das bei Flut in Behälter geleitete Meerwasser mit Kohlenoxyd versetzt und das dadurch ausgeschiedene Gold durch Sinkstoffe wie Ton zum Absetzen gebracht. Diese wirken derart, daß sie beim Niedersinken das Gold mit zu Boden ziehen. Inwiefern das Verfahren schon praktisch ausprobiert worden ist, wird allerdings nicht mitgeteilt.« *Technische Monatshefte 8, S. 191*

WIRTSCHAFTSLEISTUNG DER UMWELT ZULIEBE DROSSELN

1971

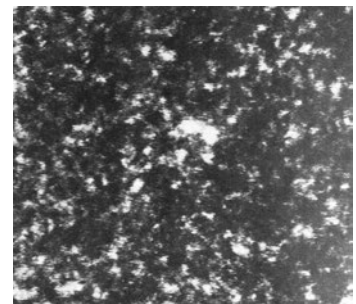
»Ein außergewöhnlicher Vorschlag zur Sicherung der menschlichen Umwelt ist jüngst von dem sowjetischen Nationalökonom Iwan Oldak gemacht worden. Nach seiner Auffassung kann nur eine internationale Verlangsamung des Wirtschaftswachstums eine effektive Verbesserung der Umweltbedingungen zur Folge haben. Der Wissenschaftler hat deshalb vorgeschlagen, daß das Wachstum der Wirtschaft in der Sowjetunion um 7 Prozent gedrosselt werden sollte.« *Kosmos 8, S. *218*

ANTIBIOTIKA AUS AMEISENGIFT?

»Die Rote Feuerameise (*Solenopsis geminata*) hat sich seit ihrer Ankunft aus Südamerika im Südosten der USA als unwillkommen erwiesen. Der Stich der Tiere ist sehr schmerzhaft. Der Entomologe M. Bund (Universität von Georgia) fand, daß das Gift dieser Ameisen ein hochpotentes Antibiotikum ist. Bereits früher wurde berichtet, daß die Blasen, welche durch die Ameisenstiche entstehen, steril sind. Bunds Versuche zeigten, daß das Gift das Wachstum bestimmter Bakterien, wie Streptokokken und Staphylokokken sowie einer Anzahl von Pilzen hemmt. Das Ameisengift besteht aus fünf Alkaloiden und ist frei von Protein. Da tierische Proteine häufig zu allergischen Reaktionen bei Injektion in den Menschen führen, würde das Toxin als klinisches Antibiotikum von großem Wert sein.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 8, S. 355*

ATOM IM RASTERELEKTRONENMIKROSKOP

»Kürzlich ist es an der Universität von Chicago erstmalig gelungen, Atome hoher Ordnungszahl in einer Molekülverbindung mit einem Rasterelektronenmikroskop sichtbar zu machen. A. V. Crewe setzte Uranylacetat mit Pyromellithsäure um und gewann eine Verbindung, in der die beiden Uranatome den festen Abstand von rund 13 Å besitzen. In dem Photo erkennt man mehrere Fleckenpaare. Andere Flecken liegen dazu schräg und lassen überdies aus einer gewissen regelmäßigen Häufung von Paaren die Neigung des Salzes zur Polymerisation erkennen.«



Mikroskopbild mit tatsächlicher Seitenlänge von 0,000051 Millimetern.

Die Umschau 17, S. 645

WISSENSCHAFT LEBT VON OFFENHEIT UND FAIRNESS

Unser Kolumnist Michael Springer bemängelte fehlende Übersicht im Meinungsstreit um die Corona-Pandemie. (»Zwischen Laien und Experten«, »Spektrum« Mai 2021, S. 47)

Andreas Dietz, Nienburg/Weser: Ich habe die Diskussion um den Ursprung des Coronavirus in den Medien verfolgt und bin seitdem erstaunt darüber, auf welchem Niveau sie geführt wird. Ob es von einem möglichen Zwischenwirt auf den Menschen übergelassen ist oder bei Forschungsarbeiten durch eine Unachtsamkeit entwichen ist, ist zunächst einmal eine wissenschaftliche Frage. Wer diese vorurteilsfrei und unpolitisch angeht, wird beide Thesen für plausibel halten. Wer einer der beiden Seiten unlautere Motive unterstellt, denkt nicht mehr wissenschaftlich und argumentiert nicht fair.

Roland Wiesendanger hat für seine These eine Reihe von Indizien zusammengetragen, die ihm zugänglich sind. Und weit davon entfernt »das Virus als chinesische Biowaffe zu dämonisieren«, wie es die Kolumne ihm unterstellt, macht er auf einen Umstand aufmerksam, mit dem wir uns beschäftigen sollten: Dass nämlich in bestimmten Hochsicherheitslaboren wichtige Forschung an Krankheitserregern betrieben wird, die zum Zweck der Vorbeugung von Pandemien und der Entwicklung von Medikamenten und Impfstoffen auch gentechnisch manipuliert werden. Das geschieht nicht nur in China, sondern in zahlreichen Laboren rund um den Globus. Dass es in der Vergangenheit bereits zu Unachtsamkeiten und Unfällen gekommen ist und diese demzufolge leider nicht völlig ausgeschlossen werden können, hatte auch eine Gruppe um die Innsbrucker Mikrobiologin Rossana Segreto festgestellt. Deren Studie stützt die These vom Laborunfall.

Die vorschnelle Dämonisierung von alternativen Erklärungsansätzen als verschwörungstheoretisches Denken bereits zu Beginn der Pandemie macht dagegen schon nachdenklich. Deshalb sollte es in der Frage letztlich um die Wahrheit gehen und nicht um Schuldzuweisungen. Von der Wahrheit sind wir aber noch weit entfernt, solange jede Seite nur Theorien bilden, diese aber nicht zweifelsfrei beweisen kann.

SELTSAME ENERGIEVERMEHRUNG

Messungen zeigen, wie eine Ungleichverteilung der Bestandteile des Protons die Atomkerne stabilisieren könnte. (»Antimaterie-Überschuss im Proton«, »Spektrum« Juni 2021, S. 22)

Eckehardt Kupsch, per E-Mail: Ein Neutron ist schon etwas schwerer als ein Proton, so weit die Physiker. Und

jetzt nehmen wir noch ein Pion dazu und erhalten weniger, nämlich ein Proton. Wie viel kann man sich eigentlich noch aus dem Quantenvakuum borgen? Gibt es eine Energieabgabe bei diesem Prozess? Das Proton kann sich nach der Darstellung unter Pionabgabe in ein Neutron verwandeln? Seltsame Energievermehrung.

Antwort des Redakteurs Mike Beckers:

Dieser scheinbar unmögliche Vorgang funktioniert nur im Rahmen der Quantenphysik. Die heisenbergsche Unschärferelation verknüpft Ungenauigkeiten bei der Energie mit solchen bei der Zeit. Der Zusammenhang erlaubt dann kurzzeitig die nötige Verletzung der Energieerhaltung. Ein Proton kann also ein Pion emittieren, sofern das Pion schnell genug wieder von einem Neutron absorbiert wird. Die von Ihnen gestellten Fragen sind beliebte Prüfungsfragen bei Einführungsvorlesungen zur Teilchenphysik. Man setzt dann in die Relation diejenige Zeit ein, in der ein Pion bei nahezu Lichtgeschwindigkeit die typische Distanz der Reichweite der starken Kernkraft (ein Femtometer) überwinden kann. Dann erhält man in etwa die tatsächliche Masse des Teilchens. Will man ein freies Pion erzeugen, muss ein Beschleuniger die nötige Zusatzenergie liefern, um Energie und Impuls dauerhaft zu erhalten und nicht nur für sehr kurze Zeit aus dem Vakuum zu borgen.

EIN DRITTER LÖSUNGSVORSCHLAG

Wenn es darum geht, einen Ball zu apportieren, löst der beste Freund des Menschen ein Minimierungsproblem. (»Kann der Hund Analysis?«, »Spektrum« Juli 2021, S. 86)

Timm Grams, Fulda: Denksportaufgaben, über die man lange und angestrengt nachgrübeln muss und für die einem schließlich eine unerwartet einfache Lösung in den Sinn kommt, lösen Glücksgefühle aus. Das ist der berühmte Heureka-Effekt. Bei dem Hundeproblem bietet der »Spektrum«-Artikel zwei Lösungsvarianten an, die mich in dieser Hinsicht nicht völlig zufrieden stellen. Die erste nutzt vorwiegend die Analysis und ist sozusagen Sekundarstufe-II-Routine; die zweite ist mir etwas zu kompliziert. Ich mag sie dennoch, weil sie das Fach Geometrie entgegen dem heutigen Trend in den Vordergrund rückt. Der folgende dritte Lösungsvorschlag geht die Sache etwas direkter an.

Der ökonomisch vorgebildete Hund springt ins Wasser, wenn der Break-even-Punkt erreicht ist. Zu Beginn sind Schwimmstrecke \overline{DB} und Laufstrecke \overline{DC} annähernd gleich lang. Mit jedem Satz verringert der Hund Lauf- und Schwimmstrecke in nahezu demselben Maß und ein Sprung ins Wasser ist von Nachteil, denn der Hund ist kein guter Schwimmer. Nähert sich der Hund dem Fußpunkt C des Lots vom Ball zum Ufer, bleibt die Wasserstrecke bei jedem weiteren Hundesatz fast unverändert. Spätestens jetzt ist es Zeit für den Sprung ins Wasser.

Der ideale Punkt für den Sprung ist dort, wo die Verringerung der Schwimmstrecke zur Verringerung der Laufstrecke in demselben Verhältnis steht wie Schwimm- und Laufgeschwindigkeit s/r . Die Verringerung der Schwimmstrecke steht zur Verringerung der Laufstrecke im umgekehrten Verhältnis zu den noch nicht durchteilten Teilen dieser Strecken. Das lässt sich mit kleinen aber endlichen Differenzen und unter Anwendung von Ähnlichkeitssätzen der Geometrie beweisen. Wer es partout nicht lassen kann, möge die Differenzialrechnung ins Feld führen. Aus alldem folgt die Gleichung $s/r = \gamma/\sqrt{\gamma^2 + z^2}$, die nur noch nach y aufzulösen ist: $\gamma = z/\sqrt{(r^2/s^2 - 1)}$.

ERRATA

»Rationale Zahlen zählen«, »Spektrum« Mai 2021, S. 82

Auf der Achsenbeschriftung müsste es unter den orangenen Kreisen auf S. 83 richtigerweise heißen: 1/5, 2/5, 3/5 und so weiter. Die kreisähnlichen Auswüchse der Mandelbrot-Menge sind zwar in der Tat so angeordnet wie die Ford-Kreise, aber nicht so groß – in keinem Maßstab. Man kann sich das Intervall von 0 bis 1 um die zentrale Kardioide aufgewickelt vorstellen, aber es ist nicht gleichmäßig strammgezogen. In der Nähe der Punkte 0 und 1 sind die zugehörigen Kreise entsprechend kleiner. Für nahe benach-

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.

barte Kreise sind zumindest die Größenverhältnisse ungefähr korrekt.

»Wasser aus den Bergen«, »Spektrum« Mai 2021, S. 64

Auf S. 68 und 69 steht bei »Amurdaja« ein Buchstabe an der falschen Stelle. Korrekt wäre Amudarja, analog zum Syrdarja, beides ehemalige Zuflüsse des Aralsees.

»Schlecht vorbereitet in die Pandemie«, »Spektrum« Juni 2021, S. 38

Auf S. 41 heißt es: »War es zu Beginn der Krise noch die Verdopplungszeit, die es zu reduzieren galt« – vielmehr ging es darum, die Verdopplungszeit zu verlängern.

Spektrum der Wissenschaft

Chefredaktion: Dr. Daniel Lingenhöhl (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleitung: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers (stellv. Redaktionsleiter), Manon Bischoff, Janosch Deeg, Dr. Andreas Jahn, Dr. Karin Schlott, Dr. Frank Schubert, Verena Tang; E-Mail: redaktion@spektrum.de

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Claus Schäfer, Oliver Gabriel,

Anke Heinkelmann, Natalie Schäfer

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), 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

Herstellung: Natalie Schäfer

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

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

Übersetzungen: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Claudia Hecker

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel.: 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel.: 0711 7252-192, Fax: 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Bezugspreise: Einzelheft € 8,90 (D/A/L), CHF 14,-; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 93,-; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 72,-. 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. 42 vom 1.1.2021.

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: © 2021 (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 Florek
Vice President Magazines: Stephen Pincock



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



Ich fühle dich

Kunstraub mit Überraschungen.
Eine Kurzgeschichte von Kris Brynn

Die Kugel streift meinen Arm und reißt einen kleinen Fetzen meiner schwarzen, unverschämte teuren Seidenbluse mit sich, der danach im Verbindungsmodul der »Van Gogh« herumtrudelt. Dass die vor meinen Augen tanzenden Blutropfen zu mir gehören, wird mir erst einige Sekunden später klar. Und diese Sekunden, in denen ich überlege, wann der Schmerz einsetzen und wie stark er sein wird, diese Sekunden nutzt der Marshall dazu, sich abzustoßen und auf mich zuzuschweben. Erstaunlich schnell. Weniger erstaunlich, mit welchem Können er das tut. Und am allerwenigsten erstaunt mich, dass er die Knarre immer noch auf mich gerichtet hält. Ich rudere mit dem unverletzten Arm, stoße mich mit dem Absatz meines Schuhs an der Verkleidung ab und rolle in einen abzweigenden Gang. Keine Sekunde zu früh. Die zweite Patrone verfehlt mich um Haaresbreite und bleibt in der Verkleidung der Haupttröhre stecken.

Nichts erscheint mehr sicher, außer dem Umstand, dass mir der Stationsmarshall auf den Fersen ist und das neueste Kunstwerk namens »Ich fühle dich« von Dan Ching in meinem Rucksack steckt: ein Roboter in der Größe eines vorsintflutlichen Papierlochers mit einer strahlend weißen Kunststoffoberfläche – versteigert für zwei Millionen Credits an einen anonymen Käufer, der sein Objekt nie in den Händen halten wird.

Ich muss Ihnen kurz einige Dinge über Farben erzählen. Tempera, Öl, Aquarell, Pastell. Blau als Zeichen der Treue und Keuschheit, fahles Gelb als Symbol der gesellschaftlich Ausgestoßenen, Grün als Ausdruck der Zuversicht. Pastos aufgetragen, lasiert, gespachtelt, gekratzt, getupft. Das war mein Leben. Früher. Als die großen Auktionshäuser ihre Versteigerungen noch auf der Erde ausrichteten. Schwerkraft, Atmosphäre, Schall. Schneller Zugriff, Abtransport der gestohlenen Meisterwerke per Autonomic, Verschwinden im Verkehrsgewühl, Scrambling des Kennzeichens, Untertauchen. Abliefern. Kassieren.

Da Sotheby's, Christie's und Co innerhalb der stark angewachsenen Oberschicht Eingruppierungen vornahmen – also diejenigen aussortierten, die sich als elitärer einstufen, als sie sind –, haben die angesehenen Häuser ihre Dienstleistungen ins All verlagert. Der Kreis der Bieter wurde dadurch noch überschaubarer, noch auserlesener ... kurzum: unvernünftig und unverschämte reich. Und auch die Künstler selbst haben sich einer Metamorphose unterzogen. Pinsel, Stechbeitel, Klüpfel, Stechnadeln oder Paletten gehören zu den Erinnerungen unbelehrbarer Nostalgiker. Einträgliche Kunst von heute besteht aus Nullen und Einsen. Nicht mein Ding, das ist klar. Aber als Diebin muss

mein persönliches Kunstempfinden eben hintanstellen. Ich beschaffe immer noch, was angefordert wird, kümmerere mich um die Details und Sorge für eine professionelle Ausführung. Risszeichnungen der Raumstationen. Fälschung meines ID-Codes. Hinflug. Abtransport. Diesen Teil der Umstellung habe ich bewältigt. Was ich jedoch noch mehr hasse als den Flug in einem Raumgleiter inmitten von Nobeluhren an knöchigen Handgelenken und Akoyaperlen um faltige Hälsen, ist die Abwesenheit von Gravitation.

Deshalb habe ich wohl die veränderte Haltung des Marshalls übersehen. Und was eine Patrone in der Schwerelosigkeit tut, kann ich genauso wenig voraussagen wie die Bewegung, die mein Körper jetzt wie von allein anstellt, als ich den Haltegriff loslasse und mich panisch abstoße, um dem Arm des Gesetzes zu entkommen. Ich rotiere unkontrolliert und stelle erneut verbittert fest, dass man mich hintergangen hat. Die Risszeichnungen der »Van Gogh«, die ich erhalten habe, sind falsch. Denn Null-g-Zonen sind dort nicht vermerkt. Entweder zeichnet sich mein Kontakt durch einen schrägen Sinn für Humor aus oder die Konkurrenz steckt dahinter. Ich vermute Letzteres. Und somit trudele ich plump in Seidenbluse und Palazzohosen durch einen Wartungstunnel, von dem ich nicht weiß, ob er auch wirklich in den Gang zu einer der Notkapseln führt, die auf mich wartet.

Für den Moment habe ich den Marshall abgehängt, aber das kann nicht von langer Dauer sein. Ich presse mich in eine Aussparung an der Wand und entdecke neben mir einen erstaunlich altmodisch aussehenden Hebel. Die Risszeichnung, die ich aktiviere, indem ich leicht auf den Verschluss meines unechten Tiffany-Armbands tippe, behauptet, die kleine Röhre dahinter brächte mich ebenfalls ans Ziel. Ich brauche ein Versteck. Wenn sich dieses Versteck gleichzeitig als Abkürzung erweist, kann mir das nur recht sein. Wenn. Wäre. Hätte. Könnte. Zu viele Konjunktive. Aber was bleibt mir anderes übrig? Ich betätige den Hebel, schlüpfte durch die entstehende Öffnung und schließe die Tür hinter mir. Wieder null g. Wäre ja auch zu leicht gewesen. Verärgert spucke ich gedämpft mehrere Flüche hintereinander aus, da fängt mein Rucksack plötzlich an zu vibrieren. Ich schließe den Mund und lausche. Es schnurrt. Leise und stetig. Annehme. Da ich mich für den Moment sicher fühle, nehme ich den Rucksack ab, lasse ihn vor mir schweben und nestele ungeschickt am Verschluss herum. Der weiße Papierlocher schwebt heraus. Auf seiner Kunststoffoberfläche erscheint ein großes Auge, und aus seiner Seite

schiebt sich eine Art Arm hervor. Weiß, glatt, ohne Finger natürlich, vorne abgeflacht und gerundet. Das Objekt scheint einen Antrieb zu besitzen, es schwebt auf mich zu und legt mir die Kunststoffrundung über die gesunde Schulter. Schmiegt sich an mich. Und schnurrt weiter. Sofort beruhigt sich mein Atem, mein Puls fällt. Das Ding weiß, was ich fühle, steuert dagegen – und ich hatte es vorher immer nur mit Handschuhen angefasst.

Das Objekt schwebt auf mich zu und legt mir die Kunststoffrundung über die gesunde Schulter. Schmiegt sich an mich. Und schnurrt weiter

In meiner Überraschung merke ich zu spät, dass sich die Verbindungstür wieder geöffnet hat. Mit einem heftigen Stoß bringt mich das weiße Kunstobjekt außer Schussweite, und die Kugel fliegt ein weiteres Mal an mir vorbei. Mein Magen krampft sich vor Angst zusammen, meine Herzfrequenz beschleunigt sich erneut. Das Schnurren stoppt abrupt. Plötzlich schießt das Objekt erstaunlich flink auf den Marshall zu und rammt ihm den Kunststoffarm ins linke Auge. Einmal. Zweimal. Mein Gegenspieler brüllt, versucht mit der freien Hand den wild gewordenen Angreifer wegzustoßen, der immer und immer wieder zustößt. Die Waffe entgleitet seinen Fingern und torkelt in meine Richtung, doch ich bin zu perplex, um nach ihr zu greifen. Ich verstehe einfach nicht, was sich vor meinen Augen abspielt. Blutropfen taumeln durch den Gang, das Gekreische des Marshalls nimmt zu, bis es schließlich völlig abbricht. Die Stille danach ist fast göttlich.

»Ich fühle dich« lässt endlich von ihm ab und dreht sich zu mir. Das schwere Lid mit den langen Wimpern senkt sich, klappt wieder auf. Ein schelmisches Blinzeln? Ein Zeichen der Vertrautheit? Als ich schließlich »Wir müssen weiter« krächzen kann, klingt meine Stimme, als gehöre sie jemand anderem.

Die Rundung legt sich abermals auf meine Schulter. Verschmiert meine Bluse mit dem Blut des Marshalls. Ich stöhne auf. Erneutes Schnurren. Nach dem, was eben geschehen ist, rechne ich damit, dass ich mich erst in ein paar Stunden wieder beruhigen werde, aber mein Körper reagiert wie auf Kommando: Meine Atemzüge werden lang, die Sicht klart auf, meine Hände zittern nicht mehr, die eiserne Faust lässt meine Eingeweide los. »Ich fühle dich« schiebt mich sanft und sicher durch den schmalen Korridor und hört erst auf zu brummen, als wir den Zugangsbereich der Fluchtkapseln erreichen.

Nachdem ich mich angeschnallt habe, setzt der Schmerz in meinem Arm mit voller Wucht ein. Mit aufeinander gepressten Lippen ignoriere ich ihn, gebe die Koordinaten ein, schnalle mich an und aktiviere den Autopiloten. Der Schub presst mich zuerst in das Polster, und dann schnell mein Kopf nach vorne, als habe er ein dringendes Date mit der Konsole. Ächzend gebe ich mich danach den weichen Formen meines Sitzes hin und betrachte die Sterne. Mein Rucksack auf dem Sitz des Kopiloten ist geöffnet. »Ich fühle dich« schwebt zuerst scheinbar unentschlossen über ihm, dann bewegt sich das Objekt in meine Richtung, schiebt mit dem Arm behutsam den zerfetzten Stoff zur Seite, klammert sich um die verletzte Stelle meines Oberarms und streichelt dabei meine Haut. Sofort stellen sich die Härchen auf. Endorphine schießen durch meine Blutbahn. Der Schmerz wird schwächer, bis er schließlich ganz verblasst, und die Augen fallen mir zu. Hinter meinen Lidern verschmilzt das Dunkel des Alls mit den hellen, pastos hingetupften Strudeln von Vincent van Goghs »Sternennacht«, den kreisenden Sonnen und weißen Turbulenzen. Blau. Gelb. Grün. Beruhigende Kreisel, begleitet von einem angenehm leisen und stetigen Schnurren.

Ich fühle dich. ◀

DIE AUTORIN

Kris Brynn alias Regine Bott studierte Kunstgeschichte, Literaturwissenschaft und Anglistik in Stuttgart und arbeitete danach als Lektorin. Seit 2014 schreibt sie Krimis und Sciencefiction. 2019 wurde ihr Roman »The Shelter« als bestes Debüt mit dem SERAPH-Preis für deutschsprachige Fantastik-Literatur ausgezeichnet. Im September dieses Jahres erscheint ihr SF-Noir-Thriller »Born«. »Ich fühle dich« ist ein Ableger ihres vierten Sciencefiction-Romans, der voraussichtlich 2022 veröffentlicht wird.

VORSCHAU



IGORCH / GETTY IMAGES / ISTOCK, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

SCHUTZSCHILD FÜR DIE ERDE

Einschläge von Asteroiden können ganze Landstriche verwüsten, und sie passieren immer wieder. Bis heute ist nur ein Bruchteil der hochhausgroßen Steinbrocken in unserer Umgebung bekannt. Beobachtungskampagnen sollen nach und nach alle Himmelskörper im Sonnensystem erfassen, die möglicherweise auf Kollisionskurs mit der Erde gelangen. Theoretisch lassen sich gefährliche Objekte rechtzeitig ablenken und die Katastrophen verhindern, doch praktisch ist noch keine Technik erprobt. Neue Raumsonden sollen das ändern.



BRANIER VON BRANDIS / GETTY IMAGES / ISTOCK

RIFFE IN SCHWERER SEE

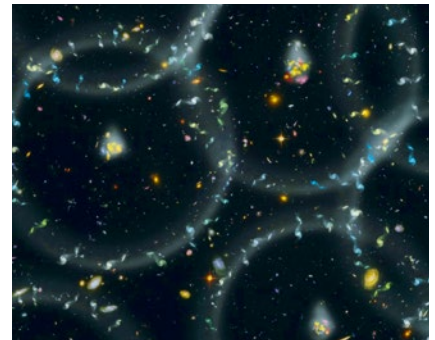
Tropische Korallenriffe gehören zu den am stärksten bedrohten Ökosystemen der Erde. Umweltverschmutzung, Überfischung und nicht zuletzt die Klimakrise setzen ihnen arg zu. Wie lassen sie sich schützen?



JOHANNYREBE / GETTY IMAGES / ISTOCK

DAS GROSSE EXPERIMENT

Es gibt zahlreiche Theorien, die das Bewusstsein beschreiben. In einer noch nie da gewesenen Kollaboration finden nun weltweit Versuche statt, die zwei der führenden Ansätze auf den Prüfstand stellen.



ZOSIA ROSTOMIANI, LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY

DIE KARTIERUNG DES ALLS

Systematische Vermessungen erfassen Millionen von Galaxien, die sich über Jahrmilliarden im Weltraum verteilt haben. Anhand dabei entstandener Muster könnten sich wichtige Fragen zur Entwicklung des Universums beantworten lassen.

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

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](https://www.spektrum.de/aktion/sdwabo)

DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.



Spektrum
der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR **25**
24.06.
2021

- > Auf der Venus bewegt sich was
- > Auch ohne Nachwuchs glücklich
- > Insektensterben durch Staudämme
- > Asiatische Elefanten quietschen mit den Lippen

TITELTHEMA: HELIUM-3-MYTHOS

Was ist dran am Helium-3-Hype?

Das viel versprechende Isotop könnte eine Kernfusion ohne verstrahlten Müll ermöglichen. Zwei unüberwindbar scheinende Hürden stehen der Vision allerdings noch im Weg.

FAMILIENGRÜNDUNG
Wenn aus Paaren Eltern werden

COVID-19-IMPfung
1,7 Milliarden Impfdosen später

LIBELLISTEN
Die Macht der Verleumdung

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)

