



ISBN 978-3-652-00963-8

4 196472 311006

# Die 25 großen Fragen der Wissenschaft

Was ist das Ich?

Wie wirklich  
ist die Wirklichkeit?Von wem  
stammen wir ab?

Warum träumen wir?

Wie kam das Leben auf  
die Erde?Was war  
vor dem Urknall?Gibt es  
das Nichts?

Wie endet die Welt?

NUR WER DAS  
**WEITTE**  
SUCHT, KANN  
*Neues finden.*

Nr. 21

**WALDEN** SEIT 2015  
ABENTEUER VOR DER HAUSTÜR  
weltweit!

**GEO WALDEN**

**DIE FERNWEH-AUSGABE**  
Touren & Tipps für 2021

Wir sind dann mal weg

Unterwegs mit WALDEN-Freunden in aller Welt

Baltic Sea Circle  
Die Ralley der anderen Art

Hoch hinaus!  
Klettern im Salzburger Land

Weit – der Film  
Wie es für die Macher weiterging

TOUREN-PLANER  
2021

Dein Reisejahr auf einen Blick

WALDEN

ALLES FÜR DAS DRAUSSEN IN DIR.

Heft oder Abo bestellen unter [walden-magazin.de/abo](http://walden-magazin.de/abo)

27





*Liebe Leserin, lieber Leser,*

immer wieder erfüllt mich ehrfürchtiges Staunen darüber, was Generationen von Wissenschaftlern alles herausgefunden haben über die Natur, den Menschen, die Erde, das Universum.

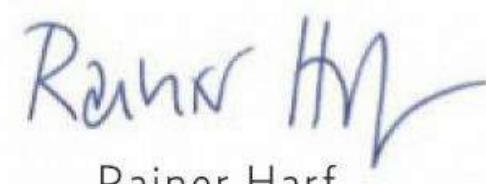
Physiker haben die winzigen Bausteine der Materie entdeckt, Atome und die noch kleineren Elementarteilchen. Biologen haben den Code des Lebens gefunden, die Erbsubstanz, und können erstaunlich präzise nachzeichnen, wie Gene das unfassbar komplexe biochemische Räderwerk in den Zellen steuern. Neuroforscher haben unseren Kopf durchleuchtet – ergründet, wo im Gehirn der Verstand sitzt und auf welche vielschichtige Art sich die Nervenzellen miteinander vernetzen.

Kosmologen haben den Blick ins All gerichtet, berechnet, dass die Abermilliarden Sterne und Galaxien durch einen Raum von mehr als 900 Trilliarden Kilometer Durchmesser fliegen. Und sie sind sogar imstande, mit ihrem Theoriegebäude zu rekonstruieren, wie dieses riesenhafte Universum einst, vor rund 13,8 Milliarden Jahren, entstanden ist – und zwar aus einem Punkt heraus, mit dem Urknall.

Dabei befindet sich die Forschung seit jeher in einem ständigen Fluss. Je mehr Wissen dazukommt, desto mehr Fragen tun sich auf. Neue Erkenntnisse verfeinern bestehende Annahmen, modifizieren Theorien – oder werfen lange geglaubte Wahrheiten über Bord. In dieser Ausgabe von GEOkompakt widmen wir uns den großen Fragen und Rätseln der Wissenschaft: Was ist das Wesen der Zeit? Gibt es das Nichts? Was war vor dem Urknall? Können wir unser Schicksal vererben? Wie endet das Universum?

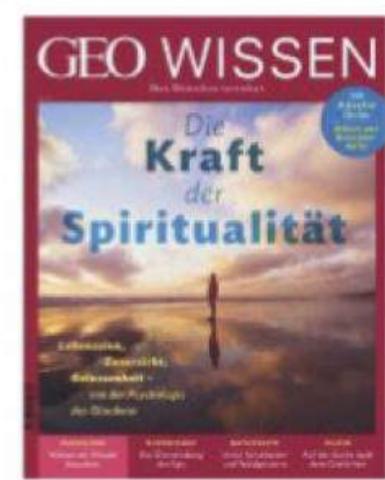
Gerade hier – in diesen Grenzbereichen zwischen Erkenntnis und Spekulation – offenbaren sich die unermüdliche Neugier der Forscher, ihr analytischer Verstand, ihr unerschöpflicher Ideenreichtum. Und nirgendwo lässt sich wohl besser staunen über das, was wir alles wissen über die Welt. Und auch: was nicht.

Herzlich,

  
Rainer Harf



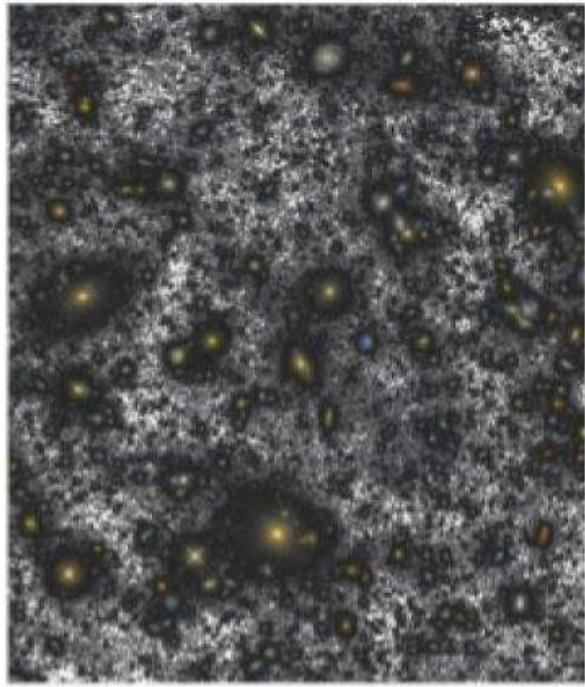
GEOkompakt erscheint viermal pro Jahr! Hier geht's zum Abo: [geo.de/kompakt-im-abo](http://geo.de/kompakt-im-abo)



Wie der Glaube an Übersinnliches dem Leben Kraft verleiht: in der neuen Ausgabe von **GEO WISSEN**



Von der wunderbaren Freundschaft zwischen Mensch und Tier: die neue Ausgabe von **WOHLLEBENS WELT**



## [20] Kosmologie

Das All mit seinen Galaxien ist aus dem Urknall hervorgegangen. Was war davor?



## [06] Stammesgeschichte

Aus zahlreichen Funden versuchen Forscher das Aussehen unserer entfernten Ahnen zu rekonstruieren



## [52] Evolution

Ob Tiere, Pilze oder Pflanzen: Die gewaltige Mannigfaltigkeit des Lebens geht auf einen Ursprung zurück. Doch wie entstand der erste Organismus?

## [78] Bewusstsein

Eines der größten Mysterien überhaupt: Wie schafft es unser Gehirn, dass wir uns als Ich empfinden?



## [24] Realität

Fälschlicherweise meinen wir oft, dass die Welt um uns herum genau so ist, wie wir sie wahrnehmen. Doch was überhaupt ist Wirklichkeit?



## [70] Physik

Jeder von uns ist mit ihr vertraut – doch je mehr Forscher über sie herausfinden, desto rätselhafter wirkt die Zeit





[90]

## Zoologie

Auch Tiere haben Verstand und Gefühle. Was unterscheidet uns von ihnen?

# INHALT

NR 65

1. Von wem <b>stammen</b> wir ab?	06
2. Was war vor dem <b>Urknall</b> ?	20
3. Wie <b>wirklich</b> ist die Wirklichkeit?	24
4. Haben <b>Pflanzen</b> Gefühle?	30
5. <b>Wie viele</b> Menschen werden auf der Erde leben?	34
6. Inwieweit vererben wir unser <b>Schicksal</b> ?	38
7. Was geht im <b>Erdkern</b> vor sich?	42
8. Werden <b>Computer</b> denken können?	46
9. Wie kam das <b>Leben</b> auf die Erde?	52
10. Wie sind die <b>Primzahlen</b> verteilt?	62
11. Wie frei ist unser <b>Wille</b> ?	64
12. Was ist das Wesen der <b>Zeit</b> ?	70
13. Was ist das <b>Ich</b> ?	78
14. Existiert eine zweite <b>Erde</b> ?	82
15. Was unterscheidet den Menschen vom <b>Tier</b> ?	90
16. Gibt es das <b>Nichts</b> ?	102
17. Warum <b>träumen</b> wir?	108
18. Wie <b>alt</b> können wir werden?	114
19. Gibt es die <b>Weltformel</b> ?	118
20. Was ist ein <b>Schwarzes Loch</b> ?	120
21. Wie <b>chaotisch</b> ist die Welt?	124
22. Woraus sind die <b>Dinge</b> gemacht?	130
23. Was ist die <b>Dunkle Materie</b> ?	132
24. Wie entsteht <b>Moral</b> ?	138
25. Wie <b>endet</b> die Welt?	144

Die Welt von GEO 146 Impressum, Bildnachweis 147

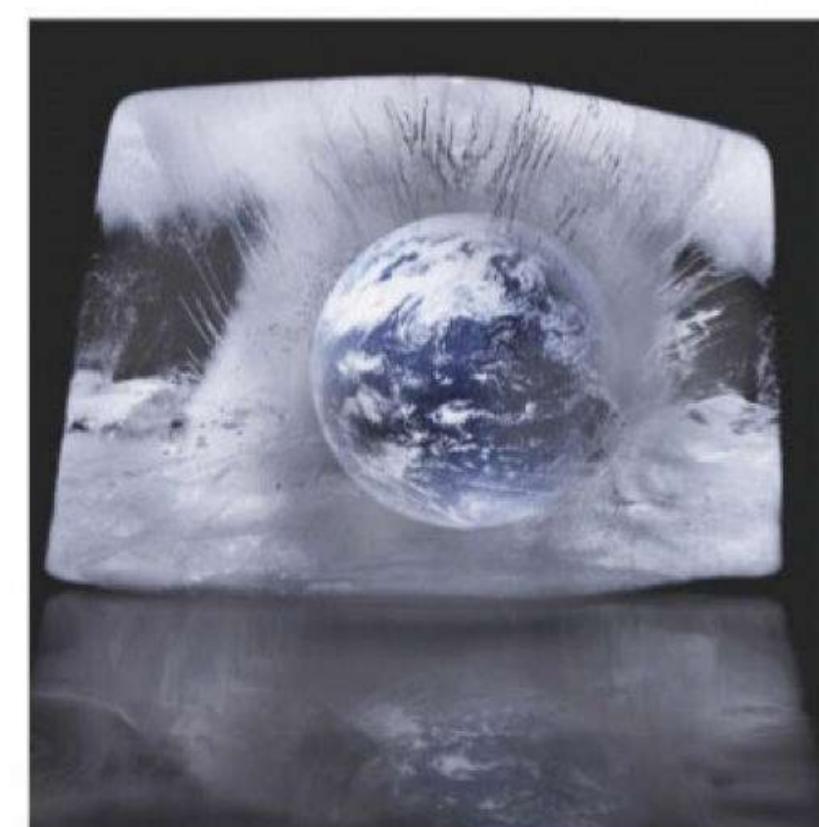
Fakten und Daten in diesem Heft sind vom GEOkompakt-Verifikationsteam auf Präzision, Relevanz und Richtigkeit überprüft worden. Kürzungen in Zitaten werden nicht kenntlich gemacht. Redaktionsschluss dieser Ausgabe: 6. November 2020. Weitere Informationen zum Thema und Kontakt zur Redaktion: [www.geokompakt.de](http://www.geokompakt.de).



[82]

## Exoplaneten

Mit ausgeklügelten Methoden suchen Forscher nach außerirdischem Leben



[144]

## Zukunft

Wird das Universum in vielen Milliarden Jahren einen Kältetod sterben?

# Von wem stammen wir ab?

Text: Henning Engeln

Rekonstruktionen: Kennis & Kennis

Je mehr Wissenschaftler über den Ursprung des **modernen Menschen** herausfinden, desto deutlicher zeigt sich: Der Weg zum ***Homo sapiens*** verlief keineswegs geradlinig. Unser Ahnenstamm scheint vielfältiger zu sein als lange gedacht



*Homo sapiens*, der »weise Mensch« taucht erstmals vor etwa 300 000 Jahren in Afrika auf. Dank der lebensechten Rekonstruktionen der niederländischen Paläokünstler Adrie und Alfons Kennis können wir uns eine Vorstellung von unseren Vorfahren machen





**Zwei, die uns nahestehen:**  
Der Neandertaler (links), dessen  
Hautfarbe vermutlich heller war  
als die seiner afrikanischen Ahnen  
(er verschwand vor 40 000 Jahren).  
Und *Homo erectus* (»der Aufrechte«),  
der vor 110 000 Jahren letzte  
Spuren in China und auf Java  
hinterlassen hat



Sein Körperbau glich schon weitgehend dem  
unseren: *Homo ergaster* (1.9 Mio.–700 000 Jahre)  
war ein Läufertyp, der von Afrika gen Osten  
wanderte und sich auf seinem Weg zu einer neuen  
Menschenform entwickelte







***Homo floresiensis* war ein nur etwa ein Meter großer, eigentümlicher Zwergmensch von der Insel Flores. 50 000 Jahre vor unserer Zeit verliert sich seine Spur**

# S

## **Schädel Nummer 5 war eine Sensation.**

Über Jahre hinweg hatten die Forscher unter der mittelalterlichen Ruinenstadt Dmanisi, 85 Kilometer südwestlich der georgischen Hauptstadt Tiflis, gegraben und immer wieder neue Fossilien zu Tage gefördert. Die Knochenfunde waren 1,8 Millionen Jahre alt, und allein dieses Alter war ein Knüller: Es lieferte den Beweis, dass Frühmenschen den Kontinent ihrer Entstehung, Afrika, bereits vor so langer Zeit verlassen hatten und Richtung Asien gezogen waren – früher als bis dahin vermutet.

Schädel Nummer 5 aber, das wurde rasch klar, würde das Denken über die Entstehung der Menschheit noch viel gründlicher auf den Kopf stellen.

Der Frühmensch, auf dessen Hals der Schädel einst saß, hatte ein breites Gesicht mit stark vorspringendem Ober- und Unterkiefer, fast wie eine äffische Schnauze. Vor allem aber steckte in seinem Schädel ein geradezu mickriges Gehirn von 546 Kubikzentimeter Volumen. Das ist vergleichbar mit dem Denkorgan der Australopithecinen – jener kleinhirnigen afrikanischen Vormenschen, die zwar bereits aufrecht liefen, denen die Forscher aber noch nicht die Intelligenz und den Status der Gattung *Homo* zubilligen.

Die übrigen vier in Dmanisi gefundenen Schädel boten dagegen größeren Hirnen Platz – und ähnelten eher den Köpfen von höher entwickelten Frühmenschen wie *Homo habilis* („der Geschickte“) oder *Homo erectus* („der Aufrechte“).

Wären die fünf Relikte nicht am selben Ort und in derselben Schicht entdeckt worden – die Paläoanthropologen hätten sie sicher verschiedenen frühen Menschenarten zugeordnet, jeweils eigenen Entwicklungsstufen auf dem Weg

der Menschwerdung. Aber sie lagen nun einmal zusammen. Und so kamen die Forscher 2013 zu einem kühnen Schluss: Dies sind die Überreste nur einer Spezies, nämlich des *Homo erectus*. Die einzelnen Vertreter hatten schlicht einen sehr unterschiedlichen Körperbau.

Warum auch nicht? Das ist so, als wenn in ferner Zukunft Wissenschaftler die Knochen des langen Sprinters Usain Bolt und des rundlichen Schauspielers Danny DeVito nebeneinander fänden – und sich dann hoffentlich auch nicht dazu hinreißen ließen, die beiden Wesen verschiedenen Arten zuzuordnen.

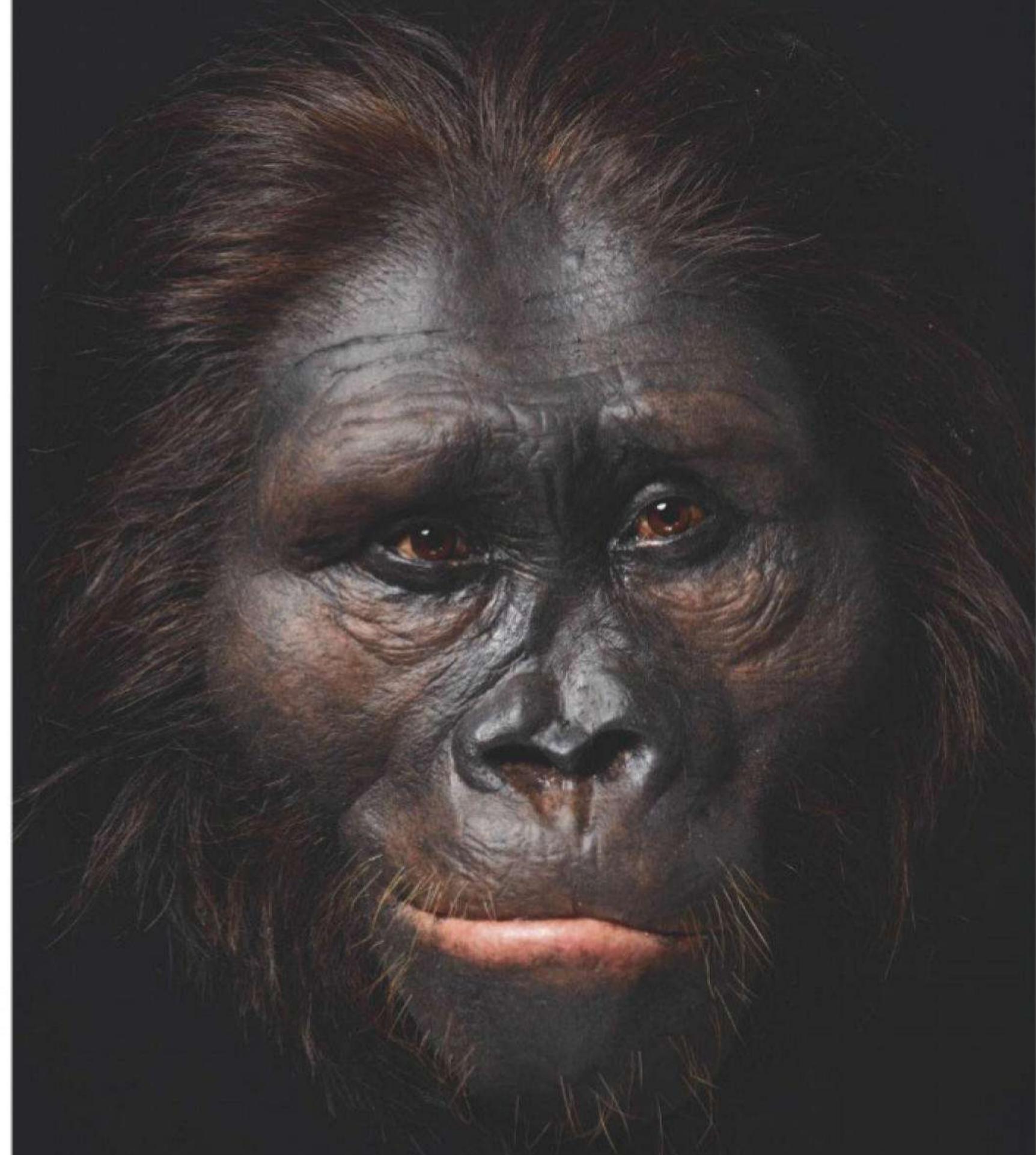
Für die Paläoanthropologen unserer Gegenwart aber war die Behauptung einer solchen körperlichen Varianz innerhalb einer einzigen Spezies eine Provokation. Sie rüttelte mächtig an einem der Pfeiler, auf denen das Konzept von der Menschwerdung ruht, das sich Forscher über 100 Jahre in mühevoller Kleinarbeit zusammengebastelt haben.

Bis dahin war es üblich, schon bei kleinen, manchmal kleinsten Unterschieden eines Skeletts eine eigene Art zu definieren. So ergab sich ein stabiler Stammbaum aus säuberlich voneinander getrennten Arten.

Doch nun schien nichts mehr gesichert: War *H. habilis* vielleicht nur ein kleiner *Homo rudolfensis*? Oder der *H. erectus* auf Java eine asiatische Variante des afrikanischen *Homo ergaster*? Waren all die sorgsam unterschiedenen homininen\* Knochen auf einmal Zeugnisse einer viel komplexeren Gemengelage?

„Inzwischen wird immer deutlicher, wie sehr sich auch damals die Mitglieder einer Art äußerlich unterscheiden konnten“, sagt Ottmar Kullmer vom Senckenberg Forschungsinstitut in Frankfurt. „Nicht nur von Region zu Region, sondern auch beeinflusst durch individuelle Faktoren ihrer direkten Umwelt, wie die Ernährung oder auch körperliche Tätigkeiten während des Heranwachsens und so weiter.“ Für die Ur- und Frühmenschenforschung ist das ein Schritt nach vorn – der zugleich viele sicher geglaubte Erkenntnisse entwertet oder infrage stellt.

Die Dmanisi-Funde waren indes nicht der einzige Schlag, den die Paläoanthropologie in jüngster Zeit einstecken musste. Auch anderswo sind Forscher immer wieder auf neue Fossilien mit



Der halb äffisch, halb menschlich anmutende *Australopithecus afarensis* gehörte zu den ersten aufrecht gehenden Primaten, lebte vor über drei Millionen Jahren und ist wohl ein ferner Urahn von Neandertaler und *Homo sapiens*

*Die Bausteine  
des Humanen  
haben sich  
mehrfach  
entwickelt –  
bei verschiedenen  
Menschentypen*

irritierenden Körpermerkmalen gestoßen. Und erst recht fordern die Erkenntnisse einer noch jungen Disziplin, der Paläogenetik, die Gemeinde der Urmenschenforscher heraus (dazu später mehr).

So radikal ist die Wende, dass manche inzwischen gar die Vorstellung eines menschlichen Stammbaums aufgeben, an dem jeder Ast eine Spezies präsentiert und nur einer dieser Äste zu uns heutigen Menschen führt – während andere Verzweigungen enden, weil die Arten ausgestorben sind.

Immer mehr Forscher vergleichen die Menschheitsevolution nun eher mit einem breiten Fluss, der sich verzweigt, dessen ausufernde Arme in neue Richtungen führen, sich aber nicht selten wieder vereinen.

Flussdelta statt Stammbaum – so sieht das neue Bild der Menschheitsevolution aus. Eine erste Verzweigung in diesem Flussdelta, das zum Menschen führt, ist die „Erfindung“ des aufrechten Gangs. Und die rückt immer weiter in

\* Zu den Homininen zählen die Menschen und alle aufrecht gehenden Verwandten/Vorläuferformen.

die Vergangenheit: Im Jahr 2000 tauchten in Kenia die sechs Millionen Jahre alten Knochen von *Orrorin tugenensis* auf, im Jahr danach stießen Forscher im Wüstenland des Tschad auf einen sieben Millionen Jahre alten fossilen Schädel von *Sahelanthropus tchadensis* – beide zum aufrechten Gang fähig. Noch spektakulärer war die im November 2019 bekanntgegebene Entdeckung der Tübinger Paläoklimatologin Madelaine Böhme: Sie hatte in einer Tongrube im Ostallgäu die fossilen Überreste von *Danuvius guggenmosi*

entdeckt – eines Menschenaffen, der sowohl klettern als auch auf zwei Beinen laufen konnte und bereits vor fast zwölf Millionen Jahren lebte.

Offenbar ist der aufrechte Gang also mehrfach unabhängig voneinander entstanden. Und Millionen Jahre lang streiften Vormenschen auf zwei Beinen durch die afrikanische Landschaft. Menschen allerdings waren sie noch nicht.

Auch die Fähigkeit, Werkzeuge herzustellen, gilt nicht mehr als exklusives Merkmal des Menschen. Lange schien es,

als seien vor rund 2,5 Millionen Jahren *H. habilis* und dann *H. rudolfensis* die ersten mit entsprechender Geistesausstattung gewesen. Doch im Mai 2015 entdeckten Paläoanthropologen in Tansania eine Ansammlung von 3,3 Millionen Jahre alten scharfkantigen Steinabschlägen – einfache Werkzeuge, offensichtlich gezielt gefertigt. Also waren auch Vormenschen, Australopithecinen, zu solchen Abstraktionsleistungen in der Lage.

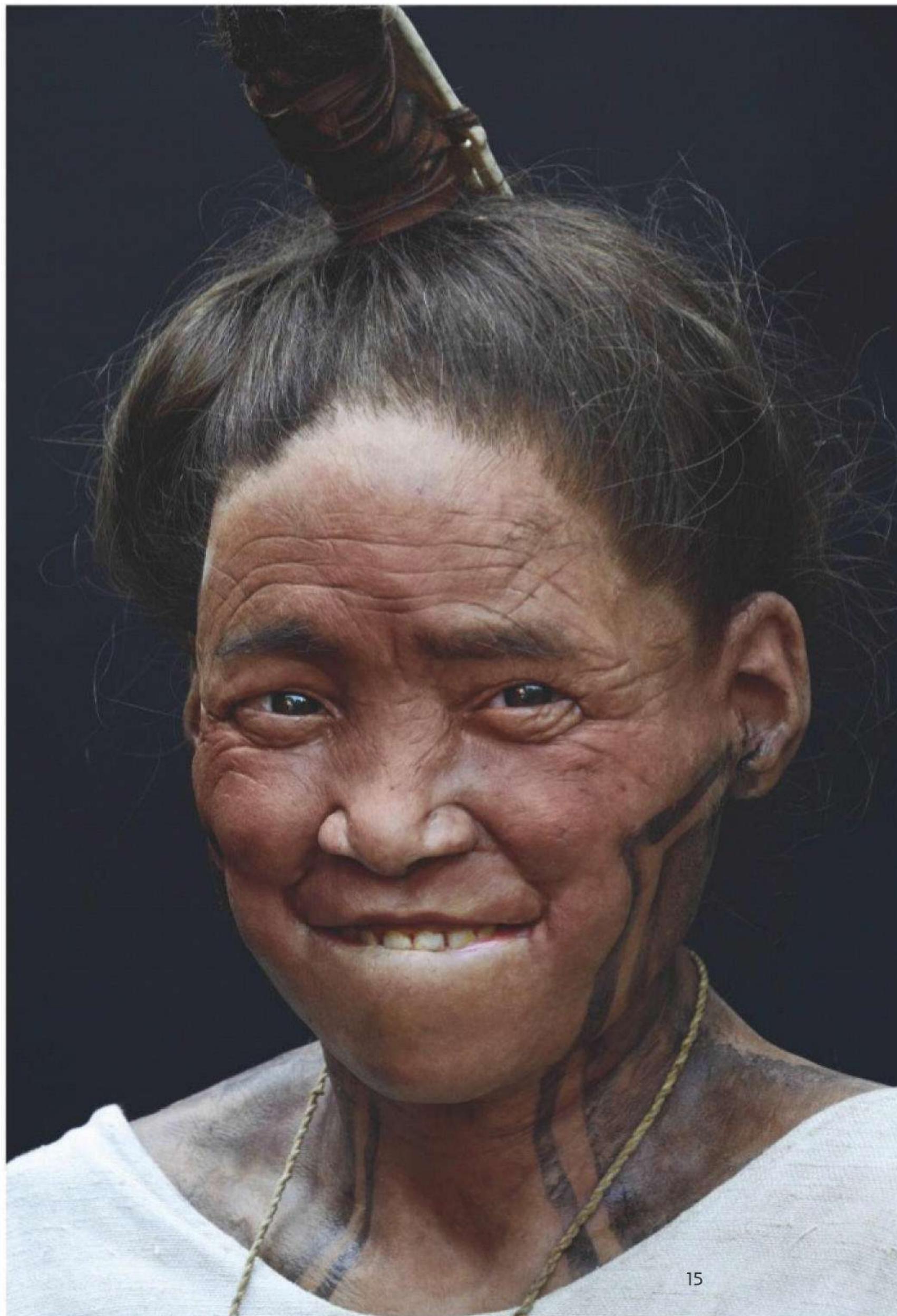
Und wie steht es mit dem dritten Kriterium des Menschlichen, der Größe des Gehirns? Geht zumindest der Gewinn an Denkmasse tatsächlich und verlässlich einher mit dem Aufstieg der Gattung *Homo*? Auch dieser Zusammenhang bröseln, seit Wissenschaftler im Jahr 2003 in einer Höhle auf der indonesischen Insel Flores auf die fossilen Überreste eines nur einen Meter großen Frühmenschen stießen, der dort bis vor rund 50 000 Jahren lebte, wie Datierungen aus dem Jahr 2016 erwiesen.

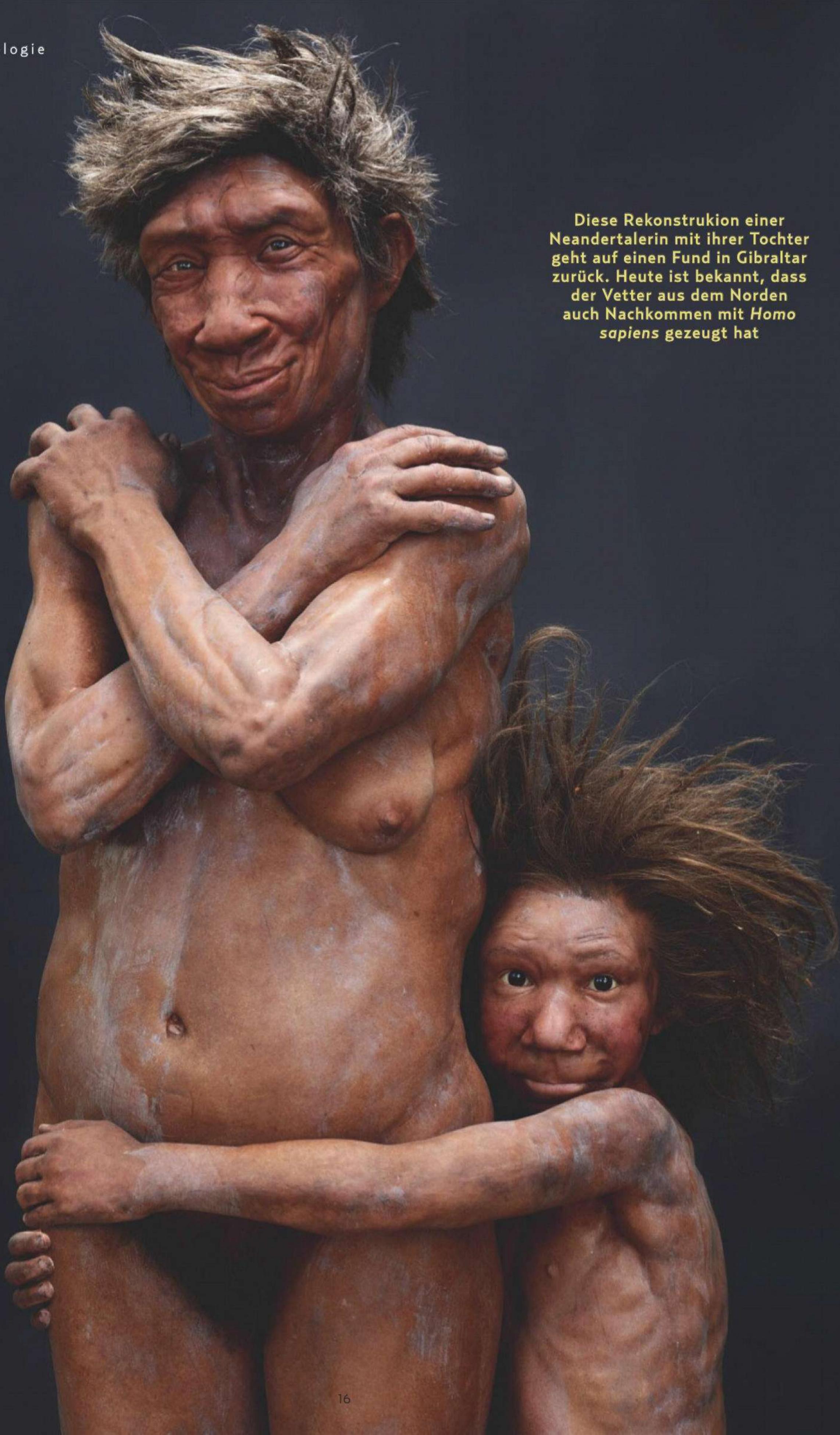
Das Frappierende an dem Fund: Das Gehirn dieses *Homo floresiensis* genannten Zwerges hatte gerade mal die Ausmaße einer Grapefruit. Im Vergleich zum Denkorgan der modernen Menschen war es so winzig, dass manche Forscher argwöhnten, es müsse sich bei den Menschlein um krankhaft veränderte Exemplare des *Homo sapiens* gehandelt haben. Doch die Form ihrer Knochen spricht eher dafür, dass die Zwergen von Flores eine eigene Entwicklungslinie darstellen. Und zwar eine mit beträchtlicher Intelligenz, da *Homo floresiensis* offenbar Waffen aus Stein herstellte, mit denen er Warane, Riesenratten und Zwerglefanten zur Strecke brachte.

# V

**Vieles ist also durcheinandergeraten** in der Paläoanthropologie: Nicht allein der Mensch vermochte auf zwei Beinen zu gehen, nicht allein der Mensch verfügte über handwerkliches Geschick, und auch ein sehr kleines Gehirn reicht offenbar aus, um typisch menschliche Verhaltensweisen zu steuern.

**Aus der Jungsteinzeit stammt diese Frau. Vielleicht zählte sie zu den ersten Menschen, die nicht mehr als Jäger und Sammler umherstreiften, sondern sesshaft – und Bauern – wurden**





Diese Rekonstruktion einer Neandertalerin mit ihrer Tochter geht auf einen Fund in Gibraltar zurück. Heute ist bekannt, dass der Vetter aus dem Norden auch Nachkommen mit *Homo sapiens* gezeugt hat

Die Bausteine des Humanen, unsere Alleinstellungsmerkmale in der Tierwelt – sie sind weder spät in der Entwicklungslinie noch synchron entstanden. Vielmehr haben sie sich unabhängig voneinander herausgebildet – bei verschiedenen Menschenformen.

Den Weg der Menschwerdung nachzuvollziehen ist damit nicht einfacher geworden. Auch weil die Zahl menschenähnlicher Wesen immer größer wurde. Vor drei bis vier Millionen Jahren teilten sich in Afrika mindestens drei Vormenschen-Typen den Lebensraum: *Australopithecus afarensis* ging schon sehr gut aufrecht, konnte sich aber noch in Bäumen hangelnd fortbewegen. Er bewohnte ein Mosaik aus Wald- und Graslandschaft. *Australopithecus anamensis* dagegen war mehr an die trockene, offene Landschaft rund um den Turkanasee angepasst. Und *Kenyanthropus platyops*, westlich des Turkanaees heimisch, war dank kleinerer Backenzähne mit dickerem Zahnschmelz möglicherweise auf weiche Nahrung spezialisiert.

Und vor rund zwei Millionen Jahren tummelten sich, zeitgleich, *Homo habilis* und *Homo rudolfensis* in den Landschaften Ostafrikas. Ersterer klein, zierlich und einem Australopithecus noch recht ähnlich, der zweite mit kräftigerem Kiefer ausgestattet. Ob es sich wirklich um zwei Arten handelte, ist umstritten.



Vor spätestens 45 000 Jahren wanderte der anatomisch moderne Mensch nach Europa. In Tschechien fanden Forscher die Skelettreste eines steinzeitlichen Jägers, der so wie hier dargestellt ausgesehen haben könnte

# D

**Die frühe Vielfalt der Homo-Varianten** wurde im Herbst 2015 durch einen weiteren Fund in einer südafrikanischen Höhle bereichert: Dort tauchte *Homo naledi* auf – ein Wesen mit einer erstaunlichen Mischung aus äffischen und menschlichen Merkmalen. Es besaß Hände mit langen, gekrümmten, zum Klettern geeigneten Fingern, jedoch Daumen und Handgelenke, die an spätere Menschen erinnern, und auch seine Füße wirkten menschlich. Es hatte ein bescheidenes Gehirn, dessen Strukturen sich jedoch deutlich von Affen und Vormen-

schen unterschieden. Verblüfft waren die Forscher, als ihnen die Datierung gelang, die sie 2017 veröffentlichten: *Homo naledi* tummelte sich vor 335 000 bis 236 000 Jahren auf Südafrikas Savannen – in einer Epoche also, in der bereits der *Homo sapiens* existierte.

Und noch eine Überraschung: Im April 2019 gab ein internationales Forscherteam die Entdeckung einer weiteren Menschenart bekannt, die sie *Homo luzonensis* nennen. Es waren wohl eher kleinvüchsige Gestalten, die bis vor 67 000 Jahren auf Luzon, der größten philippinischen Insel, lebten.

Damit wird immer deutlicher: Es gab eine große Vielfalt von Menschenformen und die Grenzen zwischen den verschiedenen Vor- und Urmenschen waren meist fließend. Und wenn sie sich begegneten, dann kamen Männer und Frauen

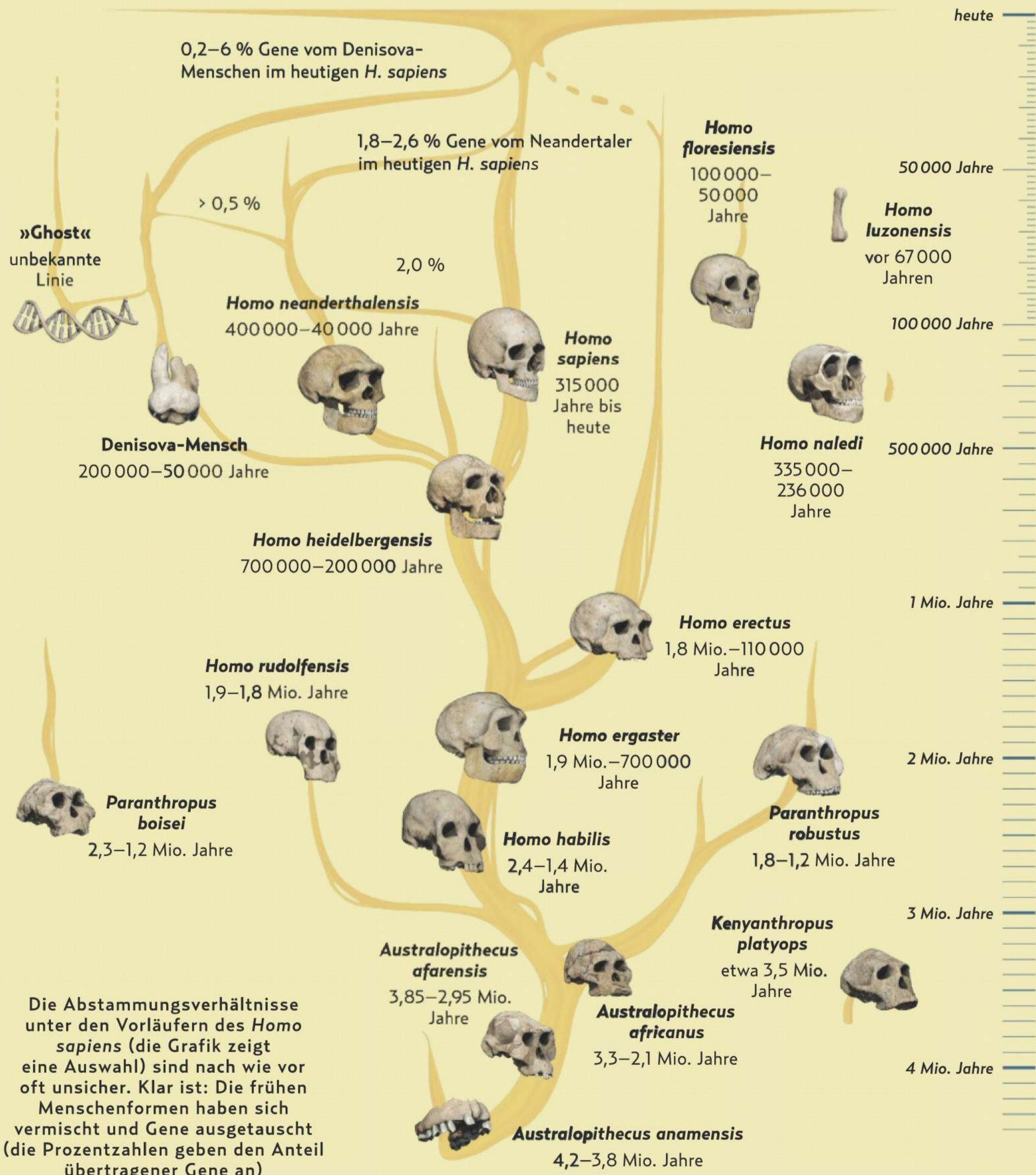
einander nahe, sehr nahe. Sie hatten Sex, und so gelangten Gene aus der einen, an eine bestimmte Umwelt angepassten Population in die andere – und erweiterten deren Fähigkeiten. Das, so sehen es viele Paläoanthropologen heute, gab der Evolution Schwung. Der Erfolg des *Homo sapiens* – er hatte viele Väter. Und Mütter.

Es ist eine Geschichte von humaner und ökologischer Vielfalt, die sich etwa so liest: In der Periode vor dreieinhalb bis zwei Millionen Jahren wurde das Klima in Afrika allmählich kühler und trockener. Den Trend unterbrachen kurzzeitig und lokal immer wieder wärmere oder feuchtere Phasen.

Gruppen von Homo-ähnlichen Wesen passten sich an die schwankenden Lebensbedingungen an. Wie um die späteren Forscher zu verwirren, entwickelten sie höchst unterschiedliche Anatomien,

# Der Lauf der Evolution

Inzwischen vergleichen Forscher die Menschwerdung mit einem Flusssystem, dessen Arme sich verzweigen – und später durchaus wieder verbinden können



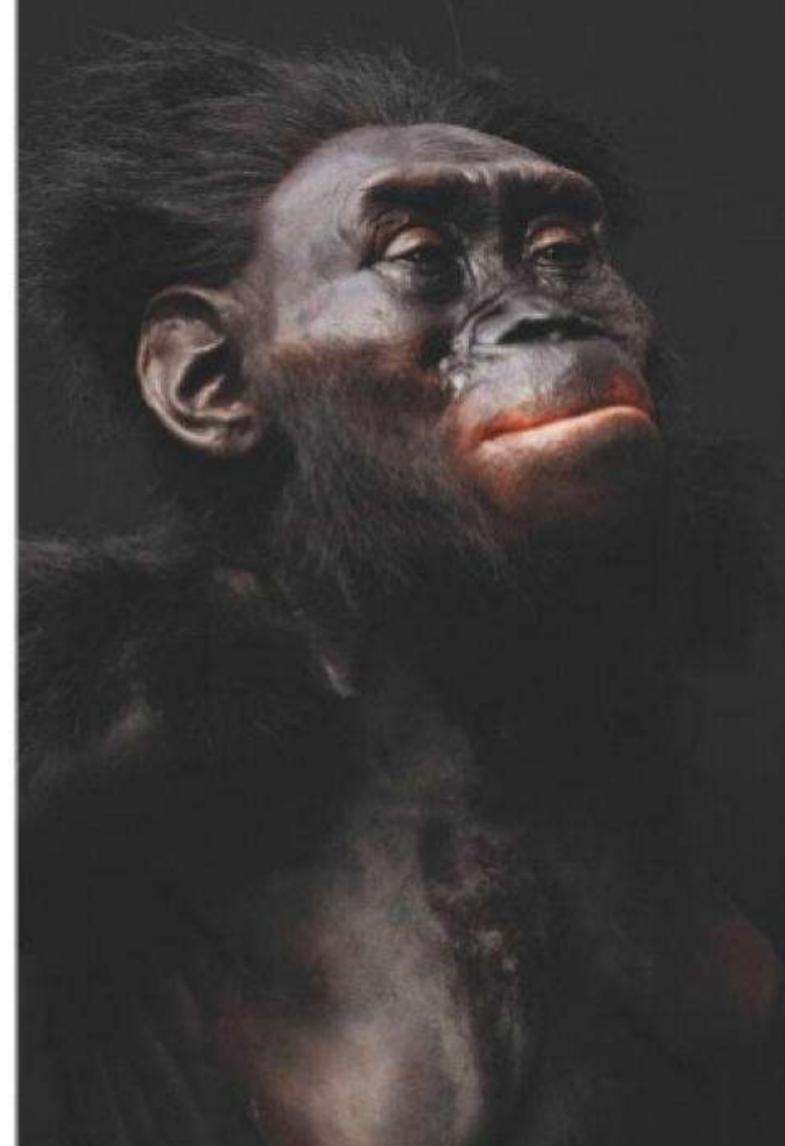
Gehirngrößen und Zahnformen. Die einen mögen zum Teil noch auf Bäumen oder am Waldrand, andere in trockenen Savannen gehaust haben, manche mögen eher Früchte und Insekten gefuttert, andere Knollen aus dem Boden gegraben oder Aas vertilgt haben. Auch heute noch ernähren sich Menschen in unterschiedlichen Kulturen sehr verschieden, was Auswirkungen etwa auf den Körperbau hat.

Über einen langen Zeitraum kristallisierten sich bei jeder einzelnen Frühmenschengruppe typische Merkmale immer klarer heraus. Erst der genetische Austausch zwischen den Populationen brachte dann jene Mixtur zusammen, die der Gattung *Homo* zum Durchbruch verhalf.

Einmal auf der Weltbühne, brachte sie vor circa 1,9 Millionen Jahren einen Läufertyp mit langen Beinen hervor, der es mit heutigen Marathon-Athleten hätte aufnehmen können. Sein Körperbau ähnelte schon weitgehend dem unseren, nur sein Gehirn war deutlich kleiner. Dieser Mensch, *Homo ergaster* (von manchen Forschern auch als frühe afrikanische Form des *Homo erectus* gewertet), verließ seine Urheimat Afrika und zog (offenbar auch via Dmanisi) gen Osten – wobei er sich auf dem Weg zum *Homo erectus* entwickelte. Er gelangte nach China und bis nach Java. Dort wiesen Forscher 1,66 Millionen Jahre alte Überreste von ihm nach.

Die Entwicklung blieb indes nicht stehen. Aus *Homo ergaster* wurde *Homo heidelbergensis*. Dessen Clans wanderten nach Europa, wo sie sich zum Neandertaler weiterentwickelten. In Afrika ging aus dem *Homo heidelbergensis* vor rund 300 000 Jahren (nach heutigem Stand) der „weise Mensch“ hervor, der *Homo sapiens* – erneut als Ergebnis diverser Techtelmechtel in verschiedenen Regionen des Kontinents. Er war ausgestattet mit einer enormen Durchsetzungskraft und Flexibilität. Beerdigt ist damit die alte Vorstellung, die Wiege der Menschheit habe nur in eng eingegrenzten Regionen Ost- oder Südafrikas gestanden. Statt eines klar definierbaren, regionalen Ursprungs bleiben ungezählte Menschheitswiegen – weit verteilt über einen Kontinent.

Den zu verlassen, machte sich der moderne Mensch früher auf als noch bis



**Zu den besterhaltenen Fossilien früher Menschenformen zählt Lucy, eine *Australopithecus*-Frau aus dem heutigen Äthiopien, die noch stark äffische Züge trägt**

vor kurzem gedacht und erreichte bereits vor mindestens 177 000 Jahren den Nahen Osten. Spätestens vor 100 000 Jahren zog er weiter und eroberte dann in einer beispiellosen Ausbreitungswelle den Globus. Und traf dabei auf seine archaischen Vettern, die lange vor ihm auf Wanderschaft gegangen waren.

Was dabei geschah, ist heute dank der Paläogenetik genauer bekannt. Vor allem der Schwede Svante Pääbo, der am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig forscht, hat das Verfahren vorangetrieben, mit dem sich

**Sexabenteuer  
gab es über  
Artgrenzen  
hinweg –  
immer wieder  
hat Erbmaterial  
sich gemischt**

Erbgut aus jahrzehntausendealten Knochenrelikten entziffern lässt.

Der Blick in den molekularen Bauplan ausgestorbener Urmenschen förderte einige Überraschungen zutage: So zeigte sich, dass alle heutigen Menschen außerhalb Afrikas etwa 1,8 bis 2,6 Prozent Neandertaler-Gene in sich tragen. Offenbar hatten die aus Afrika hinauswandernden *Homo-sapiens*-Horden sich vor 60 000 bis 50 000 Jahren im Nahen Osten und später auch in Europa mit den dort lebenden Neandertaltern eingelassen.

In einem weiteren Coup gelang es dem Team von Pääbo, die DNS eines in der sibirischen Denisova-Höhle gefundenen Fingerknochens zu entschlüsseln. Die Analyse ergab: Das Relikt muss zu einer bislang unbekannten Menschenform gehören, die noch bis vor rund 50 000 Jahren, parallel mit Neandertaltern und *Homo sapiens* also, in Asien gelebt hatte.

Noch erstaunlicher: Das Erbgut heutiger indigener Völker aus Neuguinea, Australien und Ozeanien enthält drei bis sechs Prozent der DNS dieses Denisova-Menschen. Also muss er auch mit dem modernen Menschen Nachkommen gezeugt haben. Wenig verwunderlich, dass außerdem Denisova-Mensch und Neandertaler es nachweislich miteinander trieben.

All diese Befunde der Paläogenetik passen zum neuen Bild des Flussdeltas, das den Stammbaum als Symbol der Menschwerdung abgelöst hat. Sie beweisen: Die Geschichte der Menschheit ist eine der Seitensprünge. Immer wieder haben sich Menschenformen gepaart und Teile ihres Erbmaterials einander mitgegeben. Die Grenzen zwischen den vermeintlichen Arten sind von jeher fließend.

Für viele Forscher, so auch für Svante Pääbo, sind all diese frühen Menschen und wir heutigen Erdenbürger sogar Bestandteil einer einzigen erdumspannenden „homininen Metapopulation“ – eines Netzes verschiedener Menschengruppen, die zumindest über einen schmalen Genfluss miteinander verbunden sind.

Anders formuliert: Der *Homo sapiens* hat sich hilfreiches Erbmaterial aus dem gemeinsamen Genpool herausgegriffen, hat von den anderen profitiert und erst dadurch eine Karriere gemacht wie keine Menschenform zuvor. •

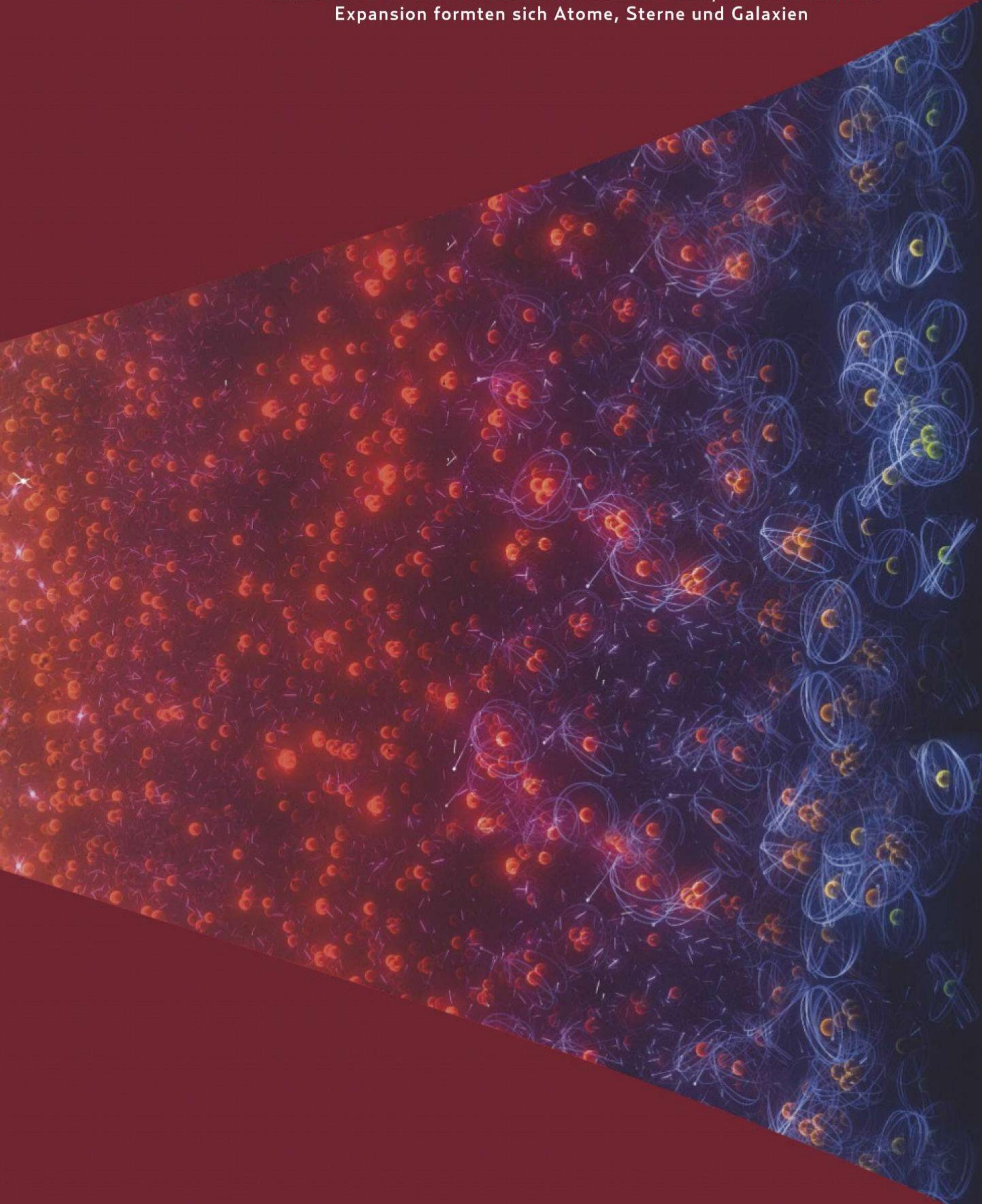
# Was war vor dem Urknall

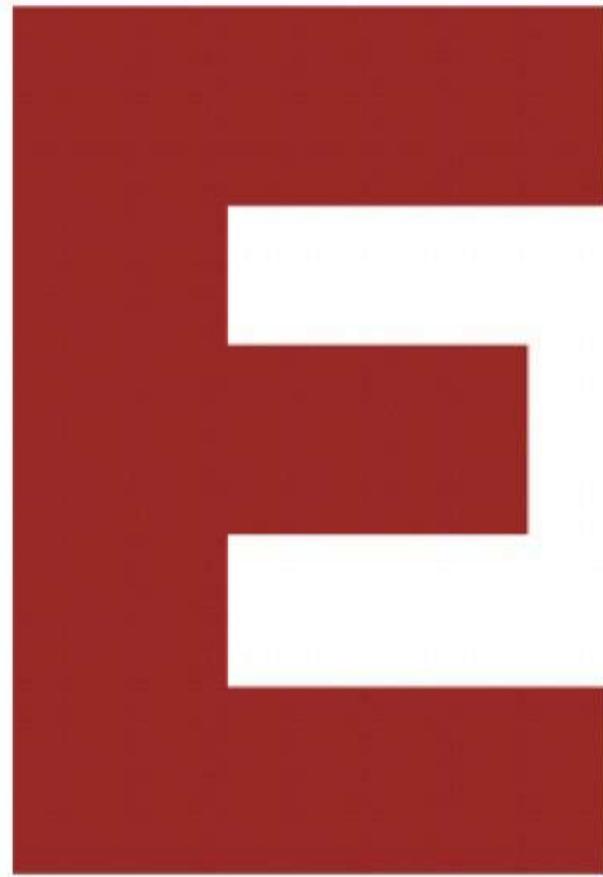


Text: Klaus Bachmann

**Es ist das wohl größte Mysterium des Universums:** Entstand das Weltall aus dem Nichts oder gab es davor bereits etwas? Seit Jahrzehnten nähern sich Physiker dieser Frage mit Experimenten, Formeln und Theorien. Was sie herausfinden, klingt wie kühne Science-Fiction – und könnte unser Weltbild revolutionieren

**Nach den gängigen Modellen entstand das Universum vor rund 13,8 Milliarden Jahren im Urknall: Zunächst war alle Materie in einem winzigen Punkt konzentriert, der sich explosionsartig ausdehnte. Erst dadurch bildeten sich Raum und Zeit, mit zunehmender Expansion formten sich Atome, Sterne und Galaxien**





**Eines wissen wir mit Sicherheit:** Unser Universum dehnt sich aus. Eine Erkenntnis, aus der sich fundamentale Schlüsse über die Vergangenheit des Kosmos ziehen lassen: Könnten wir in der Zeit zurückgehen, würde das Universum kleiner und kleiner werden. Rein mathematisch betrachtet, schrumpfte schließlich alles auf einen Punkt zusammen.

Aus eben dieser Überlegung ist die unter Wissenschaftlern weitgehend anerkannte Theorie erwachsen, dass die Welt vor etwa 13,8 Milliarden Jahren aus diesem Punkt entstanden ist. Dass in diesem Punkt Raum und Zeit geboren wurden (siehe auch Grafik Seite 20). Der Beginn jenes spektakulären Prozesses wird als Urknall bezeichnet.

Doch ein möglicherweise unlösbares Rätsel tut sich bei der naheliegenden Frage auf: Was war vor dem Urknall?

Die Kosmologen haben schlicht keine Antwort darauf. Denn wie sollte man auch wissenschaftlich vor den Beginn von Zeit und Raum schauen können?

**Freilich lässt sich spekulieren:** Vielleicht existierte das Universum ja schon vor dem Urknall. Es zog sich zusammen, bis die Materie unvorstellbar dicht komprimiert war. Dann gab es eine Art Rückprall, und das Universum begann sich wieder auszudehnen. Dieser Rückprall wäre der Urknall. Aber er wäre nicht der Anfang von allem gewesen.

Wie das Universum ausgesehen haben könnte, das unserer Welt vorausgegangen ist, ist Gegenstand verschiedener Theorien.

In den Augen mancher Physiker ist die derzeit beste Theorie die Stringtheorie. Sie besagt, dass die Bausteine des Universums aus „Strings“ bestehen, win-

zig kleinen Fäden. Danach gibt es insgesamt zehn Raumdimensionen. Von denen nehmen wir allerdings nur drei wahr. Diejenigen Dimensionen, die wir nicht erkennen, sind winzig klein aufgerollt. Dadurch sind sie für uns unsichtbar.

Es ist in gewisser Weise so wie bei einem Draht, der auch drei Dimensionen hat, aus der Distanz aber wie ein eindimensionales – ein ausschließlich in der Länge ausgedehntes – Objekt aussieht. Und die Geometrie der aufgewickelten Dimensionen bestimmt die physikalischen Gesetze in den uns bekannten drei Raumdimensionen.

Zwar übersteigt diese Theorie die menschliche Vorstellungskraft. Schließlich ist unser Gehirn darauf eingestellt, in drei Raumdimensionen und einer Zeitdimension zu denken.

Doch lassen wir uns einmal darauf ein, dass diese vielen Dimensionen existieren, wird klar: Deren Geometrien bestimmen die Naturgesetze in unserem

Universum. Beim Durchlaufen der Rückprallphase aber könnten sich die Geometrien ändern – und mit ihnen die Verfasstheit des Kosmos.

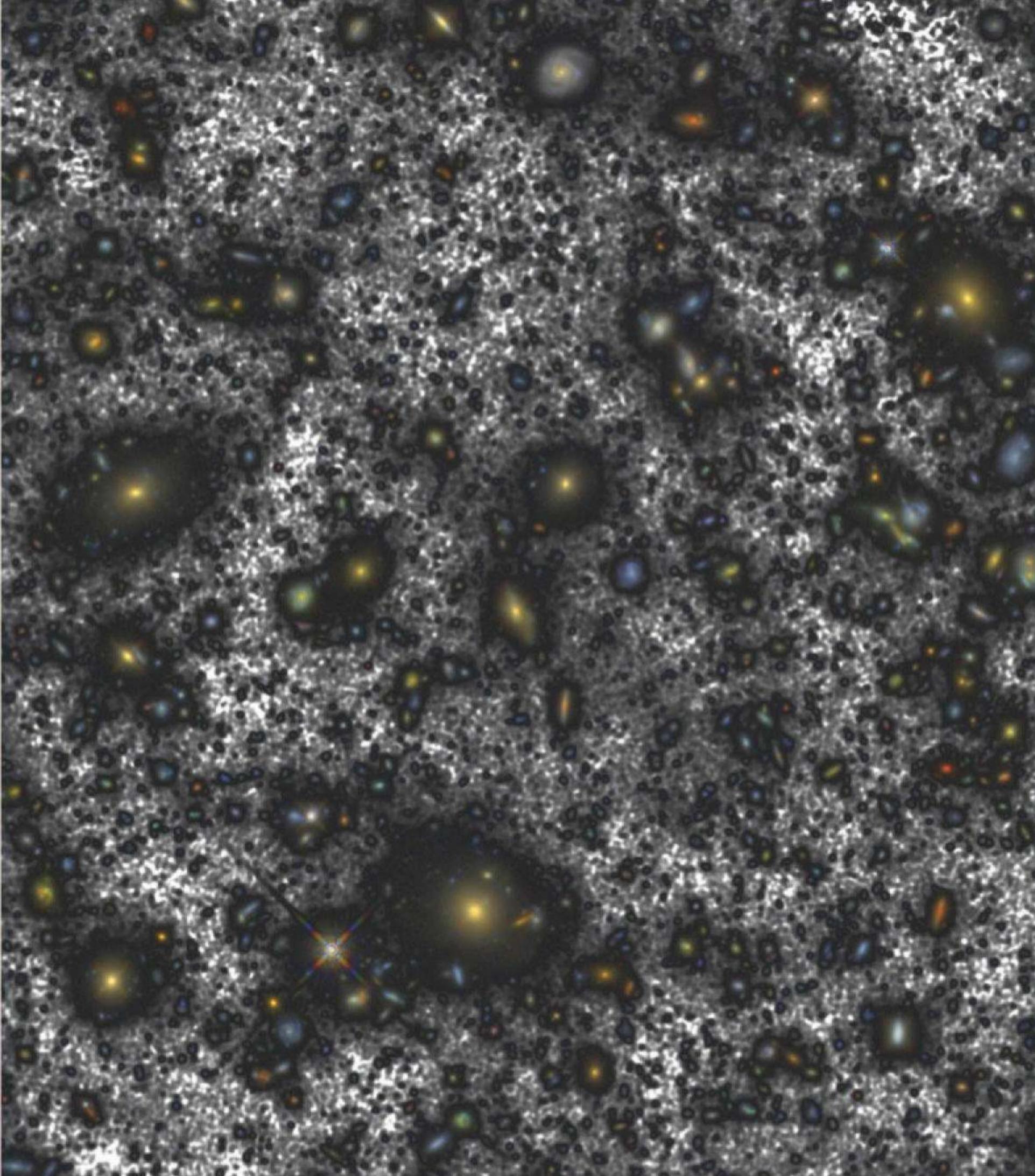
Das Vorgängeruniversum hat also möglicherweise ganz anders ausgesehen als das uns bekannte.

**Dass der Urknall** den Kosmologen solche Probleme bereitet, liegt unter anderem daran, dass er aus der Relativitätstheorie von Albert Einstein hervorgeht. Zugleich ist der Urknall aber auch der Punkt, an dem die Relativitätstheorie zusammenbricht. Sie kann also keinerlei Aussage darüber treffen, wie genau die Welt im Urknall beschaffen war.

Es erscheint paradox, aber die Relativitätstheorie bringt es fertig, ihr eigenes Versagen vorherzusagen. Nötig wäre eine Theorie, die über die Relativitätstheorie hinausgeht. Und wie die aussehen wird, ist noch nicht sicher (siehe auch Seite 118).

**Aus spektakulären Phänomenen wie diesem Sonnentod im Sternbild Skorpion können Forscher Rückschlüsse auf die Beschaffenheit und Entstehung unseres Universums ziehen**





**Da das Licht Milliarden von Jahren braucht, um das Weltall zu durchqueren, können wir mit Teleskopen in die Vergangenheit schauen: Hier die wohl ersten Galaxien nach dem Urknall**

In der Quantentheorie ist das Nichts kein absoluter Zustand – schon eine winzige Fluktuation kann ein neues Universum gebären

Allerdings muss es vor dem Urknall kein anderes Universum oder – anders gesagt – kein anderes Etwas gegeben haben. Es gibt auch die Möglichkeit, dass das Universum tatsächlich aus dem Nichts entstanden ist.

Man könnte denken, dies verletze das Gesetz von der Erhaltung der Energie. Denn Energie kann nicht einfach auftauchen oder verschwinden. Sie kann nur ihre Erscheinungsform wechseln – zum Beispiel kann aus Bewegungsenergie Wärmeenergie werden.

Doch interessanterweise ist die Gesamtbilanz für die Energie im Universum: null. So wird auf komplexe Weise die Energie, welche in der Materie steckt, durch die Gravitationsenergie, die in den Einstein-Gleichungen einen negativen Wert hat, ausgeglichen, kompensiert. Das gilt zumindest für einen endlichen Kosmos.

Der theoretische Physiker Jean-Luc Lehners vom Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam macht sich gemeinsam mit seinem Team daher gerade daran auszurechnen, wie sich aus dem Nichts ein Universum bilden kann. Dafür machen sie sich Quanteneffekte zunutze. So können auch im absolut leeren Raum Teilchen kurz auftauchen und wieder verschwinden (siehe auch Seite 102). Im Rahmen der klassischen Physik funktioniert das nicht, in der Welt der Quanten ist es möglich. Physiker sprechen auch von Quantenfluktuation.

Und eben eine solche Fluktuation könnte sich – damals, vor rund 13,8 Milliarden Jahren – zu unserem Universum ausgedehnt haben.

**All diese Überlegungen**, Theorien, Berechnungen sprengen die Imagination der meisten Menschen (selbst die vieler Physiker). Sie widersprechen unserer Alltagserfahrung – und der Wahrnehmung jener Welt, in der wir leben und die wir kennen.

Doch auch bei den beiden großen anerkannten Theorien der Physik – der Quantenmechanik und der Relativitätstheorie – waren die physikalischen Konsequenzen am Anfang nicht richtig verstanden. Erst mit der Zeit haben Forscher ein tieferes Verständnis entwickelt.

Vielleicht ist das beim Urknall ja genauso •

# Wie wirklich ist die WIRKLICH

Text: Sebastian Kretz  
Fotos: Erik Johansson

**Wir leben in der Vorstellung,  
dass die Welt mit ihren bunten  
Farben, schrillen Klängen und  
intensiven Düften auch außerhalb  
unserer Wahrnehmung genau  
so existiert. Aber inwiefern stimmt  
das überhaupt? Wissenschaftler  
finden heraus, wie unser Gehirn  
aus chaotischen Sinneseindrücken  
ein scheinbar stimmiges Bild  
konstruiert – und damit erschreckend  
oft danebenliegt**



Realitätsverlust  
In seinen surreal konstruierten Bildern spielt der schwedische Fotograf Erik Johansson bewusst mit der Wahrnehmung des Betrachters und gaukelt ihm eine seltsam verzerrte Welt vor

# CHKEIT?



**Sinnes-**  
**täuschung**  
**Die Eindrücke**  
**von oben und**  
**unten scheinen**  
**sich in dieser**  
**Darstellung zu**  
**widersprechen.**  
**Sie macht**  
**sichtbar, wie**  
**leicht sich**  
**unsere Wahr-**  
**nehmung in**  
**die Irre füh-**  
**ren lässt**

**ange schien es so sicher** wie einst der Lauf der Sonne um die Erde: dass wir die Welt wahrnehmen, wie sie wirklich ist. Dass unser Gehirn die Signale unserer Sinnesorgane originalgetreu in bewusste Eindrücke verwandelt.

Doch je mehr Forscher über die Arbeits- und Funktionsweise unseres Denkorgans herausfinden, desto deutlicher zeigt sich: Die Wirklichkeit mit ihren leuchtenden Sonnenuntergängen und ihren duftenden Lavendelfeldern, in der ein Orchester Wohlklang und eine Schrottpresse Lärm erzeugt – jene Welt also, wie sie den meisten Menschen erscheint –, ist keineswegs stabil und unverrückbar. Sie ist noch nicht einmal objektiv messbar. Die Welt, wie wir sie kennen, ist vielmehr eine Konstruktion unseres Bewusstseins.



In ihm verknüpft unser Gehirn bestimmte Reize, die von den Sinnesorganen aufgenommen werden, zum Bild einer zusammenhängenden Welt – zu einem Hier und Jetzt.

Wie genau die Nervenzellen dies schaffen, wie die Neuronennetze im Kopf zusammenarbeiten, ist nach wie vor eines der größten Rätsel der Hirnforschung. Fest steht: Allein unserem Bewusstsein verdanken wir es, dass wir einen Sonnenuntergang am Strand als farbenreiches Panorama aus leuchtenden Rottönen am Horizont und dem tiefen Blau des Meeres wahrnehmen und dass dieser Anblick Erfüllung in uns auslöst oder Sehnsucht.

Denn außerhalb unseres Gehirns – also rein physikalisch betrachtet – ist die Szene ausgesprochen unromantisch: Die

Sonne sendet Strahlen (elektromagnetische Wellen) zur Erde. Die werden von den Dingen in der Welt – dem Wasser und den Wolken, den Steinen, dem Sand – auf unterschiedliche Weise reflektiert, treffen in unser Auge, werden in elektrische Impulse übersetzt, die dann ins Gehirn gelangen.

Erst dort werden die unterschiedlichen Signale in Empfindungen umgewandelt, erst dort bilden sich Farben, erst dort entsteht der Eindruck, die vermeintliche Gewissheit, dass ein jedes Objekt von Natur aus wirklich eine ganz bestimmte Farbe besitzt.

Nicht einmal die deutlichen Kontraste eines Schwarz-Weiß-Bildes, jene Unterschiede also, die jedem Menschen als „hell“ und „dunkel“ vertraut sind, existieren außerhalb unseres Kopfes; dort gibt es allein ein Mehr oder Weniger an Lichtwellen. Kontrastreich wird die Welt letztendlich erst dadurch, dass unser Gehirn all jene Signale, die es von den Augen empfängt, auswertet und gewichtet, dass es gleichsam Licht und Schatten eine unterschiedliche Qualität, eine so grundlegend andere Empfindung zuordnet.

Ein weiterer Trugschluss: In der Regel haben wir das Gefühl, die Welt vollständig zu erfassen. Denn das, was wir als Wirklichkeit empfinden, hat keine Lücken, keine Brüche. Wir meinen, alles sehen, hören, riechen, ertasten zu können, was sich in der Welt befindet.

Dabei merken wir naturgemäß nicht, dass wir nur einen winzigen Teil dessen registrieren, woraus die Welt besteht. So nehmen wir Reize nur ausschnittsweise wahr, Lichtwellen etwa in dem engen Spektrum zwischen den Wellenlängen, die wir als Violett und Rot empfinden. Auch Schallwellen empfangen wir nur dann als Klänge, wenn sie in einem ganz bestimmten Frequenzbereich schwingen – zwischen etwa 16 und 20 000 Hertz (Schwingungen pro Sekunde).

Unsere anderen Sinne tragen auf ähnliche Weise zu der Konstruktion bei: Die Riechzellen in der Nasenschleimhaut erkennen ganz bestimmte chemische Stoffe in der Atemluft, und wir nehmen Gerüche wahr.

Auch der vermeintlich unbestechliche Tastsinn ist darauf programmiert, eine Vielzahl von Signalen in möglichst nützliche Hinweise umzurechnen. Drückt etwa ein schmaler, spitzer Gegenstand so fest auf unsere Haut, dass er den Körper zu beschädigen droht, entsteht ein unangenehmer Eindruck, der uns vor der Gefahr warnt: Schmerz.

Der Zweck unserer Sinnesorgane ist nicht, uns möglichst viel über die Welt mitzuteilen. Sie versorgen uns genau mit

Unser Bild von der **WELT**  
ist voller Lücken – und hat oft  
erstaunlich wenig mit der  
**PHYSIKALISCHEN** Realität zu tun

jenen Informationen, die sich im Laufe der Evolution als überlebenswichtig erwiesen haben.

Viele physikalische Phänomene, von denen die Welt um uns erfüllt ist, bleiben uns dagegen verborgen. Radioaktivität,

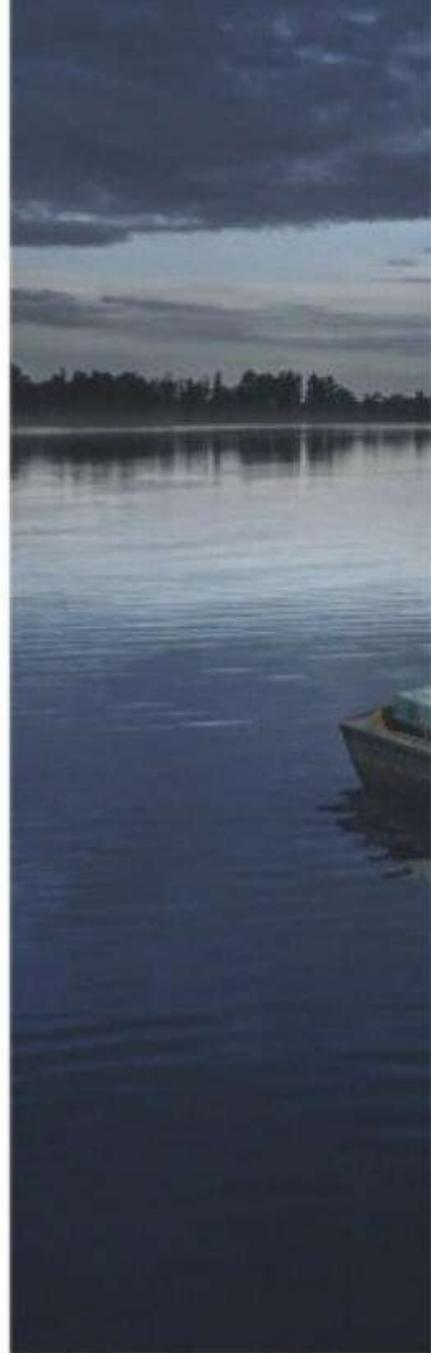
Magnetismus oder elektrische Felder nehmen wir direkt überhaupt nicht wahr – doch sie sind ebenso messbar vorhanden wie das für uns sichtbare Licht.

Aber auch von den Signalen, die unsere Sinnesorgane prinzipiell erfassen und an das Gehirn weitergeben, wird uns nur eine Auswahl bewusst – auf diese Weise wird unsere Aufmerksamkeit auf die überlebenswichtigen Dinge gelenkt.

Das Bewusstsein ist gewissermaßen der Autofokus des Körpers. Ohne unser Zutun wird Unbedeutendes ausgeblendet, Gefährliches hervorgehoben (aber auch Erstrebenswertes, etwa das Rot einer Erdbeere). Das hilft uns, richtige Entscheidungen zu treffen.

Dabei hat das Bild in unserem Kopf oft erstaunlich wenig mit der physikalischen Realität zu tun. Manchen Schlagmännern beim Baseball etwa, denen eine Reihe von Treffern ge-

**Konsistenz**  
Unser Gehirn ist darauf programmiert, Widersprüche auszublenden, sofern sie nicht unmittelbar relevant sind. Dadurch fällt es uns im Alltag leichter, uns auf das Wesentliche zu konzentrieren





Realitätsverlust  
So paradox es klingt:  
Nur weil unser Bewusstsein das meiste herausfiltert, können wir sinnvoll agieren. Nähmen wir die Wirklichkeit in all ihren Facetten wahr, würden wir dem Wahnsinn verfallen

lingt, erscheint der Ball so groß wie eine Grapefruit. Nach mehreren Fehlschlägen empfinden sie ihn dagegen als bohnenklein. Auch wie Menschen Steigungen beurteilen, hängt mitunter stark von Gefühlen und der körperlichen Verfassung ab. Nach einem anstrengenden Dauerlauf oder mit einem schweren Rucksack auf dem Rücken schätzen wir die Neigung eines Hangs um bis zu ein Drittel steiler ein als ausgeruhte Personen.

**W**ie subjektiv wir die Wirklichkeit wahrnehmen, zeigt unsere Abhängigkeit von Stimmungen: Sind wir wach und ausgeglichen, schreiten wir zumeist selbstbewusst durch die Welt, fühlen uns unseren Aufgaben gewachsen und mögen unsere Mitmenschen. Haben wir dagegen zu wenig geschlafen, mit unserem Partner gestritten oder am Abend zuvor zu viel getrunken, schrumpft die Welt zusammen, die Arbeit überfordert uns, die Kollegen nerven, und der Blick in den Spiegel schreckt ab. Könnten wir einen Tag mehrfach in verschiedenen Gemütslagen erleben: Wir nähmen wohl völlig unterschiedliche Wirklichkeiten wahr.

Selbst scheinbar einfache Sinneseindrücke dringen nicht ungefiltert in unser Bewusstsein vor: So sind einige Bereiche unseres Gehirns unter anderem damit beschäftigt, die Farbigkeit eines Objekts stets konstant zu halten – unabhängig davon, wie kalt oder warm das einfallende Licht ist. Das hat zur Folge,

Je nachdem, in welcher **GEMÜTSLAGE** wir einen Tag verbringen, nehmen wir die **WIRKLICHKEIT** völlig anders wahr

dass uns eine Rose rot erscheint – ganz gleich, ob sie von der grellen Mittagssonne, von matt orangefarbenem Abendlicht oder von einer bläulichen Energiesparlampe beschienen wird; und ganz gleich, ob Bereiche der Blüte im Schatten liegen, andere im Licht.

Wäre der hirninterne Mechanismus gestört, der diese Wirklichkeit erschafft, würden Objekte in ihrer Farbigkeit womöglich ständig changieren, die ganze Welt uns höchst chaotisch erscheinen, wie in unruhiges Flackern getaucht.

Fielen weitere Komponenten der Wirklichkeitskonstruktion in unserem Hirn fort, begäne das Abbild der Rose in unserer Wahrnehmung – je nach Blickwinkel – vermutlich zu wabern. Und je nachdem, aus welcher Entfernung wir sie betrachteten, erschien uns die Blüte mal riesenhaft, mal zwergenklein. Ein und dieselbe Blume zeigte sich in irrer Vieldeutigkeit.

Indem unser Gehirn die chaotische Wirklichkeit filtert, sortiert und bündelt, sie mit Vorwissen und Erwartungen abgleicht, erzeugt es im Bewusstsein das stabile Bild eines Hier und Jetzt.

Allein: Mit der Welt da draußen hat die Welt in unserem Kopf oft nur mittelbar etwas zu tun. •

# Haben Pflanzen Gefühle?

Sie reagieren auf Musik, schützen sich vor Fressfeinden und kommunizieren über das »Wood Wide Web«. Doch reicht das schon, um Pflanzen eine Art Bewusstsein zuzuschreiben?

Text: Barbara Lich

**Verspüren Bäume so etwas wie Schmerz? Einige Experten behaupten: ja. Ihr Forschungsfeld, die Pflanzenneurobiologie, ist in der Wissenschaft umstritten**



# Ü

ber Jahrhunderte galten Gewächse als simple, weitgehend empfindungslose Wesen, als Automaten – auf bloßes Wachstum programmiert. Sie schienen kaum mehr zu sein als eine Nahrungsressource. Zu welchem Zweck auch, so die vorherrschende Ansicht der Biologen, sollten ihnen feinfühlige Sensoren dienen?

Inzwischen hat sich dieses Bild der Flora dramatisch gewandelt. Gewächse, so viel ist heute klar, können ihre Umwelt sehr präzise wahrnehmen, sie besitzen Detektoren für vielfältige Reize. Und sie reagieren auf das, was sie wahrnehmen. Ja, sie kommunizieren gar untereinander.

Wer seinen Pflanzen Musik vorspielt, um ihnen Gutes zu tun, wurde lange als Spinner belächelt. Doch vielleicht ist an der wohlgemeinten Beschallung tatsächlich etwas dran. Heute weiß man: Pflanzen nehmen durchaus Schallwellen wahr. Und: Vermutlich reizen diese Schwingungen des Luftdrucks mechanisch die Pflanzenmembranen. Was wiederum das Wachstum fördern könnte, da die Reize die Pflanze unter leichten Stress setzen. Leichter Stress wirkt positiv, denn er macht sie robuster. In der Hoffnung, die Trauben schneller reifen zu lassen, spielen seit Jahren schon manche Weinbauern ihren Reben klassische Musik vor.

Auch auf Streicheleinheiten reagiert das Grünzeug. Das haben Forschende der Technischen Universität Braunschweig vor einigen Jahren bestätigt und das verantwortliche Gen dafür ausgemacht. Demnach hemmen Berührungen das Wachstum, lassen die kompakter bleibenden Pflanzen bisweilen später blühen, machen sie jedoch gleichfalls robuster und widerstandsfähiger gegen Pilze, Bakterien und Viren.

Im vergangenen Jahr erst veröffentlichte auch ein australisch-neuseeländisches Wissenschaftlerteam eine Studie, in der es auf die Berührungssensitivität von Pflanzen hinwies. Jedes Anfassen löse eine genetische Abwehrreaktion aus. Das kostet Energie, die dem Wachstum entzogen werde.

Kann man aber die Registrierung eines Reizes, eines Streichelns etwa, mit einer Empfindung gleichsetzen? Lässt

sich aus der Tatsache, dass Pflanzen Berührungen detektieren und darauf reagieren, gar ableiten, dass sie Gefühle haben?

**G**enau über diese Frage ist unter Botanikern eine Debatte entbrannt. Einigkeit herrscht immerhin in einem: Pflanzen verfügen über kein Gehirn und keine Nerven. Reize, die sie wahrnehmen, können sie daher nicht in Gefühle im klassischen Sinne übersetzen. Manch welkes Geestrüpp im Blumentopf mag zwar danach aussehen, doch traurig oder wütend werden Pflanzen nicht. Anders ausgedrückt: Pflanzen empfinden nicht wie Menschen. Und doch verfügen Bäume und Blumen über ein erstaunlich vielfältiges Repertoire an Strategien, mit denen sie auf ihre Umwelt zu reagieren vermögen und die ihnen so das Überleben sichern.

Sie wissen sich beispielsweise gegen Fressfeinde zu wehren und kommunizieren miteinander über Duftmoleküle und

das unterirdische Netzwerk des „Wood Wide Web“, einer Symbiose von Bäumen und Pilzen. Über dieses Geflecht aus Wurzeln und Pilzfäden im Boden verbreiten sich Signalstoffe im ganzen Wald; von Insekten befallene Bäume warnen über die „Leitungen“ etwa ihre Nachbarschaft vor Schädlingen. Und: Auch Nährstoffe tauschen die Bäume über das Netz im Erdreich aus. Die kanadische Forscherin Suzanne Simard hat dazu festgestellt, dass „Baummütter“ – die größten Bäume innerhalb eines Waldes – insbesondere mit genetisch verwandten Sämlingen gut vernetzt sind und ihnen zuckerhaltige Nährlösung zufließen lassen.

Solche Fähigkeiten sind es, die eine Handvoll Pflanzenwissenschaftler dazu bringt, den Gewächsen eine Art Bewusstsein zuzuschreiben, inklusive Intelligenz,

**Auch wenn etliche Gewächse auf Berührungen und Verletzungen reagieren: Sie empfinden nicht wie wir Menschen. Dazu fehlen ihnen Gehirn und Nervensystem**

Gedächtnis und Emotionsvermögen. Fast schon provokativ nennen sie ihr noch recht junges interdisziplinäres Forschungsfeld Pflanzenneurobiologie.

Und so schließen manche Vertreter der in der Wissenschaft umstrittenen Thesen zum Beispiel nicht aus, dass Pflanzen eine Art Schmerz empfinden können. Sicher ist: Pflanzen registrieren sogleich, wenn sie von einer Raupe angeknabbert werden oder eine Schnecke mit ihrer Zunge die Blätter feinraspelt. Dann schütten viele Gewächse einen Signalstoff aus, der dafür sorgen soll, dass die Blätter für ihre Fressfeinde ungenießbar werden.

Ferner versuchen sie, die verletzte Stelle zu verschließen. Gut zu beobachten ist dies bei Bäumen, denen ein Ast abgesägt wurde: Sie schützen die „Schnittwunde“ nach und nach mit einer dünnen Gewebsschicht. Ein Mechanismus, der dem Wundverschluss beim Menschen ähnelt, wenn wir uns in den Finger geschnitten oder bei einem Sturz die Knie aufgeschürft haben.



Dennoch: Ein Beweis dafür, dass Pflanzen tatsächlich Schmerzen spüren, ist dies nicht. Es fehlt eben das Organ, das den Schaden und die Reize als Schmerz deutet – das Gehirn. Ferner stellt sich die Frage, wozu Schmerz Bäumen und Blumen überhaupt dienen sollte. Menschen und Tieren nützt er als Schutzmechanismus vor Verletzungen und als körpereigene Alarmanlage. Er lässt uns die Finger von der heißen Herdplatte zurückziehen oder den Fuß nur auf der Ferse aufsetzen, nachdem wir mit dem Ballen in eine Scherbe getreten sind.

Doch eine im Wortsinn standhafte Eiche kann nicht wegrennen, wenn Insekten über sie herfallen. Gleichwohl alarmiert sie alle Umstehenden, indem sie Geruchsmoleküle aussendet, die auch Vögel wahrnehmen. Diese fliegen herbei, um die Raupen zu fressen. Ein genialer Kniff. Doch ob das Aussenden der olfaktorischen Botschaft eine Art bewusste Handlung darstellt und damit ein Hinweis auf Intelligenz ist, darüber debattieren die Wissenschaftler.

**E**inige Pflanzenneurobiologen halten dies mindestens für möglich. Ihre Annahmen fußen auf einer Hypothese von Charles Darwin und seinem Sohn Francis aus dem späten 19. Jahrhundert: Der britische Naturforscher stellte damals die Theorie auf, dass die Wurzelspitzen von Pflanzen mit dem Gehirn niederer Tiere vergleichbar seien.

Pflanzenneurobiologen griffen diese These auf: Das Leistungsspektrum der pflanzlichen Zellen in den Wurzeln ähnele jenem der menschlichen und tierischen Neuronen. Zum Beispiel, weil die Zellen Parameter wie Temperatur und Schwerkraft, Mineralstoff- und Feuchtigkeitsgehalt des Bodens wahrnehmen könnten.

Mithilfe bioelektrischer und chemischer Signale seien sie in der Lage, Infor-

mationen durch den Pflanzenkörper bis in die Blätter zu leiten. Der Botaniker Stefano Mancuso vom International Laboratory of Plant Neurobiology an der Universität Florenz spricht Pflanzen daher eine Problemlösekompetenz und diffuse Intelligenz zu. Über ihre Wurzeln sei es den Gewächsen sogar möglich zu erkennen, ob in ihrer unmittelbaren Nachbarschaft Pflanzen derselben Familie oder

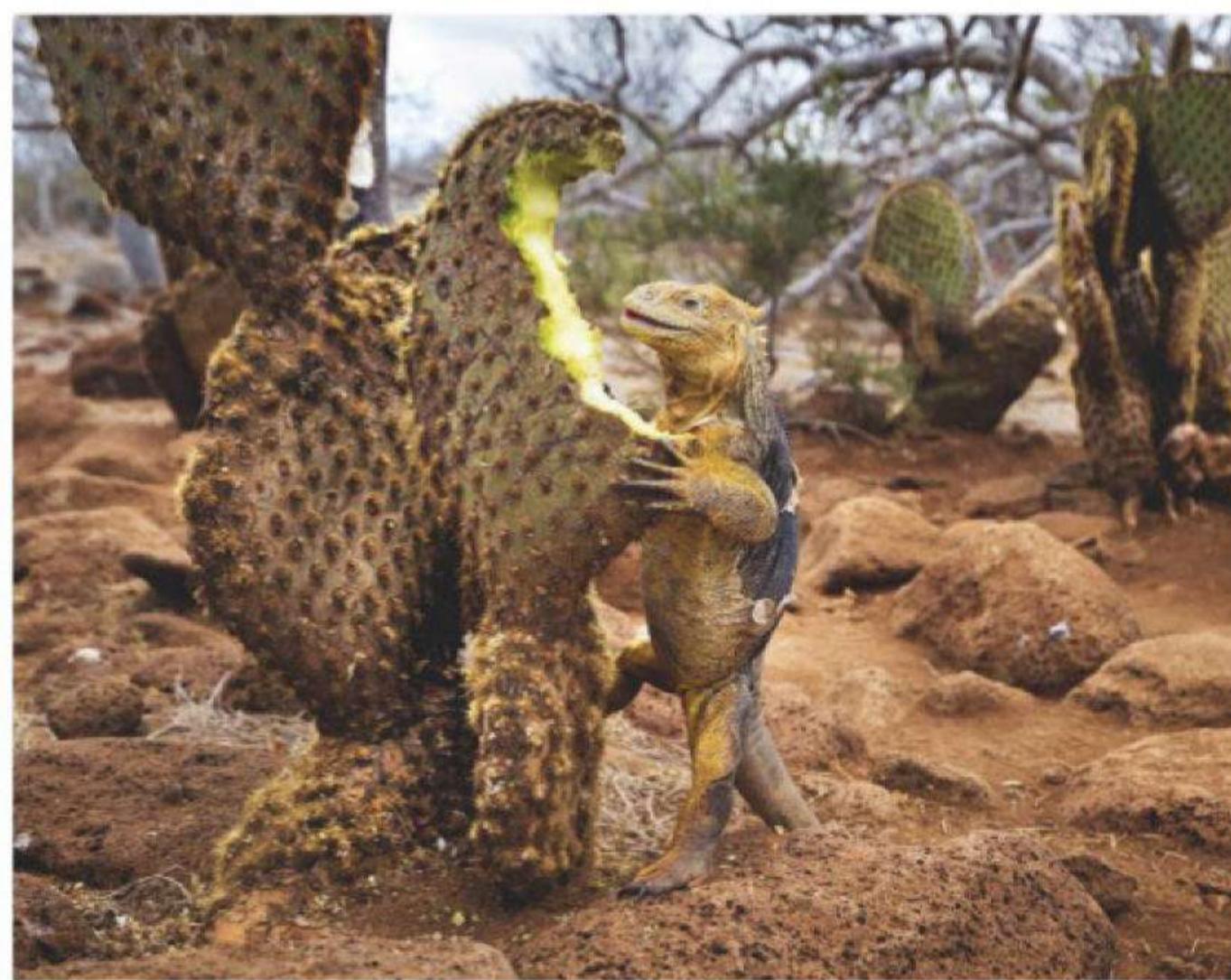
artfremde wucherten, um diese im Zweifel zurückzudrängen. Das klingt nach voller Absicht.

Eine Gruppe Wissenschaftler um Lincoln Taiz von der University of California in Santa Cruz wiederum hält die Annahme eines pflanzlichen Bewusstseins für problematisch. In einem 2019 veröffentlichten Meinungsartikel stützte sich das Team hauptsächlich auf eine neue Hypothese zur Evolution des Bewusstseins bei Tieren. Der Neurowissenschaftler Todd E. Feinberg und der Evolutionsbiologe Jon M. Mallatt haben dafür die Gehirnanatomie diverser Tiere untersucht, dazu deren funktionale Komplexität und das Verhalten der unterschiedlichen Arten.

Darauf basierend stellten sie Kriterien zusammen, die für die Entwicklung von Bewusstsein notwendig sind. Und schlussfolgerten: Einzig Wirbeltiere, Arthropoden – dazu gehören Krebstiere, Spinnentiere und Insekten – sowie Kopffüßer wie Kraken und Tintenfische erfüllen diese Kriterien und weisen damit so komplexe neuronale Strukturen auf, dass ihnen bewusstes Erleben überhaupt möglich ist. Der anatomische Aufbau von Bäumen, Sträuchern, Gräsern und Blumen hingegen sei dafür viel zu einfach, ihre Reaktionsmuster auf Reize die Folge genetischer Programme.

Gegner und Befürworter pflanzlicher Gefühle werden wohl noch lange trefflich streiten. Das Rätsel um das Ausmaß floraler Empfindsamkeit wird noch Forschergenerationen beschäftigen. Nicht ausgeschlossen, dass die Suche nach einer eindeutigen Antwort sogar vergeblich ist. Und stets etwas „Glaube“ mitschwingt.

Die Schweiz jedenfalls hat vor etlichen Jahren entschieden, es könne nicht kategorisch ausgeschlossen werden, dass Gewächse eine Empfindungsfähigkeit haben. Und so ist in der Bundesverfassung des Landes die „Würde der Pflanze“ als schützenswertes Gut festgeschrieben.



Viele Pflanzen (hier ein *Opuntia*-Kaktus) wehren sich nicht nur passiv, wenn sie angeknabbert werden – sondern indem sie Bitter- oder Giftstoffe in ihre Blätter leiten und sie so ungenießbar machen lassen

*In der Schweiz steht  
die Würde von  
Pflanzen  
als schützenswertes  
Gut in der  
Verfassung*

# Wie viele werden

# Ende

In den vergangenen 200 Jahren hat sich die Weltbevölkerung verachtacht. Bereits zum Ende des Jahrhunderts könnten mehr als zehn Milliarden Menschen den Planeten bewohnen. Doch einige Forscher prognostizieren eine Umkehr dieses Trends: Es wäre ein historischer Schritt in der Geschichte unserer Zivilisation



# Menschen auf der d e e n ?

Text: Sabrina Winter

Fotos: Andy Yeung

In Metropolen wie Hongkong drängen sich schon heute die Menschen. Der Fotograf Andy Yeung fängt seine Heimatstadt am liebsten aus der Luft ein



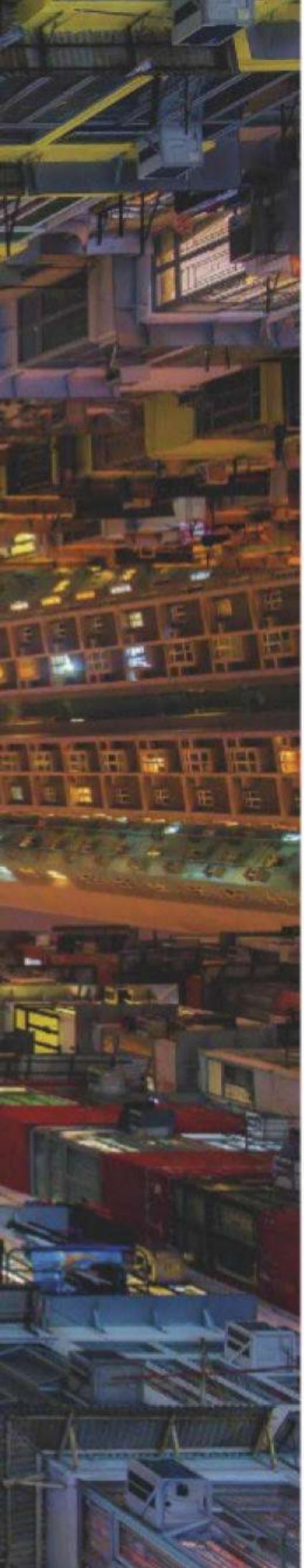
**Es ist eine Unwucht mit unguter** Tendenz für die Erde: In jeder Sekunde erblicken vier Menschen das Licht der Welt – und nur zwei sterben. Das zeigt: Wir werden immer mehr. Die Weltbevölkerung wächst rasant. Pro Jahr kommt zurzeit fast die Einwohnerzahl Deutschlands hinzu. Doch wie lange noch? Steigt die Zahl der Erdbewohner einfach immer

weiter? Wie viel Landwirtschaft, Industrie und Treibhausgase können die Ökosysteme des Planeten verkraften? Geht den Menschen irgendwann der Platz aus, weil die Ozeane ansteigen und ganze Landstriche verschwinden? Diese Ungewissheiten zählen zu den drängendsten Fragen der Forschung, denn sie könnten für die Zukunft des Globus – und damit der gesamten Menschheit – entscheidend sein. Allein: Zu prognostizieren, mit welcher Bevölkerungszahl in Zukunft zu rechnen ist, ist enorm schwierig.

Derzeit leben etwa 7,7 Milliarden Menschen auf der Erde. Kein Vergleich zu

früheren Zeiten: Vor etwa 300 000 Jahren streiften die ersten Vertreter des *Homo sapiens* umher, meist in kleinen, versprengten Clans, zunächst in Afrika, dann in Asien. Und vor gerade einmal 70 000 bis 80 000 Jahren wäre das noch junge Kapitel der Menschheit beinahe schon wieder beendet gewesen. Die Zahl unserer Vorfahren schrumpfte damals auf gerade einmal 1000 bis 10 000 Menschen – so viele wie heute in einer Kleinstadt wohnen. Der Grund dafür liegt völlig im Dunkeln.

Zwar weiß man, dass vor 74 000 Jahren im heutigen Indonesien ein Supervulkan namens Toba explodierte, wodurch Tausende Tonnen schwefelhaltiger Schwebeteilchen in die Atmosphäre gelangten. Die Temperatur auf der Erde senkte sich daraufhin kurzzeitig. Doch



# Noch zum Anbruch der Neuzeit in Europa vor etwa 500 Jahren betrug die Zahl der Menschen vermutlich nicht mehr als 500 Millionen

7,5 Millionen Menschen auf 1100 Quadratkilometern – da wird es schnell eng, wie in diesem Hongkonger Wohnblock

Forscher haben keine Anhaltspunkte dafür, dass die Naturkatastrophe ursächlich für den dramatischen Bevölkerungsschwund war.

Immerhin: Nachfahren der Überlebenden, so belegen Funde, waren spätestens vor rund 45 000 Jahren auch in Europa heimisch. Sie vermehrten sich langsam, aber stetig. Um die Zeitenwende, so schätzen Experten, lebten wohl etwa 300 Millionen Menschen auf der Erde – einige Millionen weniger als heute in den USA. Und noch vor 500 Jahren, als in Europa die Neuzeit anbrach, Wissenschaft und Welthandel erblühten, und in den Städten das Bürgertum aufkam, teilten sich den Globus vermutlich nicht mehr als 500 Millionen Menschen.

Doch dann setzte ein Prozess ein, der die Bevölkerungsentwicklung enorm anfachte: die Industrialisierung. Sie begann im 18. Jahrhundert in England mit der Erfindung der Dampfmaschine und er-

fasste nach und nach den Rest Europas. Wo sie die Wirtschaftsstruktur und damit das Leben der Menschen veränderte, stiegen die Geburtenzahlen rasant. Zudem verbesserte sich die Versorgung mit Nahrungsmitteln, sodass weniger Menschen aufgrund von Hunger starben. Auch konnten ab Ende des 19. Jahrhunderts vielerorts Infektionskrankheiten, eine der bis dato häufigsten Todesursachen, immer besser eingedämmt werden.

**Schon um das Jahr 1800** erlangte die Zahl der Erdbevölkerung die Milliardenmarke. Seither hat sie sich noch einmal fast verachtacht. Heute haben wir so viele Artgenossen wie nie zuvor. Und mehr und mehr Erdteile industrialisieren sich zusehends. Werden bald also zehn, dann 15, irgendwann gar 30 oder noch mehr Milliarden Menschen auf der Erde leben?

Kaum auszumalen, welche Schwierigkeiten solch ein Szenario verursachen würde. Sehr wahrscheinlich ist es allerdings nicht. Im Gegenteil: Die meisten Forscher gehen in ihren Bevölkerungsmodellen davon aus, dass sich das bisherige Wachstum abschwächt. Naturgemäß spielen bei derartigen Berechnungen viele Unsicherheiten eine Rolle, etwa die Frage, mit welcher Geschwindigkeit sich bestimmte Weltregionen entwickeln oder inwieweit neuartige Seuchen die Bevölkerungszahl beeinflussen.

Und so verwundert es kaum, dass Wissenschaftler in ihren Prognosen zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen: Experten der Vereinten Nationen (UNO) etwa gehen davon aus, dass die Menschheit zwar langsamer als bisher, aber noch

eine ganze Weile stetig weiter wächst. Ende des 21. Jahrhunderts sollen ihrer Einschätzung nach mehr als zehn Milliarden Menschen den Globus besiedeln. Wie es danach weitergeht, bleibt offen.

Anders die Prognose eines Teams der University of Washington in Seattle, USA. Die beteiligten Wissenschaftler veröffentlichten ein neues, viel beachtetes Modell in der renommierten medizinischen Fachzeitschrift „The Lancet“. Ihren Berechnungen zufolge wird die seit Jahrzehntausenden steigende Kurve der Weltbevölkerung bereits im Jahr 2064 einen Scheitelpunkt erreichen: beim Wert von 9,73 Milliarden Menschen. Zum ersten Mal werden dann auf der Erde mehr Menschen sterben als geboren, wird die Zahl der Erdenbürger wieder schrumpfen!

Der wesentliche Grund: Die Forscher nehmen an, dass in der Mitte dieses Jahrhunderts in vielen Ländern weit mehr Frauen als bislang Zugang zu Verhüttungsmitteln, sexueller Aufklärung und Bildung haben werden. Was sich in den entwickelten Industrienationen längst beobachten lässt, würde dann vermutlich auch etwa in Lateinamerika oder Südostasien zum Tragen kommen: Frauen, deren Situation sich verbessert und die ihre Familienplanung selbst bestimmen können, wählen meist weniger Nachwuchs.

Für Deutschland prognostizieren die Forscher den Bevölkerungshöhepunkt bereits für das Jahr 2035 – mit dann 85 Millionen Staatsbürgern. Das sind nur zwei Millionen mehr als heute. Ende des Jahrhunderts – so die US-Wissenschaftler – soll die Zahl dann auf rund 66 bis 60 Millionen gesunken sein.

Eine enorme Herausforderung für den Staat, hierzulande und anderswo: Denn in schrumpfenden Gesellschaften steigt der Anteil älterer Menschen, während die Zahl der jungen Erwerbstätigen sinkt. Die wirtschaftliche Leistung verringert sich, Gesundheits- und Sozialsysteme geraten unter Druck.

Doch global – und vor allem ökologisch – betrachtet wäre der Trend einer kleiner werdenden Menschheit ganz sicher ein Segen, da sind sich die meisten Forscher einig. Für die Ressourcen und die Ökosysteme der Erde. Und als Zeichen dafür, dass offenbar immer mehr Frauen bei der Familienplanung eine echte Wahl haben •

# Inwieweit vererben wir unser **Schicksal?**

Text: Katrin Blawat

Lange galten die Gene eines Menschen als unveränderlich. Bis Forscher entdeckten, **dass Umwelteinflüsse Spuren im Erbgut hinterlassen** – und zwar über Generationen hinweg. Prägt es also auch unser eigenes Dasein, wenn unsere Vorfahren Hunger gelitten oder Kriege erlebt haben?



## h

**Herbst 1944.** Der Zweite Weltkrieg dauert bereits fünf Jahre, und Millionen Menschen hungern. Das gilt für den Westen der Niederlande ganz besonders, denn die deutsche Besatzungsmacht blockiert die Lebensmittellieferungen. Die Einwohner müssen im Durchschnitt mit weniger als 700 Kilokalorien am Tag auskommen. Das ist viel zu wenig, vor allem für Schwangere, viele Kinder kommen mit Untergewicht zur Welt.

**Hungert eine Schwangere in den ersten drei Monaten, wirkt sich das noch auf ihre Enkel aus**

Und auch wenn der Krieg schon bald vorbei ist und es wieder ausreichend Nahrung gibt: 50 Jahre später leiden diese Kinder stärker unter Gesundheitsproblemen als ihre Altersgenossen. Vor allem jene Menschen, deren Mütter in den ersten drei Schwangerschaftsmonaten hungrig mussten. Sie haben vermehrt Herz-Kreislauf-Beschwerden oder Diabetes und sind übergewichtiger. Das ergeben Daten der niederländischen „Hungerstudie“.



Manch erworbene Eigenschaft wird vererbt. Inwieweit politisches Interesse (Familie Kennedy) oder musikalisches Talent (Familie Zappa) dazugehören, ist unklar

Aber nicht nur sie selbst, auch ihre Nachkommen haben überdurchschnittlich viele gesundheitliche Leiden. Sogar die Enkelgeneration hat also noch etwas von dem Stress, der Mangelernährung abbekommen. Aber wie kann das sein?

Die Wissenschaftler stießen auf charakteristische Veränderungen im Erbgut der Nachkommen. Das Besondere daran: Die Veränderungen betrafen nicht den genetischen Code selbst, also den Bau-



plan der körpereigenen Eiweiße. Vielmehr handelte es sich um Moleküle, die sich an die Gene heften und darüber entscheiden, ob die Gene „abgelesen“ werden. Sprich: ob aus einem Gen ein Eiweiß hergestellt wird oder nicht.

„Epigenetisch“ nennen Forscher diese spezielle Form der Erbgutveränderung. Die griechische Vorsilbe *epi* („auf“, „bei“, „darüber“) weist darauf hin, dass es neben den Genen noch weitere Mechanismen gibt, die unsere Erbanlagen beeinflussen. Epigenetische Mechanismen ändern nicht den Aufbau des genetischen Codes,

## Wie wir uns bewegen, ob wir rauchen, Freunde haben – all das prägt künftige Generationen

sondern beeinflussen, wie gut oder schlecht dieser ausgelesen werden kann. Jene gleichsam als zelluläre Werkzeuge eingesetzten Moleküle rauben einem betroffenen Gen quasi die Stimme: Es ist unverändert im Erbgut vorhanden, ist aber „stummgeschaltet“. Bei den Molekülen handelt es sich um sogenannte Methylgruppen, kleine chemische Anhänger. Die Forscher sprechen daher auch von „Methylierungsmustern“ eines Gens.

**Auf das Stummschalten** oder Aktivieren von Genen hat nicht nur die Ernährung Einfluss. Auch andere Umstände hinterlassen Spuren in unseren Erbanlagen: Wie viel wir uns bewegen, ob wir rauchen, unter Stress leiden oder uns häufig mit Freunden umgeben – all das entscheidet mit darüber, welche unserer Erbanlagen in welcher Weise aktiv sind.

Ebenso entscheidend ist der Einfluss auf die Entwicklung des Embryos im Mutterleib. Dieser ist in besonderem Maß auf ein fein abgestimmtes Zusammenspiel der Gene angewiesen: Sie müssen sowohl genau zum richtigen Zeitpunkt aktiv werden als auch in den jeweils passenden Gewebetypen und nirgendwo an-



Thomas Mann (Bildmitte) hat den Ersten Weltkrieg miterlebt. Möglicherweise gab er diese Erfahrung über sein Erbgut an seine spätgeborenen Kinder weiter

Elton John (rechts) stammt aus schwierigen Familienverhältnissen. Stress in der Jugend beeinflusst, in welchem Ausmaß bestimmte Gene später im Leben aktiviert sind



ders. Jede Zelle, egal ob sie sich zu Haut-, Leber- oder Gehirngewebe entwickelt, enthält die gleichen Gene. Je nach Zelltyp wird aber nur ein bestimmter Anteil der gespeicherten Informationen benötigt. Die übrigen bleiben dank epigenetischer Mechanismen inaktiv.

Inzwischen gibt es gar Hinweise darauf, dass sich auch traumatische Erfahrungen im Erbgut festsetzen und das Schicksal nachfolgender Generationen prägen. Zwei Wissenschaftlerinnen untersuchten die Gene von 32 jüdischen Menschen, die während des Zweiten Weltkriegs in Konzentrationslagern waren, gefoltert wurden oder in Verstecken ausharren mussten, um zu überleben. Rachel Yehuda aus New York und Elisabeth Binder vom Max-Planck-Institut für Psychiatrie in München analysierten zu dem das Erbgut der Nachkommen dieser Überlebenden des Holocaust. Die Daten verglichen die Forscherinnen mit denen jüdischer Familien, die während des Holocaust nicht in Europa gelebt hatten.

**Auch in diesem Fall** stießen sie auf epigenetische Veränderungen. Sie betreffen ein Gen, das bestimmt, wie Menschen auf Stresshormone reagieren. Es ist bei psychischen Leiden wie Depression oder posttraumatischer Belastungsstörung verändert. Dieses Gen war bei den Kindern von Holocaustüberlebenden an einer Stelle auffallend schwach methyliert. Zugleich hatten die Nachkommen erhöhte Werte des Stresshormons Kortisol im Blut, was für eine stärkere Stressreaktion spricht.

Daraus ziehen die Forscherinnen einen weitreichenden Schluss: Einschneidende Erfahrungen beeinflussen offenbar die Erbanlagen – und das kann auch generationenübergreifend wirksam werden.

Noch steht die epigenetische Forschung am Anfang. Noch bergen das Erbgut und seine Veränderungen zahlreiche Rätsel. Zu komplex ist das Zusammenspiel von Genen und unserem Leben, als dass sich genau ausmachen ließe, wie das Schicksal unserer Ahnen unser Schicksal prägt. Und doch offenbaren die Studien erste Hinweise, dass wir bis tief in unser Innerstes hinein, bis in die Erbsubstanz, auch ein Stück der Erfahrungen unserer Eltern und Großeltern in uns tragen.

Und vielleicht sogar die noch älteren Generationen. •

## Traumata

# Wenn Stress die Gene verändert

Experimente an Mäusen zeigen, wie elterliche Erfahrungen vererbt werden – und wie man den Prozess wieder rückgängig macht

**B**esser als beim Menschen sind epigenetische Zusammenhänge bei Tieren belegt. Zum Beispiel brachten US-Forscher Mäusen bei, einen bestimmten Geruch mit Elektroschocks zu verbinden. Als die derart konditionierten Tiere Nachwuchs bekamen, zeigten sich die Folgen des Trainings: Obwohl die Jungtiere nie selbst erfahren hatten, dass der Geruch mit Schmerz verbunden war, zuckten sie stärker vor ihm zurück als der Nachwuchs anderer Eltern. Die Autoren schlossen daraus, dass die Mäuseeltern ihre schlechten Erfahrungen mit dem Duftstoff epigenetisch weitergegeben haben.

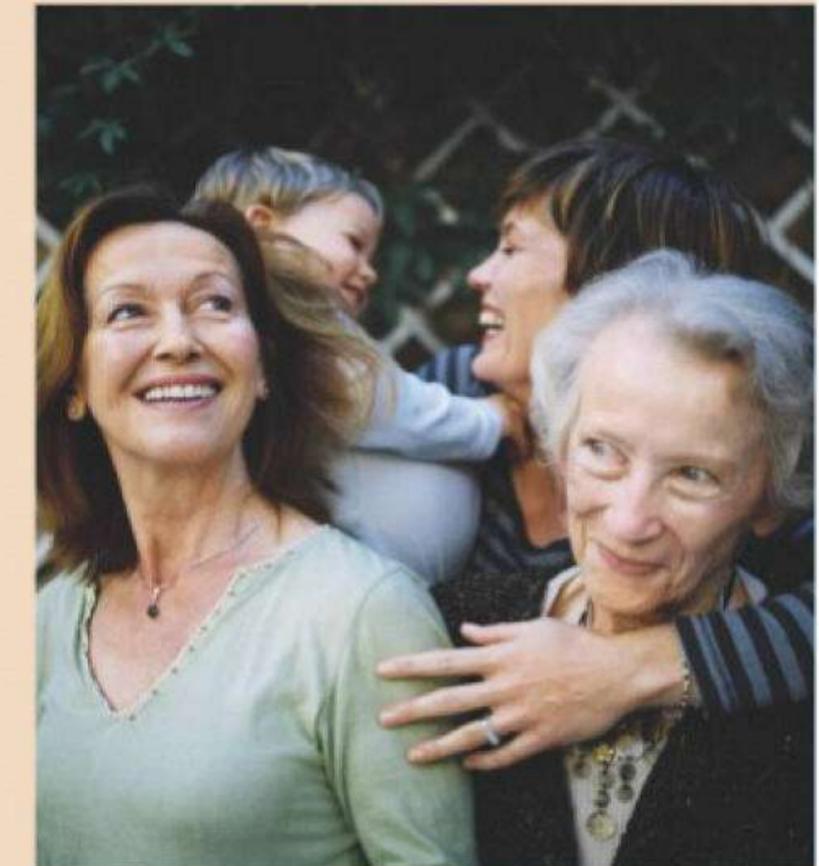
Versuche mit Mäusen stellten auch Wissenschaftler der ETH Zürich an. Und sie konnten in einem Experiment zeigen, dass traumabedingte Symptome bei den Nagern auch „rückgängig“ gemacht werden können. Das Team von Isabelle Mansuy trennte junge Mäusemännchen in unregelmäßigen Abständen und jeweils völlig unvorhersehbar von ihren Müttern. Dadurch waren die Nagetiere großem Stress ausgesetzt. In der Folge verhielten sich die Männchen sowie deren spätere Nachkommen bei neuen Stresssituationen messbar anders als die Tiere einer Kontrollgruppe.

Die Forscher fanden deutliche Veränderungen in einer für kognitive Prozesse essenziellen Hirnregion, die auch bei Stress eine Rolle spielt. Es zeigte sich, dass die Regulierung eines Gens verändert war, und zwar nicht nur im Gehirn der Mäuse-Jungtiere, sondern auch in den Spermien ihrer Väter, die nach der Geburt von ihren Müttern getrennt wurden.

Isabelle Mansuy und ihr Team ließen den Mäuse-Nachwuchs nun in einer besonders angenehmen Umwelt gedeihen, mit genug Futter, Wasser und Abwechslung. Es zeigte sich, dass sich das Verhalten der Mäuse durch die positiven Erfahrungen wieder wandelte und die epigenetisch geerbten Veränderungen im Erwachsenenalter korrigiert werden konnten. Das verhinderte laut den Forschern auch, dass die stressbedingten Symptome an weiteren Nachwuchs vererbt wurden.

Es stellt sich also die Frage: Wenn wir vermuten, dass wir unser Schicksal, vielleicht ein schreckliches, gewissermaßen vererben können: Haben wir etwas in der Hand, um dem entgegenzuwirken? Kann etwa eine Psychotherapie unser Verhalten und Erleben ändern – und zugleich epigenetische Veränderungen überschreiben? Oder könnten Medikamente gezielt dazu eingesetzt werden, unsere Nachfahren vor vererbten Stresserfahrungen zu schützen? Es gibt erste Studien, die darauf hindeuten, etwa bei Menschen mit Panikattacken oder posttraumatischen Belastungsstörungen. Und es wäre durchaus plausibel, dass sich die epigenetische Uhr zurückdrehen lässt.

Von einer epigenetischen Therapie sind wir jedoch noch weit entfernt.



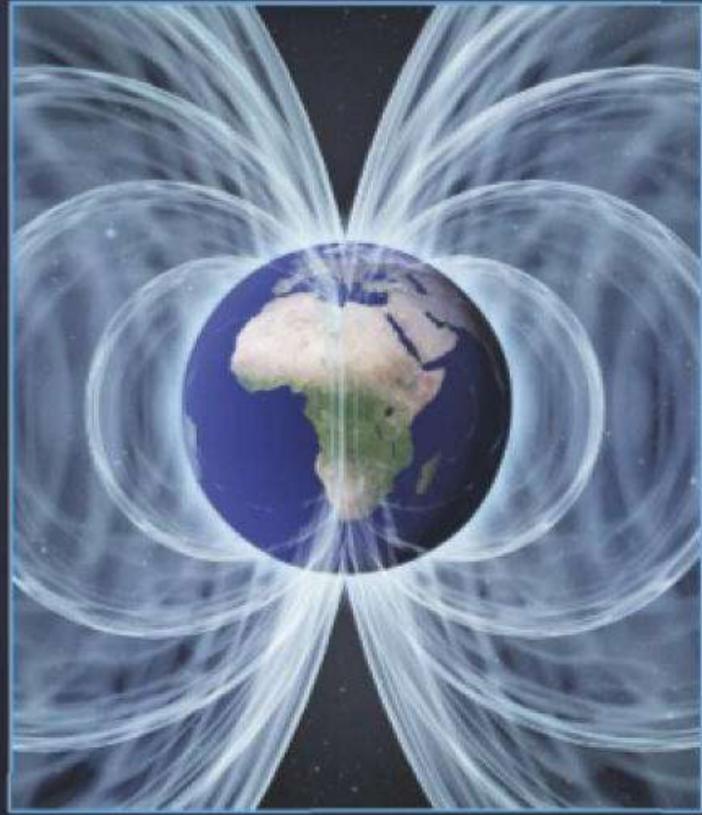
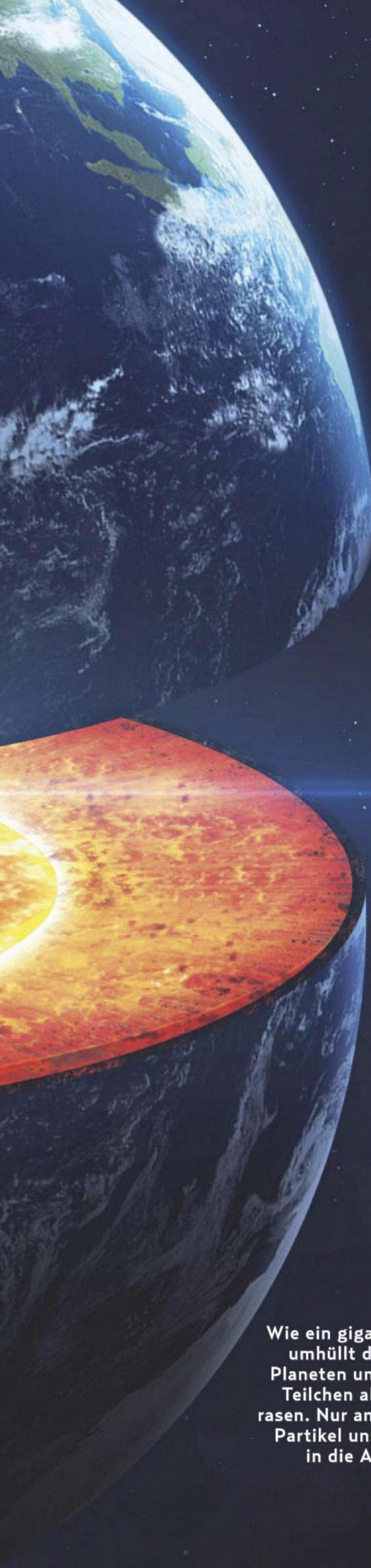
**Ein liebevolles Familienumfeld kann womöglich etwaige negative Gen-Veränderungen ausgleichen**



# Was geht im Erdkern vor sich?

Text: Michael Büker

Im Inneren der Erde erzeugen Ströme flüssigen Metalls ein riesiges **Magnetfeld**, das uns vor tödlicher Strahlung aus dem All schützt. Doch der Prozess ist noch immer so rätselhaft, dass Forscher ihn nun in einem gewaltigen Experiment nachahmen wollen



Wie ein gigantischer **Schutzschild** umhüllt das **Erdmagnetfeld** den Planeten und wehrt **so kosmische** Teilchen ab, die **auf die Erde** zu rasen. Nur an den **Polen** können die Partikel uns **nahe kommen** – und in die Atmosphäre eindringen

**A**us **großer Tiefe**, 3000 bis 6000 Kilometer unter **unseren Füßen**, entspringt ein **Mysterium**, das uns ständig umgibt, das wir aber **nur in Ansätzen** begreifen: das **Erdmagnetfeld**.

Im Alltag bemerken wir es so gut wie nie. Dabei spricht **einiges dafür**, dass wir ihm unsere Existenz verdanken: Es schirmt die Erde vor Gefahren ab. Etwa vor **elektrisch geladenen** Teilchen, die bei Sonnenstürmen in **Massen auf die Erde prasseln**. Aber auch vor **kosmischen Partikeln** aus den **Tiefen des Weltalls**, die etwa bei Sternexplosionen entstehen und in alle Richtungen rasen.

Das **Magnetfeld** lenkt **sie** ab – so erreichen sie die Erde teils gar nicht erst oder dringen vornehmlich über den spärlich **besiedelten** Polregionen in die Atmosphäre ein. Von der **kosmischen Abwehr** zeugen die **Polarlichter**, die meist nur weit im **Norden oder Süden** den Himmel zieren. Träfen die Teilchen aus dem All **ungehindert** auf die **Erdatmosphäre**, würden sie unter anderem die **Ozonschicht** angreifen, die uns vor der **UV-Strahlung** der **Sonne** schützt. Das würde uns nicht nur ein **erhöhtes Hautkrebsrisiko** einbringen – es hätte in der fernen **Vergangenheit sogar** die Entwicklung des Lebens auf der Erde **bremsen** können.

Zum Glück also gibt es das **Erdmagnetfeld**. Dank ihm und der **Erfindung des Kompasses** konnte der Mensch die **Meere** befahren. Manche **Tiere** orientieren sich sogar ohne **Hilfsmittel am Magnetfeld**: Einige **Bakterien**, Insekten, **Reptilien**, Vögel und sogar **Säugetiere** wie die **Fledermaus** haben einen **inneren Kompass** – welche **Organe** ihnen diesen siebten (**Magnet-**)Sinn ermöglichen, ist vielfach noch ungeklärt. Vor wenigen Jahren veröffentlichten Zoologen sogar **Forschungsergebnisse**, wonach sich **Hunde** womöglich am **Erdmagnetfeld** orientieren, wenn sie für ihr Geschäft bevorzugt eine **Nord-Süd-Ausrichtung** einnehmen.

Bedenkt man, wie viel das **Erdmagnetfeld** für uns bedeutet, ist sein **Ursprung** immer noch erstaunlich **rätselhaft**. Weder ist geklärt, wie es genau entsteht, noch, warum seine **Stärke** schwankt oder warum sich seine **zwei Pole** immer wieder höchst merkwürdig verhalten.

So viel ist gewiss: Der Prozess, der den irdischen **Magnetismus** hervorruft, ist hochkomplex. Und er hat seine **wesentliche Ursache** in gewaltigen Strömen **flüssigen Metalls**, die den **festen Erdkern** umgeben.

Wie die **Meere** auf der **Oberfläche** der Erde befinden sich auch die **flüssigen Metalle** in der Tiefe **permanent in Bewegung**. Denn der **Erdkern** ist aufgrund des hohen **Drucks** zwar fest, aber rund 5000 Grad Celsius heiß. Das **flüssige Eisen**, das sich ringsherum befindet, wird daher stetig umgewälzt. Dabei steigt die **Schmelze** von der **festen Kernoberfläche** **Richtung Erdmantel** auf, windet sich – unter dem **Einfluss der Erdrotation** – schraubenförmig und sinkt abgekühlt wieder in die **Tiefe Richtung innerer Kern**.

Diese „**Konvektionsströme**“ funktionieren wie eine Art **Dynamo** – eine **Maschine**, die **mechanische Energie** in **elektrische** verwandelt. Mit anderen Worten: Das **flüssige Metall**, das vom inneren **Erdkern** aufsteigt und wieder absinkt,

bewirkt, dass (gemäß einem physikalischen Gesetz) elektrischer Strom fließt und sich ein Magnetfeld bildet. Forscher nennen dies den „Geodynamo“ der Erde.

In der Theorie wird der Prozess beschrieben durch die „Magnetohydrodynamik“. Sie erklärt das Verhalten elektrisch leitfähiger Flüssigkeiten, zu denen auch die heiße Mischung aus Eisen und Nickel im äußeren Erdkern zählt, in Anwesenheit eines Magnetfeldes. Allein: Nicht nur sind die bewegten Massen und Kräfte gewaltig, es gibt auch viele sich gegenseitig verstärkende oder auslöschende Effekte. Selbst Hochleistungscomputer können die genauen Vorgänge im Erdinneren daher nur ansatzweise berechnen.

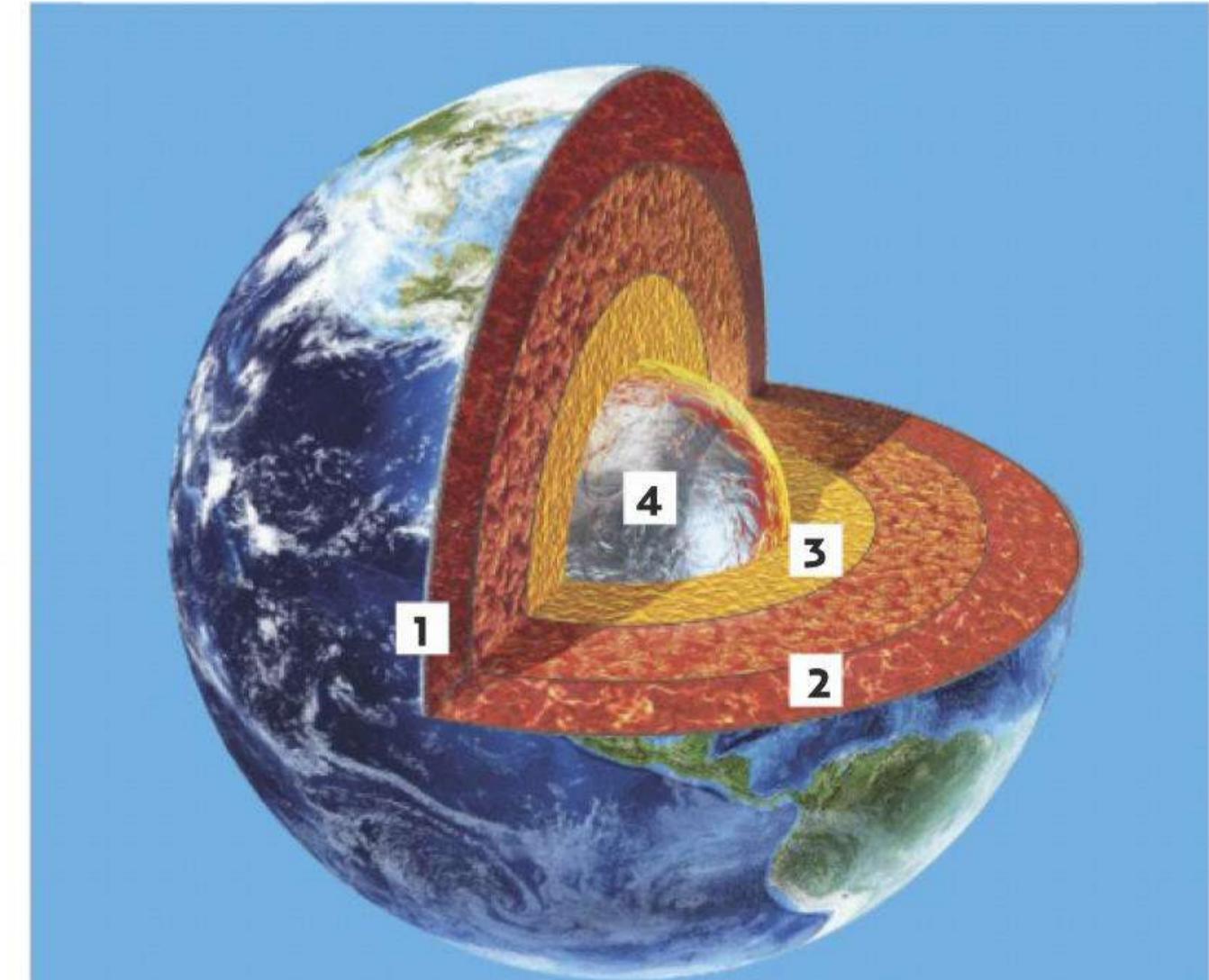
**W**ie sensibel der Vorgang zudem ist, zeigt sich nicht zuletzt daran, dass das irdische Magnetfeld eine eher unstete Kraft ist – und sich permanent wandelt. So verändert etwa der magnetische Nordpol der Erde ständig seinen Standort, an manchen Tagen kann er mehrere Dutzend Kilometer in die eine oder andere Richtung abdriften, bevor er wieder zum Ausgangspunkt zurückkehrt.

Aus Spuren im Gestein wissen Forscher zudem, dass das Magnetfeld in früheren Zeiten immer mal wieder – und wohl ohne äußere Einwirkung – seine Pole sogar vollständig getauscht hat. Im Schnitt kam es in den letzten Jahrtausenden etwa alle 250 000 Jahre zu einer solchen Feldumkehr, wobei die einzelnen Intervalle höchst unterschiedlich ausfielen.

Immer wenn Nord- und Südpol ihre Plätze tauschen, ist das Magnetfeld einige Tausend Jahre lang besonders schwach und unregelmäßig geformt. Ob und wann auf der Erde eine erneute Polumkehr ansteht, kann bislang niemand vorhersagen. Würde sie eintreten, wären die Auswirkungen beträchtlich. Zunächst würde die moderne Technik, etwa die Kommunikationstechnik, gestört. Die Elektronik würde unter dem Bombardement geladener Teilchen leiden und unzuverlässiger werden. Viele der Satelliten, die derzeit vom Erdmagnetfeld geschützt im Orbit arbeiten, würden komplett versagen. Auch Stromnetze auf der Erde könnten durch Sonnenstürme beschädigt werden, Blackouts wären die Folge. Zudem würden Krebserkrankungen zunehmen. Da tröstet es auch nicht, dass Polarlichter an jedem Ort der Welt auftraten.

Um besser zu verstehen, was sich hinter dem Phänomen der Polumkehr und anderen noch ungeklärten Effekten des irdischen Magnetfelds verbirgt, haben Forscher einen kühnen Plan gefasst: Sie wollen das Schutzschild der Erde im Labor nachahmen – und errichten dazu momentan ein einzigartiges, monströs anmutendes Experiment bei Dresden.

Ab 2022 soll „Dresdyn“ (kurz für „Dresdner Natrium-Anlage für Dynamo- und Thermohydraulikforschung“) in Betrieb gehen und ein künstliches Mini-Erdmagnetfeld erschaffen. Das Herzstück der Anlage: ein tonnenschwerer, zylindrischer Tank von zwei Meter Höhe und zwei Meter Durchmesser, der mit acht Tonnen flüssigem Natrium gefüllt ist. Das Natrium hat eine hervorragende elektrische Leitfähigkeit und übernimmt die Rolle der Metalle im Erdkern.



**Anatomie der Erde:** Die Kruste unseres Planeten (1) ist – relativ gesehen – so dünn wie die Schale eines Apfels. In etwa 50 Kilometer Tiefe geht sie über in den Erdmantel (2), eine bis zu 2900 Kilometer tiefe, zweigeteilte Schicht aus flüssigem Gestein. Mit zunehmender Tiefe steigen Druck und Temperatur. Im äußeren Kern (3) herrschen bis zu 5000 Grad Celsius. Im Zentrum des inneren Erdkerns (4), das wohl eine Eisen-Nickel-Kugel bildet, ist es mit vermutlich 6000 Grad Celsius so heiß wie auf der Sonnenoberfläche.

Damit dem Tank – gefüllt gut 33 Tonnen schwer – ein Magnetfeld entspringt, lassen die Wissenschaftler ihn in verschiedene Richtungen rotieren. Zwei Drehungen sollen zugleich stattfinden: Der schräg stehende Natriumtank rotiert bis zu zehnmal pro Sekunde um sich selbst (so wird die Eigenrotation des Planeten simuliert). Die Plattform, auf der er montiert ist, dreht sich währenddessen mit bis zu einer Umdrehung pro Sekunde (die resultierende Bewegung ist der Taumelbewegung der Erdachse im All nachempfunden).

Wenn die Berechnungen der Forscher stimmen, sollten im Tank vergleichbare schraubenförmige Strömungen entstehen, wie sie auch in den Tiefen der Erde vorkommen. Es wäre eine bahnbrechende Gelegenheit, jene Parameter genauer zu studieren, die zur Aufrechterhaltung des Magnetfelds nötig sind. Und womöglich gar zu beobachten, unter welchen Voraussetzungen sich seine Pole umkehren.

Aus Sicherheitsgründen werden sich während des Betriebs von Dresdyn jedoch nur eine Handvoll Menschen nahe der Anlage aufhalten dürfen. Lediglich durch zwei kleine, hintereinanderliegende Sicherheitsfenster können sie dann auf das gewaltige Experiment blicken, das sie steuern.

Der Anblick wird dennoch beeindruckend sein: der wilde Tanz eines Kolosses um sich selbst, aus dessen Mitte wie von Zauberhand ein Magnetfeld entsteht. Eine kleine Version dessen, was unser Leben tagtäglich umgibt und beschützt.

Und noch immer ungelöste Rätsel birgt •

# Handeln fängt mit Denken an.

brand eins

Das Magazin für alle, die ihr Leben selbst gestalten.

Jetzt im Handel oder unter [kiosk.brand eins.de](http://kiosk.brand eins.de)





Werden  
Computer  
denken  
können?



Unheimlich  
menschlich: Der  
dänische Professor  
Henrik Schärfe  
ließ einen Roboter  
nach seinem Eben-  
bild schaffen

Text: Martin Scheufens  
Fotos: Ken Hermann

Wahrhaft kluge Maschinen  
ahmen unsere Fähigkeiten  
nicht bloß nach: Sie  
erkunden und verstehen  
die Welt selbstständig.  
Doch wie könnte solch ein  
virtuelles Bewusstsein  
beschaffen sein? Müssen  
wir für seine Entwicklung  
erst den menschlichen  
Geist entschlüsseln?

**E**s ist ein alter Menschheitstraum: sich – gewissermaßen gottgleich – ein Ebenbild zu schaffen. Ein Wesen, das denkt und fühlt. Eine Maschine mit Verstand, Bewusstsein, Willen, Emotionen, kurz: mit Geist.

Zwar gibt es solche Geschöpfe bislang nur in der Fiktion. Doch ist es überhaupt möglich, menschenähnliche Maschinen zu bauen? Welche Herausforderungen liegen vor den Entwicklern?

Der einfachste Ansatz geht vermeintlich so: Man wähle ein Set elementarer menschlicher Fähigkeiten und Verhaltensweisen – etwa Sprache, Allgemeinwissen, Gefühlsreaktionen – und programmiere sie in einen Computer. Nun wird der Rechner trainiert, sich in jeder Situation wie ein Mensch zu verhalten.

Wann immer heutige Computer scheinbar menschliches Verhalten an den Tag legen, wurden sie auf diese Weise präpariert. Siri zum Beispiel antwortet schlagfertig, weil ein Programmierer die Frage voraussah und Siri eine passende Antwort vorgab.

Solch eine Maschine kann durchaus überzeugen, ja sie könnte den Turing-Test bestehen. 1950 schlug der Computer-Pionier Alan Turing vor, wie sich prüfen ließe, ob eine Maschine ein intelligentes Verhalten zeige, das mit dem des Menschen vergleichbar ist. Ein Proband unterhält sich mit einer Maschine und einem Menschen; wenn er nicht feststellen kann, wer von beiden die Maschine ist, hat sie die Prüfung bestanden.

Und doch heißt das natürlich nicht, dass zum Beispiel Siri wie ein Mensch ist, sondern nur, dass das Programm wie ein Mensch wirkt. Es simuliert menschliches Verhalten, führt uns in die Irre. Doch ein Computer empfindet keine Trauer, nur weil der Reaktionsmodus „Trauer“ aktiviert wurde. Auch ist ein Taschenrechner nicht intelligent, obwohl er dividieren kann, schließlich befolgt er allein programmierte Regeln, ohne zu verstehen, was er da tut.

Mit dem Ansatz, intelligentes Verhalten zu simulieren, lässt sich keine „echte“ Intelligenz erschaffen.

Dafür müssen Entwickler auf einer grundlegenderen Ebene ansetzen: Sie müssen jene Prinzipien entschlüsseln, die wahrhaft intelligentem Verhalten zugrunde liegen. Zudem müsste die KI (Künstliche Intelligenz) eine Persönlichkeit entwickeln, die nicht nur Sätze brabbelt, sondern sie versteht, die nicht nur Regeln anwendet, sondern ihre Logik einsieht. Und die Emotionen nicht berechnet, sondern fühlt.

Mit den Fortschritten in der KI-Forschung hat sich die Auffassung verändert, was Intelligenz eigentlich ist. Was wir im Alltag darunter verstehen, ist bloß die Spitze unserer evolutionären Entwicklung: das logisch-rationale Denken. Schach spielen, Mathematik betreiben – ein Mensch, der das beherrscht, gilt als intelligent. Doch ausgerechnet diese Tätigkeiten fallen einer KI leicht, denn sie bestehen aus der Verarbeitung simpler logischer Regeln.

Was wir Menschen den Maschinen voraushaben, sind Fähigkeiten, die wir für selbstverständlich erachten: Fahrrad fahren, Small Talk führen, Freunde trösten. Für KI sind das bislang kaum zu meisternde Aufgaben, sie erfordern ein komplexes Wechselspiel einer Vielzahl an Kenntnissen. Zum Fahrradfahren braucht man eine sensible Wahrnehmung, schnelle Orientierung, präzise Körperbeherrschung, vorausschauendes Planen, aber auch die Möglichkeit, spontan zu reagieren. Wir beherrschen jede der Fähigkeiten auf hohem Niveau und stimmen sie zudem aufeinander ab.

Diese Fähigkeiten haben wir so verinnerlicht, dass sie im Unterbewusstsein ablaufen. Deswegen erscheint uns Laufen als simple Tätigkeit, obwohl unser Gehirn dabei pausenlos Eindrücke verarbeitet, Entscheidungen trifft und Befehle gibt.

Um eine Menschmaschine zu entwickeln, müssen Forscher nicht bei null beginnen. Als Vorbild kann ihnen das menschliche Gehirn dienen. Jenes Organ, das Geist entstehen lässt.

Nicht zufällig lieferte das Gehirn die Blaupause für den meistbeachteten Ansatz in der KI-Forschung: die Künstlichen Neuronalen Netze (KNN). Sie sind grob der Architektur der Großhirnrinde nachempfunden. Wie diese haben sie keine starre Form, sondern bestehen aus Schichten virtueller Knotenpunkte, deren Verbindungen variabel sind. Die KNN lernen aus Erfahrungen, aus Versuch und Irrtum. Die besten unter ihnen meistern komplexe Videospiele.

Und doch stoßen auch die KNN an ihre Grenzen. Um einen Apfel zu erkennen, muss ein KNN zuvor Abertausende Fotos von Äpfeln mustern. Ein Kind hingegen erkennt einen Apfel, nachdem es nur wenige Exemplare gesehen hat. Zudem büßt das KNN Fähigkeiten ein, wenn es neue erlernt. Wenn sich das Netz einer neuen Aufgabe widmet und sich ihr anpasst, löst es bestehende Strukturen auf und verliert die darin gespeicherten Informationen. Das Gehirn hingegen lernt Neues, ohne automatisch Altes zu verlieren.

## Radfahren, mitfühlen, Small Talk führen: Was uns leicht fällt, stellt Maschinen bislang vor unlösbare Aufgaben



Manche Roboter  
sprechen, reagieren oder  
bewegen sich wie wir.  
Doch sie bleiben  
clever programmierte  
Imitationen

Allzu oft werden heutige Rechner mit dem Gehirn verglichen, doch sie ähneln einander mitnichten. Zwar kommen die größten Einzelchips schon auf 35 Milliarden Transistoren – und nähern sich damit den 80 Milliarden Neuronen des menschlichen Gehirns. Bloß: Jedes Neuron hat im Schnitt rund 10 000 Verbindungen zu anderen Neuronen. Selbst Superrechner erreichen nicht einmal ansatzweise diese Komplexität.

Das Gehirn unterscheidet sich aber auch in seinen Grundprinzipien. Es kennt keinen zentralen Taktgeber, der alle Aktivitäten in einen Rhythmus zwingt, keine Trennung von Hard- und Software. Anders als Transistoren können Neuronen viel mehr Zustände einnehmen, als nur zu „feuern“ oder nicht. Außerdem schwimmt das Gehirn in einem Cocktail von Substanzen, die seine Aktivität beeinflussen.

**W**eltweit arbeiten Wissenschaftler und Ingenieure daran, die Prinzipien unseres Gehirns auf Rechner zu übertragen. An der Universität Heidelberg haben Forscher den Supercomputer BrainScaleS entwickelt, der in seiner Architektur viel mehr der Struktur des Gehirns gleicht und ähnlich energieeffizient ist. Neuronen und Synapsen werden nachgebildet, dadurch sind anders als bei herkömmlichen Computern Speicher und Rechenwerk nicht mehr voneinander getrennt. Doch der „neuromorphe“ Rechner befindet sich noch im Entwicklungsstadium.

Die Herausforderung: Der Mensch versteht bislang nur in Ansätzen, wie sein eigenes Denkorgan funktioniert, wie die Neuronen verknüpft sind, wie Informationen verarbeitet werden, wie die Botenstoffe hineinspielen. Dafür bedarf es noch Jahrzehnte an Forschung.

Hinzu kommt: Neben der Architektur des Gehirns müssen Forscher auch verstehen, wie sich das Gehirn die Welt aneignet. Daher interessieren sich KI-Forscher zunehmend dafür, wie Kinder lernen: Wie schaffen

sie es, in dem Chaos an Eindrücken Orientierung zu gewinnen, Wichtiges von Unwichtigem zu trennen, Sprache zu entschlüsseln, Gesetzmäßigkeiten abzuleiten, Pläne zu entwickeln?

Vielleicht lässt sich dieser Lernprozess gar nicht abkürzen, müssen KI eine Art künstliche Kindheit durchlaufen. Und womöglich entspringt genau aus diesem Prozess auch jenes Phänomen, das als größtes Mysterium des menschlichen Geistes gilt: das Bewusstsein seiner selbst.

Zwar lässt sich schon heute einer KI ein „Ich“ einprogrammieren, kann Siri Witze über sich selbst machen, doch dieses „Ich“ ist eine Variable wie jede andere. Dass sich der Computer damit selbst bezeichnet, weiß er nicht.

Schwer vorstellbar, wie einem klassischen Computer, der als Klotz in einer Zimmerecke steht, dieser Schritt zum echten Ich gelingen soll. Dafür bräuchte er nach Meinung von KI-Forschern Sensoren, Sinnesorgane. Ja, einen Körper, um in der Welt

zu agieren. Denn: Zu den entscheidenden Momenten der Kindheit gehört die Wahrnehmung der eigenen – körperlichen – Grenzen, die Unterscheidung zwischen einer Außen- und einer Innenwelt. Vielleicht kann eine KI nur dann Selbstbewusstsein entwickeln, wenn sie ihren Platz in der Welt wortwörtlich spürt und begreift.

Und doch: Selbst wenn eine KI so aufgebaut wäre wie wir, selbst wenn sie einen ähnlichen Lernprozess durchlaufen würde und dann tatsächlich so agierte wie wir, es bliebe dennoch ein unlösbare Rätsel übrig: Es gibt keine Methode, die Empfindungen, die ein Mensch hat, in der Tiefe zu erfassen. Wie genau jemand eine Farbe wahrnimmt, wie genau sich Trauer oder Freude oder das Bewusstsein des eigenen Ichs anfühlen, das entzieht sich wissenschaftlicher Methodik. Wir vertrauen darauf – eben weil

wir Menschen sind –, dass sich im Kopf eines anderen Menschen Ähnliches abspielt wie in unserem eigenen. Wissen tun wir es nicht.

Dieses Vertrauen müssten wir dann auch den Menschmaschinen gegenüber haben.



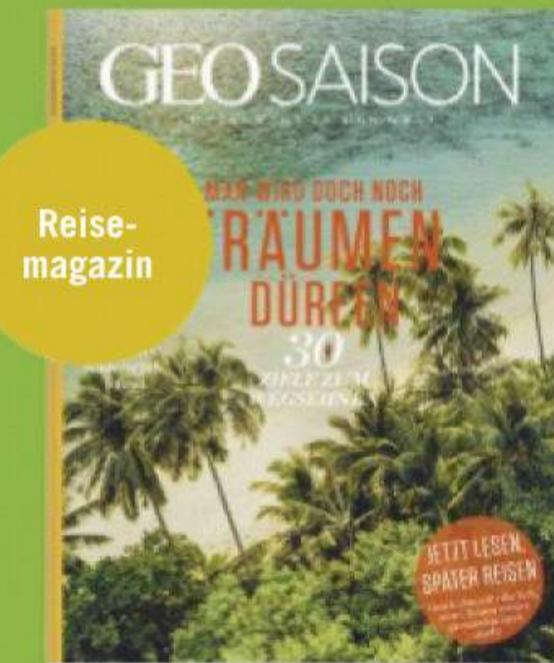
**Eine Frage entzieht sich den Methoden der Forschung: Falls Computer Gefühle entwickeln, werden diese den unseren ähneln?**

**Womöglich werden kluge Maschinen eine künstliche Kindheit durchlaufen, um sich Wissen über die Welt anzueignen**

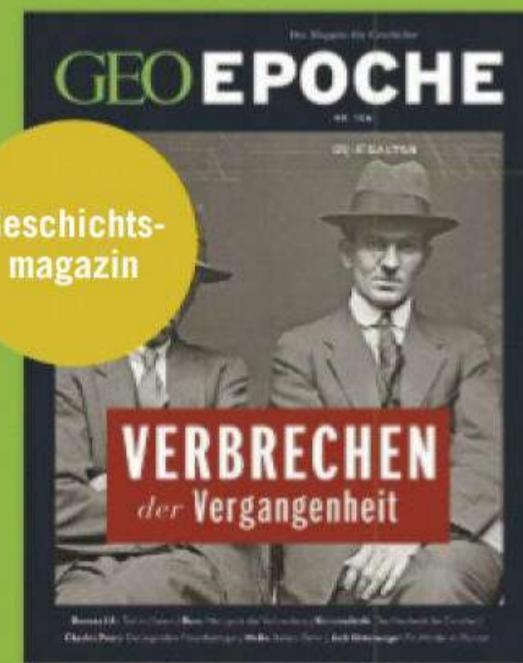
## ENTDECKEN SIE DIE VIELFALT DER GEO-WELT.



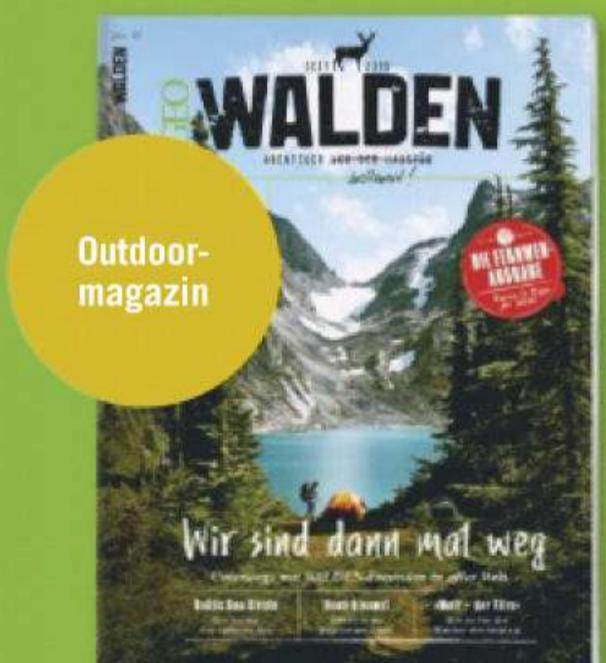
GEO Die Welt mit anderen Augen sehen.  
6x zzt. nur 49,80€\*



GEO SAISON Die Nr. 1 unter den Reisemagazinen.  
6x zzt. nur 42,-€\*



GEO EPOCHE Die spannendsten Seiten  
unserer Geschichte. 3x nur zzt. 36,-€\*



WALDEN Das Abenteuer direkt vor der  
Haustür. 5x zzt. nur 45,-€\*



GEO kompakt Das spannende Wissensmagazin.  
4x zzt. nur 44,-€\*



GEOlino Lesespaß für Kinder ab  
9 Jahren. 7x zzt. nur 31,50€\*



Prämie  
gratis dazu!

GLEICH BESTELLEN UND PORTOFREI LESEN:

**www.geo.de/vielfalt**

+49 (0)40/55558990

Bei telefonischer Bestellung bitte immer die Bestellnummer angeben.

GEO Selbst lesen: 1864490 | Verschenken: 1864491  
WALDEN Selbst lesen: 1864496 | Verschenken: 1864497

GEO SAISON Selbst lesen: 1864493 | Verschenken: 1864492  
GEO KOMPAKT Selbst lesen: 1869312 | Verschenken: 1869313

GEO EPOCHE Selbst lesen: 1864494 | Verschenken: 1864495  
GEOlino Selbst lesen: 1864498 | Verschenken: 1864499

\*Alle Preisangaben inklusive MwSt. und Versand. Es besteht ein 14-tägiges Widerrufsrecht. Zahlungsziel: 14 Tage nach Rechnungserhalt. Anbieter des Abonnements ist Gruner + Jahr GmbH. Belieferung, Betreuung und Abrechnung erfolgen durch DPV Deutscher Pressevertrieb GmbH als leistenden Unternehmer.

# Wie kam das Leben auf die Erde?

Text: Andreas Weber

**Ob Fische, Vögel oder Insekten: Die ganze Mannigfaltigkeit des Lebens geht auf einen gemeinsamen Ursprung zurück. Doch wie entstand der erste Organismus? Und wie sah er aus? Forscher sind dem größten Rätsel der Biologie auf der Spur**

**Ursprungsort**  
Viele Wissenschaftler  
vermuten, dass das  
Leben vor vier Milliarden  
Jahren tief am Meeres-  
grund entstanden ist



### Es ist erstaunlich, wie sich das Leben

auf der Erde allmählich immer weiter entwickelt hat, wie aus winzigen, einzelligen Kreaturen im Jahrtausenden währenden Prozess der Evolution komplexe Organismen hervorgegangen sind. Wesen, die irgendwann in der Lage waren, ihre Umgebung gezielt zu verändern, einander zu jagen, vielschichtige Gemeinschaften zu bilden, zu fühlen und zu denken.

Noch weit, weit erstaunlicher ist es jedoch, wie das Leben selbst entstanden ist. Was nur führte dazu, dass sich ein toter, wüster Planet in eine Heimat für Abermillionen Arten entwickeln konnte? Wie geschah das Wunder, dass sich vor Urzeiten leblose Materie in lebendige verwandelte?

Um dieses Urrätsel der Natur zu begreifen, müssen Forscher vor allem eine Frage klären: wie es zur Bildung der ersten Zelle kam, denn Zellen sind die kleinsten und ursprünglichsten Funktionseinheiten des Lebens. Was sie so grundlegend von ungeordneter, unbelebter Materie unterscheidet: Sie bilden zum Beispiel selbst ihre Grenze zur Umgebung aus. Sie sind gewissermaßen kleine Häuser, die ihre Wände und Türen aus eigener Kraft erbauen. Ohne die Membran, die die Zellen aller Lebewesen umgibt, würde sich deren Inhalt wild in der Umgebung verteilen.

Wer den Ursprung des Lebens rekonstruieren will, muss also verstehen, wie sich diese Membran erstmals ausbilden konnte. Das ist nicht ganz einfach – wenn man berücksichtigt, dass die Inhaltsstoffe und Reaktionskreise des Zellinneren eigentlich dazu nötig sind, die Membran herzustellen, dass aber ohne die Membran die ganze zelluläre

### Luftakrobaten

Vor geschätzt 300 Millionen Jahren haben Insekten das Fliegen erfunden. Die Vögel entdeckten es später erneut



### Verwandtschaft

Chamäleons und Orang-Utans zählen zu den Wirbeltieren. Doch zwischen ihnen liegen Millionen Jahre Evolution



**Nasses Erbe**  
Pilz, Pferd und  
Pflanze haben  
etwas gemeinsam:  
Zum Überleben  
ist ihr Stoffwechsel  
auf Wasser ange-  
wiesen



**Tierverbände**

Zahlreiche Spezies wie die Flamingos haben ein Sozialleben hervorgebracht, das etwa das gemeinsame Beaufsichtigen der Jungen einschließt





Maschinerie nicht funktionieren kann. Was Forscher bei der Suche nach dem Ursprung des Lebens quält, ist also die Extremversion des Henne-Ei-Problems.

Die Maschinerie im Zellinneren, die verschiedenen Eiweiße und anderen Stoffe, kann die Membran nicht allein gebaut haben. Für die Konstruktion ist letztendlich auch eine stabile Bauanleitung nötig – die DNA. Im Code der Erbsubstanz ist verzeichnet, welche Stoffe im Inneren der Zelle in welcher Reihenfolge entstehen, wie die Membran konstruiert werden muss oder wie sich eine Zelle teilt und einen neuen Tochterorganismus bildet. Ohne Zellinneres also keine Membran – und ohne Membran kein Zellinneres. Oder anders: ohne Henne kein Ei – und ohne Ei keine Henne.

# D

**Doch eine Entdeckung in den Tiefen** des Atlantischen Ozeans, die Wissenschaftler im Jahr 2000 machten, half dabei, das Dilemma zumindest teilweise aufzulösen. Die Tauchexpedition der „Alvin“ spürte damals laugenhaltige Thermalquellen entlang des Mittelatlantischen Rückens auf. An den „Weiße Raucher“ genannten Vulkanschlotten mischt sich die mit Mineralien angereicherte Lauge aus dem Meeresuntergrund mit dem leicht sauren Ozean. Zwischen den beiden Lösungen entsteht ein elektrisches Gefälle, wodurch geladene Teilchen zu der Lauge hin strömen. So gelangt mit dem Teilchenstrom beständig Energie in die winzigen Kämmchen und hilft, chemische Reaktionen anzutreiben.

Diese Erkenntnis könnte tatsächlich der Beginn einer Lösung des Urrätsels sein. Aus Sicht der Wissenschaft kann man Leben als einen Prozess begreifen, bei dem chemische Reaktionen ablaufen – und zwar ohne dass die Energie im freien Raum verpufft. Und exakt diesen Rahmen bieten die Felsstrukturen der Weißen Raucher.

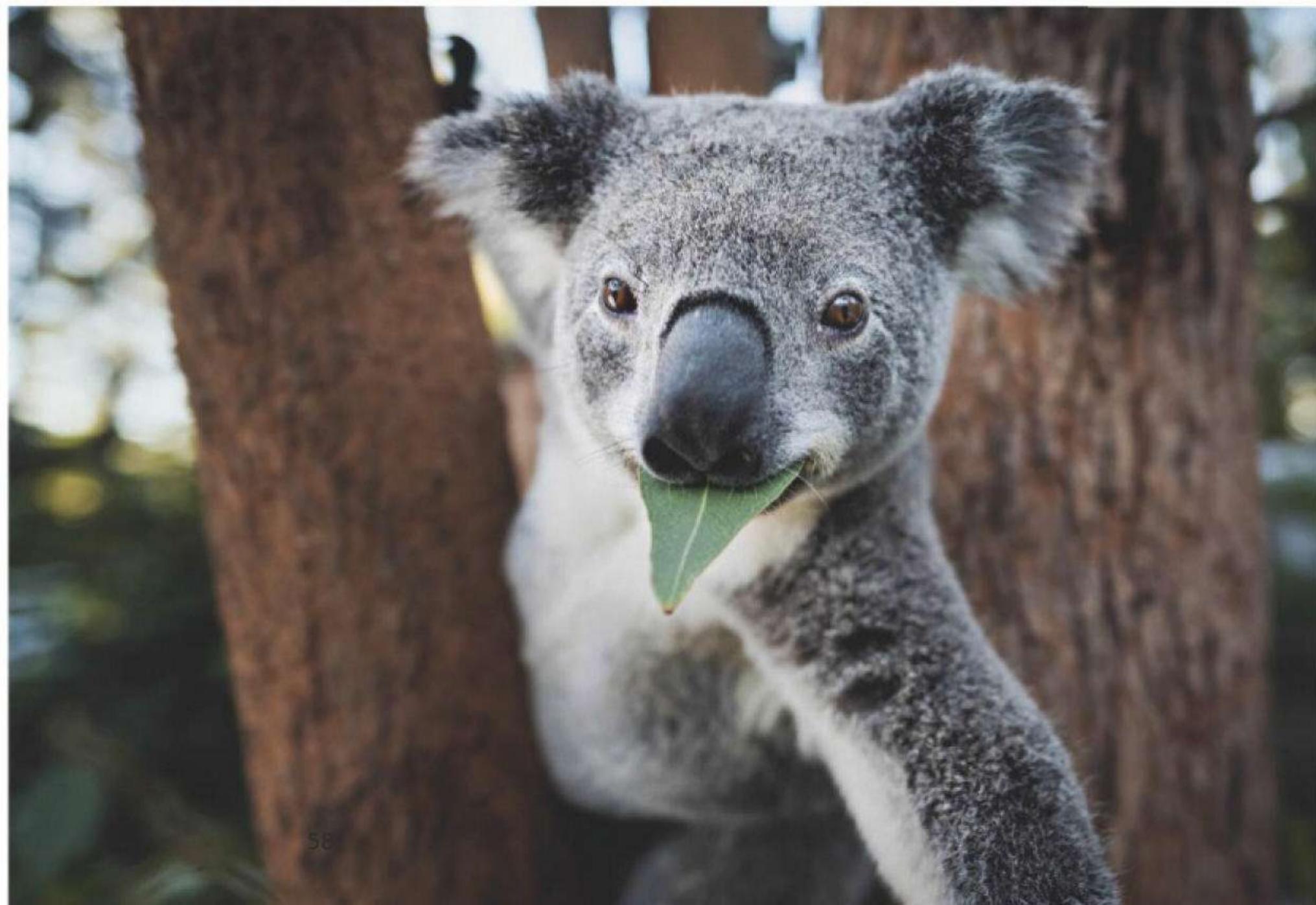
In den winzigen Poren im Fels, in denen sich die heiße Lauge aus dem

**Vierbeiner**

In den bolivianischen Anden wie in der afrikanischen Savanne sind pflanzenfressende Säugetiere entstanden, deren Lebensraum das Grasland ist



**Intelligenz**  
Jede Art hat ihre eigene Form von Lebensklugheit entwickelt, sei es das Schwarmwissen der Bienen oder die Eukalyptus-Expertise des Koalas





Erdinneren mit dem kühlen Seewasser vermischt hat, ist demnach permanent Energie freigesetzt worden. Der Beginn des Lebens wäre also kein Fettropfen und auch kein Gencode gewesen, sondern eine einfache von Wasser umspielte Höhlung im Stein, in der sich alle nötigen Prozesse bei stetem Energiefluss hätten entwickeln können.

Das Wunder des Lebens: ein Erbe des Steins, durch den und mit dem es entstand? Es ist eine These, die bislang weder bewiesen noch widerlegt werden konnte. Aber viel spricht für sie. Müsste ein Ingenieur einen Reaktor entwickeln, der kühles, saures, CO<sub>2</sub>-haltiges Meerwasser und warme, basische, eisen- und schwefelreiche Lauge so vermischt, dass frei werdende Energie systematisch genutzt werden kann, würde er wohl eine winzige Kammer mit porösen Wänden erfinden. In diesen mikroskopischen Durchlässen könnten die notwendigen Reaktionen schrittweise ablaufen.

In den Wänden dieser Poren könnten sich dieselben Reaktionen abspielen wie in Mikroorganismen, die anaerob – also ohne Sauerstoff – Energie gewinnen und Kohlenstoff aus Kohlendioxid für den Aufbau ihrer inneren Strukturen fixieren. Der die Pore umgebende Fels ist dabei beides: umgebende Membran und Raum gewordener Bauplan.

Die Idee zeigt: Wer verstehen will, wie die erste Zelle entstand, darf eben nicht nach der Grenze zwischen dem Organischen, dem Belebten, und der anorganischen Welt der Gesteine, Säuren, Gase suchen. Entscheidend ist, was diese beiden Welten verbindet. So gesehen müssen wir davon ausgehen, dass Lebewesen nur besonders raffinierte Formen ansonsten weitverbreiteter chemischer Reaktionen darstellen – also nichts anderes sind als Seewasser und Gestein, allerdings auf extrem komplexem Niveau.

Leben wäre demnach eine Einbettung der ursprünglichen Mineralchemie

des Fels in eine komplexe Maschinerie aus Zellsaft und Fettsäuren und später dann auch aus Fleisch und Blut. Die Theorie könnte erklären, warum im Zentrum der meisten Eiweißmoleküle, durch die Organismen ihre Stoffwechselenergie erhalten, Mineralstoffe stehen: Eisen und Kupfer in Enzymkomplexen der Atmungskette oder Magnesium im Chlorophyll der Pflanzen.

# W

**Wann aber begann das Leben, vom Stein unabhängig zu werden?** Laut der Tiefsee-Theorie geschah dies in dem Moment, als es gelang, die Reaktionsflächen des Mineralstoffwechsels mit einer ersten

**Meeresreptil**

Schildkröten sehen nicht nur  
uräglich aus, sie sind es auch:  
Noch vor den Dinosauriern haben  
sie Wasser und Land erobert



primitiven Außenhülle zu umgeben. Aber auch dieses Protowesen bestand noch aus einer mineralischen Pore. Die erste Zelle, der Vorfahr von uns allen, von Bienen, Blumen und Menschen, war demnach wohl aus Fels. Die Forschergemeinde nennt den hypothetischen Urorganismus LUCA, den „Last Universal Common Ancestor“ (letzter universeller Vorfahr). LUCA ist so auch das Bindeglied zwischen Bakterien und den Archaeen, einer Gruppe bakterienähnlicher, aber anders aufgebauter Einzeller.

Durchaus denkbar also, dass LUCA nicht im Freien, sondern in einer Felspore gedieh. Das wird zwar von manchen Wissenschaftlern bestritten. Aber neuere Untersuchungen am Alter der bakteriellen Gen-Ausstattung legen nahe, dass die ersten Organismen extrem früh in der Erdgeschichte auftraten – vielleicht sogar schon 100 000 Jahre nach dem Entstehen der Erde. Die Forscher sind der Ansicht, dass die Gene, die sich damals ausprägten, in der Lage waren, mit CO<sub>2</sub>, Wasserstoff, Eisen und Schwefel umzugehen. Das deutet auf Lebensbedingungen hin, wie sie in den „Weißen Rauchern“ herrschen.

# M

**Mit dem Entstehen einer Zellmembran** war das Leben in der Lage, auch andere Bereiche des Planeten zu besiedeln. Bis heute sind alle Organismen gleichwohl auf Spurenelemente und Mineralien angewiesen – jene Stoffe, die Eltern ihren Kindern per Gesundheitssirup verabreichen. Das ist das Erbe des Felses in uns. Wir sind mehr Mineral, als wir es uns je träumen ließen. Und deshalb im Universum wohl weniger Ausnahme als Regel.

Denn CO<sub>2</sub>, Fels und Wasser gibt es im All an vielen Orten. Das könnte heißen, dass Organismen nicht nur auf der Erde ein einziges Mal entstanden sind, sondern so gesetzmäßig auftreten wie eine chemische Reaktion – sobald die richtigen Bedingungen vorliegen. •

# Wie sind die Primzahlen verteilt?

Text: Tobias Hürter

Die Grundbausteine der Zahlenwelt geben Mathematikern seit Jahrtausenden Rätsel auf. Fest steht: Es existieren **unendlich viele Primzahlen**. Aber folgt ihre Position auf dem Zahlenstrahl einem verborgenen Muster?

E

**Es gibt ein Universum**, das noch riesiger und rätselhafter ist als jenes, in dem wir leben: die Welt der Zahlen. Den Eingang dazu kennt jeder. Eins, zwei, drei, vier, fünf – nichts ist einfacher als zählen. Dazu noch die Grundrechenarten – mehr braucht es nicht, um rasch an die Grenzen der Erkenntnis zu stoßen. Wer meint, die Welt der Zahlen sei allzu offensichtlich, stringent, klar und frei von Mysterien, irrt. Tatsächlich reicht kein Forscherleben aus, sie zu ergründen. Als „Königin der Mathematik“ gilt manchen gar die Zahlentheorie – also die Beschäftigung mit den Eigenschaften der ganzen Zahlen, zu denen 0, die natürlichen Zahlen (1, 2, 3 ...) und deren negative Entsprechungen

gehören. Fast 4000 Jahre alte Keilschrifttafeln künden von ihren Anfängen. Bis heute ist sie eine lebendige Disziplin.

Ihre wohl faszinierendsten Geheimnisse haben mit einer ganz besonderen Menge zu tun: den Primzahlen. Sie sind gewissermaßen die Bausteine der Zahlenwelt, vergleichbar den Atomen, aus denen die uns geläufige Materie aufgebaut ist. Was sie auszeichnet: Primzahlen sind durch genau zwei Zahlen teilbar, nämlich durch 1 und sich selbst (also 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 und so weiter).

Jede natürliche Zahl größer als 1 lässt sich dabei als genau ein Produkt von einer oder mehreren Primzahlen beschreiben – ähnlich, wie die Stoffe in unserer Welt auf spezifische Weise aus Atomen zusammengesetzt sind. Wer also die Primzahlen durchschaut, versteht die gesamte Zahlenwelt besser.

Allein: So fundamental diese Zahlen sind, so erstaunlich wenig ist bis heute über sie bekannt. Fest steht immerhin, dass es unendlich viele gibt. Den Beweis dafür kannte schon Euklid, bedeutender Mathematiker im 3. Jahrhundert v. Chr.

41

**Für jede noch so große Primzahl** gibt es eine noch größere – aber wie findet man die? Gibt es ein Muster, nach dem die Primzahlen auftauchen, wenn man sich entlang des Zahlenstrahls in Richtung Unendlichkeit vorstastet? Die Mathematiker haben in den letzten Jahrtausenden partout keines entdecken können. Um neue Primzahlen zu finden, müssen sie noch immer eine Zahl nach der anderen durchprobieren – genau so, wie jeder Schüler es tun würde.

Einst ging das nur in mühsamer Handarbeit, heute helfen Computer. Das größte Projekt dieser Art ist die Great In-

2 8 2 5 8

Die höchste bekannte Primzahl ist eine sogenannte Mersenne-Primzahl: eine Potenz der Zahl 2, von der 1 abgezogen wird

ternet Mersenne Prime Search (GIMPS), bei der Hundertausende Computer weltweit über das Internet zusammenge schlossen sind, um gemeinsam nach sogenannten Mersenne-Primzahlen zu suchen. Die müssen der Formel  $2^n - 1$  entsprechen (also etwa  $2^2 - 1 = 3$  oder  $2^5 - 1 = 31$ ) und eignen sich besonders gut für die computergestützte Suche. Trotzdem hat das GIMPS-Projekt seit seinem Start im Jahr 1996 erst 17 neue Vertreter dieser Primzahlen gefunden.

Im Dezember 2018 verkündete es seinen neuesten und bisher größten Fund: eine Mersenne-Primzahl mit wahrlich gigantischen 24 862 048 Dezimalstellen – die 51. bekannte Zahl dieser Art und zugleich die höchste bislang gefundene Primzahl überhaupt.

**Es scheint, als würden Primzahlen** sich ganz und gar unvorhersehbar verhalten. Aber zur Verwunderung der Mathematiker stimmt auch das offenbar nicht. 2016 veröffentlichten zwei Forscher von der Stanford University in Kalifornien eine Studie, für die sie aufeinander folgende Primzahlen untersucht hatten – und dabei eine seltsame Entdeckung machten.

Die meisten Mathematiker gehen davon aus, dass Primzahlen sich ganz und gar zufällig auf dem Zahlenstrahl verteilen. Oder besser gesagt, sie gingen davon aus. Denn die Ergebnisse der beiden Wissenschaftler rütteln an dieser Annahme. Sie programmierten einen Computer, die ersten 100 Millionen Primzahlen genauer zu analysieren. Dabei stellten sie fest, dass die Abfolge der Primzahlen gleichsam Schlagseite hat.

19

Wäre sie rein zufällig, müsste beispielsweise bei einer genügend großen Folge von Primzahlen auf solche mit der Endziffer 1 annähernd genau in einem Viertel der Fälle eine Primzahl folgen, die ebenfalls auf 1 endet. Schließlich gibt es nur vier Möglichkeiten für die letzte Ziffer: 1, 3, 7, 9. Alle anders endenden Zahlen sind durch 2 oder durch 5 teilbar. Die Forscher aber fanden heraus, dass etwa auf Primzahlen mit der Endziffer 1 nur in 18,5 Prozent der Fälle eine mit derselben Endziffer folgt. Viel zu wenig!

Was hat es mit dieser Abweichung auf sich? Niemand weiß es. Die Mathematiker aus Kalifornien spekulieren, ob die von ihnen entdeckte Anomalie etwas mit der sogenannten ersten Hardy-Littlewood-Vermutung (es gibt auch noch eine zweite) zu tun hat. Sie wurde 1923 von zwei britischen Mathematikern veröffentlicht und erlaubt Aussagen über die Verteilung von Gruppen nah beieinander liegender Primzahlen.

Das einfachste Beispiel für eine solche Gruppe sind Primzahl-Zwillinge: Paare wie 11 und 13 oder 29 und 31, die den kleinstmöglichen Abstand 2 haben. Aber auch Drillinge, Vierlinge und andere

**Wer den Code der Primzahlen knackt, erhält eine Million Dollar Preisgeld**

Mehrlinge existieren. Die Vermutung der Briten beschreibt, wie häufig Anordnungen, die bestimmte Bedingungen erfüllen, jeweils auftreten. Sie besagt außerdem: Selbst von den exotischsten unter diesen Mehrlingen gibt es unendlich viele. So etwas wie ein größtes Zwillings- oder Drillingspaar existiert nicht.

Die meisten Mathematiker halten die erste Hardy-Littlewood-Vermutung für wahr, aber bis heute konnte sie niemand beweisen. Viele Theorien über Primzahlen basieren darauf – darunter auch die Erklärung der Stanford-Forscher für ihre Beobachtungen, die aber noch weitere, äußerst spekulative Annahmen einbezieht.

Die bedeutendste ungelöste Hypothese stammt jedoch von dem genialen deutschen Mathematiker Bernhard Riemann. Er formulierte sie im Jahr 1859.

Riemann befasste sich mit dem Problem, zu jedem beliebigen Wert die Anzahl der Primzahlen zu bestimmen, die kleiner als dieser Wert sind. Ob er aber einen Weg gefunden hatte, die Anzahl wirklich exakt anzugeben, konnte er letztlich nur vermuten. Bis er 1866 starb, beschäftigte er sich offenbar nicht weiter damit. Alle seither angestellten Berechnungen bestätigen die Vermutung – dennoch versuchen Riemanns Fachkollegen bislang vergeblich, seine berühmte Hypothese zu beweisen. Wem dies gelingt, der erhält ein Preisgeld von einer Million Dollar, das das Clay Mathematics Institute auf die Lösung des Problems ausgesetzt hat.

Er hätte den verborgenen Code der Primzahlen geknackt und hielte womöglich den Schlüssel zu einem unendlich großen Rätselreich in Händen.

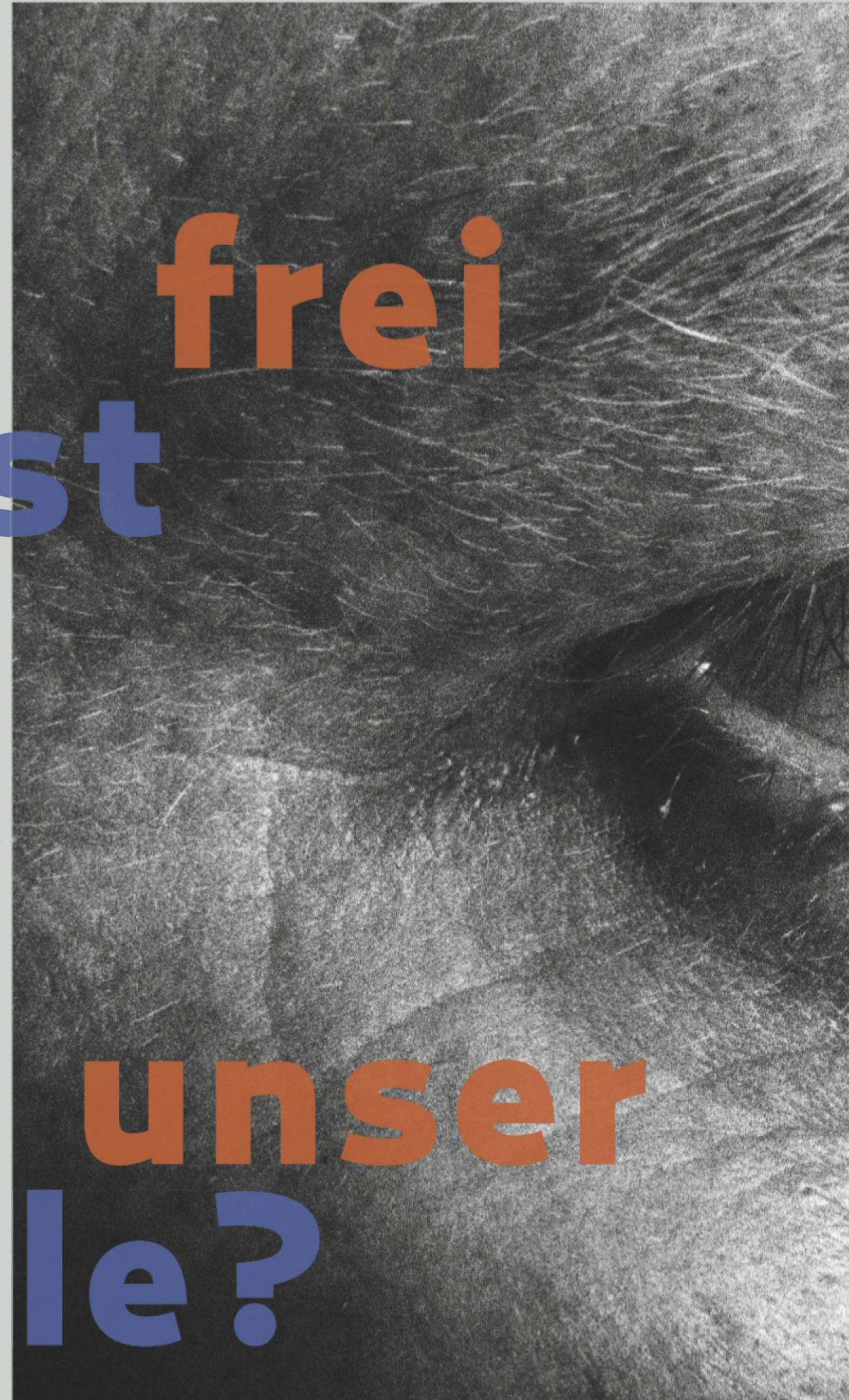
9 9 3 3

7

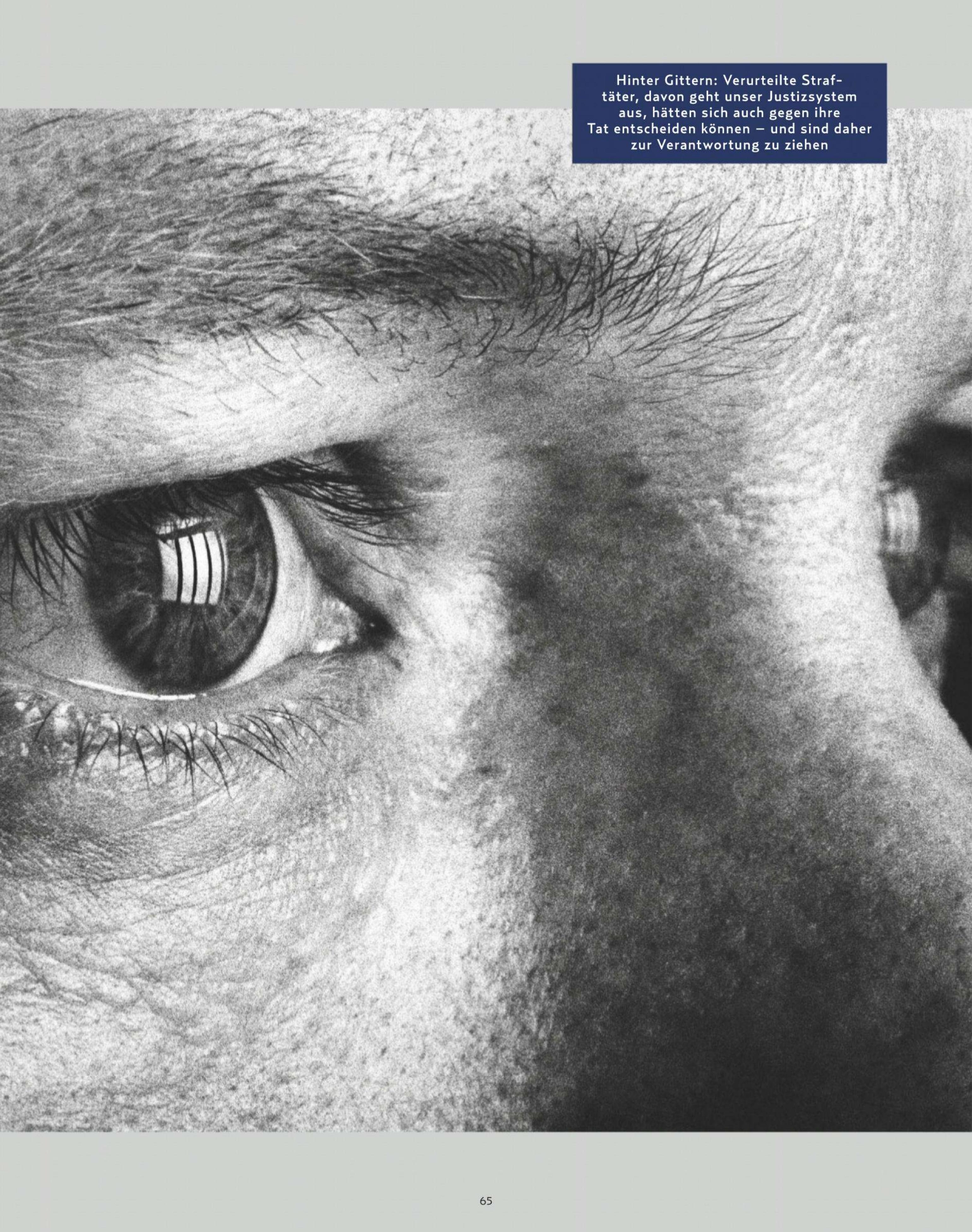
# Wie frei ist

Entscheiden wir frei über das, was wir tun, oder ist unser **Handeln vorherbestimmt?** Mit verschiedenen Methoden versuchen Forscher, diesem Rätsel auf den Grund zu gehen. Die Antwort könnte unsere gesamte Gesellschaft in Frage stellen

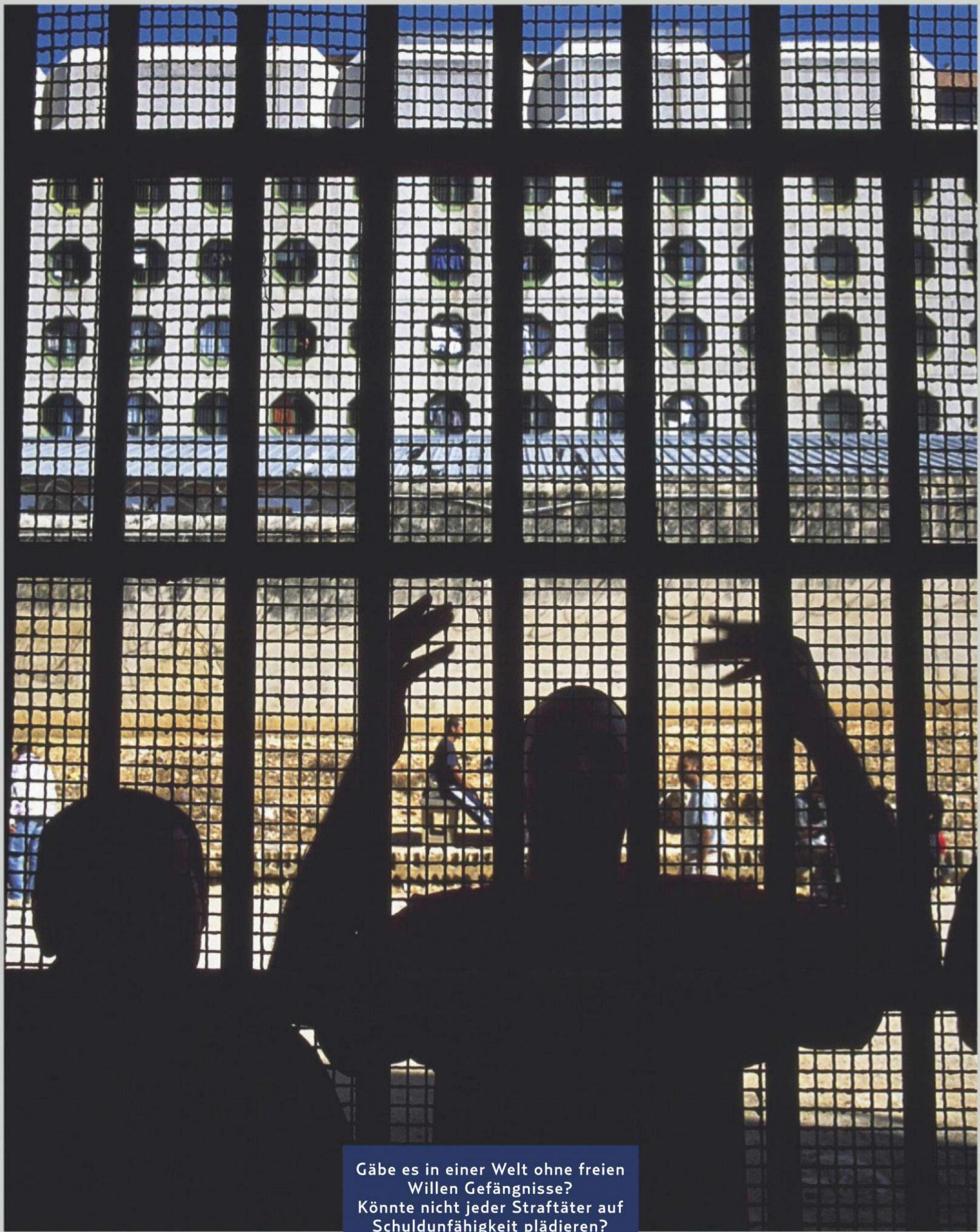
Text: Ralf Schulte und Sabrina Winter



unser  
Wille?



Hinter Gittern: Verurteilte Straftäter, davon geht unser Justizsystem aus, hätten sich auch gegen ihre Tat entscheiden können – und sind daher zur Verantwortung zu ziehen



Gäbe es in einer Welt ohne freien  
Willen Gefängnisse?  
Könnte nicht jeder Straftäter auf  
Schuldunfähigkeit plädieren?

# e

---

**Es ist ein Paradox**, das die Philosophen seit der ausgehenden Antike beschäftigt: Ist der Mensch frei? Kann er sein Tun eigenständig wählen? Oder ist er vielmehr Teil eines kausal geschlossenen Weltganzen, das jeden seiner Schritte bestimmt? Bis heute ist der Streit zwischen Deterministen und Indeterministen unentschieden – ein nicht bloß akademischer Disput, denn es geht um die Frage, ob und in welchem Maß wir für unser Handeln verantwortlich sein können.

Schon der Kirchenvater Augustinus von Hippo (354–430) lehrt gegen die Verfechter eines freien Willens, der Mensch könne sich nur durch Gottes Gnade zum Guten entscheiden und sich aus eigener Kraft nicht der Sünde enthalten.

Und so herrscht jahrhundertelang in der christlichen Tradition ein theologischer Determinismus. Noch 1525 mahnt Martin Luther unmissverständlich „dass Gott alles mit unveränderlichem, ewigem und unfehlbarem Willen vorhersieht, beschließt und ausführt.“

Erst in der aufklärerischen Neuzeit ändert sich diese Vorstellung. Für Immanuel Kant (1724–1804) ist der freie Wille die wichtigste Voraussetzung moralischen Handelns überhaupt. Er meint sogar, dass nicht irgendeine Tat, sondern

allein der Wille im eigentlichen Sinn gut genannt werden könne.

Der Preis dafür ist freilich die Teilung der Welt in eine geistige und eine physische Sphäre. Schon bald versuchen die modernen Wissenschaften, dieses Mysterium empirisch aufzulösen: Darwins Erkenntnisse über die Entstehung der Arten weisen dem Menschen einen natürlichen Platz im Tierreich zu. Sigmund Freuds psychoanalytische Theorie macht die Zeitgenossen mit der Existenz unbewusster Beweggründe vertraut. Ökonomie und Soziologie legen Gesetzmäßigkeiten in Geschichte und Kultur offen.

All das stützt die uns heute vertraute Vorstellung von der Prägung des Menschen – biologisch, psychisch und sozial.

# d

**Doch wie genau** ist der Mensch „festgelegt“? Unzweifelhaft handeln wir nie in absoluter Freiheit. Als biologische Wesen sind wir an die Fähigkeiten der Spezies gebunden und unterliegen dem Einfluss der Biochemie unserer Körper. Es gibt natürliche und kulturelle Bedingungen dafür, wie wir überhaupt handeln können, und einige dieser Bedingungen lassen

sich auch nicht ändern. Am Beispiel der Liebe hatte Artur Schopenhauer (1788–1860) einen wenig romantischen biologischen Determinismus dargelegt: „Alle Verliebtheit, wie ätherisch sie sich auch gebärden mag, wurzelt allein im Geschlechtstrieb.“

Manche Vertreter des Determinismus sind sogar der Auffassung, sämtliche Ereignisse in der Natur seien als kausale Folge von Naturgesetzen beschreibbar – und damit vorherbestimmt. Jeder Zustand des Universums ist demnach ein unvermeidliches Resultat des vorhergehenden – unmöglich, dass auch etwas anderes geschehen könnte. Da der Mensch Teil der Ursache-Wirkung-Ketten ist, gibt es für ihn keine gewählten Entscheidungen, sondern zu jedem Zeitpunkt nur eine Option, festgeschrieben wie im Drehbuch eines Spielfilms.

Der Bonner Philosoph Markus Gabriel nennt diese Denkrichtung einen naiven Determinismus, der guten wissenschaftsphilosophischen Argumenten nicht standhalte. „Naturgesetze beschreiben nicht, was in jedem Augenblick in der Natur geschieht oder gar geschehen muss. Deswegen kann man auch nicht auf Basis der Kenntnisse der Naturgesetze allein vorhersagen, was im nächsten Augenblick geschehen wird.“

Ist es also ein Beleg für die Existenz des freien Willens, dass ein derart strenger Determinismus unbegründet erscheint? Gibt es einen Spalt im Gefüge der natürlichen Ursachen und Wirkungen, durch den der Mensch aus eigenem

**Ein Experiment mit Hirnstrom-Messungen gilt manchen bis heute als Beweis, der freie Wille sei nichts als eine Illusion**

Antrieb Schöpfer seiner Handlungen sein kann?

Kompatibilisten sind überzeugt, dass die Gesetzmäßigkeit der Natur und die Freiheit des Willens miteinander vereinbar sind. Schließlich leben wir alle in dem Gefühl, ohne Zwang entscheiden zu können, selbstbestimmt, freiwillig und in dem Bewusstsein, dass sich immer auch ein anderer Weg einschlagen ließe.

## a

**Aber genügt** das subjektive Empfinden? Oder erliegen wir vielmehr einer Täuschung? Denn die Vorstellung, nicht autonom zu agieren, wäre ja höchst irritierend und unangenehm. Ist es möglich, dass unsere Gehirne den Zusammenhang von Handlungen und Absichten selbst produzieren und uns nur denken lassen, wir seien autonome Akteure? Wird unser Wollen quasi im Hintergrund unsichtbar gelenkt?

„Ich kann tun, was ich will, aber ich vermag nicht es zu wollen“, notiert Artur Schopenhauer. Es ist nicht möglich, jemanden aufzufordern, etwas Bestimmtes zu wollen. Wollen ist kein Handeln. Demnach wäre es also der Wille selbst, der uns keine Wahl lässt, und unsere Handlungsfreiheit somit eine bloße Illusion.

Diesem Verdacht verleihen Hirnforscher und Neurowissenschaftler heute neue Impulse. Sie erforschen, was im Gehirn geschieht, wenn wir einen Entschluss fassen. Und dringen damit gewissermaßen in die Schaltzentrale unserer Willensbildung vor. Was sie dort finden, scheint den Deterministen deutlich mehr Stoff für ihre Argumente zu liefern als den Verfechtern eines freien Willens.

Besonders ein Experiment untermauerte in jüngerer Zeit die Vorstellung, dass unsere Entscheidungen früher feststehen, als uns bewusst ist, dass sie demnach nicht das Resultat eines freien Willens sein können. Der Neurophysiologe Benjamin Libet wies in den 1980er Jahren Probanden an, zu einem selbst gewählten Zeitpunkt spontan und absichtlich ihre Hand zu bewegen. Dabei schauten sie auf eine Art Uhr – einen auf kreisförmiger Skala rotierenden Lichtpunkt – und sollten sich über die Position dieses Punkts merken, wann genau sie ihren bewussten

Entschluss gefasst hatten. Gleichzeitig maß Libet die elektrische Aktivität an den beteiligten Hirnarealen und stellte fest: Die neuronalen Vorgänge, die die Bewegung vorbereiteten, setzten 0,3 bis 0,5 Sekunden früher ein, als sich der Proband seiner Absicht bewusst wurde.

Libet schloss daraus: Nicht die bewusste Absicht löst eine Nervenzellaktivität aus. Sondern umgekehrt: Die Nervenzellen setzen eine Aktivität in Gang, noch bevor eine willentliche Absicht in das Bewusstsein tritt. Das schien die Annahme der Deterministen zu bestätigen: Libets Experiment galt manchen als Beweis dafür, dass der freie Wille tatsächlich nur eine Illusion ist.

Andere Forscher wiederholten und verfeinerten das Experiment. Auch sie stellten fest: Der Motorkortex, der für Bewegungssteuerung verantwortliche Teil des Gehirns, ist aktiv, bevor die Probanden sich bewusst entschieden, eine Bewegung auszuführen. „Wir tun nicht, was wir wollen, sondern wir wollen, was wir tun“, kommentiert der Münchener Psychologe Wolfgang Prinz die Resultate.

Doch Libets Studie gilt vielen Kritikern als eines der meist überschätzten Experimente in der kognitiven Neurowissenschaft. So ist etwa der Neurologe und Philosoph Henrik Walter überzeugt, dass die Versuchsanordnung gar nicht den bewussten Willen selbst untersucht, sondern lediglich eine Beziehung zwischen einer Bewegung, einem Aufmerksamkeitsprozess und einer elektrischen Aktivität feststellt. Daher sei es überzogen, aus dem Experiment zu folgern, dass unser Bewusstsein für willentliche Handlungen keine Rolle spielt.

Kritiker machen zudem geltend, Libets Laboraufbau werde den Bedingungen der Praxis nicht gerecht. Welche Aussagekraft können gemessene Hirnströme, die sich wenige Millisekunden vor einer Bewegung im Gehirn manifestieren, über wegweisende, teils jahrelang abgewogene Entscheidungen haben? Derartige mentale Prozesse sind zu komplex, um sie auf

einen bestimmten Punkt, kurz vor einer Handlung oder einem Entschluss, reduzieren zu können. Dass er frei sei, lässt sich nur von einem überlegten Willen sagen, so der Philosoph Jürgen Habermas.



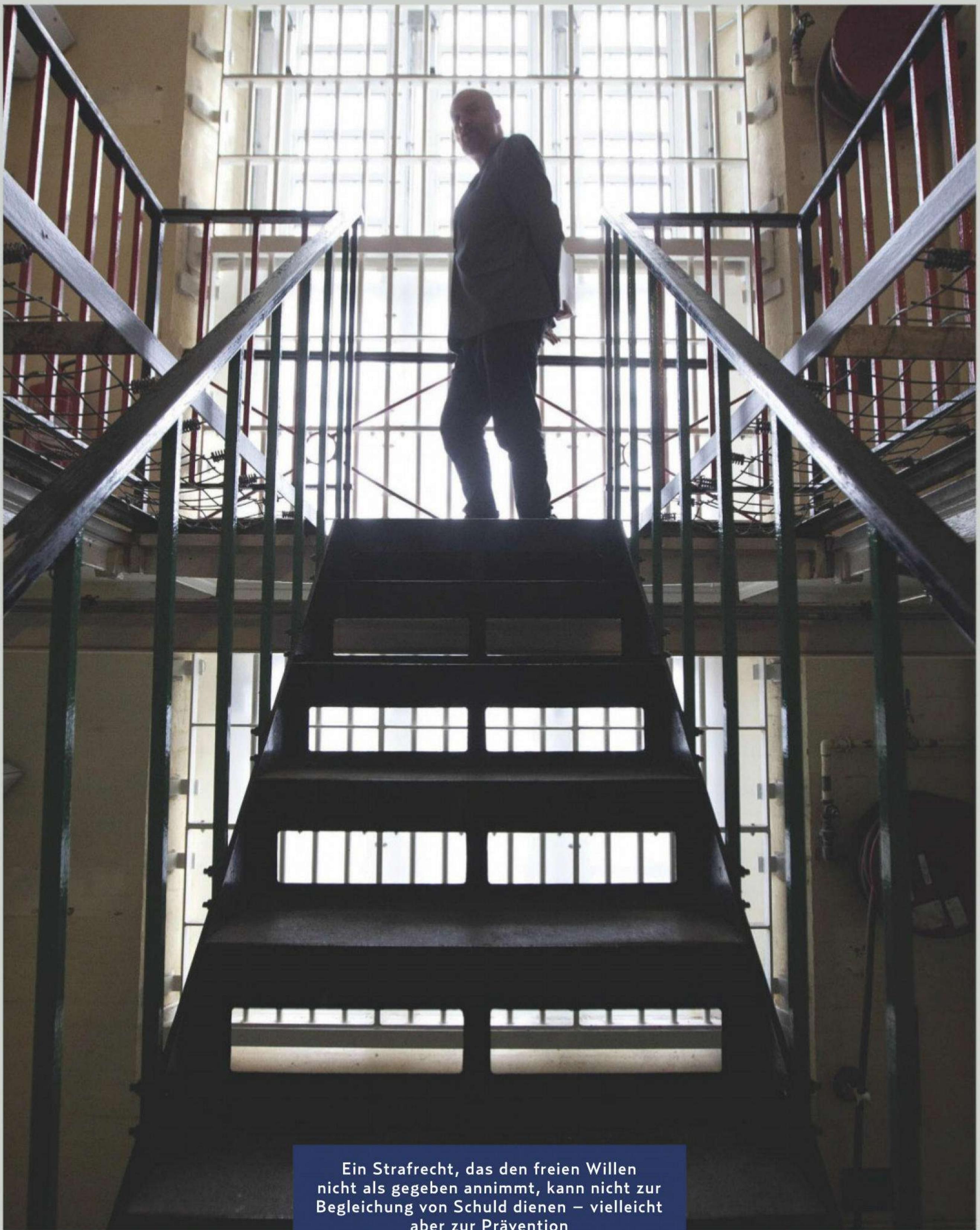
**Von den 21 Forschern**, die die britische Wissenschaftsautorin Susan Blackmore 2005 für ihr Buch „Gespräche über Bewusstsein“ interviewte, lehnte zu ihrer Überraschung keiner die Idee der Willensfreiheit völlig ab. „Theoretisch spricht alles gegen die Willensfreiheit, empirisch spricht alles dafür“, resümierte einer der Gesprächspartner. Und so brachten manche von ihnen die „Als-ob“-Lösung ins Spiel: Für unser Zusammenleben ist es essenziell, dass wir uns eine Freiheit des Willens, wenn auch keine absolute, gegenseitig zumindest zuschreiben.

Darauf fußt unsere Demokratie, die Überzeugung, dass wir uns eine freie Meinung bilden und frei wählen können. Und unser Strafrecht ist ohne die Idee des freien Willens nicht zu denken: dass ein Täter Handlungsoptionen hat und über Kontrollmechanismen verfügt.

Schuldfähigkeit setzt voraus, dass jemand erkennen kann, was Recht und was Unrecht ist. Dass er imstande ist, sich entsprechend einer Norm zu verhalten – und bewusst die Entscheidung trifft, ein Gesetz zu brechen. Andernfalls wäre es für Steuerhinterzieher, Betrüger und Mörder ein Leichtes zu behaupten, lediglich Opfer neuronaler Prozesse zu sein. Wo kein freier Wille, da keine Schuld – für diese Einsicht büßten im 4. Jahrhundert die Gegner des Augustinus mit Verbannung.

Heute sind sich die meisten Experten zumindest in diesem Punkt einig, dass die vorausgesetzte Willensfreiheit als Konzept, das ein geregeltes Miteinander erst möglich macht, nicht aufgegeben werden kann. Selbst wenn der freie Wille eine Illusion sein sollte, so wäre er immerhin eine notwendige •

**Für unser Zusammenleben und die Demokratie ist es geradezu essenziell, dass wir eine Willensfreiheit voraussetzen**



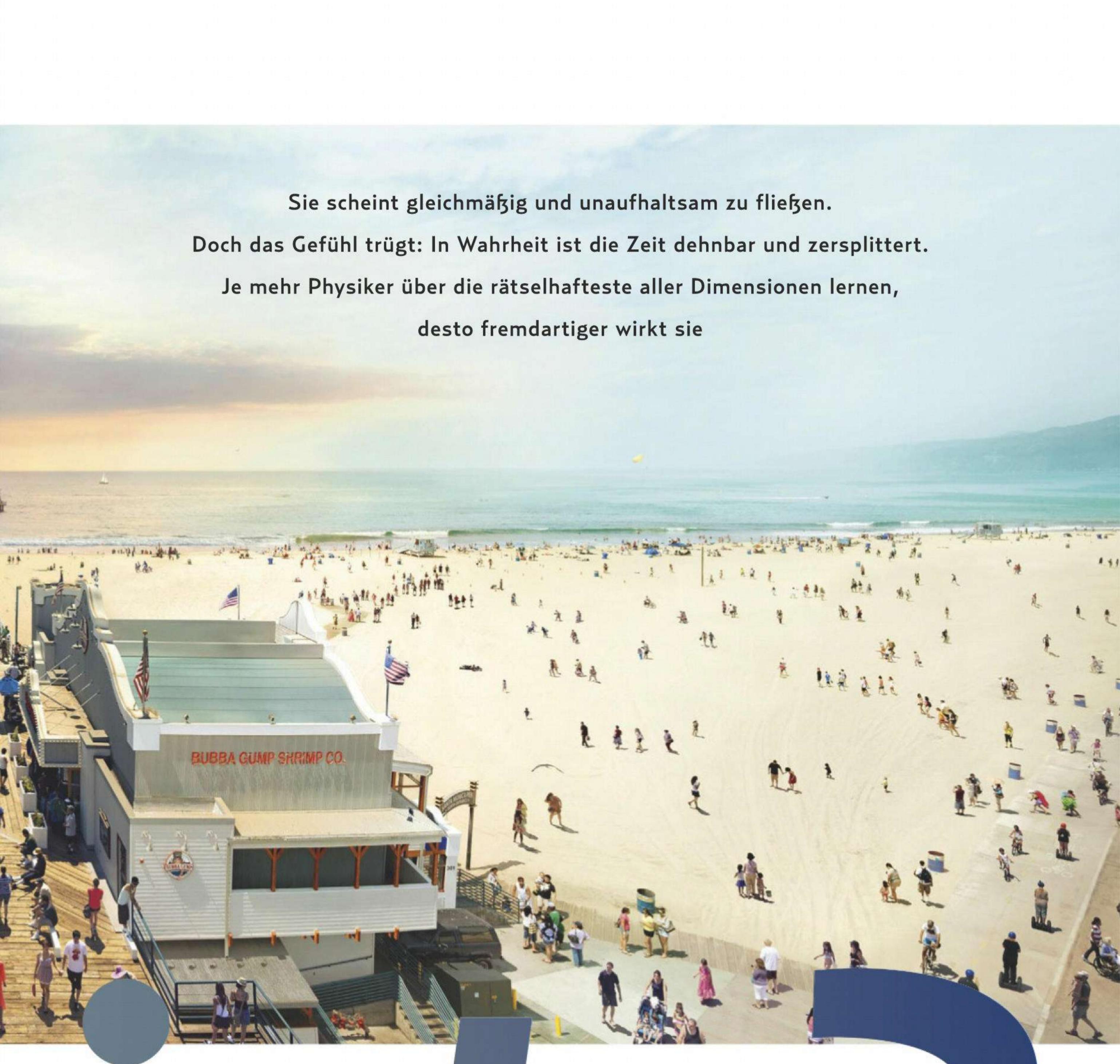
Ein Strafrecht, das den freien Willen  
nicht als gegeben annimmt, kann nicht zur  
Begleichung von Schuld dienen – vielleicht  
aber zur Prävention

Zeitraffer: Für die Serie »Day to Night« kombiniert der Fotograf Stephen Wilkes die Ereignisse vieler Stunden (hier am Santa Monica Pier, Los Angeles) zu einem Augenblick



Was ist  
das Wesen  
der

e



Sie scheint gleichmäßig und unaufhaltsam zu fließen.

Doch das Gefühl trügt: In Wahrheit ist die Zeit dehnbar und zersplittert.

Je mehr Physiker über die rätselhafteste aller Dimensionen lernen,

desto fremdartiger wirkt sie

Text: Nora Saager

Fotos: Stephen Wilkes

# S

Der gleichmäßige Fluss der Zeit ist eine Illusion. Sie lässt sich strecken und stauchen, ja sie vergeht sogar für jeden Einzelnen unterschiedlich schnell

Seit der Antike streiten Philosophen und Forscher darüber, was sich hinter einem für uns völlig alltäglichen Phänomen verbirgt. Einem Phänomen, das zu den wohl größten wissenschaftlichen Rätseln gehört: die Zeit. Die Gelehrten stellen Fragen wie: Hat die Zeit einen Beginn? Warum vergeht sie eigentlich? Ja, existiert sie überhaupt?

In der Physik führt die Jagd nach dem Wesen der Zeit geradewegs zu den Meilensteinen in unserem Verständnis der Welt. Dabei berauben die Forscher die Zeit aller Eigenschaften, die unser Gefühl für sie prägen. Was bleibt, ist ein verwirrendes, fremdartiges Konstrukt. In seinem Buch „Die Ordnung der Zeit“ schreibt der Physiker Carlo Rovelli: „Die Zeit zu untersuchen ist so, als halte man eine Schneeflocke in den Händen: Je länger wir sie betrachten, desto mehr schmilzt sie dahin, bis sie schließlich ganz verschwunden ist.“

Obwohl die Zeit überall hineinspielt, verstehen Forscher sie nirgends ganz. Zahlreiche Wissenschaftler widmen sich diesem Rätsel. Wer es löst, dem wird sich ein neuer, vollständigerer Blick auf die Wirklichkeit offenbaren.

Um zu verstehen, wie sich Physiker nach und nach der Enträtselung der Zeit genähert haben, lohnt ein Blick in

förmig und ohne Beziehung auf irgend einen äußeren Gegenstand“, schrieb der Gelehrte. Im Verborgenen tickte demnach unaufhaltsam eine kosmische Uhr, die der Welt den Takt vorgab und allen Dingen eine präzise Dauer und Reihenfolge verlieh.

Dieses Verständnis von Zeit erscheint uns sofort einleuchtend. Doch Newtons Gleichungen sagen auch etwas sehr Erstaunliches: Seine Mechanik unterscheidet nicht zwischen Vergangenheit und Zukunft. Würde jemand eine kosmische Rückspultaste betätigen – Newtons Gesetze der Bewegung hätten unverändert Gültigkeit.

Man denke etwa an die Erde, die um die Sonne kreist. Auf der einen Seite drängt den Planeten – nach Newton – die Masseträgheit dazu, auf geradem Weg ins All hinauszufliegen. Auf der anderen Seite zerrt die Schwerkraft ihn (vor allem) in Richtung Sonne. Dieser Widerstreit zwingt die Erde auf ihre Bahn. Angenommen, wir könnten nun den Lauf der Zeit umkehren: Was würde sich an ihrem Orbit ändern? Die Antwort lautet: nicht das Geringste. Alle Gesetze, die ihre Flugbahn bestimmen, gälten nach wie vor. Die Erde würde nur ihre Flugrichtung ändern.

Für einen Himmelskörper, der durchs All rast, spielt die Richtung der Zeit also



geht der Billardkugel schon nach wenigen Augenblicken der Schwung aus: Sie bleibt liegen. Würde sich der Zeitfluss umkehren, würde sich die zur Ruhe gekommene Kugel wie von Geisterhand in Bewegung

## Einstein erkannte: SCHWERKRAFT UND

die Geschichte. Im Jahre 1687 erhob der englische Naturforscher Isaac Newton den Raum und die Zeit zur großen Bühne des Weltgeschehens. „Die absolute, wahre und mathematische Zeit verfließt an sich und vermöge ihrer Natur nach gleich-

keine Rolle. Für eine Kugel, die über einen Billardtisch rollt, tut sie das sehr wohl. Planet und Kugel folgen zwar beide den Gesetzen der Mechanik. Doch während der Himmelskörper über Jahrtausende unbeeindruckt seine Bahnen zieht,

setzen und immer schneller werden. Jeder Betrachter wäre klar, dass hier etwas nicht stimmt.

Der entscheidende Unterschied ist die Reibung. Wenn die Billardkugel über den grünen Filz rollt und sich durch ein



Meer aus Luftteilchen drängt, wird ihre Bewegungsenergie durch die Reibung unerbittlich in Wärme umgewandelt.

Hier ist ein fundamentales Naturgesetz am Werk: der Zweite Hauptsatz

zerbrechen, aber sie setzen sich niemals spontan wieder zusammen. Und auch in einer von Reibung aufgewärmten Billardkugel steigt die Unordnung (Physiker sprechen von Entropie). Denn in der

Physik, in dem die Zeit nicht umkehrbar ist. Schon bald kam deshalb die Idee auf, er könne auf den Ursprung des Zeitpfeils verweisen, denn im ganzen Universum steigt zunehmend die Unordnung. Ist

## *BEWEGUNG verändern den Lauf der Zeit*

der Thermodynamik. Er besagt, dass bestimmte Prozesse ohne äußere Einwirkung nur in eine Richtung ablaufen, so gut wie nie in die andere. Und zwar vom physikalisch geordneteren zum ungeordneteren Zustand. Herabstürzende Tassen

Kugel bewegen sich die Moleküle nun stärker.

Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik, erstmals 1850 vom deutschen Physiker Rudolf Clausius formuliert, ist der einzige Grundsatz der klassischen

also die Zunahme der Entropie dafür verantwortlich, dass Zeit nur in eine Richtung fließt?

Das könnte man glauben, wenn nicht ein Physiker namens Albert Einstein zwischen 1905 und 1915 gezeigt hätte, dass

nicht die Entropie die Zeit und auch ihre Geschwindigkeit beeinflusst, sondern Schwerkraft und Bewegung. Und dass die Zeit entgegen Newtons Annahme keineswegs absolut ist. Sie ist relativ.

Die Relativitätstheorie macht jede Vorstellung zunichte, die wir uns intuitiv vom Wesen der Zeit machen. Jeder Punkt

Ende eines Tages gegenüber irdischen Uhren um 7,2 Mikrosekunden nach. Klingt nach einer Winzigkeit. Aber würde das Navigationssystem diese aus Einsteins Formeln sich ergebende Verzögerung nicht berücksichtigen, läge die berechnete GPS-Position nach 24 Stunden schon um 2,2 Kilometer daneben.

verlangsamen die Zeit – und zwar umso mehr, je stärker ihre Schwerkraft wirkt. Auf einem Berg, weiter entfernt vom Erdmittelpunkt, vergeht die Zeit deshalb schneller als im Tal. Auf Kopfhöhe vergeht sie schneller als auf Höhe der Füße.

Warum beeinflusst die Schwerkraft den Gang der Uhren? Dieser Effekt röhrt

## Womöglich **FLIESST** die Zeit gar nicht, sondern

im Raum hat seine eigene Zeit. Selbst für unseren Kopf vergeht die Zeit anders als für unsere Füße. Es gibt keine „Urzeit“, an der wir die Dinge messen können. Ob eine Uhr schnell oder langsam geht, lässt sich erst sagen, wenn wir sie mit einer anderen Uhr vergleichen. In der Welt der Relativität brauchen wir stets ein Bezugssystem.

# E

Einsteins erste geniale Erkenntnis war, dass bewegte Uhren – beobachtet aus einem äußeren Bezugssystem – langsamer ticken als ruhende Uhren. Veranschaulicht wird das im berühmten Zwillingsparadoxon: Darin bleibt ein Zwilling auf der Erde (dem Bezugssystem), während der andere ins All reist. Weil sich das Raumschiff aus Erd-Perspektive sehr schnell bewegt, dehnt sich für den Raumfahrer die Zeit. Er selbst merkt davon nichts: Aus seiner Sicht tickt die Uhr im Raumschiff mit unveränderter Geschwindigkeit. Doch als er nach vielen Jahren zur Erde zurückkehrt, stellt er erstaunt fest, dass sein Zwilling stärker gealtert ist als er selbst. Für den Daheimgebliebenen ist seit dem Abschied mehr Zeit vergangen als für den Reisenden.

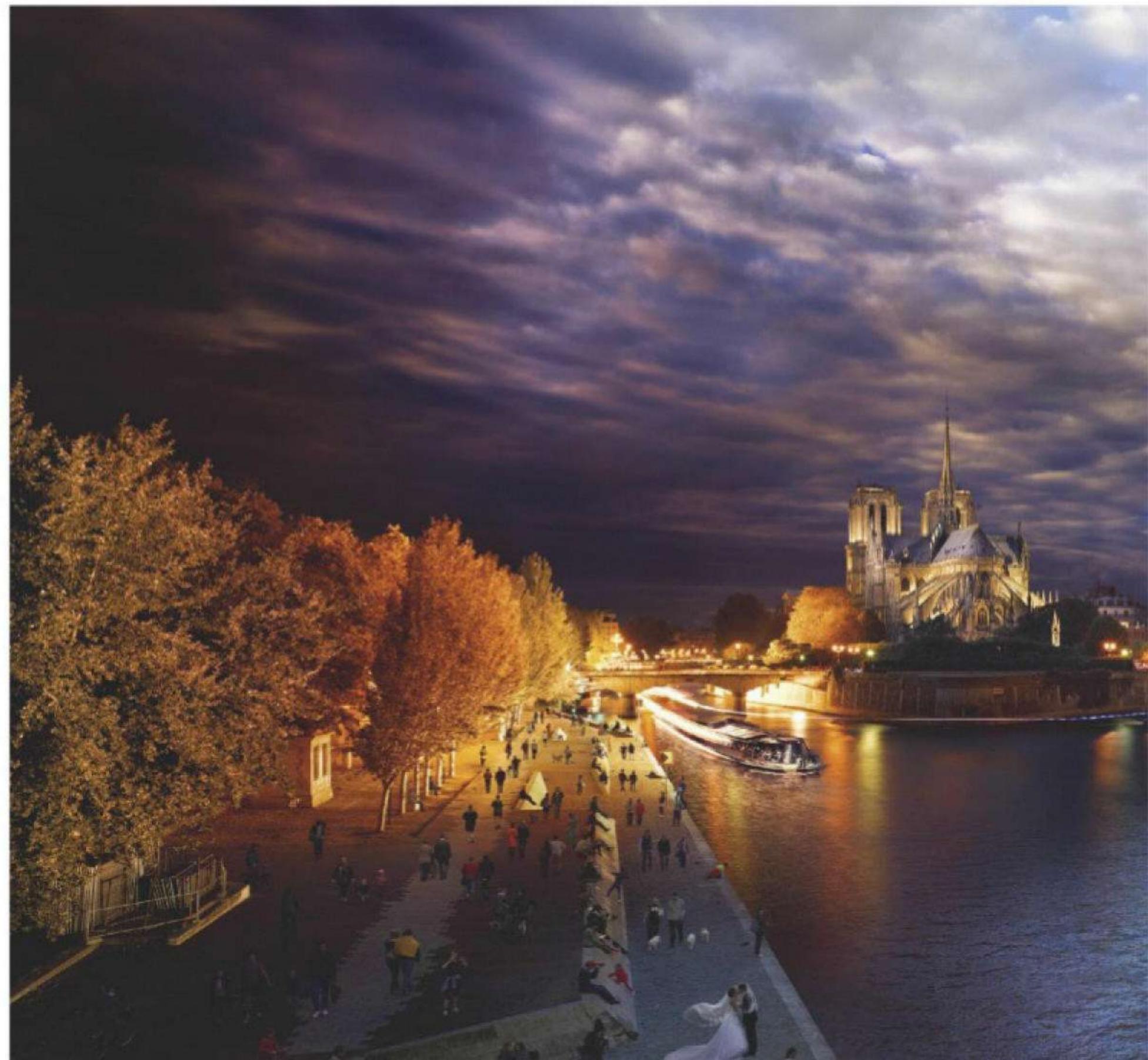
Wie stark dieser Effekt ausfällt, hängt von der Geschwindigkeit ab. Der Physiker Richard Muller liefert in seinem Buch „Jetzt“ folgendes Rechenbeispiel: Die Uhr eines GPS-Satelliten, der mit 14 000 km/h um die Erde rast, geht am

Den Extremfall der Zeitdehnung erleben Lichtteilchen. Mit rund 300 000 Kilometern pro Sekunde erreichen sie die zulässige Höchstgeschwindigkeit im Universum. Hätte ein Lichtteilchen eine Uhr im Gepäck, würde sie aus unserer Sicht stillstehen. Wäre es möglich und von den Gesetzen der Natur erlaubt, sich mit Überlichtgeschwindigkeit zu bewegen, könnte man sogar in der Zeit zurückkreisen.

Doch damit nicht genug der Merkwürdigkeiten. Einsteins zweite geniale Erkenntnis lautete: Auch große Massen

daher, dass Raum und Zeit nicht unabhängig voneinander existieren. Sie sind zu einer vierdimensionalen Raumzeit verwoben, einem elastischen Gebilde, so elastisch wie die Oberfläche eines Luftballons. Große Massen verursachen Dellen in dieser kosmischen Gummihaut. Sie dehnen buchstäblich die Zeit.

Die Relativitätstheorie wirft nicht nur unser Bild einer gleichmäßig fließenden, für alle geltenden Zeit über den Haufen. Sie raubt uns auch die Vorstellung, es gäbe eine allgemeingültige Gegenwart.



Das Beispiel der beiden Zwillinge wirft die Frage auf: Wie kann der Daheimgebliebene wissen, was sein Bruder im Raumschiff „jetzt“ macht? Er kann es nicht, denn die Zeit vergeht für beide unterschiedlich. Angaben wie „fünf Jahre nach Abreise“ haben für die Brüder also unterschiedliche Bedeutungen.

Und doch geht diese Einigkeit verloren, wenn wir die Weiten des Universums verlassen und in die Welt des Allerkleinsten eintreten.

Das Modell der Quantenmechanik beschreibt das Verhalten winzigster Teilchen wie Atome, Elektronen oder Lichtteilchen. Ihre Gleichungen wurden in der

führen, scheinen sie sich willkürlich für einen Ort oder einen Zustand zu entscheiden.

Die Zeit verhält sich in diesem Wirrwarr auf den ersten Blick unauffällig. In der ursprünglichen Quantenmechanik entspricht sie Newtons Vorstellungen. Wie in der klassischen Mechanik haben

## RIESELT wie die Körner einer Sanduhr

„Unsere Gegenwart erstreckt sich nicht auf das gesamte Universum“, schreibt Carlo Rovelli. „Sie ist wie eine Blase, die uns relativ eng umgibt.“

Die Zeit verhält sich also keineswegs so, wie sie uns erscheint. Sie vergeht nicht gleichmäßig. Sie ist mit dem Raum verwoben. Sie hat keine einheitliche Gegenwart. Diese Konsequenzen aus Einsteins Theorien sind befremdlich, aber unter Physikern umstritten.

ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelt und gehören zu den am besten belegten Theorien der Physik.

Quanten legen allerlei exotische Eigenschaften an den Tag. Sie können scheinbar aus dem Nichts entstehen und spurlos wieder verschwinden. Sie befinden sich im selben Moment an unterschiedlichen Orten. Sie nehmen gleichzeitig gegensätzliche Zustände ein. Sobald wir jedoch eine Messung durch-

Vorgänge eine Dauer – nicht mehr und nicht weniger. Es gibt keinen vorgeschriebenen Zeitpfeil und auch keine verwirrende, verwobene, gummiartige Raumzeit. Stattdessen gibt es wohl etwas noch Seltsameres. Was, wenn die Zeit sich so verrückt verhält wie die Elementarteilchen selbst?

Viele Größen im Reich des unvorstellbar Kleinen sind gequantelt – sie bestehen aus kleinen, nicht weiter teilbaren Einheiten. Warum sollte nicht auch die Zeit aus kleinsten Einheiten bestehen? Dann würde sie nicht kontinuierlich fließen, sondern rieseln, wie die Körner einer Sanduhr. Fest steht immerhin, dass es ein kleinstes Zeitintervall gibt, jenseits dessen die Gesetze der Physik nicht mehr gelten. Seine Dauer ergibt sich aus den Gleichungen der Quantenphysik und drei Naturkonstanten. Dieses kleinste Zeitintervall beträgt  $5,39116 \cdot 10^{-44}$  Sekunden. Das ist mehr als zehn Billionen Billionen ( $10^{25}$ ) mal kürzer als das, was die genauesten Atomuhren noch messen können.

Mit der Körnung der Zeit verlassen wir die Welt der experimentell gesicherten Erkenntnisse und betreten das Reich der Spekulationen. Es existieren verschiedene Auslegungen und Weiterentwicklungen der Quantenphysik; sie alle beschreiben die Rolle der Zeit ein wenig unterschiedlich. Von Bedeutung dabei ist: Die Zeit hat in der Quantenphysik andere Eigenschaften als in der Relativitätstheorie. Sie ist dort nicht mit dem Raum verquickt, sondern vergeht unabhängig.

Damit markiert die Zeit einen von vielen Widersprüchen zwischen zwei Theorien, die unsere Welt beide hervorragend beschreiben – die Quantenphysik im Kleinen, die Relativitätstheorie im Großen.



**Die Sonnenstrahlen, die das Ufer der Seine in Paris erhellen, waren mehr als acht Minuten unterwegs durchs All. Doch hätten sie eine Uhr im Gepäck, wäre darauf aus unserer Sicht nicht eine Sekunde verstrichen**

# Immer wieder spannende Grundlagen des Wissens erhalten

1 Jahr **GEOkompakt** für nur 44,– €\* lesen oder  
verschenken und Wunsch-Prämie sichern!



## GEOkompakt-Bestseller

- Zwei besonders beliebte Ausgaben
- „Das geheime Leben der Pflanzen“
- „Unser Wald“

Ohne Zuzahlung

Prämie  
zur Wahl!



## Amazon.de-Gutschein, Wert: 10,– €

- Gutschein für die nächste Online-Shopping-Tour
- Riesige Auswahl, täglich neue Angebote
- Technik, Bücher, DVDs, CDs u. v. m.

Ohne Zuzahlung

## Gleich Prämie wählen und bestellen:

\*4 Ausgaben GEOkompakt für zzt. nur 44,– € (inkl. MwSt. und Versand) – ggf. zzgl. 1,– € Zuzahlung. Es besteht ein 14-tägiges Widerrufsrecht. Zahlungsziel: 14 Tage nach Rechnungserhalt. Anbieter des Abonnements ist Gruner + Jahr GmbH. Belieferung, Betreuung und Abrechnung erfolgen durch DPV Deutscher Pressevertrieb GmbH als leistenden Unternehmer.



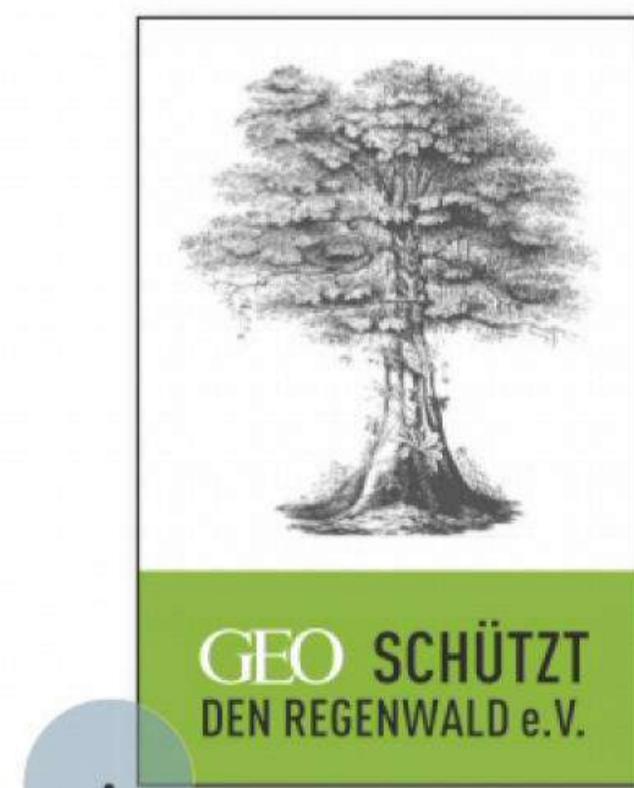
- 4 x **GEOkompakt** portofrei nach Hause
- Danach jederzeit kündbar
- **Bildungsrabatt**  
› Studenten sparen 40 %



#### Leselampe „Touch“

- In 3 Stufen dimmbares Licht
- Steuerung über Berührung am Edelstahlfuß
- Lampenschirm aus weißem Stoff

Zuzahlung: 1,-€



#### GEO-Baumspende

GEO pflanzt für Sie im Rahmen des Projektes „GEO schützt den Regenwald e.V.“ einen Baum in Sunaulo Bazaar/Nepal.  
Mehr dazu unter: [www.regenwald.de](http://www.regenwald.de)  
Ohne Zuzahlung

[www.geo-kompakt.de/abo](http://www.geo-kompakt.de/abo)

+49 (0) 40 / 55 55 89 90

# Was ist das

Seit Generationen versuchen Hirnforscher zu enthüllen, was dem Menschen die Gewissheit verleiht, ein Individuum zu sein. Doch je mehr sie **dem Ich-Bewusstsein nachspüren**, desto vielschichtiger erscheint es. Eine Antwort könnte sich in dem unfassbar komplexen Verbindungsnetz der Nervenzellen verbergen – dem »Konnektom«

Text: Rainer Harf

Über zahllose Fasern kommunizieren die einzelnen Nervenzellen in unserem Kopf miteinander. Die Art und Weise, wie das Verbindungsnetz jeweils geknüpft ist, könnte uns zu dem Menschen machen, der wir sind



Ich?

# e

**Es ist schon erstaunlich:** Beinahe acht Milliarden Menschen auf der Erde sagen „Ich“ zu sich selbst. Aber was genau sie damit meinen, ist gar nicht so klar.

Zwar fühlt es sich für uns so an, als sei unser bewusstes Ich eine unteilbare Einheit. Forscher haben jedoch herausgefunden, dass es – für Laien sicherlich verblüffend – mehrere Ich-Formen gibt, dass unser Bewusstsein offenbar in einer Vielfalt unterschiedlicher Gestalten auftreten kann. Dass also all das, was wir als in sich geschlossene Identität erleben, in Wirklichkeit ein zusammengesetztes Konstrukt aus verschiedenen Ich- oder Bewusstseinszuständen ist.

Hirnforscher und Neuropsychologen unterscheiden inzwischen bis zu neun Bewusstseinszustände, die wir jeweils mit unserem Ich in Verbindung bringen. Dazu gehören:

- die Wahrnehmung von Vorgängen in der Umwelt und im eigenen Körper

**Mit dem Ich bringen wir gleich mehrere Bewusstseinszustände in Verbindung – etwa das Grübeln über die eigene Person oder die Wahrnehmung von Körpergefühlen**

(„Ich höre ein Geräusch, ich empfinde Schmerz, mich juckt etwas“);

- mentale Zustände wie Denken, Erinnern, Vorstellen („Ich grübele über ein Problem, ich erinnere mich an einen Urlaub, ich überlege, was ich morgen machen werde“);
- Bedürfnisse, Affekte, Emotionen („Ich habe Durst, ich bin erschöpft, ich ängstige mich“);
- das Erleben der eigenen Identität und Kontinuität („Ich bin der, der ich gestern war“);
- die Meinigkeit des eigenen Körpers („Dies sind meine Beine, meine Hände, mein Gesicht“);
- die Autorschaft und Kontrolle eigener Handlungen und Gedanken („Ich möchte das tun, was ich gerade tue“);
- die Verortung des Selbst in Zeit und Raum („Es ist Ostermontag, ich befindet mich zu Hause“);
- die Unterscheidung zwischen Realität und Vorstellung („Was ich sehe, existiert wirklich und ist kein Traum“);
- das selbstreflexive Ich („Wer bin ich? Warum tue ich etwas?“).

Es mag ein wenig befreunden, dass Wissenschaftler so scharf zwischen diesen einzelnen Bewusstseinszuständen unterscheiden – immerhin fühlt es sich

für uns doch so an, als sei es stets das-selbe Ich, dass sich bewusst darüber ist, dass etwa unser Arm juckt, der Magen knurrt, dass wir gerade wach sind, in ei-ner Zeitung lesen oder auf einem Büro-stuhl sitzen. Und doch: Jeder einzelne

**Nach einem Schlaganfall verlieren manche das Gespür, dass ihr eigener Körper zu ihnen gehört**

dieser Ich-Zustände kann ausfallen, ohne dass die anderen Ich-Zustände davon be-einträchtigt wären. Das zeigt sich an Pa-tienten mit bestimmten neurologischen Störungen, die ihr Ich auf dramatische Weise anders wahrnehmen als Gesunde.

So gibt es Menschen, die durch einen Hirntumor das selbstreflexive Ich verlo-ren haben. Zwar spüren sie nach wie vor ihren Körper, können sprechen, sich Gedanken über die Zukunft machen – ha-ben aber keinerlei Ahnung, wer sie sind: Sie erkennen sich nicht im Spiegel. An-dere Betroffene sind sich zwar völlig be-wusst, wer sie sind und wo sie sich befin-den; doch haben sie (etwa nach einem Schlaganfall) ihr Empfinden dafür verlo-ren, dass ihr Körper zu ihnen gehört, sie fühlen sich wie Geister in fremder Haut.

Die diversen Bewusstseinszustände sind in der Regel jedoch nicht alle glei-chermaßen präsent: Vielmehr wechseln sich die Facetten unseres Ichs ständig ab – wenn auch zumeist unmerklich. Es ist ein stetes Kommen und Gehen, ein Auf und Ab, das wir (wenn wir darauf achten) sel-ber an uns beobachten können: In einem Moment denken wir vielleicht an den letz-ten Urlaub, dann aber stoßen wir uns an einer Türschwelle den Fuß, und Schmerz schnellt in unser Bewusstsein.

Sobald der nachlässt, verblasst auch diese Körperwahrnehmung wieder; viel-leicht wird uns stattdessen bewusst, dass wir hungrig sind, oder ein Geräusch lenkt die Aufmerksamkeit auf unsere Umwelt. Dass wir diesen permanenten Wandel an



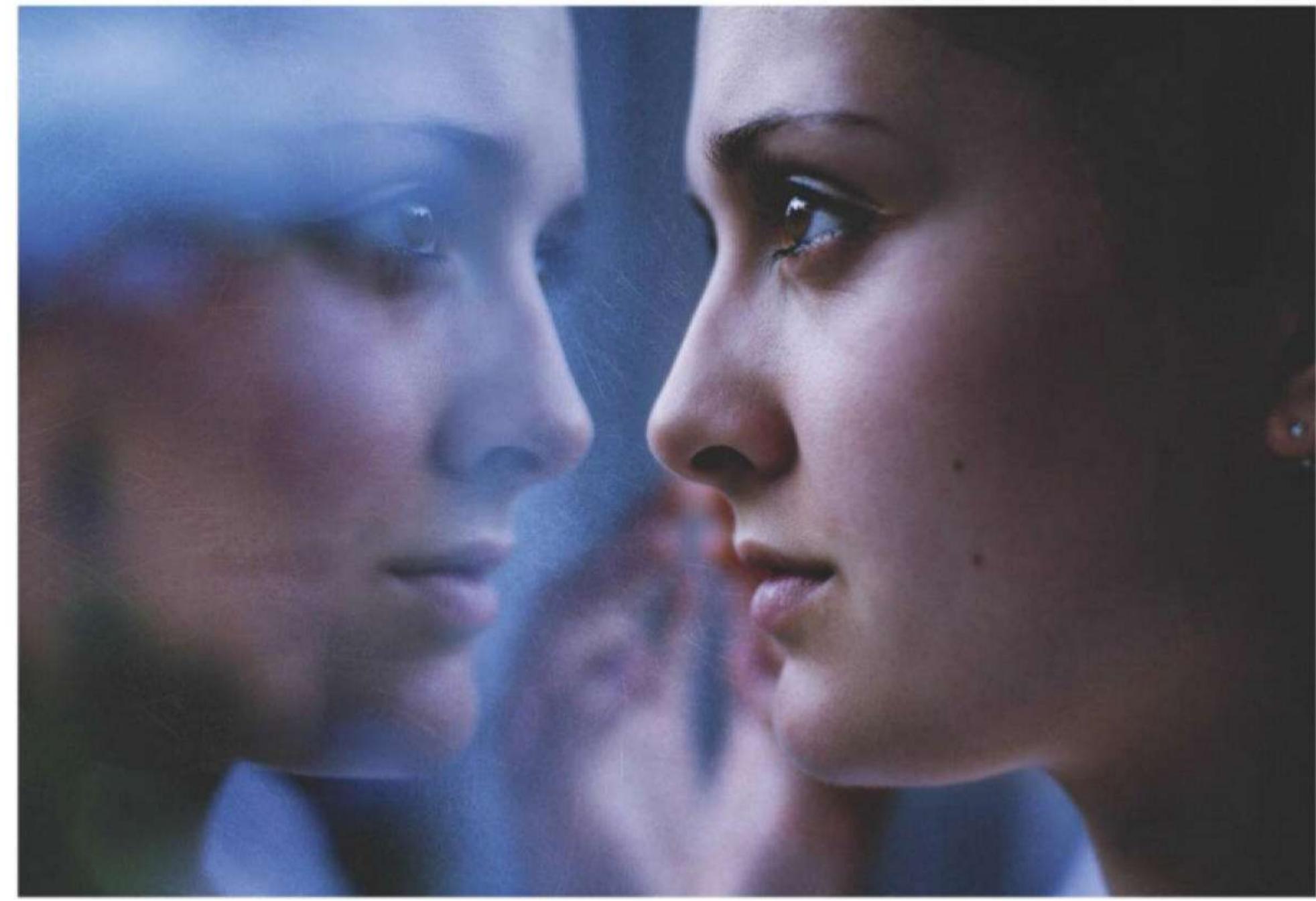
Bewusstseinszuständen nicht als ständigen Bruch unseres Ichs erleben, die Welt uns also nicht zerrissen erscheint, verdanken wir der erstaunlichen Gabe unseres Gehirns, all diese Versatzstücke zu einer meist widerspruchsfreien, nahtlos zusammenhängenden Geschichte des eigenen Ichs zu verweben.

**Diese Geistesleistung** zählt zweifelsohne zu den faszinierendsten Fähigkeiten unseres Gehirns. Und sie weist darauf hin, dass es nicht den einen Ort im Denkorgan gibt, an dem das Ich lokalisiert ist. Das bewusste Denken, das Erleben all unserer Ich-Zustände, setzt sich vielmehr aus der Aktivität ganz verschiedener Hirnregionen zusammen.

Um das Zusammenwirken dieser Regionen – und damit das Zustandekommen unseres Ichs – besser zu verstehen, betrachten die Wissenschaftler nicht mehr nur die rund 80 Milliarden Nervenzellen im menschlichen Denkorgan, sondern nehmen zudem die weit größere Zahl der Verknüpfungen zwischen den einzelnen Nervenzellen unter die Lupe.

Diese dünnen Fasern erstrecken sich durch das gesamte Gehirn, sodass es auf mikroskopischer Ebene einem Ball ineinander verschlungener Spaghetti ähnelt. Ein Kubikmillimeter unseres Denkorgans – ein winziges Würfelchen Hirn also, einen Millimeter hoch, breit und tief – enthält rund fünf Kilometer an Nervenbahnen sowie eine Milliarde Kontaktstellen zwischen Neuronen. Im gesamten Gehirn eines Erwachsenen beträgt die Länge der Nervenfasern Schätzungen zu folge mehr als 100 000 Kilometer.

Aus Studien an Mäusen wissen Forscher, dass bei den Nagern jedes Neuron im Schnitt Kontakt zu rund 150 anderen Nervenzellen hält. Nicht unwahrscheinlich, dass eine ähnliche oder größere Anzahl Verknüpfungen auch für das menschliche Gehirn gilt. Das würde bedeuten: Jede Nervenzelle in unserem Hirn könnte mindestens  $5 \times 10^{1372}$  mögliche Konstellationen mit anderen Neuronen eingehen (das ist eine Fünf mit 1372 Nullen). Zum Vergleich: Die Zahl aller Atome im Universum wird auf etwa  $10^{80}$  geschätzt. Entsprechend fällt dieses Netz an Verbindungen, das Forscher „Konnektom“ nennen, bei jedem Menschen anders aus, selbst bei einerigen Zwillingen.



**Womit identifizieren wir uns? Mit unserem Äußeren, unseren Stimmungen, unseren Erinnerungen? Unser Gehirn verwebt all diese Facetten zu einem nahtlosen Bild**

Und es liegt nahe, dass sich in der Art, wie die Neuronen miteinander verknüpft sind, ein Teil unserer Persönlichkeitsunterschiede widerspiegelt. Ein Teil dessen, was uns einzigartig macht. Das Konnektom könnte mithin eine erste Antwort auf die Frage liefern, was das Ich – in seinen verschiedenen Facetten – ist. Was einen Menschen zu dem macht, der er ist. Wie er die Welt wahrnimmt und wie er dies verknüpft mit Emotionen und Erinnerungen. Warum er Angst hat vor Schlangen oder den Geschmack von Basilikum mag.

## Spezifische Verknüpfungen im Gehirn scheinen auf grundlegende Wesenszüge hinzudeuten

Warum er einen Witz lustig findet und einen anderen nicht. Weshalb ihm eine bestimmte Person in den Sinn kommt, wenn er den Duft von Mandeln riecht.

Das Konnektom, so glauben manche Forscher, verrät ein gutes Stück weit, war-

um ich so bin, wie ich bin. Erste Hinweise für zwei elementare Muster konnten Wissenschaftler bereits ausmachen. So scheinen bei eher sanftmütigen Menschen jene Hirnbereiche besonders stark vernetzt zu sein, die man mit einem großen Wortschatz, einem guten Gedächtnis und einer hohen Lebenszufriedenheit in Verbindung bringt.

Das Konnektom von Menschen mit destruktiveren Eigenschaften offenbart hingegen auffällige Verbindungen von Arealen, die für eher negativ belegte Eigenschaften wie Aggressivität bedeutsam sind. Das heißt: Allein anhand der spezifischen Verknüpfungen der Nervenzellen im Gehirn lassen sich heute schon – zumindest in Grundzügen – bestimmte Muster ableiten, die auf Persönlichkeitsmerkmale eines Menschen hindeuten.

Noch aber wird es sicher Jahrzehnte dauern, bis Forscher die Gehirnkarte des Menschen im Detail entschlüsselt haben. Bisher ist nur das Konnektom eines einzigen Organismus kartografiert: eines ein Millimeter langen weiblichen Fadenwurms mit 302 Neuronen. Und selbst dieses einfache System ist zu komplex, um mit heutigen Computern zu berechnen, in welchem Ausmaß sich seine Teile gegenseitig beeinflussen.

Das Rätsel Ich – es ist noch längst nicht gelöst. •



Seit jeher beflügelt die Vorstellung ferner Welten die Fantasie von Biologen und Künstlern gleichermaßen. Womöglich könnten dort Mischwesen aus Tier und Pflanze existieren wie in dieser Illustration



# Gibt es eine zweite Erde?

Text: Alexander Stirn

Dank moderner Teleskope haben Wissenschaftler in  
fernen Sonnensystemen Tausende terrestrische Planeten entdeckt.  
Doch eine Frage ist bislang ungelöst: Gibt es dort Leben  
wie auf der Erde? Mit neuen, raffinierten Untersuchungsmethoden  
wollen Forscher genau das herausfinden



Die zweite Erde, sie wird – mit etwas Glück – an einem Dienstag entdeckt. Oder an einem Donnerstag. Auf jeden Fall aber kurz nach 13 Uhr. Dann trommelt Sara Seager, Astrophysikerin am Massachusetts Institute of Technology, kurz MIT, Woche für Woche ihr Team zusammen, um die neuesten Funde eines besonderen Teleskops zu diskutieren. Es heißt TESS und hat eine Aufgabe, die ans Selbstverständnis des Menschen röhrt. TESS soll nach einem Zwilling unserer irdischen Heimat suchen, einem Exoplaneten, der um eine ferne Sonne kreist und Leben trägt.

Seit Menschen zu den Sternen blicken, stellen sie sich die Frage: Sind wir allein in diesem Universum? Oder ist da draußen noch jemand?

Erstmals in der Geschichte der Menschheit sind nun die Teleskope und Methoden in Reichweite, die notwendig sind, um diese Fragen zu beantworten. Denn die Entdeckung fremder Welten ist in der Astronomie längst zur Regel geworden: Mit dem TESS-Vorgängerteleskop Kepler und ergebundenen Observatorien haben Forscher mehr als 4350 Exoplaneten identifiziert.

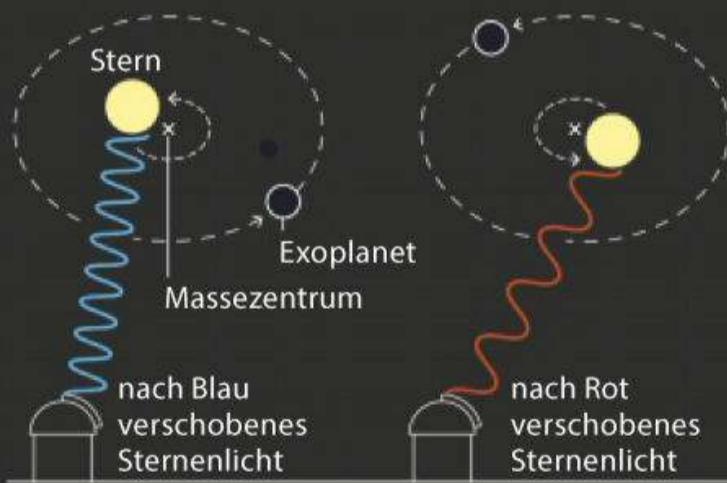
Im Schnitt, so die Berechnung der Astronomen, dürfte jeder der mehr als 100 Milliarden Sterne in unserer Galaxie mindestens einen Begleiter haben. Viele davon sind vermutlich erdähnlich. Nur, jetzt müssen Astronomen in der Vielzahl der Himmelskörper jene erkennen, die Leben tragen.

TESS kreist in mehr als 350 000 Kilometer Höhe um die Erde, seit die amerikanische Raumfahrtbehörde NASA die Forschungssonde im April 2018 ins All schoss. Mindestens vier Jahre lang soll TESS in unserer galaktischen Nachbarschaft 85 Prozent der Himmelssphäre durchmustern und im Licht heller Sterne nach Planetenspuren suchen.

Mancher Planet braucht fast eine **Million** Jahre, um seine Sonne zu **umrunden**

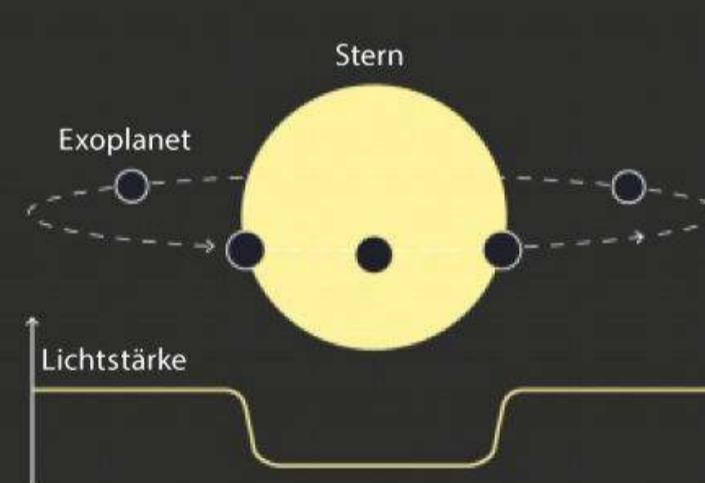
Am Ende werden, so das Versprechen der vom MIT betreuten Mission, etwa 50 kleine, felsige Planeten stehen – potenzielle zweite Erden, die nahe genug bei uns sind, vielleicht 30, vielleicht 300 Lichtjahre entfernt, um sie mit der nächsten Generation von Teleskopen im Detail studieren zu können.

Denn anders als etwa das Hubble-Teleskop, das spektakuläre Bilder von den Planeten unseres Sonnensystems liefert, kann TESS, der Transiting Exoplanet Survey Satellite, die fremden Welten nicht direkt „sehen“. Das Teleskop bedient sich bei der Suche vielmehr eines Tricks:



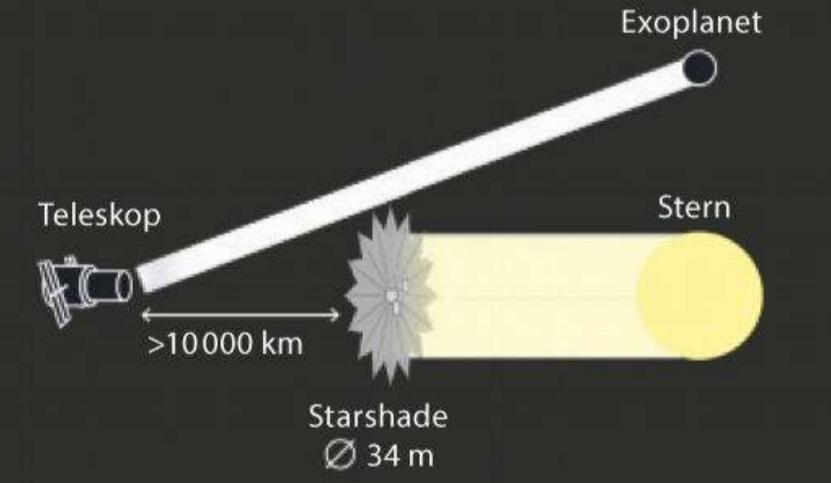
### Das Doppler-Verfahren

Um neue Planeten zu entdecken, machen sich Forscher zunutze, dass die Masse eines Planeten auch auf seine Sonne wirkt, die dadurch eine kleine Kreisbewegung vollführt. Wenn sie sich auf uns zu bewegt, wird ihr Licht zu kürzeren Frequenzen – Richtung Blau – verschoben. Entfernt sie sich, wird ihr Licht „röter“. Aus diesem Doppler-Effekt können die Forscher die Existenz des Planeten ableiten.



### Die Transit-Methode

Zieht ein Planet vor seiner Sonne vorbei, schwächt er deren Licht geringfügig ab. Diese Abschwächung gibt Auskunft über den Durchmesser des Trabanten. Da die Helligkeit der meisten Sterne schwankt, müssen Astronomen das Licht über einen längeren Zeitraum vermessen, um einen Planeten nachzuweisen. Mit der Transit-Methode wurden bislang die meisten fremden Welten entdeckt.



### Das Sonnenschirm-Prinzip

Neben einem hell strahlenden Stern einen kleinen Planeten zu erkennen, ist nahezu unmöglich. Forscher planen daher die Starshade-Mission, bei der ein riesiger, im Weltall positionierter Sonnenschirm das störende Licht blockieren soll. Seine blütenartige Form garantiert einen perfekten Schattenwurf. Der Schirm wird exakt so positioniert, dass nur die Sonne verdeckt ist, sodass der Planet sichtbar wird.



Je nach Umgebung würde außerirdisches Leben andere Formen annehmen. Eine dichte Atmosphäre etwa könnte schwabende Geschöpfe ermöglichen

Zieht ein Exoplanet auf seiner Umlaufbahn zufällig, von der Erde aus gesehen, vor dem fernen Stern vorbei, wird das Sternenlicht geringfügig schwächer. Die Lichtkurve, wie Physiker das Ergebnis ihrer Beobachtungen nennen, fällt ab. Sie verharrt auf einem Tiefpunkt und steigt am Ende des Transits wieder an (siehe Grafik Seite 84).

Mit dem Nachweis einer Lichtabschwächung ist es allerdings nicht getan. Die Auflösung von TESS mit seinen vier Teleskop-Augen, die lediglich jeweils zehn Zentimeter Durchmesser haben, ist zu niedrig, um Planeten zweifelsfrei nachzuweisen. Diese Aufgabe kommt den großen Observatorien am Erdboden zu.

Aufgrund ihrer höheren Empfindlichkeit können sie nach einem anderen verräterischen Signal suchen: Läuft ein Begleiter um einen Stern, dann zwingt er ihn durch seine Schwerkraft auf eine Mini-Kreisbahn. Von der Erde aus betrachtet scheint der Stern hin und her zu wackeln. Die Farbe seines Lichts schwankt dadurch – was empfindlichen Teleskopen nicht entgeht (siehe Grafik Seite 88).

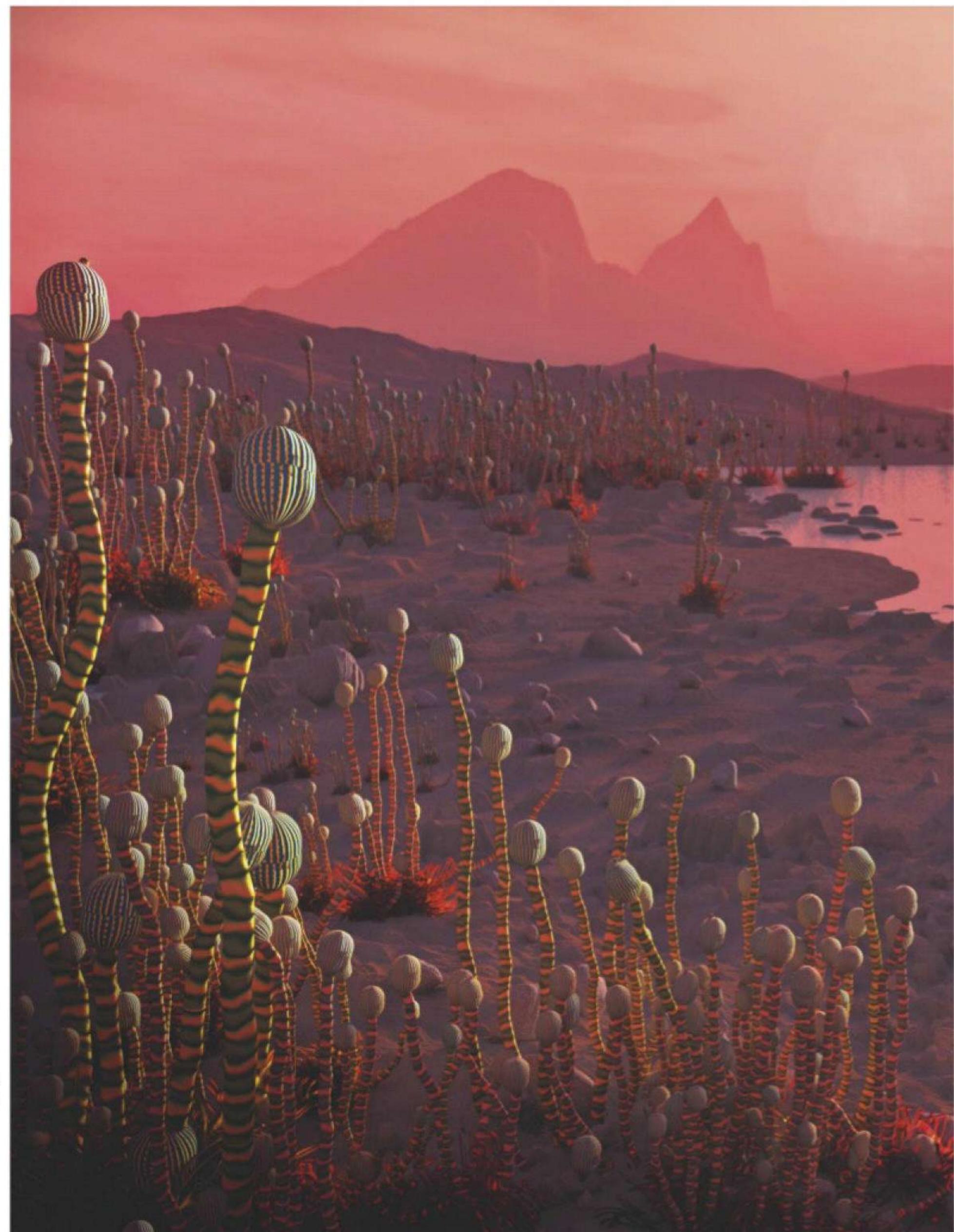
Die Vielfalt der neuen Welten, die der Exoplaneten-Goldrausch bislang hervorgebracht hat, überraschte selbst Astronomen. Manche der über 4350 Himmelskörper sind um ein Mehrfaches größer als der Gasgigant Jupiter und rasen in wenigen Tagen um ihr Zentralgestirn. Andere brauchen für einen Umlauf fast eine Million Jahre. Manche kreisen um zwei Sonnen. Andere wenden ihrem Stern stets dieselbe Seite zu. Manche sind fast 4000 Grad Celsius heiß, andere frösteln bei minus 220 Grad. Es ist ein faszinierender Zoo von Himmelskörpern.

Bloß: Wonach sollen Astronomen bei der Fahndung nach Leben im Kosmos Ausschau halten? Selbst die besten heute denkbaren Teleskope werden Organismen auf fernen Welten nicht direkt abbilden können – seien es Mikroben oder kleine grüne Männchen. „Wir müssen uns auf Spuren des Lebens konzentrieren“, sagt Sara Seager. „Genaugenommen auf Gase in der Atmosphäre eines Exoplaneten.“

**Planeten mit zwei Sonnen sind erstaunlich häufig. Auch auf ihnen ist Leben möglich, sofern dort keine extremen Temperaturen herrschen**

# Selbst das beste Teleskop könnte kein Geschöpf auf einem fremden Planeten direkt erblicken

Zum Glück für die Planetenjäger eröffnet die Physik Möglichkeiten, solche Spuren zu erkennen – auch aus Billionen Kilometer Entfernung: Jede chemische Verbindung in der Atmosphäre eines Exoplaneten verschluckt, wenn sie angestrahlt wird, bestimmte „Farben“ des Lichts, also spezifische Wellenlängen. Fangen Wissenschaftler Planetenlicht ein und zerlegen es in seine farblichen Bestandteile – in einen bunten „Farbstreifen“, ähnlich einem Regenbogen –, dann offenbaren sich einzelne schwarze Lücken in dem Spektrum (siehe Grafik Seite 88). Die Muster erinnern an einen Strichcode, der für jedes Molekül einzig-





artig ist. Planetenjäger sprechen von Biosignaturen, von einem spektralen „Fingerabdruck“ des Lebens.

Die Methode erlaubt es, gezielt nach verräterischen Gasen zu suchen. Aber nach welchen? „Ich denke, derzeit ist Sauerstoff unsere beste Option“, sagt Seager und hat dabei die Erde im Blick: Ohne Pflanzen und ohne Plankton, die das Gas ständig neu produzieren, gäbe es in der Erdatmosphäre kaum Sauerstoff.

## E

Ein zweifelsfreier Beweis für Leben ist allerdings selbst der Sauerstoff nicht. Astronomen haben das Gas auch in der extrem dünnen Gashülle des Jupitermonds Europa identifiziert.

Als alternativer Kandidat für ein Indiz des Lebens gilt Chlorophyll. Der grüne Farbstoff ermöglicht es Pflanzen, die Energie des Sonnenlichts als chemische Energie in Gestalt von Biomolekülen zu speichern. Doch freilich ist nicht sicher, ob dieses Prinzip auf einem Exoplaneten genauso wie auf der Erde funktionieren würde.

Ein rotes oder blaues Farbstoffmolekül, dessen Aufbau unbekannt ist und von dem noch niemand einen „Fingerabdruck“ genommen hat, taugt nicht als Biosignatur. Seager hat daher eine Art

Rasterfahndung ausgerufen: Zusammen mit ihrem Team hat die Forscherin simuliert, welche im Vergleich zum Chlorophyll simplen Moleküle sich aus den lebensbejahenden Elementen Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Schwefel, Stickstoff und Phosphor zusammensetzen lassen – als wären es Buchstaben im Alphabet, die in allen denkbaren Varianten kombinierbar sind.

# H

Herausgekommen ist eine Liste mit 14 000 möglichen Gasen, nach deren erwarteten Signaturen Astrobiologen im Planetenlicht suchen können. Es ist eine gigantische Aufgabe.

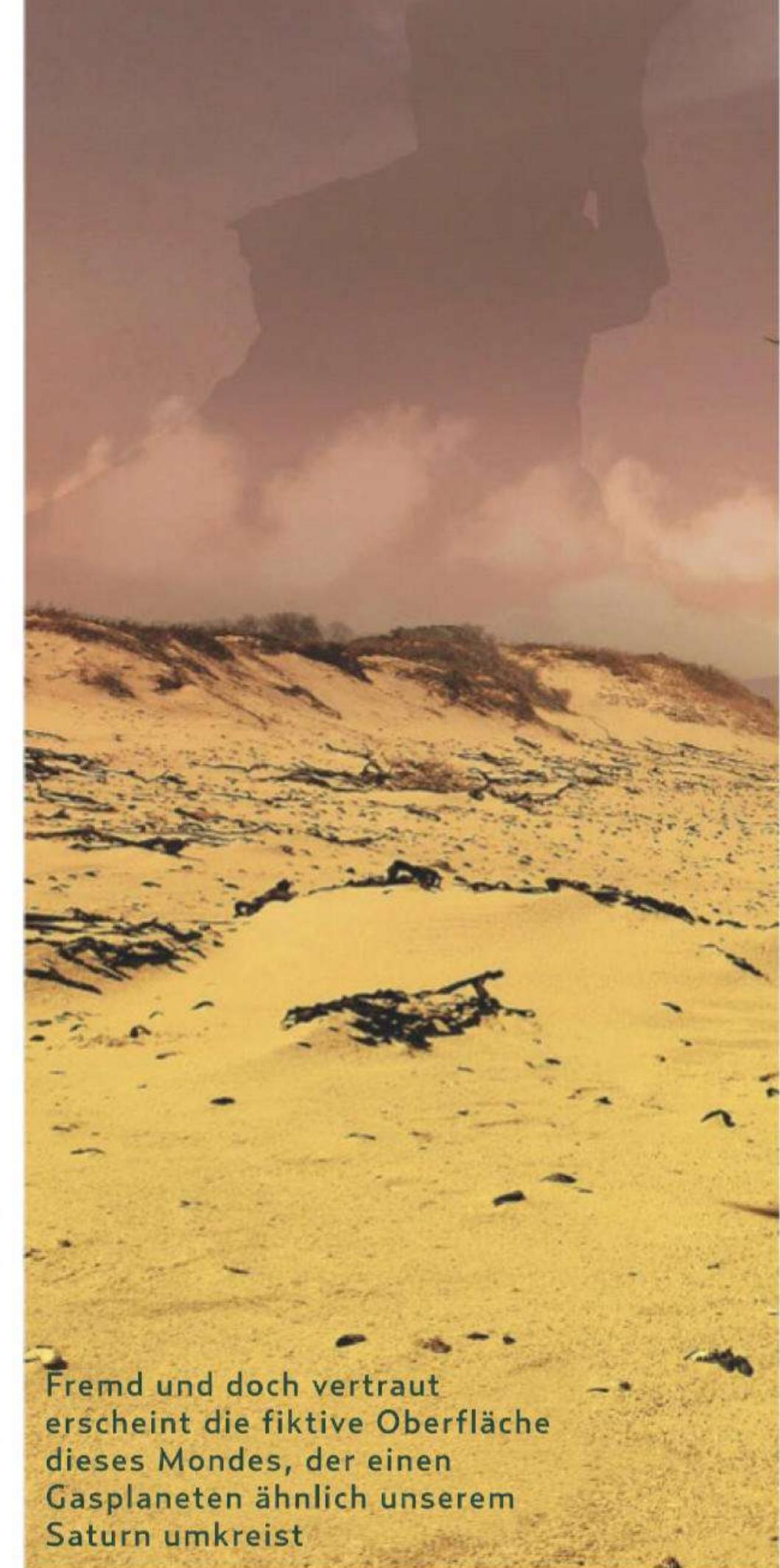
Seagers Team stellt ein Planetenverzeichnis zusammen, gedacht als eine Art Telefonbuch. Als eine Kladde voller vielversprechender Nummern, welche die kommenden Generationen von Teleskopen unbedingt kontaktieren sollten –

jene Observatorien, die dann tatsächlich dazu in der Lage sein könnten, eine Art zweite Erde zu charakterisieren.

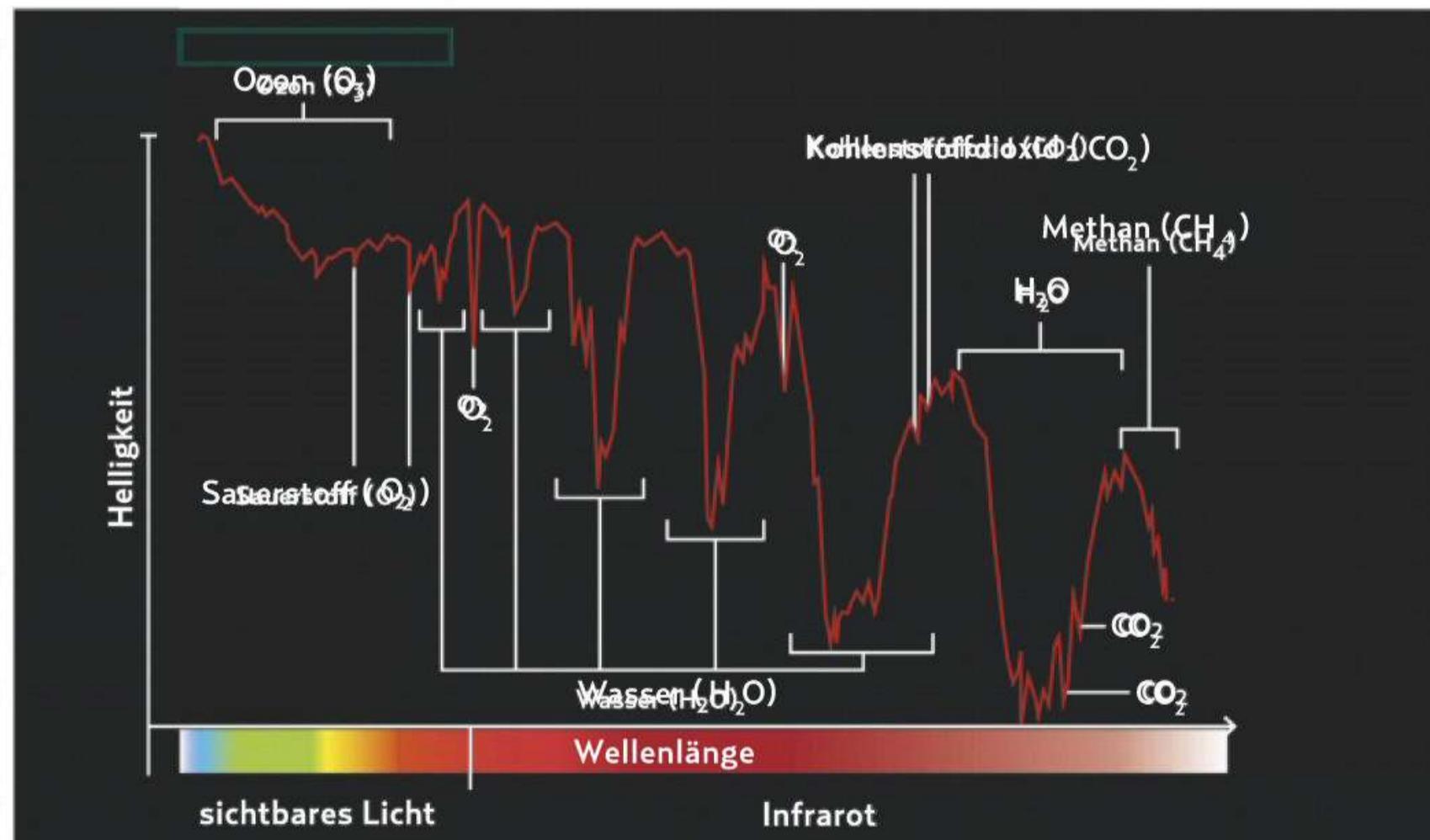
Den Anfang soll das James Webb Space Telescope (JWST) machen, ein Weltraumkoloss mit einem 6,5 Meter großen goldenen Spiegel, der sich erst im All entfaltet. Der geplante Starttermin nach jahrelanger Verzögerung: frühestens Ende Oktober 2021. Das JWST wird allerdings darauf angewiesen sein, das kombinierte Licht des fernen Sterns und seines Planeten zu analysieren. Seine Auflösung ist zu niedrig, um die beiden Himmelsobjekte getrennt abzubilden.

Deutlich größer werden die Chancen mit der nächsten Generation erdegebundener Teleskope sein, allen voran das Extremely Large Telescope (ELT), das die Europäische Südsternwarte (ESO) derzeit in Chile baut. Sein Trumpf: ein Spiegel mit fast 40 Meter Durchmesser, der größte seiner Art. Die entscheidenden Hinweise auf Leben soll eine spezielle Exoplanetenkamera liefern, die in den Fokus des ELT montiert wird und das eingefangene Licht analysiert. Doch bei deren Bau sind noch einige technische Hürden zu meistern.

Dank dem großen Spiegel soll das ELT in der Lage sein, anders als das



Fremd und doch vertraut erscheint die fiktive Oberfläche dieses Mondes, der einen Gasplaneten ähnlich unserem Saturn umkreist



## Signatur des Lebens

Moleküle in der Atmosphäre eines Exoplaneten hinterlassen im Licht ihres Muttersterns einen »Fingerabdruck«: Sie verschlucken spezifische Frequenzen. Finden Astrophysiker die Signaturen von Stoffen wie Sauerstoff, Wasser oder Kohlenstoff, die Leben ermöglichen, ist das ein Indiz für die Anwesenheit zumindest einfacher Organismen. Auch Leben auf Basis von Silizium ist theoretisch denkbar. Intelligente Wesen, die aus der Ferne die Erde studierten, sähen das obige Muster.

James-Webb-Weltraumteleskop, einen Exoplaneten neben seinem Stern zu erkennen und das gefilterte Licht direkt zu analysieren – ein Unterfangen, das die ESO mit der Beobachtung einer Motte vergleicht, die eine mehrere Dutzend Kilometer entfernte Straßenlaterne umschwirrt.

Selbst unter idealen Bedingungen kann ein Stern etwa Hundertmillionen Mal heller als ein erdähnlicher Planet in seiner Nachbarschaft scheinen. Abhilfe soll ein sogenannter Koronograf schaffen: etwa eine schwarze Scheibe, die den grellen Stern abdeckt.

Das hilft bislang allerdings nur bedingt: Da Licht sich wie eine Welle verhält, findet es seinen Weg um Hindernisse herum. Es ist derselbe Effekt, aufgrund dessen Geräusche (sprich: Schallwellen) hinter einer Hausecke noch zu hören sind. Für das Sternenlicht bedeutet das: Rund um die schwarze Scheibe zeichnen sich helle Ringe ab – ähnlich den Wellen,



die entstehen, wenn jemand einen Stein in einen Tümpel wirft.

Auch Sara Seager hofft, gegen Ende des Jahrzehnts am Ziel zu sein. Mit einer speziellen Scheibe, die einer riesigen Sonnenblume gleicht – und die Teil der Raumfahrtmission Starshade ist – will die Astrophysikerin das Licht eines Sterns noch viel besser blockieren als mit jedem irdischen Koronografen.

Durch ihre spezielle Form verhindern die „Blütenblätter“ störende Lichtmuster durch Beugung und Streuung des Lichts an den Rändern der Scheibe. Das System soll sogar Sterne ausblenden, die annähernd Hundertmilliarden Mal heller sind als ihr Planet. Das würde reichen, um erdähnliche Exoplaneten um einen sonnenähnlichen Stern zu erkennen.

Analysieren soll das Planetenlicht ein Weltraumteleskop, das Seager im Schatten der kosmischen Sonnenblume positionieren will. Die Forscherin hofft, dass

das Projekt Starshade im Jahr 2025 losgehen könnte.

Und dann? Werden Starshade, ELT und Co. umgehend den Beweis antreten, dass es sich bei einem der dienstags oder donnerstags entdeckten Planeten um eine zweite Erde handelt? Dass dort Leben existiert? Werden sie den Blauen Planeten endgültig aus dem Mittelpunkt des Universums rücken und die Kopernikanische Revolution vollenden, wie Wissenschaftshistoriker spekulieren? Werden sie womöglich die Religionen in eine Krise stürzen, weil die irdische Schöpfung auf einmal ihre Exklusivität verloren?

Vielleicht 50, vielleicht auch 100 erdähnliche Planeten in unserer kosmischen Nachbarschaft werden Starshade und das Extremely Large Telescope mit ihren noch immer begrenzten Fähigkeiten analysieren können. Die Auswahl ist klein, sie grenzt an ein Glücksspiel, aber es ist die einzige Möglichkeit, die uralte Frage der Menschheit zu beantworten.

## Die Suche nach Leben im fernen Weltraum gleicht einem Glücks- spiel

Was unterscheidet den  
**Menschen**  
vom **Tier?**



Text: Andreas Weber  
Fotos: Randal Ford

Lange glaubten Forscher, die **Vernunft** ziehe die Grenze zwischen uns und den Tieren. Doch inzwischen ist klar: Krähen haben ein **Bewusstsein ihrer selbst**, Delfine nennen sich beim Namen, Hummeln können pessimistisch sein. Gibt es überhaupt noch eine scharfe Trennlinie?



Schimpansen benutzen zahlreiche Werkzeuge, haben ein Selbsbewusstsein und können sich in ihr Gegenüber hineinversetzen



**Elefanten haben wahrscheinlich eine Vorstellung vom Tod: Sie wachen bei verstorbenen Verwandten oder bedecken sie zuweilen mit Ästen und Blättern**

ü

**Über viele Jahre veranstaltete** der Londoner Zoo im Schimpansengehege eine Schau tierischer Intelligenz. Tierpfleger führten Affen zur *tea time* an einen mit Tassen und Teekannen gedeckten Tisch. Dort begannen diese unter dem Gelächter menschlicher Zuschauer den Inhalt der Kannen zu verschütten, aus den Tüllen zu trinken und aus dem Deckel zu schlürfen.

Häufig warfen die Schimpansen schließlich mit dem Gedeck, zerbrachen die Kannen und spritzten mit der Flüssigkeit. Alle sahen: Hier waren Tiere am

Werk, die in der Rolle von Menschen nichts als Karikaturen sein konnten.

Das Publikum johlte, weil die Affen so menschlich wirkten und zugleich so ahnungslos und drollig unkultiviert.

Doch die Zoobesucher waren selbst ahnungslos. Was sie nicht wussten: Die Schimpansen waren trainiert, sich wie Affen zu benehmen. Denn die Tiere lernten zu schnell mit dem Geschirr manierlich umzugehen. Zwar konnten neu in das Spektakel gemischte Darsteller zunächst nichts mit Stühlen, Tisch und Tassen anfangen. Doch nach kurzer Zeit hatten sie jeweils gelernt, gepflegt Tee zu trinken.

Das war so nicht erwünscht. „Als die öffentlichen Teestunden begannen, das menschliche Ego zu bedrohen“, kommentiert der Verhaltensforscher und Primatenpezialist Frans de Waal, „musste etwas unternommen werden.“ Affen sollten sich äffisch benehmen. Wenn sie es nicht von allein taten, musste man es ihnen eben beibringen.

*Das Bedürfnis,  
sich als etwas  
Besonderes  
zu fühlen,  
ist uns  
keinesfalls  
angeboren*

Die Pfleger trainierten die Londoner Schimpansen darauf, dem menschlichen Klischee zu entsprechen. Sie mussten Tiere darstellen, keine Menschen – mögen Primaten auch noch so geschickt mit Werkzeugen umgehen (inzwischen kennt man zahllose Gelegenheiten, bei denen Schimpansen nicht nur Hilfsmittel wie Stöckchen benutzen, sondern sich darüber hinaus sogar Werkzeuge suchen, um an diese Hilfsmittel heranzukommen). Menschen, so war die stillschweigende Annahme, haben eine Kultur. Sie leben in einer Welt der Übereinkünfte, der Bedeutungen, der Sprache und des Verstandes – und nur sie.

Die Tee-Orgien in London wurden vor langer Zeit eingestellt. Doch die Probleme, die in ihnen zutage traten, sind offener denn je. Noch immer arbeiten sich Philosophen, Anthropologen und Verhaltensforscher an der Frage ab: Was ist der Unterschied zwischen Mensch und Tier? Und noch immer wird diese Frage so formuliert, dass in sie bereits eine Vorentscheidung eingebaut ist – genau wie Zoowärter und Publikum eine bereits feststehende Meinung zur Fähigkeit von Tieren hatten, Kulturtechniken zu erlernen.

M

**Mensch und Tier**, so lautet die Vorentscheidung, sind zwar biologisch verwandt, aber doch grundsätzlich verschieden. Im christlichen Abendland war die Position dazu lange eindeutig. Der Mensch wurde als „Erbild Gottes“ angesehen. Er allein unter allen Wesen trug den „göttlichen Funken“ in sich – und er allein durfte sich alle anderen „untertan“ machen. Das galt auch dann noch, als die moderne Naturwissenschaft das kirchliche Schöpfungsbild beerbte und Charles Darwin und Alfred Russel Wallace mit ihrer Evolutionstheorie bewiesen hatten, dass der Mensch keine von der Natur



Rinder entwickeln eine Persönlichkeit. Ähnlich wie Menschen können sie schüchtern, neugierig oder gesellig sein





Für  
animistische  
**Kulturen**  
ist der Mensch  
einer unter  
**Gleichen**

Faultiere sind  
zwar nicht die  
schlausten Säuger.  
Doch durchaus  
möglich, dass auch  
sie zu nuancierten  
Empfindungen  
fähig sind



Kraniche sind  
kommunikative Vögel  
und verständigen  
sich untereinander  
durch eine Vielzahl  
von Rufen

*Es gibt kaum*  
**menschliche**  
*Eigenschaften,*  
*die nicht auch*  
**bei Tieren**

unabhängige Kreation war, sondern mit Tieren, Pflanzen, Pilzen und Bakterien eng verschwistert.

Während Darwin eigensinnig auf einem Kontinuum zwischen menschlichen und nichtmenschlichen Tieren beharrte (womit ihm viel Skepsis entgegenschlug), brachte sein Kollege Wallace Ende des 19. Jahrhunderts das Arrangement zwischen Naturwissenschaft und Schöpfungsglauben auf den Punkt: Aufgrund unseres unvergleichlich höher entwickelten Großhirns entfalte sich vom Körper unabhängig eine neue Sphäre. In dieser regierten Gefühle, Moral, freier Wille und Vernunft, die im Tierreich nicht vorkämen.

Auf diese Weise konnte der Körper des Menschen künftig wie ein Tier medizinisch erforscht werden; zugleich aber galt für unseren Geist weiter eine Art Kreationismus. Geist taucht urplötzlich mit der Ankunft des Menschen auf, ohne dass es Vorläufer in der Evolution gibt. Und der Geist, nicht die mit den Körpern der anderen Tiere geteilte Natur, ist die Zugangspforte zum Göttlichen.

Für den Philosophen Michael Hampe ist dieser Deal der Wissenschaft mit der christlichen Tradition auch heute noch in Kraft. Ein großer Teil des philosophischen Nachdenkens über Mensch und

Tier, so Hampe, beschränke sich darauf, die Gottesebenbildlichkeit des Menschen wissenschaftlich zu beweisen.

Philosophen haben der sogenannten „anthropologischen Differenz“ zwischen Mensch und Tier viele Namen gegeben – aber sie laufen immer wieder aufs Gleiche hinaus. Der Mensch ist ein Tier, ja, aber. Für den griechischen Denker Aristoteles sind wir das „vernunftbegabte Tier“. Immanuel Kant sah uns als „das Tier, das sich selbst vervollkommen kann“. Arthur Schopenhauer nannte den Menschen „das prügelnde Tier“, Nietzsche verherrlichte ihn als „das nicht festgestellte Tier“, und Max Scheler definierte uns bescheidener als ein „Nein-sagen-Köninger“.

# D

**Dabei ist das Bedürfnis**, sich gegenüber der restlichen Natur als etwas Besonderes abzugrenzen, dem Menschen nicht angeboren. Es ist ein Kennzeichen westlichen Denkens. Naturvölker, so stellte der französische Anthropologe Philippe Descola in den 1990er Jahren überrascht fest, unterscheiden nicht zwischen Natur- und Kulturwesen. Tiere haben für sie genau wie Menschen Wünsche, Begierden, Gefühle und eine Moral.

Für solche „animistischen“ Kulturen ist der Mensch einer unter vielen Gleichen. Strenge Tabus verhindern, sich über diese animalischen Gleichen zu erheben und sie zu schädigen. Der Mensch ist weder intelligenter als die Tiere, noch hat er mehr Kultur als sie.

Das Erstaunliche ist: Die aktuelle Verhaltensforschung scheint heute eher die Grundhaltung der Naturvölker zu untermauern als die westliche Überzeugung, dass wir uns durch irgendein besonderes Kriterium vom Animalischen unterscheiden.

Es gibt kaum noch einen Bereich spezifisch menschlicher Fähigkeiten und



Ziegen besitzen ein  
gutes Langzeitgedächtnis:  
Noch nach zehn Monaten  
erinnern sie sich an  
die Lösung komplexer  
Aufgaben

Giraffen offenbaren eine spielerische Sexualität: Viele Männchen etwa kopulieren meist mit ihresgleichen



Eigenschaften, die Forscher inzwischen nicht auch bei Tieren entdeckt haben (und teils sogar bei Pflanzen).

So wiesen Forscher nach, dass sich etwa Delfine, Krähen, Schimpansen, aber auch Putzerlippfische selbst im Spiegel erkennen – also vermutlich das Bewusstsein eines eigenen Ichs haben. Hummeln haben offenbar Emotionen – sie können zuversichtlich von Blüte zu Blüte gelangen oder pessimistisch verstimmt sein. Ratten lachen sich – in Ultraschallfrequenz – schlapp, wenn Menschen sie am Bäuchlein kitzeln. Kapuzineräffchen schlagen geschickt Steinwerkzeuge zurecht. Gemeinsam errichten Schimpansen funktionslose, aber ästhetisch schöne Steinpyramiden und führen ihren Jungen den Arm, um sie anzuleiten, nach Termiten zu angeln.

Selbst Homosexualität und sogar Selbstbefriedigung, für viele Konservative immer noch „wider die Natur“, sind unter nichtmenschlichen Tieren mindestens so weit verbreitet wie unter menschlichen. Giraffenmännchen kopulieren meist mit ihresgleichen; weibliche Hyänen lecken einander die Klitoris. Im Zoo von Zagreb

genießen, genüsslich brummend, zwei Braunbärenmännchen täglich ihre gegenseitige Fellatio. Ein Delphin wurde beim Masturbieren mit einem elektrischen Aal erwischt, den er sich um den Penis gewickelt hatte.

Und sogar die Fähigkeit zur Abstraktion, eines der am heftigsten verteidigten Gebiete unserer Sonderstellung, müssen wir mit Tieren teilen. „Wölfe stellen sich die Zukunft vor, planen und denken in Episoden“, meint der Wiener Ethologe Kurt Kotrschal. Und nicht nur sie. Raben wissen, was andere Raben – oder Menschen – wissen und was nicht. Schimpansen besitzen die nachprüfbarer Vorstellung, dass der andere ein denkendes Ich ist so wie sie.

Für Kotrschals Kollegen Frans de Waal bleibt uns bei all diesen Befunden kein einziges Privileg mehr. „Bei jeder geistigen Fähigkeit, die ursprünglich als rein menschlich betrachtet wurde, hat sich herausgestellt, dass sie älter und weiter verbreitet ist als zuerst angenommen“, meint der Primatenforscher.

## V

### Viele allzu menschliche Eigenschaften

wurden lange übersehen, weil Forscher sich nicht vorstellen konnten, diese bei Tieren zu finden. Wissenschaftler schneiden bis heute ihre Experimente nicht auf die Wahrnehmung der Tiere zu, sondern auf ihre eigene. „Es ist so, als würfen wir Fische und Katzen in einen Swimmingpool und beobachteten dann, wer schwimmen kann“, meint de Waal.

So wurde die Kombinationsfähigkeit von Hunden lange relativ erfolglos mittels kleiner Bilder auf einem Touchscreen getestet. Sie mussten ihn mit der Schnauze anstupsen – obwohl die Abkömmlinge des Wolfes in einer Welt der Düfte leben. Entsprechend versagen Hunde beim Spiegeltest des Selbstbewusstseins. Erst der

Sogar die  
Fähigkeit zur  
**Abstraktion**  
teilen  
wir mit den  
**Tieren**

Pinguine erkennen  
den Schrei ihres Part-  
ners selbst im  
Stimmengewirr einer  
riesigen Kolonie

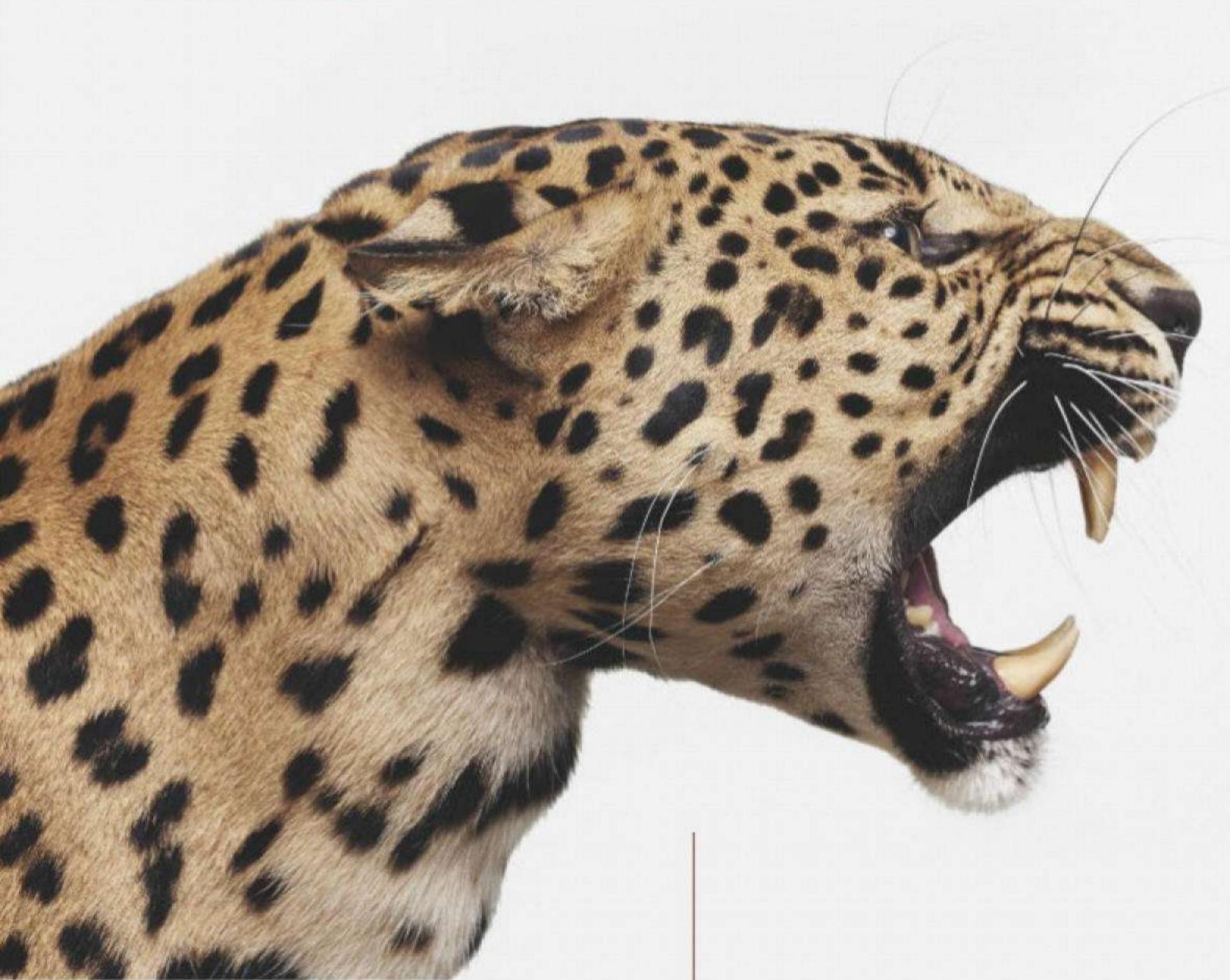


emeritierte Biologe Marc Bekoff von der Universität Boulder in Colorado konnte mit „gelbem Schnee“, den verschiedene Hunde mit Urin markiert hatten, zeigen, dass sich die Vierbeiner sehr wohl selbst erkennen, aber am Geruch, nicht am Bild.

Fehlt den Tieren überhaupt etwas, das wir haben? In den Augen vieler Wissenschaftler ist das die „konzeptuelle Sprache“. Ein Bezeichnungssystem, das nicht nur Gefühle und Stimmungen ausdrückt, sondern abstrakte Beschreibungen liefern kann. Der Philosoph Ernst Cassirer zählte dazu alle Symbole, mit denen wir uns mitteilen und die zusammen die Kultur bilden. Also Worte, Sätze, Bilder, Musik, Religion, aber auch soziale Codes. Für Cassirer liegt die Alleinstellung des Menschen darin, dass er als einziger ein „symbolisches Tier“ ist.

Doch selbst dieses Privileg ist zweifelhaft: Wale und Delfine etwa

Leoparden verfügen wie wir Menschen und andere Tiere auch über Gefühle wie Wut, Freude, Ekel oder Angst



Eulen nehmen die Welt mit hochentwickelten Sinnen wahr: Sie können weit besser hören und sehen als wir



# Wer weiß, welche Meinung Fledermäuse und Wölfe von Menschen haben?

kommunizieren mit hochkomplexen Codes und reden einander dabei sogar teils mit Eigennamen an.

Aber auch wenn der Mensch die Welt symbolischer Kommunikation nicht allein bewohnt, ist er vielleicht doch diejenige Tierart, die das Zeichen, die Geste, den Code am weitesten von seiner Verbindung mit körperlichem Ausdruck und spontaner Lautäußerung entfernt hat. Vielleicht könnte man sagen, dass wir dadurch in der Lage sind, in unserem Handeln ein Echo der Welt zu erzeugen, gleichsam ein verwandeltes Bild der Wirklichkeit, und uns so von der materiellen Realität ein Stück weit zu befreien. Zu unserem Segen – und zu unserem Fluch.

Ist dieser Unterschied zum Tierischen grundlegend? Oder wieder nur graduell, kumulativ und nicht kategorisch? Und hieße dieser Unterschied, dass wir auf unsere Andersheit stolz sein dürfen? Oder bedeutet er vielleicht, dass wir erst dann zum Menschen werden, wenn wir mit den Mitteln der Kultur den Abstand zu den anderen Tieren so klein wie möglich werden lassen und uns gleichsam als Teil der Natur wieder erfinden, statt uns von ihr abzukoppeln?

Vielleicht können wir die Frage nie entscheiden. Das Urteil müsste fairerweise ein anderes intelligentes Wesen sprechen, das von außen auf uns schaut. Wer weiß, welche Meinung Fledermäuse oder Wölfe von Menschen haben? Sind wir für sie die ganz anderen oder einfach „zweibeinige Tiere ohne Federn“, wie der Philosoph Platon meinte?

Bis das entschieden ist, könnte es helfen, den übrigen Tieren als jüngere Brüder und Schwestern zu begegnen – bescheiden und lernbegierig, anstatt weiter gottgleich über ihr Leben und ihren Tod zu richten.

# FÜR FRAUEN, DIE IHREN WEG GEHEN



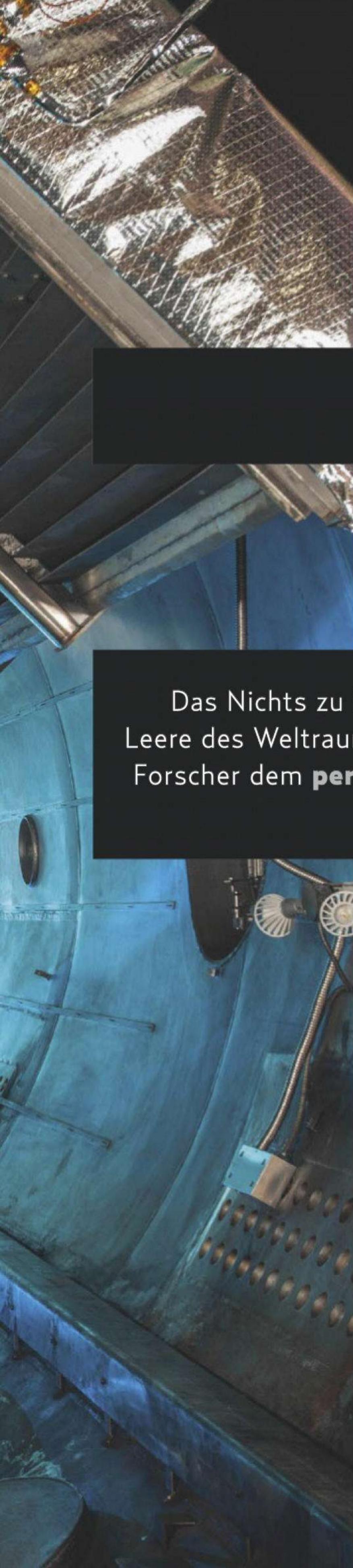
Jetzt zwei Ausgaben gratis sichern unter:

[www.emotion.de/geokompakt](http://www.emotion.de/geokompakt)

oder 040 - 55 55 3810 (Best.-Nr.: 1920345)





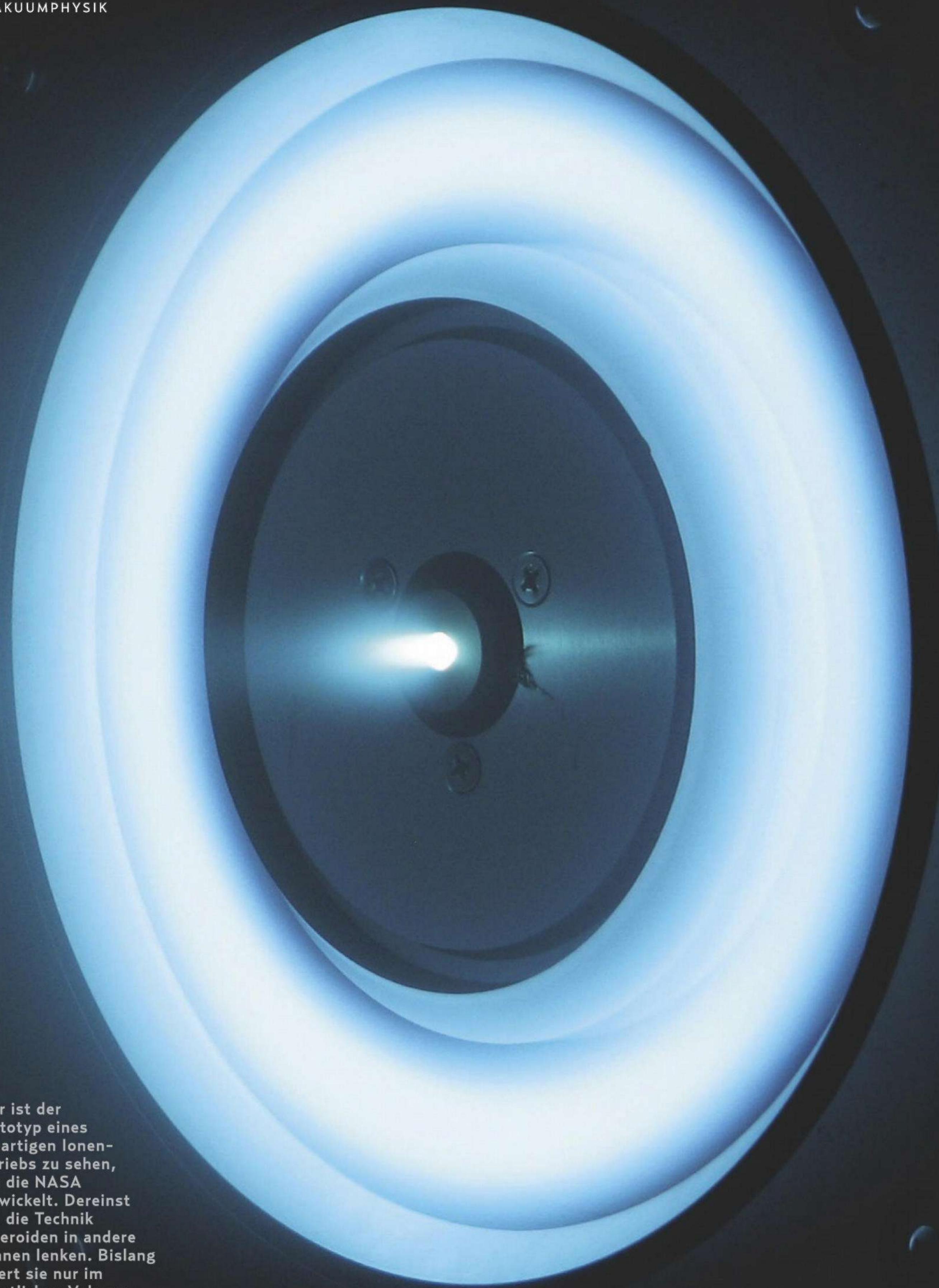


# Gibt es das **Nichts**?

Das Nichts zu finden ist gar nicht so einfach. Selbst durch die vermeintliche Leere des Weltraums schwirren noch ein paar Teilchen. Doch im Labor kommen Forscher dem **perfekten Vakuum** immer näher – und stellen fest, dass es gar nicht so leer ist wie angenommen

Text: Wolfgang Richter

Vakuumkammern wie diese am Glenn Research Center der NASA in Cleveland dienen Wissenschaftlern für vielfältige Experimente. Um einen nahezu vollständig leeren Raum zu erzeugen, entfernen die Forscher mit speziellen Pumpen nach und nach immer mehr Luftteilchen



Hier ist der Prototyp eines neuartigen Ionenantriebs zu sehen, den die NASA entwickelt. Dereinst soll die Technik Asteroiden in andere Bahnen lenken. Bislang feuert sie nur im künstlichen Vakuum

# W

**Wenn man von einer Menge alles**, also wirklich alles wegnimmt – was bleibt dann übrig?

Es mag überraschen, doch diese scheinbar so simple Frage zählt zu den spannendsten – und ältesten Rätseln, mit denen sich Naturwissenschaftler und Philosophen befassen. Gibt es das Nichts? Ist ein völlig leerer Raum möglich? Ein absolutes Vakuum? Oder hegt die Natur eine Abscheu gegen die extreme Leere, wie bereits mancher antike Denker glaubte?

Seither lässt die Frage den Menschen nicht mehr los. Immerhin: Die Auseinandersetzung mit dem Phänomen des Nichts hat zu kulturellen Hochleistungen geführt und sorgt bis heute für wissenschaftliche Entdeckungen. Der Grund klingt paradox: Wer sich mit dem Nichts beschäftigt, lernt viel über jene Dinge, die existieren.

Beispielsweise lässt sich die Welt nur deshalb so gut berechnen, weil die Mathematiker einst ein Symbol für das Nichts erfanden: die Null. Und wirklich Erstaunliches fanden und finden Wissenschaftler bei der Ergründung des Wesens der Leere heraus, des physikalischen Pendants zur Zahl Null. Die Forscher untersuchen dazu das Vakuum mit Lasern und Teilchenbeschleunigern. Und enthüllen: In extremer Leere eröffnet sich ein ganz eigener Kosmos, in der alle erdenklichen Dinge wortwörtlich aus dem Nichts entstehen und ins Nichts verschwinden.

Das klingt schon deshalb überaus mysteriös, weil sich dergleichen in unserer Alltagswelt nicht erfahren lässt. Einer Welt, in der die völlige Leere nicht vorkommt – und dennoch reichlich Platz herrscht.

So können wir schon morgens beim Aufrichten im Bett dafür dankbar sein, dass die Luftmoleküle beiseitetreten, um uns Raum zu geben. Ohne die Leere zwischen den Atomen wäre das nicht möglich.

Genau dies vermutete bereits der griechische Philosoph Demokrit – und löste damit einen jahrhundertelangen Kampf aus. Demokrit und seine Anhänger gingen Ende des fünften Jahrhunderts vor unserer Zeitrechnung davon aus, dass Materie aus unteilbaren kleinen Bausteinen bestehe; diese Atome (von altgriechisch *átomos*, unteilbar) würden sich durch leeren Raum bewegen.

Der Philosoph Aristoteles, der im vierten Jahrhundert vor Christus lebte, war dagegen überzeugt, das Sein fülle jeden Winkel des Universums aus, so wie Wasser den frei werdenden Platz hinter

einem Taucher einnimmt. Wäre der Raum zwischen den Planeten leer, würden sie aufeinanderfallen. Daher müsse etwas sie auf ihrer Bahn halten, eine besondere, durchsichtige Materie: der „Äther“.

Offensichtlich gefiel den meisten Menschen dieses vollgestellte aristotelische Weltbild besser. Einer der größten Anhänger war Alexander der Große, der Aristoteles' Ideen bis nach Indien verbreitete. Noch im Mittelalter hielt sich jene Vorstellung, nach der die Natur einen Widerwillen gegen die Leere hege, der damals auf Latein viel zitierte „horror vacui“.

Die Angst vor dem Vakuum nahm erst 1643 der Physiker Evangelista Torricelli, ein Schüler von Galileo Galilei. Im entscheidenden Versuch füllte er ein langes Reagenzglas voll mit flüssigem Quecksilber und hielt es mit dem Daumen verschlossen – was der Arbeitsschutz heute strikt verbieten würde wegen der Giftigkeit. Torricelli drehte das Röhrchen mit der Öffnung nach unten und tunkte diese Öffnung in eine Schale mit Quecksilber – dann zog er den Daumen zurück. Was nun passierte, grenzte für seine Zeitgenossen an Zauberei: Das Quecksilber sackte ab, oben im Reagenzglas bildete sich ein durchsichtiger Hohlraum. Was war da drin? Gar nichts, vermutete Torricelli. Auf verblüffend einfache Weise hatte er ein Vakuum erzeugt.

Nur 40 Jahre später berechnete Isaac Newton, dass auch im Weltall gähnende Leere herrscht. Nicht Materie hält Planeten auf ihrer Bahn, sondern allein das Zusammenspiel aus der Anziehung der Sonne und der Eigengeschwindigkeit der Planeten. Ja, gerade weil der Raum zwischen den Planeten leer ist, können diese ungestört ihre Kreise ziehen. Das Weltbild von Aristoteles war damit passé, doch Fragen blieben. Wieso spüren die Planeten die Kraft der Sonne, wenn nichts den leeren Raum zwischen Sonne und Planeten überbrückt? Newton führte den Äther in neuer Form wieder ein – diesmal als Vermittler der Gravitationskraft durch das Vakuum.

An die Existenz eines solchen Äthers glaubten auch die Anhänger des Holländers Christiaan Huygens, der 1678 erklärte, Licht sei eine Welle. So wie sich Schallwellen in Luft oder Wogen in Wasser ausbreiten, brauche auch Licht ein Medium, das es trägt: eben den Äther. Das ganze Universum sei in Äther getaucht – wie eine Unterwasserwelt.

Erst 1905 war mit dieser Theorie endgültig Schluss. Danach gingen die meisten Wissenschaftler davon aus, dass das

**Wer das Nichts erforscht, lernt viel über jene Dinge, die existieren**

Vakuum wirklich leer ist, das absolute Nichts also existiert. In jenem Jahr zeigte Albert Einstein, dass Licht keine Welle im herkömmlichen Sinne ist, denn es verhält sich zuweilen wie ein Teilchen. Es braucht kein Medium, das es trägt – es kann selbstständig das Vakuum durchqueren.

**B**ald darauf erklärte abermals Einstein in seiner allgemeinen Relativitätstheorie, dass es der leere Raum selbst ist, der die Gravitation überträgt. Der Äther wanderte in die Rumpelkammer der Wissenschaft. Für kurze Zeit schien der Weltraum völlig leer zu sein. Dort draußen schien es das „Nichts“ wirklich zu geben, dachte man damals.

Im Vakuum  
treten für winzige  
Zeiträume  
plötzlich Energie-  
blitze auf

Doch wirklich leer ist auch der leerste Raum nicht. Selbst wenn es gelänge, alle Partikel etwa aus einem Behälter zu entfernen, wäre das so entstandene Vakuum nicht perfekt. Die moderne Physik, genauer die Quantenmechanik, die Vorgänge im Mikrokosmos beschreibt, kommt dem mit einer ungeheuerlichen Behauptung in die Quere: Ihr zufolge können für kurze Momente aus dem Nichts Teilchen entstehen, die sofort wieder verschwinden.

Um zu begreifen, was es damit auf sich hat, muss man die Welt des Allerkleinsten betrachten, die Welt der Quanten, die ganz eigenen, oft skurril anmutenden Gesetzen folgen. Eines der wichtigsten Gesetze der Quantenphysik ist die sogenannte Unschärferelation, die der Physiker Werner

In dieser riesigen Vakuumkammer herrschen Bedingungen wie im All. So können die NASA-Forscher neue Instrumente testen, die irgendwann durch die Leere des Weltraums fliegen sollen



Heisenberg 1927 formulierte. Nach ihr lassen sich bestimmte Eigenschaften von Quantenteilchen nicht gleichzeitig exakt bestimmen.

Vergleichbares existiert auch in unserer Alltagswelt: So lässt sich die Frequenz einer bestimmten Schallwelle (also etwa die Höhe eines reinen Tons) nicht zu einem beliebigen Zeitpunkt exakt messen.

Dazu ist es nötig, mindestens jenes Zeitintervall abzuwarten, in dem die zugehörige akustische Schwingung von ihrem Maximum zum Minimum und wieder zurück gelaufen ist. Physiker sprechen von einer „Unschärfe für das Größenpaar Frequenz und Zeit“.

In der Quantenmechanik wiederum haben Licht und Materie Welleneigenschaften, und die Frequenz dieser Wellen hängt direkt mit deren Energie zusammen. Es ergibt sich also eine Unschärfe zwischen Energie und Zeit. Entscheidend ist: Diese Unschärfe ist nicht nur ein Messproblem, sie ist laut Quantenphysik real!

Und hat zur Folge, dass in einem Vakuum für sehr kurze Zeiträume unerwartet Energieblitze auftreten können. Als „Vakuumfluktuation“ bezeichnen Wissenschaftler dieses bizarre Phänomen. Noch verrückter vielleicht: Trotz ihrer kurzen Lebensdauer wandeln sich die Energieblitze teils sogar in Materie um. Die Energie wird zu Masse, wie Einstein es mit seiner berühmten Formel  $E = mc^2$  mathematisch beschreibt – enthüllt sie doch, dass Energie und Materie wesensverwandt sind.

Bei diesem Prozess entstehen immer Paare: je ein Teilchen und sein Antiteilchen, etwa ein negativ geladenes Elektron mit einem positiv geladenen Positron. Denn die Eigenschaften des Teilchens, zum Beispiel seine negative Ladung, müssen kompensiert werden (hier also durch eine positive Ladung), da das Nichts selbst elektrisch neutral ist.

Forscher nennen solche Teilchen „virtuell“; im Gegensatz zu „realen“ Teilchen er-

**Das Nichts  
ist tatsächlich  
etwas: Es  
bringt elementare  
Teilchen hervor**

laubt die Natur ihre Existenz nur für einen verschwindend kurzen Moment. Nach Ablauf ihrer kurzen Lebensspanne löschen sie sich gegenseitig aus, Elektron und Positron zerstrahlen wieder zu Energie, die daraufhin ins „unscharfe“ Nichts verschwindet.

Das Nichts ist also nicht leer, es wimmelt in ihm von Teilchen. Und deren Effekte sind sogar spürbar! Das sagte 1948 der niederländische Physiker Hendrik Casimir in den Philips-Forschungslaboren in Eindhoven vorher. Dort sollte eine Gruppe Physiker mithilfe der Quantenmechanik unter anderem die Eigenschaften von Emulsionen beschreiben. Diese fein verteilten Gemische waren in der Produktion sehr wichtig.

Casimir befragte dazu den Nobelpreisträger Niels Bohr, und der empfahl, auch einmal die Vakuumfluktuationen in die Gleichungen miteinzubeziehen. Tatsächlich ließ sich das Verhalten der Emulsionen dann besser berechnen. Was wiederum bedeutet: Das Nichts beeinflusst seine Umwelt. Zur Veranschaulichung erdachte Casimir ein simples Experiment: Zwei Metallplatten werden in einem luftleeren Raum parallel und mit wenig Abstand zueinander aufgebaut.

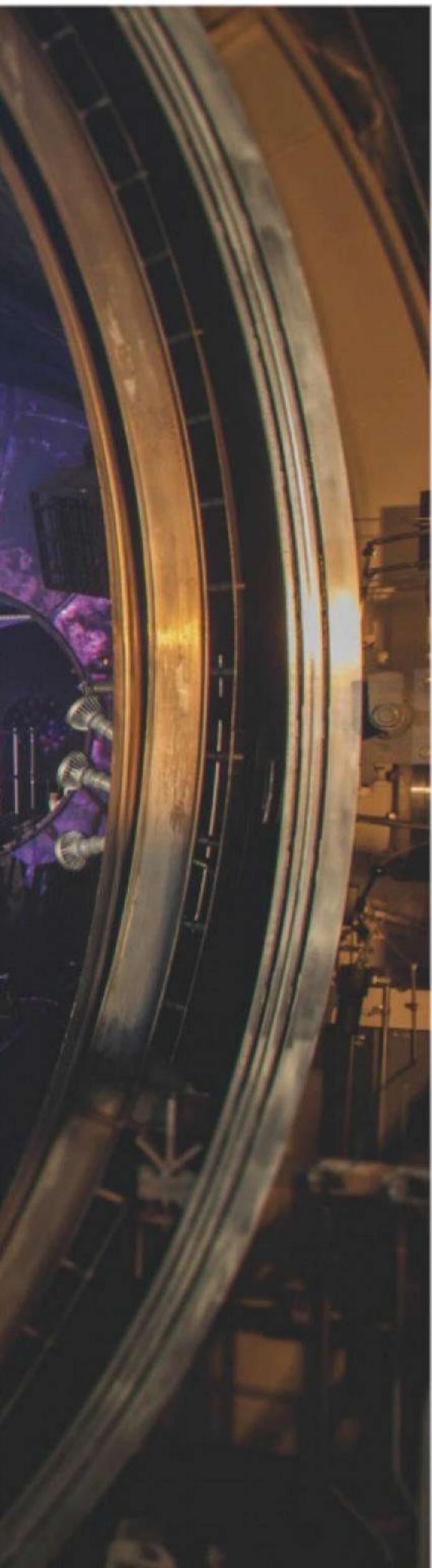
Der Physiker überlegte dann, wie die Vakuumfluktuationen auf den Aufbau wirken müssten. Sein Ergebnis: Die Platten würden sich von allein wie von Geisterhand aufeinander zubewegen, weil zwischen den Metallplatten (aufgrund des besonderen Versuchsaufbaus) weniger virtuelle Lichtteilchen entstehen würden als außerhalb der Platten.

Und tatsächlich: 1997 konnte der „Casimir-Effekt“ zweifelsfrei nachgewiesen werden. Wenn auch die Kraft, die beide Platten zusammendrückt, unvorstellbar klein ist.

Doch so gering die Auswirkung des Casimir-Effekts erscheinen mag, seine Bedeutung könnte bald zunehmen, etwa in der Nanotechnologie. Winzige Maschinen, die nur noch aus wenigen Molekülen bestehen, werden in absehbarer Zeit wohl zum Einsatz kommen. Die Nanoroboter könnten in unseren Blutbahnen Krankheiten bekämpfen, in der Umwelt Schadstoffe vertilgen oder eine ganz neue Informationstechnik möglich machen. Solche Nanomaschinen bestünden aus vielen Teilen: Motoren, Pumpen, Aufzügen, Kränen und Rädern, allesamt so klein, dass sich die Kraft des Nichts auf sie auswirken wird und Forscher diese Kraft unbedingt einberechnen müssen.

**S**chon jetzt zeichnet sich also ab, dass das Bild, das die Physiker vom Nichts entwerfen, erstaunlich folgenreich ist. Und uns zum Umdenken auffordert: Das Nichts ist tatsächlich etwas. Es bringt elementare Teilchen hervor. Es ist ein kraftvoller physikalischer Akteur. Es ist ein Medium für Licht und damit erstaunlich nah dran an der jahrhundertealten Vorstellung eines Äthers. Die Natur hat also tatsächlich einen Horror Vacui, die absolute Leere ist in ihrem Bauplan nicht vorgesehen.

Das, was uns leer erscheint, so könnte man schlussfolgern, birgt in Wirklichkeit die Summe aller Möglichkeiten bereits in sich. •



# Warum träumen wir?

Text: Ute Eberle

Fotos: Davis Ayer

**Nächtens spielt sich vor unserem inneren Auge Mysteriöses ab: Wir tauchen ein in surreale Welten, fliehen vor Monstern oder suchen verzweifelt ein Kleidungsstück. Lange Zeit haben Forscher den Nutzen unserer Träume bezweifelt. Jetzt aber decken sie ihn Stück für Stück doch noch auf**



Die Welt der Träume  
ist gewissermaßen unser  
zweites Zuhause: Wohl  
mehr als 25 Jahre ver-  
bringen wir im Lauf eines  
80-jährigen Lebens in  
diesem Parallelreich



### **Während wir schlafen, spielen sich skurrile Geschichten**

in unserem Kopf ab. Da können wir fliegen, jagen Monster, treffen verstorbenen Ahnen, reden mit Tieren. Doch obwohl das Träumen so allnächtlich ist, stellt es Forscher vor große Rätsel.

Hartnäckig hielt sich viele Jahre lang eine Theorie, wonach die nächtlichen Bilder überflüssig seien, biologische Abfallprodukte. Demnach entstünden Träume nur, weil der primitive Hirnstamm des Menschen nachts nicht zur Ruhe komme und ständig zufällige Impulse aussende. Das Großhirn registriere die vom Hirnstamm produzierten Signale und übersetze sie willkürlich in Bilder. Die aber hätten nichts zu bedeuten.

Diese Theorie widersprach dem, was Menschen seit Jahrtausenden glauben: dass Träume eine wichtige Funktion haben, dass sie vielleicht gar Botschaften enthalten. Und tatsächlich haben die Befürworter dieser Sichtweise inzwischen die weitaus stärkeren Argumente auf ihrer Seite.

Das liegt unter anderem daran, dass Neurowissenschaftler vor einigen Jahren herausgefunden haben, dass Träume nicht, wie gedacht, dem Hirnstamm entspringen, sondern sich wohl in jenen Regionen des Denkorgans bilden, die auch am Tag an bewussten Vorgängen beteiligt sind.

Zwar können sich die Wissenschaftler nach wie vor noch nicht auf eine Theorie einigen, die umfassend erklärt, warum genau der Mensch träumt. Doch haben sie viele neue Erkenntnisse darüber gewonnen, wie Träume entstehen.

Inzwischen ist klar: Alle gesunden Menschen träumen regelmäßig. Weckt man allerdings Mädchen und Jungen, die jünger als sieben Jahre alt sind, haben sie meist nur wenig zu berichten. Kindergartenkinder etwa glauben allenfalls, im Schlaf vereinzelt vage und statische Bilder gesehen zu haben, während Schulanfänger immerhin schon von etwas längeren und bewegten Traumszenen berichten.

Doch Träume, die wie ein Film ablaufen, in denen der Schlafende selbst zum Akteur wird und in denen eine komplexe Handlung stattfindet, entwickeln Kinder erst im höheren Grundschulalter. Wissenschaftler vermuten, dass erst

dann das Gehirn die nötige Reife für die nächtlichen Fantasiereisen erreicht.

Sobald sich das Denkorgan weit genug entwickelt hat, träumen Menschen überaus viel. Experten schätzen, dass wir fast die gesamte Nacht in der Welt der Träume verbringen. Das bedeutet: Bei einer Lebenserwartung von gut 80 Jahren leben wir wohl mehr als 25 Jahre in der Welt der Nachtfantasien.

Dieser Zeitraum ist weitaus größer, als Forscher lange dachten. So glaubte man noch vor einigen Jahrzehnten, dass Menschen nur dann träumen, wenn sie nachts in die REM-Phase (von engl. „Rapid Eye Movement“) eintreten. Weckt man Schlafende in dieser Phase, berichten sie meist, dass man sie gerade aus einem wilden Schauspiel gerissen habe.

Erst allmählich stellte sich heraus, dass wir offenbar auch in anderen Schlafphasen träumen. Allerdings sind diese „Nicht-REM-Träume“ weitaus weniger bildhaft, sie erscheinen meist kürzer und selten bizarr.

Es erscheint paradox, dass unser Denkapparat derart emsig ist, während wir im Bett liegen und uns ausruhen wollen.

Zum Teil, so fanden Forscher heraus, beteiligen sich am Träumen genau jene Regionen im Hirn, die auch im Wachzustand sehr aktiv sind. Und doch schaltet das schlafende Gehirn in einen anderen Betriebsmodus: So ist zum Beispiel im REM-Schlaf der dicht hinter der Stirn liegende präfrontale Kortex weniger rege – er ist der Sitz von Logik und Verstand, bestimmt unser planerisches Handeln.

Als Folge seiner verringerten Aktivität wundern wir uns nicht über das traumhaft-skurrile Geschehen.

Das Gehirn scheint zudem nachts derart mit sich selbst beschäftigt zu sein, dass es äußere Signale (Gerüche zum Beispiel) in der Regel ignoriert – solange die Reize nicht so stark sind, dass sie den Schlafenden wecken (etwa ein Knall oder ein kräftiges Schütteln).

Die intensive neuronale Aktivität während der Nacht ruhe wiederum bedeutet, dass unser Gehirn viel Energie ins Träumen investiert. Damit wir nicht mit den Beinen strampeln oder gar im Zimmer umherlaufen, lähmmt der Körper

Menschen verbringen

**fast die gesamte Nacht  
in der Welt der Träume,**

schätzen Experten



Träume sind nicht immer logisch. Das stört uns selten, denn die für Vernunft zuständige Hirnregion ist in Traumphasen weniger aktiv

In etwa einem von drei Träumen geht etwas schief. Doch keine Sorge: Wer etwa oft von verpatzten Klausuren träumt, fällt nicht wirklich häufiger durch

sich im REM-Schlaf durch eine Blockierung der Muskelaktivität quasi selbst.

Die Natur betreibt also einen beachtlichen Aufwand, damit wir träumen können (und uns dabei nicht in Gefahr bringen). Mehr noch: Unser Geist scheint regelrecht erpicht darauf, sich ins Kopfkino fallen zu lassen.

So zeigen Untersuchungen: Träumt ein Mensch mal weniger als normal – etwa weil ihn etwas immer wieder aus dem Schlaf reißt –, dann durchlebt er in der folgenden Nacht besonders viele und besonders lebhafte Fantasien.

Träumen ist also ungemein wichtig für uns.

## U

**Um Wesen und Bedeutung des nächtlichen Kopfkinos** besser zu ergründen, haben Forscher Tausende Traumberichte von Menschen aus aller Welt zusammengetragen. Dabei haben die Wissenschaftler auffällige Regelmäßigkeiten entdeckt: So erleben wir etwa im Traum viel Unangenehmes. Durchschnittlich stößt uns in jedem dritten Traum ein Missgeschick zu: Wir verlegen den Büroschlüssel, das Auto rutscht von der Straße.

Zudem verglichen Forscher, ob sich Trauminhalte aus tagsüber Erlebtem speisen. Dabei stellten sie fest, dass die nächtlichen Fantasien viele Parallelen, aber auch überraschende Abweichungen zeigen: So spiegeln sich Erfahrungen des Tages oft im Traum wider, aber in verzerrter Gewichtung.

Wer zum Beispiel täglich neun Stunden am Computer arbeitet, der träumt eher selten vom Büro oder der Tätigkeit



am Monitor. Viel wahrscheinlicher ist, dass sich in die nächtliche Fantasie des Betreffenden jene 20 aufregenden Minuten schleichen, in denen er in einer Kneipe eine neue Bekanntschaft gemacht hat.

Forscher sprechen in diesem Zusammenhang von „Tagesresten“, die in einem bestimmten Rhythmus auftauchen: Hat etwas Bedeutsames stattgefunden, erscheint es im Traum meist erstmals in jener Nacht, die unmittelbar



Träume öffnen einen Zugang zu unseren Gefühlen, sagen Experten. Das können helfen, Ängste abzubauen und schmerzhafte Erinnerungen zu lindern

Im Vergleich zu Frauen tauchen bei Männern in Träumen häufiger Waffen und Kämpfe auf – sowie mehr andere Männer



auf das Erlebnis folgt, und dann wieder rund fünf bis sieben Nächte später. Aber nur selten in der Zwischenzeit.

Das Gehirn siebt aus dem Tagesgeschehen offenbar jene Erfahrungen heraus, die für uns wichtig sind, und webt die entsprechenden Bilder in die Traumhandlung ein. Daher sehen wir im Traum zuweilen aktuelle Probleme, die wir noch nicht gelöst haben; oder Menschen, die Eindruck auf uns gemacht haben; oder Erfahrungen aus der Kindheit, die uns ein Leben lang nicht loslassen.

So können uns Träume mitunter zeigen, was uns in der Tiefe unseres Wesens bewegt; was uns bei wachem Geist – dann, wenn die Ratio unangenehme Emotionen zurückdrängt – nicht gänzlich bewusst ist.

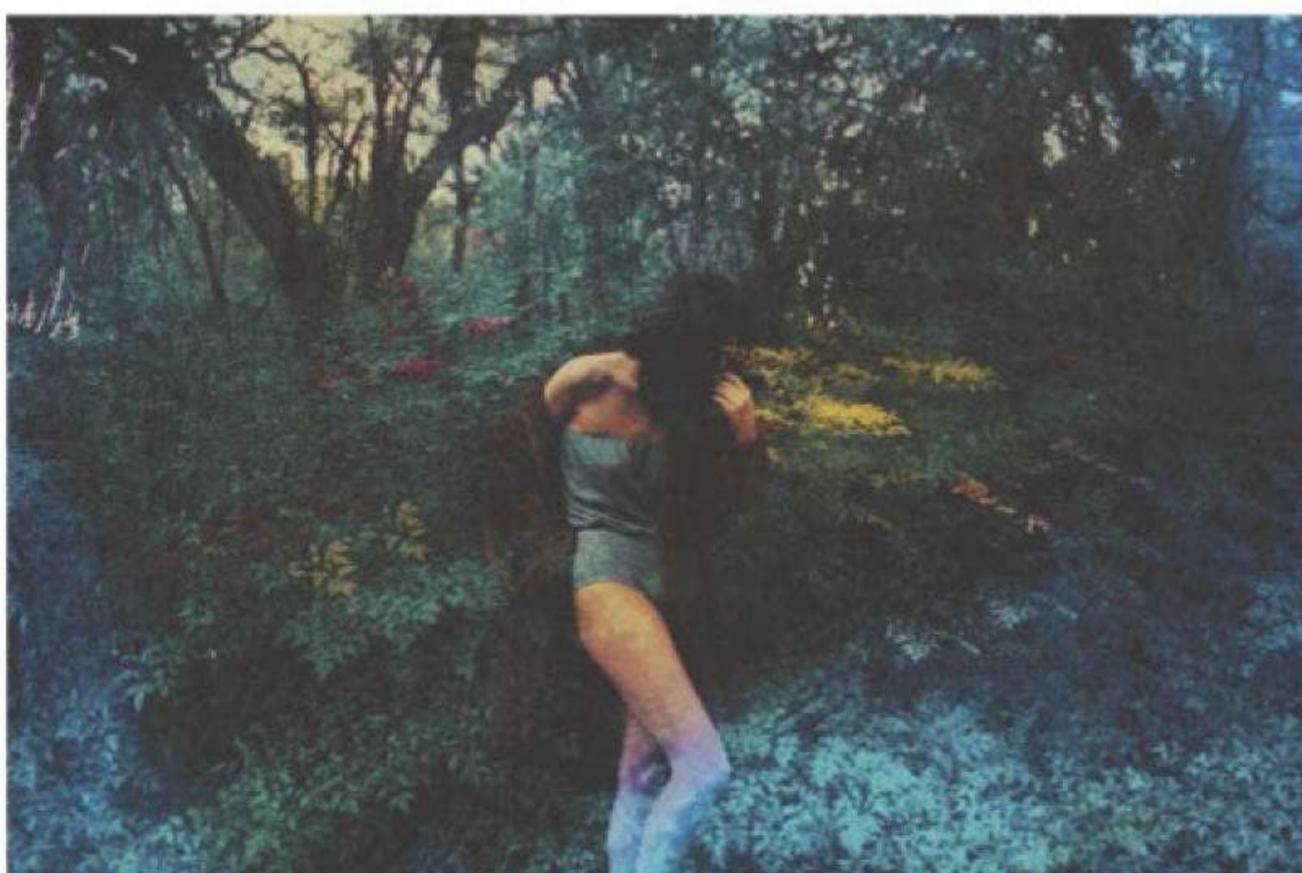
Zunehmend besteht Konsens in der Forschergemeinde darüber, dass Träume dabei helfen können, Erfahrungen und Erlebnisse besser zu verstehen –, und so Lernprozesse unterstützen.

Mehr noch: Die nächtlichen Fantasien können dazu beitragen, unsere Gefühlswelt zu ordnen und nach schwierigen Situationen im Leben wieder ein inneres Gleichgewicht zu schaffen.

Im Traum würfelt das Gehirn oft ganz unterschiedliche Szenen und Bilder zusammen. Es verknüpft Orte und Personen, die scheinbar nichts miteinander zu tun haben, kombiniert längst Vergangenes mit aktuellen Geschehnissen – und vermengt das Ganze mit fantastischen Elementen.

Viele Forscher glauben, dass unser Gehirn auf diese Weise fast spielerisch nach Verbindungen zwischen mehreren gespeicherten Erfahrungen sucht – nach Zusammenhängen, die hilfreich sein könnten. Natürlich erscheinen viele jener Geschichten, in die wir nächtens abgleiten, mit wachem Verstand betrachtet als unsinnig. Doch manchmal

Vor allem Neues und Bedeutsames findet Eingang in unser nächtliches Kopfkino – der Ausflug ins Grüne zum Beispiel eher als die Büroarbeit



führt die traumwandlerische Freiheit des Geistes auch zum entscheidenden Durchbruch auf dem Weg zur Lösung eines Problems.

Viele Menschen kennen das Phänomen, dass ihnen das nächtliche Kopfkino mitunter gute Ideen einbringt. Und immer wieder erweisen sich die nächtlichen Visionen auch als Quelle künstlerischer Schaffenskraft: Musiker berichten davon, wie sie im Traum neue Melodien hören.

Maler lassen sich durch Träume zu Gemälden inspirieren.

Meist geht es im Schlaf allerdings eher darum, was uns emotional stark beschäftigt – besonders dann, wenn es uns belastet. Dadurch, dass das limbische System (im Gehirn der Hort unserer Gefühle) bei Nacht sehr aktiv ist, wallen Emotionen im Schlaf dann besonders mächtig auf und beeinflussen die Träume. Die nächtlichen Bilder verschaffen uns somit einen direkten Zugang zu unserer Gefühlswelt – und damit auch zu unseren Ängsten.

Und manchmal können Träume sogar wie eine Therapiesitzung wirken, in der wir Schmerhaftes verarbeiten. Denn mitunter spürt der Betreffende schon nach einigen Nächten voller Fantasien Linderung: Die negativen Gefühle erscheinen gewissermaßen entschärft, der Schmerz wird schrittweise erträglicher, grüblerische Gedanken lösen sich.



**Man kann sagen: Im Traum ist man in der Lage, sich** Menschen oder Situationen, die einen verletzen oder ängstigen, immer wieder gefahrlos zu nähern – so lange, bis sie ihren Stachel verlieren.

Auch wenn noch viele Aspekte rund ums Träumen ungeklärt sind, lautet das Fazit der meisten Forscher inzwischen: Wir träumen, weil es in vielerlei Hinsicht nützlich für uns ist. Der Mensch, so die These, profitiert von den Schlaffantasien – und zwar auch dann, wenn er am Morgen nicht mehr weiß, was sich darin abgespielt hat.

Den Schlafforscher Robert Stickgold von der Harvard Medical School erinnert die Funktion des Träumens an das berühmte Märchen vom Schuster, der vor dem Zubettgehen Leder für zwei Paar Schuhe zuschneidet – und am nächsten Tag vier fertige Stiefel vorfindet.

Aus Sicht von Stickgold und vielen anderen Forschern erlebt jeder Mensch Nacht für Nacht etwas Ähnliches: Aus dem Rohstoff der Erfahrungen, die wir tagsüber sammeln, formt sich im Schlaf (ohne unser bewusstes Zutun) unsere Erinnerung, unser Selbstbild.

Es ist ein Wunder – das aber nicht auf Magie zurückzuführen ist: sondern auf den rätselhaften Zustand des Schlafs und die geheimnisvolle Macht der Träume •

# Wie alt können



Text: Holger Diedrich

Dank des medizinischen Fortschritts hat sich die Lebensspanne des Menschen immer weiter verlängert.

Ist die **maximale Grenze** nun erreicht? Mit neuen Methoden wollen Wissenschaftler das Altern bekämpfen – und den Tod um weitere Jahrzehnte hinausschieben



# wir werden?

Bislang liegt der Altersrekord bei 122 Jahren. Manche Mediziner halten 150 Jahre für möglich, etwa durch Transplantation körpereigener Stammzellen

# F

**s ist ein Traum, wohl so alt wie** die Menschheit selbst: ein Mittel in Händen zu halten, das uns vor dem Vergreisen bewahrt – und uns vielmehr ermöglicht, gesund zu altern, weit über die natürliche Lebensgrenze hinaus. Der momentane Rekord liegt angeblich bei 122 Lebensjahren. Manche Wissenschaftler, die sich der Anti-Aging-Forschung verschrieben haben, halten schon

bald 150 Jahre für möglich!

Sie erproben Medikamente, die tief in den Zellen des menschlichen Körpers Alterungsprozesse aufhalten oder sogar umkehren sollen – und uns so eines Tages vor Herz- und Lungenkrankheiten, Alzheimer, Parkinson, Krebs oder Gelenkverschleiß bewahren könnten.

Es wäre eine medizinische Revolution. Denn noch ist das Altern ein Prozess, der zwar dynamisch verläuft und in Maßen beeinflusst, der aber nicht zum Stillstand gebracht werden kann.

Der einfache Grund: Die meisten Zellen des menschlichen Körpers sind nur begrenzt teilungsfähig. Ab einem bestimmten Zeitpunkt gehen sie gewissermaßen in den Ruhestand: Sie sind nicht tot, teilen sich aber auch nicht mehr – und können fortan etwa kein Gewebe mehr regenerieren.

„Seneszenz“ nennen Forscher diesen zellulären Erschöpfungszustand. Im Grunde ein körpereigenes Schutzprogramm: Es verhindert beispielsweise, dass sich Zellen weiter teilen, deren Erbgut beschädigt ist. Doch der Schutz hat einen Preis. Haben wir zu viele von ihnen im Körper, bekommen wir altersbedingte Krankheiten.

Denn diese Zellen verstehen nicht mehr alle Botschaften, die sie empfangen, und sie geben falsche Signale weiter. Außerdem produzieren sie unter anderem entzündungsfördernde Substanzen und fügen so dem umliegenden Gewebe Schaden zu.

Senescente Zellen sind schuld daran, dass wir im letzten Lebensdrittel schmerzanfälliger werden und sich chronische Leiden einnisteten. Und damit nicht genug: Erbgutschäden

sammeln sich an und werden vom Körper weniger effektiv repariert. So steigt auch das Krebsrisiko weiter an.

Diese Erkenntnisse bilden heute eine Grundlage für etliche Anti-Aging-Medikamente, die Forscher schon bald zur Marktreife bringen wollen.

Ein US-amerikanisches Start-up beispielsweise untersucht in klinischen Tests, ob ein Stoff namens UBX0101 wirksam senescente Zellen beseitigen kann, die beim Gelenkverschleiß mitwirken. In Tierversuchen führte das Molekül UBX0101 bereits zu einer deutlichen Besserung der Arthrose, weil es senescente Zellen dazu anregt, kontrollierten Selbstmord zu begehen. Dadurch verringerte sich der Abbau von Knorpelsubstanz.

Neben den seneszenten Zellen steht ein weiterer, ganz besonderer Typ von Zellen im Fokus der Anti-Aging-Wissenschaftler: die Stammzellen. Diese sich unbegrenzt teilenden Zellfabriken bilden die Basis vieler Körperfunktionen. Sie produzieren unter anderem Tag für Tag 200 Milliarden rote Blutkörperchen.

Zwar werden wir alle mit einem riesigen Pool an Stammzellen geboren. Doch der geht im Alter zur Neige. Wenn etwa die Stammzellen der Thymusdrüse im Brustkorb verloren gehen, entwickelt sich sogenannte Immunosenesenz: nach und nach bricht das Immunsystem zusammen.

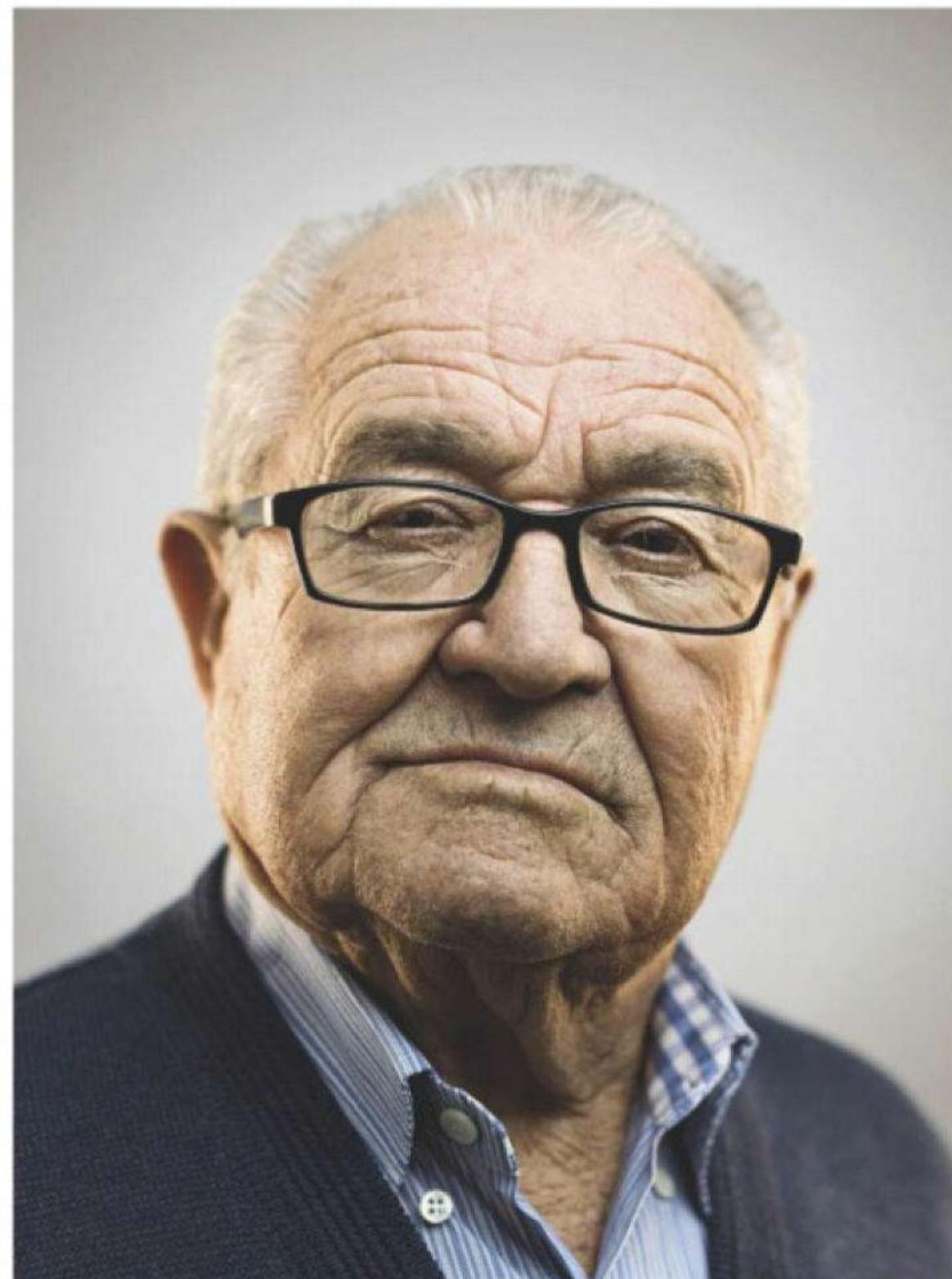
Betrifft die Seneszenz die Stammzellen des Hypothalamus im Gehirn, können verschiedene Stoffwechselwege, bestimmte Hormonsysteme oder die Temperaturregulierung des Körpers geschädigt werden.

Ansätze, dem Verlust an Stammzellen entgegenzuwirken, gibt es viele. Eine Möglichkeit ist es, körpereigene Zellen des Patienten im Labor zu vermehren, um sie ihm später zu injizieren. In den USA bieten Kliniken solche Behandlungen bereits an. Die Wirksamkeit der Therapie ist jedoch umstritten: Noch ist nicht klar, wie lange

die neuen Stammzellen im Körper überleben und ob sie sich dort ansiedeln, wo sie gebraucht werden.

Außerdem besteht die Gefahr, dass sie sich unkontrolliert teilen und Tumoren bilden.

Geforscht wird darüber hinaus an Substanzen, die Stammzellen fit und teilungsfreudig halten. Wieder andere Wirkstoffe sollen die chemischen Signale gesunder Stamm-



**Dass wir sichtlich altern, hat einen Grund: Die meisten Zellen hören mit den Jahren auf, sich zu erneuern, manches Gewebe kann seine Funktion einbüßen**

zellen nachahmen oder schwächernde Körperzellen mit dringend benötigten Nährstoffen versorgen.

2019 sorgte eine Studie für Aufsehen, die ein Biotech-Unternehmen auf einem Anti-Aging-Kongress in New York vorstellte: Der Firma sei es mit Hilfe von bestimmten Substanzen gelungen, bei neun Männern zwischen 51 und 65 Jahren neues Gewebe in der für das Immunsystem so wichtigen Thymusdrüse wachsen zu lassen. Auch das biologische Alter der Probanden, gemessen an bestimmten Merkmalen im Erbgut, sei während des Studienzeitraums von einem Jahr gesunken: um 18 Monate. Doch mehr als ein weiterer Hinweis, in welche Richtung die Wissenschaftler forschen könnten, ist diese kleine Studie nicht.

Ein weiteres Forschungsgebiet der Anti-Aging-Wissenschaft sind die Kraftwerke unserer Zellen: die Mitochondrien. Was wir an Nahrung zu uns nehmen, wandeln sie in Energiepäckchen um, die für fast alle Zellprozesse notwendig sind.

Doch auch Mitochondrien verschleißt mit zunehmendem Alter. Denn bei der Bereitstellung von Energie fallen wie bei einem echten Kraftwerk Nebenprodukte an. Wenn sich eine Zelle dem Ende ihres Lebenszyklus nähert, kommt es durch eine Häufung dieser Stoffe letztendlich auch zur Zersetzung der Mitochondrien.

**D**er Vorgang, bei dem eine Zelle ihre eigene Zersetzung orchestriert, wird „Apoptose“ genannt. Schadhafte Zellen räumen sich auf diese Weise selbst aus dem Weg. Doch nicht immer funktioniert das einwandfrei. Für manche Forscher ist die Apoptose deshalb der Schlüssel zum Verständnis von Krankheiten.

Eine bedeutende Rolle spielen dabei spezielle Moleküle, in der Fachsprache auch „freie Radikale“ oder „reaktive Sauerstoffspezies“ (ROS) genannt. Sie sind ein Zwischenprodukt unseres Stoffwechsels – und hochaggressiv gegenüber anderen Molekülen. Sie benötigen Elektronen, um sich chemisch zu stabilisieren – und diese stehlen sie ihrer Umgebung, beispielsweise aus den Zellwänden oder der Erbsubstanz von Mitochondrien.

Die meisten Schäden, die freie Radikale anrichten, werden rasch wieder repariert. Einige bleiben jedoch bestehen, und ihre Zahl steigt im Laufe der Zeit. Die Energieproduktion in den versehrten Zellen sinkt. Freie Radikale schädigen jedoch nicht nur die Mitochondrien einer Zelle, sondern auch die Proteine und die DNS darin. Doch es gibt Methoden, um die zelleigenen Abwehrkräfte zu unterstützen.

Vielversprechend könnte ein Wirkstoff sein, der bereits im Kampf gegen

## Einige Forscher sehen im programmierten Zelltod den Schlüssel, um das Altern aufzuhalten

nennt sich „Autophagie“.

Der aus dem Griechischen stammende Begriff bedeutet schlicht „Sich-selbst-Essen“. Genau das tun die Zellen, wenn es an Energiezufuhr von außen mangelt: Sie suchen nach Energielieferanten in ihrem Inneren.

Dazu werden die Verdauungsorgane der Zellen, die Lysosomen, von der zelleigenen Müllabfuhr mit unbrauchbaren Zellbestandteilen in Form von Proteinen, Fetten und Kohlenhydraten beliefert. Daraus recyceln die Lysosomen Grundstoffe für die Zellen und sorgen so für ihre Vitalität. Das zurzeit populäre Intervallfasten, bei dem Menschen für einen begrenzten Zeitraum von zum Beispiel 16 Stunden keine Nahrung zu sich nehmen, zielt auf diesen Effekt ab.

Der Beweis, dass das Großreinemachen in den Zellen durch die Gabe von Rapamycin auch beim Menschen gefördert wird, ist jedoch noch nicht erbracht.

Überhaupt stehen die Zellbiologen vor vielen weiteren Jahren der Grundlagenforschung. Denn allen Strategien, mit denen Forscher versuchen, das Altern zu verlangsamen, ist eines gemeinsam: Es sind detaillierte Kenntnisse über die Vorgänge im Zellinneren notwendig. Und je mehr Zellen und Zellarten sie beim Altwerden beobachten können, desto besser.

Im Rahmen eines internationalen Projekts versuchen Wissenschaftler daher, eine dreidimensionale Übersicht aller 30 Billionen Zellen des menschlichen Körpers zu erstellen. Ein Mammutprojekt, das verstehen helfen soll, wie genau sich Zellen verändern, wenn sie in die Jahre kommen.

Mit dem „Human Cell Atlas“ – so die Erwartung – könnte sich eine Vielzahl neuer Therapien auftun. Und die

Anti-Aging-Forschung zu neuen Durchbrüchen gelangen. Medikamente, die das Altern verlangsamen, würden bald Realität, heißt es in einer Studie der Citigroup, einer der weltgrößten Finanzdienstleister. Schon 2022 soll das Geschäft mit der Jugend einen Rekordumsatz von 85,6 Milliarden US-Dollar einfahren.

Durchaus denkbar ist jedoch auch, dass sich der Plan des Lebens am Ende als zu komplex erweisen wird, um ihn mit zwei, drei Wirkstoffen zu durchkreuzen. •

## Könnte Fasten die Regeneration von Körperzellen unterstützen? Experimente an Tieren legen das nahe

Krebs eingesetzt wird, da er Wachstum und Vermehrung von Zellen bremst: Rapamycin. In Experimenten stellte sich heraus, dass die Substanz die Lebensspanne von Fliegen, Würmern und Nagetieren verlängert.

Der Stoff täuscht einer Zelle Nahrungsnot vor und löst dadurch eine Art Selbstanreinigungsprogramm aus. Es ist vor allem in Fastenzeiten aktiv und befreit die Zelle von Abfallstoffen, die auf Dauer den Zelltod herbeiführen können. Diese Selbstanreinigung

# Gibt es die Weltformel?

Die ganze Welt der Physik – alle Vorgänge vom subatomaren Mikrokosmos bis zu den Galaxien im Universum – in eine Gleichung gießen: Dieses Ziel haben bereits Generationen von Wissenschaftlern verfolgt. Wird es je gelingen, die Theorien in Einklang zu bringen?

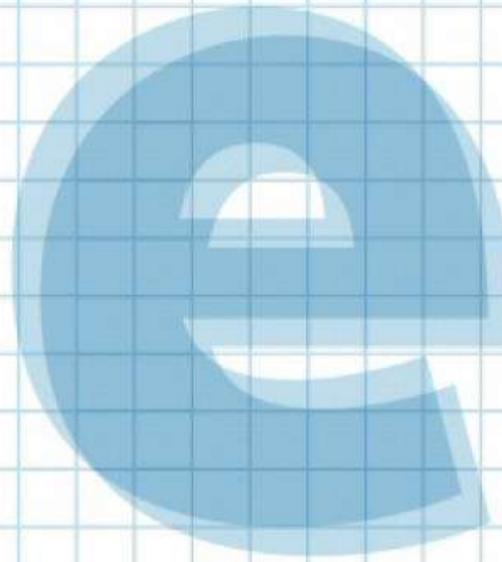
Text: Sebastian Witte

**Eine einzige Formel für die Welt!** Eine Zeile, mit der man sämtliche Phänomene im Universum beschreiben kann. Und zwar von den kleinsten Elementarteilchen über die Atome, Moleküle und komplexeren Strukturen bis zu Planeten, Sternen, Galaxien und dem Aufbau und der Entwicklung des Universums. Danach streben Physiker weltweit.

Noch ist völlig rätselhaft, wie solch eine Formel aussehen könnte, ja, ob es überhaupt je gelingen wird, das gesamte Wissen der Physik in nur einer Theorie zu vereinen. Und doch laufen alle Bemühungen auf genau dieses Ziel hinaus, so utopisch und anmaßend es klingen mag.

Um zu verstehen, warum es überhaupt denkbar ist, muss man wissen, dass die Physik eine reduktionistische Wissenschaft ist. Anders als etwa die Biologie, welche die Spezies und Subspezies in all ihrer Vielfalt erst einmal beschreibt und klassifiziert, versucht die Physik, die Dinge auf ihren einfachsten Kern zu reduzieren: Sie sucht nach den kleinsten Bausteinen der Welt und nach den Gesetzen, nach denen diese Bausteine miteinander wechselwirken. Die Weltformel wäre gewissermaßen die kompakteste Zusammenfassung all dieser Gesetze, das Urprinzip, nach dem die gesamte Welt funktioniert.

Noch existieren im Wesentlichen zwei große Theoriegebäude, die zwar zusammengenommen bereits ziemlich umfassend sind, sich jedoch gehörig in die Quere kommen. Auf der einen Seite: Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie, die für die Physik bei großen Abständen zuständig ist. Die Kraft, die auf diesen Skalen dominiert, ist die Schwerkraft oder Gravitation. Mit ihr lassen sich sämtliche Phänomene der Himmelsmechanik erklären. Etwa, wie sich Planeten, Sterne und Galaxien bewegen und wie große Massen die Struktur des Raumes und den Lauf der Zeit beeinflussen.



Auf der anderen Seite beschreibt das Standardmodell der Teilchenphysik – das die Quantenphysik mit einschließt und auf ihr basiert – die Welt im ganz Kleinen. Es enthält die winzigen Teilchen, aus denen alle Materie aufgebaut ist. Zudem umfasst es die drei Kräfte, die zwischen diesen kleinen Bausteinen wirken: die elektromagnetische Kraft, die Starke und die Schwache Kernkraft.

Die elektromagnetische Kraft bestimmt alles, was mit Magnetismus, Elektrizität und Energieübertragung von einem Ort zum anderen zu tun hat. Sie ist der Grund, warum Strom fließt, aber auch, warum wir Dinge sehen und die Wärme der Sonne spüren. Denn Licht- und Wärmestrahlen bestehen aus elektromagnetischen Wellen.

Die Schwache und die Starke Kernkraft dagegen können wir nicht wahrnehmen. Sie wirken nur im Inneren des Atomkerns. Dazu muss man wissen, dass jedes Atom aus drei Grundbausteinen besteht. Den Kern bilden neutrale Neutronen und positiv geladene Protonen, und um den Kern schwirren negativ geladene Elektronen. Die Starke Kernkraft sorgt nun dafür, dass die Protonen, obwohl auf engstem Raum zusammengesperrt, sich nicht gegenseitig abstoßen, sondern zusammenhalten. Die Schwache Kernkraft wiederum kann den Kern unter bestimmten Umständen instabil werden lassen, sodass er zerfällt und Energie freisetzt. Ein Vorgang, den Physiker Radioaktivität nennen.

**So fabelhaft sich die Allgemeine Relativitätstheorie** und die Quantenphysik auf großen und kleinen Skalen ergänzen: Bei genauer Analyse passen sie partout nicht zusammen. Denn es gibt immer noch Phänomene, die sich mit keiner der beiden Theorien richtig erklären lassen. Allen voran zum Beispiel sogenannte Singularitäten, wo Größen wie Dichte

und Temperatur unendliche Werte annehmen, was schlichtweg keinen Sinn ergibt.

Der Urknall etwa ist eine solche Singularität. Vor rund 13,8 Milliarden Jahren, bevor sich das Weltall schlagartig ausdehnte, war sämtliche Energie des Universums, ja sogar der Raum selbst in einem winzigen Punkt konzentriert, viel kleiner noch als ein Atom. Und bei diesen extrem kleinen Abständen müsste nun eigentlich die Quantenphysik ins Spiel kommen. Da aber in diesem Punkt zugleich eine unvorstellbar große Energiedichte besteht, wird die Gravitation auf einmal genauso relevant wie die anderen Kräfte. Um zu berechnen, was in der Singularität geschieht, müssen also beide Theorien gleichzeitig berücksichtigt werden.

Doch genau das funktioniert nicht. Ein Problem dabei ist, dass es sich um völlig verschiedene Arten von Theorien handelt. Die Allgemeine Relativitätstheorie ist im klassischen Sinne deterministisch. Das bedeutet: Sie basiert auf dem Prinzip von Ursache und Wirkung, auf Kausalität. Objekte befinden sich immer an einem genau definierten Ort. Und sie bewegen sich auf geordneten Bahnen durch Zeit und Raum – die Planeten kreisen um die Sonne, das Sonnensystem rotiert um das Zentrum der Milchstraße.

**Die Quantenphysik dagegen** basiert auf Zufall, Unschärfe und Wahrscheinlichkeit. Mit frappierenden Konsequenzen. So lässt sich etwa nicht vorhersagen, wann ein einzelnes, bestimmtes radioaktives Atom zerfällt – in einer Sekunde oder in einer Million Jahren. Exakt bestimmen lässt sich nur die sogenannte Halbwertszeit – die Zeit, nach der von einer großen Menge von Atomen die Hälfte zerfallen ist. Es ist also nötig, eine sehr große Zahl von Ereignissen zu betrachten, um zu einer quantitativ nachprüfbaren Aussage zu gelangen.

Ein anderes Beispiel für die Kuriosität der Quantenphysik: Teilchen haben keinen festen Ort. Es existiert nur eine gewisse Wahrscheinlichkeit, mit der sich ein Teilchen – etwa ein Elektron – gerade an einem bestimmten Punkt aufhalten könnte. Erst bei genauem Hinsehen, also bei einer Messung, manifestiert es sich an einem bestimmten Ort. Würde man die Gesetze der Quantenwelt ins Makroskopische übertragen, wäre das so, als würde jedes Mal, wenn der Blick nachts zum Himmel geht, der Mond an einer anderen Stelle stehen. Aber solange niemand hinschaut – und das ist das eigentlich Entscheidende – wäre der Mond überall und nirgendwo.

Es ist eine Welt, die man sich überhaupt nicht vorstellen kann. Und doch: Sämtliche Experimente bestätigen, dass sich die Dinge im Mikrokosmos exakt nach den Vorhersagen der Quantenphysik verhalten – so unbegreiflich dies für den menschlichen Geist ist.

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4}W_{\mu\nu}W^{\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu} \\ & + \bar{L}\gamma^\mu(i\partial_\mu - \frac{1}{2}g\tau W_\mu - \frac{1}{2}g'YB_\mu)L \\ & + \bar{R}\gamma^\mu(i\partial_\mu - \frac{1}{2}g'YB_\mu)R \\ & + |(i\partial_\mu - \frac{1}{2}g\tau W_\mu - \frac{1}{2}g'YB_\mu)\phi|^2 - V(\phi) \\ & - (g_1\bar{L}\phi R + g_2\bar{L}\phi R + \text{herm.conj.}) \\ & + \frac{1}{2}g_s(\bar{\Psi}_q^j\gamma^\mu\lambda_{jk}^a\Psi_q^k)G_\mu^a \end{aligned}$$

**Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt die Prozesse im Allerkleinsten. Nicht aber die im Makrokosmos**

Die Physiker verfügen also über zwei wunderbar präzise, aber miteinander inkompatible Theorien, um die Welt zu beschreiben. Dazwischen klafft eine Lücke, die sie vor grundsätzliche Probleme stellt. Es gibt zwar mehrere Ansätze, die Theorien zu vereinigen und die Lücken zu füllen. Doch bislang führen sie zu keinem befriedigenden Ergebnis.

Besonders populär ist die „Stringtheorie“. Sie besagt im Wesentlichen, dass sämtliche Teilchen aus winzigen Fäden, „Strings“, bestehen, die wie die Saiten einer Geige unterschiedlich schwingen. Je nachdem, mit welcher Frequenz ein String vibriert, ergibt sich ein anderes Teilchen. Damit ließen sich tatsächlich die Gleichungen der Quantenphysik mit der Relativitätstheorie vereinbaren. Der Haken: Die Stringtheorie funktioniert nur mit weiteren Dimensionen der Raumzeit, von denen es bisher keine Spur gibt. Zudem sagt sie die Existenz weiterer Elementarteilchen voraus. Die hofft man mithilfe riesiger Teilchenbeschleuniger wie dem

CERN bei Genf zu finden. Bislang vergebens.

Darüber hinaus, und das ist die umstrittenste Annahme, postuliert die Stringtheorie, dass wir in einem Multiversum leben. Unser Universum wäre dann nur eines von vielen, wie eine Blase in einem Topf mit kochendem Wasser. Solche Blasen entstehen und vergehen gemäß dem Konzept ständig, und genau so könnte unser Universum sich erst ausdehnen und dann wieder verschwinden, um Platz zu lassen für neue Universen. Diese Universen könnten der Stringtheorie zufolge völlig unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Es wären Myriaden von Welten mit unterschiedlichen Kräften und Elementarteilchen, in denen die sogenannten Naturkonstanten gerade jeweils zufällig die Werte haben, die sie haben.

Allein: Ihre Existenz ließe sich schlicht nicht überprüfen. Damit fehlt das entscheidende Kriterium einer jeden überzeugenden physikalischen Theorie: dass sie sich im Experiment überprüfen und gegebenenfalls widerlegen lässt.

Das ist bei der Quantentheorie der Fall. Die mutet zwar ebenfalls ziemlich absurd an, aber sie hat ihre Richtigkeit und ihren praktischen Nutzen bereits hunderttausendfach unter Beweis gestellt. Die Stringtheorie dagegen ist in ihrer vorliegenden Form nicht in der Lage, eine Vorhersage zu treffen, mit der die Theorie steht oder fällt.

Und so werden sich weiterhin einige der schlauesten Köpfe weltweit mit der Frage beschäftigen, ob es einen überzeugenden Weg gibt, das Wissen der Physik auf einen Nenner zu bringen. Eine Zeile, die alles umfasst, vom Allerkleinsten bis zum Allergrößten.

Wenn es ihnen gelänge, dann könnten sie vielleicht sogar die Frage aller Fragen beantworten: Warum überhaupt etwas ist und nicht einfach nichts.

# Was ist ein

Text: Klaus Bachmann

Sie verbiegen den Raum, dehnen die Zeit  
ins Unendliche und setzen die herkömmlichen  
Gesetze der Physik außer Kraft: Was im Inneren  
von Schwarzen Löchern geschieht, ist so bizarr,  
dass es die menschliche Vorstellungskraft sprengt.  
Mehr noch: Offenbar spielen die gefräžigen  
Himmelskörper auch eine entscheidende Rolle  
im Werden des Kosmos

# Schwarzes Loch?

So wie in dieser Illustration könnte es aussehen, wenn ein Schwarzes Loch einen Stern verschlingt. Dessen Materie wird um das Loch herumgewirbelt und zum Teil als heißer Strahl (Jet) ins Weltall geschleudert. Prozesse wie dieser tragen zur Entstehung von Galaxien bei

# S

**Schwarze Löcher** sind der Inbegriff des schier Unbegreiflichen. Wie soll man sich auch vorstellen, dass es etwas gibt, das so viel Masse in sich vereint, dass nichts, nicht einmal das Licht, seiner Anziehungskraft entkommt?

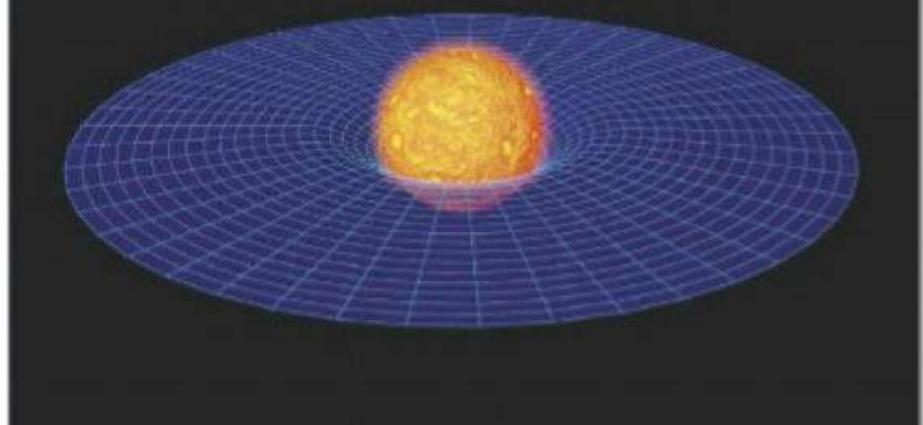
Dass alles, was in diesem apokalyptischen Schlund verschwindet – sei es ein Stern, ein Auto oder ein Hund –, seine komplette Identität, seine Form, Farbe, materielle Zusammensetzung verliert? Dass nichts weiter als fundamentale Eigenschaften wie die Masse übrigbleiben?

Einstein und andere Physiker glaubten nicht an Schwarze Löcher, doch seit den späten 1960er Jahren fanden sich mehr und mehr astronomische Hinweise auf ihre Existenz. Mathematisch hatte der deutsche Astrophysiker Karl Schwarzschild schon im Jahr 1916 das Vorhandensein solcher kosmischer Strukturen aus der Relativitätstheorie hergeleitet. Spätestens seit den 2000er Jahren herrscht Klarheit. Forscher haben inzwischen den Tanz von Sternen rund um das Schwarze Loch in der Mitte unserer Milchstraße aufgezeichnet; sie haben die Gravitationswellen gemessen, die durch die Kollision zweier Schwarzer Löcher ausgelöst wurden – und es ist ihnen gelungen, ein Schwarzes Loch zu „photografieren“.

**Das Bild wurde zu einer Ikone** der Wissenschaft: ein orangefarbener Ring rund um einen schwarzen Kern. Dank der Aufnahme wissen wir, dass im Zentrum der Riesengalaxie M87 ein Schwarzes Loch mit der Masse von 6,5 Milliarden Sonnen sitzt und rotiert. Oder dass dies jedenfalls vor 55 Millionen Jahren der Fall war: So lange brauchte nämlich die Strahlung,

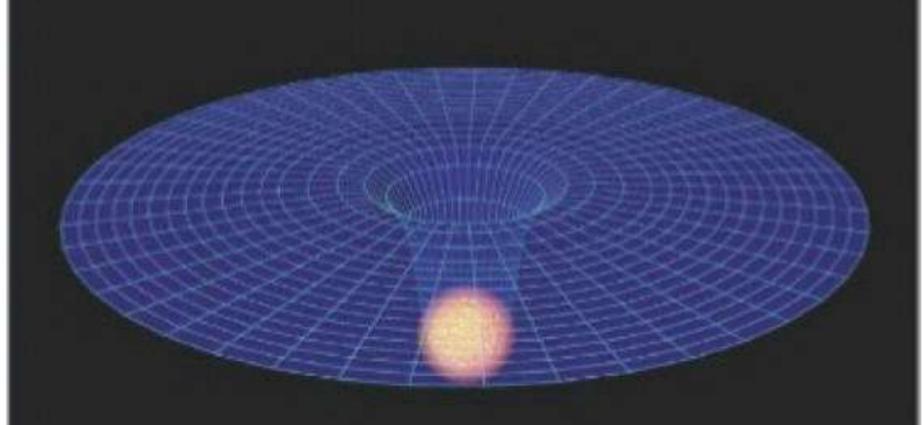
## PHASE 1: KRÜMMUNG

Massereiche Körper wie etwa ein Stern verbiegen das Raum-Zeit-Gefüge (blaues Gitter)



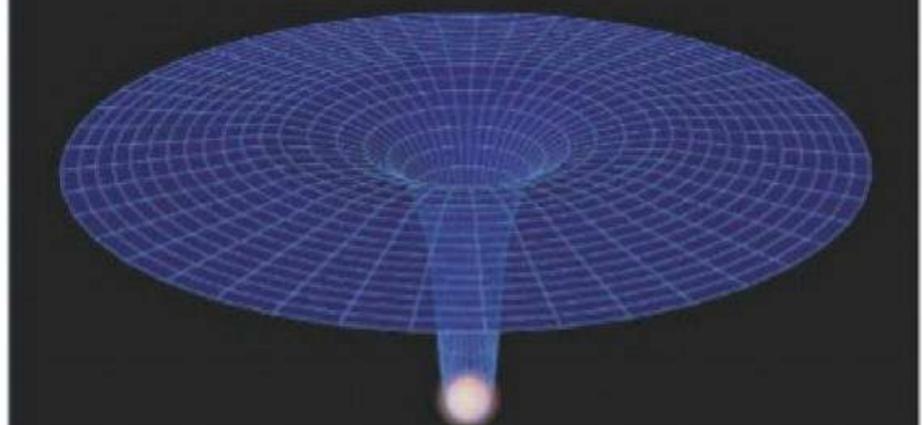
## PHASE 2: VERDICHTUNG

Komprimiert sich die Masse des Sterns, etwa bei einer Supernova, krümmt sich die Raumzeit noch stärker



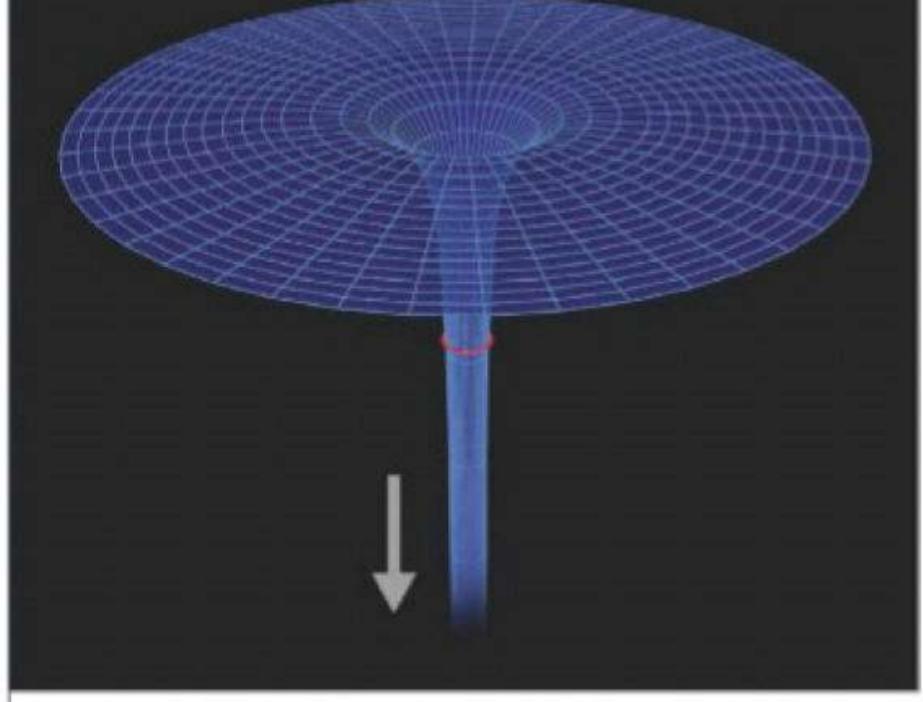
## PHASE 3: SCHRUMPFUNG

Die Masse verdichtet sich immer weiter, die Raumzeit verbiegt sich ins Extreme



## PHASE 4: KOLLAPS

Im Schwarzen Loch krümmt sich die Raumzeit unendlich (Pfeil). Ab dem Ereignishorizont (rot) wird alles verschluckt



um von M87 bis zur Erde zu reisen, wo es schließlich aufgezeichnet wurde.

Sera Markoff ist Mitglied des internationalen Teams, dem diese bahnbrechende Aufnahme gelungen ist. Für die Astrophysikerin von der Universität Amsterdam verdeutlicht das Bild mit seinem Leuchten auch eine andere, weniger bekannte Eigenschaft Schwarzer Löcher: „Sie sind die wirkungsvollsten Motoren

im Universum, angetrieben von der Schwerkraft.“ Dass sie meist nur als dunkler Schlund dargestellt werden, in dem alles wie im Abfluss einer Küchenspülle verschwindet, hält Sera Markoff für ein Missverständnis. Denn Schwarze Löcher würden gewaltige Energien freisetzen, dadurch das Gas in ihrer Umgebung beeinflussen und maßgeblich die Evolution ihrer Heimatgalaxie bestimmen.



Durch Bündelung der Messdaten weltweit verteilter Radioteleskope gelang die erste Darstellung eines Schwarzen Lochs. Es sitzt im Zentrum der Galaxie M87, ist 55 Millionen Lichtjahre von uns entfernt und hat eine Masse von 6,5 Milliarden Sonnen

Die Astrophysikerin verweist auf die Simulationen, mit denen Kosmologen die Entwicklung des Universums nachzuvollziehen versuchen. Sie basteln sich dazu eine Art virtuelle Box, die einen Ausschnitt des Kosmos beherbergt. In diese „Schachtel“ packen sie die Zutaten für ein Universum: Materie, Dunkle Materie, fundamentale Kräfte wie die Schwerkraft. Dann lassen sie den Dingen ihren Lauf und vergleichen das Ergebnis mit den Strukturen, die wir am Himmel sehen.

„Anfangs ergaben die Simulationen viel zu viele schwere Galaxien“, sagt Markoff. Es musste also einen Effekt geben, der die Sternentstehung und damit das Galaxienwachstum hemmte. Und das sind Schwarze Löcher. Wenn sie die um sie herum wirbelnde Materie verschlucken, werden gigantische Energien entfesselt. Die heizen Gas in ihrer Umgebung auf, jagen Schockwellen in den interstellaren Raum, treiben Jets an, keulenförmige Strukturen, in denen elektrisch geladene Teilchen durch Magnetfelder verzweigt Zehntausende von Lichtjahren weit hinausgeschleudert werden. All das verhindert, dass das Gas in der Galaxis sich abkühlt, zusammenklumpt und Sterne formt. „Wenn man verstehen will, warum das Universum heute so aussieht, wie es aussieht“, sagt Markoff, „muss man die Rolle der Schwarzen Löcher berücksichtigen.“

Über die mächtige Außenwirkung der Massemonster haben Astrophysiker mittlerweile eine Menge gelernt. Doch es ist nach wie vor ein Rätsel, wie die ersten

Schwarzen Löcher entstanden sind, wie es in ihrem Innern aussieht. „Sie sind eine klaffende Lücke in den Modellen der Physik“, sagt Sera Markoff. Denn „unsere derzeitige Theorie bricht dort zusammen. Wir haben kein Konzept, was genau dort mit der Raumzeit passiert.“

**Albert Einsteins** Allgemeine Relativitätstheorie beschreibt die Gravitation als eine Qualität der Raumzeit, eines Amalgams der drei Raumdimensionen und einer Zeitdimension. Vereinfacht gesagt kann man sich die Raumzeit wie ein straffes Gummiband vorstellen. Planeten, Sterne,

## Auch in unserer Heimatgalaxie schlummert ein gigantisches Schwarzes Loch

Monde, sogar unsere Körper drücken eine Delle in das Tuch. Je größer die Masse, desto tiefer. Alle Objekte, selbst Lichtteilchen, müssen in ihrer Bewegung der gekrümmten Oberfläche folgen. Sie rutschen etwa in eine ausgeprägte Senke. Auch die Erdmasse erzeugt in der Raumzeit eine Delle, in die wir hineingleiten – was für uns so aussieht, dass wir von unserem Heimatplaneten angezogen werden und fest auf ihm stehen.

Der Knackpunkt beim Schwarzen Loch: Die gewaltige Masse ist in einem unendlich kleinen Punkt konzentriert. Und unter solchen Umständen versagt die Allgemeine Relativitätstheorie. Schwarze Löcher sind Orte, an denen Gott durch null dividiert hat, so drückte es einmal ein amerikanischer Komiker aus.

Immerhin wissen die Astrophysiker inzwischen, dass die Relativitätstheorie ziemlich nah am Rand der astronomischen Schweregewichte noch funktioniert. Genau das beweist das „Foto“, das die Himmelsforscher vom Herzen der Galaxie M87 geschossen haben. Form und Ausdehnung des funkelnenden Lichtrings entsprechen präzise dem, was Albert Einsteins Gleichungen voraussagen.

Was wir sehen, erfordert die Präsenz eines Ereignishorizonts, erklärt Sera Markoff. Ein Schwarzes Loch hat keine Oberfläche wie ein Stern oder ein Planet. Unser Blick reicht nur bis zu einer immateriellen Grenze, die das Loch kugelförmig umgibt – eben das ist der Ereignishorizont. Alles, was dahinter liegt, bleibt uns verborgen, von dort gelangt keine Information, kein Licht zu uns. Dort ist nur rätselhafte Dunkelheit.

Werden wir vielleicht doch eines Tages eine Möglichkeit finden, hinter den Horizont zu blicken? Sera Markoff hält das „für ziemlich unwahrscheinlich“. Und gelangte doch einmal jemand hinter die magische Grenze, könnte derjenige uns nicht mehr davon berichten. Was einmal ein Mensch war, wäre dann nur noch Masse •

Text: Tobias Hürter

# Wie chaot



2011 löst ein Seebben einen Tsunami aus, der Japans Ostküste verwüstet. Bis heute lassen sich solche Erdstöße nicht verlässlich vorhersagen



Staus und Gewitter, Börsenkurse und Lottozahlen:  
Viele Phänomene entziehen sich präzisen Vorhersagen.  
Sie verhalten sich **unberechenbar, aber nicht willkürlich.**  
Forscher suchen nach der verborgenen  
Ordnung im Chaos

*is ch  
ist die  
We lt?*



Der Flügelschlag eines Schmetterlings löst weder einen Hurrikan in Florida noch einen Tornado in Texas aus – auch wenn dieses Bild oft bemüht wird



### An einem Wintertag des Jahres 1961

tippte der Meteorologe Edward Lorenz am MIT in Boston ein paar Zahlen in seinen Computer, der aussah wie eine Waschmaschine mit angeschlossener Schreibmaschine. Dann stand Lorenz auf, um eine Tasse Kaffee zu trinken, und ließ die Vakuumröhren und Dioden rechnen. Als er zurückkam, fiel ihm etwas

auf, das die Wissenschaft für immer verändern sollte.

Als einer der ersten Forscher simulierte Lorenz damals das Wettergeschehen per Computer. Sein Modell beruhte auf zwölf Variablen für die Temperatur, die Windgeschwindigkeit und andere Größen. An jenem Tag wiederholte er eine Berechnung, die er schon einmal durchgeführt hatte. Zu seiner Überraschung lieferte der Computer diesmal ein völlig anderes Resultat. Dabei hatte Lorenz lediglich eine der Variablen von 0,506127 auf 0,506 gerundet. Was sollte das schon ändern? Der Computer gab

ohnehin nur drei Stellen hinter dem Komma aus.

Doch tatsächlich hatte der Eingriff einen immensen Effekt, er änderte das Ergebnis der Berechnung radikal. Winzige Ursache, große Wirkung. So ebnete ein simpler Rundungsfehler einem Wissenschaftsbereich den Weg, der seither versucht, Ordnung in schwer fassbare, zuweilen rätselhaft erscheinende Vorgänge zu bringen: die Chaosforschung.

Anfangs blieb weitgehend unberichtet, welche Revolution Lorenz in Gang gesetzt hatte. Kaum jemand außerhalb der Meteorologie las sein Papier mit dem



trockenen Titel „Deterministic Nonperiodic Flow“, das im Jahr 1963 im *Journal of the Atmospheric Sciences* erschien. Dann fand Lorenz ein eindrucksvolles Bild für seine Entdeckung: Der Flügelschlag eines Schmetterlings im brasilianischen Urwald kann einen Tornado in Texas auslösen. Dieses Bild beeindruckte Experten verschiedenster Disziplinen: Physiker, Geologen, Biologen, Ökonomen.

Denn es offenbarte: So kalkulierbar, wie Wissenschaftler die Welt gern sehen, scheint sie nicht immer zu sein. Statt dessen sind wir von Phänomenen wie dem Wettergeschehen umgeben, die sich nur unzureichend beschreiben und prognostizieren lassen. Phänomenen, die völ-

stets nur ungefähr kennen, und die ungefähre Gegenwart bestimmt nicht die ungefähre Zukunft. Etwas wissenschaftlicher ausgedrückt: Determinismus ist nicht gleichzusetzen mit Vorhersagbarkeit.

Im Nachhinein ist es erstaunlich, dass die Wissenschaftler erst so spät auf

## Auch nach Jahrzehnten der Forschung tun sich Experten schwer damit, das Wesen des Chaos zu definieren

lig chaotisch erscheinen. Was aber ist das – Chaos? Wie sehr regiert es die Welt? Und wie lässt es sich in den Griff bekommen? Bis heute beschäftigen Forscher diese Fragen.

In der Zeit vor Lorenz' Entdeckung schien die Gestalt der Natur ganz und gar geordnet zu sein. Der Engländer Isaac Newton schuf mit seinen Bewegungsgesetzen im Jahr 1687 ein Modell, nach dem die Welt regelmäßig und vorhersagbar verläuft, wie in einem Uhrwerk. Folglich erklärte der französische Mathematiker Pierre-Simon Laplace 1814 in seinem „Philosophischen Essay über die Wahrscheinlichkeiten“, dass ein „Weltgeist“, eine Intelligenz, die alles über das Universum in seinem gegenwärtigen Zustand weiß, auch die gesamte Geschichte des Universums kennt. „Nichts wäre für sie ungewiss, Zukunft und Vergangenheit lägen klar vor ihren Augen“, schrieb Laplace. Unvorhersagbarkeit gibt es in diesem Uhrwerk-Universum nicht.

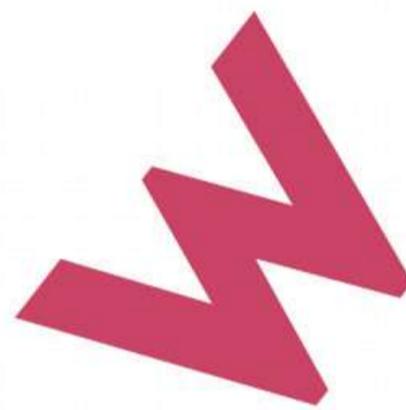
Doch Edward Lorenz brachte dieses festgelegte, deterministische Weltbild ins Wanken. Allmählich wurde klar: Zwar mögen Newton und Laplace recht haben damit, dass die Gegenwart die Zukunft bestimmt – aber nur im Prinzip. Denn in Wirklichkeit können wir die Gegenwart

das Phänomen des Chaos aufmerksam geworden sind, denn es zeigt sich überall in der Welt, nicht nur in so komplexen Systemen wie dem Wetter. Man kann es auch im Spielzeugladen kaufen: Ein Beispiel für ein einfaches System, das sich chaotisch verhält, ist ein magnetisches Pendel, das über einer Fläche mit zwei oder mehreren anziehenden Magneten schwingt. Irgendwann bleibt das Pendel über einem der Magneten stehen. Aber über welchem? Das hängt von der genauen Startposition und Anfangsgeschwindigkeit des Pendels ab – so sehr, dass es sich praktisch nicht vorhersagen lässt. Auch der Automat, mit dem die Lottozahlen gezogen werden, verhält sich chaotisch. Der Laplace'sche Weltgeist hätte jedes Mal sechs Richtige, aber für Menschen wird Lotto immer ein Glücksspiel bleiben.

Aktienkurse und Konjunkturdaten zeigen chaotische Verläufe. Manche Mediziner betrachten die Steuerung des Herzrhythmus als chaotisches System. Psychologen und Gehirnforscher versuchen, Stottern und Epilepsie mit chaostheoretischen Methoden zu verstehen. Staus im Straßenverkehr lassen sich als chaotische Erscheinungen beschreiben. Der amerikanische Biologe Stuart Kauffman hat gezeigt, dass

im Grenzbereich zwischen Ordnung und Unordnung besonders günstige Bedingungen für die Evolution des Lebens herrschen – den „Rand des Chaos“ nennt Kauffman diesen Bereich.

Bei genauerer Betrachtung aller dieser Phänomene zeigt sich jedoch, dass Chaos mehr ist als nur Unvorhersagbarkeit. Hinter dem komplexen Verhalten dieser Systeme verstecken sich Muster und Regelmäßigkeiten. Aktienkurse entwickeln sich chaotisch, aber nicht beliebig. Ein Verkehrsstau ist kein Durcheinander, sondern ein geordneter Zustand. Die Evolution bringt hochentwickelte Lebewesen hervor. Die Chaosforschung versucht, die verborgenen Muster in diesen Phänomenen ans Licht zu bringen.



**Was genau verbindet sie?** Was ist das Wesen des Chaos? Auch nach Jahrzehnten der Chaosforschung tun Spezialisten sich schwer, den Begriff Chaos exakt zu definieren. Der amerikanische Essayist und Wissenschaftshistoriker James Gleick fragte für sein Buch „Chaos – die Ordnung des Universums“, erschienen 1990, mehrere Wissenschaftler nach einer Definition von Chaos. Er bekam ganz unterschiedliche und widersprüchliche Antworten. Der Mathematiker Philip Holmes von der Princeton University sprach von „den komplizierten aperiodischen Orbits bestimmter, meist niedrig-dimensionaler dynamischer Systeme“.

Der chinesische Physiker Hao Bai-Lin charakterisierte Chaos als „eine Art von Ordnung ohne Periodizität“. Auch in Lehrbüchern der Chaostheorie sucht man vergeblich nach einer scharfen Definition. „Wir bezeichnen Beobachtungen oft als ‚chaotisch‘, wenn es in ihnen keine erkennbare Regelmäßigkeit oder Ordnung gibt“, schreibt der Physiker Neil Rasband in seinem Lehrbuch „Chaotic Dynamics of Nonlinear Systems“ – verdächtig vage für einen Naturwissenschaftler.

In dem Film „Jurassic Park“ gibt es eine Szene, in der der Mathematiker



**Die Entstehung von  
Gewittern verläuft so  
chaotisch, dass sich nur  
Wahrscheinlichkeiten  
beziffern lassen**



Das Wetter lässt sich präziser berechnen als einst vermutet. Chaos bringt es bisweilen dennoch, wie Hurrikan »Sandy« in New York



Dr. Ian Malcolm, gespielt von Jeff Goldblum, der Biologin Dr. Ellie Sattler (Laura Dern) die Chaostheorie zu erklären versucht. „Sie befasst sich mit Unvorhersehbarkeit in komplexen Systemen“, sagt Goldblum alias Malcolm. Als Ellie ratlos schaut, versucht Ian es nicht weiter mit Worten. Stattdessen führt er ein kleines Experiment vor: Er setzt Tropfen aus einem Wasserglas auf Ellies Handrücken. Obwohl er die Tropfen immer auf dieselbe Stelle setzt, rinnen sie mal zur einen, mal zur anderen Seite hinunter. Scheinbar zufällig, aber der Chaosforscher sucht nach den verborgenen Ursachen. Die Pulswellen im Blut, das durch Ellies Hand

fließt, stoßen die Wassertropfen in verschiedene Richtungen, vermutet Ian.

Und so gibt es zwar bis heute keine eindeutige Definition von Chaos, aber immerhin ein Forschungsprogramm: den scheinbaren Zufälligkeiten in der Welt auf den Grund zu gehen.

Allerdings zeigte sich inzwischen ausgerechnet beim Wetter, dass es doch nicht so chaotisch ist, wie Edward Lorenz und Kollegen einst glaubten. Die wichtigsten Größen, die das Wetter bestimmen, zum Beispiel Temperatur, Luftdruck und Windgeschwindigkeit, sind Mittelwerte aus sehr vielen Einzelkomponenten: den Bewegungen der Luftmoleküle. In vielen

Wetterlagen können deshalb kleine Störungen keine große Wirkung entfalten. So kommt es, dass heutige Großcomputer das Wetter viel weiter vorausberechnen können, als Lorenz es vor 60 Jahren für möglich gehalten hätte: für bis zu zehn Tage. Nur manche Wetterphänomene wie die Entstehung von Gewittern sind so chaotisch, dass Meteorologen nur mit Wahrscheinlichkeiten vorhersagen können: „am Nachmittag einzelne Gewitter am Alpenrand“.

Genau die richtige Mischung: genug Ordnung, um nicht im Chaos zu versinken, und genug Chaos, um nicht langweilig zu werden.

Diamanten sind Gebilde aus nahezu reinem Kohlenstoff, dessen Atome sich zu einer komplexen Kristallstruktur verknüpfen



# Woraus sind die Dinge gemacht?

Egal ob Gold oder Kohlenstoff, Schwefel oder Silber:  
Alle Elemente – und somit alle Gegenstände, die uns umgeben –  
bestehen aus Atomen. Die **Atome** wiederum sind  
aus **Elementarteilchen** aufgebaut. Forscher rätseln, ob es  
noch kleinere als die derzeit bekannten Bausteine gibt

Text: Klaus Bachmann

Foto: Jeffrey Hamilton



**Eines der größten Rätsel** der Menschheit ist die Frage, woraus alles gemacht ist. Lassen sich die Dinge in immer winzigere Bausteine aufspalten, oder ist irgendwann eine Grenze erreicht?

Um das Rätsel zu lösen, ließen Physiker im 20. Jahrhundert Atombestandteile mit immer höherer Geschwindigkeit aufeinanderprallen. So stießen sie auf vier verschachtelte Ebenen: Alle Materie besteht aus Atomen. Die Atome sind aufgebaut aus einem Kern und Elektronen (die zu den sogenannten Leptonen gehören). Der Atomkern wiederum formt sich aus Kernteilchen (Protonen und Neutronen), und diese sind zusammengesetzt aus noch winzigeren Teilchen, den Quarks. Derzeit nehmen die meisten Physiker an, dass Quarks und Leptonen sich nicht weiter zerteilen lassen. So sagt es das Standardmodell aus, die bis heute genaueste Theorie der Teilchenphysiker. Es beschreibt den Aufbau der Materie aus Teilchen und deren Wechselwirkungen, die ebenfalls über Teilchen ablaufen. Insgesamt existieren danach zwölf Materiepartikel: sechs Quarks und sechs Leptonen, zu denen Elektronen, Myonen und Neutrinos zählen. Hinzu kommen vier Wechselwirkungsteilchen – darunter das Photon – sowie das Higgs-Partikel, das den Materienteilchen ihre Masse verleiht.

Doch manche Physiker zweifeln, ob dies der Wahrheit letzter Schluss ist, für sie wirft das Modell Fragen auf: Warum soll die Materie aus exakt zwölf Bausteinen bestehen? Und warum soll die Grenze der Teilbarkeit ausgerechnet bei Quarks und Leptonen erreicht sein?

Die Suche nach noch kleineren Teilchen – von manchen Wissenschaftlern „Präonen“ oder „Subquarks“ genannt –

stellt Forscher jedoch vor ein Problem. Denn diese hypothetischen Bausteine müssten von einer extrem starken Kraft zusammengehalten werden. Kein Beschleuniger bringt es auf die Energie, die notwendig wäre, um die Präonen auseinanderzureißen.

Kerstin Hoepfner, Experimentalphysikerin an der RWTH Aachen, glaubt, dass sie den Teilchen in der größten Experimentiermaschine der Welt, am Beschleunigerring des Kernforschungszentrums CERN in Genf, auf die Schliche kommen wird. Dafür behilft sie sich mit einem Trick.

## Um ins Innere der Materie zu blicken, brauchen Wissenschaftler enorm viel Energie

Der Detektor CMS des CERN-Teilchenbeschleunigers steht zwölf Kilometer von Genf entfernt, rund 100 Meter unter der Erde. Hinter einer Sicherheitsschleuse und einem Raum voller blinkender Serverschränke öffnet sich eine unterirdische Halle, darin steht eine Maschine, so groß wie ein fünfstöckiges Haus. Dieser Wunderapparat schießt Bilder von einer Welt, die dem menschlichen Auge verborgen bleibt.

Wenn der Beschleuniger läuft, kollidieren in jeder Sekunde Millionen geladener Kernteilchen fast mit Lichtgeschwindigkeit. Dabei erzeugen sie ein Feuerwerk aus Teilchen mit manchmal exotischen Namen. Der Detektor legt sich wie eine gigantische Zwiebel um den Kollisionspunkt. Jede ihrer Schichten ist spezialisiert darauf, bestimmte Teilchen zu vermessen oder nachzuweisen. Eine weltumspannende Forschergemeinde wertet

die Daten aus, auf der Suche nach neuen physikalischen Gesetzmäßigkeiten.

Die Hauptrolle in Hoepfners Experiment spielt das Myon, das ebenfalls bei den Kollisionen entsteht: ein negativ geladenes Teilchen wie das Elektron, aber 200-mal schwerer. Es fliegt fast unbremst durch die inneren Schichten der Zwiebel hindurch, bevor es einige große metallene Kästen erreicht, die Myonkammern. Ein paar dieser Kammern baute Hoepfner einst selbst in ihrem Labor in Aachen zusammen. In den Kästen stehen Millionen Drähte unter Spannung. Saust ein Myon vorbei, fließt ein kurzer Stromstoß durch die Drähte. So kann das Teilchen nachgewiesen werden.

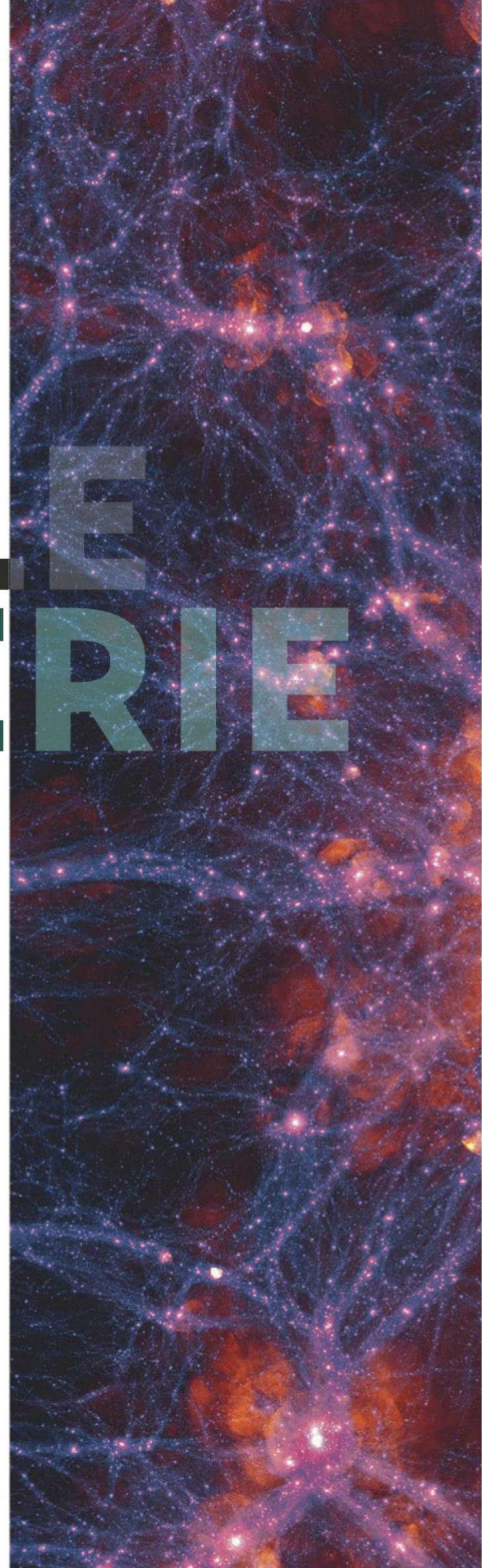
Die Idee, die Kerstin Hoepfners Suche antreibt, ist letztlich simpel: Wenn das Myon nicht elementar, sondern zusammengesetzt ist, können seine Bausteine bei seiner Entstehung Energie aufnehmen und für den Bruchteil einer Sekunde in Schwingung geraten. Sodann gibt das Myon die überschüssige Energie ab, zum Beispiel indem es ein Photon, also Licht, aussendet. Nach diesem Photon fahndet eine andere Zwiebelschicht des Detektors.



**Wenn der Beschleuniger** läuft, fließen gigantische Datenmengen in den Serverraum des Detektors. Hoepfner und ihre Kollegen durchsuchen die Datenmassen mithilfe von Computerprogrammen nach Paaren von Myonen und Photonen. Insgesamt neun Jahre lief der Detektor bislang. Noch hat Hoepfner in den Trümmern der Kollisionen nichts entdeckt, was auf die Existenz von Präonen hinweist. Für die Physikerin ist das kein Grund aufzugeben.

Zurzeit wird der Beschleuniger aufgerüstet, der Detektor gewartet und umgebaut. Im Jahr 2022 soll die Anlage wieder in Betrieb gehen. Dann wird die Suche weitergehen. Mit noch mehr Power.

# WAS IST DUNKLE MATERIE



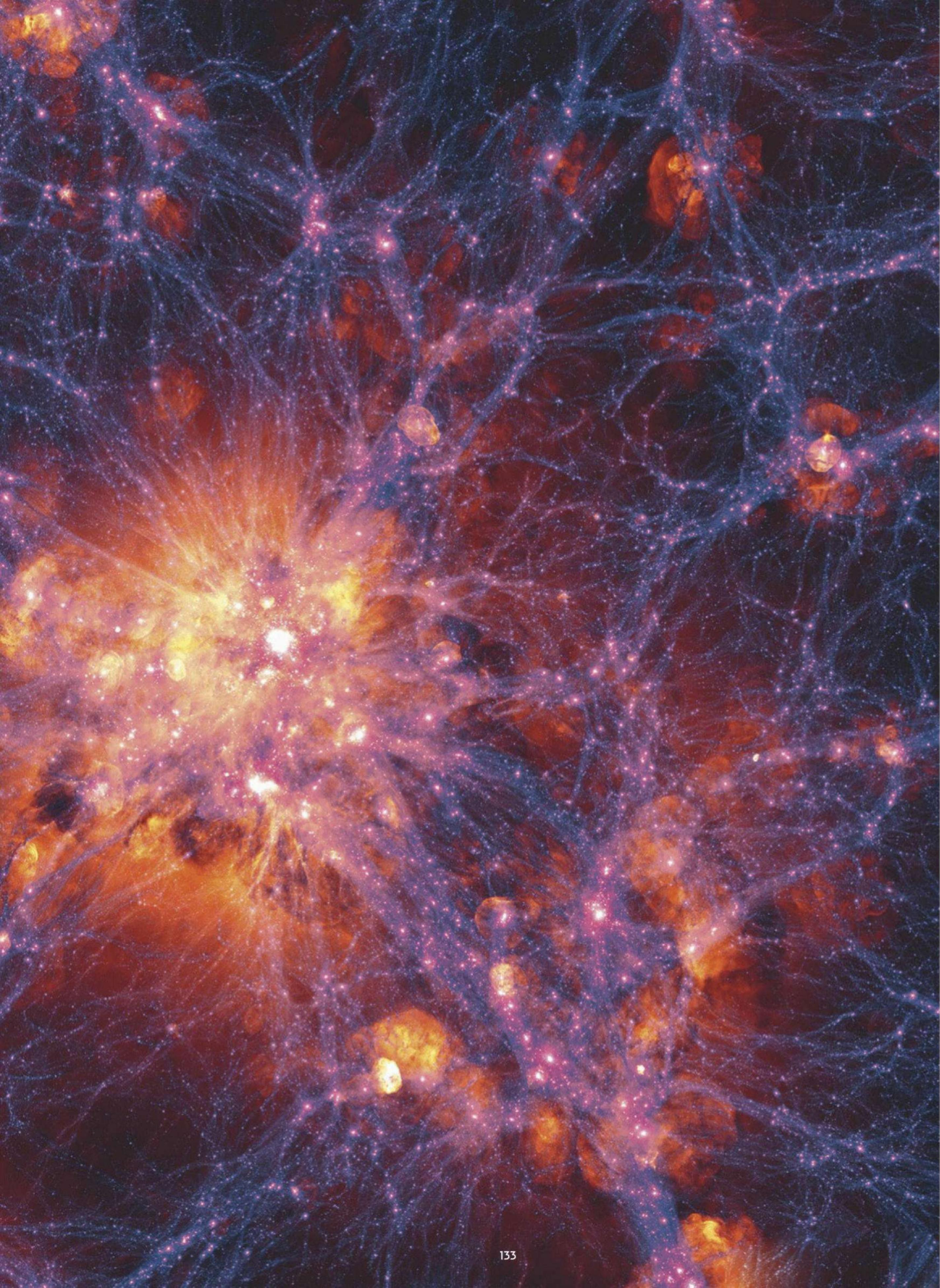
Mehr als 80 Prozent der Materie im Weltall stellt

**Forscher vor große Rätsel:** Sie ist völlig unsichtbar, Physiker konnten noch keines ihrer mysteriösen Teilchen detektieren. Und doch spielt diese Dunkle Materie eine immens wichtige Rolle in der Genese des Universums



Text: Rainer Harf und Maria Kirady

Die Großstruktur des Alls – ein Netz aus Milliarden Galaxien – hat sich unter dem Einfluss einer für uns unsichtbaren Masse geformt: der Dunklen Materie



# E

**Es gibt eine überaus** rätselhafte Form von Materie in unserem Universum: Wir können sie nicht sehen, da sie nicht leuchtet und auch kein Licht reflektiert. Daher wird sie auch die Dunkle Materie genannt.

Im Gegensatz zur sichtbaren Materie kennt niemand ihre Zusammensetzung, bis heute ist völlig ungeklärt, aus welcher Sorte von Teilchen sie besteht. Während die sichtbare Materie sich im Laufe von Milliarden Jahren zu Sternen und Planeten verdichtet hat, verhält sich die Dunkle Materie gänzlich anders: Die mysteriösen Teilchen, aus denen sie besteht, bilden keine Atome und mithin keine komplexen Strukturen wie Moleküle.

Obwohl es weltweit zahlreiche Projekte gibt, die einen Nachweis zum Ziel haben, ist es bisher nicht gelungen, auch nur ein einziges Teilchen der Dunklen Materie direkt mithilfe eines Detektors aufzuspüren.

Und das, obwohl die Dunkle Materie überall im Universum existiert, das gesamte All durchzieht. Sie ist auch hier auf der Erde vorhanden, wir werden sogar beständig von ihr durchströmt: Die seltsamen Partikel wehen einfach durch uns hindurch. Wir bekommen davon überhaupt nichts mit.

Denn die Dunkle Materie interagiert nur extrem selten mit den Atomen, die unseren Körper bilden. Daher fühlen wir sie auch nicht.

Einer gängigen Theorie zufolge rauschen durchschnittlich pro Sekunde rund 100 000 Teilchen der Dunklen Materie durch eine Fläche, die so groß ist wie ein Daumennagel.

**Die Erforschung** des rätselhaften Phänomens reicht weit zurück: Schon in den 1930er Jahren hatte der Schweizer Astrophysiker Fritz Zwicky die Existenz einer unsichtbaren Form von Materie postuliert. Der Wissenschaftler hatte die Geschwindigkeit mehrerer weit entfernter Galaxien beobachtet, die eine Art Ansammlung bil-

den. Aufgrund komplexer Berechnungen stellte Zwicky fest, dass die Galaxien eigentlich auseinanderfliegen müssten. Gäbe es nur die sichtbare Materie, also hauptsächlich die Masse der Sterne und des Gases dazwischen, dürften sich gar keine Galaxienhaufen bilden – ihre Gravitationskraft wäre schlicht nicht groß genug, die Sternenarchipelen aneinander zu binden.

Es musste weitaus mehr als die sichtbare Materie vorhanden sein – etwas, das die Galaxien wie eine Art Klebstoff zusammenhält. Doch Zwicks Theorie wurde von Kollegen belächelt, seine Entdeckung lange Zeit ignoriert.

Erst in den 1970er Jahren machte die US-Physikerin Vera Rubin eine weitere revolutionäre Beobachtung, die schließlich auch von Astrophysikern weltweit ernst genommen wurde: Sie ermittelte, mit welchem Tempo sich Sterne um das Zentrum einer Galaxie bewegen. Und stellte dabei fest, dass die unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Gestirne nur durch die Existenz einer großen, unbekannten Masse zu erklären sind. Wäre allein die sichtbare Materie vorhanden, müssten sich den Gesetzen der Physik zufolge jene Sterne, die sich weit entfernt vom Zentrum einer Galaxie befinden, weitaus langsamer bewegen, als sie es tatsächlich tun.

Außerdem stellt man fest: Dunkle Materie, die Galaxien umgibt, lenkt das Licht ferner, weit dahinter liegender Himmelskörper durch ihre immense Masse und die dadurch wirkende Gravitationskraft ab. Das Resultat: Von der Erde aus gesehen, erscheinen die Objekte hinter der Galaxie verzerrt – gerade so, als würde man sie durch eine Art Linse betrachten.

Und es findet sich noch ein anderer Hinweis auf die Existenz der Dunklen Materie. Es gibt eine Strahlung, die das ganze All erfüllt, sie stammt aus der Frühzeit des Universums und ist eine Art

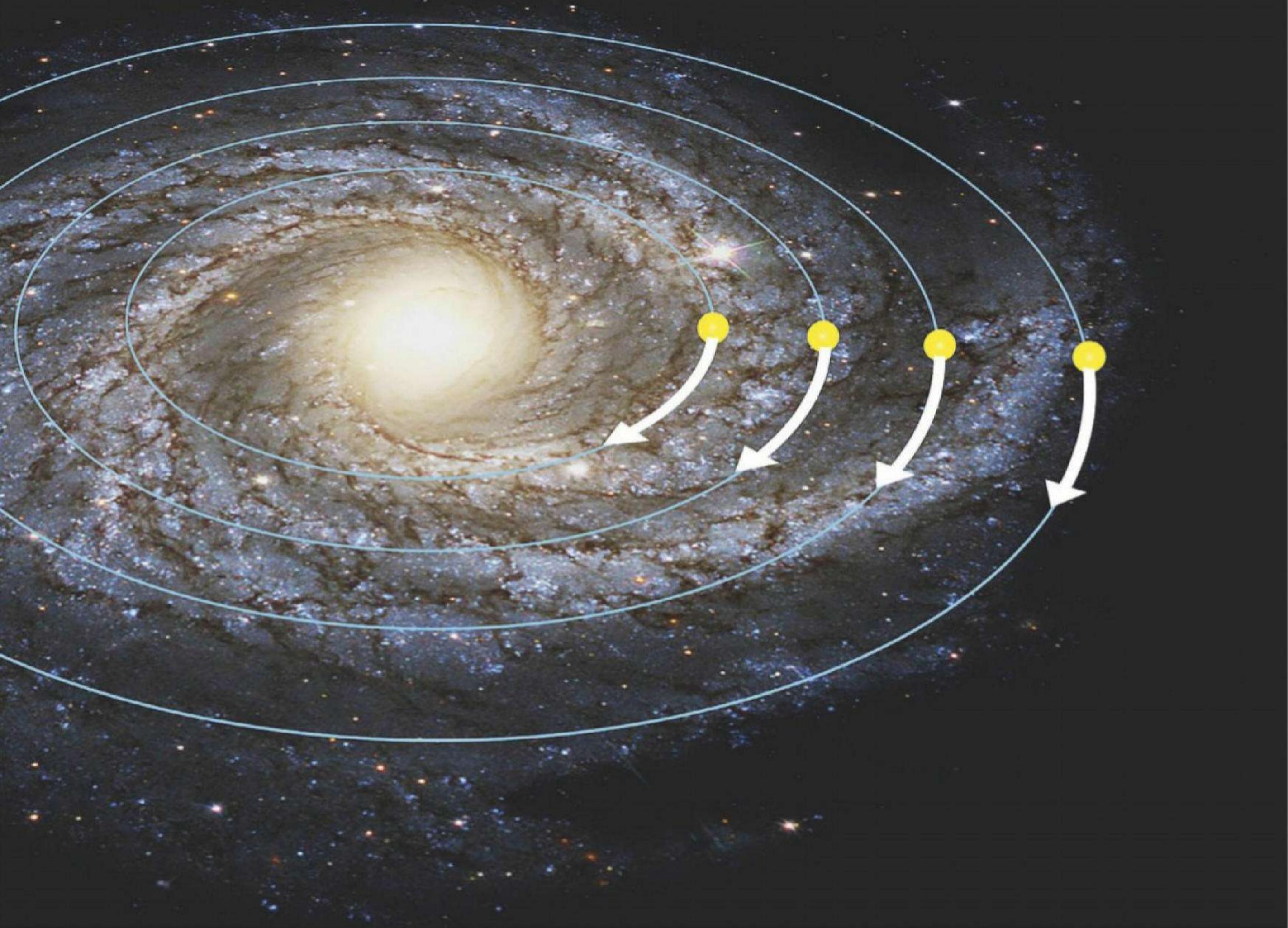
## Ständig **RAUSCHEN** **TEILCHEN** der Dunklen Materie unbemerkt durch uns hindurch



**Dass sich Sterne am Rande von Spiralgalaxien ähnlich schnell bewegen wie Sonnen nahe dem Zentrum (und nicht viel langsamer), führen Forscher auf die Kraft der Dunklen Materie zurück**

Echo des Urknalls: die kosmische Hintergrundstrahlung. Durch deren präzise Vermessung kann man berechnen, wie viel Masse schon in der Urzeit des Universums vorhanden war. Diese physikalischen Quantifizierungen offenbaren, dass die Masse weitaus höher ist als jene, aus der die für uns wahrnehmbare Welt – etwa Sterne, Planeten, Asteroiden, Gaswolken – besteht. Man könnte auch sagen: Man hat das All gewogen und festgestellt, dass noch ein erheblicher Teil an Materie fehlt. Und zwar: rund 85 Prozent.

Kosmologen gehen davon aus, dass die Dunkle Masse bei der Entwicklung des Alls eine wesentliche Rolle gespielt hat. Sie hat dem Kosmos Struktur gegeben. Weder Galaxien noch Galaxienhaufen oder auch netzartige Verbände aus Tausenden Galaxienhaufen können ohne die Kraft der Dunklen Materie erklärt wer-



den. Inzwischen sind Physiker mithilfe moderner Computersimulationen in der Lage, die Strukturbildung und insbesondere die Entstehung der Galaxien im Universum recht genau nachzuvollziehen. Diese Simulationen kommen ohne die Dunkle Materie gar nicht aus.

Seit Jahrzehnten versuchen Physiker der Partikel habhaft zu werden. So lässt man mithilfe von großen Teilchenbeschleunigern wie etwa dem CERN nahe Genf Protonen nahezu auf Lichtgeschwindigkeit zusammenprallen. Bei der Kollision entstehen zahlreiche neue Teilchen. Die Hoffnung: Möglicherweise befindet sich unter diesen neuen Partikeln eben auch ein Teilchen der Dunklen Materie (welches man durch komplexe Berechnungen feststellen könnte).

Andere Forscher, wie die Physikerin Laura Baudis von der Universität Zürich,

gehen davon aus, dass die Dunkle Materie fast nicht mit der sichtbaren interagiert – aber eben nur fast. Es kann, so die Vermutung, zu sehr seltenen Zusammenstößen zweier Partikel kommen. Weil sie so wenig reaktionsfreudig sind, bezeichnen Forscher die hypothetischen Teilchen der Dunklen Materie daher auch als „WIMPs“, englisch für „Schwächlinge“. Zugleich ist WIMP eine Abkürzung für „Weakly Interacting Massive Particle“, Deutsch so viel wie „schwach wechselwirkendes massereiches Teilchen“.

Wenn es sich bei den Partikeln der Dunklen Materie tatsächlich um WIMPs handelt, müsste es hin und wieder vorkommen, dass ein solches schwach wechselwirkendes Teilchen auf einen Atomkern prallt. Genau auf dieser Annahme basiert ein Detektor in einem Untergrundlabor im italienischen Gran-Sasso-Ge-

birgsmassiv, an dem Laura Baudis forscht. Es ist der weltweit größte seiner Art.

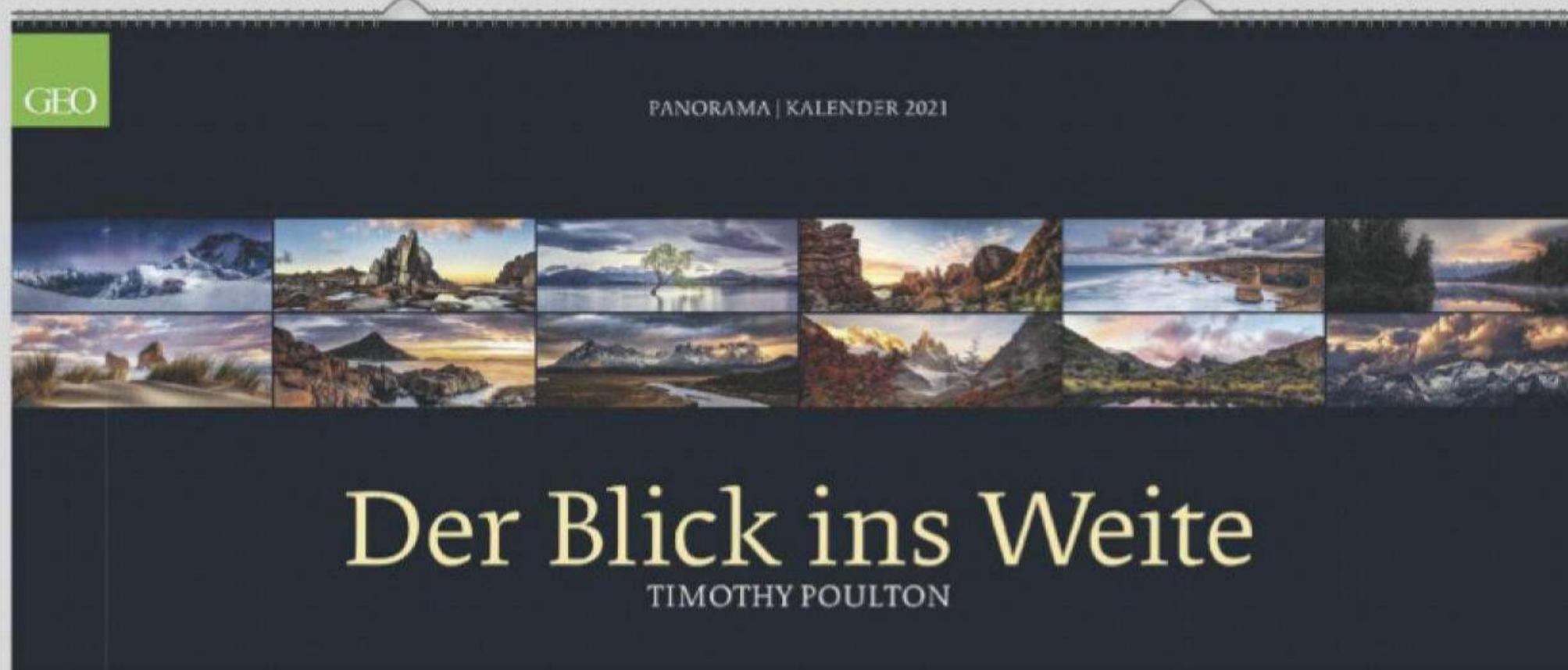
**Noch haben die Physiker** im Team von Laura Baudis kein einziges Teilchen jener Materie detektiert, die unser All so reichhaltig durchdringt. Doch wenn, wäre das eine wissenschaftliche Sensation!

Denn unter anderem würde die Entdeckung der Teilchen das Standardmodell der Teilchenphysik, das die Eigenschaften der kleinsten Materiebausteine unserer Welt beschreibt, vor immense Herausforderungen stellen. Bislang sind darin keine Partikel der Dunklen Materie vorgesehen. Das Standardmodell bezieht sich allein auf die Teilchen der sichtbaren Materie und müsste somit erweitert werden.

Es wäre ein enorm wichtiger Stein der Erkenntnis in einem der größten Puzzles der Wissenschaft.

# Die große Welt der GEO-Kalender für 2021!

Bis zum 15.12. den Vorteilspreis für Abonnenten nutzen!



Panorama-Format!

## GEO Panorama-Kalender „Der Blick ins Weite“

Als Fotograf unendlicher Weiten genießt Timothy Poulton Weltruf. Zwölf seiner spektakulären Bilder zeigt dieser Kalender im einzigartigen GEO-Panorama-Großformat.

Maße: 137 x 60 cm  
Best.-Nr.: G729275  
Preise: 99,99 € (D/A),  
107.00 Fr. (CH)

**99,99 €**  
Vorteilspreis  
für Abonnenten **89,99 €**

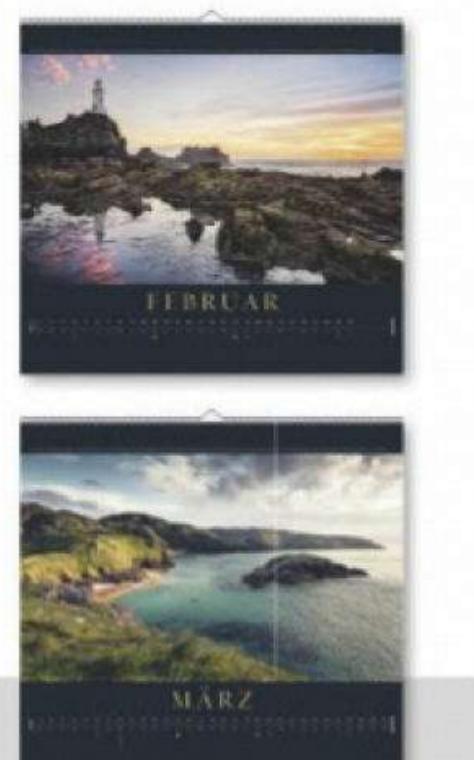
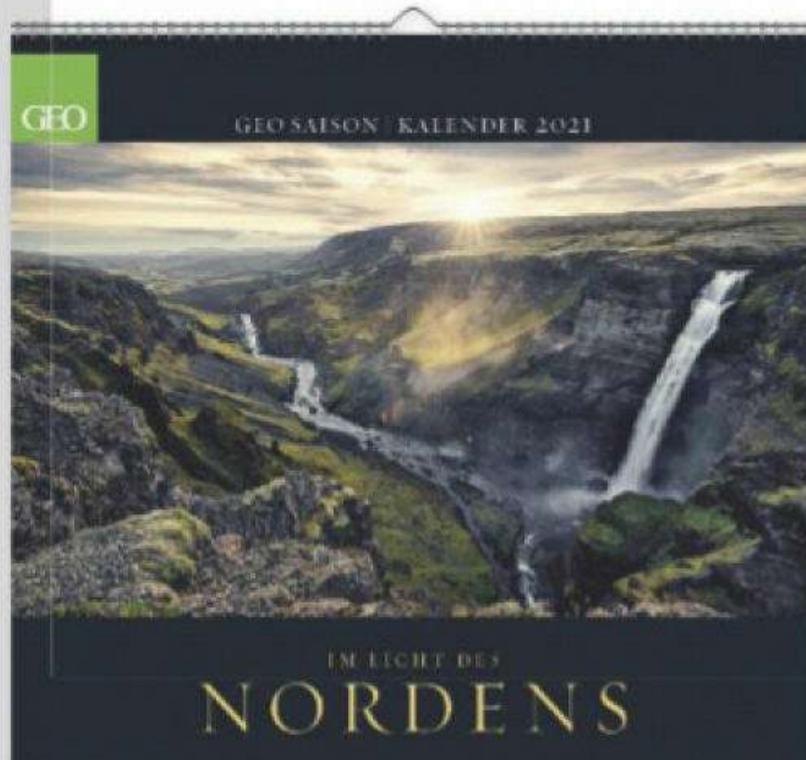


## GEO SAISON-Kalender „Im Licht des Nordens“

Es ist klar. Es ist frisch. Und doch so sanft. Ob in der Weite von Wales, zwischen Sonne und Regen auf der Isle of Skye, über grünen Matten auf den Hügeln von Island oder glitzernd zwischen Eisschollen der Lofoten – das nordische Licht vereint Purismus mit Magie.

Maße: 50 x 45 cm  
Best.-Nr.: G729286  
Preise: 29,99 € (D/A), 32.00 Fr. (CH)

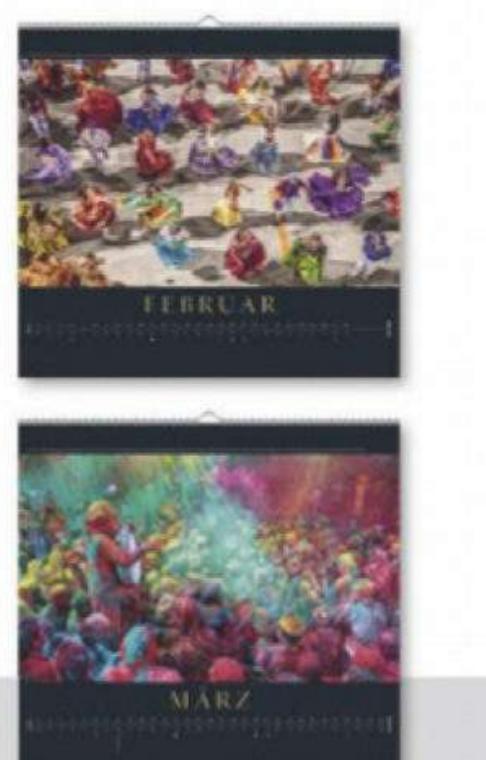
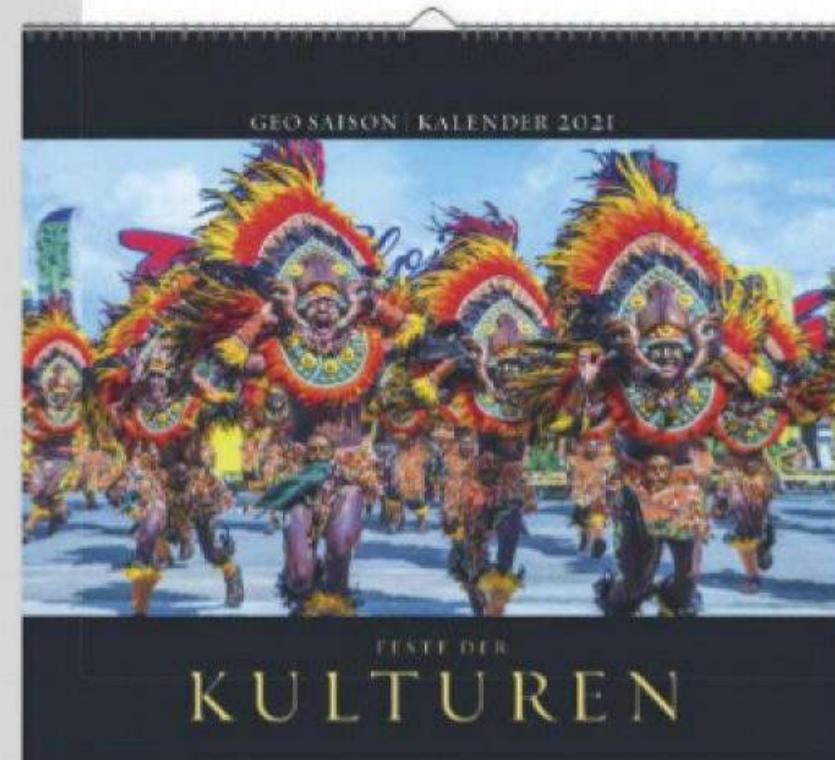
jeweils  
**29,99 €**  
Vorteilspreis  
für Abonnenten **25,99 €**



## GEO SAISON-Kalender „Feste der Kulturen“

Dieser Kalender ist ein einziges Fest – von Januar bis Dezember: Karneval von Rio, Kirschblüte in Japan, das indische Holi. Wie die Kulturen der Erde feiern, könnte unterschiedlicher kaum sein. Was sie aber feiern, ist allen gemein: Lebensfreude.

Maße: 50 x 45 cm  
Best.-Nr.: G729289  
Preise: 29,99 € (D/A), 32.00 Fr. (CH)



Jetzt bestellen unter [www.geoshop.de/kalender2021](http://www.geoshop.de/kalender2021) oder telefonisch unter **+49(0)40/42236427**

(Bitte geben Sie immer den Aktionscode an: G00173)



# Wie entsteht

**Wir wissen meist sehr genau, was richtig ist und was falsch, was Gut und Böse voneinander trennt. Doch woher röhrt diese Vorstellung? Was lenkt unseren inneren Kompass – und was führt ihn manchmal in die Irre?**



## Hilfsbereitschaft

Moral orientiert sich an Prinzipien. Doch diese verändern sich in der Menschheitsgeschichte. Vor Urzeiten galt es etwa verstärkt, nicht allen, sondern nur dem eigenen Stamm gegenüber hilfsbereit zu sein

# Moral?



## Respekt

Die Vernunft gebietet, so argumentieren Philosophen, ausnahmslos jeden Menschen als eigenständiges Wesen zu respektieren, das seinen eigenen Zweck in sich trägt

Text: Mathias Mesenhöller

# S

**Sie ist einer der stärksten** Antriebe, dem wir Menschen folgen. Denn sie vermittelt uns bei fast allen Entscheidungen ein verlässliches Gespür dafür, was richtig und was falsch ist: Die Moral ist unser innerer Kompass. Sie bildet unsere Richtschnur für die vielen kleinen und großen Entschlüsse, die wir in unserem Leben fassen.

Wo aber liegen die Wurzeln von Rücksichtnahme, Empathie, Opferbereitschaft? Von moralischen Qualitäten, die nicht nur einem Zeitgeist entsprechen, sondern Tausende, ja vielleicht sogar Hunderttausende Jahre alt sind?

Lange standen sich in dieser Frage zwei philosophische Schulen gegenüber. Der einen galt die Moral als eine mühe-

volle Bändigung unserer rohen, „tierischen“ Natur. Die andere hielt dagegen, der Mensch sei von Natur aus gut – aber verdorben durch die Zivilisation, durch Privateigentum, durch die Herrschaft weniger über viele.

Jüngere Forschungen zeigen, dass die Dinge weitaus komplizierter liegen. Denn so allgegenwärtig die Moral unser Leben bestimmt, so faszinierend kompliziert und rätselhaft ist sie bei näherer Betrachtung.

**i** **n den vergangenen** Jahren haben sich immherin die Hinweise gemehrt, dass die Fähigkeit, moralisch zu handeln, zur Natur des Menschen gehört, zu seiner biologischen Grundausstattung. Im Gegensatz zu dem bei Forschern lange Zeit verbreiteten Bild ist *Homo sapiens* seinem Wesen nach kein skrupelloser Egoist, der allenfalls aus taktilen Gründen Rücksicht auf andere nimmt.

Dafür sprechen Befunde vor allem aus der Forschung mit Kleinkindern und der mit Menschenaffen: Beide Gruppen liefern wertvolle Hinweise, wenn es darum geht, unserer unverstellten Natur und ihrer Evolution auf die Spur zu kommen.

So bestrafen bereits einjährige Kinder diejenige Figur, die sich in einem Puppenspiel unfair zeigt, während sie leidende Mitmenschen spontan trösten. Und viele Kleinkinder kennen bereits den Unterschied zwischen kulturellen Konventionen („Man soll nicht im Schlafanzug in die Schule gehen“) und moralischen Prinzipien („Du sollst anderen nicht wehtun“) – also zwischen Verstößen, die andere nur ärgern, und solchen, die ihnen Schaden zufügen.

Diese Intuition wurzelt offenbar in unserer Evolution.

Forscher haben herausgefunden, dass unter sozialen Lebewesen eine Art emotionale Ansteckung verbreitet ist, die Übernahme von Empfindungen eines Artgenossen. Das ist nützlich, wenn etwa



## Empathie

Die Fähigkeit zu fühlen, was andere empfinden, bestimmt viele unserer Entscheidungen. Und sie verschafft dem Menschen enormen Vorteil: Sie ist die Basis für Zusammenhalt und Kooperation

## Mit einem Jahr können Kinder bereits erkennen, ob jemandem ein Unrecht geschieht

ein Vogel von einem Raubtier aufgeschreckt wird und prompt der ganze Schwarm abhebt: Ein Vogel, der die Angst der anderen nicht reflexhaft teilt, wird schneller gefressen.

Der Mensch hat das Vermögen, sich in andere einzufühlen, in einzigartiger Weise weiterentwickelt (möglicherweise im Zusammenhang mit der Entwicklung von Sprache). Wir benutzen diese Fähigkeit so selbstverständlich, dass wir sie kaum bemerken: wenn wir einem Frierenden die Jacke reichen, wenn wir einen Verlierer trösten oder einen Sieger beglückwünschen, wenn wir für ein Eichhörnchen bremsen.

Die größere Neigung zur Anteilnahme bietet Menschen enorme Vorteile, weil sie den Zusammenhalt einer Gruppe stärkt und so die Kooperation und Überlebenschancen aller erhöht. Denn ob bei der Kinderaufzucht, der Arbeitsteilung am Lagerplatz, nach Unfällen, in Krank-

heit oder der Konkurrenz mit Dritten: Stets ist der Mensch auf eine Gemeinschaft angewiesen, profitiert der Einzelne von der Gruppe. Der Mensch ist also zuerst und vor allem ein soziales Wesen.

Dennoch wurde der Altruismus, ein Handeln also, das nicht unmittelbar den egoistischen Zielen des Individuums, sondern dem Wohl anderer dient, von Forschern lange als (oft unterbewusste) Strategie interpretiert, um die eigene Reputation und damit den Status in der Gruppe zu steigern. Als getarnte Taktik zum Aufbau von Allianzen im Durchsetzungsstreben.

Doch die Vorstellung vom steten Kampf ums Dasein ließ manchen Wissenschaftler eine simple Wahrheit der Evolution übersehen: Sie belohnt nicht Härte, sondern Effizienz.

**d** er Einzelne mag seine Reproduktionschancen verbessern, indem er besonders egoistisch agiert (und anderen nur beisteht, wenn er sich davon indirekt Nutzen erhofft). Aber dem Fortbestand der Gruppe hilft es eben auch, wenn viele ihrer Mitglieder fürsorglich sind, wohlwollend, den anderen zugetan –



## Altruismus

Lange glaubten Forscher, jedes hilfsbereite Handeln diene im Kern doch den eigenen egoistischen Zielen. Doch mittlerweile wissen sie: Auch gänzlich uneigennütziges Verhalten ergibt einen biologischen Sinn



## Fairness

Die Entwicklung zum Menschen hat beides hervorgebracht: Miteinander und Gegeneinander. Welcher Impuls sich in uns durchsetzt, hängt stark von den Emotionen ab, die in der jeweiligen Situation vorherrschen



## Kooperation

Weniges fördert Zusammenhalt ähnlich effektiv wie ein gemeinsamer Gegner oder ein gemeinsames Ziel. Ein Vorhaben, das jeder Einzelne anstrebt – aber keiner allein umsetzen könnte



## Teilen

Es gibt unter Menschen eine Art moralische Intuition, die nahezu universal gilt: Schon Kleinkinder geben im Experiment anderen umstandslos etwas von einem geschenkten Geldbetrag ab

und das ohne Hintersinn und versteckte Absichten, ohne Erwartung einer Gegenleistung, sondern aus ihrem spontanen Empfinden heraus. Es überleben nicht die Rücksichtslosesten, sondern die Fittesten.

So lässt sich erklären, dass es unter Menschen eine Art moralische Intuition gibt, die nahezu universal gilt: Fast jeder von uns empfindet Stress und Entsetzen, wenn er einen anderen körperlich schädigt.

Fast überall auf der Erde gilt es zudem als verwerlich, zu betrügen oder zu stehlen. Kinder teilen im Experiment einen geschenkten Geldbetrag umstandslos mit anderen, und schon Anderthalbjährige helfen unaufgefordert Erwachsenen, etwa beim Öffnen einer Schranktür.

Und in nahezu jeder Kultur wird folgender Leitspruch geschätzt: Was du nicht willst, dass dir geschieht, das füge auch deinem Nächsten nicht zu.

Und doch hat die Natur uns neben kooperativen und altruistischen Instinkten auch egoistische und aggressive Neigungen mitgegeben. Offenbar hatten im Verlauf der Evolution diejenigen Menschen tatsächlich einen gewissen Vorteil, die sich innerhalb einer Gruppe durchsetzen konnten. Die im Vergleich weniger Skrupel zeigten, die befähigt und bereit waren, hin und wieder geschickt zu lügen, andere zu ihrem Vorteil gegeneinander auszuspielen.

Gepaart mit egoistischem Antrieb, macht uns die Fähigkeit, uns in andere hineinzuversetzen, zu Meistern der Manipulation, des Bluffs und Betrugs.

**d**ie Entwicklung zum Menschen hat also beides begünstigt: Miteinander und Gegeneinander.

So kommt es, dass wir die genetische Grundlage für beide Verhaltensweisen in uns tragen, in einer großen Bandbreite individueller Variationen. Zudem hat die Evolution der Moral eine empfindliche Grenze gezogen: Unsere sozialen Instinkte gelten zunächst einmal der eigenen Gemeinschaft – der Familie oder der Gruppe, der wir uns zugehörig fühlen.

Auch das war einst im Sinne des Überlebens: Um den Fortbestand der eigenen Gruppe zu wahren, bedurfte es der Abgrenzung gegenüber anderen. Wer

nicht zu ihrem Verband gehörte, dem begegneten die frühen Menschen wohl zwangsläufig mit Misstrauen und einem Gefühl des Bedrohtseins – statt mit Empathie und Hilfsbereitschaft.

Solche Rivalitäten brachten wiederum die soziale Moral innerhalb der Gruppe voran: Weniges fördert Kooperation und Zusammenhalt ähnlich effektiv wie ein gemeinsamer Gegner. *Homo sapiens*, unter allen Spezies die einfühlsamste, ist deshalb nach Meinung von vielen Wissenschaftlern von Natur aus ein Fremdenfeind.

Auch der heutige Mensch hat mithin ein ausgeprägtes Bedürfnis, sich mit einer Gruppe zu identifizieren – und sich zugleich von anderen abzugrenzen. Diesem Impuls folgen wir, wenn wir Nationalhymnen singen, einer Religionsgemeinschaft beitreten, uns zu einer Partei bekennen – oder zu einem Fußballverein.

Erstaunlicherweise ist seit einiger Zeit bekannt, dass moralische Entscheidungen auch bei ausgeprägt rationalen Menschen zu einem nicht unerheblichen Teil Bauchentscheidungen sind.

Die für unsere Gefühle zuständigen Hirnareale sind dabei ebenso aktiv wie diejenigen, mit denen wir nüchtern kalkulieren, wägen. Emotionen und Intelligenz gehen Hand in Hand. Gerade auch in ethischen Fragen.

Kaum verwunderlich, dass wir von „moralischen Empfindungen“ sprechen, wenn wir beurteilen, ob etwas gut oder schlecht ist, erstrebenswert oder verwerlich. Das Problem daran: Dieses Gespür ist naturgemäß sehr individuell – was dem einen widerstrebt, das empfindet der andere als gangbar.

Deshalb braucht es mehr als Emotionen, um in einer komplexen Welt Antworten auf die existenzielle Frage zu geben: Was ist gut und was schlecht? Und: Was soll ich tun und was nicht?

Eine Lösung hat der preußische Philosoph Immanuel Kant schon vor mehr als 200 Jahren formuliert – und damit einen zeitlosen Vorschlag gemacht, auf

den sich eine Moral gründen lässt, die das Horden- und Stammesdenken weit überschreitet und überall und für jeden gilt. Der Mann aus Königsberg begriff die Vernunftbegabung als diejenige Eigenschaft, die alle Menschen teilen. Hieraus folgerte er zwei Maßgaben.

Die eine besagt, dass kein Mensch einen anderen (und ebenso sich selbst) allein als Mittel benutzen dürfe; vielmehr sei jeder Mensch als ein Wesen zu respektieren, das seinen eigenen Zweck in sich trägt.

Die andere lautet: Handele stets so, dass die Maxime deines Handelns als allgemein gültiges Gesetz dienen könnte. Wenn du stiehlst, musst du wollen, dass alle

stehlen – auch von dir.

Dieser Gedanke wirkt sehr abstrakt. Kant sah darin aber die einzige Möglichkeit, eine universelle Moral zu entwickeln. Seither ist sein Ansatz immer neu kritisiert, fortentwickelt, erweitert worden.

Die Grundannahme dieser fortlaufenden Debatten lautet: Eine allgemeine Moral für eine kooperierende Menschheit ist vernunftgemäß und möglich. Konservative Denker, vor allem in den USA, haben dagegen eingewandt, das seien Träume, naiver Idealismus. Denn Immanuel Kant und seine Jünger würden die Natur des Menschen erkennen: Der sei und bleibe seines Nächsten Wolf.

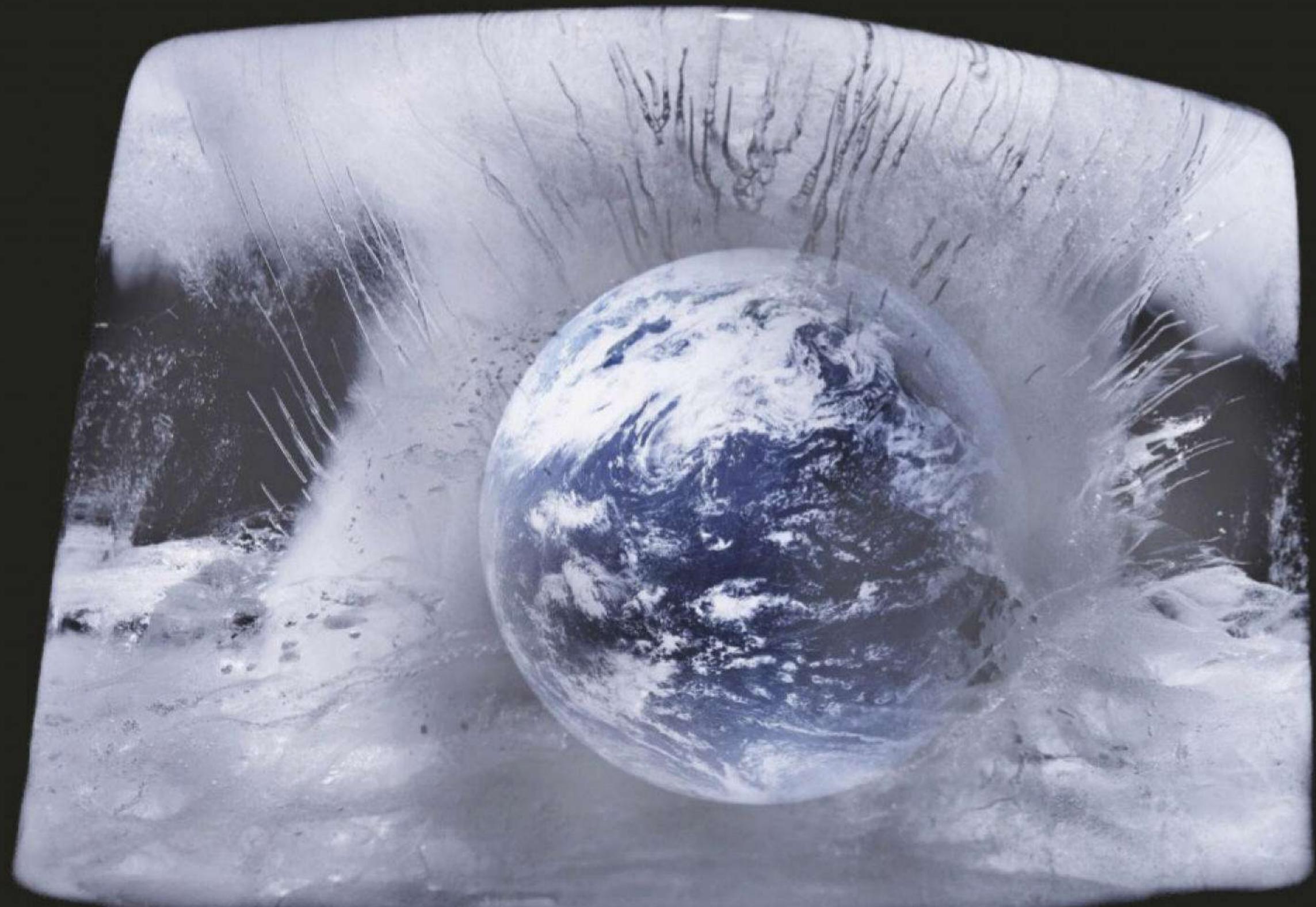
**g**ewiss, kein anderes Tier quält und mordet seinesgleichen so wie der Mensch. Aber wir sind auch die einzige Spezies, die sich in einem solchen Ausmaß um Kranke und Bedürftige kümmert, Güter teilt, bewusst Nachteile in Kauf nimmt, um Fremden zu helfen – und sogar Verantwortung über die eigene Gattung hinaus empfinden kann.

Eine Antwort auf das Rätsel der Moral könnte demnach lauten: Wir sind von Natur aus weder gut noch schlecht. Sondern gehen davon aus, dass wir in unseren Entscheidungen vor allem eines sind: frei.

## Ist der Mensch grundsätzlich frei, zwischen seinen Taten und Untaten zu wählen?

# Wie endet die Welt?

Text: Tobias Hofbaur  
und Rainer Harf



**Seit dem Urknall dehnt sich unser Universum mit rasanter Geschwindigkeit aus. Doch wie wird das All in ferner Zukunft aussehen, wird die Welt einen frostigen Tod sterben oder der Kosmos in sich zusammenfallen?**

**B**egonnen hat alles vor rund 13,8 Milliarden Jahren, mit dem Urknall. Ganz allmählich hat sich dann das Universum, wie wir es kennen, entwickelt, mit Abermilliarden von Sternen und Galaxien, von Schwarzen Löchern und planetaren Nebeln. Doch wie wird es weitergehen mit unserer Welt? Wie sieht die Zukunft des Alls aus, die ferne Zukunft? Sicher sind sich die Forscher nicht. Doch viele Kosmologen spekulieren und haben verschiedene Szenarien entworfen, wie das Universum gewissermaßen endet.

Bei diesen Szenarien spielt eine mysteriöse Kraft eine tragende Rolle: die Dunkle Energie. Erst Ende der 1990er Jahre machen zwei Astronomenteams eine Entdeckung, die alle bisherigen Annahmen über die Entwicklung des Kosmos auf den Kopf stellt: Aus fernen Sternexplosionen ermitteln sie, dass sich das Universum in den vergangenen fünf Milliarden Jahren immer schneller ausgedehnt hat.

Die rasante Expansion des Alls zwingt die Astronomen dazu, die Zusammensetzung des Kosmos aufs Neue zu berechnen. Seine beschleunigte Ausdehnung können sie sich nur mit einer bis dahin unbekannten Größe erklären – einer Kraft, so rätselhaft, dass sie ihr eher hilflos einen ähnlichen Namen geben wie der Dunklen Materie, obwohl beides miteinander überhaupt nichts zu tun hat: Sie nennen die Kraft „Dunkle Energie“.

Auch wenn die Wissenschaftler so gut wie gar nicht wissen, was genau sich hin-

ter der seltsamen Form von Energie verbirgt, haben sie kalkuliert: Knapp drei Viertel der gesamten Energie im Universum gehen aufs Konto der Dunklen Energie.

Die Folgen dieser ominösen Größe, ihre Auswirkungen auf die Zukunft des Alls, spiegeln sich in den Szenarien der Kosmologen wider.

#### **BIG FREEZE** **Das große Frieren**

Der Kosmos dehnt sich aus, und durch die Dunkle Energie sogar immer schneller. Es wird dunkler am Himmel, immer weniger Sterne oder Galaxien sind zu sehen. Das Universum, welches heute -270,4 Grad Celsius kalt ist, kühlt noch weiter ab. So weit, dass die Temperatur schließlich nur noch einen winzigen Hauch über dem absoluten Nullpunkt von minus 273,15 Grad Celsius liegt. Viel zu kalt für jedwedes Leben, denn ohne Temperaturunterschiede gibt es kein Vor oder Zurück, keinen Prozess, der noch Energie zu liefern vermag.

#### **BIG RIP** **Das große Zerreißen**

Nicht ausgeschlossen, dass sich herausstellt: Die Dunkle Energie hat noch seltsamere Eigenschaften, als die Forscher bislang vermuten. Dann könnte die Ausdehnung des Universums sogar so stark zunehmen, dass letztlich die Schwerkraft, welche unsere Milchstraße und unser Sonnensystem zusammenhält, überwunden wird und diese Gebilde auseinanderreißen. Das Auseinanderdriften könnte gar

so stark werden, dass sogar Atome nicht mehr zusammenhalten. Es kommt zum großen Zerreißen.

#### **BIG CRUNCH** **Das große Zermalmen**

Bei diesem Szenario überwiegt irgendwann die Schwerkraft der Materie. Der Raum schrumpft, und unser Universum schnurrt in einer Art zeitlicher Umkehr des Urknalls zusammen, bis sich die Materie wieder in die Urbausteine auflöst. Diese Entwicklung wäre aber nur dann möglich, wenn die Dunkle Energie irgendwann verschwindet und nicht mehr für eine beschleunigte Expansion sorgt.

#### **BIG SPLAT** **Der große »Klatsch«**

Einer Theorie nach existiert unser Universum auf einer vierdimensionalen Membran, die sich durch einen Raum mit noch mehr Dimensionen bewegt (dieses Modell ist – sehr vereinfacht – mit einem Blatt Papier vergleichbar, das durch ein Zimmer fliegt). Stößt die Membran unseres Weltalls mit einer anderen zusammen, löst der Aufprall (Klatsch) ein dramatisches Geschehen aus: Das bestehende Universum stürzt in einem Big Crunch zu einer Singularität – quasi zu einem Punkt – zusammen. Daraus folgt ein Urknall, der ein neues Universum gebiert. Dieses Szenario geht davon aus, dass sich Phasen des Entstehens und Vergehens in einem zyklischen Universum fortlaufend abwechseln.

**Auch wenn das erste Szenario** vielleicht das wahrscheinlichste ist, weiß niemand genau, wie sich das Universum in Milliarden von Jahren verändert. Doch ganz gleich, welches Szenario eintritt: Uns Menschen wird es mit Sicherheit nicht mehr geben. Niemanden also, der das Ende der Welt mitbekommt.

Vielleicht ist das sogar ein wenig tröstlich.

**Bei der Entwicklung des Alls**

**spielt eine mysteriöse Kraft eine Rolle:  
die Dunkle Energie**

GEOkompa<sup>t</sup> Nr. 66 erscheint am 3. 3. 2021

## WOHLLEBENS WELT

**Tierisch  
gut**

Eine besondere Freundschaft

Der Winter ist für Lebewesen eine besonders herausfordernde Zeit, der viele mit erstaunlichen Tricks begegnen. Etwa der Winterpilz, der eine Art Frostschutzmittel produziert, um bei klimmender Kälte nicht zu vereisen. Oder der Schneehase, der sich in eine weiße Tarntracht hüllt, um unbemerkt über Schneewehe zu hoppeln. WOHLLEBENS WELT erzählt von verblüffenden Naturphänomenen in der kalten Saison. Von Nordlichtern, von geheimnisvollen Mischwesen. Und davon, wie innig die Beziehung zwischen Mensch und Tier sein kann.

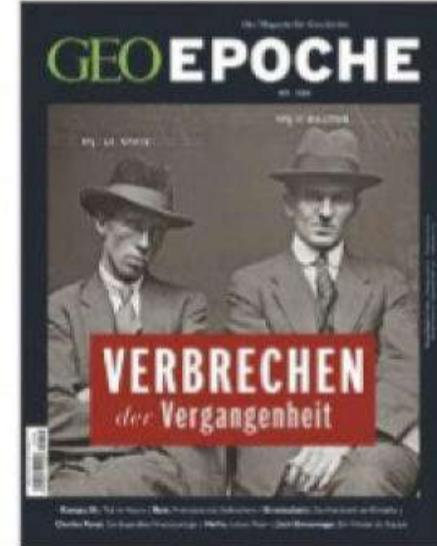


Die Winter-Ausgabe von **WOHLLEBENS WELT** hat 116 Seiten und kostet 6,50 Euro. Weitere Themen: Weihnachtsbäume: kaufen oder nicht? • Wildschweine: Alles andere als saudumm • Stechpalmen: Das ganze Jahr über grün

## GEO EPOCHE

**Verbrechen  
der Vergangenheit**

Täter, Opfer und Ermittler



**GEOEPOCHE** »Verbrechen der Vergangenheit« hat 164 Seiten und kostet 12 Euro, mit DVD »Das Vermächtnis des Sherlock Holmes« 18,50 Euro. Einige Themen: Ramses III. – Tod im Harem • Mafia – Italiens Paten • Jack Unterweger – Ein Mörder als Popstar

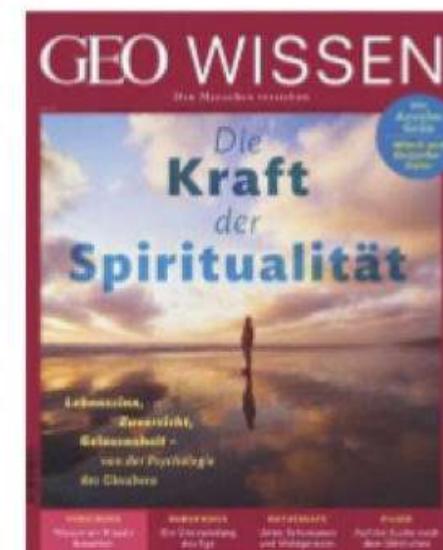
**G**eschichten über Verbrechen packen uns Menschen. Weil uns jene Facetten des Menschseins faszinieren, die mitunter zu schockierenden Taten führen. Doch bietet das Thema Verbrechen mehr als düstere Abgründe – es ist ein ergiebiger historischer Gradmesser. Was ist kriminell? Was eine gerechte Strafe? Und gilt diese für jeden gleichermaßen? Es sagt viel über eine Gesellschaft aus, wie sie diese Fragen beantwortet. Und viel über eine Epoche, wie sich ein Vergehen abspielt. So weist jede Missetat über sich selbst hinaus: gleichsam als Spiegel ihrer Zeit.

## GEO WISSEN

**Spiritualität  
heute**

Die Psychologie des Glaubens

**S**piritualität, transzendent Erfahrungen sind in traditionellen Glaubensgemeinschaften erlebbar, aber auch ohne Gottesvorstellung, wie im Buddhismus, bei bestimmten Yoga-Stilen, in einer Meditation oder in der Natur. Damit beschäftigt sich das neue **GEO WISSEN**. Zu Wort kommen Religionspsychologen, Parapsychologie-Experten, Grenzgänger zwischen Wissenschaft und Buddhismus sowie der Benediktinerpater Anselm Grün. Eine Ausgabe über Dinge jenseits der materiellen Welt, über Erfahrungen, die der unmittelbaren Anschauung entzogen sind.



**GEO WISSEN** »Die Kraft der Spiritualität«, 148 Seiten, 11 Euro, mit DVD (»Becoming Nobody«) 17,50 Euro. Weitere Themen: Unter Schamanen und Waldgeistern • Warum wir Rituale brauchen • Spirituelle Einkehr im Franziskanerkloster

## Den Schmerz lindern

Migräne und Kopfschmerz



### GEO WISSEN GESUNDHEIT

»Kopfschmerz und Migräne« kostet 12,50 Euro, mit Entspannungs-DVD 17,50 Euro. Weitere Themen: Kinder und Kopfschmerzen • Was tun gegen den Kater?

Die „Gewitter im Kopf“ haben vielfältige Ursachen und zahllose Erscheinungsformen. Doch es gibt nachhaltige Linderung – dank der modernen Medizin und wirksamer Selbsthilfe. In der aktuellen Ausgabe von GEO WISSEN GESUNDHEIT erklären Ärzte zudem, welche Warnsignale des Körpers unbedingt ernst genommen werden müssen und weshalb viele Patienten oft lange Zeit falsch behandelt werden. Forscher berichten über moderne Untersuchungs- und Therapiemethoden, etwa eine neuartige Antikörper-Behandlung gegen Migräne.

## IMPRESSUM

Gruner + Jahr GmbH, Am Baumwall 11, 20459 Hamburg  
Postanschrift der Redaktion: Brieffach 24, 20444 Hamburg  
Tel.: 040/37 03-0, Internet: [www.GEOkompakt.de](http://www.GEOkompakt.de)

**CHEFREDAKTEURE**  
Jens Schröder, Markus Wolff  
**STELLVERTRETEnde CHEFREDAKTEURE**  
Rainer Harf, Claus Peter Simon  
**ART DIRECTION**  
Torsten Laaker  
**TEXTREDAKTION**  
Tilman Botzenhardt, Lara Hartung, Maria Kirady,  
Nora Saager, Bertram Weiß, Sebastian Witte  
**BILDREDAKTION**  
Carla Rosorius (Leitung); Carolin Küst,  
Jochen Raiß, Katrin Trautner  
**VERIFIKATION**  
Regina Franke, Dr. Götz Froeschke,  
Susanne Gilges, Stefan Sedlmair, Bettina Süssmilch  
**LAYOUT**  
Dennis Gusko  
**CHEF VOM DIENST/SCHLUSSREDAKTION**  
Ralf Schulte  
**TECHNISCHER CHEF VOM DIENST**  
Rainer Droste  
**REDAKTIONSSISTENZ**  
Ümmük Arslan  
**HONORARE/SPESEN**  
Angelika Györfly  
**GESCHÄFTSFÜHRENDE REDAKTEURIN**  
Maike Köhler  
**VERANTWORTLICH FÜR DEN REDAKTIONELLEN INHALT**  
Jens Schröder, Markus Wolff  
**PUBLISHER**  
Frank Thomsen (Stv. Toni Willkommen)  
**PUBLISHING MANAGER**  
Patricia Hildebrand  
**DIRECTOR BRAND**  
Heiko Hager/G+J eMMS  
**VERANTWORTLICH FÜR DEN ANZEIGENTEIL**  
Fabian Rother, Head of Brand Print + Direct Sales,  
G+J eMMS, Am Baumwall 11, 20459 Hamburg.  
Es gilt die jeweils aktuelle Preisliste.  
Infos hierzu: [www.gujmedia.de](http://www.gujmedia.de)  
**SALES DIRECTOR**  
Franziska Bauske, DPV Deutscher Pressevertrieb  
**MARKETING**  
Pascale Victoir  
**HERSTELLUNG**  
G+J Herstellung, Heiko Belitz (Ltg.), Oliver Fehling  
Litho: 4MAT Media, Hamburg  
Druck: appl druck GmbH,  
Senefelderstraße 3-11, 86650 Wemding  
Bankverbindung: Deutsche Bank AG Hamburg,  
IBAN: DE30200700000032280000,  
BIC: DEUTDEHH  
Heft-Preis: 11 Euro, ISBN 978-3-652-00963-8,  
ISSN 1614-6913

USA: GEOkompakt is published by Gruner + Jahr GmbH.  
K.O.P.: German Language Pub., 153 S Dean St, Englewood NJ 07631. Periodicals Postage is paid at Paramus NJ 07652.  
Postmaster: Send address changes to GEOkompakt,

GLP, PO Box 9868, Englewood NJ 07631.

KANADA: Sunrise News, 47 Silver Shadow Path,  
Toronto, ON, M9C 4Y2, Tel.: +1 647-219-5205,  
E-Mail: [sunriseorders@post.com](mailto:sunriseorders@post.com).

Der Export der Zeitschrift GEOkompakt und deren Vertrieb im Ausland sind nur mit Genehmigung des Verlages statthaft. GEOkompakt darf nur mit Genehmigung des Verlages in Lesezirkeln geführt werden.

© 2020 Gruner + Jahr Hamburg,  
Printed in Germany

## GEO-LESERSERVICE

### FRAGEN AN DIE REDAKTION

Tel.: 040/37 03 20 84

E-Mail: [briefe@geokompakt.de](mailto:briefe@geokompakt.de)

### ABONNEMENT- UND EINZELHEFTBESTELLUNG

Online-Kundenservice: [www.geo.de/kundenservice](http://www.geo.de/kundenservice),

Tel.: 0049/40/55 55 89 90

Service-Zeiten: Mo-Fr 7.30-20 Uhr, Sa 9-14 Uhr

Postanschrift: GEO-Kundenservice, 20080 Hamburg

### Preis Jahresabonnement:

44,00 € (D)/50,00 € (A)/74,40 sfr (CH);

Preise für weitere Länder auf Anfrage erhältlich.

BESTELLADRESSE FÜR GEO-BÜCHER,  
GEO-KALENDER, SCHUBER ETC.

GEOkompakt-Kundenservice, 74569 Blaufelden,  
Tel.: 0049/40/42236427, Fax: 0049/40/42236663  
E-Mail: [guj@sigloch.de](mailto:guj@sigloch.de)

## BILDNACHWEIS

Anordnung im Layout: l. = links, r. = rechts,  
o. = oben, m. = Mitte, u. = unten

### TITEL

Montage, verwendete Fotos: Jose A. Bernat Bacete/  
Getty Images, Getty Images

### EDITORIAL

Dr. Götz Froeschke: 3

### INHALT

siehe entsprechende Seiten

### VON WEM STAMMEN WIR AB?

Kennis & Kennis/Moesgard Museum: 6/7, 10/11,  
12/13, 19; Kennis & Kennis: 8/9, 14, 15, 16, 17; Infografik:

Tim Wehrmann für GEO: 18

### WAS WAR VOR DEM URKNALL?

Illustration: Tim Wehrmann für GEOkompakt: 20/21;  
Teleskopaufnahmen: J. Kastner (RIT)/  
ESA/NASA: 22; A. S. Borlaff et al./HUDF: 23

### WIE WIRKLICH IST DIE WIRKLICHKEIT?

Erik Johansson: 24-29

### HABEN PFLANZEN GEFÜHLE?

Don Farrall/Photographer's Choice/Getty Images: 30/31;  
Philippe Clement/Nature Picture Library: 32;

Tui De Roy/Nature Picture Library: 33

### WIE VIELE MENSCHEN WERDEN AUF DER ERDE LEBEN?

Andy Yeung: 34-37

### INWIEWEIT VERERBEN WIR UNSER SCHICKSAL?

Bachrach/Getty Images: 38/39; John Olson/The LIFE  
Picture Collection/Getty Images: 39 u., 40 u.; ullstein  
bild: 40 o. Meyer/Tendance Floue/Agentur Focus: 41

### WAS GEHT IM ERDKERN VOR SICH?

Vadim Sadovski/Shutterstock: 42/43; Science Photo  
Library: 43; Panther Media/action press: 44

### WERDEN COMPUTER DENKEN KÖNNEN?

Ken Hermann: 46-50

### WIE KAM DAS LEBEN AUF DIE ERDE?

Alex Mustard/Nature Picture Library (NPL): 52/53;  
Nick Garbutt/NPL: 54 o., 54 u. l.; Anup Shah/NPL:

54 u. r., 58 m.; Sylvain Cordier/NPL: 55 o.; Jeff Vanuga/  
NPL: 55 m.; Sascha Vancauwenberg/500px/Getty  
Images: 55 u. l.; John Collett/EyeEm/Getty Images:  
55 u. r.; Claudio Contreras/NPL: 56/57; EyeEm/  
Getty Images: 58 o.; Solvin Zankl: 58 u. l.;  
Doug Gimesy/NPL: 58 u. r.; Pete Oxford/NPL: 59;

Reinhard Dirscherl/Biosphoto: 60/61

### WIE FREI IST UNSER WILLE?

Martin Langer/Visum: 64/65; Ludovic/REA/laif: 66;

Heathcliff O'Malley/Telegraph/Camera Press/laif: 69

### WAS IST DAS WESEN DER ZEIT?

Stephen Wilkes: 70-75, erschienen in dem Buch:  
»Day to Night« (Taschen)

### WAS IST DAS ICH?

Adam Gazzaley, Roger Anguera Singla, Rajat Jain,  
Tim Mullen, Christian Kothe, John Fesenko, Oleg  
Konings and Matt Omernick/University of California/  
NSF: 78/79; Eugenio Marongiu/Cultura/Getty  
Images: 80; Lana Isabella/Moment/Getty Images: 81

### GIBT ES EINE ZWEITE ERDE?

Illustrationen: Stocktrek Images/Getty Images: 82/83;  
Mark Garlick/Science Photo Library/Getty Images:  
85, 86/87, 88/89; Infografiken: Julianne Richter/  
Illuteam: 84, 88; Planeten: Goddard Space Flight  
Center/NASA: 87

### WAS UNTERSCHIEDET DEN MENSCHEN VOM TIER?

Randal Ford: 90-100, erschienen in dem Buch:  
»Animal Kingdom« (Rizzoli)

### GIBT ES DAS NICHTS?

NASA: 102/103, 106/107; JPL-Caltech/NASA: 104

### WARUM TRÄUMEN WIR?

Davis Ayer: 108-113

### WIE ALT KÖNNEN WIR WERDEN?

Westend61/Getty Images (2): 114-115; SensorSpot/  
Getty Images: 116

### WAS IST EIN SCHWARZES LOCH?

Sonoma State University/Aurore Simonnet/Swift/NA-  
SA: 120/121; EHT Collaboration/ESO: 123; Infografiken:  
Rainer Harf für GEOkompakt: 122

### WIE CHAOTISCH IST DIE WELT?

The Asahi Shimbun/Getty Images: 124/125; CHYUN/  
Getty Images: 126/127; Dan Callister/Shutterstock:  
128/129

### WORAUS SIND DIE DINGE GEMACHT?

Jeffrey Hamilton/DigitalVision/Getty Images: 130

### WAS IST DUNKLE MATERIE?

D. Nelson/Illustris Collaboration: 132/133;  
Rainer Harf für GEOkompakt 134/135

### WIE ENTSTEHT MORAL?

Michael Robinson Chavez/The Washington Post/  
Getty Images: 138/139; Noam Galai/Getty Images: 139;  
Daniel Etter/laif: 140; Sergey Ponomarev/laif: 141 o.;  
Jan Grarup/laif: 141 u.; Jonas Bendiksen/  
Magnum Photos/Agentur Focus: 142 o.;  
Jun Michael Park/laif: 142 u.

### WIE ENDET DIE WELT?

Andrew Bret Wallis/Getty Images: 144

GEOkompakt erscheint viermal

pro Jahr! Hier geht's zum Abo:

[geo.de/kompakt-im-abo](http://geo.de/kompakt-im-abo)



# DIE BESTEN SEITEN DER NATUR.



Jetzt im Handel oder  
kostenloses Probeheft unter:  
[www.geo.de/wohlleben-heft](http://www.geo.de/wohlleben-heft)