

Ausgabe 03 | 2025

MAX PLANCK

Forschung

BIOLOGIE
Appgeblüht

ASTRONOMIE
Seltene Erde

COMPUTERWISSENSCHAFT
Avatare auf Augenhöhe



WAS IST SCHÖN?



COLLAGE: SANDRA KOCH/DESIGNERGOLD NACH VORLAGEN VON ADOBE STOCK

Komponiertes Ideal: Einer antiken Legende zufolge soll der Maler Zeuxis Ansichten von fünf Frauen zu Helena, der schönsten von allen, kombiniert haben. Er nahm damit die Arbeitsweise von künstlicher Intelligenz vorweg, die aus online verfügbaren Bildern vermeintlich idealtypische Gesichter und Körper formt, dabei aber vor allem westliche Schönheitsnormen reproduziert.

EDITORIAL

Liebe Leserinnen und liebe Leser,

wie oft verlassen Sie eine Ausstellung oder Aufführung und bewerten das Dargebotene als „schön“? Wie oft missfällt Ihnen etwas, weil es nicht Ihrem Geschmack entspricht? Was wir als schön ansehen, ist höchst individuell, aber nur auf den ersten Blick rein subjektiv.

Dass wir uns nach dem Schönen sehnen, lässt sich durchaus erklären. Geht es nach Platon, liegt darin etwas zutiefst Menschliches. Nicht weniger als das Göttliche scheint unsere Seele finden zu wollen – und vermutet es im Ästhetischen. Doch über wenig lässt sich so trefflich streiten wie über die Kriterien des Schönen.

In unserer aktuellen Ausgabe finden Forschende unterschiedlicher Disziplinen erstaunlich objektive Antworten auf die Frage „Was ist schön?“. So erklärt Forschung aus dem Max-Planck-Institut für empirische Ästhetik und dem Max-Planck-Institut für Psycholinguistik, wann uns Musik berührt und welchen Anteil unsere genetische Disposition daran hat.

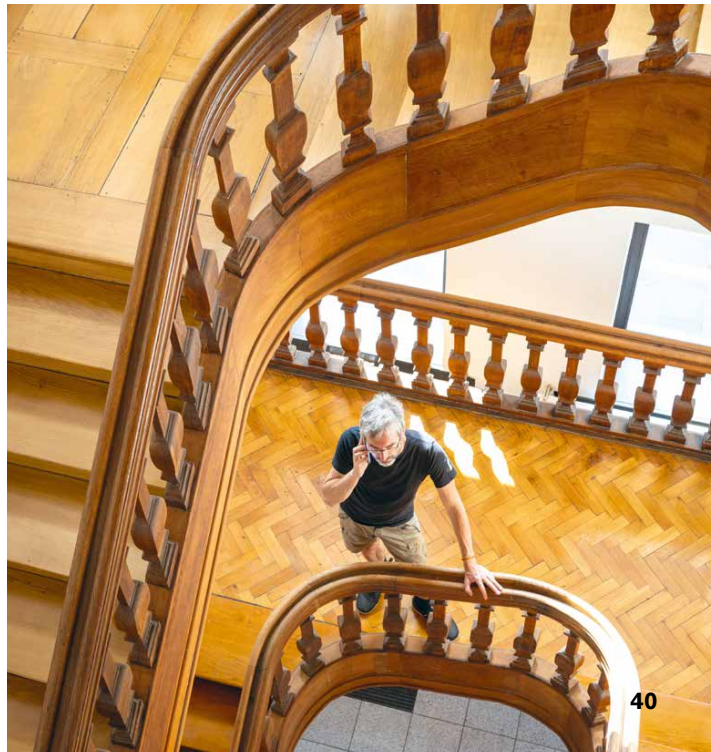
Wie sehr unser Begriff von Schönheit historisch, kulturell und politisch geprägt ist, zeigen Erkenntnisse aus dem Kunsthistorischen Institut in Florenz. In jeder Epoche gibt es Schönheitsideale, die Gesellschaften prägen und oft genug auch politisch instrumentalisiert werden.

Im Tierreich hingegen passen unsere Vorstellungen von Schönheit nur bedingt. Prächtiges Gefieder, bunte Farben oder stattliche Größe sind keine Garantien für eine erfolgreiche Partnerwahl, wie Ornithologen am Max-Planck-Institut für biologische Intelligenz am Beispiel von Zebrafinken und Kampfläufnern zeigen. Bei Letzteren kommen vor allem die cleversten Männchen zum Zug. Manche nutzen dabei einen ästhetischen Trick: Sie sehen so unscheinbar aus, dass sie keinen Verdacht bei den balzenden Beaus erregen.

Eine „schöne“ Lektüre wünscht
Ihre Max-Planck-Redaktion



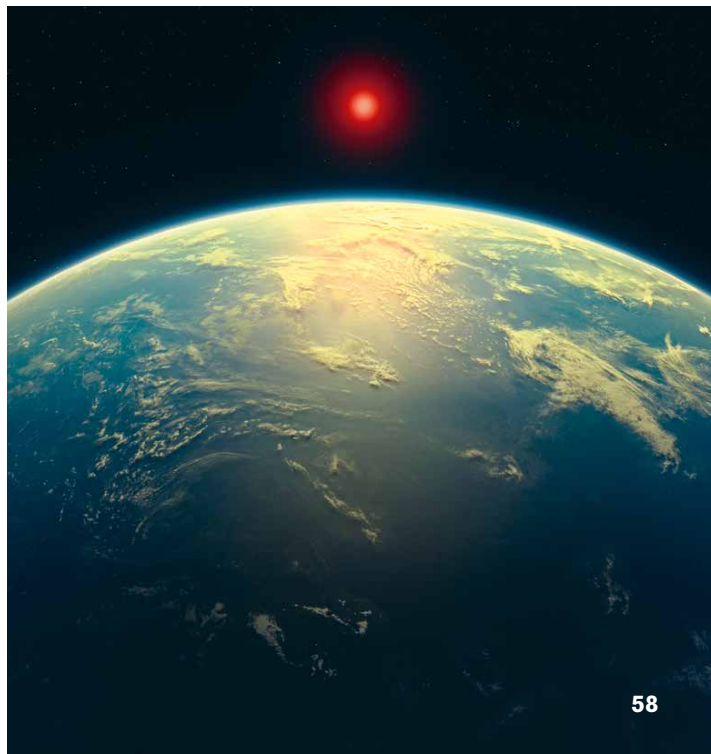
34



40



54



58

34 | BETÖREND

Bei der Partnerwahl der Kampfläufer entscheidet nicht das prächtige Gefieder der Männchen, sondern deren Verhalten.

40 | BEEINDRUCKEND

Seit Dennis Gaitsgory den Breakthrough Prize erhalten hat, erfährt sein Forschungsgebiet mehr Aufmerksamkeit.

54 | BEWEGEND

In der virtuellen Realität des Projekts FutureU treffen Teilnehmende auf ihr künftiges Ich.

58 | BEGEISTERND

Künstlerische Darstellung eines blauen Planeten, der um einen Roten Zwergstern kreist. Ähneln er der Erde?

BILDER: MICHAEL GERBER (LINKS OBEN), CHRISTOPH SEELBACH / MPG (RECHTS OBEN), CHATGPT (LINKS UNTEN), PICTURE ALLIANCE / COVER IMAGES | A. SMITH, N. MADHUSUDHAN (UNIVERSITY OF CAMBRIDGE)/COVER (RECHTS UNTEN)

INHALT

03 | EDITORIAL

06 | ORTE DER FORSCHUNG

LuiKotale Forschungscamp,
Demokratische Republik Kongo

08 | KURZ NOTIERT

14 | ZUR SACHE

Bildung kann das Rentensystem
stabilisieren

20 | INFOGRAFIK

Das Ende der Deutschland AG

IM FOKUS

Was ist schön?

22 | Klingt das gut?

Welche Musik Menschen schön finden, hängt
von verschiedenen Faktoren ab.

28 | Die Macht des Makellosen

Schönheit wird oft politisch instrumentalisiert.

34 | Schön ist anders

Weibchen von Zebrafinken und Kampfläufern
wählen Männchen nicht aufgrund des
Aussehens.

40 | BESUCH BEI

Dennis Gaitsgory

46 | ZWEITER BLICK

WISSEN AUS

48 | Appgeblüht

Eine App hilft bei der Bestimmung von
Pflanzen und liefert Informationen über den
Zustand der Natur.

54 | Die Zukunft im Visier

Erfahrungen in der virtuellen Realität könnten
kriminelles Verhalten verhindern.

58 | Seltene Erde

Das James-Webb-Teleskop hilft bei der Suche
nach Exoplaneten mit einer erdähnlichen
Atmosphäre.

64 | Avatare auf Augenhöhe

Realistische 3D-Computermodelle von
Menschen sollen Videokonferenzen lebendiger
machen.

70 | POST AUS ...

Ouagadougou, Burkina Faso

72 | NEU ERSCHIENEN

74 | FÜNF FRAGEN

Zur Erzeugung von Gold durch
Kernfusion

75 | IMPRESSUM

5

TECHMAX

Kunststoffe im Kreislauf –
vom Abfall zur Ressource

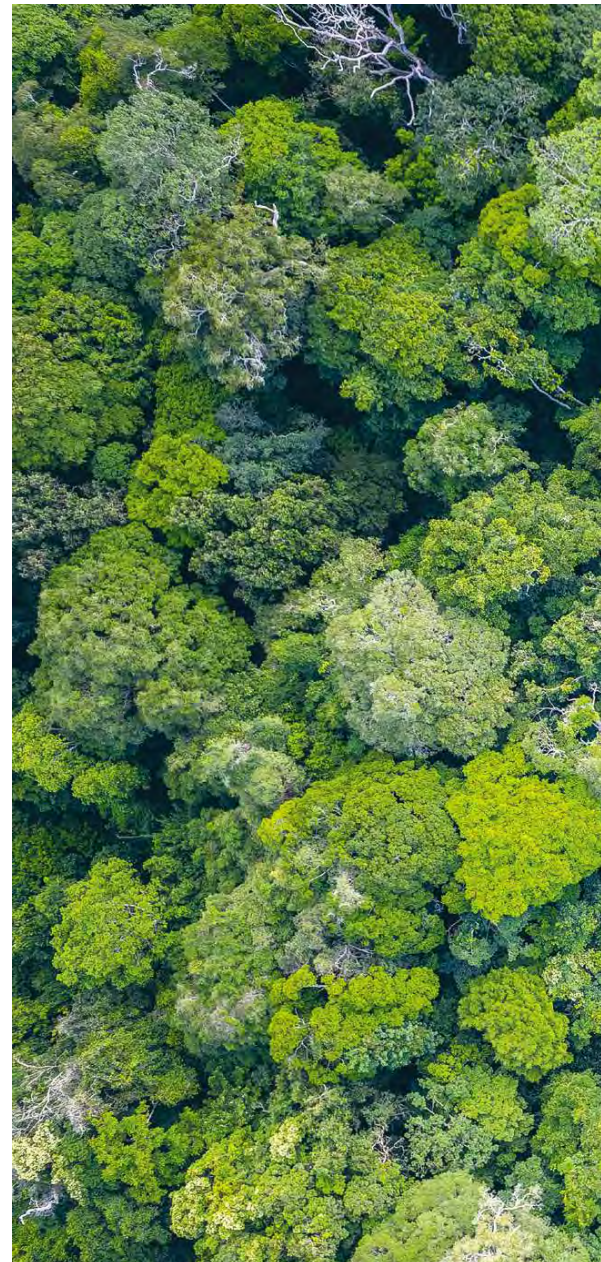


Fast überwuchert von Grün liegt das LuiKotale Forschungscamp wie eine menschenbewohnte Insel im tropischen Regenwald mitten im Reich der Tiere. 300 Kilometer sind es bis zum Fluss Kongo, 30 Kilometer bis zum nächsten Dorf. Zum Camp kommt man nur zu Fuß auf Trampelpfaden durch den Dschungel.

Die Station wurde von der Verhaltensbiologin Barbara Fruth gegründet, die am Max-Planck-Institut für Verhaltensbiologie eine Forschungsgruppe leitet. Zusammen mit ihrem Ehemann Gottfried Hohmann begann sie vor 20 Jahren im Salonga Nationalpark in der Demokratischen Republik Kongo, die Lebensweise wildlebender Bonobo-Gruppen zu erforschen. Das Schutzgebiet besteht zu 95 Prozent aus Wald. Es bedeckt eine Fläche von 33 500 Quadratkilometern und ist damit fast so groß wie Nordrhein-Westfalen.

Das Camp bietet 15 Menschen Platz und wird von den umliegenden Dörfern unterstützt. Von hier aus brechen die Forscher in kleinen Teams zu Bonobo-Gruppen auf, die an die Anwesenheit von Menschen gewöhnt sind. Ohne die Tiere zu stören, beobachten sie deren Verhalten und kombinieren ihre Ergebnisse mit physiologischen, genetischen und ökologischen Analysen. Dabei entstehen auch faszinierende Naturfotografien aus nächster Nähe. Neben den Schimpansen sind Bonobos uns Menschen am ähnlichsten. Die Forschenden wollen herausfinden, warum unsere nächsten Verwandten ein für Menschenaffen ungewöhnlich friedfertiges Sozialleben entwickelt haben, in dem die Weibchen den Ton angeben.

*DSCHUNDEL-
CAMP*



ORTE DER FORSCHUNG



7

FOTO: CHRISTIAN ZIEGLER

NEUES MAX PLANCK CENTER IN SÜDKOREA

Das Max Planck – Yonsei IBS Center for Deep Tissue Nanoscale Control hat im August 2025 seine Arbeit aufgenommen. In dem zweiten Max Planck Center mit einem südkoreanischen Partner kooperieren Forschende des Max-Planck-Instituts für medizinische Forschung mit seinen in Heilbronn angesiedelten Abteilungen, des Max-Planck-Instituts für Neurobiologie des Verhaltens – caesar in Bonn und des Institute for Basic Science an der Yonsei University in Seoul. Ihr Ziel ist es, zelluläre Pro-

zesse tief im Inneren menschlichen Gewebes sichtbar zu machen und gezielt zu beeinflussen, ohne das Gewebe dabei zu schädigen. Da Licht nur wenige Millimeter tief ins Gewebe eindringt, setzen die Forschenden bei der Bildgebung auf alternative Techniken wie Magnetfelder oder Ultraschall. Zudem wollen sie nachweisen, dass sich das Immun- und Nervensystem von außen gezielt steuern lässt, um neue therapeutische Möglichkeiten zu erschließen.

www.mpg.de/25113091

AUSGEZEICHNET*

EDELGARD
BULMAHN



Die SPD-Politikerin und ehemalige Bundesministerin für Bildung und Forschung wurde mit der Harnack-Medaille der Max-Planck-Gesellschaft für ihre Verdienste um die Wissenschaft in Deutschland geehrt. In ihrer Amtszeit als Ministerin von 1998 bis 2005 schob sie einige bis heute wirkende Reformen an. Unter anderem schuf sie die Exzellenzinitiative, die deutsche Universitäten international wettbewerbsfähiger gemacht hat, und den Pakt für Forschung und Innovation, der den außeruniversitären Forschungseinrichtungen kontinuierliche Etatsteigerungen zusichert.

FOTO: DAVID AUSSERHOFER / MPG



FOTO: FABIAN VOGL / MPG

Proxima Fusion entwickelt ein Fusionskraftwerk auf Basis des Stellarator-Konzepts. Dabei schließt ein Magnetfeld in Form einer gewundenen Teigschleife das Plasma (pink) ein, in dem die Kernfusion stattfindet.

REKORDFINANZIERUNG FÜR PROXIMA FUSION

Das Münchner Start-up Proxima Fusion, eine Ausgründung aus dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, hat 130 Millionen Euro Kapital eingeworben. Damit will das Unternehmen die Entwicklung des weltweit ersten Fusionskraftwerks auf Stellarator-Basis finanzieren, das in den 2030er-Jahren entstehen soll. Die Investition stellt die bislang größte private Finanzierungsrunde im Bereich der Fusions-

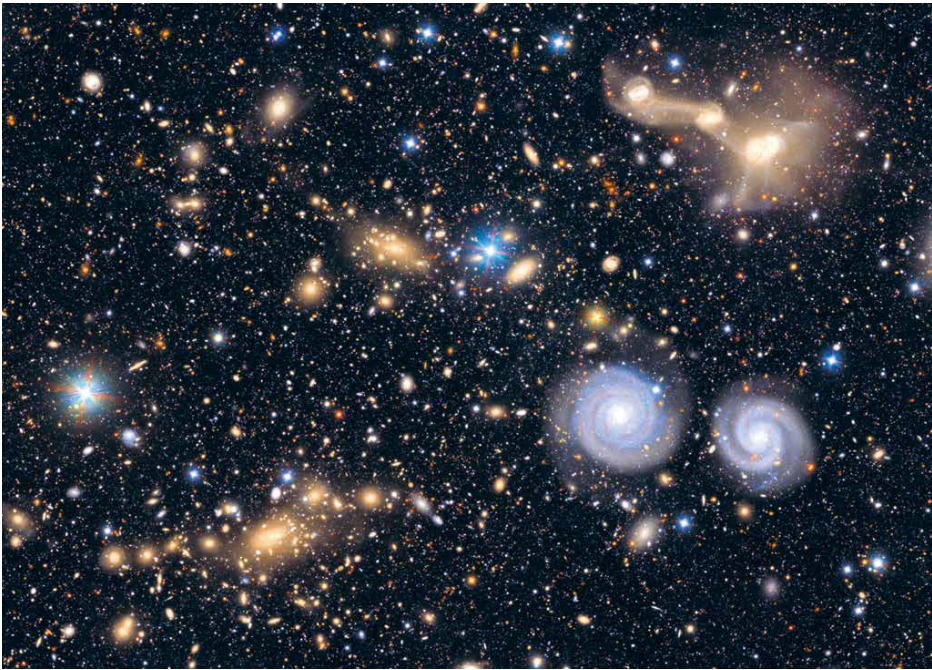
energie in Europa dar. Insgesamt verfügt Proxima Fusion nun über mehr als 185 Millionen Euro an öffentlichen und privaten Mitteln. Der Stellarator ist neben dem Tokamak eines der beiden Magnet einschlussverfahren in der Kernfusion, bei denen der plasmaförmige Brennstoff in Magnetfeldern eingeschlossen wird. Ein Stellarator ist komplizierter zu konstruieren als ein Tokamak, wie etwa der im Bau

befindliche internationale Forschungsreaktor Iter, hat aber im Betrieb Vorteile. Proxima Fusion baut auf den Ergebnissen des Wendelstein-7-X-Stellarator-Experiments am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik auf und setzt bei der Entwicklung eines Fusionsreaktors auf ausgeklügelte Simulationen und eine innovative Supraleitertechnik.

www.mpg.de/24881733

FOTO: MPI FÜR BIOCHEMIE

BILD: NSF-DOE VERA C. RUBIN OBSERVATORY



Ausschnitt aus einer deutlich größeren Aufnahme, die das Vera C. Rubin Observatorium vom Virgo-Galaxienhaufen in Richtung des Sternbilds Jungfrau gemacht hat. Es zeigt unter anderem verschmelzende Galaxien (oben rechts) und Spiralgalaxien, die an die Milchstraße erinnern (unten rechts).

DIE GRÖSSTE KAMERA FÜRS ALL

Das Vera C. Rubin Observatorium in Chile hat seine ersten Teleskopaufnahmen veröffentlicht. Die Bilder zeigen eine enorme Diversität an Objekten, darunter zahlreiche Galaxien unterschiedlichster Formen und Farben. In der hier gezeigten Aufnahme, die aus über 1100 überlappenden Einzelbildern entstand, verstecken sich 10 Millionen Galaxien. Durch sein weites Gesichtsfeld, das 40 Mal so groß ist wie der Vollmond, kann das Vera-C.-Rubin-Teleskop in zehn Jahren den gesamten einsehbaren Südhimmel ablichten. Dabei hilft dem 8,4-Meter-Teleskop die größte Digitalkamera der Welt. Mit 3200 Megapixeln ist ein einzelnes Bild so groß, dass es 400 Ultra-HD-Bildschirme – eine Fläche so groß wie ein Basketballfeld – bräuchte, um alle Details auf einmal darzustellen. Forschende der Max-Planck-Gesellschaft werden in den Daten Milliarden Galaxien jenseits der Milchstraße kartieren und untersuchen, welchen Einfluss dunkle Materie und dunkle Energie auf deren Verteilung haben. Auch schnell ablaufende Prozesse werden dem Teleskop nicht entgehen, etwa, wenn ein Stern von einem supermassereichen schwarzen Loch im Inneren einer weit entfernten Galaxie zerrissen wird.

www.mpg.de/24886437

ZWEI ERC ADVANCED GRANTS FÜR MAX PLANCK

Eva Schinnerer, Leiterin einer Arbeitsgruppe am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg, und Miltos Tsiantis, Direktor am Max-Planck-Institut für Pflanzenzüchtungsforschung in Köln, haben jeweils einen ERC Advanced Grant eingeworben. Eva Schinnerer erhält die Förderung, die rund 2,5 Millionen Euro beträgt, für das Projekt Galaxy Centers: Understanding Star Formation in Extreme Environments. Darin geht es um die

Frage, wie Sterne in den dichten, gasreichen Zentren von Spiralgalaxien entstehen – Regionen, die lange als eher untypische Umgebungen für Sternentstehung galten. Das Forschungsvorhaben Clonal von Miltos Tsiantis verfolgt das Ziel, die Grundlagen der klonalen Fortpflanzung durch Wurzel- ausläuferbildung aufzuklären, ein bislang wenig erforschter Mechanismus pflanzlicher Vermehrung.

www.mpg.de/24914485



Kapuzineraffe auf Jicarón Island mit entführtem Brüllaffenbaby. Die Männchen auf der Insel haben gelernt, harte Nahrung mit Steinen zu knacken, und gelten als besonders innovativ.

ENTFÜHRT AUS LANGEWEILE

Seit 2017 dokumentieren Forschende des Max-Planck-Instituts für Verhaltensbiologie mit bewegungsgesteuerten Kameras auf einer Insel vor der Küste Panamas das Verhalten von Weißgesicht-Kapuzineraffen. 2022 entdeckte eine Doktorandin beim Durchsehen der Aufnahmen einen Kapuzineraffen, der ein junges Brüllaffenbaby auf seinem Rücken trug. Sie durchforstete daraufhin Zehntausende Bilder und Videos aus diesem Zeitraum und entdeckte, dass ein junges Männchen vier verschiedene Brüllaffenbabys mit sich herumtrug. Innerhalb von fünf Monaten hatten dann vier weitere Männchen diese Eigenart übernommen. Über ein Jahr lang trugen die Tiere elf Brüllaffen jeweils

bis zu neun Tage auf ihrem Rücken. Aus den Aufnahmen lässt sich schließen, dass die Männchen die Brüllaffenbabys deren Eltern weggenommen hatten: Die Eltern riefen aus Bäumen in der Nähe nach ihren Jungen, und wenn die Babys wegliefen, holte der Entführer sie wieder zurück. Wahrscheinlich sind die Babys schlussendlich verhungert, weil sie keine Milch zu trinken bekommen haben. Einen Nutzen scheinen die Kapuzineraffen von den Entführungen nicht zu haben. Da Kapuzineraffen auf der Insel kaum Feinde und Konkurrenten haben, könnte das Verhalten stattdessen aus Langeweile entstanden sein und sich dann in der Gruppe verbreitet haben.

www.mpg.de/24696859

EMPATHIE ENTSTEHT IM KLEINHIRN

Wir können nicht sehen, was andere Menschen denken. Für unser Zusammenleben ist es aber unerlässlich, dass wir uns vorstellen können, was andere wissen und vorhaben. Wir brauchen deshalb die Fähigkeit, uns in unsere Mitmenschen hineinzusetzen. Diese Fähigkeit entsteht im Alter zwischen drei und fünf Jahren. Getestet wird sie unter anderem mit Experimenten, in denen Probanden wissen, wo sich ein Gegenstand befindet, und erkennen sollen, dass eine andere Person ihn an einem falschen Ort sucht. Forschende des Max-Planck-Instituts für Kognitions- und Neurowissenschaften haben Kindern Filmszenen mit solchen Situationen gezeigt und währenddessen ihre Gehirnaktivität mit MRT gemessen. Die Aufnahmen zeigen, dass Gebiete des Kleinhirns dabei besonders aktiv waren –

einer Hirnregion, die vor allem für ihre Rolle bei Bewegungen, aber neuerdings auch für Sprache und andere geistige Fähigkeiten bekannt ist. Die Forschenden haben auch festgestellt, dass das Kleinhirn von Kindern mehr Informationen an die Großhirnrinde weitergibt. Bei Erwachsenen verläuft der Informationsfluss dann in umgekehrter Richtung. Das Kleinhirn könnte also in der Kindheit die Hirnrinde in die Lage versetzen, den mentalen Zustand eines anderen Menschen zu entschlüsseln. Die Ergebnisse decken sich mit dem Befund, dass Verletzungen des Kleinhirns im frühen Kindesalter zu dauerhaften Veränderungen des Sozialverhaltens wie Autismus-Spektrum-Störungen oder Schizophrenie führen können.

www.mpg.de/24925574

10 LIDER STATT LIEDER

Wer sich in lauter Umgebung unterhalten möchte, muss schreien. Viele Vögel machen es genauso: Sie passen die Lautstärke ihres Gesangs an den Lärmpegel der Umgebung an. Forschenden des Max-Planck-Instituts für biologische Intelligenz zufolge verfolgt die an schnell fließenden Bächen lebende Wasseramsel eine weitere Strategie. Anstatt gegen das Rauschen des Wassers anzusingen, um ihr Revier zu verteidigen oder Partner anzulocken, setzt der Vogel manchmal auf optische Signale: Er blinzelt mit den Augen. Die strahlend weißen Lider heben sich deutlich vom braunen Gefieder ab und sind daher gut zu erkennen. Die Forschenden haben beobachtet, dass Wasseramseln öfter mit ihren Augenlidern blinzeln, wenn Artgenossen in der Nähe sind. Die Vögel, die am häufigsten blinzeln, singen zudem leiser. Wasseramseln, die alleine sind, machen es genau umgekehrt. Das Blinzeln dient folglich der Kommunikation mit Artgenossen. Was sie damit signalisieren, ist noch unklar.

www.mpg.de/25213580



FOTO: KEVIN DUCLOS

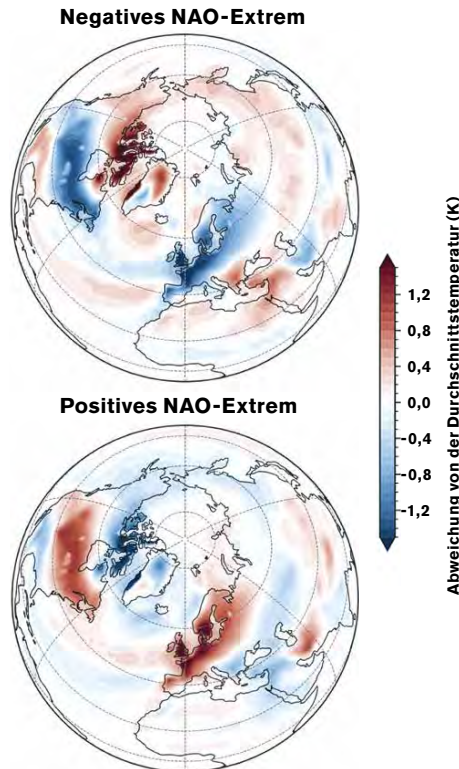
Wasseramseln leben oft an rauschenden Gewässern.

DON'T BREXIT MY HEART

Paare im Vereinigten Königreich, die unterschiedlichen Parteien anhängen, trennen sich häufiger als solche mit denselben politischen Überzeugungen. Das zeigt eine Analyse von Langzeitdaten aus über 30 Jahren, die Forschende der Universität Padua und des Max-Planck-Instituts für demografische Forschung ausgewertet haben. Demnach ist das Trennungsrisiko um 38 Prozent höher, wenn die Partner unterschiedliche politische Ansichten vertreten und daher unterschiedliche Parteien bevorzugen. Besonders deutlich war der Effekt bei Meinungsverschiedenheiten zum Brexit: Paare mit unterschiedlichen Haltungen dazu trennten sich öfter als Paare, die sich beim Brexit einig waren. Die Studie macht deutlich, dass politische Polarisierung nicht nur die Gesellschaft spaltet, sondern auch Partnerschaften belastet, und dass gemeinsame Grundwerte die Stabilität einer Beziehung fördern können.

www.mpg.de/24865509

GRAFIK: GCO NACH QUAN LIU, MPI FÜR METEOROLOGIE



Geteiltes Europa: Bei einem negativen Extrem in der Nordatlantischen Oszillation (NOA), das heißt einem schwachen Luftdruckgefälle im Nordatlantik, kommt es zu starken Niederschlägen in Nordwesteuropa und Hitze im Süden. Bei einem positiven NOA-Extrem, also einem starken Luftdruckunterschied, ergibt sich eine umgekehrte Wetterlage.

DÜRRE UND FLUT IN EUROPA

Extreme Hitze und Dürre in einem Teil Europas, ergiebige Regenfälle in einem anderen – diese Situation gab es 2023, und sie wird künftig im Sommer wohl häufiger auftreten. Denn mit dem menschengemachten Klimawandel werden Extreme in der Nordatlantischen Oszillation (NOA) häufiger und ausgeprägter. Als NOA bezeichnen Meteorologen Schwankungen im Luftdruckgefälle über dem Nordatlantik zwischen den Azoren und Island. Wenn das Druckgefälle im Sommer über dem Nordatlantik wie 2023 sehr schwach ist, strömt kühle und feuchte Luft nach Nordwesteuropa, warme Luft in den Mittelmeerraum. Wenn das Druckgefälle extrem stark ist, kommt es zur umgekehrten Situation: Hitze in Nordwesteuropa und niedrigere Temperaturen in Südeuropa.

www.mpg.de/24909008

11

92 000

Jahre bräuchte ein Kind, um Sprache zu lernen, wenn es dabei wie ChatGPT vorgeht.

HIRN SCHLÄGT KI

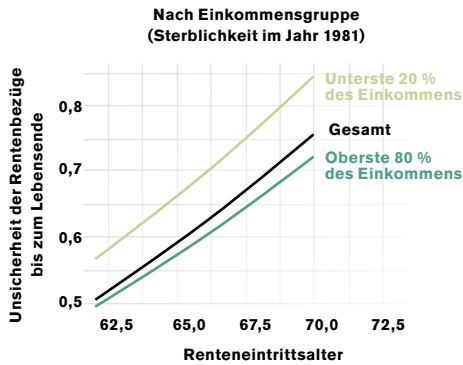
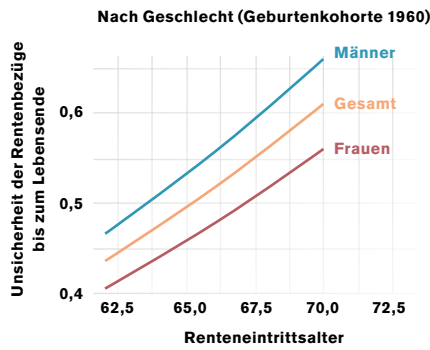
Kleinkinder lernen Sprache deutlich schneller als KI-Systeme. Während Maschinen große Datenmengen in Sekunden verarbeiten, nutzen Kinder ihre sozialen, kognitiven und motorischen Fähigkeiten, um Sprache aktiv und in kurzer Zeit zu meistern. Dabei sind sie der KI in Sachen Spracherwerb haushoch überlegen. Wenn ein Kind Sprache auf dieselbe Art wie

ChatGPT lernen würde, bräuchte es dafür 92.000 Jahre. Ein Team vom Max-Planck-Institut für Psycholinguistik und dem ESRC LuCiD Centre in Großbritannien hat nun ein Modell vorgestellt, das diesen Vorsprung erklärt. Entscheidend sei nicht die Menge an Informationen, sondern die Art, wie Kinder daraus lernen: Sie binden alle Sinne ein,

kombinieren Sehen, Hören, Tasten, Riechen und Schmecken und schaffen durch Erkundung ihrer Umgebung ständig neue Lerngelegenheiten. Diese Erkenntnisse könnten nicht nur helfen, die kindliche Sprachentwicklung besser zu verstehen, sondern auch Impulse für die KI-Forschung und Entwicklung geben.

www.mpg.de/250203en (in Englisch)

LOHNT ES SICH, LÄNGER ZU ARBEITEN?



In vielen Ländern steigt die monatliche Rentenzahlung, wenn Menschen später in Rente gehen. Ob sich das lohnt, hat ein Forschungsteam des Max-Planck-Instituts für demografische Forschung, der Stanford University und der Huazhong University of Science and Technology anhand von Daten aus den USA untersucht. Dabei haben die Forschenden berechnet, wie sich die Unsicherheit der eigenen Lebenserwartung auf den optimalen Rentenbeginn auswirkt, gemessen an der Gesamtsumme, die ein Mensch bis zum Lebensende als Rentenzahlung erhält. Demnach ist ein Renteneintritt mit dem in den USA geltenden Mindestalter von 62 ökonomisch rational, weil bei einem späteren

Rentenbeginn die Unsicherheit, ob man dadurch bis zum Lebensende insgesamt mehr Rente bezieht, steigt. Vor allem für Männer und Menschen mit niedrigem Einkommen lohnt es sich, bereits mit 62 Jahren in Rente zu gehen, denn bei ihnen ist besonders unsicher, ob sie lang genug leben, um von einer längeren Lebensarbeitszeit zu profitieren. Bei einem frühen Renteneintritt können sie so zumindest die bis dahin erworbenen Ansprüche nutzen. Die Forschenden empfehlen, die Unsicherheiten der Lebensdauer stärker in der Rentenpolitik zu berücksichtigen, um existierende Ungleichheiten nicht zu verschärfen.

www.mpg.de/24946616

Je später Menschen in Rente gehen, desto unsicherer wird, ob sie bis zum Lebensende insgesamt mehr Rente erhalten als bei einem früheren Renteneintritt – besonders bei Männern und Personen mit niedrigem Einkommen. Nur bei einem langen Leben lohnt es sich, später in Rente zu gehen.

Wasserstoffversprödung führt nicht nur wie hier bei Stählen zu Rissen, sondern auch bei Aluminiumlegierungen.



BILD: CEPHOTO, UWE ARANAS

WIDERSTANDSFÄHIG GEGEN WASSERSTOFF

Ein neuartiges Material könnte den Aufbau der Wasserstoffwirtschaft erleichtern. Wasserstoff soll künftig in vielen Bereichen fossile Rohstoffe ersetzen. Er ist allerdings schwierig zu transportieren und zu speichern, weil er viele Legierungen spröde macht. Aluminiumlegierungen sind wegen ihres geringen Gewichts zwar prinzipiell gut geeignet für Wasserstoffanwendungen. Solche, die robust gegenüber dem Gas sind, waren bislang jedoch zu weich für viele

Einsatzgebiete. Ein internationales Forschungsteam – darunter Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Nachhaltige Materialien – hat einer Legierung aus Aluminium und Magnesium nun etwas Scandium, ein Metall der Seltenen Erden, beigemischt und die Legierung mit Wärme behandelt. Dadurch erzeugten die Forschenden zwei Arten von Nanopartikeln in dem Material. Die einen bestehen komplett aus Aluminium und Scandium, wodurch

die Legierung fester wird. Die anderen besitzen zudem eine Hülle, die zusätzlich Magnesium enthält; sie fangen Wasserstoff ein und vermindern die Versprödungsgefahr. Durch das neue Legierungsdesign verbesserten die Forschenden auch die Eigenschaften anderer Aluminiumlegierungen. Außerdem testeten sie das Herstellungsverfahren erfolgreich unter industrieähnlichen Bedingungen.

www.mpg.de/24646977

MACHTBALANCE

In vielen Kulturen haben Männer dominierende Stellungen. Gelegentlich wird dies als Erbe unserer Primaten-Vergangenheit angesehen. Forschende des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig widerlegen nun diese Sicht und zeigen, dass das Verhältnis der Geschlechter bei Affen und Menschenaffen vor allem von den Lebensumständen abhängt. Sie haben Begegnungen zwischen Männchen und Weibchen von über 120 Arten analysiert und festgestellt, dass nur selten ein Geschlecht das andere eindeutig dominiert. Männliche Dominanz herrschte in 25 von 151 Populationen vor, weibliche Dominanz in 16. In 70 Prozent der untersuchten Populationen waren sich die Geschlechter mehr oder weniger ebenbürtig. Weibliche Macht haben die Forschenden vor allem bei Arten beobachtet, deren Weibchen monogam sind, so groß werden wie die Männchen oder hauptsächlich in Bäumen nach Nahrung suchen. Unter diesen Umständen haben die Weibchen offenbar mehr Entscheidungsfreiheit, ob sie sich mit einem bestimmten Männchen paaren wollen oder nicht. Auch bei einzelgängerischen oder paarlebenden Arten dominieren oft die weiblichen Tiere. Bei Arten dagegen, die vor-

wiegend auf dem Boden leben, deren Männchen sich mit mehreren Weibchen paaren und die physisch stärker sind, dominieren häufig die Männchen. Der Mensch passt weder in die weibliche noch in die männliche Dominanzgruppe. Er ist viel eher mit Arten vergleichbar, bei denen beide Geschlechter Macht erlangen können. www.mpg.de/24989962



FOTO: CHRISTINA FICHTEL

Männlicher (links) und weiblicher Rotstirn-Maki. In der Gruppenhierarchie stehen die Weibchen dieser Art über den Männchen.

13

Die planetenbildende Scheibe um den Stern V883 Orionis (künstlerische Darstellung) enthält sehr wahrscheinlich komplexe organische Moleküle wie Vorläufer von Aminosäuren (kleines Bild).

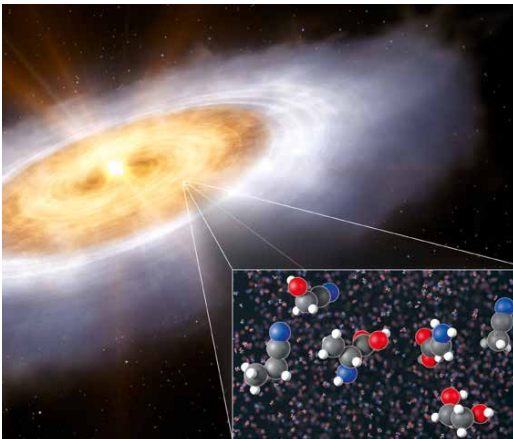


BILD: ESO/L. CALÇADA/T. MÜLLER (MPIA/HDA) (CC BY 4.0)

EVOLUTION BEGINNT IM ALL

Forschende des Max-Planck-Instituts für Astronomie haben im jungen Sternensystem V883 Orionis komplexe organische Moleküle entdeckt. Darunter sind mit hoher Wahrscheinlichkeit erstmals Ethylenglykol und Glykolnitril in einer planetenbildenden Scheibe nachgewiesen worden. Diese Verbindungen gelten als Vorstufen von Zuckern und Aminosäuren und könnten wichtige Bausteine des Lebens darstellen. Die Beobachtungen mit dem Radioteleskopnetzwerk Alma deuten darauf hin, dass solche

präbiotischen Moleküle nicht erst mit den Planeten in Staub- und Gasscheiben um junge Sterne entstehen, sondern Phasen des Sterntods und der Sternengeburt überleben können. Die Bausteine des Lebens, die die Evolution einläuten, sollten also bereits im Universum verbreitet sein. Demnach könnte auch Leben im All universeller sein als bisher angenommen. Ob sich Leben auf Planeten bildet, hängt dann vor allem von den Bedingungen auf den Planeten ab. www.mpg.de/24449239

BILDUNG KANN DAS RENTENSYSTEM STABILISIEREN

Um den Folgen des demografischen Wandels zu begegnen, wurde seitens der Politik bisher vor allem darauf gesetzt, die Geburtenrate zu steigern. Leider ohne nennenswerten Erfolg. Auch die Forschung hat bisher keine Antwort auf die Frage, wie man Menschen dazu bewegen kann, mehr Kinder zu bekommen. Es gibt aber eine andere Stellschraube, mit der man die negativen Auswirkungen des demografischen Wandels auf die Renten begrenzen kann: eine bessere Bildung.

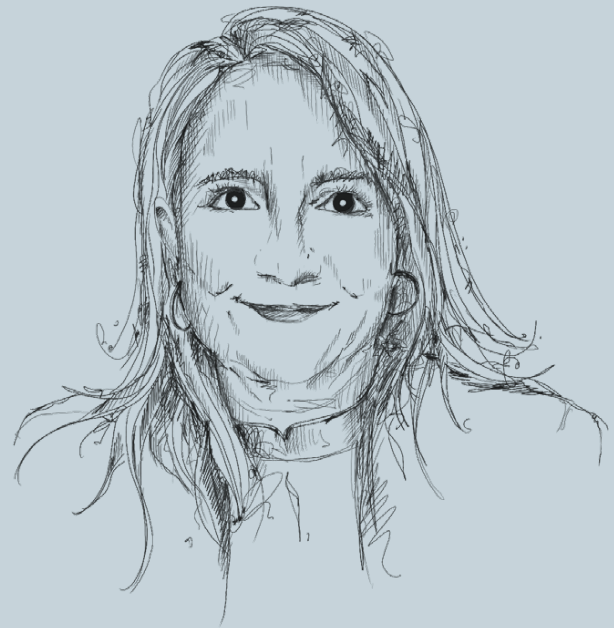
Reichskanzler Otto von Bismarck, der Erfinder der Rentenversicherung, hätte sich sicherlich nicht träumen lassen, dass die Funktionsfähigkeit der gesetzlichen Rentenversicherung eines Tages maßgeblich davon abhängig sein könnte, wie lange Kinder die Schulbank drücken. Zu Bismarcks Zeiten, als die Industrialisierung im vollen Gange war, brauchte man vor allem viele Arbeitskräfte für die vielen neuen Fabriken. Ob diese Arbeitskräfte ein Handwerk oder lesen und schreiben gelernt hatten, war unwichtig. Das „Invaliditäts- und Alterssicherungsgesetz“ von 1889 war sehr simpel: Der Beitragssatz zur neuen Rentenversicherung betrug rund zwei Prozent, die Beiträge zahlten wie heute Arbeitgeber und Arbeitnehmer zu gleichen Teilen. Das Gesetz sollte mehr die Erwerbsunfähigkeit als die Rente absichern. Denn eine Rente erhielt in Deutschland nur, wer älter als 70 Jahre war – ein biblisches Alter in einer Zeit, in der die durchschnittliche Lebenserwartung bei nicht einmal 50 Jahren lag. →

ZUR SACHE

ANNICK EIMER &
MIKKO MYRSKYLÄ



Mikko Myrskylä ist Direktor am Max-Planck-Institut für demografische Forschung in Rostock. Außerdem ist er Professor für Soziale Datenwissenschaft an der Universität Helsinki sowie Co-Direktor des Max Planck – University of Helsinki Center for Social Inequalities in Population Health. Zuvor war er Professor für Demografie an der London School of Economics. Zu seinen aktuellen Forschungsschwerpunkten gehört das ERC Synergy-Projekt BIOSFER, das die Ursachen niedriger Fertilität in modernen Gesellschaften untersucht. Seine Forschung konzentriert sich auf die Gesundheit der Bevölkerung, Fertilitätsanalysen und demografische Prognosen.



Annick Eimer arbeitet als Journalistin für Zeitschriften, Zeitungen, Online-Medien und Radio. Ihre Schwerpunkthemen sind Bildung, Forschungs- und Hochschulpolitik und Ökologie. Außerdem ist sie Redakteurin der *Demografischen Forschung aus Erster Hand*.

DIE BEITRAGS- SÄTZE LIEGEN MITTLERWEILE BEI 18,6 PROZENT

Dieses kapitalgedeckte Modell, bei dem die Beiträge der Versicherten angespart werden, wurde in den 1950er-Jahren schrittweise in ein umlagefinanziertes Modell umgewandelt, bei dem die erwerbstätige Generation für die Renten der vorhergehenden Generation aufkommt. Genau diese Rechnung geht heute nicht mehr auf, da die Zahl der Menschen im erwerbsfähigen Alter abnimmt und die Zahl der Menschen im Ruhestand wächst. Grund dafür ist der demografische Wandel: Die Geburtenraten sinken, und die Lebenserwartung steigt. Für die Rentenkasse bedeutet das, dass immer weniger Beitragszahler immer mehr Rentner versorgen müssen. Und anders als zu Bismarcks Zeiten wird heute erwartet, dass man mit der Rente den Lebensunterhalt bestreiten kann. Deswegen sind die Beitragssätze in den letzten Jahrzehnten immer weiter gestiegen, liegen aktuell bei 18,6 Prozent. Absehbar ist, dass auch das nicht reichen wird. Politische Vertreterinnen und Vertreter – jüngst Bundeswirtschaftsministerin Katherina Reiche und der Wirtschaftsminister Martin Werding – bringen daher immer wieder ein höheres Renteneintrittsalter in die Diskussion ein.

Vom demografischen Wandel sind alle europäischen Länder betroffen, in unterschiedlichem Ausmaß. Und alle versuchen, den Folgen politisch zu begegnen. In Deutschland versucht man zum Beispiel, die „stille Reserve“ zu aktivieren: Mütter. Sie sollen mehr Zeit in die Erwerbsarbeit stecken. Dafür wurde unter anderem seit 2004 die Kinderbetreuung massiv ausgebaut. Die Maßnahmen waren durchaus erfolgreich. So ist die Erwerbstätigenquote von Müttern von 60 Prozent im Jahr 2005 auf 69 Prozent im Jahr 2022 gestiegen. Es wurden zudem Anreize geschaffen, damit ältere Menschen länger arbeiten. Außerdem sollten viele Maßnahmen Menschen dazu bringen, mehr Kinder zu bekommen. Dazu zählen finanzielle Anreize wie Kindergeld, Elterngeld und steuerliche Vergünstigungen. Aber auch mehr Kinderbetreuungseinrichtungen und eine familiengerechte Arbeitswelt. Trotzdem lag die Geburtenziffer in Deutschland 2024 bei 1,35 Kindern pro Frau. In anderen europäischen Ländern, die die Geburtenrate mit ähnlichen Maßnahmen steigern wollten, sieht es nicht besser aus. So liegen die Geburtenziffern in Schweden, Norwegen, Dänemark und Finnland allesamt unter 1,5 – Tendenz sinkend.

Abgesehen davon, dass es fragwürdig ist, Menschen dazu zu drängen, Kinder zu bekommen, muss man festhalten, dass alle Anstrengungen, die Geburtenziffer zu erhöhen, allenfalls kurzfristig funktionierten. Das könnte auch daran liegen, dass in Gesellschaften, in denen Familien bereits gut unterstützt werden, diese Unterstützung als selbstverständlich angesehen wird und sie deswegen langfristig an Wirksamkeit verliert. In Deutschland haben wir genau das erlebt: Die Familienpolitik hat ab 2010 zu einem kurzfristigen Anstieg der Geburten geführt, seit 2022 gehen sie aber massiv zurück. Wir müssen uns also an den Gedanken gewöhnen, dass wir in einer alternden Gesellschaft leben, und Strategien entwickeln, damit

umzugehen. Es ist essenziell, dass der Generationenvertrag nicht aufgekündigt wird, sprich: Wir brauchen ein funktionierendes Rentensystem, das die Erwerbsgeneration nicht überlastet und die Rentnergeneration absichert.

Erstaunlich bei der allgegenwärtigen Diskussion ist, dass eine mögliche Lösung bisher kaum Beachtung gefunden hat: Investitionen in Bildung. Bildung ist der Schlüssel für den Wohlstand des Einzelnen und der Gesellschaft. Ein hoher Bildungsgrad der Bevölkerung ist ein wichtiger, wenn nicht der wichtigste Faktor für das Wachstum von Volkswirtschaften. Wirtschaftswachstum wird eher vom Humanvermögen, also von den wirtschaftlich nutzbaren Fähigkeiten, Kenntnissen und Verhaltensweisen der Erwerbsbevölkerung bestimmt. Die Altersstruktur der Bevölkerung ist weniger wichtig – so lautet die Grundannahme, die hinter dem Vorschlag steckt, mit Investitionen in Bildung das Rentensystem zu stabilisieren. Mit einem ökonomischen Blickwinkel kann man die Idee so formulieren: Weniger kann mehr sein. Denn anders als zu Bismarcks Zeiten, in der die Unternehmen vor allem viele Menschen für ihre Fabriken brauchten, benötigt die Wirtschaft heute vor allem gut ausgebildete Menschen, die Innovationen schaffen. Theoretische Überlegungen legen nahe, dass Investitionen in Humanvermögen auch zur Stabilisierung des Rentensystems beitragen können.

KLEINE GEBURTS- JAHRGÄNGE KÖNNEN SOGAR VORTEILE HABEN

Mit solchen Investitionen könnte man sich den sogenannten Easterlin-Effekt zunutze machen, den der US-Ökonom Richard Easterlin in den 1980er-Jahren beschrieben hat. Dahinter steckt die Annahme, dass kleinere Geburtsjahrgänge Vorteile haben können: Für jedes Kind stehen in diesen Kohorten mehr öffentliche Mittel zur Verfügung, etwa für Bildung. Außerdem haben sie auf dem Arbeitsmarkt bessere Chancen auf gut bezahlte Jobs, weil weniger gleichaltrige Bewerber um die Stellen konkurrieren. Davon würden in einem umlagefinanzierten Rentensystem sowohl die kleinere, jüngere, arbeitende Generation als auch die zahlenmäßig größere, ältere Generation der Rentner profitieren. Denn je besser die arbeitende Generation verdient, desto mehr Geld landet in der Rentenkasse. Gut ausgebildete Menschen sind für das Rentensystem aber gleich in mehrfacher Hinsicht gut: Sie verdienen nicht nur mehr, sondern sind auch seltener krank, weniger von Arbeitslosigkeit betroffen, und sie gehen im Schnitt später in Rente.

Dass der Easterlin-Effekt ohne großen Aufwand nutzbar wäre, hat eine Datensimulation aus Finnland gezeigt. Dabei wurde untersucht, wie sich verschiedene Größen, die das Rentensystem maßgeblich bestimmen, verändern, wenn man von unterschiedlichen Geburtenziffern und unterschiedlich hohen Investitionen in Bildung ausgeht. Das Ergebnis: Bei einer sinkenden Geburtenrate müssten die Ausgaben für Bildung auf dem derzeitigen Niveau gehalten werden, damit der Easterlin-Effekt greift. →

DIE ZAHL GERING QUALIFIZIERTER JUGENDLICHER WÄCHST IN DEUTSCHLAND

Die höheren Pro-Kopf-Ausgaben für Bildung reichen aus, um die negativen Auswirkungen einer schrumpfenden Erwerbsbevölkerung auf die Rentenbelastung größtenteils auszugleichen.

Die Daten aus Finnland lassen sich durchaus auf andere Staaten wie Deutschland übertragen. Finnland und Deutschland haben zwar unterschiedliche Schul- und Rentensysteme, dennoch ist zu erwarten, dass das Ergebnis für Deutschland ähnlich ausfällt. Denn beide Systeme sind zum größten Teil staatlich finanziert. Das macht es überhaupt erst möglich, an der Stellschraube Bildung zu drehen. Vor allem aber besteht in beiden Bildungssystemen noch viel Entwicklungspotenzial. Ein Schwachpunkt im deutschen Schulsystem ist zum Beispiel die wachsende Zahl der gering qualifizierten jungen Erwachsenen, also derjenigen ohne Abitur, Fachhochschulreife und Berufsausbildung. Ihr Anteil liegt in Deutschland mit 16 Prozent über dem OECD-Durchschnitt von 14 Prozent. In den vergangenen Jahren ist der OECD-Schnitt sogar gesunken, nicht aber in Deutschland. Hierzulande ist der Anteil seit 2016 von 13 Prozent um drei Prozentpunkte gestiegen. Finnland kämpft dagegen mit einer geringen Studierendenquote.

Laut OECD haben nur 41 Prozent der 25- bis 34-jährigen Finnen einen Hochschulabschluss. Das Land liegt damit deutlich unter dem OECD-Durchschnitt von 47 Prozent. Auch wenn es paradox klingt – diese Schwächen könnten sogar von Vorteil sein. Denn sie zeigen, dass es noch viel Luft nach oben gibt.

Wenn ein Land seine Bildungsausgaben trotz sinkender Anzahl von Kindern stabilisiert, stellt sich die Frage, in welchen Bereich der Bildung die zusätzlichen Mittel fließen sollten. Die Forschung hat gezeigt: Grundsätzlich sind Investitionen in alle Bereiche der Bildung gut. Sie hat aber auch gezeigt, dass sich Investitionen in die frühkindliche Bildung besonders auszahlen.

Frühkindliche Bildung ist wichtig, um die Entwicklungsunterschiede zwischen Kindern aus sozial begünstigten und benachteiligten Familien zu verringern, bevor sie in die Grundschule kommen. Deutschland hat die Ausgaben für die frühkindliche Bildung und Erziehung mit dem Ausbau der Kindertagesstätten in den letzten zwei Jahrzehnten extrem gesteigert. Trotz dieser Investitionen sank die Teilnahmequote der drei- bis fünfjährigen Kinder, weil diese Gruppe größer geworden ist und gleichzeitig seit 2013 jedes Kind in Deutschland einen Anspruch auf einen Kita-Platz hat. Auch wenn sich die Betreuungskrise in einigen Großstädten zu legen scheint, fehlen derzeit bundesweit rund 125 000 Fachkräfte in der frühkindlichen Bildung und etwa 384 000 Betreuungsplätze. Diese Unterbesetzung führt einerseits zu einer Überlastung des vorhandenen Personals, andererseits beeinträchtigt sie die Qualität der Betreuung und Bildung der Kinder.

Hinzu kommt, dass bei Kindern aus einkommensschwachen Familien, bei denen die Förderung am meisten Gewinn bringen würde, seltener in eine Kindertagesstätte gehen als Kinder aus einkommensstarken Familien. Die Gründe sind laut einer Studie des Bundesinstituts für Bevölkerungsforschung (BiB) vielfältig. Potenziell benachteiligte Familien berichten deutlich häufiger von Schwierigkeiten bei der Kita-Suche und bemängeln öfter fehlende wohnortnahe Bildungs- und Betreuungsmöglichkeiten sowie unpassende Öffnungszeiten. Es lohnt sich, an diesen Schwachstellen zu arbeiten, auch im Sinne der Renten.

Aber auch in den weiterführenden Schulen und in den Hochschulen gibt es Investitionsbedarfe: Fast 2,9 Millionen Menschen zwischen 20 und 34 Jahren haben in Deutschland keinen Berufsabschluss – also weder eine abgeschlossene Ausbildung noch einen Studienabschluss. Das entspricht etwa 19 Prozent der Altersgruppe. Hier ist es wichtig, nachzusteuern, zum Beispiel mit umfassenden Berufsorientierungsangeboten in den Schulen, um den Übergang ins Erwerbsleben sicherzustellen.

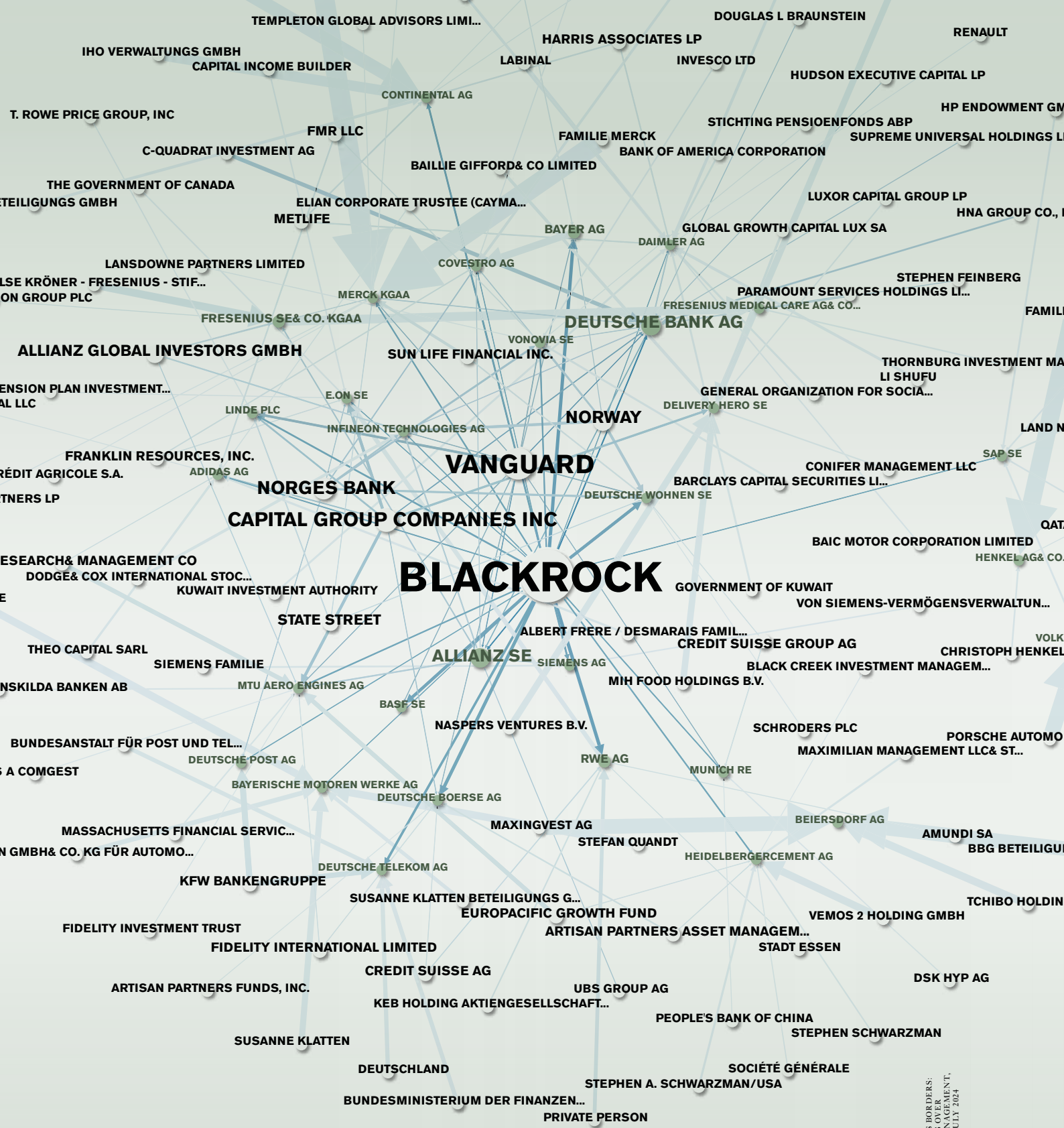
Beide Beispiele zeigen, dass das System ganzheitlich betrachtet werden muss. Investitionen in frühkindliche Bildung statten Kinder zwar mit den Fähigkeiten aus, die ihnen eine erfolgreiche schulische Karriere ermöglichen. Wenn aber im späteren Bildungsweg der Flaschenhals eng wird, zahlen sich diese Investitionen nicht aus.

19

DIE QUALITÄT DER BILDUNG IST ENTSCHEIDEND

Wichtig ist auch zu berücksichtigen, dass es nicht nur darum geht, mehr Zeit in der Schule zu verbringen. Es geht um die Qualität. Die Bildungsforschung hat klar gezeigt, dass vor allem die Vermittlung von Basiskompetenzen wie Lesen, Schreiben und Rechnen, aber auch Sprachentwicklung, Wahrnehmung und Konzentration wichtig sind. Schulen brauchen mehr Handlungsfreiheit zum Beispiel in der Schul- und Unterrichtsorganisation, hier kann der Föderalismus Reformen erschweren. Sich für eine größere Chancengerechtigkeit einzusetzen ist deswegen wichtig, weil es gerade bei den sozial benachteiligten Kindern enorme Entwicklungspotenziale gibt. Dafür müssen beispielsweise Schulen in sozioökonomisch schwachen Gegenden gezielt unterstützt werden, benachteiligte Kinder durch frühkindliche Bildungsangebote, Nachhilfe- und Mentoring-Programme gefördert und ihre sprachliche Entwicklung früh getestet und unterstützt werden.

Gerade für Länder wie Deutschland, in denen Bildung vor allem in der öffentlichen Hand liegt, bietet die Steuerung über Bildungsinvestitionen eine sehr gute Möglichkeit, den Folgen des demografischen Wandels zu begegnen. Tatsächlich scheint das geschilderte Szenario durchaus auch politisch umsetzbar, weil es keine zusätzlichen Mittel erfordert. Die Politik darf jedoch auch in Zeiten leerer Kassen auf keinen Fall an der Bildung sparen und muss das Geld sinnvoll investieren. ←



BLACKROCK STATT DEUTSCHE BANK

Das Geflecht der Unternehmensbeteiligungen rechts zeigt für 1996 die 100 größten Unternehmen in Deutschland. Das Beteiligungsgeflecht oben um die Dax-30-Unternehmen (grün, Stand 2020), darunter auch investierende wie Banken, berücksichtigt Beteiligungen über drei Prozent. Die Pfeilstärke entspricht in beiden Grafiken der Höhe der Anteile. Mit Beteiligungen von rund fünf Prozent sind Investoren in vielen Unternehmen bereits größter Anteilseigner. Die Größe der Punkte eines Vermögensverwalters und die Farbintensität der von ihm ausgehenden Pfeile entspricht der Zahl der Unternehmensbeteiligungen.

2020

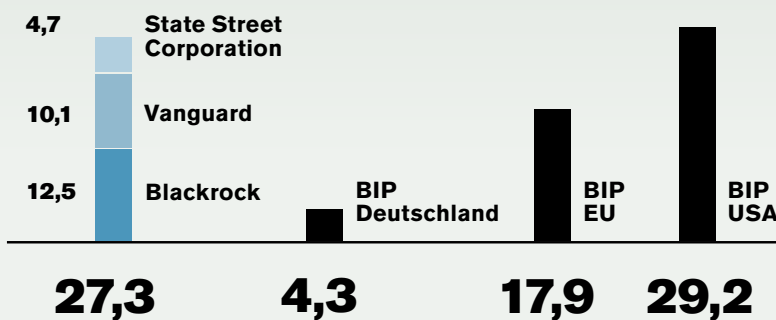
- Dax-30-Unternehmen
- Investoren und Holdings

GRAFIK: GCO NACH DUSTIN VOSS, SECTORS VERSUS BORDERS: INTEREST GROUPS AND STRATEGIES OVER CORPORATE GOVERNANCE, SOCIO-ECONOMIC REVIEW, VOLUME 22, ISSUE 3, JULY 2024.

DAS ENDE DER DEUTSCHLAND AG

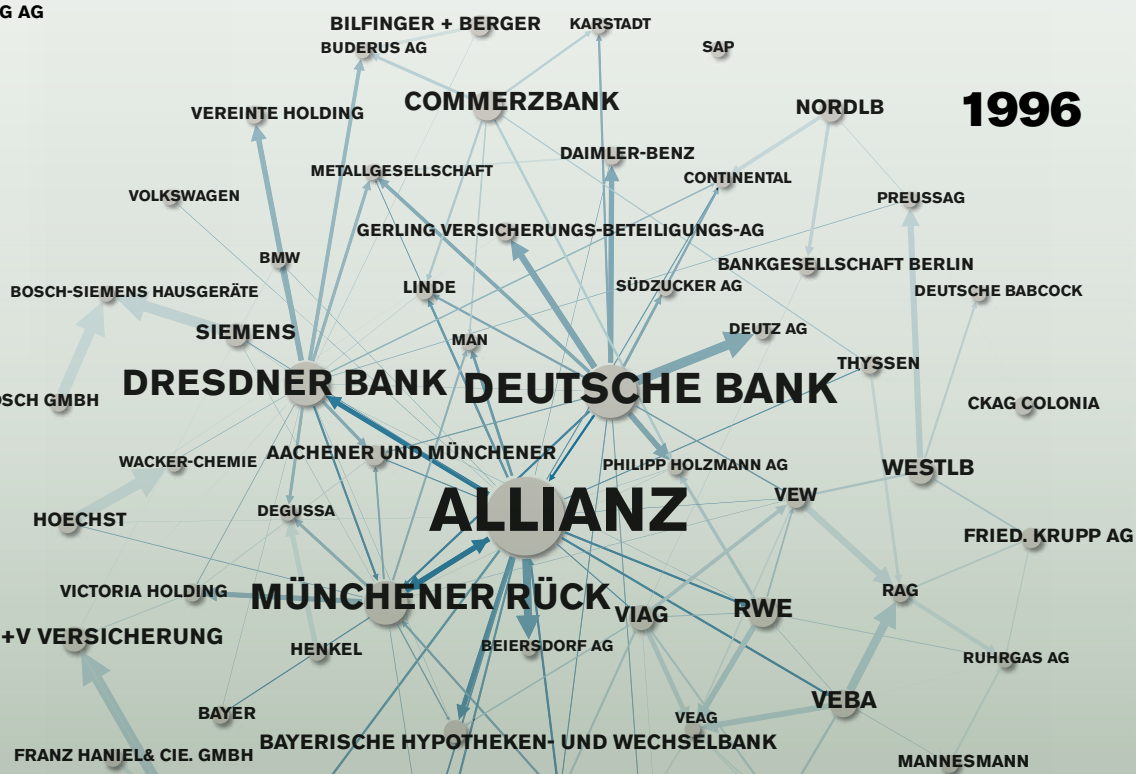
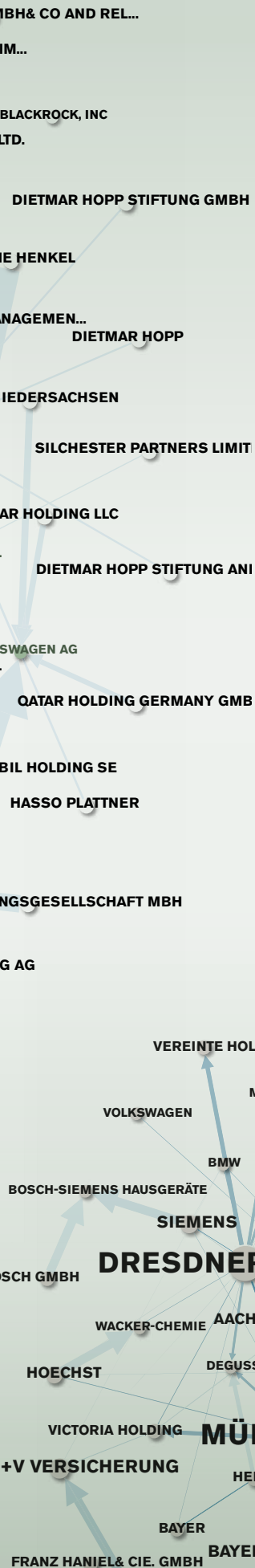
Anfang der 2000er-Jahre erleichterte die damalige rot-grüne Bundesregierung auf Druck der EU-Kommission und zur Stärkung des deutschen Finanzmarktes den Zugang für ausländische Investoren. Seit der Finanzkrise 2008 sind Vermögensverwalter wie Blackrock und Vanguard zu den größten Anteilseignern vieler deutscher Firmen aufgestiegen, indem sie vornehmlich börsengehandelte Fonds (ETFs) anbieten. ETFs sind zusammengesetzt wie ein Wertpapierindex, beispielsweise der Dax, und versuchen, dessen Entwicklung abzubilden. Deshalb zählen auch solche Vermögensverwalter zu den passiven Investoren. Für sie ist der langfristige Erfolg eines Unternehmens unerheblich: Schwächtelt ein Unternehmen und fällt etwa aus dem Dax heraus, verkauft der Vermögensverwalter automatisch seine Anteile und ersetzt sie durch solche des Dax-Nachrücker.

DIE GROSSEN DREI



in Billionen US-\$

Blackrock, Vanguard und die State Street Corporation sind global die größten Investoren und heißen in der Sozioökonomie Big Three. Gemeinsam verwalten sie 2025 ein Kapital von 27,3 Billionen US-Dollar (zum Vergleich das Bruttoinlandsprodukt (BIP) Deutschlands, der EU und der USA 2024). Sie gelten damit als „too big to fail“, da die Insolvenz eines dieser Unternehmen die Kapitalmärkte erschüttern und die Altersvorsorge vieler Menschen, die in etlichen Ländern aus Fondsanteilen besteht, gefährden würde.



Mehr zum Thema und die vollständigen Grafiken finden Sie hier: www.mpg.de/passive-investoren



IM FOKUS

WAS IST SCHÖN?

22 | Klingt das gut?

28 | Die Macht des Makellosen

34 | Schön ist anders

Schönheit verstehen: Was unser Gegenüber und wir als schön empfinden, ist höchst individuell und mitunter Grund für Streit. Ob in der Musik, in der bildenden Kunst oder im Tierreich: Forschende wie Melanie Wald-Fuhrmann nähern sich dem Begriff in verschiedenen Disziplinen und finden dabei recht objektive Kriterien für ein subjektives Empfinden.



FOTO: KATRIN BINNER / MPG

KLINGT DAS GUT?

TEXT: JULIA MEYER-HERMANN

23

Manche Melodien berühren uns, manche nicht. Ist das reine Geschmackssache? Geprägt durch Erfahrung und Kultur? Oder liegt das Schöne in der Musik tiefer, vielleicht sogar in unseren Genen? Forschende verschiedener Max-Planck-Institute nähern sich dem Phänomen musikalischer Schönheit aus ganz unterschiedlichen Perspektiven.

Was haben Stefan Raab und Theodor W. Adorno gemeinsam? Auf den ersten Blick nicht viel. Der eine ist Showmaster, Musikproduzent, ESC-Teilnehmer – ein Mann des Mainstreams. Der andere einer der bedeutendsten Philosophen der Nachkriegszeit, scharfer Kritiker der Kulturindustrie und Mahner gegen gedankenlosen Musikgenuss. Und doch haben sie, jeder auf seine Weise, am selben Rätsel gearbeitet: Welche Musik empfinden Menschen als schön – und warum? Worauf reagieren sie? Ist das eine Frage des Geschmacks? Oder gibt es objektivierbare Muster im Erleben von Musik?

Jedes Jahr beim Eurovision Song Contest lässt sich beobachten, wie Songwriter und Produzenten versuchen, den Geschmack von Millionen zu treffen. Sie tüfteln an Akkorden, Beats, Melodien. Sie rechnen mit Punkten und Quoten. Und doch: Immer wieder liegen Jury und Publikum auseinander, Favoriten fallen durch, Underdogs gewinnen. Der Massengeschmack entzieht sich der Planung – genauso wie das ästhetische Erleben sich scheinbar einer rein rationalen Analyse entzieht.

Lässt sich Schönheit in der Musik vermessen?

- 24 Auch Theodor W. Adorno stellte sich diese Frage – allerdings aus kulturkritischer Perspektive. In seinem Radiovortrag „Schöne Stellen“ von 1965 analysierte er ein verbreitetes Verhalten von Hörerinnen und Hörern: Viele Menschen lauschen Musik nicht als zusammenhängender Struktur, sondern warten gezielt auf einzelne Höhepunkte – auf eine Wendung, einen Gänsehautmoment, eine sogenannte schöne Stelle. Für Adorno war diese Erwartungshaltung Ausdruck einer konsumistischen Hörweise, in der Musik auf affektive Reize reduziert wird, statt in ihrer formalen Entwicklung ernst genommen zu werden.

Er war nicht der Erste, der sich über solche Phänomene Gedanken machte. Die Frage, was Menschen als schön empfinden, beschäftigt Philosophie, Kunst und Psychologie seit Jahrhunderten. Schon Immanuel Kant sprach von einem „interesselosen Wohlgefallen“, das den Anspruch auf Allgemeingültigkeit erhebt. Für ihn lag musikalische Schönheit nicht einfach in der persönlichen Vorliebe, sondern in der Fähigkeit, überindividuelle ästhetische Urteile zu fällen. Gustav Theodor Fechner, ein Mitbegründer der experimentellen Psychologie, wiederum legte im 19. Jahrhundert den Grundstein für eine empirische Ästhetik, die genau diese Fragen zum Gegenstand wissenschaftlicher Forschung machte. Sein Anliegen: Schönheit nicht nur philosophisch zu deuten, sondern auch erfahrbar und messbar zu machen – durch systematische Befragungen, Reizvergleiche, Reaktionsanalysen.



FOTO: KATRIN BINNER / MPG (OBEN); ADOBESTOCK (UNTEN)



Analyse des Empfindens: Physiologische Messinstrumente zeichnen auf, wie eine Mitarbeiterin am Max-Planck-Institut für empirische Ästhetik auf Musik reagiert (ganz oben). Zeigt eine Komposition Dynamikwechsel, also Wechsel zwischen laut und leise, oder auffällige Akkorde, wurde sie als „schön“ empfunden.

Neue interdisziplinäre Ansätze, etwa in der Neuroästhetik oder Musikpsychologie, kombinieren subjektive Erlebnisse mit physiologischen Daten und computergestützter Stimmanalyse – nicht um Schönheit zu entzaubern, sondern besser zu verstehen. Am Max-Planck-Institut für empirische Ästhetik in Frankfurt am Main erforscht ein Team unter der Leitung der Musikwissenschaftlerin und Institutsdirektorin Melanie Wald-Fuhrmann, was Menschen beim Hören als schön empfinden. In einer quantitativen Studie mit 33 Teilnehmenden ging das Forschungsteam der Frage nach, welche musikalischen Passagen als besonders berührend oder ästhetisch eindrucksvoll erlebt werden – und warum.

Angeregt wurde Wald-Fuhrmann auch durch eben jenen Radiovortrag „Schöne Stellen“ von Adorno. „Er kritisiert zwar die Vorstellung, dass man Musik auf einzelne schöne Stellen reduzieren kann“, sagt sie. „Aber das Interessante ist: Er macht es selbst. Er spielt Passagen ein, analysiert sie, verweilt bei ihnen. Und genau diese Idee fand ich spannend – dass man bestimmte Stellen in einem Werk noch einmal als besonders schön empfindet, nicht nur das Ganze.“ Die Redewendung „schöne Stelle“ hat Wald-Fuhrmann daraufhin auch kulturgeschichtlich zurückverfolgt: „Die Formulierung lässt sich bis ins 18. Jahrhundert nachweisen – nicht nur für Musik, sondern auch für andere Kunstformen wie Romane oder Theaterstücke. Immer dann, wenn es um längere Werke geht, wird nicht nur ein Gesamturteil gefällt, sondern es wird über bestimmte Stellen gesprochen, die besonders berühren oder aufhorchen lassen.“

In ihrer Studie verzichtete sie bewusst auf eine engere Definition. „In der Alltagssprache ist von schönen Stellen die Rede – also sind wir davon ausgegangen, dass Menschen ein eigenes Verständnis davon haben.“ Ihr Team setzte dabei bewusst auf individuelle Auswahl statt vorgegebener Stücke. Die Teilnehmenden brachten Musikstücke mit, in denen sie persönlich „schöne Stellen“ erlebten – also kurze Passagen, die sie emotional besonders berührten. Darunter fanden sich klassische Werke wie Schuberts *Winterreise* ebenso wie Musik von Coldplay oder französische Chansons.

Während des gesamten Hörens maßen Sensoren verschiedene physiologische Reaktionen, die nachweislich mit dem emotionalen Erleben zusammenhängen. Im Anschluss berichteten die Teilnehmenden mithilfe von Ratingskalen, wie sie die einzelnen Passagen erlebten – unter den Aspekten Schönheit, Anspannung, Energie, Wohlgefühl, Inte-

resse und Empathie, Lächeln, Weinen oder Gänsehaut. Außerdem beschrieben sie, was manche Stellen für sie besonders machte – etwa ein plötzlicher Dynamikwechsel, ein markanter Akkord oder ein besonders eindringlicher gesanglicher Ausdruck. Diese vielfältigen Einschätzungen bildeten die Grundlage für sogenannte Clusteranalysen. Ziel dieser Auswertung war es, typische Muster im Erleben musikalischer Schönheit zu erkennen: Gibt es wiederkehrende Kombinationen von emotionalen Reaktionen, die sich körperlichen Reaktionsmustern zuordnen lassen? Und wenn ja – wie hängen sie mit musikalischen Merkmalen wie Tempo, Harmonik, Dichte oder Instrumentierung zusammen?

Schönheit im Kontext

Die Analyse ergab, dass sich das subjektive Erleben musikalischer Schönheit in drei Subtypen gliedern ließ: ruhige Ergriffenheit, freudige Erregung und gespannte Erwartung. Diese Subtypen unterschieden sich sowohl in den physiologischen Reaktionen – als auch in den musikalischen Merkmalen. „Oft lässt sich die Schönheit einer Stelle nur nachvollziehen, wenn man sie im Kontext hört – vor allem zu dem, was davor war“, so Wald-Fuhrmann. Erst im Unterschied zur vorangehenden musikalischen Bewegung entfalte sich ihre Wirkung. „Musik ist eine Zeitkunst, und jeder Moment lebt aus dem Bezug zu dem, was davor und danach kommt – das wurde in den Beschreibungen sehr deutlich.“

Zwar variierte die ausgewählte Musik stark, doch bestimmte Wirkprinzipien tauchten immer wieder auf. Ganz egal, ob es sich um einen Song von Whitney Houston wie *I Will Always Love You* handelte oder um eine Arie wie *Nessun dorma* aus Puccinis *Turandot*: Plötzliche Dynamikwechsel oder auffällige Akkorde wurden als besonders schön empfunden. Häufig wurden auch Stellen genannt, in denen nach einem längeren instrumentalen Vorspiel erstmals die Stimme einsetzte.

Ein weiteres Kriterium für den Musikgenuss ist die Klangfarbe der Stimme. Muss sie glatt und gefällig sein – oder darf sie auch irritieren oder herausfordern? Beim diesjährigen Eurovision Song Contest 2025 gewann JJ mit dem

Song *Wasted Love* für Österreich – ein Countertenor, dessen Stimmfarbe für viele Ohren ungewohnt war. Seine Stimme sorgte für Gesprächsstoff, wurde gefeiert, irritierte, bewegte. Und wirft die Frage auf: Was genau macht eine Stimme schön? →

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Musikalische Schönheit zeigt sich in drei emotionalen Mustern: ruhige Ergriffenheit, freudige Erregung und gespannte Erwartung. „Schöne Stellen“ stehen meist im Kontrast zur musikalischen Umgebung und lösen emotionale sowie körperliche Reaktionen aus.

Zwillingsstudien zeigen: Etwa 54 Prozent der Unterschiede im Musikerleben – also wie stark Menschen auf Musik emotional, körperlich oder sozial reagieren – gehen auf genetische Einflüsse zurück.

Ob eine Stimme als schön empfunden wird, hängt weniger von messbaren Klangmerkmalen ab als von subjektiver Wahrnehmung.

Diese Frage stand im Zentrum einer weiteren Studie. Bisher dominierten Studien zur Attraktivität von gesprochenen Stimmen, etwa solche, die zeigen, dass tiefere Stimmlagen bei Männern und höhere bei Frauen als angenehmer empfunden werden. Dagegen fehlte bislang systematische Forschung zur ästhetischen Wahrnehmung von Singstimmen. Genau hier setzt die Forschung von Camila Bruder an, wissenschaftliche Mitarbeiterin am Max-Planck-Institut für empirische Ästhetik in Frankfurt am Main. Gemeinsam mit Senior Researcher Pauline Larrouy-Maestri wollte sie herausfinden, was unsere Vorliebe für bestimmte Gesangsstimmen prägt: der objektiv messbare Klang – oder das, was wir subjektiv darin wahrnehmen?

Klangfarbe ist nicht alles

Für das Experiment ließen die Forscherinnen 16 professionelle Sängerinnen zwei bekannte Melodien (*Don't Worry Be Happy* und *Over the Rainbow*) insgesamt 96 Mal a cappella einsingen – ohne Text, nur auf dem Vokal „u“. Diese Aufnahmen wurden im Rahmen eines Online-Experiments zunächst 326 US-amerikanischen Teilnehmenden vorgespielt, die angaben, wie sehr ihnen jede Stimme gefiel – auf einer Skala von 1 („gar nicht“) bis 7 („sehr“). Bewertet wurde dabei nicht die gesangliche Leistung im engeren Sinn, sondern das subjektive Gefallen.

In einem zweiten Schritt wurden die Aufnahmen in einem Laborexperiment mit 42 deutschen Personen noch einmal untersucht – diesmal ergänzend zur Online-Bewertung durch eine detaillierte Analyse der akustischen Eigenschaften, etwa Tonhöhenpräzision, Vibrato oder wie gehaucht die Stimme klingt. Gleichzeitig wurde erfasst, wie die Stimmen subjektiv wahrgenommen wurden. Das Ergebnis: Die Vorlieben unterschieden sich stark von Person zu Person. Fast jede Stimme wurde von einigen geliebt, aber von anderen kaum geschätzt. Nur eine Sängerin schnitt bei nahezu allen Befragten gut ab.

Insgesamt zeigte sich: Rund 43 Prozent der Bewertungen ließen sich durch die subjektive Einschätzung stimmlicher Eigenschaften erklären – darunter Begriffe wie „exakt“, „hell“, „dunkel“, „schräg“ oder „übermäßig gehaucht“. Das heißt: Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer beschrieben, wie sie den Stimmklang wahrnahmen – unabhängig davon, ob sich diese Eindrücke auch objektiv messen ließen. Tatsächlich spielten objektive Merkmale wie der Frequenzverlauf – also wie exakt eine Sängerin die Tonhöhe hielt – oder die Lautstärke eine weit geringere Rolle. Entscheidend war vor allem, wie jemand eine Stimme interpretierte – nicht, was sie akustisch messbar leistete. Diese Dominanz subjektiver Wahrnehmung spiegelte sich auch in der großen Spannbreite individueller Urteile wider.

Schönheit lag hier also nicht im Klang, sondern eindeutig im Ohr der Hörenden. Doch wie entsteht dieser persönliche Höreindruck? Warum berühren uns bestimmte Stimmen – oder Musik im Allgemeinen –, während sie bei anderen keinerlei Wirkung entfalten? Ist das alles nur Geschmackssache, eine Frage der kulturellen Bildung oder auch der genetischen Veranlagung?

Mit diesen Fragen beschäftigt sich eine aktuelle Studie zweier Max-Planck-Institute und des Karolinska Instituts in Stockholm. Das Forschungsteam um Giacomo Bignardi, Doktorand am Max-Planck-Institut für Psycholinguistik im niederländischen Nijmegen, untersuchte gemeinsam mit Forschenden des Max-Planck-Instituts für empirische Ästhetik, warum Menschen Musik als belohnend erleben – und ob sich diese Unterschiede genetisch erklären lassen.

Dabei ging es nicht um ästhetische Urteile im engeren Sinn, sondern um das Konzept der „Music Reward Sensitivity“ – also darum, wie stark Menschen Musik als belohnend empfinden: Löst sie ein intensives Gefühl aus? Will man sich dazu bewegen? Fühlt man sich dadurch anderen näher? Diese drei Reaktionsweisen – emotional, körperlich und sozial – beschreiben unterschiedliche Arten, wie Musik unser Belohnungssystem im Gehirn ansprechen kann.

„Wir wollten herausfinden, warum Musik für manche Menschen ein so intensives Erlebnis ist – und für andere kaum eine Rolle spielt“, sagt Giacomo Bignardi. Manche Menschen bekommen bei Musik Gänsehaut, weil ihr Gehirn besonders stark auf emotionale Reize reagiert. Andere spüren einen Bewegungsdrang, weil musikalische Rhythmen bei ihnen besonders leicht motorische Impulse auslösen. Wieder andere erleben Musik als soziale Brücke – sie fühlen sich durch bestimmte Lieder mit anderen Menschen oder Erinnerungen verbunden. „All diese Reaktionen entstehen durch unterschiedliche, teils angeborene Verschaltungen im Gehirn.“ Einige Menschen sprechen auf Musik jedoch kaum an. Wie kommt es dazu? Anhand der Daten von über 9000 Zwillingspaaren aus dem schwedischen „Twin Registry“ hat das internationale Forscherteam untersucht, ob sich bestimmte Reaktionen

**„Schönheit ist ein Erleben
– und nicht primär eine
Eigenschaft.“**

MELANIE WALD-FUHRMANN

auf Musik genetisch erklären lassen. Der zentrale Befund: Etwa 54 Prozent der Unterschiede im Musikerleben – also wie stark Menschen auf Musik emotional, körperlich oder sozial reagieren – gehen auf genetische Einflüsse zurück. Nur der Rest lässt sich durch Umwelteinflüsse, Erziehung oder individuelle Erfahrungen er-

klären. Dabei sprechen die Forschenden von „genetischen Pfaden“, also von Wegen, über die unsere Gene bestimmte Hirnreaktionen beeinflussen können. Diese Pfade betreffen teilweise das Belohnungssystem im Gehirn – also jene Bereiche, die mit positiven Gefühlen und Motivation zu tun haben. „Es gibt also nicht das eine ‚Musikgen‘, sondern sehr viele, die dafür sorgen, dass wir uns darin unterscheiden, wie unser Gehirn auf musikalische Reize reagiert – ob wir eher emotional, körperlich oder sozial darauf ansprechen“, sagt Mitautorin Miriam Mosing vom Institut für empirische Ästhetik.

Musikwissenschaftlerin Melanie Wald-Fuhrmann erforscht, wie Menschen Musik empfinden.

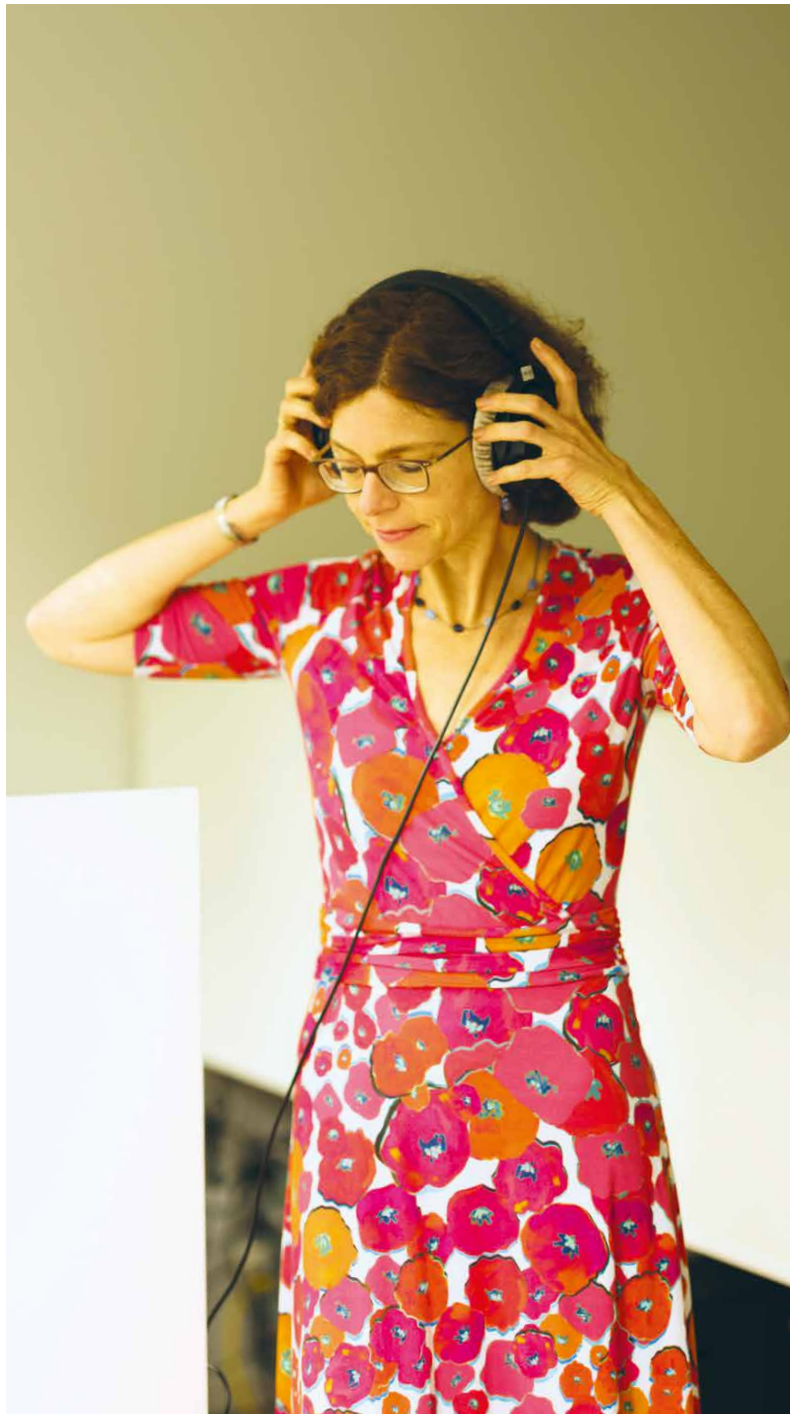


FOTO: KATRIN BINNER / MPG

Gerade weil diese Reaktionen so verschieden ausfallen, könnte das auch erklären, warum die Schönheit von Musik so unterschiedlich erlebt wird: Was die eine Person tief berührt, bleibt für die andere bedeutungslos – nicht aus mangelndem Geschmack, sondern möglicherweise aufgrund genetischer Prädispositionen. Doch was heißt das für unser Verständnis von musikalischer Schönheit? Die Studien von Camila Bruder, Giacomo Bignardi und Melanie Wald-Fuhrmann zeigen: Das Schönheitserleben von Musik ist nicht beliebig – aber auch nicht einheitlich. Emotionale Reaktionen, Bewegung, soziale Resonanz, physiologische Reize und kulturelle Erwartungen greifen ineinander.

Was jemand als schön empfindet, lässt sich nicht auf ein einziges Merkmal zurückführen – aber vielfach auf bestimmte Muster: Stimmen, die als besonders präzise oder resonant wahrgenommen werden, lösen häufiger positive Reaktionen aus. Bestimmte Hirnareale springen verlässlich an, wenn Musik berührt. Und sogar das Erbgut scheint mitzuentcheiden, ob jemand Musik als bedeutsam erlebt oder nicht. „Wir können die alte Frage, wo die Schönheit liegt – im Objekt, im Ohr oder im Auge des Rezipienten –, durch unsere Befunde neu oder eben differenzierter beantworten“, sagt Melanie Wald-Fuhrmann und betont zugleich: „Es ist nicht so, dass wir mit dieser Forschung das Rezept musikalischer Schönheit finden – und ich bin ehrlich gesagt ganz froh darüber.“

So wird auch in Zukunft der nächste ESC-Hit, die große Opernarie oder das persönliche Lieblingsstück nicht aus der Berechnung der Komponierenden entstehen. Selbst wenn man heute viel über musikalische Muster, Vorlieben oder emotionale Reaktionen weiß – der Moment, in dem Musik wirklich berührt, entzieht sich letztlich der Kontrolle. Er entsteht irgendwo zwischen Komposition und Hörerlebnis, zwischen Intention und Interpretation. Oder, wie Melanie Wald-Fuhrmann es formuliert: „Schönheit ist ein Erleben – und nicht primär eine Eigenschaft.“



www.mpg.de/podcasts/schoenheit



Agnolo Bronzinos
*Porträt der Eleonora
von Toledo mit ihrem
Sohn Giovanni* entstand
um 1545 und bewegt
sich zwischen Idealisie-
rungen der Weiblichkeit
und politischer Macht.



DIE MACHT DES MAKELLOSEN

TEXT: TANJA BEUTHIEN

BILD: AGNOLO BRONZINO / GEMEINFREI

Mit dem Begriff „Schönheit“ verbinden viele Menschen in erster Linie Geschmacksfragen. Inwiefern Schönheitsideale von der Renaissance bis zur KI-Ära aber gesellschaftliche Normen und Vorurteile widerspiegeln, das untersucht Hana Gründler mit ihrer Forschungsgruppe am Kunsthistorischen Institut in Florenz – zwischen gesellschaftlichen Normen, totalitärer Propaganda und digitalen Körperbildern.

Es geht um Schönheit. Und um Politik. Es geht um das Abbild einer schönen Frau. Und um Gene. Es geht um Macht: Das *Porträt der Eleonora von Toledo mit ihrem Sohn Giovanni*, entstanden um 1545, gemalt von Agnolo Bronzino, zeigt die Gattin von Cosimo I. de' Medici, des Herzogs von Florenz, mit perfektem Teint, in prunkvoller Kleidung und prächtigem Schmuck. Bronzino kannte die Schönheitstraktate seiner Zeit. Die *Gespräche über die Schönheit der Frauen* des Dichters Agnolo Firenzuola etwa, der die Farbe der Stirn (weiß), der Lippen (rot), der Ohren (rosig) und Wangen (strahlend) bis ins Detail festlegte. In dieser Hinsicht repräsentiert Eleonora von Toledo eine westliche Idealverkörperung der Weiblichkeit – bis hin zu ihrem überlängten Hals. Doch damit nicht genug. Firenzuola nämlich bezog sich mit seiner Schönheitslehre unter anderem auf Marsilio Ficino, einen italienischen Philosophen, Übersetzer und Humanisten, der im 15. Jahrhundert im allgemeinen Wesen der Schönheit das Göttliche erkannte. Er legte dabei dar, wie sich innere Schönheit im äußeren Erscheinungsbild widerspiegelt – und bezog sich damit unter anderem auf christliche Tugenden und die Schönheitskonzeptionen Platons, der in äußerer Harmonie einen Widerschein der seelischen Haltung erkennt. Die Herzogin ist also für ihre Zeitgenossen nicht nur eine attraktive Frau, sondern verkörpert mit ihrem Aussehen für alle sichtbar auch das Wahre und Gute. Den Arm um ihren kleinen Sohn gelegt, repräsentiert sie zudem den Erhalt der Dynastie. Also die Macht.

30

„In Bronzinos Porträt wird die ästhetische Kategorie der Schönheit zu einer moralischen“, sagt Hana Gründler. „Und damit ist sie letztlich auch politisch.“ Als Wissen-

schaftlerin am Kunsthistorischen Institut (MPI) in Florenz erforscht Gründler mit ihrem Team das Verhältnis von Kunst, Visualität und Ethik. „Etho-Ästhetiken des Visuellen“ nennt sich ihre Forschungsgruppe, die sich mit der Kunst und Philosophie der Renaissance genauso auseinandersetzt wie mit den manipulativen Bildwelten autoritärer Staaten und ihren künstlerischen Gegenentwürfen in Osteuropa – bis hin zu KI-Ästhetiken in der Gegenwart und den daraus resultierenden ethischen Problemen. „Auch wenn Schönheit erst mal eine subjektive Empfindung sein mag, ist sie doch stets historisch und kulturell bedingt. In diesem Sinne spielen (Kunst-) Objekte und gebaute Umwelt eben nicht nur eine maßgebliche Rolle für die ästhetische Wahrnehmung und Sensibilisierung des Einzelnen“, so Gründler. „Sie wirken stets bei der ethischen und politischen Konstituierung der Gesellschaft mit.“ In dieser Hinsicht ist auch die Frage wichtig, ob und wie Schönheit und soziale Normen als Propaganda missbraucht werden. Und für Diskriminierung und gesellschaftliche Ungerechtigkeit sorgen.

Die Gleichsetzung des Schönen mit dem Guten und Wahren

Die Abhandlung *De Amore* des Philosophen Marsilio Ficino besitzt das KHI in Florenz in einer um 1475 entstandenen Handschrift auf Papier, Hana Gründler hat kürzlich erst damit gearbeitet. „Ficinos Liebestheorie besagt, dass die Schönheit die Idee ist, die am stärksten ausstrahlt. Davon werden wir angezogen, deswegen verlieben wir uns.“

Die Spartakiade in Prag, 1955: Solche Großereignisse inszenierten ein ästhetisiertes, kollektives Körperbild, das auch Ausdruck einer Ideologie war, die das Individuelle dem staatlich normierten Ideal unterordnete.

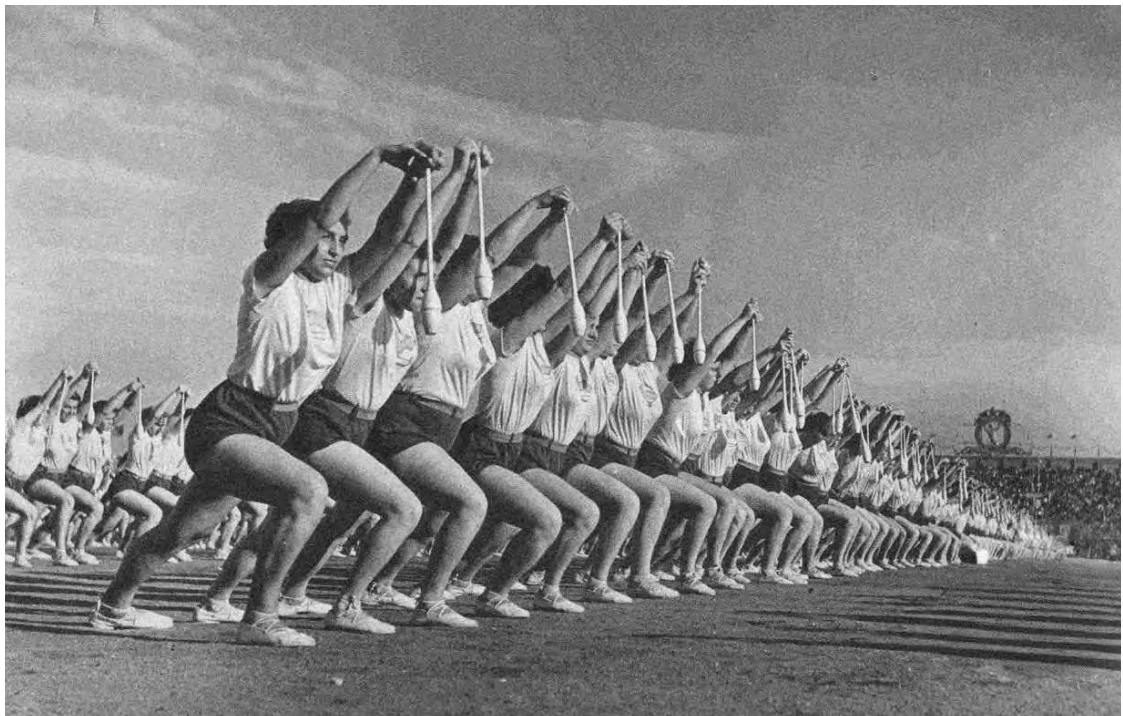


FOTO: ARCHIV DES NATIONALMUSEUMS IN PRAG, CC BY 4.0

Damit werden die menschliche Wahrnehmung und die Ästhetik aufgewertet. „Zugleich“, so Gründler, „gibt es eine Gleichsetzung des Schönen mit dem Guten und Wahren, was normative Implikationen besitzt: Diejenigen, die nicht diesen Idealen entsprechen, werden moralisch und intellektuell abgewertet.“ Als weiteres Beispiel nennt die Bildwissenschaftlerin den moralischen Dialog des Kunsttheoretikers und Humanisten Leon Battista Alberti (1404–1472) *Über die Seelenruhe oder vom Vermeiden des Leidens in drei Büchern*, den sie vor drei Jahren mit Katharine Stahlbuhk und weiteren Mitgliedern ihrer Forschungsgruppe herausgegeben und kommentiert hat. Auch in diesem Text, entstanden um 1445, geht es um die ethische Dimension des Ästhetischen: Drei Freunde, der betagte Humanist Agnolo Pandolfini, der etwa 60-jährige Niccola, ein Spross der Bankiersfamilie de' Medici, und das Alter Ego des Autors machen sich auf zu einem Spaziergang durch Florenz. Die Harmonie des gerade fertiggestellten Domes, das wohlgeordnete Stadtbild, die lieblich-sanfte toskanische Landschaft erbauen ihre Seelen. „Man kann Alberti so lesen, dass sich die Schönheit und Wohlstrukturiertheit des Stadtraumes auch auf den Einzelnen und die Gesellschaft auswirken – Ästhetik und Ethik bedingen sich hier wechselseitig und bestimmen das Politische mit, so Gründler. Die Säulenordnung im Dom etwa, wird ihm zu einem Sinnbild der Gemeinschaft: Genauso wie die Säule das Gebäck stützt, trägt der Einzelne durch seine „aufrechte“ Haltung die Gesellschaft. Die Schmutzigen und Verwahrlosten, die Bettler und Armen, die ebenfalls den öffentlichen Raum, die Straßen, Hospitäler und Vorhallen der Kirche bevölkern, werden von Alberti bewusst als negatives Gegenbeispiel zu idealisierten Körper- und Stadtbildern eingesetzt.

Doch auch zu Albertis Zeiten gab es künstlerische Gegenentwürfe zur stark idealisierten Schönheit. Die Skulptur *Maria Magdalena* des Bildhauers Donatello etwa. Er zeigt die schöne Maria Magdalena hier als abgemagerte Büßerin: mit eingefallenem Gesicht, zahnlos, asketisch, mit einem einzigartigen, intensiven Blick. „Der Anblick solch ausgemergelter Körper war den Zeitgenossen Albertis und Donatellos wahrscheinlich nicht fremd. Doch die Holzstatue bricht aufgrund ihrer extremen Darstellung mit den Konventionen.“ Ein zu ungeschöntes, zu realistisches Kunstwerk wurde als nicht angemessen betrachtet. „Zugleich aber führt sie dem Betrachter die theologische Komplexität der Heiligen – als tragende Säule des christlichen Glaubens und als Figur zwischen Sünde und Gnade, Erotik und Askese – vor Augen“, sagt Katharine Stahlbuhk, wissenschaftliche Mitarbeiterin in Gründlers Team, die aktuell zur *Maria Magdalena* forscht. „Der Maler und Kunsttheoretiker Giorgio Vasari, der im 16. Jahrhundert für seine Künstlerviten bekannt wurde, beschrieb die Plastik von Donatello bezeichnenderweise als ‚molto bella‘, sehr schön, und zwar gerade aufgrund der vortrefflichen Darstellung ihrer Enthaltbarkeit und ihres Fastens.“



FOTO: PICTURE ALLIANCE/UNITED ARCHIVES | UNITED ARCHIVES/IFTN

Standbild aus dem Film *Tausendschönchen* der tschechischen Filmregisseurin Věra Chytilová. Die beiden Protagonistinnen begehren gegen die Weiblichkeitsideale und die Normierung des Sozialismus auf, scheitern aber.

31

Was also ist Schönheit? Ist es die Harmonie, die Ausgewogenheit und Symmetrie, auf die sich schon der antike Philosoph Platon bezieht? Und dessen Theorien des Schönen und der Liebe die Philosophen und Kunsttheoretiker der Renaissance wie Ficino und Alberti beeinflussten? Oder ist es der Realismus des Bildhauers Donatello, der die Betrachter und Betrachterinnen die reine Seele der Maria Magdalena nachvollziehen lässt? Wann und zu welchen Gelegenheiten in der Geschichte wird der Begriff der Schönheit normiert, idealisiert und als politisches Element gebraucht – oder missbraucht?

Machthaber totalitärer Staaten – wie Hitler im Nationalsozialistischen Deutschland oder Stalin in der Sowjetunion – generierten schon immer einen einheitlichen Schönheitsbegriff. Der perfekte, gestählte Körper stand im Zentrum der visuellen Propaganda und wurde etwa von Leni Riefenstahl in ihren Filmen wie *Olympia* von 1936 in Szene gesetzt oder von Arno Breker modelliert. Die Skulptur *Arbeiter und Kolchosbäuerin*, die Wera Muchina 1937 für den Pavillon der Sowjetunion zur Weltausstellung in Paris schuf, zeigt ein ähnlich heroisiertes Menschenbild. Darüber hinaus prägten die National-



sozialisten den Begriff der „Entarteten Kunst“ für alles, was diesem Ideal der Schönheit und der Ästhetik widersprach. „Das ist ein Totalitarismus des perfekten, des unangreifbaren, militarisierten Körpers“, so Hana Gründler.

„Schwäche, Sensibilität, Krankheit, vermeintliche Andersartigkeit, all das wird eliminiert aus dieser Bildwelt, die ja auch eine Gedankenwelt, eine Ideologie ist. Es geht um Formen von Unterwerfung des Individuellen unter das ästhetisierte, kollektive, staatlich normierte Körperbild. Letztlich ist es stets auch die Ausblendung dessen, was nicht akzeptierter Teil der Gesellschaft ist.“ Zu sehen etwa in den „Spartakiaden“, den staatlich inszenierten Großsportereignissen, die von der Sowjetunion gefördert wurden und ab 1955 auch in der Tschechoslowakischen Sozialistischen Republik (ČSSR) stattfanden.

Körper, Kunst, Kritik

„Gegen diese propagandistische Normierung und Ideologisierung des Körpers wehrten sich viele Body-Art-Künstler in den 1970er- und 1980er-Jahren in Osteuropa“, so Gründler. Etwa der tschechische Künstler Petr Štembera, der sich im Juni 1980 in einer radikalen, das Publikum miteinbeziehenden Performance direkt auf die Spartakiade bezog. Und der den eigenen Körper bis an die äußersten Grenzen brachte. 1974 experimentierte er in seiner Performance *Narcissus* mit Schlaf- und Nahrungsentzug und verletzte sich selbst. „Natürlich geht es hier nicht um Schönheit, es geht darum, den eigenen Körper und die Kunst als Instrument der Kritik an ihre eigenen Grenzen zu bringen. Und gegen idealisierte Körpervorstellungen zu revoltieren.“

Das tat auch die tschechische Filmregisseurin Věra Chytilová. In ihrem Film *Tausendschönchen* von 1966 zeigt sie zwei Frauen, die sie Marie 1 und Marie 2 nennt und die gegen die Weiblichkeitsideale und die gesellschaftliche Normierung des Sozialismus aufbegehren. Sie essen die ganze Zeit, stopfen mit beiden Händen Speisen in sich hinein, steigen mitten ins Buffet, fackeln das Zimmer ab, degradieren die Männer zum Pin-up. „Ein unglaublich disruptiver Akt“, sagt Gründler. „Der Film war Teil der Tschechoslowakischen Neuen Welle, in der viele avantgardistische Filme entstanden, und hatte von vornherein einen schwierigen Stand, da er als antisozialistisch beschimpft wurde. 1968, als die Truppen des Warschauer Pakts in die ČSSR einmarschierten, wurde er vom Regime natürlich verboten.“ Dennoch zirkulierte der Streifen weiter im Untergrund. „Aus heutiger Perspektive ist

der Film geradezu ein feministisches Manifest.“ Aber er endet bitter. Am Schluss werden die beiden maßlosen, exzessiven Frauen wieder verschnürt und eingepackt, sie werden normiert und für die Gesellschaft passend gemacht.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Die Kategorie „Schönheit“ war noch nie neutral. In der Renaissance galt sie als Ausdruck des Wahren und Guten.

Auch totalitäre Systeme griffen auf normierte Körperbilder zurück, um Macht zu inszenieren und Abweichungen zu unterdrücken.

Die Kunst hat sich immer wieder mit diesen Normen auseinandergesetzt und Gegenentwürfe geschaffen – von Donatellos *Maria Magdalena* bis zu subversiven Filmen in Osteuropa.

Heute verstärken KI-Systeme stereotype Ideale und gesellschaftliche Normen.

Schönheit bleibt damit eine kulturell und politisch hoch aufgeladene Kategorie.

„Die beiden Maries feiern in *Tausendschönchen* die Freiheit, die Abweichung, das Empowerment des eigenen Körpers. Und auch die Kraft, über die eigenen Bilder des Körpers bestimmen zu können“, so Gründler, die ein Buch zu den „Ästhetiken der Freiheit“ in der Subkultur der ČSSR schreibt. Doch wie steht es heute um die Selbstbestimmung? Um die Disruption und die Andersartigkeit? In Zeiten, in denen das heroisch-muskulöse Soldatenbild nicht nur in Putins Russland wieder populär ist? In denen das Weiße Haus eine Liste aller unliebsamen Werke in den Smithsonian-Museen veröffentlicht, die es eliminieren möchte? Darunter *Trans Forming Liberty*, ein Gemälde der Malerin Amy Sherald mit dem Porträt von trans Model und Performance-Künstlerin Arewà Basit. Wird es überhaupt noch Abweichungen geben, jetzt wo die KI-basierten Bildgenerierungstools aus Milliarden von Trainingsdaten Schönheitsideale herausfiltern, um ein scheinbar perfektes Model zu generieren?

„Als Bildwissenschaftlerin denkt man hier sofort an die berühmte antike Legende über den Maler Zeuxis, der aus fünf Jungfrauen, die für ihn posierten, die eine, die schönste aller Frauen, nämlich Helena, erschuf“, so Gründler. „Von jeder übernahm er eine andere Ansicht, einen anderen Körperteil. Das spiegelt die Vorstellung, dass Schönheit aus einer Vielzahl von Körpern selektiert werden kann. Bezeichnenderweise

„Die Macht der Bilder ist enorm. Immer mehr Menschen versuchen, ihren eigenen Körper gemäß ihres simulierten Idealbilds zu formen.“

HANA GRÜNDLER



Das Gemälde *Trans Forming Liberty* der Malerin Amy Sherald zeigt trans Model und Performance-Künstlerin Arewà Basit. Es steht auf einer Liste unliebsamer Werke in den Smithsonian-Museen, die das Weiße Haus veröffentlicht hat.

von einem Mann.“ Ähnliches generieren heute auch die KI-Bildtools, wenn sie hyperrealistische, sexy Influencerinnen hervorbringen, Models mit langen Haaren und großen Brüsten, die auf Instagram werben. Oder die man sich mit der App AI Beauty gleich selbst erschaffen kann. Gemeinsam mit ihrem Kollegen Rafael Uriarte, Leiter des Digital Humanities Lab am KHI, hat Gründer im April 2024 einen Workshop veranstaltet, in dem auch darüber diskutiert wurde, wie KI-Systeme westliche Schönheitsnormen reproduzieren und verstärken. „Dabei sollte man auch die Frage nicht aus den Augen verlieren, wer eigentlich die KI-Szene dominiert“, so Gründer. Nach einer Untersuchung der UN-Kulturorganisation Unesco im Jahr 2023 waren weltweit nur etwa zwölf Prozent der KI-Forscherinnen weiblich.

„Ganz abgesehen von diesem stark normierten und auch stark männlich geprägten Blick und der Nivellierung weiblicher Körperbilder, ist bekannt, wie sehr insbesondere junge Frauen durch KI generierte Bilder beeinflusst werden. Die Macht der Bilder ist enorm. Immer mehr versuchen, ihren eigenen Körper gemäß ihres simulierten Idealbilds – auch operativ – zu formen“, so Gründer. Weiter kann man sich von der utopischen, hemmungslosen Vision der „Tausend-schönchen“, von den asketischen Idealen eines Donatello oder eines Petr Štembera nicht entfernen.

Auch heute geht es also, wie schon zu Bronzinos Zeiten beim Abbild einer schönen Frau immer um Politik. Und zuweilen auch um die richtigen Gene – wie der Fall der äußerst prominenten amerikanischen Schauspielerin Sydney Sweeney zeigt, die kürzlich für eine

Werbekampagne posierte. „Sydney Sweeney has great Jeans“, hieß der Slogan, der mit dem gleichlautenden Worten „jeans“ und „genes“, Jeans und Gene spielte. In einem Zusatz plapperte die blauäugige, blonde und weiße Sweeney von Vererbung der Augen- und Haarfarbe. Das würde an rassistische Stereotype erinnern, hieß es in den sozialen Medien aus dem eher linken Spektrum – da würde eine gut aussehende Amerikanerin von Woken fertiggemacht, konterte kurz darauf der rechte Rand. Da blieb Trump nur noch, die „HEISSESTE Werbung“ der Schauspielerin zu loben, die zudem als Wählerin bei den Republikanern registriert ist. Die Aktie der Jeansmarke stieg im Rekordtempo nach oben – der neue Film von Sweeney flopte. „Schönheit hat immer mit Körperpolitik und Macht zu tun“, sagt Hana Gründer. „Sie ist seit jeher kulturell und historisch bedingt, und sie ist somit auch normativ, ideologisch und politisch besetzt. Sie ist eine problematische Kategorie im 20. und auch im 21. Jahrhundert – wie es dieses Beispiel zeigt. Und sie war es schon immer.“

33



www.mpg.de/podcasts/schoenheit



Wie auf einem Laufsteg scheint dieser männliche Kampfläufer seine Federpracht zu präsentieren. Aber mit dem Aussehen allein lässt sich niemand beeindrucken. Während andere Männchen kämpfen, wartet dieser hier einfach ab und nutzt die erstbeste Gelegenheit, um sich mit Weibchen zu paaren.



SCHÖN IST ANDERS

TEXT: CLAUDIA DOYLE

FOTO: MICHAEL GERBER

35

Bunte Farben, prächtige Federn – doch am Ende erwählen weibliche Zebrafinken und Kampfläufer nicht den Schönsten, sondern den mit dem besten Auftritt oder der cleversten Strategie. Wolfgang Forstmeier und Clemens Küpper vom Max-Planck-Institut für biologische Intelligenz in Seewiesen erforschen die Präferenzen der Vögel bei der Partnerwahl.

Die Balz einiger Vogelarten ist ein Spektakel für Augen und Ohren: Mit herzergreifenden Gesängen, spektakulären Farben oder ausgefeilten Tanzeinlagen versuchen die Männchen, Weibchen von sich zu überzeugen. Vieles davon wirkt beinahe menschlich. „So wie Vögel bei der Partnerwahl ihr Aussehen und ihre Stimme einsetzen, könnte man meinen, dass sie die gleichen Merkmale attraktiv finden wie wir Menschen“, sagt Wolfgang Forstmeier, der am Max-Planck-Institut für biologische Intelligenz in Seewiesen forscht. Aber ist das tatsächlich so? Forstmeier hat einen großen Teil seiner bisherigen Laufbahn damit verbracht, diese weit verbreitete Annahme zu prüfen – mit überraschendem Ergebnis. Aber von vorn.

Am Max-Planck-Institut in Seewiesen sitzt ein männlicher Zebrafink in seiner Voliere auf einer Holzstange und wartet. Wird er heute die Partnerin fürs Leben finden? Der kleine grau-weiße Vogel mit dem leuchtend roten Schnabel und dem orangefarbenen Wangenfleck dreht den Kopf zur Seite. Ein Weibchen kommt geflogen und setzt sich ihm gegenüber. Jetzt geht es los: Das Männchen beginnt, elanvoll zu singen – wobei „zwitchern“ die eher unmelodischen Klänge der Finken besser beschreibt. Die Dame hört zu und trifft ihre Wahl.

36

Wolfgang Forstmeier hat über 75 000 solcher Aufeinandertreffen auf Video aufgenommen und analysiert. Er hat zudem die Männchen gewogen, ihre Schnabelfarbe katalogisiert und ihren Wangenfleck vermessen – alles, um herauszufinden, welche Eigenschaften die Weibchen bevorzugen. Das Ergebnis war unerwartet: „Uns wurde klar, dass es gar keinen Faktor geben kann, der bestimmte Männchen attraktiv macht, denn die Weibchen sind sich völlig uneins, wer ihnen gefällt“, fasst Forstmeier zusammen. „Wir Menschen sind davon überzeugt, dass es bei der Partnerwahl im Tierreich in erster Linie um Schönheit geht. Zumindest bei den Zebrafinken scheint dies jedoch nicht der Fall zu sein“, erklärt der Biologe aus der Abteilung Ornithologie von Bart Kempnaers. Stattdessen könnte neben dem Gesang auch das Verhalten des potenziellen Partners eine wesentliche Rolle spielen.

„Es entwickeln sich regelrechte Sympathien oder Antipathien zwischen den Vögeln“, sagt Forstmeier. Optische Merkmale dienen seiner Ansicht nach dagegen der Erkennung von Artgenossen. Woher kommt dann aber die weit verbreitete Ansicht, dass optische Merkmale ein wichtiges Kriterium für die Partnerwahl sind? Wolfgang Forstmeier vermutet, dass hier ein „Publication Bias“ vorliegt

– dass also vor allem Studien veröffentlicht werden, die diese Vermutung stützen, während solche mit negativem Resultat in der Schublade verschwinden.

Die zentrale Rolle des Gesangs ist für Forstmeier dagegen unstrittig. So konnte er zeigen, dass Zebrafinkenweibchen eine Vorliebe für bestimmte Gesangs-„dialekte“ besitzen. Zwei getrennt voneinander gehaltene Gruppen haben am Institut über die Jahre unterschiedliche Dialekte entwickelt. Diese beeinflussen offenbar die Attraktivität: Weibchen präferieren eindeutig den ihnen bekannten gegenüber dem fremden Dialekt.

Inzwischen widmet sich Forstmeier einer anderen Art: dem Kampfläufer. Diese elstergroßen Vögel leben in Feuchtgebieten im Nordwesten Europas und Russlands – einige auch in geräumigen Volieren am Institut in Seewiesen. Während der Balz bieten die Tiere ein eindrucksvolles

Schauspiel: von eitlen Zurschaustellen bis zu wildem Schnabelhacken. Die Männchen versuchen, möglichst viele Weibchen in ihre Balzarena zu locken. Dazu stellen sie ihre imposanten individuell gefärbten Halskrausen auf und springen flügel Schlagend hoch in die Luft. Die Weibchen beäugen das Schauspiel zunächst aus sicherer Entfernung.

Und genau wie bei den Zebrafinken ist auch bei den Kampfläufern das Aussehen nicht das ausschlaggebende Kriterium. „Obwohl die Männchen bei der Balz ihr Prachtgefieder zur Schau stellen, spielt es für die Wahl der Weibchen keine Rolle“, erklärt Forstmeier. Denn es gibt nicht nur mit prachtvollem Gefieder ausgestattete Männchen, sondern auch solche, die weniger auffällig sind und sogar wie Weibchen aussehen. „Würden alle Weibchen eine bestimmte Ästhetik präferieren, wären die anderen Varianten längst ausgestorben.“ Doch so ist es nicht. Daher geht Forstmeier davon aus, dass die Vielfalt der Halskrausen der individuellen Erkennung dient.

Stattdessen imponiert den Weibchen vor allem Stärke. Dominanz scheint zumindest für einige Weibchen sehr attraktiv zu sein. Wahrscheinlich deshalb wird in den Balzarenen ständig gekämpft: Die

Vögel flattern wenige Zentimeter in die Luft, schlagen mit den Füßen nach ihren Kontrahenten und hacken mit ihren Schnäbeln aufeinander ein. Das permanente Ringen darum, seine Stellung zu verteidigen oder zu verbessern, ist zwar anstrengend, aber es lohnt sich, denn das Alphamännchen bekommt deutlich öfter die Gelegenheit, sich zu paaren und seine Gene weiterzugeben. „Mehr als

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Bei Zebrafinken und Kampfläufern entscheidet nicht das prächtigste Gefieder über den Paarungserfolg, sondern Gesang, Stärke und Verhalten. Äußere Merkmale spielen – anders als oft vermutet – nur eine untergeordnete Rolle.

Kampfläufer-Männchen existieren in drei genetisch festgelegten Typen – Kämpfer, Satelliten und Faeder – die sich durch Aussehen, Verhalten und Hormonhaushalt unterscheiden. Ein Supergen auf Chromosom 11, das vor Millionen Jahren entstand, prägt diese Vielfalt und erhält sie trotz ungleicher Fortpflanzungschancen.

Von uns Menschen als „schön“ empfundene Merkmale haben oft eine bestimmte Funktion. So dienen die Farben der Zebrafinken der Unterscheidung von Individuen.

die Hälfte aller Paarungen entfallen auf das dominante Männchen. Rangniedere Vögel bekommen nur selten eine Chance oder gehen sogar ganz leer aus“, erklärt Clemens Küpper, der am Max-Planck-Institut in Seewiesen die Arbeitsgruppe Verhaltensgenetik und Evolutionäre Ökologie leitet.

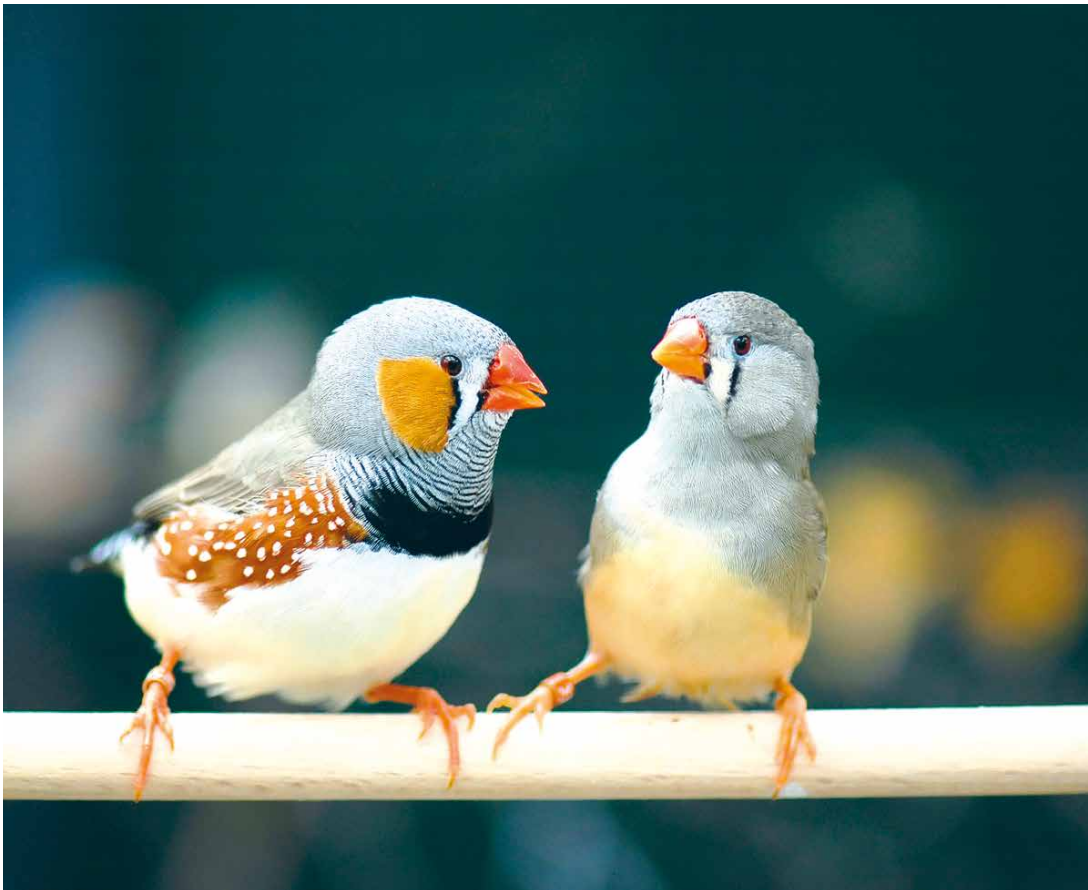
Satelliten und Faeder

Küpper erforscht an den Vögeln schon seit mehr als zehn Jahren, wie Vielfalt innerhalb einer Art entsteht und wie sie über lange Zeiträume erhalten bleibt. Dafür sind Kampfläufer ein ideales Untersuchungsobjekt, denn die Vögel haben das Prinzip Vielfalt auf die Spitze getrieben. Neben den dominanten, auffälligen „Kämpfern“ gibt es noch zwei weitere Typen von Männchen: 15 Prozent der Männchen sind ein wenig kleiner als die Kämpfer, und ihr Balzkleid ist auffälliger: Der Federkragen ist meist weiß statt dunkel gefärbt. Doch die größte Auffälligkeit betrifft das Verhalten dieser als „Satelliten“ bezeichneten Tiere. Von Aggression gibt es bei ihnen keine Spur. Stattdessen schließen sich diese Männchen einem Kämpfer an und lassen sich freiwillig von ihm dominieren. Sie kommen durch ihr friedfertiges Verhalten in die

Nähe von Weibchen und nutzen schamlos jeden Moment zur Paarung aus, sobald ihr Partner in einen Kampf verstrickt ist.

Noch seltsamer ist der dritte Typ, der „Faeder“ (altfriesisch: Vater). Er sieht aus wie ein etwas zu groß geratenes Weibchen. Gut getarnt schleicht er unbemerkt durch die Balzarena und wartet darauf, dass ein Weibchen sich auf den Boden duckt und signalisiert, dass es zur Paarung bereit ist. Der Faeder verwirrt andere Männchen, indem er die Stellung und das Verhalten des Weibchens imitiert. Die Konfusion nutzt er dazu, als Erster beim Weibchen zum Zug zu kommen. Ein Prozent der Männchen gehören diesem Typ an.

Durch Genomanalysen hat Clemens Küpper bereits an der Universität Sheffield, wo er von 2012 bis 2015 forschte, herausgefunden, dass sich die drei Typen an einer einzigen Stelle im Genom voneinander unterscheiden. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler konnten sogar den ungefähren Zeitpunkt bestimmen, an dem die Veränderung stattfand: Vor etwa vier Millionen Jahren wurde ein rund 125 Gene umfassender Abschnitt auf Chromosom 11 herausgetrennt und in entgegengesetzter Richtung wieder eingebaut. Die betroffene Gruppe von →



Das Gefieder männlicher Zebrafinchen (links) ist voller Farben. Bei der Partnerwahl ist das bunte Gefieder jedoch unwichtig. Für die Weibchen zählt vielmehr die Persönlichkeit des Verehrers.



Am Institut in Seewiesen leben die Kampfläufer in großen Volieren. Auf dem Bild testen Veronika Rohr und Clemens Küpper die Flugfähigkeit eines Jungvogels. Sobald dieser das vor ihm liegende Wasserbecken überfliegen kann, gilt er als flügge. Dies ist eine wichtige Station in seinem Leben, denn in freier Natur kann er dann Beutegreifern besser entkommen.

38

Genen, auch als Supergen bezeichnet, war fortan vom restlichen Genom isoliert und entwickelte sich unabhängig weiter. „Eine Inversion kommt in der Natur recht häufig vor“, erklärt Clemens Küpper. Bei Fruchtfliegen zum Beispiel, Ameisen und auch beim Menschen. So geht beispielsweise die Bluterkrankheit Hämophilie auf eine kleine Inversion auf dem X-Chromosom zurück. Kampfläufer, bei denen beide Kopien von Chromosom 11 derart verändert sind, sind nicht lebensfähig. Ist nur eine Kopie mutiert, entwickeln sich die Tiere normal, auch wenn sie sich in Aussehen und Verhalten von ihren Artgenossen unterscheiden.

Aus den Faedern sind wiederum vor einigen Jahrtausenden die Satelliten entstanden. Dabei haben die Satelliten an mehreren Stellen des Supergens intakte Kopien von Genen zurückerhalten, deren Funktion bereits verloren gegangen war. Die betroffenen Individuen haben dadurch wieder die imposanten Halsfedern der Kämpfer zurückerhalten, nun allerdings in Weiß statt in Schwarz. Auch signalisieren sie durch ihr Verhalten, dass sie zur Paarung bereit sind. Doch genau wie den Faedern fehlt ihnen jegliche Aggressivität. Welche Gene für all diese Änderungen verantwortlich sind, erforscht Clemens Küpper gemeinsam mit seinem Team. Ein wichtiger Faktor für die unterschiedliche Aggressivität sind die unterschiedlichen Testosteronwerte von Kämpfern, Satelliten und Faedern. Wie zu erwarten haben Kämpfer während der Paarungszeit viel Testosteron im Blut. Faeder und Satelliten hingegen fast keins. Zunächst vermutete Küpper, dass bei Letzteren die Produktion des Hormons gestört ist. Doch diese Theorie sollte sich als falsch herausstellen.

„Tatsächlich produzieren die Faeder und Satelliten sogar viel mehr Testosteron in den Hoden als die Kämpfer. Sie bauen es jedoch im Blut direkt wieder ab“, erklärt er. Verantwortlich dafür ist ein Gen mit der Abkürzung HSD17B2. Es dient als Vorlage für ein Enzym, das Testosteron in das wesentlich schwächer wirkende Androstendion umwandelt. Durch eine Mutation hat dieses Enzym eine Art Superkraft bekommen: Es wird jetzt vermehrt gebildet und arbeitet zudem wesentlich effizienter. Fast das gesamte Testosteron, das in die Blutbahn gelangt, wird also sofort wieder zu Androstendion abgebaut.

Auch die Weibchen können Träger der Faeder- oder Satelliten-Mutationen sein. Erstere sind deutlich kleiner, Letztere unterscheiden sich dagegen äußerlich kaum von den Tieren ohne Mutation. Die Testosteron- und Androsten-

**„Mehr als die Hälfte
aller Paarungen
entfallen auf das
dominante Männchen.“**

CLEMENS KÜPPER

dionunterschiede sind ähnlich wie bei den Männchen, auch wenn die Weibchen von diesen beiden Hormonen viel weniger produzieren. Ob auch die weiblichen Geschlechtshormone betroffen sind, untersucht Küppers Team gerade. Darüber hinaus wollen die Forschenden wissen, welche Vor- oder Nachteile es für die weiblichen Vögel hat, eine dieser Genvarianten zu besitzen. Über mehrere Jahre hinweg zählte und wog sein Team die Eier der Kampfäufer-Weibchen, die in den Volieren in Seewiesen leben. Ihre Messungen ergaben, dass die biologische Fitness der Faeder-Weibchen stark unter der Mutation leidet: Sie legen weniger und kleinere Eier, und die Embryonen in den Eiern und die geschlüpften Küken haben eine geringere Überlebenschance. Faeder-Weibchen haben daher acht Mal weniger Nachkommen als Kämpfer-Weibchen. Warum ist die Genvariante dann bisher von der Evolution noch nicht aussortiert worden, wenn sie den Weibchen so viele Nachteile bringt? „Sie kann nur fortbestehen, weil die Faeder-Männchen überdurchschnittlich viele Vorteile davon haben“, fasst der Vogelforscher zusammen. „In einer Balzarena, wo die meisten Kämpfer-Männchen nie zum Zug kommen, zahlt es sich aus, eine andere Strategie zu verfolgen“, sagt Küpper. Allerdings nur, wenn es nicht viele davon gibt. Denn wenn die Faeder-Männchen häufiger werden,

werden sie von den anderen Männchen öfter erkannt und aus der Balzarena vertrieben.

Schönheit ist individuell

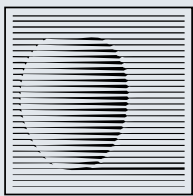
Schönheit ist also weder bei den Kampfäufern noch bei den Zebrafinken ein ausschlaggebendes Kriterium für die Partnerwahl. Mindestens genauso wichtig sind Gesang, Stärke und Verhalten. Schönheit allein betrachtet, hat keine große Anziehungskraft. Wirkliche Attraktivität wirkt oft individuell und ist das Zusammenspiel vieler verschiedener Eigenschaften eines potenziellen Partners. Schön kann also sein, wer im richtigen Dialekt singt, mutig kämpft und sich dem anderen gegenüber angemessen verhält. Jede Art hat ihren eigenen Begriff von Schönheit – und wie der eher unmelodische Gesang der Zebrafinken zeigt, stimmt dieser nicht immer mit dem menschlichen Empfinden überein.



www.mpg.de/podcasts/schoenheit



ANZEIGE



iena 2025

Sa 1. – Mo 3. November
Messe Nürnberg

**Go for Gold –
mit Ihrer Idee zum Erfolg!**

Internationale Fachmesse
Ideen • Erfindungen • Neuheiten

www.iena.de



In Kombination mit



Consumenta



Hack & Make
Das Können- und Technikfestival

In Kooperation mit



Deutsches
Patent- und Markenamt



INTERNATIONAL FEDERATION
OF INVENTORS' ASSOCIATIONS



DEUTSCHER
ERFINDER
VERBAND e.V.

Mo 3.11.2025

iINNOVATIONS
KONGRESS



Auf höchstem Niveau Mathematik zu betreiben, das ist mehr Berufung als Beruf. Dennis Gaitsgory ist jahrzehntelang seiner mathematischen Intuition gefolgt und hat gemeinsam mit Kollegen die geometrische Langlands-Vermutung bewiesen – eine immense wissenschaftliche Leistung, für die er nun mit dem Breakthrough Prize in Mathematics ausgezeichnet wurde.

TEXT: DIRK EIDEMÜLLER

Er stellt die Kaffeetasse ab und grüßt zum Videocall. Zum Glück hat er für unser Gespräch Zeit, denn Dennis Gaitsgory ist ein vielgefragter Mann. Als Direktor am Bonner Max-Planck-Institut für Mathematik muss er sich nicht nur um seine Arbeitsgruppe kümmern. Er ist neulich quasi über Nacht ins mediale Rampenlicht gerückt, und ihm selbst ist der Trubel nicht unbedingt angenehm.

Normalerweise sind Spezialisten wie er nur Eingeweiheten bekannt. Die höhere Mathematik gilt als äußerst hermetische Wissenschaft. Nur wenige Fachkollegen weltweit können überhaupt nachvollziehen, was in bestimmten mathematischen Disziplinen publiziert wird. Doch letztes Jahr ist ihm als Leiter eines Teams von neun Kollegen eine große mathematische Tat geglückt: der schlüssige Beweis der sogenannten geometrischen Langlands-Vermutung – oder zumindest eines zentralen Teils dieser Vermutung. Für diese Leistung erhielt er dieses Jahr als Einzelpreisträger den Breakthrough Prize in Mathematics, der mit drei Millionen US-Dollar dotiert ist und im Rahmen einer feierlichen Zeremonie im kalifornischen Santa Monica überreicht wurde.

„Ich freue mich natürlich sehr über die Anerkennung meiner Arbeit“, sagt der Forscher, „aber ich muss auch betonen, dass ich ohne die Zusammenarbeit mit meinen Freunden und Kollegen diesen Beweis niemals hätte führen können – vor allem nicht ohne Sam Raskin, der nach 2022 einen Großteil der Arbeit übernommen hat.“ Aber während Gaitsgory sich bescheiden gibt, muss man doch erwähnen, dass er nicht ganz zufällig als Preisträger ausgewählt wurde. So hat er diesem Beweis drei Jahrzehnte seines Schaffens gewidmet, die Arbeit daran stets vorangetrieben, hat seine Freunde und Kollegen inspiriert und ausgebildet – einige der Co-Autoren waren seine Schüler –, und schließlich hat er auch die Hauptarbeit bei der Ausarbeitung der finalen Publikationen übernommen.

Das alles klingt ein bisschen so, als sei ihm die Mathematik in die Wiege gelegt worden. Aber das stimmt nur zum Teil. „Mein Vater ist Mathematiker und hätte sich natürlich sehr gefreut, wenn ich mich schon als junger Bursche für die Mathematik interessiert hätte“, erzählt Gaitsgory. Doch er spielte lieber Schach, und zwar sehr ambitioniert. „Im Alter von zehn bis vierzehn Jahren war das mein liebstes Hobby, und in der Schule war ich zwar gut in Mathematik, hatte aber keine wirkliche Passion dafür.“ Mit 14 Jahren nahm er dann an der Physikolympiade teil und begeisterte sich für die Knobelei an den schwierigen Aufgaben. Er nahm sich vor, Physik zu studieren.

Doch sein Lebensweg sollte eine andere Wendung nehmen. Damals lebte er mit seinen Eltern und seiner jüngeren Schwester noch in der früheren Sowjetunion. Die mathematisch-physikalische

→

BESUCH BEI

DENNIS
GAITSGORY



FOTO: CHRISTOPH SEELBACH / MPG

41

Tolle Aussicht, aber trubelig: Dennis Gaiatsgory forscht am Max-Planck-Institut für Mathematik, das vis-à-vis vom Münster in der Bonner Innenstadt liegt. Um in Ruhe über Mathematik zu sprechen, sucht er aber auch gerne mal Abgeschiedenheit in der Natur.

Ausbildung dort war zwar sehr gut, aber die Lebensumstände waren es nicht. Als er knapp 16 Jahre alt war, wanderte seine Familie nach Israel aus und zog nach Tel Aviv. Dort erwartete Dennis Gaitsgory zwar ein besseres Leben, aber er beherrschte noch kein Hebräisch. In der Sprache der Mathematik konnte er jedoch von Anfang an mitreden. Das erleichterte es ihm, an einem Spezialkurs für besonders talentierte Schüler teilzunehmen, den die Universität von Tel Aviv anbot – zwar nicht in Physik, aber in Mathematik. Das Programm entsprach einem Mathematikstudium. „Daran nahmen einige Mathe-Asse teil, die schon wesentlich weiter waren als ich“, erläutert Gaitsgory. „Dort traf ich auch Alexander Braverman, der ebenfalls aus der Sowjetunion stammte. Wir freundeten uns an, und der Kontakt mit ihm sowie der Kurs an der Tel Aviver Universität überzeugten mich endgültig, zur Mathematik zu wechseln.“

Die Heranwachsenden stürzten sich mit Eifer in die Materie und stachelten sich gegenseitig zu immer besseren Leistungen an. „Es war ein sehr inspirierendes Umfeld, umgeben von den besten Talenten der Region und unterrichtet von engagierten Professoren, die uns richtig herausforderten“, erinnert sich Gaitsgory. Und die Anforderungen waren hoch. „Normale Mathematikstudenten mussten in den Abschlussprüfungen mindestens 60 von 100 Punkten erzielen, die Schüler aus unserem Spezialkurs aber 80, was wesentlich schwieriger war!“

Damit wollte die Universität sicherstellen, dass nur die besten jungen Leute, die noch im Schüleralter waren, an diesem Kurs teilnahmen, rund ein Dutzend aus jedem Jahrgang. Dies ging ja auch mit dem Privileg einher, dafür auf viele normale Unterrichtsstunden verzichten zu können. Die Abschlussprüfungen, auch in Hebräisch, mussten die Schüler natürlich absolvieren. Doch auf dem Weg dahin gewährte man ihnen große Freiheiten. Schließlich kamen viele Schüler aus der Sowjetunion und sprachen noch kaum Hebräisch. „Ich muss sagen, auch angesichts meiner Erfahrung in vielen Ländern und auch in Deutschland, dass ich von der didaktisch geschickten Handhabung der Schule und Universität in Tel Aviv immer noch sehr beeindruckt bin“, sagt der Forscher. „Speziell aus dem Mathematikprogramm sind viele bekannte Wissenschaftler hervorgegangen, und gehen es bis heute noch.“

In seiner freien Zeit las er mathematische Fachbücher oder tauschte sich mit seinen Mitstreitern über mathematische Theorien und Beweise aus. Mit 17 hatte er das Abitur in der Tasche. Doch dann

näherte Gaitsgory sich einer für ihn geradezu bedrohlichen Lebensphase: dem Militärdienst, der in Israel obligatorisch ist und für Männer drei Jahre dauert. „Mittlerweile war ich so tief in die Mathematik eingetaucht, dass ich mir eine so lange Zeit ohne sie kaum vorstellen konnte“, sagt er. Doch er hatte wieder Glück: Damals herrschte aufgrund der zahlreichen Zuwanderer kein Mangel an Rekruten, und er konnte den Militärdienst umgehen und sich gleich der Mathematik widmen und studieren.

„Dieser Übergang bedeutete für mich überhaupt keinen Bruch, ich machte einfach da weiter, wo ich mit dem Abitur aufgehört hatte“, sagt er. Sein Betreuer war mittlerweile Joseph Bernstein, ein international renommierter Mathematiker, zu dessen Studierenden neben Gaitsgory auch einige andere heutige Koryphäen zählten. Es war eine kleine Gruppe junger Leute, die sich damals wie eine verschworene Gemeinschaft der Mathematik widmete. „Wir lernten schlicht alles, was Bernstein uns vorschlug, und belegten eine ziemlich wahnsinnige Anzahl von Kursen“, meint er mit einem Schmunzeln. „Und es fühlte sich für uns gar nicht wie ein Studium an, wir machten einfach die ganze Zeit das, was uns faszinierte, und das war eben Mathematik.“ Anfangs ging es noch um eine möglichst breite Ausbildung in den mathematischen Grundlagen.

In dieser Zeit kam er auch mit der geometrischen Langlands-Vermutung in Kontakt, die sein späteres Berufsleben prägen sollte. Er wusste kaum etwas darüber, als er einen Vortrag über diese Hypothesen hörte. Gleich war er Feuer und Flamme für das Thema. Denn er spürte, dass dies ein sehr tiefes und anspruchsvolles Gebiet der Mathematik war, das zudem genau seinen persönlichen Interessen und Fähigkeiten entsprach. Er spezialisierte sich auf diese Fragen und promovierte auch darin.

Doch bevor wir uns über die Langlands-Vermutung austauschen, unterhalten wir uns noch über seinen Weg nach der Zeit in Tel Aviv. Es folgte die übliche Postdoc-Phase, die ihn an verschiedene Stationen führte. Insgesamt zwei Jahre verbrachte er in Princeton, wo er auch die Zusammenhänge zwischen den abstrakten Konzepten der Mathematik und den Theorien der Teilchenphysik studierte. Deshalb musste er sich während des Postdocs auch mit der theoretischen Physik beschäftigen. „Das war extrem hart für mich, weil die Art und Weise, wie Mathematiker und Physiker Probleme betrachten, so unterschiedlich ist“, sagt er. Physiker rechnen einfach drauflos und versuchen irgendwie, die Geschehnisse in der Natur nachzuvollziehen. „Wir Mathe-

matiker hingegen überlegen zunächst einmal, ob eine Größe wohldefiniert ist und ob eine Aussage richtig oder falsch ist“, sagt Gaitsgory und fügt halb zerknirscht, halb lachend hinzu: „Ich habe es nie geschafft, mir die physikalische Denkweise zu eigen zu machen!“ 2001 wurde er Professor an der University of Chicago, 2005 dann an der Harvard Uni-

großes Hobby ist der Tango. Er ist ein leidenschaftlicher Tänzer, der stundenlang auf Tanzevents verbringen kann. Dort kann er von der Mathematik abschalten und ganz in die Musik und die Bewegung eintauchen. Er liebt vor allem das klassische Tango-Repertoire der Nachkriegszeit und ist manchmal auch selbst als Tango-DJ unterwegs.

„Das Denken über Mathematik können passionierte Forscher wie ich nicht einfach abschalten.“

versity. Dort erhielt er den Ruf zum Direktor am Max-Planck-Institut für Mathematik, dem er 2021 nach reiflicher Überlegung folgte.

Die Umgebung hat einiges zu bieten. In Bonn macht er gerne Fahrradtouren am Rhein. Auf die Frage nach dem Institut antwortet er etwas ausweichend, die Lage sei sehr zentral, gleich neben dem Münsterplatz. Die Aussicht sei toll. Doch man merkt, dass ihm eher die Ruhe liegt und nicht der Trubel und die laute Musik im Stadtzentrum. Deshalb trifft er Besucher und Kollegen gerne auch mal im Grünen, um dort in Ruhe über Mathematik zu sprechen.

Und er interessiert sich keineswegs nur für seine Wissenschaft. „Die Mathematik spielt natürlich eine sehr wichtige Rolle in meinem Leben, und das Denken über Mathematik können passionierte Forscher wie ich nicht einfach abschalten“, erzählt er. Seine Frau und die beiden Söhne hätten sich schon daran gewöhnt, wenn er im Alltag manchmal etwas geistesabwesend sei, weil er gerade über mathematische Probleme nachdenke. Dieses unermüdliche wissenschaftliche Grübeln habe in seiner Jugend begonnen, und das habe sich bis heute nicht geändert.

Das heißt aber nicht, dass es in seinem Leben nichts anderes gäbe. In seiner Freizeit geht er etwa in die Kletterhalle. „Diesen Sport habe ich vor einigen Jahren für mich entdeckt, und mittlerweile gehen wir auch zusammen mit einigen Studenten dort hin“, sagt er. „Nebenbei reden wir natürlich auch über mathematische Probleme, worüber sonst? Aber wir achten schon darauf, dass dabei keiner abstürzt“, fügt er mit einem Schmunzeln hinzu. Sein zweites

Doch seine größte Leidenschaft gilt natürlich der Mathematik. Seine Forschungsarbeit zu erklären ist allerdings nicht einfach. An dem Beweis der geometrischen Langlands-Vermutung haben insgesamt neun Autoren mitgewirkt. „Außerhalb dieses Teams gab es weltweit bis zur Publikation vielleicht nur gut eine Handvoll Experten, die den Beweis verstehen“, schätzt er. Nicht zuletzt der Breakthrough Prize hat jedoch viele Kollegen neugierig gemacht, sodass Gaitsgory und seine Mitstreiter nun weltweit Workshops halten, um das Gebiet besser zugänglich zu machen. Von den neu entwickelten Methoden könnten auch andere Gebiete der Mathematik profitieren.

Nun wurde dieser Beweis in zahlreichen Medienberichten mit allen möglichen Dingen verglichen – unter anderem als die mathematische Version des Steins von Rosette bezeichnet. Dieser ermöglichte seinerzeit die Entzifferung der ägyptischen Hieroglyphen, weil er zusätzlich eine Übersetzung auf Griechisch und Demotisch enthielt. Andernorts wurde das Langlands-Programm, das zum Beweis der verschiedenen Varianten der Langlands-Vermutung formuliert wurde, als die „große vereinheitlichte Theorie“ der Mathematik bezeichnet. Gaitsgory ist mit all diesen Begriffen unzufrieden, weil sie den Inhalt seiner Arbeit überstrapazieren.

„Langlands hatte vor über einem halben Jahrhundert die Idee, dass einige weit voneinander entfernte Gebiete der Mathematik sich aufeinander beziehen lassen“, sagt er. „Doch das heißt nicht, dass sie sich einfach so ineinander übersetzen lassen, wie mit einem Wörterbuch von einer Sprache in eine andere.“ →

Die ursprüngliche Langlands-Vermutung bezog sich auf die Verknüpfung der Arithmetik, also der Lehre von den Zahlen, mit der Analysis, die Funktionen beschreibt. Wie sich herausstellte, lässt sich auch für die Geometrie eine solche Vermutung formulieren. „Es geht hier darum, in bestimmten, abstrakten geometrischen Räumen fundamentale Symmetriebeziehungen zu untersuchen“, erklärt er. „Dabei stellt sich heraus, dass es zwei verschiedene Wege gibt, mit denen man diese mathematischen Probleme lösen kann. Unser Beweis zeigt nun, dass diese beiden Wege letztlich austauschbar sind.“ Es handele sich

möchte er die Begeisterung für die Mathematik und Hartnäckigkeit bei der Forschung auch an die junge Generation herantragen. Angehenden Mathematikern rät er, sich nicht von großen Problemen einschüchtern zu lassen. „Oft macht man monatelang nur winzige Fortschritte, Schritt für Schritt, das ist eben die Arbeit eines Mathematikers“, meint er. Und man müsse sich auch keine Sorgen machen, wenn man nicht schon mit 16 Einblicken in die höhere Mathematik habe. Das könne durchaus auch erst mit über 20 Jahren geschehen.

„Oft macht man monatelang nur winzige Fortschritte, das ist eben die Arbeit eines Mathematikers“

44

also nicht um eine Übersetzung, sondern um den Nachweis einer tiefliegenden Äquivalenz in den abstrakten Räumen. Damit ist nur ein – wenn auch ein wichtiger – Aspekt der geometrischen Langlands-Vermutung bewiesen. Das macht Mut, auf diesem Weg voranschreiten zu können. Sowohl die geometrische als auch die ursprüngliche Variante der Langlands-Vermutung dürften von diesem Beweis profitieren. Damit haben Gaißgory und seine Mitstreiter eine ganze Reihe von Türen für diesen Zweig der Mathematik aufgestoßen.

Zunächst einmal muss die mathematische Forschungsgemeinde aber den Beweis verdauen. In fünf Publikationen auf insgesamt fast 1000 Seiten sind die Ergebnisse zusammengefasst. „Ich habe den größten Teil davon selbst geschrieben, unter anderem als ich nach einem Skiunfall ans Bett gefesselt war“, erzählt er. Fast anderthalb Jahre hat es gebraucht, alles auf Papier zu bringen. Die Co-Autoren hatten dabei auch die Aufgabe, alles peinlichst genau auf Stimmigkeit zu prüfen.

Doch wie geht es nun weiter, nachdem er diese Lebensaufgabe gemeistert hat? „Ich habe schon eine Reihe von Ideen für neue Projekte“, sagt er. „Natürlich möchte ich auch weiter zum Langlands-Programm arbeiten, aber nicht ausschließlich.“ Nicht zuletzt

Speziell für angehende Mathematikerinnen hat er einen ungewöhnlichen Rat parat: „Ignoriert einfach die Jungs! Junge Männer haben oft einen sehr kompetitiven Charakter, der sich auch im Auftreten und einer gewissen Ellbogenmentalität zeigt“, sagt er. „Das kann man ihnen nicht ohne Weiteres verbieten, ohne ihre berufliche und akademische Entwicklung zu hemmen, aber das sorgt auch dafür, dass sich gerade in den ohnehin hochselektiven abstrakten Wissenschaften junge Frauen leider oft unwohl fühlen.“ Sein Appell richtet sich deshalb auch an das Lehrpersonal an Schulen und Universitäten, es Mädchen einfacher zu machen. Zu lange habe man es dem weniger aggressiven Geschlecht erschwert, einen Weg in die Wissenschaft zu finden.

Aber vor allem soll einem die wissenschaftliche Arbeit Freude bereiten. „Ein mathematisches Problem ist wie ein riesiges Puzzle, nur dass es eben kein Bild auf der Vorderseite der Puzzle-Box gibt, das einem sagt, wie das endgültige Bild auszusehen hat“, sagt er. Stattdessen müsse man die Lösung selbst entwickeln. Und man müsse Befriedigung bei dieser endlosen Puzzelei empfinden, sonst werde man auf Dauer in der Mathematik nicht glücklich. Und so beschließt er unser Gespräch scherzhaft: „Spaß an der Sache ist also eine zugleich notwendige und hinreichende Bedingung!“ ←

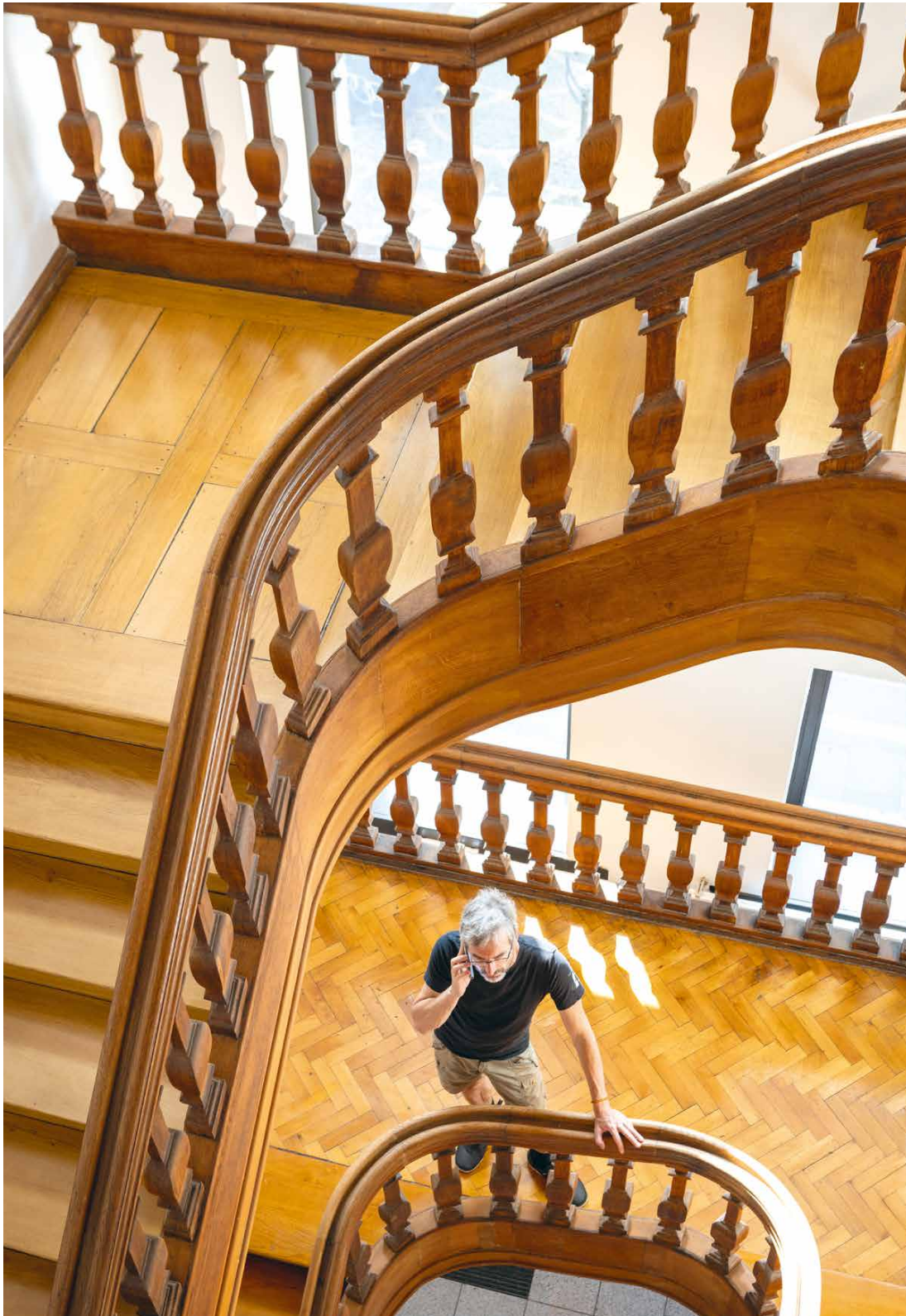


FOTO: CHRISTOPH SEELBACH / MPG

Ziemlich eingespannt: Gaitsgory empfindet Befriedigung bei mathematischer Puzzelei, als Direktor muss er aber auch viel organisieren. Seitdem er den Breakthrough Prize gewonnen hat, erfährt seine Forschung zudem viel mehr Aufmerksamkeit von außen.



BILD: NATIONAL INSTITUTE OF GENETICS/CC-BY-4.0

ZWEITER BLICK

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR
BIOLOGISCHE INTELLIGENZ

Wie entscheiden Zebrafische? Da Körper und Gehirn der nur wenige Millimeter großen Larven der Fische weitgehend durchsichtig sind, lässt sich die Aktivität der Nervenzellen von außen beobachten. Zeigt man einer Larve auf einem Bildschirm schwarze Punkte, die ein Objekt auf Kollisionskurs simulieren, weicht sie manchmal aus und manchmal nicht. Wie sie sich entscheidet, wird unter anderem davon beeinflusst, wie hungrig sie ist: Hungrige Larven sind meist mutiger – schließlich könnte der Punkt ja auch etwas Essbares sein. Das Bild auf dieser Seite zeigt einen kleinen Teil der Nervenzellen im sogenannten Tectum, einem Teil des Mittelhirns der Larven (grau unterlegt). Hier wird die Entscheidung getroffen, wohin das Tier schwimmen wird.

47

BILD: DOMINIQUE FÖRSTER/MPI FÜR BIOLOGISCHE INTELLIGENZ

APPGEBLÜHT

TEXT: CLAUDIA CHRISTINE WOLF

48

Gänseblümchen, Butterblume, Löwenzahn. Sehr viel weiter reicht die botanische Artenkenntnis vieler Menschen heute nicht mehr. Doch eine App schafft Abhilfe. Flora Incognita liefert innerhalb von Sekunden den korrekten Namen nahezu jeder Pflanze, auf die man in Mitteleuropa treffen kann. Jana Wäldchen vom Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena ist an der Entwicklung der KI-gestützten App maßgeblich beteiligt, mit der sich auch wichtige Daten zum Zustand der Natur gewinnen lassen.

Wer durch das Kyffhäusergebirge in Thüringen wandert, entdeckt entlang der Äcker am Südrand des Höhenzugs mit etwas Glück eine seltene Schönheit: die roten Blüten des Sommer-Adonisröschens. Es ist Jana Wäldchens Lieblingspflanze. Für die aus der Region stammende Biologin ist das nährstoffarme, kalkhaltige Böden liebende Ackerwildkraut ein Stück Heimat und zugleich ein Beispiel für eine Art, die aufgrund der intensiven Landwirtschaft selten geworden ist. Auch sonst lassen sich

entlang der Wanderwege viele weitere botanische Schätze entdecken. Vielleicht ist Wäldchen deshalb daran gelegen, Menschen für die am Wegesrand wachsende Flora zu sensibilisieren. Schließlich kann man nur schützen, was man kennt.

Und Schutz brauchen die Pflanzen dringend, denn weltweit ist die Artenvielfalt im Sturzflug: Lebensräume verschwinden, Böden werden überdüngt, und Pestizide vernichten viele Wildpflanzen. Hinzu kommt, dass auch das Wissen über die Flora schwindet. Immer weniger Menschen kennen Pflanzen wie den Scharfen Hahnenfuß, die Gewöhnliche Vogelmiere oder die Echte Nelkenwurz. Dass eine Wiese ein komplexes Ökosystem ist, in dem Dutzende von Arten eine Gemeinschaft bilden, ist ebenfalls kaum bekannt. Für das Phänomen gibt es sogar eine Bezeichnung: „Plant Blindness“, Pflanzenblindheit. Sie beschreibt die Tendenz des Menschen, Pflanzen in der Umgebung kaum wahrzunehmen und ihre Bedeutung für Ökosysteme zu unterschätzen. Schwindende Artenkennt-

nisse sind nicht nur in der allgemeinen Bevölkerung zu beobachten. Eine Untersuchung des Bund Naturschutz in Bayern zeigte, dass auch die Zahl der Menschen in den letzten 20 Jahren um mehr als 20 Prozent zurückgegangen ist, die sich privat, ehrenamtlich oder beruflich mit einer Tier- oder Pflanzengruppe befassen und Daten zu einzelnen Arten sammeln.

Da erscheint es paradox, dass ausgerechnet künstliche Intelligenz (KI) eine Brücke zurück zur Natur schlagen und dazu beitragen soll, sie zu bewahren. Flora Incognita erkennt unterschiedlichste Pflanzenarten dank KI innerhalb von Sekunden. Und das tut die frei verfügbare App so zuverlässig, dass sie seit ihrer Veröffentlichung 2018 über zehn Millionen Mal heruntergeladen worden ist. Seit der Einführung der App haben Nutzerinnen und Nutzer über 60 Millionen Bestimmungsanfragen zu mehr als 10 000 Pflanzenarten gestellt. Mit der App können Menschen Pflanzen einfach bestimmen. Dadurch nehmen sie nicht nur die Artenvielfalt um sich herum besser wahr. Die Beobach- →

WISSEN AUS

— UMWELT & KLIMA

Den Klatschmohn mit seinen unverwechselbar knallroten Blüten können die meisten Menschen auch ohne digitale Unterstützung erkennen. Bei selteneren und weniger auffälligen Pflanzenarten hilft die App Flora Incognita von Jana Wäldchen und ihrem Team bei der Bestimmung.

tungsdaten sind zudem eine wichtige Datenquelle für die Forschung. Forschende können so erkennen, wo welche Pflanzen vorkommen, wann sie blühen und Samen bilden. Mit solchen Informationen lassen sich die Auswirkungen des Klimawandels verfolgen, das Verschwinden von Arten sowie das Auftreten neuer Spezies dokumentieren und daraus Schutzmaßnahmen entwickeln.

Eine Portion Neugier, eine Pflanze, ein bis drei Schnappschüsse mit der Mobiltelefon-Kamera – mehr braucht es nicht, um mit Flora Incognita eine Pflanze zu bestimmen. Blitzschnell schlägt die App mögliche Arten vor und sortiert sie nach dem Grad der Übereinstimmung zwischen gespeicherten und fotografierten Merkmalen. Zu jeder Art gibt es einen Steckbrief mit Angaben zu Aussehen, Vorkommen und Schutzstatus. Wanderungen und Spaziergänge können so zu kleinen botanischen Exkursionen werden. Nutzerinnen und Nutzer können aber auch gezielter vorgehen und für wissenschaftliche Projekte Daten sammeln.

50

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Die kostenlose KI-gestützte App Flora Incognita identifiziert Pflanzen anhand von Fotos, die von Nutzerinnen und Nutzern hochgeladen werden. Sie kann bislang 32 000 Pflanzenarten sicher erkennen.

Flora Incognita basiert auf einem neuronalen Netzwerk, das die Merkmale von Pflanzen selbst erlernt und somit automatisch erkennt.

Die App soll Menschen die Vielfalt der Natur näherbringen. Auch Forschende können die Daten nutzen – beispielsweise, um jahreszeitliche und geografische Veränderungen infolge des Klimawandels, wie etwa die frühere Blüte vieler Pflanzen, zu erkennen und Schutzmaßnahmen zu entwickeln. Naturschutzbehörden profitieren zum Beispiel bei der Dokumentation invasiver Arten.

Mit ihrer App kann Jana Wäldchen innerhalb weniger Sekunden bestimmen, zu welcher Art eine Pflanze gehört. Zu jeder Art gibt es einen Steckbrief mit Informationen zu Verbreitung, Eigenschaften und Schutzstatus. Nutzerinnen und Nutzer können ihre gesammelten Pflanzenfunde in einer persönlichen Beobachtungsliste speichern und sie auf einer Karte anzeigen lassen.

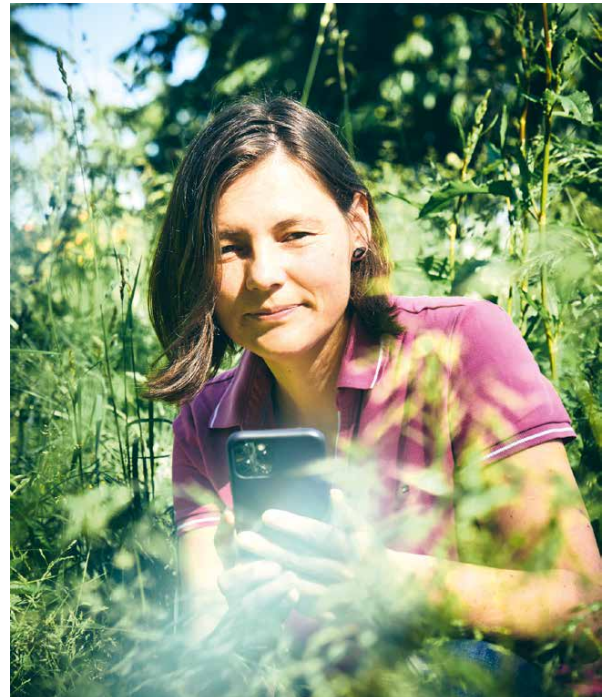


FOTO: HANNES WIEDEMANN

Im Projekt „Kastaniendetektive“ in Kooperation mit Forschenden der Universität Göttingen etwa wurden im Sommer 2024 binnen zweier Monate 30 000 Fotos von Kastanienblättern hochgeladen. Die Bilder sollen dabei helfen, eine KI zu entwickeln, die blattfressende Insekten wie die Miniermotte automatisch erkennt, um diese frühzeitig zu identifizieren und langfristig schnelle Gegenmaßnahmen einzuleiten. Darauf aufbauend werden im Projekt „Der Walddoktor“ weitere Schäden an Rinde und Blättern dokumentiert. Auch hier gilt es, umfangreiches Trainingsmaterial zu sammeln, damit die Software Schäden an Bäumen erkennen kann

Die Düfte von Pflanzenarten dokumentieren Nutzerinnen und Nutzer in einem gemeinsamen Projekt mit dem Max-Planck-Institut für Chemie: Duft Incognita. Dabei soll untersucht werden, welche Pflanzenarten Gerüche in unsere Umwelt bringen und ob diese angenehm oder stechend, stark oder schwach sind. Im seit November 2024 laufenden Projekt PollenNet dokumentieren Bürgerwissenschaftlerinnen und -wissenschaftler die

Blüte der Gemeinen Hasel und der Hänge-Birke. Auch diese Bilder dienen der Entwicklung einer KI, die anhand von Blütenbildern den Pollenflug vorhersagen soll, um Allergikern eine rechtzeitige Vorbereitung zu ermöglichen.

Am Max-Planck-Institut leitet Jana Wäldchen zusammen mit dem Informatiker Patrick Mäder von der Technischen Universität Ilmenau ein interdisziplinäres Projektteam zur Weiterentwicklung der App. „Eine automatisierte Bestimmung von Pflanzen war lange Zeit nahezu unmöglich“, sagt Wäldchen. Zunächst mussten die Forschenden festlegen, welche Merkmale einer Art für deren Bestimmung wichtig sind: die gezackte Kontur oder die Aderung eines Blattes etwa oder die Form und Farbe ihrer Blüten. Die Merkmale mussten sie als Nächstes mathematisch beschreiben. Ein Algorithmus konnte die Merkmale dann dazu nutzen, mit klassischen Verfahren des maschinellen Lernens eine automatische Bestimmung der Arten zu erlernen. Der Prozess ist sehr aufwendig, da relevante Merkmale von Fachleuten definiert, mathematisch beschrieben

und aus den Bildern extrahiert werden müssen. Außerdem sind diese Verfahren weniger flexibel und robust gegenüber der großen Variabilität innerhalb einer Art. Sie stoßen bei vielen Arten oder komplexen Mustern daher schnell an ihre Grenzen. Genau dieses Problem begegnet uns bei der Bestimmung von Pflanzen: Allein in Deutschland gibt es über 10000 Pflanzenarten, weltweit sogar mehr als 330000. Viele Arten unterscheiden sich äußerlich nur minimal, während andere je nach Standort oder Jahreszeit innerhalb der Art unterschiedlich aussehen können.

Deep Learning zur Bilderkennung

Das Projektteam verfolgt deshalb einen anderen Ansatz, denn schließlich soll Flora Incognita eines Tages die meisten Pflanzen weltweit zuverlässig bestimmen können. Die App nutzt sogenanntes Deep Learning zur Bilderkennung. Grundlage sind neuronale Netzwerke, deren Architektur vom Aufbau des menschlichen Gehirns inspiriert ist. Sie bestehen aus künstlichen Neuronen, die Informationen verarbeiten und weiterleiten. Besonders leistungsfähig sind tiefe neuronale Netze (Deep Neural Net-

works), die aus mehreren hintereinandergeschalteten Schichten bestehen. In jeder werden die Eingangsdaten weiter verarbeitet, sodass das Netzwerk immer komplexere Merkmale erkennen kann. Flora Incognita verwendet ein sogenanntes Convolutional Neural Network, ein spezielles tiefes neuronales Netzwerk, das für die Bildverarbeitung optimiert ist. Diese Netzwerke begleiten bereits den Alltag vieler Menschen, sie sind beispielsweise bei der Entsperrung des Smartphones per Gesichtserkennung im Einsatz. Auch in der medizinischen Diagnostik werden sie verwendet, etwa zur Analyse von Röntgen- oder MRT-Bildern.

In der Trainingsphase lernt der Algorithmus, Pflanzenarten anhand typischer äußerer Merkmale zu unterscheiden, etwa eine Rotbuche von einem Feldahorn oder – was deutlich anspruchsvoller ist – verschiedene Grasarten mit oft sehr ähnlichem Erscheinungsbild. Im Gegensatz zu dem ursprünglichen Verfahren, bei dem die Merkmale von Menschen definiert werden mussten, lernt das Modell während des Trainings, die relevanten Muster eigenständig zu erkennen. „Wir haben unser Netzwerk mit einer großen Zahl von Bildern trainiert, damit es verschiedene Strukturen identifizieren kann – von

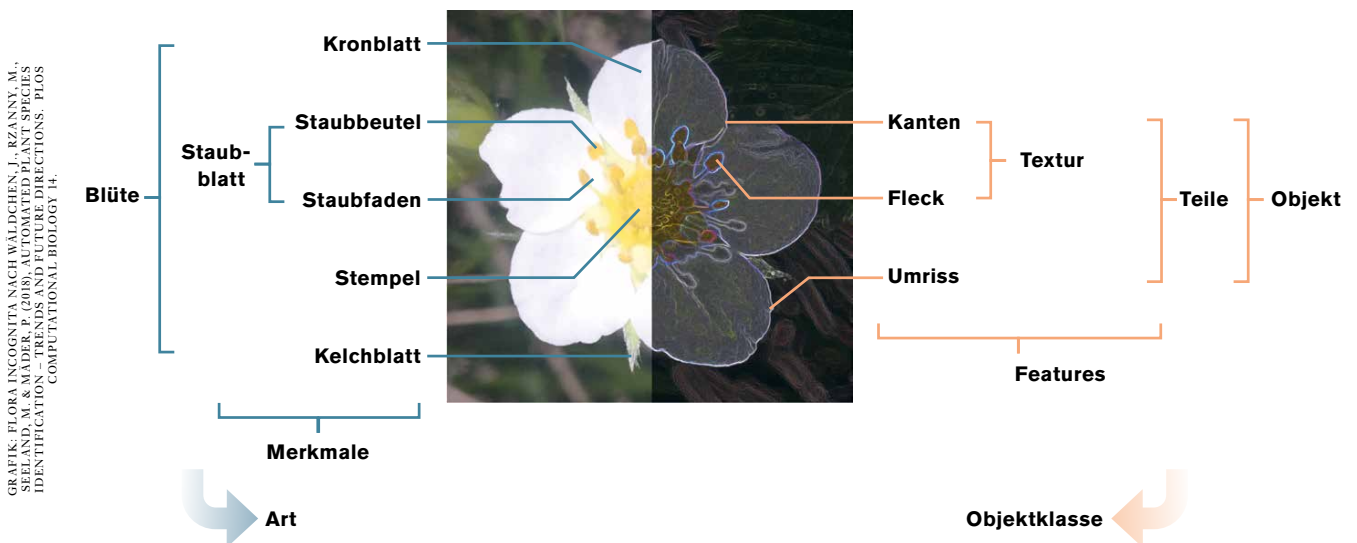
einfachen Kanten und Farben bis hin zu komplexen Merkmalen wie charakteristischen Blattformen oder Blütenmustern“, erläutert Wäldchen.

Verifizierte Trainingsbilder, die von Menschen korrekt und zweifelsfrei den diversen Pflanzenarten zugeordnet wurden, sind deshalb das A und O. Sie stammen von professionellen Artenkennern. „Immer wenn wir genügend neue geprüfte Fotos zusammen haben, lassen wir den Algorithmus damit weiterlernen. Auf diese Weise wird er noch treffsicherer und erkennt immer mehr Arten“, erklärt Wäldchen. Die KI von Flora Incognita ist also nur so gut wie ihr Training. „Es lohnt sich folglich, viel Arbeit in gute Trainingsbilder zu stecken“, betont Wäldchen. Flora Incognita hat auf diese Weise gelernt, mehr als 32000 Pflanzenarten mit einer Genauigkeit von über 90 Prozent zu identifizieren.

Mit den vielen Millionen Beobachtungsdaten ihrer Nutzer stehen der App große Datenmengen zur Verfügung. Diese Daten weisen jedoch Muster auf, die in systematisch erhobenen Datenerfassungen weniger stark ausgeprägt sind. So sind die Nutzer und Nutzerinnen von Flora Incognita eher bei gutem Wetter und in städtischen Gebieten unterwegs als bei Regen und in abgelegenen

51

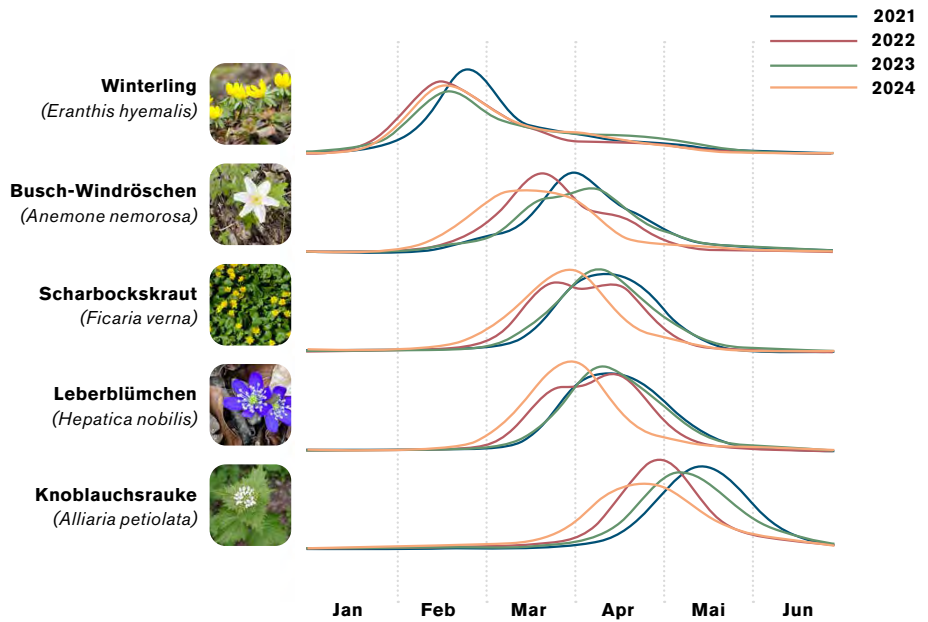
Eine Blüte aus Sicht eines Menschen (links) und eines Computers. Ein Mensch kann die Pflanze anhand von Merkmalen wie Anzahl, Form oder Farbe der Staub- und Kronblätter erkennen. Ein Computer dagegen ordnet den Inhalt des Bildes anhand von Eigenschaften wie Textur und Kanten einer bestimmten Objektklasse zu. Anders als der Mensch berücksichtigt er für die Bestimmung der Art den gesamten Bildinhalt.



Regionen. An Wochenenden und Feiertagen zeigen sich deutliche Spitzen bei der Anzahl der Beobachtungen. Diese stammen eher von Wald- oder Feldwegen als von offenen Flächen. Außerdem werden vor allem auffällige und schön blühende Arten dokumentiert, während unscheinbare Arten im Datensatz stark unterrepräsentiert sind.

Auswirkungen des Klimawandels

Um solche opportunistisch erhobenen Daten zuverlässig auszuwerten, sind vielfältige Analysemethoden erforderlich. Mehrere Studien des Forschungsteams zeigen beispielsweise, dass die Daten von Flora Incognita gut dafür geeignet sind, jahreszeitliche sowie geografische Verschiebungen nachzuweisen. Langfristig sollen auf diese Weise die Auswirkungen des Klimawandels sichtbar gemacht werden. Aber schon jetzt deutet sich an: Die Blühzeiträume vieler Pflanzen können zwischen den Jahren stark variieren. So haben häufig beobachtete Arten wie das Buschwindröschen, das Leberblümchen oder die Knoblauchsrauke bei den besonders milden Temperaturen 2024 früher geblüht als 2021. Bringt die globale Erwärmung die Natur aus dem Takt, kann das weitreichende Folgen haben. Blüht beispielsweise eine Pflanze vor dem Auftreten oder der Aktivitätsperiode ihrer spezifischen Bestäuber entstehen „Bestäubungslücken“ die zu einer verminderten Bestäubungseffizienz, reduzierter Samenproduktion und letztlich zu einem Rückgang der reproduktiven Fitness der Pflanzen führen. „Solche ökologischen Veränderungen wollen wir frühzeitig erkennen“, sagt Wäldchen. Aber nicht nur die Forschenden, sondern auch der behördliche Naturschutz profitiert von den Daten. So konnten Vorkommen invasiver Arten an die zuständigen Behörden weitergeleitet werden, um rechtzeitig geeignete Maßnahmen einzuleiten, denn insbesondere bei der Bekämpfung invasiver Arten ist eine Früherkennung von entscheidender Bedeutung.



Aus den gesammelten Beobachtungen in der App können die Forschenden indirekt auf die Blühzeiträume der Pflanzen schließen. Die Daten zeigen, dass sich diese von Jahr zu Jahr stark unterscheiden können. Fast alle der hier gezeigten Arten haben in den Jahren 2022 bis 2024 mehrere Wochen früher geblüht als 2021.

Was 2014 als kleines Forschungsprojekt zur Pflanzenbestimmung begann, ist heute ein unverzichtbares Werkzeug im Naturschutz. Von den Erfahrungen aus der Entwicklung von Flora Incognita können auch andere profitieren. So haben Wäldchen und Mäder zusammen mit dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung eine KI zur Bestimmung der in Deutschland vorkommenden Schmetterlingsarten entwickelt („Tagfalter-Monitoring“). Darüber hinaus ist eine automatische Bestimmung von Algen in der Entwicklung. Die oft einzelligen Lebewesen sind besonders schwer zu klassifizieren: Weil sie verschiedene Stadien durchlaufen, mutet ein und dieselbe Art oft ganz unterschiedlich an. Ein KI-gestütztes Überwachungssystem bestimmter Arten kann auch beim Monitoring von Gewässern helfen. Und nicht mehr lange, dann soll die KI von Flora Incognita nicht nur einzelne Pflanzenarten analysieren können, sondern ganze Flächen. Forschende könnten dann zum Beispiel auf Fotos die Pflanzenzusammensetzung von Wiesen, Äckern und anderen Lebensräumen deutlich schneller als heute erfassen.

LINKS

FLORA INCOGNITA
floraincognita.de



DUFT INCOGNITA
www.mpic.de/duftincognita



POLLENNET
floraincognita.de/citizen-science-pollenet/



DER WALDDOKTOR
floraincognita.de/walddoktor-misteln



TAGFALTER-MONITORING
web.app.ufz.de/tagfalter-monitoring





Sie würden gerne Wissen verschenken?



Eine Geschenkidee, die Wissenschaft und Kreativität verbindet

Das MAX PLANCK Malbuch enthält 30 spannende Themen von der Nervenzelle bis hin zu Galaxien und Quasaren in der Astrophysik. Es gibt kleine Geschichten zu Orang Utans, die ihre Wunden mit Pflanzensaft versorgen, Flughunden, die Bäume pflanzen können und somit enorm zur Aufforstung beitragen bis hin zum Axolotl, der sogar sein eigenes Herz reparieren kann.

Das Buch eignet sich nicht nur für Kinder, sondern auch für Erwachsene.

Dieses Malbuch finden Sie ausschließlich im
Online-Shop der Max-Planck-Gesellschaft

www.mpg-shop.de



Blick voraus: Im Projekt „FutureU“ treffen Probanden mittels virtueller Realität auf ihr älteres Ich, um mit ihm zu sprechen. Das Model im KI-generierten Bild trägt eine VR-Brille.



DIE ZUKUNFT IM VISIER

TEXT: JANNIK JÜRGENS

Was führt zu kriminellem Verhalten? Am Max-Planck-Institut zur Erforschung von Kriminalität, Sicherheit und Recht in Freiburg untersucht ein Team, wie virtuelle Realität dabei helfen kann, Straftaten zu verhindern. Seine Erkenntnis: Der Blick in die Zukunft entscheidet.

Bevor Aniek Siezenga mir die klobige Brille aufsetzt, die mich in die virtuelle Realität versetzen soll, warnt sie: „Nicht erschrecken, wenn du dein zukünftiges Ich siehst.“ Ich nicke. Dann tauche ich ein in die Welt, die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler neben Aniek Siezenga am Max-Planck-Institut zur Erforschung von Kriminalität, Sicherheit und Recht in Freiburg erschaffen haben.

Das Forschungsprojekt „FutureU“ untersucht, welchen Einfluss die Vorstellungen von der künftigen Entwicklung des eigenen Lebens und die Erwartungen daran – die Zukunftsorientierung – auf die Kriminalität von jugendlichen Straftäterinnen und Straftätern hat. Laut der Theorie des Teams um Direktor Jean-Louis van

Gelder hat die Zukunftsorientierung einen maßgeblichen Einfluss darauf, ob Menschen straffällig werden oder nicht. Wer etwa für einen Schulabschluss lernt, um Medizin zu studieren, wird sich die Chance, Ärztin oder Arzt zu werden, kaum zunichtemachen, indem sie oder er Ladendiebstähle begeht.

Doch Zukunftsorientierung sei nicht bei allen Menschen gleich stark ausgeprägt, sagt Siezenga, die bis Ende 2024 am Max-Planck-Institut in Freiburg geforscht hat. „Man muss zum einen über die geistigen Kapazitäten verfügen, um sich vorzustellen, wie das eigene Leben in zehn Jahren aussehen könnte.“ Außerdem spielten die Umgebung, in der Menschen aufwachsen, und die Lebensumstände eine wichtige Rolle. Wer in einem Umfeld aufwächst, das wenig Wert auf Bildung legt, oder schon früh Kriminalität ausgesetzt ist, hat oft andere Prioritäten und weniger Zeit, um über die eigene Zukunft nachzudenken.

Wie lässt sich die Zukunftsorientierung von jungen Menschen und speziell von Kriminellen verstärken? Die Forschenden schlagen ein Experiment in der virtuellen Realität vor. Ich setze

mir die VR-Brille auf und finde mich an einem Tisch in der obersten Etage eines Hochhauses wieder. Mir gegenüber 55
hängt ein Spiegel, in dem ich mein Gesicht sehe. Aus dem Fenster schaue ich auf die Bürotürme einer Stadt. An der Decke hängt eine Zeitmaschine mit Schläuchen, Lüftern und Rohren, ein digitaler Kalender steht mir gegenüber. Aus dem Tisch ragt ein Hebel hervor. Mit meiner leicht gespenstisch wirkenden Hand ziehe ich daran – und plötzlich springt das Datum auf dem Kalender um zehn Jahre in die Zukunft. Draußen surren Flugtaxis durch die Luft, und Umgebung wie Einrichtung sind futuristisch.

Der Spiegel mit meinem Abbild ist verschwunden. Mir gegenüber sitzt nun mein zehn Jahre älteres Ich. Die Haare sind angegraut, Geheimratsecken ziehen sich rechts und links meine Stirn hinauf, und die Haut ist fahl. Zwar erschrecke ich nicht – Siezenga hatte mich ja gewarnt –, aber mir wird schon etwas mulmig. So werde ich in zehn Jahren mit 46 also aussehen? Ganz unwillkürlich beginne ich, mir vorzustellen, wie ich dann leben werde. Doch bevor meine Überlegungen konkreter werden, er-

→



Simulierte Welt: Das Forschungsteam entwickelte eine künstliche Welt, in der die Studienteilnehmerinnen und -teilnehmer ihr älteres Ich treffen.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Lange Zeit ging man davon aus, dass Kriminalität vor allem durch einen Mangel an Selbstkontrolle entsteht.

Die Fähigkeit, an die eigene langfristige Zukunft zu denken (die Zukunftsorientierung), beeinflusst die Entscheidung, eine Straftat zu begehen.

Mithilfe eines KI-gestützten Chatbots in einer App könnte sich Zukunftsorientierung, trainieren lassen, was zu einer geringeren Straffälligkeit gerade bei Einstiegsdelikten wie Diebstahl führen könnte.

und Täterinnen denken an das schnelle Geld, den Nervenkitzel oder Status und sehen in Straftaten eine Möglichkeit, im Augenblick etwas zu erlangen. Dabei vergessen sie, dass selbst ein kleines Vergehen langfristig sehr negative Folgen haben kann – beispielsweise eine Vorstrafe.

Aber solche Folgen sind weit weg. „Wenn die Vorteile unmittelbar sind und die Kosten eher langfristig, sind Menschen, die sehr auf das Hier und Jetzt fokussiert sind, motiviert, Straftaten zu begehen“, sagt Teamleiter Jean-Louis van Gelder, promovierter Jurist und Psychologe. Genau hier setzt das Projekt „FutureU“ an, das eine Verbindung zum zukünftigen Selbst herstellen will.

Langfristiges Denken wirkt präventiv

scheint ein kleiner Roboter. FI, was für „Future Interviewer“ steht, stellt mir mit piepsiger Stimme einige Fragen: Wo lebst du in zehn Jahren? Was machst du beruflich? Worauf bist du stolz? Was hast du erreicht? Welche Hindernisse hast du überwunden?

Viele Studien zeigen, dass insbesondere impulsive und sensationshungrige Menschen mit einer kurzfristigen Denkweise eher zu Straftaten neigen. Dies beobachtet man besonders deutlich bei Einstiegsdelikten: Die Täter

Bei mir funktioniert das, aber ich neige ohnehin zu langfristigem Denken. Auch bei den Jugendlichen zeigte die virtuelle Zeitreise eine positive Wirkung. „Insgesamt berichten unsere Teilnehmenden, dass sie weniger kurzsichtiges Verhalten zeigen, darunter auch kriminelles“, sagt Jean-Louis van Gelder. Er würde das Programm noch nicht als vollständige Intervention bezeichnen, die bereit für die Umsetzung in der Praxis ist, aber es ist ein wichtiger Schritt in Richtung einer wirksamen Kriminalitätsreduzierung und Resozialisierung.

Den Fokus vor allem auf die Zukunftsorientierung zu legen, könnte man in der Kriminologie als Paradigmenwandel bezeichnen. Lange Zeit ging man davon aus, dass Kriminalität durch einen Mangel an Selbstkontrolle entsteht. Menschen neigten beispielsweise zum Stehlen, wenn sie nicht durch soziale Bindungen wie Familie, Arbeit oder Freunde davon abgehalten würden.

Doch es gab erhebliche Zweifel an dieser Theorie: Warum traf das Selbstkontrolle-Paradigma nicht auf alle Menschen gleichermaßen zu? Einige wurden kriminell, obwohl sie über starke soziale Bindungen verfügten, während andere es nicht wurden, obwohl ihre Bindungen eher schwach waren. Jean-Louis van Gelder geht indes davon aus, dass Zukunftsorientierung, beziehungsweise das Fehlen von Zukunftsdenken, einen entscheidenden Einfluss auf kriminelles Verhalten hat.

Die Idee dazu kam ihm auf einer wissenschaftlichen Konferenz in Chicago, als er mit einem Kollegen spazieren ging, der sich mit den Folgen kurzfristigen Denkens auf Finanzentscheidungen befasste. Dieser Kollege, Hal Hershfield, hatte bereits eine VR-Studie durchgeführt, bei der die Probandinnen und Probanden Abbilder ihres zukünftigen Ichs in einem Spiegel sahen. Hershfields Erkenntnis: Wenn du an die Zukunft denkst, sparst du eher für den Ruhestand.

Van Gelder griff diese Idee auf und testete sie 2013 zusammen mit Hal Hershfield und Loran Nordgren in einer ersten Grundlagenstudie unter Studierenden: Die Probandinnen und Probanden sahen sich in einem virtuellen Spiegel als gealterte Versionen ihrer selbst und erhielten die Möglichkeit, Geld von der Versuchsleitung zu stehlen. Das Ergebnis: Diejenigen, die sich im Spiegel gesehen

hatten, stahlen weniger Geld als die Kontrollgruppe, die sich nicht gesehen hatte. „Es läuft auf etwas hinaus, das wir die ‚Lebendigkeit des zukünftigen Selbst‘ nennen, also die Fähigkeit von Menschen, sich ihr zukünftiges Selbst vorzustellen“, sagt van Gelder. Wenn sie ein klares Bild von ihrem FutureU haben, fühlt es sich für sie psychologisch näher an und beeinflusst eher ihre Entscheidungen.

Sein Team verifizierte die Ergebnisse in einer kontrollierten randomisierten Studie mit 321 Studierenden. In mehreren Sitzungen interagierten diese mit ihrem zukünftigen Selbst in der virtuellen Realität. Am Ende jeder Sitzung wurden die Teilnehmenden gebeten, ihrem gegenwärtigen Selbst Ratschläge zu geben – aus der Perspektive ihres zukünftigen Selbst. „Es ist beeindruckend, wie detailliert und offen manche Probandinnen und Probanden über ihre Wünsche und Erwartungen gesprochen haben“, erinnert sich Aniek Siezenga und kann das erklären: „Obwohl wir eigentlich wissen, dass uns die VR-Brille nur eine virtuelle Welt vorspielt, lässt sich unser Gehirn darauf ein. Denn bei der Wahrnehmung der Welt verlässt sich unser Gehirn in erster Linie auf den Sehsinn, der als primärer Sinn fungiert.“

In einer anderen Situation derselben Studie nutzten die Teilnehmenden eine speziell entwickelte App, um sich mit ihrem zukünftigen Ich zu verbinden und ihre Pläne und Ziele für die Zukunft festzuhalten. „Wir wollten wissen, ob die Interaktion mit einer Smartphone-App auch die Zukunftsorientierung der Studierenden stärken kann“, sagt Studienleiter Jean-Louis van Gelder. Ein integrierter Chatbot kontaktierte sie täglich und stellte ihnen Fragen, die sie zum Nachdenken über die Zukunft anregen sollten. Der Chatbot schickte den Studierenden außerdem Nachrichten mit psychologischen Erkenntnissen, beispielsweise dass sich die Persönlichkeit im Laufe der Zeit verändern kann. Die Teilnehmenden nutzten die App drei Wochen lang und wurden anschließend gefragt, wie lebendig sie ihr zukünftiges Ich wahrnahmen und wie verbunden sie sich mit

ihm fühlten. Außerdem gaben sie an, ob die Intervention sie zukunftsorientierter gemacht hatte und ob sich kurzfristige Verhaltensweisen – wie beispielsweise Rauchen – geändert hatten.

Die Forschungsergebnisse waren gemischt: Die Teilnehmenden fühlten sich stärker mit ihrem zukünftigen Ich verbunden und gaben eine höhere Zukunftsorientierung an, jedoch konnte keine Veränderung ihres kurzfristigen Verhaltens festgestellt werden. „Obwohl es noch Verbesserungspotenzial gibt, unterstreichen die Ergebnisse die Wirkung der Maßnahmen“, sagt Aniek Siezenga. „Es

kann zukunftsorientiertes Denken und Handeln fördern.“ Für das Team ist klar, dass die App noch nachgebessert werden muss. Dank der finanziellen Unterstützung des Europäischen Forschungsrats entwickelt das Team nun einen Chatbot mit künstlicher Intelligenz (KI), der in die Intervention integriert werden soll. „Das Ziel ist es, einen realistischen Gesprächspartner zu entwickeln, der nicht nur nach Skript antwortet, sondern auch auf die Äußerungen der Probandinnen und Probanden eingehen kann“, sagt Direktor van Gelder. So möchten er und sein Team einen wirksamen Beitrag zur Prävention leisten. ←

„Das Fehlen von Zukunftsdenken hat Einfluss auf kriminelles Verhalten.“

JEAN-LOUIS VAN GELDER

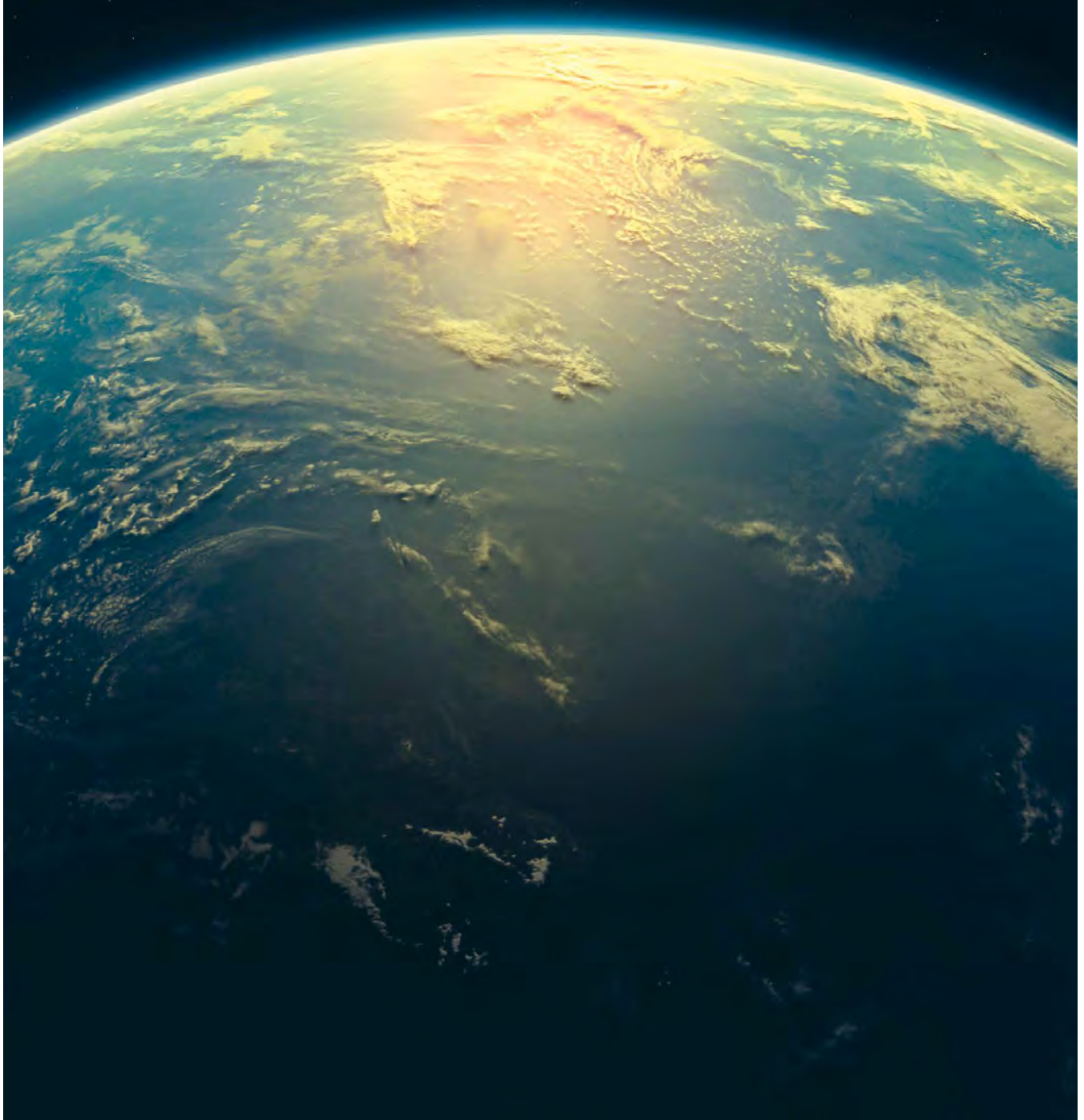
57

Institutsdirektor Jean-Louis van Gelder erforscht, was kriminelles Verhalten bedingt und wie es sich vermeiden lässt – mit virtuellen Welten.



FOTO: BASCHI BENDER

Wundersame Welt: Ein blauer Planet kreist in dieser künstlerischen Darstellung um einen Roten Zwergstern. Ist es eine zweite Erde, eine Wasserwelt oder ein Planet ohne feste Oberfläche wie Neptun, bei dem Methan den blauen Anteil des Sonnenlichts reflektiert? All diese Optionen sind plausibel.



SELTENE ERDE

TEXT: AENEAS ROOCH

Gibt es in den Weiten des Weltalls einen Planeten wie unseren – nicht zu groß, nicht zu klein, nicht zu heiß, nicht zu kalt, aus Gestein und mit einer Atmosphäre, die Leben ermöglicht? Laura Kreidberg und ihr Team am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg suchen mit dem James-Webb-Weltraumteleskop nach einer zweiten Erde. Am überraschendsten ist, was sie dabei nicht finden.

Ein erdähnlicher Exoplanet – der Begriff beflügelt die Fantasie und ruft Bilder aus Science-Fiction-Filmen wach. In der Astrophysik ist er eine nüchterne Kategorie, eine Schublade für alle Planeten jenseits der Sonne, die in etwa so groß und schwer sind wie die Erde, aus Gestein bestehen und in einem solchen Abstand um ihren Stern kreisen, dass auf der Oberfläche flüssiges Wasser möglich ist. Dazu braucht es eine Glocke aus Gasen – die Atmosphäre –, die ihn durch den Treibhauseffekt wärmt und einen ausreichend hohen Druck auf die Oberfläche ausübt, sodass die Ozeane nicht zu kochen anfangen und verdampfen. Laura Kreidberg, Direktorin am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg, sucht in unserer Milchstraße nach solchen Atmosphären.

Aber wie viele gibt es da draußen überhaupt? Ein Blick in unsere direkte kosmische Nachbarschaft zeigt mit Venus, Erde und Mars drei Gesteinswelten, die in kosmischen Maßstäben eine etwa gleiche Größe, aber ganz unterschiedliche Atmosphären haben: Während die Erde eine dünne Atmosphäre hauptsächlich aus Stickstoff und Sauerstoff an sich bindet, herrscht auf der Venus ein erstickendes Treibhausklima unter einer dicken, fast hundert Mal schwereren Hülle aus Kohlendioxid, der Mars mit seiner hauchdünnen Gasschicht bietet hingegen ein eher sandiges Weltall-Ambiente. Spuren des Lebens finden sich weder auf Venus noch Mars. Doch selbst auf der Erde deutet von der Internationalen Raumstation aus betrachtet bei Tag kaum etwas auf Leben hin – erst bei Nacht erstrahlt ein Netz aus leuchtenden Städten und Straßen. Und erst als die Esa-Sonde Juice im Herbst 2024 beim Vorbeiflug ihre Messinstrumente auf die Erdatmosphäre richtete und Spuren von Leben in der Erdatmosphäre fand, war der erste messtechnische Nachweis von Leben auf einem Planeten aus dem Weltall gelungen. Aus Lichtjahren Entfernung wäre dieser Befund aber so nicht möglich gewesen.

Planeten aufzuspüren, die außerhalb des Sonnensystems durch die Finsternis ziehen – Hunderttausende bis Millionen Mal so weit von uns entfernt wie die Sonne –, ist ein kompliziertes Unterfangen. Schließlich sind sie viel kleiner und leuchten viel schwächer als ihre Sterne, etwa wenn sie deren Licht in unsere Richtung reflektieren oder selbst Wärmestrahlung aussenden. Es ist zwar spekulativ, aber sogar in unserem Sonnensystem, direkt in unserem kosmischen Hinterhof, könnte sich ein Planet verstecken, der noch nicht mit Teleskopen entdeckt wurde. Wenn es irgendwo dort draußen bewohnbare Welten gibt, sind sie allenfalls als mikroskopische und schwach leuchtende Punkte zu erkennen, die sich im gleißenden Licht des Sterns verbergen. Es ist, als wolle man ein kleines Steinchen im Licht eines Flutlichtstrahlers auf dem Mond ausmachen.

Erst in den 1990er-Jahren wurden die ersten Planeten außerhalb des Sonnensystems entdeckt. Inzwischen kennen Astronominnen und Astronomen fast 6000 Exoplaneten. Nur rund 80 von ihnen, vornehmlich massive Gasriesen, die im Infrarotlicht sichtbare Wärmestrahlung aussenden, wurden direkt fotografiert. Den Rest

59

→

entdeckten Planetenjägerinnen und -jäger nur indirekt und mit großer Raffinesse in den Untiefen der Milchstraße, über 70 Prozent davon mit der sogenannten Transitmethode: Wenn ein Planet von uns aus gesehen vor seinem Stern vorbeizieht, blockiert er einen winzigen Teil des Sternenlichts. Im Extremfall scheint die Gesamthelligkeit des Sterns dabei um wenige hundertstel Prozent abzunehmen, und aus diesem schwachen Flackern lässt sich auf die Größe und Umlaufdauer des Planeten schließen. Die Methode funktioniert freilich umso besser, je größer der Planet ist.

Diese indirekte Messung verrät jedoch nichts darüber, ob erdähnliche Gesteinsplaneten eine Atmosphäre besitzen, weil deren Atmosphäre viel zu dünn ist, um bei der Abschattung des Sternenlichts eine Rolle zu spielen – bei der Erde etwa trägt die Gasschicht nur weniger als ein Prozent zum Gesamtdurchmesser bei. Laura Kreidberg und ihre Kolleginnen und Kollegen nutzen daher einen Trick. Scheint das Licht des dahinterliegenden Sterns durch die Gashölle des umlaufenden Planeten, trifft es dort auf Gasmole-

küle und reagiert mit ihnen: Ob Wasserdampf, Methan oder Kohlendioxid – jedes Molekül hinterlässt im Sternenlicht, im Spektrum aller Farben und Wellenlängen, charakteristische Spuren, und anhand dieser Fingerabdrücke versuchen die Astronominnen und Astronomen, Rückschlüsse darauf zu ziehen, wie die Atmosphäre zusammengesetzt ist.

Für die sogenannte Transmissionsspektroskopie – also die Aufschlüsselung des Sternenlichts, das bei seiner Reise durch die Planetenatmosphäre verändert wurde – nutzen Kreidberg und ihr Team das James-Webb-Weltraumteleskop. „Es ist das fortschrittlichste wissenschaftliche Instrument, das je ins All gebracht wurde“, schwärmt Kreidberg, „es wurde fast drei Jahrzehnte lang entwickelt, und ich habe das Glück, genau zur richtigen Zeit geboren worden zu sein, um damit arbeiten zu dürfen.“ Und auch wenn das gemessene Signal schwach ist, finden sich Fingerabdrücke chemischer Elemente in Welten, die viele Lichtjahre entfernt liegen. „Wir treiben die Messgeräte an ihre Grenzen“, erklärt sie. Ehe Forschende sich an

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

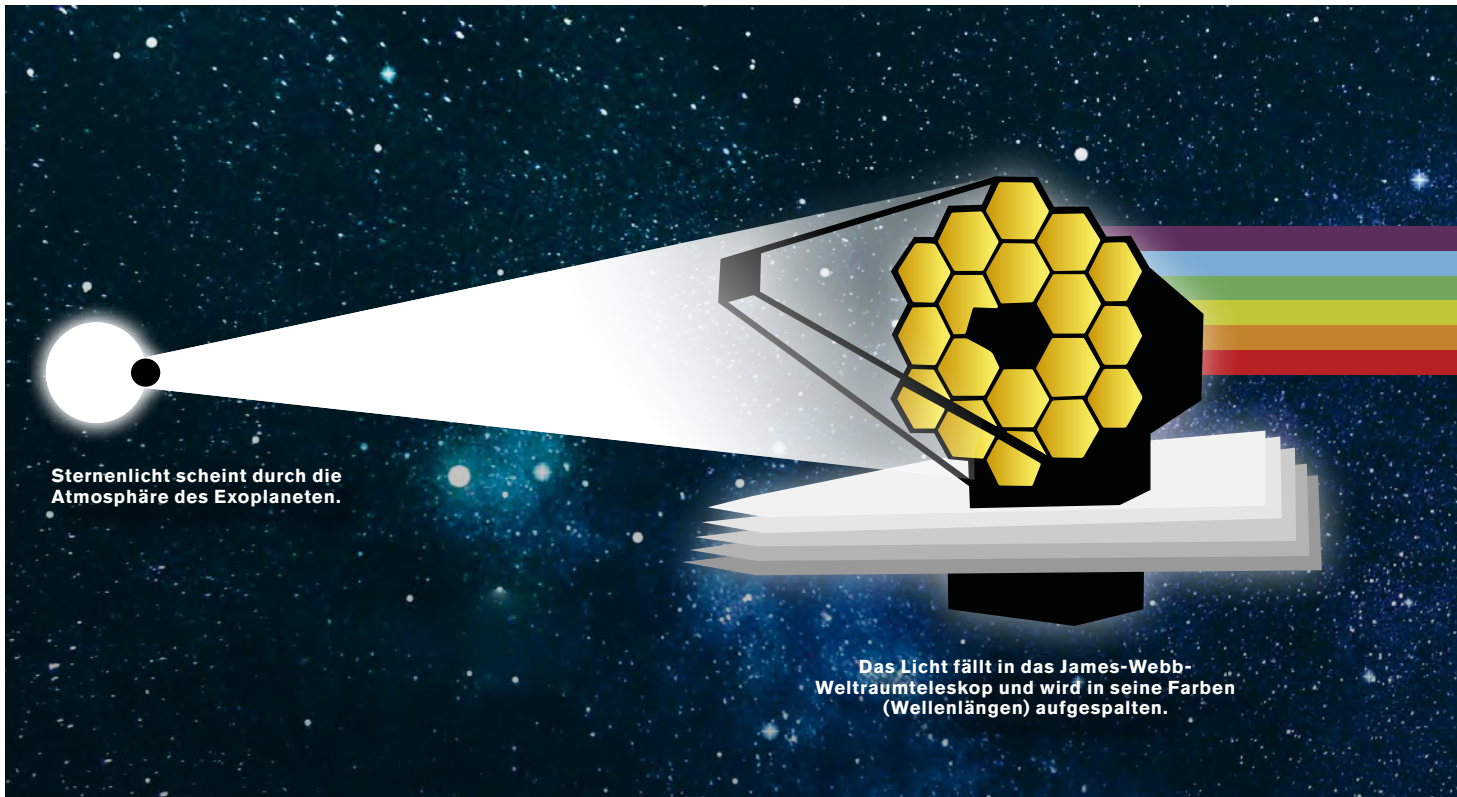
Laura Kreidberg und ihr Team suchen mit dem James-Webb-Weltraumteleskop nach einer zweiten Erde, genauer nach Atmosphären um ferne Gesteinsplaneten.

Je dünner die Atmosphäre, desto schwerer lässt sie sich nachweisen. Fest steht aber: Bei keinem der untersuchten Planeten fanden sie eine dicke Atmosphäre, also eine solche, die der Venusatmosphäre ähnelt.

Die Forschenden konzentrieren sich auf Gesteinsplaneten um Rote Zwergsterne. Dies ist die häufigste Sternklasse in der Milchstraße, aber auch eine temperamentvolle. Womöglich überleben dünnere Atmosphären wie die der Erde nur um weniger aktive Sterne wie die Sonne.

Noch ist unklar, ob erdähnliche Atmosphären um erdgroße Planeten selten sind oder nur schwer zu messen. Künftige Beobachtungen werden zeigen, wie besonders die Erde wirklich ist.

60



GRAFIK: GCO NACH ESA

Sternenlicht scheint durch die Atmosphäre des Exoplaneten.

Das Licht fällt in das James-Webb-Weltraumteleskop und wird in seine Farben (Wellenlängen) aufgespalten.

die Gesteinsplaneten heranwagen, lohnt sich ein Blick auf eine besondere Planetenklasse, die sogenannten Sub-Neptune. Ihre Größe und Dichte liegt irgendwo zwischen Erde und Neptun. Was sie so wertvoll für die Spektroskopie macht: Viele dieser Art haben gewaltige Atmosphären, und je ausgedehnter die Atmosphäre, durch die das Sternenlicht dringt, desto stärker ist das Signal, das die Moleküle der Atmosphäre im Sternenlicht hinterlassen.

Ein Beispiel ist K2-18 b, der einen Roten Zwergstern umkreist. Neben einer Menge Wasserstoff haben Astronominen und Astronomen auch Kohlenstoffdioxid und Methan in den Spektren des James-Webb-Teleskops aufgezeichnet. Wäre die Atmosphäre von K2-18 b bloß so dünn wie die der Erde, wäre es umso schwerer gewesen, die fragilen Spuren der Gase im Rauschen der Daten auszumachen – selbst wenn sie existierten. Im Jahr 2025 kam dann der Aufschrei, der durch die Nachrichten ging: Mögliche Lebenszeichen entdeckt! Tatsächlich gab ein Forschungsteam an, in der Atmosphäre von K2-18 b mög-

licherweise Anzeichen für Moleküle gefunden zu haben, die hier auf der Erde nur pflanzliches Plankton produziert. Laura Kreidberg mahnt zur Vorsicht: „Diese Behauptungen sind vollkommen haltlos.“ Gemeinsam mit vielen Kolleginnen und Kollegen versucht sie seither diesen Hype auf den Boden der Tatsachen zurückzuholen. Denn die Daten sind eigentlich viel zu verrauscht, diese komplexen Moleküle statistisch nicht sicher nachweisbar – wenn sie überhaupt stabil sind: Je tiefer man in eine Atmosphäre eintaucht, desto mehr steigen Druck und Temperatur. Auf der tiefliegenden Oberfläche von K2-18 b könnte es tausend Mal so heiß sein wie auf der Erde. Das ist ein schlechtes Zeichen für DNA und Leben. „Dieser Planet hat definitiv kein Leben!“, schreibt Kreidberg in einem Kommentar im *Scientific American*. Man könnte den Eindruck bekommen, die Wissenschaft sei sich nicht einig, doch das Gegenteil ist der Fall. Kurz nachdem sich die Nachricht von angeblichen Lebenszeichen wie ein Lauffeuer zu verbreiten drohte, hielt die Forschungsgemeinschaft vehement dagegen. Auch wenn viele gern Lebens-

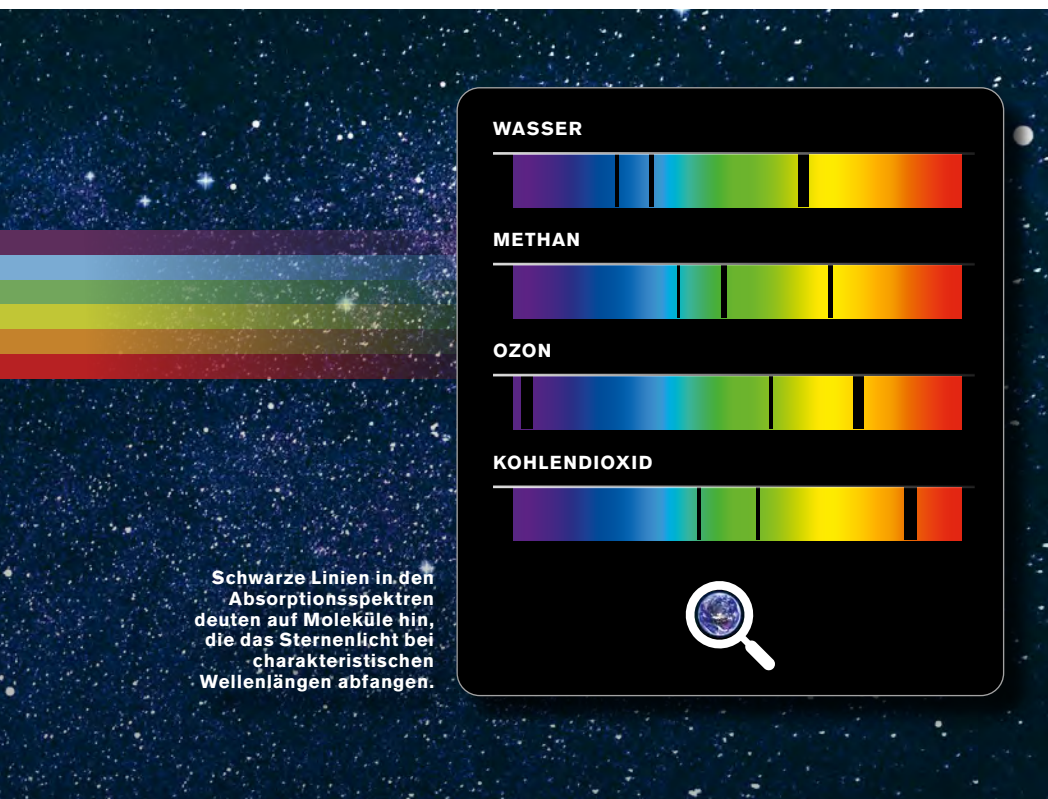
zeichen gefunden hätten, Wissenschaft folgt einer Methode, und die gilt für alle.

Mehrdeutige Ergebnisse

Aber selbst wenn methodisch sauber gearbeitet wurde, bleibt Interpretationsspielraum. Bevor Astronominen und Astronomen aus den Messdaten Schlüsse ziehen, müssen sie diese mit Modellen abgleichen, die mathematisch beschreiben, wie sich das Sternenlicht beim Flug durch die Atmosphäre hindurch verändert, wenn diese sich verschiedentlich zusammensetzt. Je nachdem, welches Modell die Forschenden zugrunde legen, kann ein und derselbe Datensatz zu unterschiedlichen Schlüssen führen, erst recht bei so schwachen Signalen. Deshalb arbeiten in Heidelberg meist zwei Teams unabhängig an denselben Daten, jedes mit einem anderen Modellansatz. „Allgemein gilt es als gute Praxis, mindestens zwei unabhängige Analysen der Daten durchzuführen, um sicherzustellen, dass Schlussfol-

61

→



Mit Durchblick: Forschende richten das James-Webb-Weltraumteleskop auf einen Exoplaneten, der gerade vor seinem Heimatstern vorbeizieht. Strömt das Licht durch die Planetenatmosphäre, hinterlassen die darin enthaltenen Moleküle charakteristische Spuren im Licht des Sterns, das die Kamera des Teleskops aufzeichnet. Die Spektroskopie erlaubt, das Licht in seine Wellenlängen aufzuspalten und die diskreten Signaturen der fernen Atmosphäre sichtbar zu machen, sofern das Signal stark genug ist. Die Regenbogenfarben dienen nur der Veranschaulichung, da hier infrarotes Licht betrachtet wird.

gerungen verlässlich sind“, sagt Laura Kreidberg.

Die Herausforderung, auf diese immensen Distanzen eine Atmosphäre zu entdecken und zu untersuchen, ist gewaltig. Atmosphären sind hochdynamische Systeme, auf der Erde etwa beeinflussen sich Ozeane, Wolken, Pflanzen, Vulkane und Lebewesen gegenseitig, es gibt chemische Reaktionen, Schichtungen, Strömungen, Durchmischungen. Ein so komplexes System aus Hunderten bis Tausenden Lichtjahren Entfernung zu rekonstruieren, ist gewagt. Zumal wenn der Planet vielleicht gerade gar nicht vor, sondern hinter seinem Stern vorbeizieht, während James Webb auf ihn gerichtet ist. „Das ist das, was mich nachts wach hält“, gesteht Kreidberg, „die Sorge, dass wir zur falschen Zeit hinschauen.“ Hinzu kommt: Sollte es da draußen eine zweite Erde geben, die ihren Heimatstern im selben Abstand umkreist wie unsere Erde die Sonne, dann ist ihre Umlaufbahn höchstwahrscheinlich gerade nicht genau so geneigt, dass sie von uns aus gesehen exakt über den Stern führt – eine solche Konstellation tritt nur in fünf von tausend Fällen auf.

Die Venus scheint selten

Bevor man Zeit und Mühe investiert, mit James-Webb-Spektren nach Atmosphären zu suchen, deren Moleküle entweder selbst messbares Licht aussenden oder das durchscheinende Licht des dahinterliegenden Sterns prägen, lohnt sich ein Vorab-Check: Gibt es da überhaupt Hoffnung auf eine Atmosphäre? Um das im Voraus abzuklären, messen Kreidberg und ihr Team die Oberflächentemperatur von Gesteinsplaneten aus dem Helligkeitskontrast zwischen Planet und Stern. Die Forschenden konzentrieren sich dabei auf Planeten, die Rote Zwergsterne umkreisen.

Solche Systeme zu finden ist einfach. Denn dieser Sterntyp ist der häufigste und macht drei Viertel aller Sterne der Milchstraße aus. Außerdem sind Rote Zwergsterne kleiner und nicht so hell wie

die Sonne, was es erleichtert, Planeten um diese Sterne zu vermessen. Und diese Zwergsterne sind vergleichsweise leicht, Gesteinsplaneten umkreisen sie in kürzerem Abstand als die Erde die Sonne. Die dabei wirkenden Gezeitenkräfte führen dazu,

Ikone am Drahtseil:
Laura Kreidberg steht neben einem Modell des Hubble-Weltraumteleskops im Maßstab 1:10. Bevor das James-Webb-Weltraumteleskop die Arbeit aufnahm, war dies das leistungsstärkste Auge im All.



FOTO: ANNA ZIEGLER FÜR MPG

dass solche Planeten den Roten Zwergen häufig dieselbe Seite zeigen – wie der Mond der Erde –, und genau das hilft Kreidberg und ihrem Team bei der Suche nach einer Atmosphäre. Die Planeten besitzen dadurch nämlich eine heiße, ständig bestrahlte Tagseite und eine eiskalte, ewige Nachtseite. Je nachdem, wo sich diese Planeten auf ihrer Umlaufbahn befinden, sind von der Erde aus unterschiedliche Anteile der Tagseite zu sehen, vergleichbar mit den unterschiedlichen Phasen des Mondes. Die Temperaturunterschiede zwischen diesen beiden Seiten nutzen die Forschenden

als diagnostisches Werkzeug: Existiert eine Gashülle, sollte sie die Wärme auf der Planetenoberfläche verteilen, und der Temperaturunterschied zwischen Tag- und Nachtseite wäre gering – so wie bei der Venus. Zeigt sich die Tagseite hingegen extrem heiß

und die Nachtseite eisig kalt, deutet das auf eine nackte Oberfläche ohne Atmosphäre hin. Und das ist der entscheidende Vorteil dieser Temperaturmethode, denn Transmissionsspektren des Sternenlichts sind nicht immer aussagekräftig – vor allem wenn diese keine oder nur schwer messbare Signaturen in sich tragen. Das könnte daran liegen, dass es tatsächlich keine Atmosphäre gibt, Wolken in der fernen Atmosphäre das Signal abschirmen oder dass die Atmosphäre so kompakt ist, dass kaum Licht des dahinterliegenden Sterns auf dem Weg zu uns durch sie dringt.

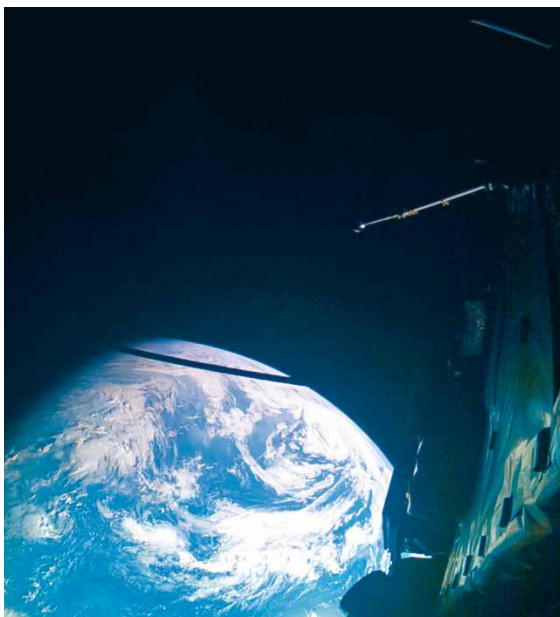
Haben die Heidelberger um Laura Kreidberg auf diese Weise endlich die ersten Spuren einer lebensfreundlichen Atmosphäre auf einer fernen Gesteinswelt entdeckt, endlich die ersten Indizien, dass wir nicht allein im Universum sind? „Leider haben wir schlechte Nachrichten“, sagt Kreidberg, „keiner der Gesteinsplaneten, die wir seit 2024 untersucht haben, scheint eine Atmosphäre zu besitzen – eine dicke Atmosphäre, um genau zu sein.“ Dicke Atmosphären wie die der Venus üben einen vergleichsweise hohen Druck auf die Planetenoberfläche aus und sind mit der Temperaturmethode leicht zu finden. Aber was bedeutet das für die Erde? Wie einzigartig ist sie? Laura Kreidberg formuliert vorsichtig: „Es ist zu früh, um zu sagen, dass die Erde besonders ist. Aber die Venus ist es.“ Dieser Befund klingt zunächst enttäuschend. Jedoch haben Kreidberg und ihre Mitstreitenden bisher nur rund zehn Planeten im Detail analysiert. Es ist eine sehr kleine Stichprobe inmitten der Milli-

arden Planetensysteme, die es in der Milchstraße geben muss, und damit kein Beweis gegen eine zweite Erde. „Nachdem, was wir bisher gesehen haben, halte ich es für das wahrscheinlichste Szenario,

Wir sind echt:

Die Esa-Sonde Juice ist auf dem Weg zu Jupiters Monden, als sie ihre Instrumente am 20. August 2024 testweise auf die Erde richtet. Spektrographen an Bord bestätigen: Die Erde ist bewohnt!

FOTO: ESA/JUICE/JMC



dass zumindest dicke Atmosphären einfach selten sind“, interpretiert die Astronomin. Und es liegt im Rahmen des Möglichen, dass die Gesteinswelten, die sie mit James Webb bisher in den Fokus genommen hat, heiß und dem Weltall ungeschützt ausgeliefert sind.

Die Erde: eine Folge glücklicher Zufälle

Das überrascht. Schließlich gast Kohlendioxid aus dem Inneren von Gesteinsplaneten aus und bleibt, anders als flüchtigere Gase, stabil in der Atmosphäre, selbst unter der intensiven Röntgen- und UV-Strahlung Roter Zwerge, die andere Moleküle über Jahrmillionen wegradiert. Auch die Erde war von einer schweren Hülle des Treibhausgases umgeben, ehe die Fotosynthese vor wenigen Milliarden Jahren das meiste CO₂ abbaute. Die entscheidenden Fragen lauten also: Finden sich keine erdähnlichen Atmosphären um erdgroße Planeten, weil sie nie da waren? Oder weil sie von den temperamentvollen Roten Zwergen inzwischen fortgeweht wurden? Laura Kreidberg blickt optimistisch nach vorn: „In zehn Jahren werden wir die Atmosphären von weiteren 50 Gesteinsplaneten vermessen haben, dann ergibt sich ein deutlicheres Bild, was typisch fürs Universum ist und was nicht.“

Vielleicht ist die Handvoll Planeten, die bisher untersucht wurden, schlicht eine besonders ungünstige Stichprobe gewesen? Möglicherweise braucht es einen ruhigeren Stern wie die Sonne, damit sich um die Gesteinsplaneten eine stabile Hülle bildet. Solche Sterne sind seltener und machen nur etwa 20 Prozent in der Milchstraße aus. Ein sonnenähnlicher Stern alleine dürfte aber nicht reichen. Die Erdatmosphäre könnte auch Ergebnis weiterer kosmischer Zufälle sein: Die Erde ist weder zu groß noch zu klein, weder zu heiß noch zu kalt, sie besitzt ein Magnetfeld, das

GLOSSAR

SPEKTROSKOPIE

Ist ein Verfahren, bei dem ein Instrument das Licht, etwa eines Sterns, in seine Wellenlängen (oder Farben) zerlegt – ähnlich wie bei einem Regenbogen. Bei der Transmissionsspektroskopie dringt Licht etwa durch ein Gas, wobei es bei bestimmten Wellenlängen mit Molekülen oder Atomen des Gases interagiert, diese anregt oder von diesen absorbiert wird.

Daher erscheinen im aufgezeichneten Spektrum Linien bei eben diesen Wellenlängen, welche Rückschlüsse auf die Zusammensetzung des Gases erlauben.

die Gashülle ausreichend vor starken Sonnenstürmen schützt, die auch die Sonne regelmäßig abstrahlt; die Erde hat einen Mond, der für stabile Achsenneigung und Gezeiten sorgt, Ozeane, die CO₂ speichern, eine tektonisch aktive Kruste, die Gase zirkulieren lässt, und hat einen Jupiter in der Nachbarschaft, der mögliche Killer-Asteroiden vom Kurs ins innere Sonnensystem ablenkt. „Was die Erdatmosphäre hat entstehen und bestehen lassen, hat die Wissenschaft noch längst nicht verstanden“, sagt Kreidberg, „der Blick auf andere Planeten und wie sich dort Atmosphären bilden oder nicht, wie sie verschwinden oder bleiben, kann auch hier zur Klärung beitragen.“ Die Suche nach Gesteinsplaneten mit Atmosphäre ist kein simpler Blick durch ein Fernrohr, es ist ein mühevolleres Messen am Rande der technischen Möglichkeiten, eine Spurensuche im Rauschen eines Datenozeans, ein Spiel mit Wahrscheinlichkeiten und Modellen. Jeder Hinweis, den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Tiefen des Alls bergen, bringt uns zudem näher an die Antwort auf eine der grundlegendsten Fragen, die sich Menschen stellen können: Sind wir allein? „In einer Welt, die mit vielen Herausforderungen konfrontiert ist, vom Klimawandel bis zu Kriegen, zeigt diese Forschung, wie besonders die Erde wirklich ist und wie sehr sie geschätzt und geschützt werden sollte“, sagt Laura Kreidberg.

Täuschend echt:
Diese Person existiert
nicht nur im realen
Leben, sondern auch in
der dreidimensionalen
virtuellen Welt. Die
Körperbewegungen
sowie die Gestik
und Mimik dieses
fotorealistischen
Avatars lassen sich am
Computer steuern.



AVATARE AUF AUGENHÖHE

TEXT: KATJA ENGEL

Konferenzen und geschäftliche Besprechungen verursachen beträchtliche CO₂-Emissionen, wenn die Teilnehmenden per Flugzeug anreisen. Digitale Konferenzen mit realistischen Avataren im virtuellen Raum könnten da Abhilfe schaffen. Damit dies mit einem Headset im Homeoffice klappt, perfektionieren Forschende des Max-Planck-Instituts für Informatik in Saarbrücken die digitale Vermessung von Menschen und trainieren damit eine künstliche Intelligenz.

1977 – der erste *Star Wars*-Film macht weltweit Furore und präsentiert auch die Vision einer neuen Kommunikationstechnik: Der Druide R2-D2, der an eine fahrbare Tonne erinnert, spielt in der einfachen Behausung des Jedis Obi-Wan Kenobi auf dem Planeten Tatooine ein Hologramm ab. Es erscheint ein bläulich flimmerndes, auf einen Steinsockel projiziertes Abbild von Prinzessin Leia, Schwester von Luke Skywalker, die mit verzweifelter

Miene um Obi-Wans Unterstützung im Kampf gegen das Imperium von Darth Vader bittet: „Helft mir, Obi-Wan Kenobi. Ihr seid meine letzte Hoffnung!“, tönt es blechern aus dem Roboter. Als der Film in die Kinos kam, war diese Form der Kommunikation reine Science-Fiction, und selbst Videoschaltungen auf zweidimensionalen Bildschirmen waren zu der Zeit nur mit großem Aufwand möglich.

Auch heute, fast 50 Jahre später, haben sich Nachrichten-Hologramme nicht durchgesetzt. Dabei ist es Forschenden aus den USA 2018 gelungen, die futuristisch anmutende Technik aus *Star Wars* nachzuahmen. In ihren volumetrischen, also dreidimensionalen Laserprojektionen scheinen Menschen flackernd im Raum zu schweben – wie im Film. Trotzdem: Die Projektion ist kleiner als ein echter Mensch und wirkt unecht.

Forschende am Max-Planck-Institut für Informatik in Saarbrücken gehen einen anderen Weg. Sie arbeiten an einer Telepräsenz per Avatar in virtuellen Räumen. Die Gruppe um Christian Theobalt, Direktor am Max-Planck-Institut für Informatik und Leiter der Abteilung Visual Computing and Artificial Intelligence, vermisst Menschen so perfekt wie möglich, um sie dann virtuell entstehen zu lassen. Sie erzeugt mittels künstlicher Intelligenz (KI) und nur anhand weniger Kameras an einem Headset ein fotorealisiertes dreidimensionales Abbild der Person, die das Headset trägt. Mehrere Personen, die diese Technik nutzen, können in virtuellen Konferenzräumen interagieren und bekommen das Gefühl, selbst vor Ort zu sein – daher der Name Telepräsenz. „Wenn ich so etwas wie Telepräsenz machen will, dann muss das Modell für den Avatar sehr schnell erzeugt werden. In Echt-

zeit“, sagt Theobalt. Einen Zugang zum virtuellen Raum bieten schon heute sogenannte VR- beziehungsweise AR-Brillen, das steht für Virtual Reality beziehungsweise Augmented Reality. Erstere sind maximal immersiv, das heißt, sie lassen einen in einen simulierten Raum eintauchen. Letztere sind noch Teil aktueller Forschung, in Teilen durchsichtig, und sie vermitteln den Eindruck, als bewegten sich die dreidimensionalen Körper im wirklichen Raum. Die Szene aus *Star Wars* hätte also auch funktioniert, wenn alle Anwesenden eine AR-Brille getragen hätten.

Zwar gibt es schon dreidimensionale Avatare für die Begegnung von Menschen im virtuellen Raum wie im Gaming oder in ausgewählten Konferenzen. Aber es sind meist nur halb reale Avatare, die eher comichaft daherkommen. „Es gibt zwischen der Wirklichkeit und dem digitalen Abbild eine Kluft, das sogenannte Uncanny Valley“, erklärt Marc Habermann, Gruppenleiter im Team von Theobalt. Dabei erkennen Menschen sofort, wenn ein Avatar nur fast real aussieht, und empfinden schnell Unbehagen. Das ist die Krux. Also realisieren viele Betreiber von Videokonferenz-Software Avatare lieber im Cartoon-Stil. „Wir haben es inzwischen geschafft, dieses Uncanny Valley hinter uns zu lassen, indem wir superfotorealistische Avatare von Menschen erzeugen“, sagt Habermann. Die Forschenden am Max-Planck-Institut sind Vorreiter bei Ganzkörper-Avataren, stehen aber auch in Sachen fotorealistische Gesichter Industriegrößen wie Meta in nichts nach.

„Es ist gemessen an den heutigen Möglichkeiten eigentlich erstaunlich, wie lange wir schon im Medium der Videocalls feststecken“, sagt Habermann. Diese hatten spätestens während der Corona-Pandemie ihren Durchbruch, gleichzeitig klagen viele darüber, wie es sie ermüdet. Telepräsenz in Meetings oder Konferenzen im dreidimensionalen Raum mit persönlichen und superrealistischen Avataren könnten künftig neue Impulse setzen. Denn während Videokonferenzen nur das Gesicht und die

Sprache übertragen, ermöglicht die Telepräsenz, sich virtuell mit Mimik, Gestik und Körpersprache auszutauschen. Dies schafft eine intensivere und persönlichere Erfahrung, vor allem wenn das eigene Abbild fotorealistisch erscheint.

Um das zu erreichen, bringt das Saarbrücker Max-Planck-Team einer KI zunächst bei, den menschlichen Körper, sein Aussehen und seine Bewegungen zu verstehen. Auf Basis des Modells, das dabei entsteht, wird dann eine fotorealistische dreidimensionale Repräsentation eines Individuums generiert, erklärt Theobalt.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Ein fotorealistisches zweites Ich in virtueller Realität, das sich einfach von zu Hause aus erstellen lässt: Das ist das Ziel von Forschenden des Max-Planck-Instituts für Informatik.

Die Technik nutzt auch die Filmindustrie, jedoch ist der Aufwand hier beträchtlich. Damit Personen ihren Ganzkörper-Avatar nur mithilfe einer VR-Brille und den integrierten Kameras und Sensoren erstellen können, trainieren die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ein komplexes KI-Modell.

Mit solchen Avataren ließen sich in Zukunft auch internationale Meetings in virtuellen Räumen abhalten, die deutlich klimafreundlicher sind als solche in Präsenz, aber dennoch ein Gefühl der Lebendigkeit vermitteln.

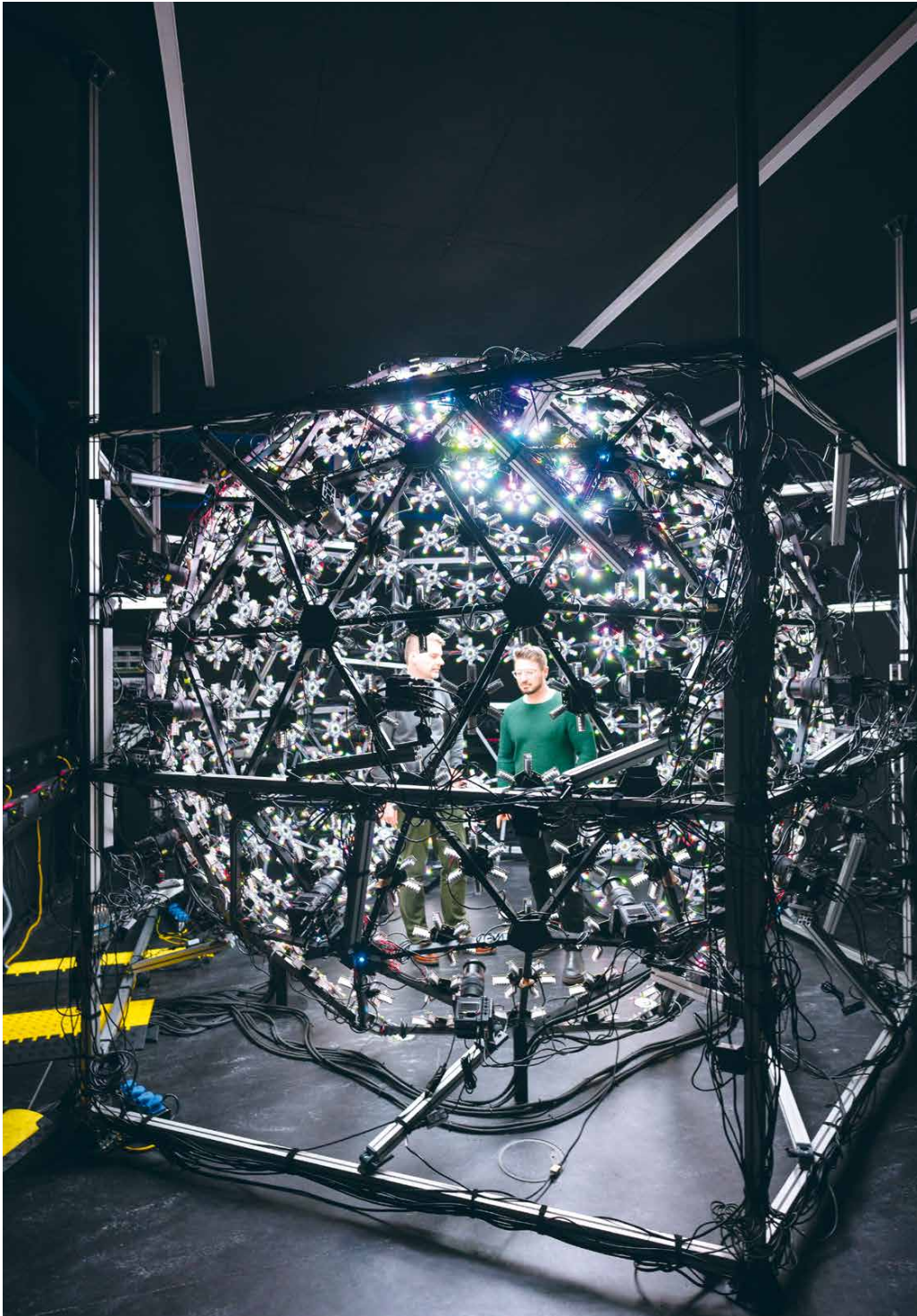
Die erste Station im Training der KI ist der „Grüne Raum“. Er ist geräumig wie ein halbes Handballfeld, die Wände sind verhängt mit grünen Stoffbahnen, aus denen 120 hochauflösende Kameras herausragen. Sie

erfassen aus allen Raumwinkeln, wie der Mensch sich bewegt, sei es bei Liegestützen, beim Golfspielen oder Spazierengehen. Rechner werten die Bilder aus, extrahieren die Bewegung und berechnen parallel in Echtzeit den Skelettaufbau, der dann im Video mittels farbiger Striche auf dem Körper eines Menschen dargestellt wird. Für das Tracking der Bewegungen in Echtzeit verwenden die Forschenden die Software von The Captury, das 2013 als Start-up aus Theobalts Gruppe ausgegründet wurde. In sechs Stunden Aufnahmezeit fällt ein Petabyte an Rohdaten an, das ist das Hundertfache des Speichervolumens von Computerfestplatten im Privatgebrauch.

Das neuronale Netz, das hinter der künstlichen Intelligenz steckt, erzeugt aus den Bewegungsdaten eine dreidimensionale Repräsentation eines menschlichen Körpers – ein Modell, das sich zwar bewegt wie die Testperson, aber nicht so aussieht wie sie – noch nicht. Einen überzeugenden fotorealistischen Avatar kennzeichnen auch natürlicher Schattenwurf, eine Haut, die Licht richtig reflektiert, und Kleidung, die so wie in der Realität Falten wirft. All das lernt das noch untrainierte KI-Bewegungsmodell eines Körpers Schritt für Schritt, indem es mit dem realen Aussehen konfrontiert wird.

So realistisch wie in *Star Wars*

Das geschieht in einem weiteren Raum, der Lightstage. Um die 3,5 Meter hohe Kuppel herum ist es dunkel, schwarz. Im Inneren strahlen 13 000 einzeln angesteuerte Leuchtdioden von allen Seiten auf die Testperson ein und setzen sie in Szene, so als stünde sie inmitten des Lichtspiels der farbenfrohen Buntglasfenster der Grace Cathedral in San Francisco. „Wir können auch simulieren, wie das Licht in einer hohen Straßenschlucht einfällt oder in einem nüchternen Konferenzraum“, sagt Marc Habermann, Scientific Manager des Real Virtual Labs, welches die Lightstage beinhaltet. Insgesamt verfügen die



Eigene Welt: Diese Lightstage versetzt Christian Theobalt (links) und Marc Habermann auf Knopfdruck in eine von Hunderten voreingestellten Lichtstimmungen – sei es die im Inneren von Notre Dame oder in einem grellen Konferenzraum.

67

Saarbrücker über mehr als 500 Beleuchtungssimulationen allein für Innenbeleuchtungen, noch mehr gibt es für Außensimulationen. Neben den Leuchtdioden sind auch 40 hochauflösende Kameras in der Kuppel befestigt. Sie nehmen das Bild der Person von allen Seiten auf und auch, wie Haut, Haare und Kleidung das Licht

reflektieren. Anhand all dieser Informationen lernt das neuronale Netz der KI, den Avatar mit fotorealistischen Texturen zu bekleiden, die auch die Materialeigenschaften der Kleidung berücksichtigen. Diese KI-Trainingsmethode ist nicht neu und findet sich in Teilen auch in der Filmindustrie wieder. Hier spricht

man übergreifend von CGI oder Computer-Generated Imagery. Auch hier dient eine Lightstage dazu, den digital neu erschaffenen Superhelden aus der Marvel-Reihe oder den hochgewachsenen Figuren aus dem Film *Avatar* ein Aussehen zu verleihen, das an die echten Schauspielerinnen und Schauspieler erinnert. Deren reale

→

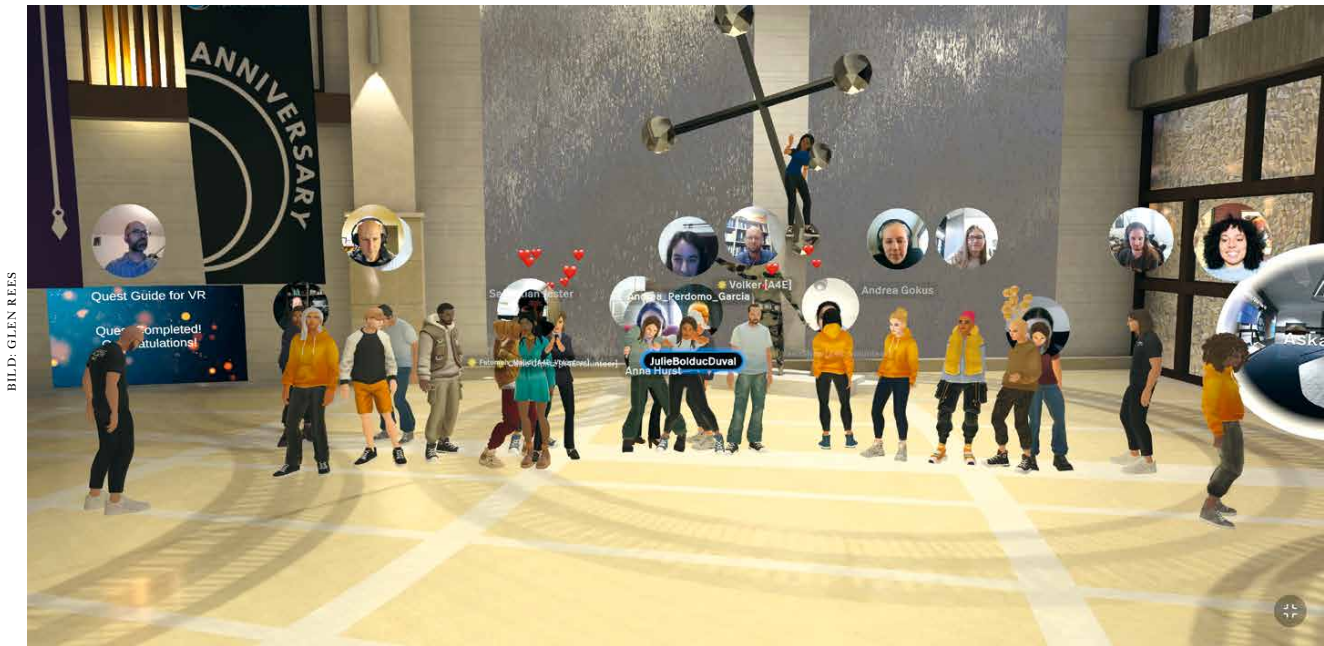


BILD: GLEN REES

68

Bewegungen am Filmset erfasst ein Marker Suit, ein Ganzkörperanzug mit reflektierenden Markierungen, die mit Motion Capture verfolgt und auf das digitale Abbild übertragen werden. Wie weit die Technik schon vor neun Jahren war, zeigt dieser Spezialfall aus *Star Wars*: Der erste Film stammt aus dem Jahr 1977, entspricht aber dem vierten Teil der Saga. Der Film *Rogue One* kam 2016 in die Kinos, spielt aber chronologisch wenige Wochen vor der *Episode IV* aus dem Jahr 1977. Da der Originalschauspieler von Tarkin, Kommandeur des Todessterns, bereits 1994 verstarb, musste er für *Rogue One* digital neu erschaffen werden. Als Vorlage dienten die Videoaufnahmen von damals, ein hochrealistisches Gipsmodell Tarkins sowie der Körper eines lebenden Schauspielers, der auch mithilfe eines Marker Suits und einer Lightstage in den spitzwangigen Tarkin verwandelt wurde. Aber: „Es dauert Monate, die digitale Filmfigur fertigzustellen. Selbst mit der hoch ausgerüsteten Visual-Effects-Pipeline der Filmindustrie“, sagt Christian Theobalt.

Damit die Telepräsenz aus dem Homeoffice heraus klappt, muss dieser ganze Prozess, also die Erstellung des

Avatars, so schnell klappen wie ein Fingerschnipsen. „Momentan müsste eine Person theoretisch erst bei uns vorbeikommen und ihren Körper in der Lightstage scannen lassen“, sagt Habermann. Das große Ziel ist aber ein generisches KI-Modell, das aus zahlreichen Scans verschiedener Körper unter diversen Lichtverhältnissen gelernt hat und auf alle Menschen übertragbar ist. Alles, was es dann bräuchte, um ein virtuelles Ganzkörper-Ich zu erzeugen, ist dieses fertig trainierte generische Modell und eine VR- oder AR-Brille, die mit wenigen Videokameras und Sensoren bestückt ist.

Einige Kameras dieser Brillen schauen nach vorne, die Downlook-Kameras nehmen den unteren Teil des Körpers auf, und eine IMU (Inertial Measurement Unit) misst die Bewegungen, indem sie Beschleunigungen und die Rotation erfasst. Die Kameras erkennen, wie sich die Unterarme, Teile des Oberkörpers und die Füße eines Menschen bewegen und wie weit der Boden entfernt ist. Diese Daten sollen künftig reichen, damit das generische Avatar-Modell nicht nur aussieht wie der echte Mensch, sondern im virtuellen Raum auch live die Bewegungen einer Person nachahmt. „Das Modell

Cheese! Mitglieder der internationalen Organisation Astronomers for Planet Earth versammeln sich im Januar 2025 in der Aula des eigens für ihr Jubiläumstreffen designten virtuellen Konferenzentrums zum Gruppenfoto. Rechts im Bild gelangt man in der App Spatial zu einer Ausstellungsfläche.

hat sogar gelernt, aus einer Armbewegung darauf zu schließen, wie und wo die Kleidung des virtuellen Avatars Falten wirft“, sagt Habermann.

Das Problem der Deepfakes

Neben der Telepräsenz, animierten Filmszenen oder realistischerem Gaming gibt es noch andere Einsatzmöglichkeiten für die Technik. „Unsere Forschung zielt nicht auf ein bestimmtes Anwendungsmodell“, betont Theobalt. Dazu zählen etwa Ferndiagnosen und Telemedizin, bei denen die Bewegungsmuster relevant sind. Die Avatar-Technik würde auch verändern, wie Menschen mit der künstlichen Intelligenz interagieren. Die KI könnte wiederum als Avatar über Gestik und Mimik mit Menschen kommunizieren. „Wenn ich ChatGPT bitte, mir eine Yoga-Pose zu erklären, bekomme

ich eine detaillierte Erklärung als Text“, sagt Habermann. „Es wäre doch viel einfacher, wenn ChatGPT als Avatar erscheint und mir die Position vormacht.“

So spannend die Anwendungen klingen, so sehr gilt es auch, die Risiken zu kennen. „Was damals noch ein 40-köpfiges CGI-Team in der Filmindustrie machte, könnte schon bald zu Hause auf der Couch passieren“, sagt Marc Habermann. „Wir befinden uns an einer Schwelle, an der Technik immer zugänglicher wird.“ Sollte einmal ein universelles Avatar-Modell existieren, ist der Weg zu Deepfakes nicht weit. „Daher besuchen unsere Doktorandinnen und Doktoranden Ethik-Klassen, in denen sie einen verantwortungsvollen Umgang mit der Technik lernen“, sagt Theobalt. Und es gibt eine eigene Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut für Informatik, die erforscht, warum eine KI welche Entscheidung trifft. Diese Technik hat auch die Gruppe um Theobalt genutzt, um Deepfakes zu entlarven. In diesem Ansatz geht sie die Schritte, die hin zu einem generischen Avatar-Modell führen, rückwärts und analysiert, warum der Avatar so aussieht, wie er dargestellt wird. Vielleicht müssen virtuelle Konferenz-Veranstalter in Zukunft auch sogenannte digitale Wasserzeichen der Teilnehmenden prüfen, die sicherstellen, dass hinter einem Avatar auch der richtige Mensch steckt.

Gelingt ein sicherer und vollvirtueller Meetingraum, könnten Konferenzen und Treffen von Geschäftspartnern deutlich klimafreundlicher werden: Flugreisen zu weltweiten Kongressen oder internationalen Unternehmenskonferenzen setzen eine beträchtliche Menge an klimaschädlichen Emissionen frei. Leonard Burtscher, Astronom und Referent für Klima- und Umweltpolitik des Umweltinstituts München, hat zusammen mit anderen Forschenden am Beispiel der fünftägigen Jahrestagung der Europäischen Astronomischen Gesellschaft berechnet, wie viel. Als die Konferenz 2019 in Lyon in Präsenz stattfand, wurde etwa 3000 Mal mehr CO₂ freigesetzt als im Jahr darauf.

Denn 2020 fand die Tagung wegen der Corona-Pandemie ausschließlich online statt.

Laut einer nachfolgenden Studie von Andrea Gokus von der Washington University in St. Louis, an der auch Knud Jahnke vom Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg beteiligt war, entfällt auf jede Teilnehmerin und jeden Teilnehmer einer der 362 analysierten Astronomietagungen durchschnittlich rund eine Tonne klimaschädlicher Treibhausgase. Selbst wenn man das aufwendige Training eines generischen Avatar-Modells berücksichtigt, dürfte eine Konferenz von individuellen Avataren noch einen deutlich geringeren CO₂-Fußabdruck haben als eine Konferenz, bei der alle Teilnehmenden mit dem Flugzeug anreisen. Denn schließlich ist die Rechenleistung für das Training des Modells nur einmal nötig.

Und Konferenzen in dreidimensionalen virtuellen Räumen machen Spaß, weiß Leonard Burtscher. Er erinnert sich sofort an eine Situation: „Wir hatten ein Gruppentreffen an einem virtuellen Lagerfeuer auf einer virtuellen Insel. Im Gegensatz zu Zoom-Meetings erinnere ich mich noch genau an das Lagerfeuer, das nächtliche Setting, eine Palme, die im Wind weht – und verknüpfte das bis heute mit der Diskussion, die wir dort hatten“, sagt Burtscher. Wenn es also kein Präsenztreffen sein kann, da die Anreise für die Teilnehmenden zu umständlich oder eben klimabelastend wäre, dann ist das Treffen unter

Avataren auch aus psychologischer Sicht sinnvoll. Denn auch über virtuelle Realität bauen die Personen einen Bezug zum Ort des Treffpunkts auf. „Wenn sie später an diesen denken, hilft ihnen das, sich an vergangene Gesprächsinhalte zu erinnern“, sagt Simone Kühn, Direktorin der Abteilung Umweltneurowissenschaften am Max-Planck-Institut für Bildungsforschung in Berlin. Sie untersucht, welche Auswirkungen die physikalische Umwelt auf das Individuum und das Gehirn hat.

Aber nicht nur das: Viele wissen, wie ermüdend Videokonferenzen sein können. Hier versammeln sich Teilnehmende in einem Schachbrettmuster aus Videokacheln. „Ein gut gestalteter virtueller Raum mit realistischen Avataren kann dagegen anregend wirken“, sagt Kühn. „Gute Darstellungen von natürlichen Umwelten können sogar Stress abbauen.“ Warum also nicht den persönlichen Avatar in einer Pause mal kurz zum virtuellen Sandstrand navigieren, der passenderweise direkt vor die Tür gelegt wurde.



69

Ein Avatar für daheim:
Die Kameras an einem VR-Headset (links) erfassen die Bewegungen des Körpers, der Hände und Füße und übertragen diese in Echtzeit auf den computergenerierten fotorealistischen Avatar im virtuellen, dreidimensionalen Raum (rechts).

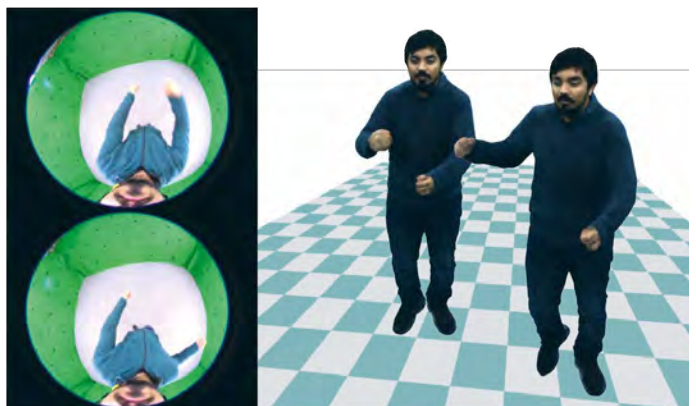




FOTO: ADOBESTOCK

Schnappschuss aus Ouagadougou: Das Bild zeigt den Place des Cinéastes im Zentrum der burkinischen Hauptstadt. Das Monument ist afrikanischen Filmemachern gewidmet.

70

Max-Planck-Forscher arbeiten mit Partnern in mehr als 120 Ländern zusammen. Hier berichten sie über ihre persönlichen Erfahrungen und Eindrücke. Jason Hendry, Malariaforscher am Max-Planck-Institut für Infektionsbiologie in Berlin, berichtet über eine zweiwöchige Reise nach Burkina Faso. Er sucht mit Forschenden des Institut de Recherche en Sciences de la Santé (IRSS) nach Wegen, um die Ausbreitung von Malariaerregern zu verhindern, die gegen Medikamente resistent sind.

Es ist April in Burkina Faso, und es ist unerträglich heiß. Selbst im Schatten der Mangobäume vor dem Institut de Recherche en Sciences de la Santé (IRSS) habe ich das Gefühl zu verbrennen. Ich schaue auf mein Handy: Es herrschen 42 Grad Celsius. Gestern erzählte mir ein Student, dass

Burkina Faso das heißeste Land der Welt sei und der April der Höhepunkt der Trockenzeit, also der heißeste Monat des Jahres. Das hätte ich vielleicht vorher wissen sollen.

Zum Glück sind die Labore des IRSS gut klimatisiert. Ich betrete den Raum für die DNA-Extraktion zusammen mit einer Gruppe von vierzehn burkinischen Studentinnen und Studenten in blauen Laborkitteln, und wir beginnen mit den Vorbereitungen für eine sogenannte Polymerasekettenreaktion (PCR) – eine Methode, mit der wir die DNA von Malariaerregern vervielfältigen. Anschließend sequenzieren wir die DNA, um nach Resistenzen zu suchen, die im Erbgut sichtbar werden. Ich gehe mit den Studierenden das Protokoll durch: Zuerst werden die Reagenzien zusammengestellt (bedenkt bitte, dass manche noch tiefgefroren sind), dann die benötigten Mengen berechnet (überprüft das besser noch mal), danach wird mit Pipetten gemischt (vorsichtig, damit keine Blasen entstehen) und schließlich werden die

Reaktionen in das PCR-Gerät gegeben (vergesst nicht, euer Laborbuch zu aktualisieren). Ich begleite die Studierenden durch die ersten Wochen eines Workshops, in dem sie lernen, medikamentenresistente Malariaerregere aufzuspüren.

Malaria ist die tödlichste parasitäre Krankheit der Welt. Die Weltgesundheitsorganisation schätzt, dass sie jährlich fast 600 000 Todesfälle verursacht, etwa 95 Prozent davon in Afrika. Nach dem Stich eines Malariamuskos erkrankt man innerhalb von 10 Tagen an Fieberanfällen, die zu Organversagen und schlimmstenfalls zum Tod führen können. Die gute Nachricht ist, dass es kostengünstige Medikamente gibt, mit denen sich eine Malariainfektion innerhalb von drei Tagen heilen lässt, sofern man schnell einen Arzt aufsucht. Die schlechte Nachricht ist, dass Malariaparasiten mittlerweile Resistenzen gegen diese Medikamente entwickeln. Bei resistenten Parasiten wirken die Medikamente langsamer, und in einigen Fällen versagen sie sogar völlig.



OUAGADOUGOU, BURKINA FASO

Jüngste Forschungen zeigen, dass sich resistente Malariaparasiten bereits in Ostafrika ausbreiten. Wenn diese Entwicklung fortschreitet, wird die ohnehin schon enorme Zahl der Malaria-todesfälle noch weiter steigen. Angesichts des Zeit- und Kostenaufwands für die Entwicklung neuer Medikamente ist es unerlässlich, dass wir die Ausbreitung der medikamentenresistenten Malaria verfolgen, um bestehende Behandlungsmethoden möglichst effektiv einzusetzen. Aber wie?

In Zusammenarbeit mit Forschern aus ganz Afrika haben wir dafür eine praktikable Lösung entwickelt: ein eigenes Sequenziergerät, das weniger als 1000 US-Dollar kostet, so klein wie ein Smartphone ist und das Erregergut innerhalb von nur fünf Stunden auslesen kann. Dafür benötigen wir nur einen kleinen Tropfen Blut von Malariapatienten. Im Blut befinden sich die Erreger, deren Erbgut wir isolieren und untersuchen. Für alle weiteren Analysen genügt ein Laptop. So lassen sich Blutproben in vielen afrikanischen Ländern, wie

etwa Burkina Faso, schnell vor Ort auswerten.

Im Labor hat unser erster Sequenzierungslauf begonnen, und ich stehe neben Dr. Issiaka Soulama, der die Malaria-Labore am IRSS leitet. Er analysiert die Ergebnisse gemeinsam mit seinen Studentinnen und Studenten, die sich hinter ihm versammelt haben. Zur Erleichterung aller hat die Sequenzierung funktioniert. In nur wenigen Tagen haben die Studierenden wertvolle neue Daten über Malaria in Burkina Faso generiert.

Ich konnte ihnen viel beibringen und habe dabei selbst viel gelernt. In Mòoré, einer verbreiteten lokalen Sprache, lautet die Antwort auf „Wie geht es dir?“ laafi – was „gesund“ bedeutet. Für „danke“ sagt man barka. Meine Forschung gibt mir die Möglichkeit, unglaubliche Orte zu besuchen, mit engagierten Studierenden zu arbeiten und inspirierende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zu treffen. Und dafür kann ich gar nicht oft genug barka sagen.



71

FOTO: PRIVAT

Jason Hendry

34, wurde in Brampton, Kanada, geboren. Er promovierte an der Universität Oxford zum Thema Malaria und arbeitet derzeit am Max-Planck-Institut für Infektionsbiologie in Berlin. Er ist Co-Projektleiter eines von der Gates Foundation geförderten Projekts zur Entwicklung neuer DNA-Sequenzierungsansätze für Malaria.

DIE KRUX DES ALTERS

Warum sterben wir? Diese Frage beantwortet der Chemie-Nobelpreisträger Venki Ramakrishnan mit einem verständlich vermittelten Überblick über die zellbiologischen Prozesse des Alterns und die neuesten Erkenntnisse der Altersforschung. Diese zielten laut Ramakrishnan auch darauf ab, Möglichkeiten zu ergründen, um das Leben zu verlängern. Die Forschung bestätige dabei landläufige Ratschläge für ein langes, gesundes Leben: sich vor allem pflanzlich zu ernähren und ausreichend zu bewegen, Kalorien zu beschränken und genug zu schlafen. Vor diesem Hintergrund rügt der Autor die milliardenschwere Anti-Aging-Industrie, an der sich auch renommierte wissenschaftliche Kolleginnen und Kollegen beteiligten. Besonders aber kritisiert er Tech-Milliardäre wie Elon Musk und Jeff Bezos, die geradezu fanatisch nach einer

Möglichkeit suchten, das Altern auszubremsen. Diesen dystopischen Hyperkapitalisten stellt Venki Ramakrishnan die Frage gegenüber, ob unseren Gesellschaften wirklich geholfen wäre, wenn wir den Tod langfristig überlisten könnten. *Warum wir sterben* ist eine äußerst kluge und lesenswerte Lektüre, die durch die umfassende systemische Perspektive des Autors besticht – und dazu anhält, uns mit der Endlichkeit unseres Lebens zu versöhnen.

Anne-Kathrin Weber

Venki Ramakrishnan
Warum wir sterben
352 Seiten, Klett-Cotta
28,00 Euro



72

DIE GOLDENEN QUANTENJAHRE

Mit der neuen Weltsicht taten sich auch einige der gescheiterten Menschen ihrer Zeit schwer: Die Quantenmechanik stieß nicht nur Gewissheiten der Physik um, sie widerspricht auch Alltagserfahrungen. Wie sich ihre Einsichten zwischen 1919 und 1929 allmählich durchsetzten, zeichnet Thomas de Padova nach. Gut nachvollziehbar stellt er die Suche nach den neuen physikalischen Gesetzen dar und vermittelt dabei einige wesentliche Aspekte der Quantenphysik. Vor allem aber schildert er unterhaltsam und anekdotenreich die Atmosphäre, in der sich die Theorie entwickelte: Wie die Argumente hin und her gingen. Welche Charaktere dabei aufeinandertrafen – der meist zweifelnde Einstein, der schon jung sehr selbstbewusste Werner Heisenberg, der aber beinahe durch die Doktorprüfung fiel, der charismatische, philoso-

phisch denkende Niels Bohr – um nur wenige Protagonisten zu nennen. Und ebenso die Ratlosigkeit, die immer wieder in der Physik-Gemeinde herrschte. Auch auf die politischen und gesellschaftlichen Umstände der Zeit geht de Padova ein: die existenzbedrohende Inflation Anfang der 1920er-Jahre, in der auch ein Nobelpreisträger für ein paar Lebensmittel mindestens ebenso dankbar war wie für neue physikalische Erkenntnisse, oder den erstarkenden Nationalsozialismus und Antisemitismus, die viele Quantenpioniere schließlich aus Deutschland und Europa vertrieben. So bleibt nach der Lektüre trotz aller Lichtblicke auch ein Gefühl der Beklommenheit beim Gedanken an manche heutige Bedrohung nicht nur für die Wissenschaft.

Peter Hergersberg

Thomas de Padova
Quantenlicht
430 Seiten, Hanser
28,00 Euro



NEU

ERSCHIENEN

ZU VIELE SIND IMMER DIE ANDEREN

Schlagworte wie „Überbevölkerung“ oder gar „Bevölkerungsexplosion“ sind Teil des Alltagsdiskurses, oft fließen sie ohne größere Reflexion in Aussagen ein. Die Völkerrechtlerin Dana Schmalz vom Max-Planck-Institut für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht geht zurück zum Ursprung der Debatte. Dort steht Thomas Malthus' Essay *Das Bevölkerungsgesetz* von 1798. Malthus' Kernthese: Bevölkerungswachstum ist wesentlich für Armut verantwortlich. In ihrem essayistisch angelegten und gut lesbaren Buch zeigt Schmalz, welchen Weg die Debatte seitdem genommen hat – und welche Kontinuität sie bestimmt: Zu viele sind immer die anderen. Kinderreichtum statt Ausbeutung als Ursache von Armut in der Frühindustrialisierung – heute würde man von erfolgreichem Framing sprechen. Die Deutung verlagert die Verantwortung und macht es den Privilegierten bequem. Schmalz folgt der Debatte durch die Jahrhunderte und durch verschiedene Kontexte wie Migration, Frauenrechte und Klimaschutz. Ihre Expertise in Völkerrecht zeigt sich vor allem dort, wo sie auf Rechtsverletzungen wie Zwangssterilisationen eingeht oder die Bemühungen um eine internationale Bevölkerungspolitik im Rahmen der UN nachzeichnet. Dabei wird deutlich, welcher rote Faden sich durch die Diskurse zieht: Übergriffigkeit und der Versuch von Kontrolle von reich über arm, Mann über Frau, globaler Norden über globalen Süden. Die Mächtigen beanspruchen die Deutungshoheit. Ein politisches Buch, das wachsam macht für die Instrumentalisierung eines allgegenwärtigen Arguments.

Nina Schick



Dana Schmalz
Das Bevölkerungsargument
183 Seiten, Suhrkamp
18,00 Euro

DIE IM DUNKELN SIEHT MAN NICHT

Was haben schwarze Löcher, die Rückseite des Mondes, Gravitationswellen und das Innere der Sonne gemeinsam? Richtig, wir können sie aus unterschiedlichen Gründen mit unseren Augen einfach nicht sehen, obwohl sie existieren! Tatsächlich ist das All voll von solchen Dingen. In ihrem Buch mit dem etwas merkwürdig anmutenden, aber auf den zweiten Blick plausiblen Titel *Sternenjahr auf unsichtbar* beschreibt die Astronomin und Podcasterin Ruth Grützbauch zwölf kosmische Phänomene, die sich unseren Blicken entziehen. Das tut sie so unterhaltsam, dass man von Anfang bis Ende von der Lektüre gefesselt ist. Gern lässt man sich auf die dunkle Seite des Universums entführen – zu Planeten bei fernen Sonnen, zum Big Ring, einer Milliarden Lichtjahre großen Megastruktur aus „Haufen von Haufen von Galaxienhaufen“, zu Sternen, die auf mysteriöse Weise vom Firmament verschwinden; oder nicht zuletzt auf die Spur der geheimnisvollen Neutrinos,



jener Geisterteilchen, die unbeeindruckt von Materie nahezu lichtschnell durch den Kosmos huschen. Es sind spannende und lehrreiche Geschichten, welche die Autorin im Laufe eines „Sternenjahrs“ in übersichtlichen Kapiteln zu erzählen hat, jeden Monat eine. Dabei setzt Grützbauch dem Leser und der Leserin auch die Gamma- und Röntgenbrille auf und lässt sie das Weltall in diesen Spektralbereichen erkunden. Leider fehlen in dem Buch erklärende Abbildungen, sie wären das Tüpfelchen auf dem i gewesen.

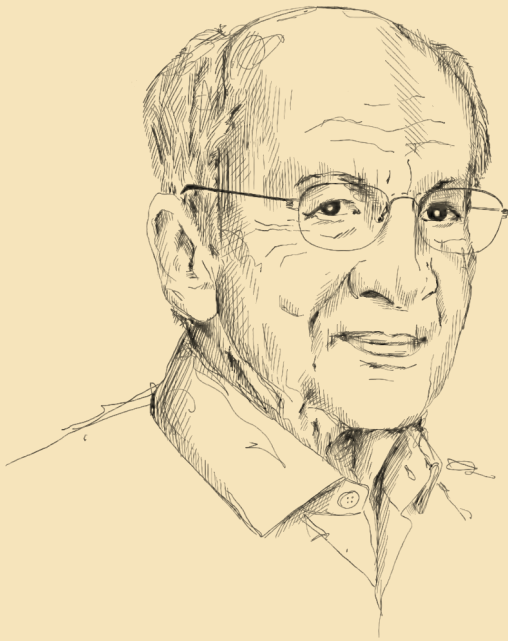
Helmut Hornung

Ruth Grützbauch
Sternenjahr auf unsichtbar
255 Seiten, Aufbau
24,00 Euro

FÜNF FRAGEN

ZUR ERZEUGUNG VON GOLD DURCH KERNFUSION

AN KARL LACKNER



Das US-amerikanische Start-up Marathon Fusion möchte durch Kernfusion Gold produzieren. Wie soll das gehen?

74

KARL LACKNER: Bei der Kernfusion entstehen schnelle Neutronen, die Elemente umwandeln können, etwa ein bestimmtes Quecksilber-Isotop in Gold. Marathon Fusion will das Isotop im Fusionsreaktor als Neutronenvervielfältiger einsetzen. Der Hintergrund ist: Wir brauchen die Neutronen aus der Fusion dringend, um damit aus Lithium einen der Brennstoffe der Kernfusion, das Tritium, zu erzeugen. Das gibt es in der Natur nicht. Irgendwo verschwindet aber immer mal ein Neutron, sodass der geschlossene Kreislauf zusammenbrechen würde. Daher plant man, im Fusionsreaktor Blei oder Beryllium zu verwenden, weil es Neutronen vervielfältigt, also eins aufnimmt und zwei ausschickt. Das Quecksilber-Isotop hat auch diese Eigenschaft, und das Positive an diesem Prozess ist: Das Endprodukt wäre Gold.

Welche Mengen Gold können auf diese Weise produziert werden?

Die Wand der Plasmakammer soll mit Kassetten ausgekleidet werden, die mehr als 10 000 Tonnen eines Blei-Lithium-Gemischs enthalten, um den neuen Brennstoff zu erzeugen. Wenn man 500 Tonnen davon durch das geeignete Quecksilber-Isotop ersetzen würde, könnte man in einem Reaktor

mit einem Gigawatt elektrischer Leistung etwa fünf Tonnen Gold pro Jahr erzeugen.

Welche Schwierigkeiten gibt es bei dem Vorhaben?

Quecksilber als Neutronenvervielfältiger zu verwenden ist viel komplizierter, deshalb würde man das in der ersten Generation von Fusionsreaktoren wohl auch nicht machen. Eine prinzipielle Schwierigkeit ist außerdem, dass das nutzbare Isotop nur ein Zehntel des Quecksilbers, das in der Natur vorkommt, ausmacht. Das heißt, man muss das Quecksilber-Isotop anreichern, und zwar auf 90 Prozent – das ist technisch sehr aufwendig. Uran für einen Reaktor zur Kernspaltung muss man nur auf fünf Prozent anreichern. Unter der extremen Annahme, dass man die gesamten Quecksilbervorkommen in der Erdkruste, die auf etwa 600 000 Tonnen geschätzt werden, verwenden könnte, erhielte man in einem Jahr 600 Tonnen Gold. Das ist nur ein Fünftel der derzeitigen Goldförderung weltweit, die bei rund 3000 Tonnen pro Jahr liegt. Gold würde also keinesfalls wertlos, wie in manchen Medien behauptet wurde.

Lohnt sich das wirtschaftlich?

Es würde sich lohnen, weil Gold so teuer ist. Die fünf Tonnen Gold aus einem 1-Gigawatt-Reaktor hätten etwa denselben Wert, wie die Elektrizität, die der Reaktor produziert. Man würde wahrscheinlich erst einmal

mit den 20 000 Tonnen Quecksilber anfangen, die derzeit als Abfall irgendwo rumliegen. Daraus ließen sich in einem Jahr 20 Tonnen Gold erzeugen. Aber man könnte immer nur einen kleinen Teil der für die Energieerzeugung nötigen Reaktoren zur Goldgewinnung ausstatten, da die gesamten Quecksilbervorräte einfach zu begrenzt sind.

Ist das Gold aus der Kernfusion radioaktiv?

Das Gold, das im Hauptprozess entsteht, ist nicht radioaktiv. Aber es gibt im Quecksilber nach der Anreicherung zu einem kleinen Prozentsatz ein weiteres Isotop, das radioaktives Gold erzeugt. Das hat nur eine Halbwertszeit von ein paar Hundert Tagen. Bis man Gold aus der Fusion allerdings als Schmuckkette tragen kann, sollte man mindestens 18 Jahre warten. Dann ist das auf dem radioaktiven Niveau einer Banane. Wenn man das Gold aber nur in Fort Knox lagert oder als Spekulationsobjekt handelt, spielt das keine große Rolle. Und bei dem Zerfall entsteht übrigens Platin – da wird sich auch niemand beschweren.

Interview: Peter Hergersberg

Karl Lackner ist emeritierter Direktor am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und analysiert heute die unterschiedlichen Konzepte der Kernfusion, die weltweit verfolgt werden.

- Institut / Forschungsstelle
- Teilinstitut / Außenstelle
- Sonstige Forschungseinrichtungen
- Assoziierte Forschungseinrichtungen

Niederlande

- Nimwegen

Italien

- Rom
- Florenz

USA

- Jupiter, Florida

Brasilien

- Manaus

Luxemburg

- Luxemburg



IMPRESSUM

Max Planck Forschung wird herausgegeben von der Wissenschafts- und Unternehmenskommunikation der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e. V., vereinsrechtlicher Sitz: Berlin. ISSN 1616-4172

Redaktionsanschrift
 Hofgartenstraße 8
 80539 München
 089 2108-1719 /-1276 (vormittags)
 mpf@gv.mpg.de
 www.mpg.de/mpforschung
 Kostenlose App: www.mpg.de/mpfmobil

Verantwortlich für den Inhalt
 Dr. Christina Beck (-1276)

Redaktionsleitung
 Peter Hergersberg (Chemie, Physik, Technik; -1536)

Redaktion
 Dr. Tobias Beuchert (Astronomie, Physik, Technik; -1404)
 Michaela Hutterer (Kultur, Gesellschaft; -2617)
 Dr. Elke Maier (Biologie; -1064)
 Dr. Harald Rösch (Biologie, Medizin; -1756)
 Franziska Schulze (Kultur, Gesellschaft; -1957)

Zur besseren Lesbarkeit haben wir in den Texten teilweise nur die männliche Sprachform verwendet. Mit den gewählten Formulierungen sind jedoch alle Geschlechter gleichermaßen angesprochen.

Bildredaktion

Annabell Kopp (-1819)
 Susanne Schauer (-1562)

Konzeptionelle Beratung

Sandra Teschow und Thomas Susanka
 www.teschowundsusanka.de

Gestaltung

GCO Medienagentur
 Schaezlerstraße 17
 86150 Augsburg
 www.gco-agentur.de

Druck & Vertrieb

Vogel Druck & Medienservice GmbH
 Leibnizstraße 5
 97204 Höchberg

Anzeigenleitung

Philipp Bender
 Bertelsmann Marketing Services
 Tel: 49 173 60 55 713
 philipp.bender@bertelsmann.de

MaxPlanckForschung berichtet über aktuelle Forschungsarbeiten an den Max-Planck-Instituten und richtet sich an ein breites wissenschaftsinteressiertes Publikum. Die Redaktion bemüht sich, auch komplexe wissenschaftliche Inhalte möglichst allgemein verständlich aufzubereiten. Das Heft erscheint in deutscher und in englischer Sprache (*MaxPlanckResearch*) jeweils mit vier Ausgaben pro Jahr. Die Auflage dieser Ausgabe beträgt 75 000 Exemplare (*MaxPlanckResearch*: 10 000 Exemplare). Der Bezug ist kostenlos. Ein Nachdruck der Texte ist nur mit Genehmigung der Redaktion gestattet; Bildrechte können nach Rücksprache erteilt werden. Die in *MaxPlanckForschung* vertretenen Auffassungen und Meinungen können nicht als offizielle Stellungnahme der Max-Planck-Gesellschaft und ihrer Organe interpretiert werden.

Die Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. unterhält 84 Institute und Forschungseinrichtungen, in denen rund 24 000 Personen forschen und arbeiten, davon etwa 13 000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Im Jahr 2023 betrug die Grundfinanzierung durch Bund und Länder 2,1 Milliarden Euro. Die Max-Planck-Institute betreiben Grundlagenforschung in den Natur-, Lebens- und Geisteswissenschaften. Die Max-Planck-Gesellschaft ist eine gemeinnützige Organisation des privaten Rechts in der Form eines eingetragenen Vereins. Ihr zentrales Entscheidungsgremium ist der Senat, in dem Politik, Wissenschaft und sachverständige Öffentlichkeit vertreten sind.

Max Planck Forschung wird auf Papier aus vorbildlicher Forstwirtschaft gedruckt und trägt das Siegel des Forest Stewardship Council® (FSC®).



Die MaxPlanckForschung
kostenfrei abonnieren:



MAX PLANCK
GESELLSCHAFT

