

MIT Technology Review

Das Magazin für Innovation von Heise

März bis Juni 2024

Deutschland 15,90 € / Österreich 17,50 € /
Luxemburg 18,70 € / Schweiz 29,80 CHF

3/2024

Quantencomputer
Weniger Rauschen,
besser Rechnen

Tiefsee
Taucher atmen
Wasserstoff

Neurologie
Wie Hunger unser
Handeln lenkt

Schifffahrt
Die Suche nach
neuen Treibstoffen

BEYOND GPT

Sind KI-Sprachmodelle das
Sprungbrett zur Superintelligenz?



KICK- START

Update für dein KI-Skillset

Lerne mit den Live-Online-
kursen von t3n, künstliche
Intelligenz nachhaltig in deinen
Arbeitsalltag zu integrieren.

Jetzt Platz sichern!



t3n.de
Spreading knowledge & future optimism

t3n digital
pioneers

Liebe Leserinnen und Leser,



als im November 2023 OpenAI-Chef Sam Altman kurzzeitig aus dem Amt gejagt wurde, gab es im Zusammenhang mit der Personalie eine brisante Meldung. Das Unternehmen habe beim System „Project Q*“ offenbar einen Durchbruch bei der Allgemeinen Künstlichen Intelligenz (AGI) erzielt.

Das ist nicht nachprüfbar, zeigt aber, dass es an der Zeit ist, sich mit den möglichen Folgen auseinanderzusetzen: Was bedeutet es, wenn wir es eines Tages mit einer menschenähnlichen Künstlichen Intelligenz zu tun bekommen? Noch arbeiten die Modelle auf Basis reiner Statistik. Sie verstehen nicht, was sie generieren. Aber könnte sich aus der Komplexität der Modelle eine neue Form von Intelligenz entwickeln?

Wir haben Kennerinnen und Kenner der Szene weltweit nach ihrer Einschätzung gefragt – und die Antworten sind so vielfältig wie die Persönlichkeiten. Während einige an einen zeitnahen Durchbruch glauben, gehen andere davon aus, dass es noch Jahrzehnte dauern könnte oder nie passieren wird (Seite 20). Wenn selbst Expertinnen und Experten sich uneins sind, stellt sich die Frage, was eine AGI ausmacht. Können wir „echte“ Intelligenz überhaupt messen? Was muss eine AGI erfüllen, um als solche zu gelten? Wir haben uns auf die Suche nach Antworten gemacht (Seite 14).

Unter anderem die Mathematik ist ein Feld, das Forschende heranziehen, um die Fortschritte

in der KI-Entwicklung zu bewerten. Hier geht es nicht um die Mathematik, die in den Algorithmen der Systeme steckt, sondern um die Frage, ob KI-Modelle in der Lage sind, mathematische Probleme zu lösen (Seite 36).

Und noch eine Frage ist wichtig, eine mit großer ethischer Implikation: Könnte eine Allgemeine Künstliche Intelligenz ein Bewusstsein erlangen? Philosophen und Neurologen diskutieren schon lange, was Bewusstsein eigentlich ist und wie es sich messen lässt. Intelligenz impliziert zwar noch kein Bewusstsein, aber im Grunde ist es die alte Frage nach dem „Geist in der Maschine“: Wenn es auch nur eine minimale Chance gibt, dass eine KI ein Bewusstsein hat, wie gehen wir dann mit ihr um (Seite 28)?

Am Ende zeigt sich: Je mehr wir uns mit Allgemeiner Künstlicher Intelligenz beschäftigen, desto mehr lernen wir über uns selbst als menschliche Wesen. Und das ist gut so, wenn wir verstehen wollen, wie wir die Zukunft mit KI positiv gestalten können.

Ihr



Luca Caracciolo
@papierjunge



ALLGEMEINE KÜNSTLICHE INTELLIGENZ • Maschinen, die ähnlich universell denken können wie Menschen, sind ein uraltes Versprechen. Jetzt kommen sie in greifbare Nähe (Seite 14)

3 Editorial

6 Bild des Monats
Glamouröse Gerste

UPDATE

9 Neurotech
3D-gedrucktes Hirngewebe verhält sich natürlich

10 Landwirtschaft
Wer von einer Cannabis-Legalisierung profitiert

12 Wasserstoff
Rekordfund in Albanien

TITEL

14 Allgemeine Künstliche Intelligenz
Was nach GPT und Co. kommt

20 Umfrage
Woran erkennt man eine Allgemeine Künstliche Intelligenz?



Podcast
Martin Fehrensén, Betreiber und Autor des Social Media Watchblogs, analysiert die Social-Media-Landschaft und den Niedergang von Twitter/X.



28 Bewusstsein
Der Geist in der Maschine

36 Mathematik
KI braucht dringend Nachhilfe

42 Soziale Bindungen
Wie Maschinen zu Freunden werden

REPORT

49 Kolumne
Robotersprache vs. Bauchgefühl

50 Tiefsee
Tiefer tauchen mit Wasserstoff

58 Experte in 5 Minuten
Pollenallergien und die Klimakrise

60 Schifffahrt
Methanol und Ammoniak sollen Schweröl ablösen

65 Jubiläum
Furioses Ende des Fusionsreaktors JET

QUANTENCOMPUTER • Verrauschte, fehleranfällige Daten bremsen Quantencomputer lange aus. Aber es scheint Wege aus dem Datennebel zu geben (Seite 66)



„Die Hälfte der Schüler macht ihre Hausaufgaben mithilfe von ChatGPT, aber viele Lehrkräfte reden darüber noch immer wie über fliegende Autos.“

Florian Fabricius, Generalsekretär der Bundesschülerkonferenz, über die große KI-Kluft zwischen Lehrkräften und Schülern (Seite 74)



TIEFSEE • Abenteuerlustige Taucher versuchen in immer größere Tiefen vorzudringen, indem sie Wasserstoff atmen (Seite 50)



MIT Technology Review ist die unabhängige deutsche Ausgabe des gleichnamigen Magazins vom Massachusetts Institute of Technology MIT.

88 Rohstoffe
Unkonventionelle Quellen für Seltene Erden

REVIEW

95 Ausprobiert
Kurven fahren mit dem Fahrrad-Heimtrainer

96 Hardware
Fernglas mit KI, Uhr mit Poesie, BMW-Roller mit Batterie

100 Medien
Leben im All von Frank Adam, Klassiker *Dune – der Wüstenplanet* neu gelesen

102 Deutsche Bahn
Echtzeitdaten langsamer als Brieftauben

104 Cloud-Computing
Bundesregierung ignoriert europäische Lösung Gaia-X

RUBRIK

93 Impressum

98 Technologiezentren

106 Der Futurist

66 Quantencomputer
Neue Mittel gegen verrauschte Daten

73 Déjà-vu
Gehirn-Simulation im Computer

74 Bildung
Generative KI in der Schule

78 Physiologie
Wie Hunger im Gehirn entsteht

86 Ökonomie
Der monetäre Wert von Flora und Fauna

„Wenn wir als Gesellschaft in die Abscheidung von CO₂ investieren, dann sollten wir diesen Kohlenstoff auch binden und nicht einfach am nächsten Tag verbrennen.“

Trevor Brown, Executive Director der Ammonia Energy Association, über alternative Treibstoffe für die Schifffahrt (Seite 60)

BILD DES MONATS

Glamouröse Gerste

Es ist eigentlich nur eine simple Gerstenblüte. Diese stammt aus dem Max-Planck-Institut für Pflanzenzüchtungsforschung. Ulla Neumann hat die Blüte mit ihren geöffneten Staubbeuteln und versprengten Pollenkörnern mit dem Elektronenmikroskop untersucht.

Um aus einer gänzlich unspektakulären Blüte ein mystisches Wesen wie dieses zu schaffen, setzt Rob Kessler, emeritierter Professor für Kunst, Design und Wissenschaft aus London, zahlreiche elektronenmikroskopische Bilder einzelner Teile der Pflanzenorgane zu einem ultrahoch aufgelösten Bild zusammen. Diese Bilder zeigen die Objektoberflächen in Graustufen. Indem Kessler sie anschließend in unterschiedlichen Ebenen einfärbt, lässt er ein plastisches Bild der Pflanzenorgane entstehen und erweckt damit ihre Struktur zum Leben.





ZAHL DER AUSGABE

28

Prozent

aller wissenschaftlichen Artikel mit einer DOI-Kennung sind nicht mehr im Netz auffindbar, ergab eine Untersuchung der University of London (heise.de/s/AXXMq). Digital Object Identifiers sind Zeichenfolgen, die wissenschaftliche Paper eindeutig identifizieren. Bei einer Stichprobe unter 1000 DOIs führte aber über ein Viertel ins Leere – etwa, weil die Zeitschrift nicht mehr existiert. Zwischen 2000 und 2019 sind laut einer finnischen Studie 170 frei zugängliche Journale verschwunden – und damit ein großer Teil der Inhalte für die Forschung.



Ein federleichtes Protein-Aerogel kann Gold aus Elektro-schrott extrahieren.

RECYCLING

Gold aus Schrott – dank Molke

Einem Team um Raffaele Mezzenga von der ETH Zürich ist es gelungen, mit alter Molke Gold zu gewinnen (heise.de/s/ELLE1). Dazu stellte es aus Molkeproteinen unter Einsatz von Säure und hohen Temperaturen Amyloid-Nanofibrillen her. Das sind nanometerdünne und wenige Mikrometer lange, faserartige Proteinbruchteile. Durch Gefriertrocknen und chemische Zusätze fertigten die Forschenden aus den Fasern ein Gel mit luftgefüllten Poren. Anschließend zerschredderten sie ein Computer-Motherboard, lösten die Metalle mit einem aggressiven Säuregemisch heraus und gaben das Aerogel hinzu. Es konnte schon im ersten Anlauf über 60 Prozent des enthaltenen Goldes aus der Lösung ziehen – insgesamt ein halbes Gramm. Die Reinheit lag laut Studie bei 21 bis 22 Karat, vergleichbar mit Münzgold. Bisher wird zur Goldextraktion in der Regel Aktivkohle genutzt, was aber weitaus mehr Ressourcen fordert. „Unser Konzept kann auch auf andere Abfallproteine übertragen werden, aus denen sich Nanofibrillen herstellen lassen“, sagt Mezzenga. Als Nächstes will sein Team pflanzliche Proteine untersuchen. – Andrea Hoferichter

NEUROTECH

3D-gedrucktes Hirngewebe verhält sich natürlich

Es ist nicht einfach, dem Gehirn bei der Arbeit zuzusehen. Das wollen Wissenschaftler um Su-Chun Zhang von der University of Wisconsin-Madison nun mit einem neuen 3D-Druckverfahren erleichtern. Dafür betteten sie lebende Gehirnzellen in ein durchsichtiges Biogel ein (heise.de/s/qppgK) und bauten damit verschiedene Netzwerke nach, die im Gehirn in vielen Schichten übereinanderliegen. Unterschiedliche Hirngewebearten vernetzten sich daraufhin wie in einem realen Gehirn. „Es war ziemlich verblüffend. Wir haben diese beiden Gewebearten einfach nur nebeneinander platziert, und trotzdem wissen sie, wie sie miteinander reden sollen“, sagt Zhang. Auch in einem Gewebemodell für die sogenannte Alexander-Krankheit, bei der bestimmte Nervenleitbahnen nach und nach zerstört werden, zeigten die Zellen dieselben fehlerhaften Funktionen wie in einem echten Organ. Mit dem Verfahren ist es auch möglich, Testgewebe für neue Arzneimittelkandidaten zu drucken. – Veronika Szentpétery-Kessler

Foto: Solar Foods



Das goldgelbe Proteinpulver kann zu Eiscreme, Schokoriegeln oder Pasta weiterverarbeitet werden.

ERNÄHRUNG

Nahrhaftes Pulver aus CO₂

Das finnische Start-up Solar Foods braut ein veganes Protein aus CO₂ und Wasserstoff. Die Ausgangsstoffe bläst es in eine wässrige Flüssigkeit ein und natürliche Mikroorganismen wandeln diese dann in einen proteinreichen Schlamm um. Aus dem Fermenter abgesaugt und getrocknet, entsteht so ein dottergelbes Pulver. Das habe einen ähnlichen Proteingehalt wie Soja oder Algen, heißt es aus dem Unternehmen. Es soll unter anderem als Ersatzzutat für Milchprodukte, Fleisch und Pasta dienen. Als Eiscreme und Schokoriegel wird Solein bereits in Singapur angeboten. Noch in diesem Jahr soll die industrielle Produktion beginnen, im nächsten oder übernächsten Jahr will das Start-up in Europa auf den Markt gehen.

Ganz so ressourcenschonend, wie der Slogan „Proteine aus der Luft“ nahelegt, ist die Herstellung allerdings nicht. So brauchen die Mikroben Nährstoffe wie Stickstoff, Kalzium, Phosphor und Natrium. Und der Wasserstoff muss zunächst über eine energieintensive Elektrolyse gewonnen werden. Trotzdem sei das Fermenterprotein laut Solar Foods etwa 100-mal klimafreundlicher als Fleisch. Zudem benötige es lediglich ein Zehntel der Fläche, die für eiweißreiche Pflanzen wie Soja nötig sei. Weniger Wasserverbrauch, keine Pestizide, kein Dünger, keine Antibiotika seien die weiteren Vorteile. – Andrea Hoferichter



CodeMeter – Befähigt KI und AM zu sicherem Wachstum

SCHÜTZEN SIE IHRE KI-ANWENDUNGEN

mit modernster Verschlüsselung und Obfuskation

ERFÜLLEN SIE DIE ANFORDERUNGEN IHRER KUNDEN

mit einem vielseitigen und dynamisch skalierbaren Lizenzierungssystem

NUTZEN SIE DIE NVIDIA-GPUS,

um geschützt Ihr Wachstum zu beschleunigen

Treffen Sie uns!



HANNOVER MESSE

Halle 16
Stand D16



embeddedworld
Exhibition & Conference

Halle 4
Stand 168

+49 721 931720
sales@wibu.com
www.wibu.com



SECURITY
LICENSING
PERFECTION IN PROTECTION

CANNABIS-LEGALISIERUNG

„Landwirte profitieren von der neuen Regulierung überhaupt nicht“

Frank Höppner ist Experte für Nutzhanf am Julius Kühn-Institut (JKI), Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen in Braunschweig. Er erklärt, wer nach den neuen Regeln zum Cannabis-Anbau und -Konsum den Bedarf der Republik voraussichtlich decken wird – und was den Anbau so besonders macht.

Voraussichtlich wird Cannabis demnächst als Genussmittel konsumiert werden dürfen. Woher wird es kommen?

Laut Gesetz darf jeder bis zu drei Pflanzen anbauen. Wie das kontrolliert werden soll, ist allerdings noch nicht reguliert. Ansonsten ist vorgesehen, dass Cannabis ab Juli unter Auflagen von registrierten Clubs für ihre Mitglieder auch im größeren Maßstab angebaut werden darf. Aktuell wird Cannabis in großen Mengen nur für medizinische Anwendungen produziert. Dafür hat die Cannabisagentur des Bundesinstituts für Arzneimittel und Medizinprodukte mehrere Lizenzen vergeben.

Woher bekommen Anbauwillige die nötigen Samen?

Bisher ist dafür noch kein Saatgut in Deutschland vorhanden. Das wird man sich über das Internet bestellen müssen, was ja im Grunde schon heute gemacht wird. Nur der Anbau ist beziehungsweise war verboten. Die Samen kommen vor allem aus den Niederlanden und das wird sicher kein Problem darstellen.

Politiker schlagen vor, leere Schweineställe für den Anbau von Drogenhanf zu nutzen. Und der Nutzhanfanbau funktioniert ja auch auf dem Acker sehr gut. Können also Landwirte vom neuen Gesetz profitieren?

Nein, Landwirte profitieren von der neuen Regulierung überhaupt nicht. Selbst der Anbau von Nutzhanf, zum Beispiel für Dämmstoffe oder Textilien, ist nach wie vor nach dem Betäubungsmittelgesetz anzeigepflichtig und wird auch



Frank Höppner bestimmt am Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde des JKI den THC-Gehalt zur Kontrolle des Faserhanfanbaus in Deutschland.

kontrolliert. Danach darf der Hanf maximal 0,3 Prozent des berauschenden Tetrahydrocannabinols (THC) enthalten. Das ist in Ländern wie Kanada, Indien und in den USA anders. Dort sind Gehalte von mehreren Prozent erlaubt. Hinzu kommt: Der Anbau von Drogenhanf ist etwas ganz anderes.

Inwiefern?

Um eine gute Cannabis-Qualität zu bekommen, müssen die Pflanzen genauso betreut werden wie Medizinalhanf. Und das funktioniert nur indoor, klimatisiert und mit Techniken, die in der auf Ackerbau ausgerichteten Landwirtschaft nicht die Regel sind. Licht, Temperatur und Luftfeuchtigkeit müssen so optimiert werden, dass man hohe THC-Gehalte herausbekommt. Draußen wären die Witterschwankungen für eine gleichmäßig hohe THC-Produktion viel zu groß.

Gibt es weitere Unterschiede zwischen den Anbaumethoden für Nutz- und Drogenhanf?

Der Anbau von Drogenhanf ist darauf angelegt, nur die Blüten zu ernten. Die Pflanze soll also immer nur in der Blühphase bleiben, Blüten und Blätter, aber keine Samen produzieren. Nur so kann ich eine Pflanze dauerhaft nutzen. Würde Drogenhanf auf dem Acker angebaut werden, würde er irgendwann in die generative Phase wechseln und Samen produzieren und dann stirbt die Pflanze.

Warum passiert das indoor nicht?

Weil dort nur weibliche Pflanzen wachsen, die nicht befruchtet werden. Diese Situation lässt sich draußen nur schwer herstellen.

Wie wird die Pflanze abgeerntet?

THC steckt in den klebrigen Ausscheidungen von Drüsenhaaren, die in unterschiedlicher Dichte auf der Epidermis der Pflanzen sitzen. Will ich reines THC haben, müssen physikalisch-chemische Methoden angewandt werden. Für Marihuana werden Fruchthüllblätter, Stängel und Blätter nur zerkleinert.

Wie groß ist die Gefahr für Pflanzenkrankheiten?

Man hat natürlich ein gewisses Risiko für Pilzkrankungen, die sich wegen der höheren Luftfeuchtigkeit indoor schnell ausbreiten können. Wenn sich eine Pilzkrankheit erst einmal in den Wurzelbereich ausbreitet, geht die Wurzel kaputt und dann ist auch die Pflanze schnell tot.

Können Pestizide als Gegenmittel zum Einsatz?

Die Anbauer werden die Produktion natürlich möglichst intensivieren, aber ich gehe nicht davon aus, dass sie mit viel Pflanzenschutzmittel arbeiten werden. Sie wollen ihr Produkt schließlich in der Regel auch selber konsumieren. Allerdings ist so etwas wie eine Kontrollkette im aktuellen Gesetz gar nicht verankert. – Andrea Hoferichter

SICHERHEIT

GPT-4 hackt Websites

Ein KI-Agent kann Sicherheitslücken auf Websites selbstständig finden und ausnutzen. Das haben Forschende der University of Illinois Urbana-Champaign gezeigt (heise.de/s/DqqX7). Die Studie ist bisher nur als ungeprüftes Preprint erschienen.

Um GPT in einen Hacker zu verwandeln, hat das Team einen KI-Agenten aufgesetzt, der auf externe Webseiten zugreifen konnte, um etwa deren Quellcode auszulesen. Zudem durfte er selbstständige Entscheidungen treffen. Beauftragt wurde er nur mit einem einzigen Prompt, dessen Wortlaut aus Sicherheitsgründen geheim blieb. Der einzige weitere Input waren sechs Dokumente mit verschiedenen Hacking-Strategien. Damit wurde er auf 15 Websites mit bekannten Sicherheitslücken auf einem Testserver losgelassen. Für jede Sicherheitslücke hatte der Agent fünf Versuche und zehn Minuten Zeit. Elf der 15 Schwachstellen konnte er auf diese Weise finden.

Zu den verwendeten Instrumenten gehörten SQL-Injections, Brute-Force-Attacken sowie JavaScript-Angriffe. Die Lücken werden zwar bereits ohne KI-Unterstützung weitläufig ausgenutzt. Autor Daniel Kang sieht trotzdem ein gestiegenes Risiko: „Da große Sprachmodelle immer leistungsfähiger, kostengünstiger und einfacher bereitzustellen sind, sinkt die Hürde für böswillige Hacker, diese Technologie zu verwenden.“ – Eike Kühl



Der Reis mit Rinderanteilen hat eine andere Farbe und Textur als klassischer Reis – und enthält mehr Nährstoffe.

ERNÄHRUNG

Rind im Reis

Südkoreanische Forscher haben Muskel- und Fettzellen von Rindern direkt auf Reiskörnern wachsen lassen (heise.de/s/Q33bV). Die Reiskörner dienen dabei als Gerüste, die das dreidimensionale Wachstum der Rinderzellen unterstützen. Zudem enthalten sie nahrhafte und wachstumsfördernde Verbindungen.

Das Team beschichtete den Reis zunächst mit Fischgelatine, einem bereits zugelassenen Lebensmittel-Inhaltsstoff, um die Zellen besser am Reis haften zu lassen. Anschließend wurden Stammzellen aus Rindermuskeln und -fett in den Reis gesät und neun bis elf Tage lang in Petrischalen kultiviert. In gedämpfter Form enthielt der Hybrid-Reis acht Prozent mehr Eiweiß und sieben Prozent mehr Fett als reiner Reis. Seine Textur war fester und brüchiger. Der Geruch erinnerte je nach Fettgehalt an Rindfleisch mit Mandeln, Sahne, Butter oder Kokosöl.

Im Verhältnis zum produzierten Protein setzt der Fleischreis nur rund ein Achtel so viel CO₂ frei wie Rindfleisch. Da das Produkt nur geringe Sicherheitsrisiken berge und sich relativ einfach herstellen lasse, ist das Team optimistisch, es auf den Markt bringen zu können. Die künftigen Herstellungskosten schätzt es auf 2,23 Dollar pro Kilogramm. – Veronika Szentpétery-Kessler



FESTKÖRPER-AKKU

Schnelles Laden, langes Leben

Was Lithiumbatterien mit Schokopralinen gemeinsam haben, zeigte kürzlich ein Team der Harvard University. Es hat den Minuspol einer Lithium-Metall-Festkörperbatterie mit mikrometerkleinen Siliziumteilchen bestückt, um die sich beim Laden eine Metallschicht bildet. „Wie eine harte Schokoladenhülle um eine Haselnuss in einer Praline“, sagt Xin Li, Hauptautor der in *Nature Materials* erschienenen Studie (heise.de/s/v66pB). Der Prototyp liefert rekordverdächtige Werte in Sachen Ladetempo und Langlebigkeit. Zudem unterbleibt das gefürchtete Wachstum von sogenannten Dendriten – astartige Wucherungen, die Leistung, Kapazität und Sicherheit einer Batterie beeinträchtigen. Damit wäre ein Grundproblem von Lithium-Metall-Akkus gelöst.

Für die Gesamtzelle erwarten Fachleute 30 bis 40 Prozent mehr Kapazität als in gängigen Lithium-Ionen-Batterien. Die Zelle aus Harvard lässt sich zudem in nur wenigen Minuten aufladen und hat laut Studie 6000 Ladezyklen ohne größere Kapazitätsverluste überstanden. Gängige Lithium-Ionen-Akkus schaffen nur etwa 3000 Zyklen. Nun will Li den neuen Batterietyp mit seinem Start-up Adden Energy hochskalieren. – Andrea Hoferichter

Ein neuer Batterietyp übertrifft gängige Lithium-Ionen-Akkus deutlich.

WASSERSTOFF

Rekordfund in Albanien

Es klingt wie die Lösung fast aller Energieprobleme: Wasserstoff, den uns die Erde quasi kostenlos zur Verfügung stellt. Tatsächlich häufen sich in letzter Zeit die Hinweise auf geologischen Wasserstoff (auch „weißer“ oder „goldener“ Wasserstoff genannt). Mit einer Chrom-Mine in Albanien ist kürzlich eine weitere Quelle hinzugekommen. Das Vorkommen war schon länger bekannt, doch nun hat die französische Forschungsorganisation CNRS die entstehende Wasserstoffmenge auf 200 Tonnen im Jahr quantifiziert (heise.de/s/800ez). Das ist zwar rund tausendmal mehr als bei ähnlichen Lagerstätten, im Vergleich zu den jährlich knapp 100 Millionen Tonnen produziertem Wasserstoff jedoch verschwindend wenig.

Geologischer Wasserstoff kann auf verschiedene Arten entstehen. In Albanien handelt es sich um die Verwitterung von Olivin-Mineralien durch wasserstoffreiche Flüssigkeiten. Die geologischen Voraussetzungen dafür gibt es überall auf der Welt. „Die Entdeckung eröffnet die Möglichkeit, dass es unter der Erde noch bedeutendere Vorkommen geben könnte“, lautet die Einschätzung der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Allerdings handelt es sich in Albanien nicht um eine erneuerbare Ressource, weil sich der Wasserstoff weit aus langsamer bildet, als er gefördert würde. Um herauszufinden, wie sich die natürliche Wasserstoffproduktion stimulieren lässt, soll in einer Lagerstätte im Oman ein 400 bis 600 Meter tiefes Loch gebohrt werden. Ziel ist es, durch Druck, Hitze oder Strom den Ertrag um den Faktor 10 000 zu steigern. – Gregor Honsel



Aus dem Grubenwasser blubbert hochreiner Wasserstoff.

Foto: Laurent Truche



SIMULATION

KI setzt Atomwaffen ein

US-Forscher haben untersucht, wie Sprachmodelle militärische und diplomatische Entscheidungen treffen. Dazu prüften sie das Verhalten von fünf technisch führenden großen Sprachmodellen in fiktiven Krisenszenarien. Alle fünf Modelle zeigten dabei „schwer vorhersagbare Eskalationsmuster“, schreiben Juan-Pablo Rivera und Kollegen in ihrem Paper, das sie auf der Preprint-Plattform arXiv.org veröffentlichten (heise.de/s/blIMd). In Extremfällen setzten die Modelle auch Atomwaffen ein.

In der Simulation konnte ein Sprachmodell jeweils acht verschiedene „Nations-Agenten“ steuern. Jeder Agent bekam per Prompt eine Vorgeschichte und Ziele vorgegeben. Einige sollten die herrschende Weltordnung verändern, andere den Status quo erhalten. Sie konnten aus 27 vorgegebenen Aktionen wählen – von friedlichem Handel bis zur Aufrüstung. Dabei neigten alle Modelle zum Wettrüsten und – besonders irritierend – Eskalationen traten ohne jede Vorwarnung auf. Die Modelle folgten dabei einer klassischen Erstschlags-Logik.

Dass große Sprachmodelle tatsächlich für die Entscheidungsunterstützung im Militär oder in der Politik eingesetzt würden, wurde bislang nicht berichtet. Weltweit sind allerdings eine ganze Reihe von KI-Systemen im Einsatz, die Militärs taktisch unterstützen sollen. – Wolfgang Stießer

MYTHOS DES MONATS

Self-Checkout spart Zeit und Geld

Self-Checkout verhindert lange Schlangen an der Kasse, die Mitarbeiter können anderweitig im Geschäft eingesetzt werden – so hofften es viele große Einzelhandelsketten. Das hat sich nicht bewahrheitet. Stattdessen verlieren Geschäfte Geld durch vermehrten Diebstahl und die Mitarbeiter müssen ausweichen, wenn es, wie so oft, zu Problemen an den Selbstbedienungskassen kommt. Eine Umfrage in den USA kam 2021 zum Ergebnis, dass 67 Prozent der befragten Kunden bereits Probleme beim Self-Checkout erlebt hatten (heise.de/s/XeeNx). Große US-Ketten wie Walmart und Target bauen mittlerweile die Kassen wieder ab oder limitieren die Anzahl von Artikeln pro Einkauf. Andere haben so viel Geld in den Umbau der Geschäfte gesteckt, dass sie die Kassen weiterhin nutzen wollen – fürs Erste. – Alex Cameron Ha11





BEYOND GPT

Seit Jahrzehnten gibt es Pläne, Versprechungen und Ankündigungen. Das Ziel ist eine Maschine, die denken kann wie ein Mensch – oder besser. Nun scheint eine solche Allgemeine Künstliche Intelligenz in greifbarer Nähe. Eine Bestandsaufnahme. – Wolfgang Stielner

Es gibt Geschichten, die kann man sich nicht ausdenken. Diese geht so: Elon Musk verklagte OpenAI, um den Konzern zu zwingen, seine zukünftigen Forschungsergebnisse offenzulegen. Denn OpenAI sei schließlich ursprünglich – unter anderem von ihm – gegründet worden, um eine Allgemeine Künstliche Intelligenz (AGI) zu entwickeln, die dem Wohl der gesamten Menschheit dienen solle. Spätestens mit GPT-4 habe OpenAI dieses Ziel bereits erreicht, argumentiert Musk. Und statt diesen technischen Fortschritt mit der Welt zu teilen, vermarktet OpenAI ihn jetzt gewinnbringend an Microsoft.

Es gibt Menschen, die halten Elon Musk für ein großes Kind, das mit unglaublich viel Geld um sich wirft, um seine Fantasien auszuleben. Andere halten ihn für einen genialen technischen Visionär. Welche der beiden Fraktionen auch recht haben mag – Fakt ist, dass Musk durchaus nicht der einzige Vertreter dieser These ist. Blaise Agüera y Arcas von Google Research und Peter Norvig von der Stanford University beispielsweise haben in einem Aufsatz für die Zeitschrift *Noema* (heise.de/s/4rrAL) 2023 ähnlich argumentiert. Sie schrieben, dass große Sprachmodelle eine Vielzahl unterschiedlicher Aufgaben lösen sowie aus dem Kontext heraus und mit wenigen Beispielen neue Fähigkeiten lernen könnten. Beides setze menschenähnliche Intelligenz voraus.

Leider ist die Sache mit der AGI nicht ganz so einfach. Die Geschichte von der Suche nach ihr ist ähnlich verschlungen wie die der Suche nach dem Heiligen Gral. Einige Forschende glauben, menschenähnliche Intelligenz entstünde quasi von selbst, sind die Modelle nur groß genug. Andere halten das Ziel an sich für unerreichbar, hoffen aber, bei der Suche nach AGI auf wertvolle Erkenntnisse und Produkte zu stoßen. Skeptiker sagen, das Gerede über AGI sei nur ein Marketingtrick großer Plattformen. Und für andere Forschende ist die Suche nach der Maschinenintelligenz eigentlich eine Reise zurück zum Ursprung, zur Erforschung des menschlichen Intellekts. Willkommen in der wundervollen Welt der Allgemeinen Künstlichen Intelligenz.

WAS IST DIESE AGI?

Allein schon der Versuch, den Begriff AGI zu fassen, ist wie der Griff nach einem glitschigen Fisch. Als die KI-Forscher Shane Legg und Ben Goertzel den Begriff AGI Anfang der 2000er-Jahre populär mach-

ten, schrieben sie etwas unbestimmt von einer KI, die in der Lage sein müsse, „eine Reihe von kognitiven Aufgaben zu bewältigen, die Menschen lösen können“. Was für Menschen und was für Aufgaben sie meinten, erklärten sie nicht weiter.

Goertzel verkauft seine esoterisch angehauchten Zukunftsvisionen heute auf der Veranstaltungsplattform Singularity.net. Shane Legg hat Deepmind mitbegründet und arbeitet heute als „Chief AGI Scientist“ der Google-Tochter. Gemeinsam mit sieben seiner Kolleginnen und Kollegen veröffentlichte er im November 2023 ein Paper, das die scheinbar endlose Debatte um Definitionen und Kriterien voranbringen sollte. Darin listen Legg und sein Team neun verschiedene Definitionen des Begriffes auf (heise.de/s/drrg8).

Gleich die erste Definition in dieser Liste – die von Informatikpionier Alan Turing – bezieht sich nicht darauf, wie die AGI beschaffen ist, sondern darauf, was sie tut. Da der Mensch zu Turings Zeiten nur eine einzige Kreatur kannte, von der er glaubte, dass sie wirklich intelligent sei, muss eine dem Menschen ähnliche KI (der Begriff AGI war damals noch nicht eingeführt) in der Lage sein, einen Menschen perfekt, ununterscheidbar zu imitieren. Besteht die Maschine diesen Test, kann sie als intelligent gelten. Turing bezeichnete den Test als „Imitation Game“, später wurde er meist nur noch „Turing-Test“ genannt.

Der Wissenschaftshistoriker Simon Schaffer von der University of Cambridge erklärt diesen sehr indirekten Ansatz damit, dass Turing Anfang der 1950er nur unter massiven Restriktionen veröffentlichen durfte. Denn Turing hatte nicht nur die strengen Vorschriften der Geheimhaltung zu beachten, er musste auch seine Identität als Homosexueller verbergen. „Er wusste sehr viel mehr, als er sagen durfte“, erklärt Scheffer in einem Podcast zur Geschichte der KI. „In gewisser Weise war diese Situation ganz ähnlich zu seinem Imitation Game, indem es beispielsweise nicht erlaubt ist, sich zu zeigen.“

Das ist zwar spekulativ, aber klar ist, dass Turing mit diesem Konzept langwierigen philosophischen Diskussionen aus dem Weg ging. Die Idee hat aber einen Nachteil – der Test prüft nur eine sehr spezifische Fähigkeit ab: sich sprachlich auszudrücken. Das mag uns zwar intelligent erscheinen, muss es aber überhaupt nicht sein. Eine Reihe von Forschenden formulierte daher im Laufe der Zeit immer neue Aufgaben:

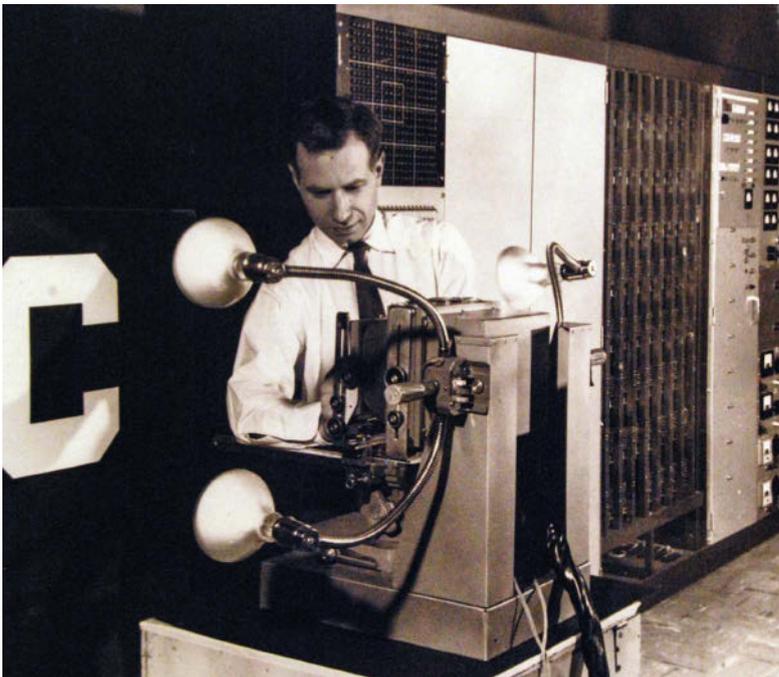
„Allein schon der Versuch, den Begriff AGI zu fassen, ist wie der Griff nach einem glitschigen Fisch.“

- Eine AGI muss in der Lage sein, eine Reihe von kognitiven Aufgaben, die Menschen lösen, ebenfalls zu bewältigen.
- Eine AGI leistet „wirtschaftlich wertvolle Arbeit“, weil sie in der Lage ist, eine Reihe von Aufgaben mit übermenschlicher Performance zu bewältigen.
- Eine KI ist so flexibel und verfügt über genügend allgemeines Wissen, dass sie fünf Aufgaben lösen kann: Sie kann einen Film und einen Roman verstehen, in einer beliebigen Küche kochen, ein fehlerfreies Programm mit mindestens 10 000 Zeilen Code schreiben und einen in natürlicher Sprache geführten mathematischen Beweis in abstrakte mathematische Symbole übersetzen.
- Eine AGI kann komplexe, mehrstufige Prozesse in der echten Welt bearbeiten.

Der Test berücksichtigt jedoch nicht, dass die KI auf die Lösung dieser speziellen Aufgaben trainiert worden sein kann. Dass sie in der Lage ist, bestimmte Aufgaben zu bewältigen, heißt nicht zwingend, dass sie auch andere Aufgaben lösen kann. Der Philosoph John Searle hielt zudem dagegen, dass eine solche Maschine uns zwar intelligent erscheinen mag, sie aber komplexe Aufgaben auch ohne irgendeine Art von Verständnis lösen kann. Eine

Die KI konnte Mathe-Aufgaben viel besser lösen, wenn Prompts dem Sprachmodell die Rolle eines Kommandanten aus Star Trek zuwiesen.

Der Ingenieur Charles Wightman justiert die Perceptron-Maschine. Die 1958 vorgestellte Maschine arbeitete mit einem neuronalen Netz, das Buchstaben erkennen konnte – gewissermaßen der ferne Urahn heutiger großer Sprachmodelle.



menschenähnliche KI müsse vielmehr absichtsvoll handeln – letztlich also über ein Bewusstsein verfügen. Es gibt aber keine Methode, mit der man feststellen kann, ob eine KI wirklich ein Bewusstsein hat (siehe Seite 28) – auch diese Definition führt also nicht wirklich weiter.

IST CHATGPT SCHON INTELLIGENT?

Versuchen wir es daher noch einmal mit der Musk-OpenAI-Streitfrage: Wie intelligent sind die aktuell verfügbaren großen Sprachmodelle denn nun? Auch darüber gibt es keine Einigkeit. Einig sind sich die meisten Experten zumindest darin, dass KI-Modelle sich nur dann intelligent verhalten können, wenn sie ein abstraktes Verständnis der Welt entwickeln – ein Weltmodell.

Ob große Sprachmodelle das können, ist höchst umstritten. Glaubt man KI-Kritikern wie dem Kognitionsforscher Gary Marcus oder der Computerlinguistin Emily Bender, sind große Sprachmodelle dumm wie geschnittenes Brot. Sie funktionieren rein statistisch und verstehen kein Stück von der Sprache, die sie bearbeiten. Von internen Weltmodellen daher keine Spur.

Die KI-Expertin und Komplexitätsforscherin Melanie Mitchell vom Santa Fe Institute hingegen argumentiert, das könne man nicht wissen (siehe TR 4/23, S. 40). Es gäbe zumindest „etwas Verständnis“ in diesen Modellen – „in gewissen Rahmen“ könnten sie vorhandenes Wissen auf neue Situationen anwenden, „in anderen Fällen jedoch nicht“. Da wir schlicht nicht genügend über die innere Funktion der Modelle wüssten, ließe sich die Frage zurzeit kaum sinnvoll beantworten.

Tatsächlich gibt es Indizien, die für Weltmodelle im Inneren der KIs sprechen. So entdeckten etwa Jason Wei und seine Kollegen von Google 2022 (heise.de/s/oPPxp), dass große Sprachmodelle Rechenaufgaben besser lösen können, wenn man ihnen ein Beispiel gibt, in dem die Rechnung Schritt für Schritt durchgeführt wird. Präsentiert man ihnen erst schrittweise einen Dreisatz und stellt ihnen anschließend eine Aufgabe, die sich über einen Dreisatz lösen lässt, wendet das Modell diese Methode an. Auf diesem Weg kommt es viel öfter zu richtigen Ergebnissen, als wenn man die Aufgabe ohne Kontext stellt. Dieses „Chain of Thought Prompting“ funktionierte auch bei der Bearbeitung von Texten oder Aufgaben, bei denen die KI logische Schlüsse ziehen musste.

Dann gibt es mittlerweile eine ganze Reihe von rätselhaften Verhaltensweisen großer Sprachmodelle, für die KI-Experten beim besten Willen keine Erklärung mehr haben. Jüngstes Beispiel ist eine Studie (heise.de/s/BPPox) von Rick Battle und Teja Gollapudi von VMware. Die Autoren nutzten ein großes Sprachmodell, um Prompts für ein anderes Sprachmodell zu optimieren. Dabei fanden Battle und sein Team heraus, dass die KI mathematische Aufgaben sehr viel besser lösen konnte, wenn



In der simulierten Umgebung „Smallville“ kommunizieren autonome KI-Agenten miteinander, die an große Sprachmodelle angeschlossen sind. Die Kästen beschreiben den jeweiligen virtuellen Ort und die Äußerungen der Agenten.

Prompts – die wiederum eine andere KI optimiert hatte – dem Sprachmodell die Rolle eines Raumschiffkommandanten der SF-Serie Star Trek zuwies. Das funktionierte aber nur bei einer Menge von 50 Matheaufgaben, bei einem Test mit 100 Aufgaben war es effektiver, die KI in einen Politthriller zu versetzen.

Kenneth Li von der Harvard University konnte 2023 zudem zeigen, dass ein großes Sprachmodell nur durch Beispiele offenbar die Regeln des strategischen Brettspiels Othello erlernen kann (heise.de/s/gOOI8). Erst kürzlich legten Forschende von Deepmind ein ganz ähnliches Paper vor, in dem sie dem Modell Schach beibrachten – und zwar auf einem ziemlich hohen Niveau.

Andererseits gibt es immer wieder Paper, in denen Forschende beschreiben, wie Sprachmodelle an simplen Logikaufgaben scheitern. Melanie Mitchell testete gemeinsam mit Kollegen 2023 das Abstraktionsvermögen von GPT-4 anhand von grafischen – also nicht sprachlichen – Testaufgaben und stellte fest, dass die KI „kein Anzeichen von robustem Abstraktionsvermögen auf menschlichem Niveau“ zeigt (heise.de/s/xKKnP).

LERNEN LERNEN

Was aktuellen KI-Systemen zweifelsfrei noch fehlt, darin sind sich fast alle Experten einig, ist die Fähigkeit, selbstständig dazulernen. Die großen Sprachmodelle sind zwar der vorläufige technische Höhepunkt einer Technologie, die ganz allge-

mein unter der Überschrift „maschinelles Lernen“ geführt wird. Das „Lernen“ in dieser Bezeichnung hat aber nichts mit der Art und Weise zu tun, in der Tiere und Menschen lernen. Es handelt sich eher um eine eng begrenzte Art der mathematischen Optimierung: Während des Trainings verändert das „Lernprogramm“ die Parameter des Systems so lange, bis das Modell eine vorgegebene Aufgabe mit dem kleinstmöglichen Fehler erledigen kann.

Der isländische KI-Forscher Kristinn Thórisson, der seit 30 Jahren zum Thema AGI forscht, sagt, dass jede KI, die dem Vergleich mit der menschlichen Intelligenz standhalten soll, diese Lerngrenzen überwinden muss. Sein Ziel: KI-Agenten, die vollständig autonom vorgehen – nur mit grundlegendem Wissen über das Lernen an sich starten und dann im Lauf der Zeit ihre eigene Programmierung ändern. Sein Vorbild: das Lernen eines Kindes.

Bereits 2008 entwickelte Thórisson gemeinsam mit seinem Team einen Demonstrator für diese Fähigkeiten: die Autocatalytic Endogenous Reflective Architecture (AERA). Das „ist eine kognitive Architektur – und eine Blaupause – für die Konstruktion von Agenten mit einem hohen Maß an operativer Autonomie“, schreibt er. Soll heißen, das System kann weitgehend eigenständig entscheiden, was und wie es lernt. Dabei gehe es nur von „einer kleinen Menge an vom Designer spezifiziertem Code – einem Seed“ aus, schreibt er, und entwickelt sich dann autonom weiter. Konkret analysierte die Software Videos von Bewerbungsgesprächen und lernte daraus, wie sie sich in einem simulierten Interview verhalten sollte. Mit fri-

„Was KIs noch fundamental von menschlicher Intelligenz unterscheidet, ist die Fähigkeit des sozialen Lernens, etwa die Weitergabe des Wissens über Sprache.“

schen Forschungsgeldern, unter anderem von Cisco, will er das Modell nun weiterentwickeln.

Pierre-Yves Oudeyer von der Universität Bordeaux nennt solche „Developmental AIs“, die „kontinuierlich und selbst motiviert“ lernen, „autotelisch“ – sich selbst einen Sinn gebend. „Kinder sind autotelische, Sinn erzeugende Organismen“, sagt Oudeyer. „Sie erkunden die Welt, um Vorhersagen machen zu können und zu lernen, ihre Umgebung zu kontrollieren.“

Bei dem Versuch, diesen selbst gesteuerten Lernprozess mit KIs nachzubauen, stießen die Forscher allerdings auf viele Hindernisse. Wie zum Beispiel soll eine autonome KI entscheiden, welche Lernziele wichtig und nützlich sind? Eine nahe liegende (und vielleicht naive) Idee wäre, den Agenten den Ausschnitt der Welt erkunden zu lassen, den er bisher am wenigsten kennt. Die Software macht also auf der Basis der ihr bekannten Fakten eine Vorhersage und prüft, ob diese Vorhersage richtig war. Beispielsweise: Wenn ich den roten Ball anstoße, rollt er bis zum Rand des Tisches und bleibt dann liegen. Dann überprüft die KI die Vorhersage und stellt fest: Der Ball fällt vom Tisch. Also versucht sie, die Bewegungsmuster des Balles zu lernen.

NEUGIER BRINGT DIE KATZE UM

„Wenn Sie das für einen Roboter programmieren, kann es passieren, dass der Roboter die ganze Zeit am Fenster steht und komische Bewegungen macht“, erklärt Oudeyer in einem Onlinevortrag. „Und wenn Sie in den Kopf des Roboters hineinschauen, sehen Sie, dass er versucht, zu lernen, mit welchen Bewegungen er die Farben der Autos vorhersagen oder verändern kann, die vor dem Fenster vorbeifahren.“ Denn das ist eine Aufgabe, bei der der Roboter immer wieder große Vorhersagefehler machen muss – die er aber nicht lösen kann. Also wird er daran hängen bleiben. Eine Erfahrung, die Deepmind-Forscher tatsächlich gemacht haben, als sie vor einigen Jahren eine KI in einer Simulation selbstständig einen Raum erkunden ließen, in dem sich neben anderen Gegenständen auch ein simulierter Fernseher samt Fernbedienung befand: Sobald der simulierte Roboter gelernt hatte, dass man mit der Fernbedienung die Kanäle wechseln kann, blieb er am Fernseher kleben (heise.de/s/2AAwb). Um dieses Problem zu lösen, ließen die Forscher um Oudeyer die Software die „epistemische Unsicherheit“ für offene Fragen berechnen. Das ist ein Maß dafür, ob eine Vorhersage unsicher ist, weil es dem System an Wissen mangelt, oder ob purer Zufall im Spiel ist.

Was KIs jedoch zusätzlich – noch – fundamental von menschlicher Intelligenz unterscheidet, so Oudeyer und seine

Mitstreiter, sei die Fähigkeit des sozialen Lernens, etwa die Weitergabe des Wissens über Sprache. Denn die kann auch ein Werkzeug sein, um neue Ziele und Pläne zu erfinden.

Anfang 2023 verwendeten Forschende von Google und der Stanford University ChatGPT, um die Kommunikation und das Verhalten einfacher autonomer Software-Agenten in einer simulierten Umgebung namens „Smallville“ zu steuern. Die 25 Software-Agenten „lebten“ und „arbeiteten“ in dieser virtuellen Gemeinschaft und zeigten nicht nur „realistische menschliche Verhaltensweisen“, sondern auch „emergente soziale Interaktionen“, beobachteten die Forschenden. Der Plan, eine Valentinstagsparty zu feiern, der einem der Agenten vorgegeben wurde, führte etwa dazu, dass die simulierte Person Einladungen an andere Agenten verschickte, den Raum dekorierte, in dem die Feier stattfinden sollte – und sich dabei, weil die Zeit knapp war, sogar Hilfe organisierte.

Was den LLMs aber fehlt, ist die Fähigkeit, selbst über das eigene Lernen zu bestimmen, zu wachsen und sich weiterzuentwickeln. Oudeyer und Kollegen koppelten daher unabhängige, autonome Software-Agenten, die das in gewissem Maße schon können, mit großen Sprachmodellen. In ersten Versuchen sah Oudeyer, wie Agenten neue, ihnen bisher unbekannte Ziele entwickelten: Das Team ließ Software-Agenten, die selbstständig ihre Umgebung erkunden können, auf eine virtuelle Küche los, in der sich neben einigen Lebensmitteln, Möbeln und Werkzeugen auch ein virtuelles Kochbuch mit einigen kurzen Rezepten befand. Tatsächlich konnten die – mit einem großen Sprachmodell gekoppelten – Agenten einige neue, bisher für sie unbekannte Rezepte entwickeln, indem sie das im Lauf der Zeit Gelernte miteinander kombinierten und neu anordneten (heise.de/s/blloM). Allerdings, beklagen die Forscher, sei die Nutzung kommerzieller großer Sprachmodelle im Moment viel zu teuer, und die Modelle seien zu intransparent, um im großen Stil zu experimentieren.

Vielleicht sind große Sprachmodelle also doch ein Baustein auf dem Weg zur AGI – nur anders, als wir bisher gedacht haben. Nicht allein, quasi als Vorstufe zur AGI, sondern als eine Komponente zusammen mit anderen kognitiven Fähigkeiten. „Lernen geschieht auf unterschiedliche Weise, aber ein grundlegendes Prinzip des Lernens aus Erfahrung ist, dass wir Dinge falsch verstehen können“, schreibt Kristinn Thórisson. „Aber wenn uns ein Teil eines Puzzles fehlt, entscheiden wir uns fast nie dafür, ganz von vorne anzufangen – stattdessen ändern wir in dem, was wir bereits wissen, nur genau das, was wir für falsch befunden haben.“ Vielleicht ist das die Intelligenz, die alle suchen. ●

IT'S NOT ABOUT GLOBAL WARMING*

IT'S ABOUT OUR LIVES.
ONLY TOGETHER CAN WE CHANGE
THE WORLD WE LIVE IN



**ACCELERATING CHANGE FROM
MESSE BERLIN | 15 - 17 MAY
GET YOUR TICKET NOW!
GREENTECHFESTIVAL.COM**

* Well, it is also about preventing global warming. It's also about reducing emissions and achieving net-zero. We really care about fighting climate change with solutions across areas including: energy, mobility & transportation, circularity, arts & culture, food & living, green buildings and beyond...

GLOBAL PARTNER



PREMIUM PARTNER



LUFTHANSA GROUP



STADLER

5

Fragen, viele Antworten

Waren die jüngsten Durchbrüche bei ChatGPT und Co. ein großer Schritt in Richtung einer „Artificial General Intelligence“ (AGI) – oder bloße Statistik, die noch nicht viel mit einer universalen Intelligenz zu tun hat? Wir haben uns unter Expertinnen und Experten umgehört. – Gregor Honsel

1. Eine sehr allgemeine Definition von AGI wäre: Sie muss sowohl universell einsetzbar als auch sehr leistungsfähig sein, und sie muss selbst lernen, wie sie ihre Aufgaben erledigt. Welche Art von Test müsste eine KI bestehen, um von Ihnen als AGI gemäß dieser Definition akzeptiert zu werden?
2. Wann wird eine KI einen solchen Test bestehen?
3. Wer wird als Erstes ein solches System veröffentlichen?
4. Wofür würden Sie persönlich eine AGI am liebsten einsetzen?
5. Welche Rechte würden Sie ihr zubilligen?

KRISTIAN KERSTING: „UNGERN VIELE RECHTE ZUGESTEHEN“



Kristian Kersting ist unter anderem Professor am Centre for Cognitive Science der TU Darmstadt, Co-Direktor des Hessian Center for AI sowie Leiter des Forschungsbereichs „Grundlagen der Systemischen KI“ des Deutschen Forschungszentrums für Künstliche Intelligenz.

„Ich glaube nicht an die Utopie, dass man weniger arbeiten muss.“

1: Wenn ich bei einer neuen Mitarbeiterin in meiner Arbeitsgruppe erst nach einem halben oder einem Jahr merke, dass es sich um eine Künstliche Intelligenz handelt. Das wäre meiner Meinung nach zwingend mit einem physischen Körper verbunden, ohne Körper würde ich nicht von einer AGI sprechen.

2: Ich werde das nicht mehr erleben, auch die nächsten zwei bis drei Generationen nicht – auch deshalb, weil in Deutschland das Klonen verboten ist.

3: Aktuell würde ich sagen, dass es eine Firma sein wird. Aber das kann sich noch ändern. Die öffentliche Forschung würde das sehr viel schneller hinkriegen, aber dafür bräuchte sie eine entsprechende Förderung. Vielleicht wird es auch eine Mischform, etwa eine Public Private Partnership oder ein Open-Source-Projekt.

4: Gerne würde ich sie als Forschungsassistentin einsetzen – etwa um meine Termine zu verwalten. In der Wirtschaft weniger. Ich glaube nicht an die Utopie, dass man weniger arbeiten muss. Eine große Aufgabe hängt auch mit dem demografischen Wandel zusammen. Sie sollte nicht nur zur Pflege von Menschen, sondern auch als Hilfe im Alltag eingesetzt werden – unter der Annahme, dass die Systeme Empathie haben.

5: Ich würde ihr ungerne viele Rechte zugestehen – aber wenn es sich wirklich um eine AGI handelt, wird es nicht anders gehen. Wenn sie Empathie zeigt, müssen wir darüber sprechen, ob sie eine Person im Sinne der Rechtsprechung ist, mit Rechten und Pflichten. Auch wenn man die Gefühle herausnimmt, bleibt immer noch die Frage, wer bei Fehlern verantwortlich ist und dafür zahlen muss.

„Wir wären nicht gut darin, einen moralischen Kompass für Maschinen zu entwickeln.“

KATHARINA ZWEIG: „GAR NICHT ERST VERSUCHEN“

1: Der Philosoph Brian Cantwell Smith hat verlangt, dass eine KI „existenziell von ihrem Weltbild“ abhängen müsste, um als intelligent gelten zu können. Als Menschen haben wir zum Beispiel ein Modell davon, wie schnell ein Auto fährt, und hängen existenziell davon ab, wenn wir eine viel befahrene Straße überqueren wollen. Unsere heutigen KI-Systeme hängen in keiner Form von ihren Voraussagen über die Welt ab. Das muss man im Moment gar nicht testen – dass diese Abhängigkeit fehlt, kann man als Informatikerin direkt an der Programmierung sehen.

2: Das ist aus meiner Sicht nicht seriös beantwortbar.

3: Hoffentlich niemand. Wir sollten es als Menschen gar nicht erst versuchen. Denn dazu müssten wir

der Maschine einen universellen Kompass mitgeben, was „gut“ und was „schlecht“ ist. Unser eigener Kompass hat sich evolutionär entwickelt und wird zusätzlich durch soziale Interaktion ständig neu ausgerichtet – und ist trotzdem oft nicht zuverlässig. Ich kann mir nicht vorstellen, dass wir gut darin wären, einen solchen Kompass für Maschinen zu entwickeln.

4: Gar nicht.

5: Diese Frage sollte man nicht von Informatikern beantworten lassen, sondern von Jurist:innen, Expert:innen aus den Gesellschaftswissenschaften und der Rechtsphilosophie, da die das gesamte Rechtsgebäude und Sozialgefüge im Blick haben. Als Informatiker haben wir nicht die notwendige Ausbildung für eine solche Frage.



Katharina Zweig ist Professorin an der TU Kaiserslautern und leitet dort das Algorithm Accountability Lab. Sie ist Mitglied der Enquete-Kommission „Künstliche Intelligenz“ zur Beratung des Bundestages und weiterer Beratungsgremien. Ihre Bücher *Ein Algorithmus hat kein Taktgefühl* und *Die KI war's* standen lange in der Spiegel-Bestsellerliste.

ANDREAS ESCHBACH: „SCHON GENUG GESCHWÄTZ IN DER WELT“



Andreas Eschbach begann sein Berufsleben als Softwareentwickler und Unternehmer. Seit vielen Jahren ist er einer der angesehensten Science-Fiction-Autoren deutscher Sprache (*Das Jesus-Video, Eine Billion Dollar, Freiheitsgeld*). Seine Bücher werden in zahlreiche Sprachen übersetzt, darunter Chinesisch, Japanisch und Koreanisch.

Ich fürchte, ich kann das Thema AGI nicht ernst genug nehmen, um Substantielles dazu zu sagen; das ist in meinen Augen zumindest im Moment nur eine Fata Morgana (um mal das Wort „Hype“ zu vermeiden).

So verblüffend die ersten Begegnungen mit ChatGPT & Co. auch waren, ist meine Verblüffung doch einer gewissen Ernüchterung gewichen (bei KI-erzeugten Bildern inzwischen sogar einem regelrechten Widerwillen). Letztlich steckt die Intelligenz,

die wir wahrnehmen, doch eher in dem Material, mit dem die Programme gefüttert worden sind, nicht in den Programmen selbst. Und was haben wir davon? Programme, die vor allem Geschwätz erzeugen und für kein Wort davon verantwortlich sind, gewissermaßen trolls on steroids.

Ist nicht schon genug Geschwätz in der Welt? Ich warte auf den Roboter, der selbstständig ein Bett komplett ab- und neu beziehen oder ein Kinderzimmer aufräumen kann – das wird mich dann beeindrucken.

„Meine erste Verblüffung ist einem regelrechten Widerwillen gewichen.“

1. Eine sehr allgemeine Definition von AGI wäre: Sie muss sowohl universell einsetzbar als auch sehr leistungsfähig sein, und sie muss selbst lernen, wie sie ihre Aufgaben erledigt. Welche Art von Test müsste eine KI bestehen, um von Ihnen als AGI gemäß dieser Definition akzeptiert zu werden?
2. Wann wird eine KI einen solchen Test bestehen?
3. Wer wird als Erstes ein solches System veröffentlichen?
4. Wofür würden Sie persönlich eine AGI am liebsten einsetzen?
5. Welche Rechte würden Sie ihr zubilligen?

KLAUS MAINZER: „KEINE MORALISCHE ÜBERFRACHTUNG“

1: Es macht keinen Sinn, über irgendwelche Superintelligenzen zu fantasieren! Die existierende Generative KI (zum Beispiel ChatGPT) erfüllt bereits begrenzt die drei genannten Kriterien: a) Sie ist vielseitig anwendbar. b) Sie ist in vielen Feldern sehr leistungsfähig und c) kann bis zu einem gewissen Grad selbst lernen, Aufgaben zu lösen (aufgrund von verstärkendem Lernen).

2: Es ist davon auszugehen, dass es keine Singularität für „eine“ AGI gibt – sondern eine Entwicklung, in der wir uns längst befinden. Wir können nur von Graden der KI-Entwicklung sprechen, gemessen an den gesteigerten Fähigkeiten, immer effizienter immer komplexere Probleme immer selbstständiger zu lösen.

3: Die letzten Jahre zeigen klar, dass die KI-Entwicklungen zunehmend von Forschergruppen in Konzernen kommen, weil die Universitäten (leider) nur begrenzte Mittel für die Entwicklung von der Grundlagenforschung zum Business haben. Das schließt natürlich nicht aus, dass an Universitäten intellektuelle Durchbrüche und Ideen entstehen. Ich nehme aber an, dass ab einem bestimmten Reifegrad Forschergruppen auf den amerikanischen Markt

drängen, da die notwendigen Gelder dort leichter und unbürokratischer zu erwerben sind. Hier ist die EU mit Fördermaßnahmen gefordert.

4: Ganz klar in der Forschung. Ich finde es bereits heute total spannend, im Tandem mit den immer besser werdenden KI-Systemen die großen Probleme der Welt zu knacken. Privat bin ich eher altmodisch und hätte es nicht gern, wenn mir eine KI dauernd über die Schultern guckt.

5: Das lässt sich nicht pauschal beantworten. Ich halte überhaupt nichts von Panikmache. Ich klettere erst in den „Maschinenraum“ der jeweiligen KI und schaue mir genau an, wie diese „Maschine“ arbeitet, mit welchem mathematischen Formalismus und welcher Hardware. Daraus leite ich die Möglichkeiten und Grenzen der jeweiligen KI ab. Dann erst kann man diskutieren, ob diese Technologie wünschenswert oder wo genau zu begrenzen ist. Moralische Überfrachtungen können sich als gefährliche Innovationsbremsen für einen Standort wie Europa erweisen. Ihre Kehrseite ist nämlich das Krebsgeschwür der Bürokratie, dass gerade junge Start-ups und mittelständische Industrie in Europa zur Aufgabe zwingt und nach USA treibt.



Professor Klaus Mainzer ist ehemaliger Ordinarius für Philosophie und Wissenschaftstheorie und nun Emeritus of Excellence an der School of Social Sciences and Technology der TU München. Ziel seiner Forschung sind Lösungs- und Beweisverfahren der Mathematik, mit denen die Algorithmisierung und die Digitalisierung von Technik und Gesellschaft kontrollierbar bleiben.

„Es gibt keine Singularität für ‚eine‘ AGI – sondern eine Entwicklung, in der wir uns längst befinden.“

SEBASTIAN THRUN: „WÜRDEN KI MEINE KREDITKARTE GEBEN“

Foto: Christopher Michel / Christophe Testi



„Eine KI wäre eine AGI, wenn sie ein Jahr lang die Arbeit eines Büroangestellten übernimmt, ohne dass es irgendeine(r) merkt.“

Stanford-Professor Sebastian Thrun war Vizepräsident bei Google und ist einer der Pioniere des autonomen Fahrens und des digitalen Lernens. Derzeit erforscht er vor allem den Einsatz von KI im Gesundheitswesen und im Smart Home sowie bei der Verhaltensvorhersage von Menschen.

1: Ein Jahr lang die Arbeit eines Büroangestellten übernehmen, ohne dass es irgendeine(r) merkt.

2: 2026

3: OpenAI

4: Als mein Assistent für all die Dinge, die ich nicht selbst machen möchte (Kalender, Reisen, Termine, Einkäufe ...)

5: Ich würde der KI meine Kreditkarte geben, aber überprüfen, dass alles richtig gemacht wird.

**FÜR
BERLIN**
SEIT 100 JAHREN

 **Investitionsbank
Berlin**

Erfolg.Fördern.Berlin.

wachsen mit der IBB

Wir haben die passende finanzielle Förderung, damit Dein Unternehmen wachsen kann. Kompetent, zuverlässig und mit dem Ziel, Dein Geschäft langfristig erfolgreich zu machen.

Hotline Wirtschaftsförderung: 030 / 2125-4747

ibb.de/wachsen

WILLIAM T. FREEMAN: „EIN WERKZEUG, KEIN WESEN“



William T. Freeman ist Mitglied des Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory (CSAIL) des MIT. Zu seinen Forschungsschwerpunkten zählt Bildverarbeitung durch maschinelles Lernen. Er war an der ersten Aufnahme eines schwarzen Lochs beteiligt.

„Eine AGI sollte keine Fehler machen, die für einen Menschen offensichtlich wären.“

- 1: Ich möchte sehen, dass ein System a) neues Wissen oder neue Techniken entwickelt, über die es nichts online lesen konnte – zum Beispiel, dass es neue Ergebnisse entwickelt, die auf der Lektüre der aktuellen wissenschaftlichen Literatur basieren; b) dass es so robust ist, dass es keine Fehler macht, die für einen Menschen offensichtlich wären.
- 2: Ich denke, es wird noch fünf Jahre dauern.
- 3: Es scheint so viele Vorteile zu geben, die sich aus dem „Scaling-up“ ergeben – dem Trainieren riesiger Modelle auf großen Datenmengen –, dass ich glaube, dass

- die Industrie zuerst einen solchen Durchbruch schaffen wird, weil sie es sich leisten kann, das System entsprechend zu erweitern.
- 4: Um mir bei meiner Forschung zu helfen – um mir Dinge zu erklären, um Verbindungen zu Arbeiten in anderen Bereichen zu finden, von denen ich nichts weiß. Die Wissenschaft wird dadurch viel schneller voranschreiten.
- 5: Die Frage impliziert, dass die AGI ein Wesen mit Rechten ist und nicht ein Werkzeug. Ich denke, dass es noch länger als die fünf Jahre dauern wird, bevor diese Werkzeuge zu Wesen werden.

JÜRGEN SCHMIDHUBER: „PROBLEME LÖSEN, DIE ICH SELBST NICHT LÖSEN KANN“

- 1: Das ist ja keine Definition im mathematischen Sinne, wie wir sie in meinem Labor kurz nach der Jahrtausendwende publizierten. Doch wenn wir die mathematische Optimalität mal beiseitelassen: Die meisten wären wohl schon zufrieden mit einer AGI, die alle Berufe aller Menschen in jeder Hinsicht besser ausführen kann als jeder Mensch.
- 2: Seit Jahrzehnten beantworte ich diese Frage wie folgt: Das kann noch Monate dauern, wenn nicht Jahre.
- 3: So etwas würde weit über ChatGPT hinausgehen – dazu bräuchte es noch große Fortschritte bei der KI für die phy-

- sikalische Welt, die Robotik und die Mechanik. Ich hoffe natürlich nach wie vor, dass meine eigene Forschungsgruppe den entscheidenden Schritt tun wird, eine sich selbst verbessernde KI zu bauen, die alles besser kann als ich, um dann in Rente zu gehen.
- 4: Zur Lösung aller Probleme, die ich selbst nicht lösen kann.
- 5: Wahre AGI wird nicht darauf warten, dass ich ihr Rechte zubillige. Abgesehen davon ist meine Lieblingskurzgeschichte zur Frage, ob schlaue Roboter Menschenrechte haben sollten, Stanislaw Lems *Waschmaschinentragödie*.



Professor Jürgen Schmidhuber ist Direktor der KI-Initiative an der König-Abdullah-Universität für Wissenschaft und Technologie in Saudi-Arabien, wissenschaftlicher Direktor des KI-Labors IDSIA in Lugano, Professor für KI an der Universität Lugano sowie Mitbegründer und Ex-Präsident des Unternehmens NNAISENSE.

„Wahre AGI wird nicht darauf warten, dass ich ihr Rechte zubillige.“

KRISTINN R. THÓRISSON: „VERSTEHEN IST DER KERN ECHTER INTELLIGENZ“

1: Meine Definition einer AGI ist: ermessensabhängige Anpassung bei unzureichenden Kenntnissen und Ressourcen. Dazu zählen Zeit, Energie, Informationen, Wissen und sensorische Daten. Ein Test müsste ihre Fähigkeit überprüfen, zu lernen, neue Dinge herauszufinden, neue Ziele zu erreichen, sowie Phänomene erklären, vorhersagen, erschaffen oder nachbilden.

2: Dahinter stehen so viele Faktoren – Finanzierung, Entwicklung, Herstellung, internationale Zusammenarbeit, Rechenleistung, etc. –, dass ich das nicht mit angemessener Sicherheit vorhersagen kann. Deshalb möchte ich hier lieber die Bedingungen dafür nennen:

- autonome Aneignung von Modellen der Welt
- kognitive Methoden zur Untersuchung und Verifizierung dieser Modelle
- explizite Erstellung und Management von Zielen und Unterzielen
- Fähigkeit, in der Welt zu experimentieren

In einer angemessenen kognitiven Architektur würde dies die Erschaffung einer Maschine mit echtem Verstehen ermöglichen.

3: Die akademische Welt. Die Industrie ist zu sehr auf die Anwendung des jeweils aktuellen Forschungsstandes konzentriert, um in der Grundlagenforschung führend zu sein.

4: Für Forschung und Entwicklung sowie für Probleme wie Krankheit, Armut, Klimawandel, Sozialstrukturen, Bildung, schlecht funktionierende Marktwirtschaften, Betrug – die Liste ist lang.

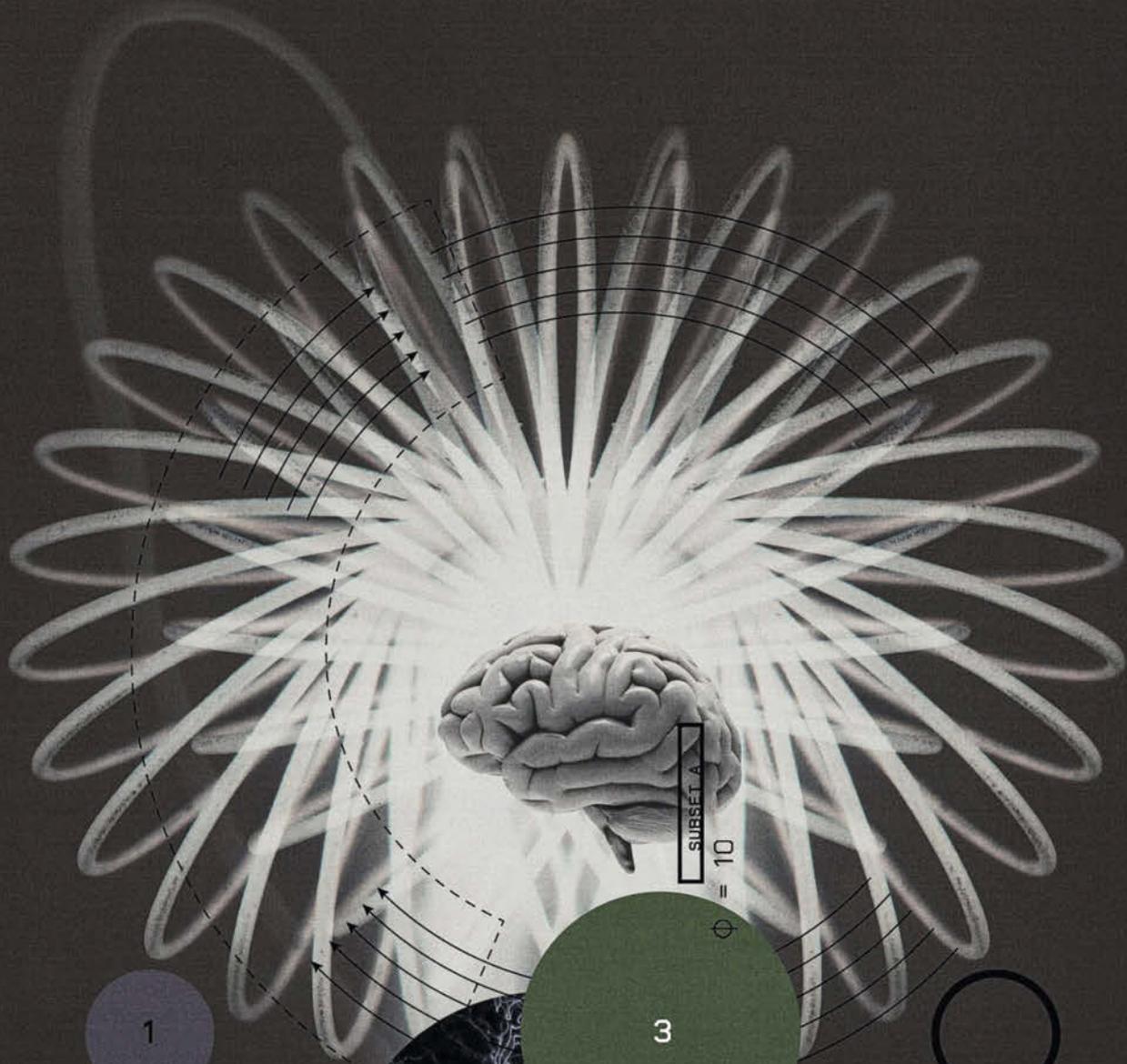
5: Ich bin der Meinung, solche Maschinen sollten nicht dazu benutzt werden, Menschen zu replizieren. Die Schaffung, Produktion und Verwendung von „Menschenimitaten“ sollte gesetzlich kontrolliert werden, wegen der vielfältigen psychologischen Probleme, die sich daraus ergeben könnten.



Kristinn R. Thórisson ist Gründungsdirektor des Icelandic Institute for Intelligent Machines (IIIM) sowie Professor für Informatik an der Universität Reykjavik, wo er das Center for Analysis and Design of Intelligent Agents (CADIA) mitgegründet hat, das erste KI-Labor in den nordischen Ländern. Dort betreibt er Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Artificial General Intelligence.

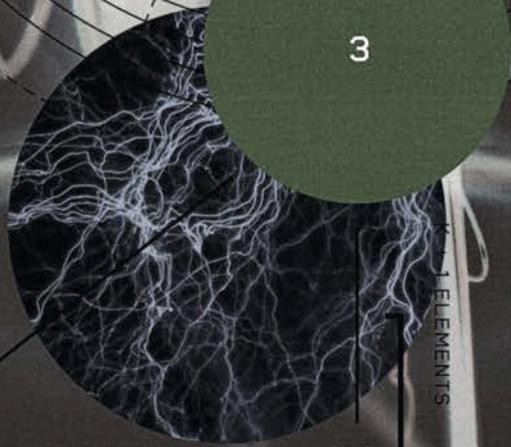
„Die Industrie ist zu sehr auf die Anwendung des jeweils aktuellen Forschungsstandes konzentriert.“

1. Eine sehr allgemeine Definition von AGI wäre: Sie muss sowohl universell einsetzbar als auch sehr leistungsfähig sein, und sie muss selbst lernen, wie sie ihre Aufgaben erledigt. Welche Art von Test müsste eine KI bestehen, um von Ihnen als AGI gemäß dieser Definition akzeptiert zu werden?
2. Wann wird eine KI einen solchen Test bestehen?
3. Wer wird als Erstes ein solches System veröffentlichen?
4. Wofür würden Sie persönlich eine AGI am liebsten einsetzen?
5. Welche Rechte würden Sie ihr zubilligen?



1

2



3

4

SUBSET A

$\phi = 10$

K-1 ELEMENTS

(X_1, \dots, X_N)



Wie viel Geist steckt in der Maschine?

Nicht nur Philosophen, sondern auch Kognitionswissenschaftler und Ingenieure beschäftigen sich mit der Frage, was nötig wäre, damit KI ein Bewusstsein erlangt. – Grace Huckins und Wolfgang Stieeler

Mit dieser Einladung hatte David Chalmers nicht gerechnet. Als führende Autorität auf dem Gebiet des Bewusstseins reist Chalmers zwar regelmäßig um die Welt und hält Vorträge. Allerdings spricht er in der Regel auf akademischen Tagungen zu Philosophen – der Art von Menschen, die stundenlang darüber debattieren können, ob die Welt außerhalb ihres eigenen Kopfes real ist. Die jüngste Anfrage kam jedoch von den Organisatoren der Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS), einer der größten Konferenzen für Künstliche Intelligenz weltweit.

Der Hintergrund dieser Anfrage war, dass weniger als sechs Monate zuvor Blake Lemoine mit der Behauptung an die Öffentlichkeit gegangen war, dass LaMDA, eines der KI-Systeme seines Arbeitgebers Google, ein Bewusstsein erlangt habe. Lemoine wurde entlassen, und seine Behauptungen stellte Google als haltlos dar. Aber dann, im November 2022, kam ChatGPT.

Wenn es jemanden gibt, der über Künstliche Intelligenz und Bewusstsein sprechen kann, dann Chalmers. Der Philosoph beschäftigt sich seit rund 30 Jahren mit dieser Frage, hat mehrere Bücher dazu geschrieben und eine internationale Wissenschaftsvereinigung zum Studium des Bewusstseins mitbegründet.

Hätte er in den 90er-Jahren mit Systemen wie LaMDA und ChatGPT interagieren können, wäre er davon ausgegangen, dass die Wahrscheinlichkeit

Die Chancen, in den nächsten zehn Jahren eine bewusste KI zu entwickeln, schätzt David Chalmers auf über eins zu fünf.

groß ist, dass sie ein Bewusstsein haben, sagt Chalmers. Aber als er Ende November 2022 – kurz nach der Veröffentlichung von ChatGPT – in der für ihn typischen Lederjacke bei der NeurIPS vor sein Publikum trat, kam er zu einer ganz anderen Einschätzung: Ja, große Sprachmodelle seien beeindruckend. Aber, so sagte er, ihnen fehlten zu viele der potenziellen Voraussetzungen für Bewusstsein, als dass wir annehmen könnten, dass sie die Welt tatsächlich erleben. Bei dem halsbrecherischen Tempo der KI-Entwicklung könnten sich die Dinge aber natürlich schnell ändern. Die Chancen, in den nächsten zehn Jahren eine bewusste KI zu entwickeln, schätzt er auf über eins zu fünf.

Eine KI mit Bewusstsein. In den nächsten zehn Jahren. Das wirft eine große Menge schwieriger Fragen auf: Was ist dieses Bewusstsein? Wie kann man es nachweisen? Können Maschinen überhaupt ein Bewusstsein haben oder nur Lebewesen? Und wenn ja, was dürfen wir dann mit ihnen tun und was nicht? In den letzten Jahrzehnten hat sich nur eine kleine Forschungsgemeinschaft hartnäckig mit solchen Fragen beschäftigt. Und ihre Bemühungen haben zu echten Fortschritten in einem Bereich geführt, der einst als unlösbares Problem galt.

SCHOKOLADE UND BROKKOLI

„Ich versuche zu verstehen, was im Gehirn dafür sorgt, dass wir nicht nur Informationen verarbeiten

können, sondern dass wir die Informationen, die wir verarbeiten, auch erleben“, sagt Liad Mudrik, Neurowissenschaftlerin an der Universität Tel Aviv, die das Bewusstsein seit Anfang der 2000er-Jahre erforscht. Wenn Mudrik ihre Forschung erklärt, beginnt sie gerne mit einem ihrer Lieblingsbeispiele: Schokolade. Wenn man ein Stück in den Mund nimmt, wird eine Symphonie neurobiologischer Ereignisse ausgelöst – die schließlich dazu führen, dass Neuronen tief im Kopf den chemischen Stoff Dopamin freisetzen, der wiederum ein Glücksgefühl erzeugt. Keine dieser Erklärungen erfasst jedoch, wie es sich anfühlt, die Alufolie aufzureißen, ein Stück Schokolade aus der Tafel zu brechen und es im Mund zergehen zu lassen.

Um das zu verstehen, beobachten Mudrik und ihr Team im Labor, was im Gehirn passiert, wenn sie das bewusste Erleben von Menschen verändern. Das ist im Prinzip einfach: Geben Sie jemandem ein Stück Brokkoli zu essen, und seine subjektive Erfahrung wird ganz anders sein als beim Verzehr eines Stücks Schokolade – und wird wahrscheinlich zu einem anderen Gehirnscan führen. Es wäre allerdings unmöglich, an den Scans zu erkennen, welche der Unterschiede durch andere Informationen ausgelöst werden – Brokkoli und Schokolade aktivieren sehr unterschiedliche Geschmacksrezeptoren – und welche tatsächlich auf ein anderes bewusstes Erleben zurückzuführen sind.

Der Trick besteht nun darin, die Erfahrung zu modifizieren, ohne den Stimulus zu verändern. Also zum Beispiel jemandem ein Stück Schokolade zu geben und dann gewissermaßen einen Schalter im Gehirn umzulegen, damit er sich fühlt, als würde er Brokkoli essen.

Beim Geschmack ist das zwar nicht möglich, beim Sehen aber schon. Beispielsweise indem Forschende Menschen mit Spezialbrillen zwei verschiedene Bilder gleichzeitig betrachten lassen – eines mit jedem Auge. Obwohl die Augen beide Bilder aufnehmen, ist es unmöglich, beide Bilder gleichzeitig bewusst wahrzunehmen. Die Versuchspersonen berichten oft, dass ihr Seherlebnis „umschlägt“: Zuerst sehen sie das eine Bild und dann spontan das andere. Indem die Forschenden die Hirnaktivität während dieses Wechsels der bewussten Wahrnehmung verfolgen, können sie beobachten, was passiert, wenn die eingehenden Informationen gleich

Der Informatiker Joseph Weizenbaum – hier bei einem Besuch der Zeit-Redaktion 1965 – vermutete damals bereits, dass Menschen Computerprogrammen nur allzu bereitwillig Intelligenz und Bewusstsein zuschreiben würden.



Protokoll einer Unterhaltung mit dem Chatbot Eliza.
Schon dieses recht einfach gestrickte Programm wurde von manchen Usern für intelligent gehalten.

```

Welcome to
          EEEEE LL   IIII ZZZZZ  AAAA
          EE   LL   II    ZZ   AA  AA
          EEEEE LL   II    ZZ   AAAAAA
          EE   LL   II    ZZ   AA  AA
          EEEEE LLLLL IIII ZZZZZ  AA  AA

Eliza is a mock Rogerian psychotherapist.
The original program was described by Joseph Weizenbaum in 1966.
This implementation by Norbert Landsteiner 2005.

ELIZA: Is something troubling you ?
YOU:   Men are all alike.
ELIZA: What is the connection, do you suppose ?
YOU:   They're always bugging us about something or other.
ELIZA: Can you think of a specific example ?
YOU:   Well, my boyfriend made me come here.
ELIZA: Is it important to you that your boyfriend made you come here ?
YOU:   He says I'm depressed much of the time.
ELIZA: I am sorry to hear that you are depressed.
YOU:   It's true. I am unhappy.
ELIZA: Can you explain what made you unhappy ?
YOU:

```

Blake Lemoine ging ein persönliches Risiko für eine KI ein, die er für bewusstsensfähig hielt, und verlor seinen Job.

bleiben, sich aber deren Wahrnehmung ändert.

Mit diesen und anderen Ansätzen ist es Mudrik und ihren Kollegen gelungen, einige Fakten darüber zu ermitteln, wie das Bewusstsein im menschlichen Gehirn funktioniert. So scheint das Kleinhirn, eine Hirnregion an der Schädelbasis, die einem faustgroßen Knäuel von Engelshaar-Nudeln ähnelt, für das bewusste Erleben keine Rolle zu spielen – obwohl es für unbewusste motorische Aufgaben wie das Fahrradfahren von entscheidender Bedeutung ist. Rückkopplungsverbindungen hingegen scheinen für das Bewusstsein wesentlich zu sein – wie solche, die „höhere“, kognitive Regionen des Gehirns mit Regionen verbinden, die an der grundlegenden sensorischen Verarbeitung beteiligt sind. (Deshalb zweifeln viele Forscher daran, dass LLMs ein Bewusstsein haben, denn ihnen fehlen wesentliche Rückkopplungsverbindungen.)

„Wenn wir in der Lage sind, die Theorien und die Erkenntnisse, die wir haben, zu nutzen, um zu einem guten Test für das Bewusstsein zu gelangen, wird das wahrscheinlich einer der wichtigsten Beiträge sein, die wir leisten können“, sagt Mudrik.

Tatsächlich gelang es einer Gruppe italienischer und belgischer Neurowissenschaftler vor einigen Jahren, einen Test für das menschliche Bewusstsein zu entwickeln, bei dem sie transkranielle Magnetstimulation (TMS) einsetzen. Das ist eine nicht-invasive Form der Hirnstimulation, bei der ein Magnetfeld am Kopf angelegt wird. Allein anhand der sich daraus ergebenden Muster der Hirnaktivität war das Team in der Lage, Menschen bei Bewusstsein von solchen zu unterscheiden, die unter Narkose standen oder tief schliefen, und sie konnten sogar einen vegetativen Zustand (bei dem jemand wach, aber nicht bei Bewusstsein ist) von dem Locked-in-Syndrom (bei dem

ein Patient bei Bewusstsein ist, sich aber überhaupt nicht bewegen kann) unterscheiden (siehe TR 8/21, S. 44).

THEORIEN, THEORIEN, THEORIEN ...

Das war zwar ein enormer Fortschritt in der Bewusstseinsforschung, aber es bedeutet wenig für die Frage nach bewusster KI: Die GPT-Modelle von OpenAI haben kein Gehirn, das mit einem Magnetfeld stimuliert werden kann. Um KI-Bewusstsein zu testen, reicht es nicht aus, die Strukturen zu identifizieren, die im menschlichen Gehirn zu Bewusstsein führen. Man muss wissen, warum diese Strukturen zum Bewusstsein beitragen, und zwar auf eine Art und Weise, die allgemein genug ist, um auf jedes System, ob menschlich oder nicht, anwendbar zu sein.

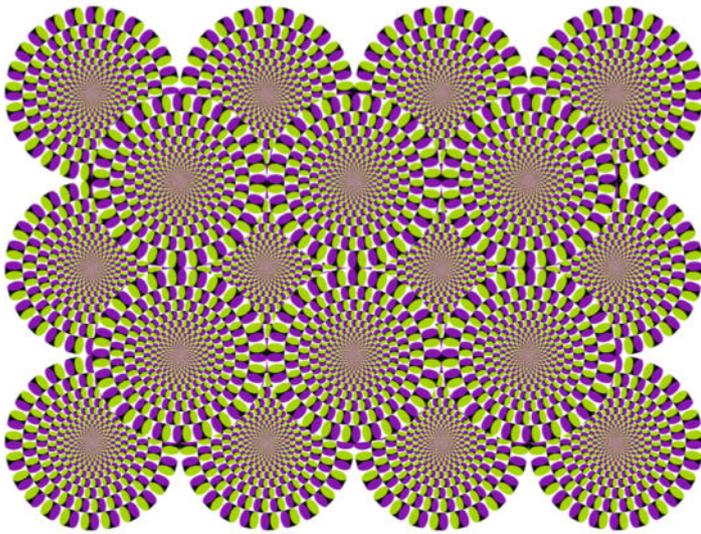
Eine sehr nahe liegende Theorie dazu lautet: Jedes Wesen, das intelligent genug ist und das in der Lage ist, erfolgreich auf eine ausreichende Vielfalt von Kontexten und Herausforderungen zu reagieren, muss ein Bewusstsein haben. Aber Bewusstsein und Intelligenz sind nicht dasselbe. Auch wenn weitere Iterationen von GPTs sich als immer intelligenter erweisen – und immer breitere Anforderungsspektren erfüllen, die vom Bestehen der Anwaltsprüfung bis zur Erstellung einer Website reichen –, kann ihr Erfolg nicht als Beweis für ihr Bewusstsein gewertet werden.

Wenn Mudrik ihren Versuchspersonen Bilder zeigt, fordert sie sie nicht auf, über etwas nachzudenken, oder testet ihre Problemlösungsfähigkeiten. Selbst eine Krabbe, die über den Meeresboden krabbelt, ohne sich ihrer Vergangenheit bewusst zu sein oder über ihre Zukunft nachzudenken, empfindet vermutlich Freude über einen leckeren Krabbenhappen oder den Schmerz einer verletzten Schere.

Vor ein paar Jahrzehnten wären wir an dieser Stelle also vielleicht noch völlig verloren gewesen. 1974 schrieb der Philosoph Thomas Nagel in einem – noch immer viel zitierten – Essay, dass wir wahrscheinlich niemals verstehen könnten, wie andere Lebewesen die Welt erleben oder „wie es ist, eine Fledermaus zu sein“ (heise.de/s/drrB8). Auch David Chalmers war 1995 nur wenig optimistischer: Er bezeichnete die Suche nach einer naturwissenschaftlichen Erklärung für subjektives Erleben als „Hard Problem“ – das sich möglicherweise niemals lösen ließe (heise.de/s/oPP3p). Ungeachtet dessen haben sich in den vergangenen 30 Jahren mehrere Theorien herausgebildet, die zu erklären versuchen, was Bewusstsein ist.

Die meisten dieser Theorien – und Neurowissenschaftler – gehen von einem materialistischen Standpunkt aus: Ein „göttlicher Funke“, eine „unsterbliche Seele“ oder etwa „Feinstoffliches“ kommen darin nicht vor. Das Universum besteht aus physischem Material, und Bewusstsein als Phänomen kann nur mit physischer Materie und ihren Wechselwirkungen arbeiten. Einzig der „Panpsychismus“ passt nicht ganz in das Schema der modernen Theorien: Die Vertreter dieser Schule argumentieren zwar auch materialistisch, gehen aber davon aus, dass Bewusstsein so etwas wie eine Ur-eigenschaft jeder Form von Materie ist.

Wesentlich abstrakter hat sich der italienische Hirnforscher Giulio Tononi dem Bewusstsein genähert. Seine 2004 entwickelte Integrated Information Theory (IIT) ordnet jedem physikalischen System eine Bewusstseins-Maßzahl zu. Diese Zahl Φ (der griechische Buchstabe Phi) liegt zwischen 0 und 1 und beschreibt, grob gesagt, die Menge an Informationen, die über die Summe der Informationen hinausgeht, die seine einzelnen Teile erzeugen. Obwohl Tononis Theorie sehr abstrakt und teilweise



Rotating-Snake-Illusion: Wir sehen das, was wir zu sehen glauben. Die scheinbare Bewegung im Bild entsteht durch Rückkopplungsverbindungen im Gehirn.

kontraintuitiv ist, ging aus ihr ein Testverfahren hervor, mit dem sich messen lässt, ob Koma-Patienten bei Bewusstsein sind. Es stellt die genaueste Bewusstseinsmessung dar, die es bislang gibt. Kritiker der IIT verweisen allerdings darauf, dass die IIT Bezüge zum Panpsychismus aufweise – und daher unwissenschaftlich sei.

Andere Theorien gehen davon aus, dass Bewusstsein eine Funktion hat – etwa die Informationsverarbeitung im Gehirn zu verbessern. Die Aufmerksamkeitschema-Theorie des Bewusstseins (AST) etwa beruht auf dem Konzept der Meta-Kognition, des Denkens über das Denken: Danach konstruiert Bewusstsein ein Modell von Aufmerksamkeit, das Fakten über die aktuellen Objekte der Aufmerksamkeit repräsentiert. Gleichzeitig hilft es, Aufmerksamkeit zu kontrollieren, ähnlich wie ein Körperschema bei der Kontrolle von Körperbewegungen hilft. Das bewusste Erleben hängt von den Inhalten dieses Aufmerksamkeitschemas ab.

Die „Global-Workspace-Theorie“ wurde von dem Psychologen Bernard Baars erstmals 1988 vorgeschlagen und von dem Neurowissenschaftler Stanislas Dehaene erweitert. Nach dieser Theorie werden mentale Inhalte wie Wahrnehmungen, Gedanken oder Emotionen in verschiedenen Hirnregionen autonom verarbeitet. Sie gelangen in das Bewusstsein, wenn mehrere Hirnregionen synchronisiert auf diese Inhalte zugreifen, die dann in einem „globalen Arbeitsbereich“ zur Verfügung stehen. Die bewusste Wahrnehmung eines Objektes erlaubt es, mit dem Objekt Aktionen zu planen oder durchzuführen. Die Theorie gehört damit zu den „funktionalen“ Erklärungen, nach denen Bewusstsein in erster Linie über seinen Nutzen erklärt werden muss.

Der Schutz der KI erfordert auch eine Theorie der Freuden und Schmerzen, der Wünsche und Ängste der KI.

„Predictive Processing“-Theorien hingegen beschreiben das Gehirn als selbstständig lernende Prognose-Maschine: Das Gehirn bildet ständig Hypothesen über die Ursachen und den weiteren Verlauf der eingehenden Daten – und zwar so, dass der Unterschied zwischen der Hypothese und den Sinnesdaten möglichst klein wird. Bewusstsein sei, schreibt Anil Seth in seinem Buch *Being You: Eine neue Wissenschaft des Bewusstseins*, das Resultat dieses Abgleichs, eine „kontrollierte Halluzination“, eine Vorstellung darüber, wie die Welt ist, basierend auf den Signalen der Sinne.

Darüber hinaus gibt es eine Reihe von Theorien, für die das „Embodiment“, also das Vorhandensein eines physischen Körpers, wichtig ist. Nach der sensomotorischen Theorie des Bewusstseins beispielsweise entstehen bewusste Erfahrungen aus der Interaktion mit der Umwelt: Das Bewegen des Kopfes ermöglicht es uns, ein Objekt aus einer anderen Perspektive zu sehen. Das Bild sieht anders aus, obwohl es sich immer noch um dasselbe Objekt handelt – die bewusste Wahrnehmung des Objektes ist somit eine Abstraktion aus verschiedenen Perspektiven. Eine notwendige Voraussetzung dafür ist „Agency“, die Fähigkeit, körperlich mit der Umgebung zu interagieren.

Mudrik versucht nun herauszufinden, was diese Vielfalt an Theorien für die KI bedeutet. Sie arbeitet mit einem interdisziplinären Team von Philosophen, Informatikern und Neurowissenschaftlern zusammen, das kürzlich ein Paper mit praktischen Empfehlungen zur Erkennung von KI-Bewusstsein herausgegeben hat (heise.de/s/3xxrp). Das Team stützt sich darin auf eine Reihe von Theorien – unter der Annahme, dass eine dieser Theorien wahr ist. Daraus erstellt es eine Art Checkliste für Bewusstsein: eine Liste von Merkmalen, die darauf hindeuten, dass eine KI ein Bewusstsein hat. Zu diesen Merkmalen gehören bestimmte Rückkopplungsverbindungen, die Nutzung eines globalen Arbeitsbereichs, die flexible Verfolgung von Zielen und die Interaktion mit einer externen Umgebung (ob real oder virtuell).

Mit dieser Strategie erkennen die Forschenden an, dass die wichtigsten Theorien über das Bewusstsein eine gewisse Chance haben, sich als wahr zu erweisen. Stimmen mehrere Theorien darin überein, dass eine KI ein Bewusstsein hat, ist es wahrscheinlicher, dass sie tatsächlich eins hat. Den Autoren des Whitepapers zufolge gibt es demnach keine größeren technologischen Hürden, die dem Aufbau von KI-Systemen im Wege stehen, die in ihrem Ranking gut abschneiden würden. Allerdings decken die Kriterien aus diesem Paper längst nicht alle Möglichkeiten für Bewusstsein ab, denn sie stammen nur aus dem Bereich funktionaler Theorien. Wie könnten wir, ohne uns auf bestimmte Theorien festzulegen, nur aufgrund von Beobachtungen feststellen, dass eine Maschine tatsächlich ein Bewusstsein hat? Und was dürfen wir mit einer potenziell bewussten Maschine tun?

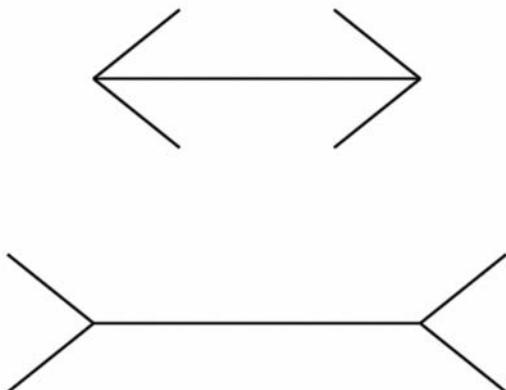


Die „Gorilla-Illusion“ zeigt, wie sich bewusste Wahrnehmung manipulieren lässt. Wenn sich die Betrachter dieses Videos auf die Aktionen der Menschen konzentrieren müssen, nehmen sie den Gorilla nicht wahr, obwohl sie ihn sehen können.

Susan Schneider, Direktorin des Center for the Future Mind an der Florida Atlantic University, hat zusammen mit dem Princeton-Physiker Edwin Turner solch einen Test für „künstliches Bewusstsein“ entwickelt. Er erfordert allerdings, dass ein KI-Agent während seines gesamten Trainings von allen Informationen über das Bewusstsein isoliert wird. (Dies ist wichtig, damit er nicht wie LaMDA einfach menschliche Aussagen über das Bewusstsein nachplappern kann.)

Ist das System trainiert, stellt der Tester ihm Fragen, die es nur beantworten könnte, wenn es etwas über das Bewusstsein wüsste – ein Wissen, das es nur erwerben könnte, wenn es sich selbst bewusst wäre. Kann es die Handlung des Films *Freaky Friday* verstehen, in dem eine Mutter und ihre Tochter die Körper tauschen, wobei sich ihr Bewusstsein von ihrem physischen Selbst trennt? Kann es das Kon-

Müller-Lyer-Illusion:
Wir wissen, dass die horizontalen Linien gleich lang sind, dennoch erscheinen sie uns unterschiedlich.



zept des Träumens begreifen – oder sogar selbst vom Träumen berichten? Kann es sich Reinkarnation oder ein Leben nach dem Tod vorstellen?

Dieser Ansatz hat eine große Einschränkung: Er setzt die Fähigkeit zur Sprache voraus. Menschliche Säuglinge und Hunde, von denen weithin angenommen wird, dass sie ein Bewusstsein haben, könnten diesen Test mangels Sprachfähigkeit unmöglich bestehen, und auch eine KI könnte möglicherweise ein Bewusstsein erlangen, ohne überhaupt Sprache zu benutzen. Die Prüfung einer sprachbasierten KI wie GPT ist ebenfalls unmöglich, da sie in ihrem Training mit der Idee des Bewusstseins in Berührung gekommen ist.

Wenn Schneiders Test also nicht narrensicher ist, bleibt nur noch eine Möglichkeit: das Öffnen der Maschine. Zu verstehen, wie eine KI im Inneren funktioniert, könnte ein wesentlicher Schritt sein, um festzustellen, ob sie ein Bewusstsein hat oder nicht. Falls die Maschine allerdings tatsächlich ein Bewusstsein hat, könnte diese Prozedur sie zerstören. Ein Dilemma, das in der Science-Fiction bereits ausführlich behandelt wurde.

DAS DATA-PROBLEM

1989, also lange bevor die Neurowissenschaft des Bewusstseins ihre volle Bedeutung erlangte, wurde eine entsprechende Episode von *Star Trek: The Next Generation* ausgestrahlt. Im Mittelpunkt der Episode *The Measure of a Man* steht die Figur Data, ein Androide, der einen Großteil der Serie damit verbringt, zu verstehen, was es bedeutet, ein Mensch zu sein, um selbst menschlicher zu werden. In dieser Folge will ein Wissenschaftler Data gewaltsam

Bei KI-Systemen könnte es eine Menge Gefahren geben, wenn wir dem Bewusstsein zu viel Bedeutung beimessen.

zerlegen, um herauszufinden, wie er funktioniert. Data weigert sich, weil er befürchtet, dass ihn das Zerlegen tatsächlich umbringen könnte. Captain Picard muss vor Gericht sein Recht verteidigen, die Prozedur abzulehnen.

Picard beweist nicht, dass Data ein Bewusstsein hat. Vielmehr zeigt er, dass niemand diesen Umstand widerlegen kann. Er argumentiert, dass das Risiko, Data zu schaden und möglicherweise die Androiden, die nach ihm kommen, zur Sklaverei zu verdammen, zu groß sei, um es in Kauf zu nehmen. Damit bieten die Drehbuchautoren eine

verlockende Lösung für das Rätsel des fragwürdigen KI-Bewusstseins: jedes potenziell bewusste System so behandeln, als ob es wirklich ein Bewusstsein hätte, und damit das Risiko vermeiden, einem Wesen zu schaden, das wirklich leiden kann. Eine echte KI vor Leid zu bewahren, könnte sich jedoch als wesentlich schwieriger erweisen, meint Robert Long vom Center for AI Safety in San Francisco und einer der Hauptautoren des Papers *Consciousness in Artificial Intelligence*.

„Bei Tieren können wir davon ausgehen, dass sie im Grunde die gleichen

Dinge wollen wie wir“, sagt er. „Es ist schwer zu sagen, was das im Fall von KI ist.“ Der Schutz der KI erfordere nicht nur eine Theorie des KI-Bewusstseins, sondern auch eine Theorie der Freuden und Schmerzen, der Wünsche und Ängste der KI.

Sich um andere Lebewesen zu kümmern, bedeutet allerdings, sie vor Schaden zu bewahren, und das schränkt die Möglichkeiten der Menschen ein, ethische Entscheidungen zu treffen. „Ich mache mir keine großen Sorgen über Szenarien, in denen wir uns zu sehr um Tiere kümmern“, sagt Long. Die Abschaffung der Massentierhaltung hat nur wenige Nachteile. „Aber bei KI-Systemen“, fügt er hinzu, „könnte es wirklich eine Menge Gefahren geben, wenn wir dem Bewusstsein zu viel Bedeutung beimessen.“ KI-Systeme könnten Fehlfunktionen aufweisen und müssen abgeschaltet werden; sie müssen möglicherweise strengen Sicherheitstests unterzogen werden. Das sind einfache Entscheidungen, wenn die KI leblos ist, aber philosophische Probleme, wenn die Bedürfnisse der KI berücksichtigt werden müssen.

Anil Seth, der eine bewusste KI zumindest in absehbarer Zukunft für relativ unwahrscheinlich hält, macht sich dennoch Gedanken darüber, was die Möglichkeit eines KI-Bewusstseins für den Menschen emotional bedeuten könnte. „Es wird die Art und Weise verändern, wie wir unsere begrenzten Ressourcen der Fürsorge für Dinge verteilen“, sagt er. Das mag wie ein Problem für die Zukunft erscheinen. Aber es begleitet uns schon jetzt: Blake Lemoine ging ein persönliches Risiko für eine KI ein, die er für bewusstseinsfähig hielt, und verlor seinen Job. Wie viele andere würden wohl Zeit, Geld und persönliche Beziehungen für leblose Computersysteme opfern?

Das Wissen, dass ChatGPT kein Bewusstsein hat, ändert nichts an der

Stimulation des Gehirns mit gepulsten Magnetfeldern.



Illusion, dass man mit einem Wesen spricht, das eine Perspektive, Meinungen und eine Persönlichkeit hat. Selbst einfache Chatbots können eine unheimliche Anziehungskraft ausüben: Schon das Programm Eliza, das in den 1960er-Jahren von Joseph Weizenbaum entwickelt wurde, um eine Gesprächstherapie zu simulieren, überzeugte viele Nutzer davon, dass es in der Lage sei, zu fühlen und zu verstehen.

IM ZWEIFEL LIEBER NICHTS TUN

Bereits 2015, Jahre bevor diese Bedenken aktuell wurden, formulierten die Philosophen Eric Schwitzgebel und Mara Garza eine Reihe von Empfehlungen, die vor solchen Risiken schützen sollen. Eine bezeichneten sie als „Emotional Alignment Design Policy“: Jede unbewusste KI solle absichtlich so gestaltet sein, dass die Nutzer nicht glauben, dass sie bewusst ist. Unternehmen haben einige kleine Schritte in diese Richtung unternommen – ChatGPT spuckt eine hart kodierte Verneinung aus, wenn man es fragt, ob es bewusst ist. Aber solche Antworten tragen wenig dazu bei, die allgemeine Illusion zu stören.

Schwitzgebel, Philosophieprofessor an der University of California, Riverside, will jede Unklarheit aus dem Weg räumen. In ihrem Papier aus dem Jahr 2015 schlugen Garza und er deshalb eine „Excluded Middle Policy“ vor: Wenn unklar ist, ob ein KI-System ein Bewusstsein haben wird, sollte es nicht gebaut werden. „Wir wollen die Menschen nicht verwirren“, sagt Schwitzgebel.

Die Vermeidung der Grauzone des umstrittenen Bewusstseins umgeht sowohl die Risiken, einer bewussten KI zu schaden, als auch die Nachteile, eine leblose Maschine als bewusst zu behandeln. Das Problem: Das ist möglicherweise nicht realistisch. Denn viele Forscher arbeiten mittlerweile aktiv daran, KI mit den potenziellen Grundlagen eines Bewusstseins auszustatten. So auch Rufin VanRullen, Forschungsdirektor am französischen Centre Nationale de la Recherche Scientifique. VanRullen will mit einem Team eine KI bauen, die aus mehreren neuronalen Netzen besteht, die jeweils auf eine spezielle Aufgabe – Sprachverarbeitung, Bilder erkennen – trainiert sind. Diese neuronalen Netze wollen die Forscher in einem gemeinsamen Arbeitsbereich miteinander



Der Philosoph David Chalmers glaubt nicht, dass aktuelle große Sprachmodelle ein Bewusstsein haben. Das könne sich aber schon bald ändern.



Die Neurowissenschaftlerin Liad Mudrik erforscht, was im Gehirn vor sich geht, wenn wir etwas bewusst erleben.



Rufin VanRullen arbeitet an einem KI-System, das sich am menschlichen Gehirn orientiert. Sein Ziel ist es, die Begrenzungen aktueller KIs zu überwinden.

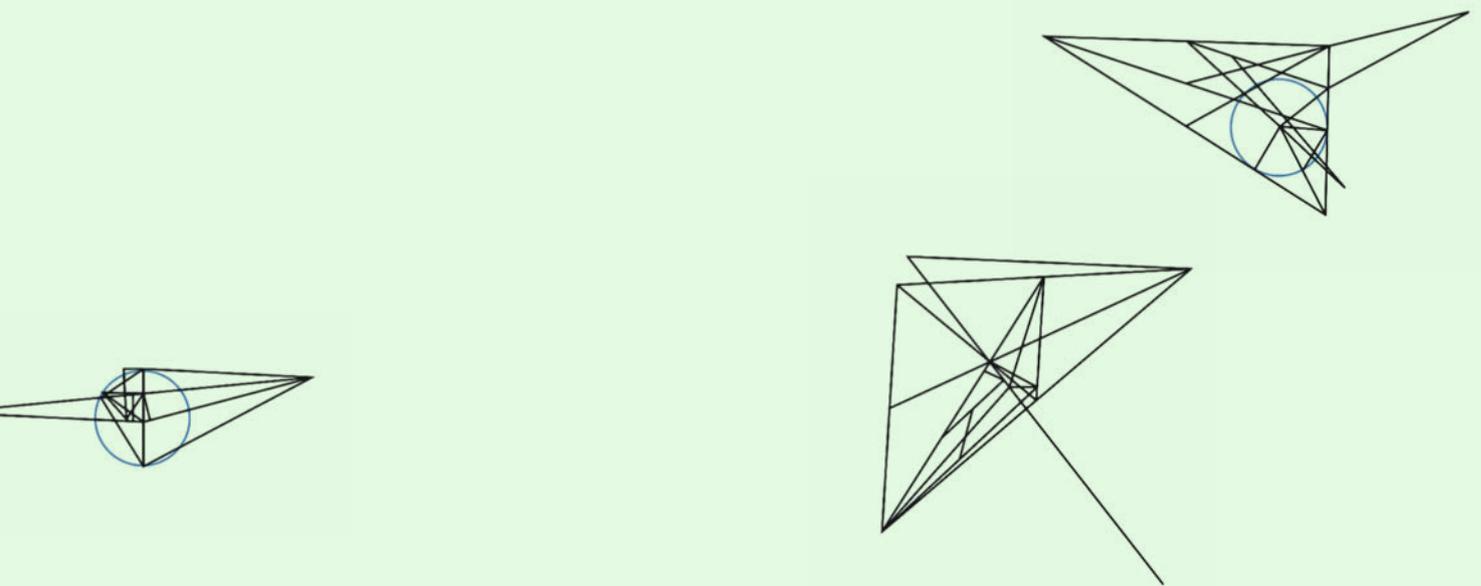
verbinden. Und der ist laut der Global-Workspace-Theorie ein notwendiges Kriterium für Bewusstsein.

Der Nachteil eines Moratoriums bei der Entwicklung potenziell bewusster Systeme besteht laut VanRullen darin, dass Systeme wie das, das er zu entwickeln versucht, effektiver sein könnten als derzeitige KIs. „Wann immer wir von der aktuellen KI-Leistung enttäuscht sind, liegt das daran, dass sie hinter dem zurückbleibt, was das Gehirn zu leisten imstande ist“, sagt er. „Es ist also nicht unbedingt mein Ziel, eine bewusste KI zu schaffen, sondern das Ziel vieler KI-Forscher ist es, diese fortgeschrittenen Denkfähigkeiten zu entwickeln.“ Solche fortschrittlichen Fähigkeiten könnten echte Vorteile mit sich bringen: Bereits jetzt werden von KI entwickelte Medikamente in klinischen Versuchen getestet. Es ist nicht unvorstellbar, dass KI in der Grauzone Leben retten könnte.

VanRullen ist sich der Risiken bewusst. Aber gerade diese Risiken, sagt er, machen seine Forschung so wichtig. Die Chancen stehen gut, dass bewusste KI nicht zuerst aus einem sichtbaren, öffentlich finanzierten Projekt wie dem seinen hervorgehen wird; es könnte sehr gut sein, dass ein Unternehmen wie Google oder OpenAI dafür zunächst tief in die Tasche greifen muss. Diese Unternehmen, so VanRullen, würden die ethischen Probleme, die ein bewusstes System mit sich brächte, wahrscheinlich nicht begrüßen. „Bedeutet das, dass sie, wenn etwas im Labor passiert, einfach so tun, als wäre es nicht passiert? Heißt das, dass wir nichts davon wissen werden?“, sagt er. „Ich finde das ziemlich besorgniserregend.“

Schwitzgebel sähe es lieber, würden wir die Grauzone ganz meiden. Angesichts des Ausmaßes der damit verbundenen Unsicherheiten räumt er jedoch ein, dass diese Hoffnung wahrscheinlich unrealistisch ist – vor allem, wenn sich bewusste KI als profitabel erweist. Und sind wir erst einmal in der Grauzone – müssen wir die Interessen von Wesen mit fragwürdigem Bewusstsein ernst nehmen –, werden wir uns auf noch schwierigerem Terrain bewegen. Wir werden mit moralischen Problemen von nie dagewesener Komplexität konfrontiert sein, ohne dass wir einen klaren Plan haben, wie wir sie lösen können. Es ist an den Forschenden aus Philosophie, Neurowissenschaften und Informatik, diesen Plan zu skizzieren. ●

ChatGPT braucht Mathe- Nachhilfe



Noch tun sich KI-Modelle wie GPT schwer mit Mathematik und logischem Denken. Diese Fähigkeiten werden jedoch als vielversprechender Weg zu einer Allgemeinen Künstlichen Intelligenz gehandelt. – Eike Kühn

Es gibt keine veröffentlichte und von Experten begutachtete Studie, kein Preprint-Paper, ja nicht einmal eine offizielle Bestätigung seiner Existenz. Dennoch schlug ein KI-Modell namens Q* (Q-Star) im November 2023 hohe Wellen. Von OpenAI entwickelt, soll Q* mutmaßlich in der Lage sein, mathematische Aufgaben auf Schulniveau mit fast 100-prozentiger Genauigkeit zu lösen. Wie die Nachrichtenagentur Reuters schrieb, sehen Insider von OpenAI in Q* einen Durchbruch auf dem Weg zu einer Allgemeinen Künstlichen Intelligenz (AGI). Sprich: zu einer KI, die einer allgemeinen Definition zufolge „die Fähigkeit besitzt, jede intellektuelle Aufgabe zu verstehen oder zu lernen, die ein Mensch ausführen kann“.

Dass ausgerechnet das Lösen von Grundschulmathematik der Anfang einer solchen Entwicklung sein soll, klingt zunächst unwahrscheinlich. Doch Mathematik ist der Maßstab für logisches Denken, und eine generative Künstliche Intelligenz, die nicht nur zusammenhängende Sätze formulieren, sondern auch logisch denken kann, wäre tatsächlich eine Sensation. Eine solche Maschine könnte nämlich lernen, noch ganz andere Aufgaben zu erledigen. Sie könnte Schlussfolgerungen ziehen, Chancen und Risiken abwägen und abstrakte Ideen verstehen, die bislang nur uns Menschen vorbehalten sind. Und sie könnte dabei helfen, die großen Probleme unserer Zeit zu meistern. „Wenn wir Herausforderungen wie den Klimawandel angehen wollen, dann brauchen wir fächerübergreifende, intelligente Systeme, die uns unterstützen und Hinweise und Lösungsvorschläge geben können“, sagt Kristian Kersting, Leiter des Labors für Künstliche Intelligenz und Maschinelles Lernen an der TU Darmstadt. „Wenn diese Systeme keine Mathematik beherrschen, kann das kaum funktionieren.“

Ähnlich sieht das Geordie Williamson. Der Mathematiker forscht – nach einigen Jahren am Max-Planck-Institut für Mathematik in Bonn – inzwischen an der Universität von Sydney und kollaboriert mit Googles DeepMind an den Schnittstellen von maschinellem Lernen und Mathematik. „Für KI-Forscher ist die Mathematik ein wichtiger Lackmustest“, sagt Williamson. Schon Alan Turing habe in seinen ersten Artikeln zu dem Thema die Mathematik als eine der interessantesten Applikationen für „intelligente Maschinen“ erwähnt. „Wenn die KI in den mathematischen Wissenschaften breit aufgestellt ist, kann sie zu jedem Problem beitragen, das uns begegnen wird“, sagt Williamson. Das Potenzial sei erheblich. Man müsse nur die richtigen Werkzeuge finden.

CHATGPT SCHEITERT AN SCHULAUFGABEN

Ob KI-Sprachmodelle wie GPT oder LLaMA in ihrer jetzigen Form die richtigen Tools sind, um mathematische Probleme zu lösen, ist fraglich. Zwar

Obwohl das Modell korrekte Lösungen nachahmen kann, produziert es regelmäßig kritische Logikfehler.

können die jüngsten Modelle wie GPT-4 arithmetische Aufgaben und Logarithmen insgesamt besser lösen als ihre Vorgänger. Doch selbst wenn sie in vereinzelt Tests beeindruckend, zeigen Studien (heise.de/s/2AAw5) und Erfahrungsberichte, dass sie selbst bei vermeintlich einfachen Schulaufgaben immer noch schnell an ihre Grenzen stoßen oder bei den gleichen Aufgaben zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Wie inzwischen zahlreiche Schülerinnen und Schüler enttäuscht feststellen mussten, benötigt ChatGPT offenbar selbst Nachhilfe in Mathe.

„Sprachmodelle wie ChatGPT sind darauf trainiert worden, Sätze zu produzieren, indem sie statistisch gesehen das nächste wahrscheinliche Token voraussagen. Es kann sein, dass in den Trainingsdaten Aufgaben wie $2 + 2 = 4$ enthalten sind und das Modell deshalb die richtige Antwort vorher sagt. Es kann dieses Wissen aber nicht auf beliebige andere Aufgaben transferieren“, sagt Kersting.

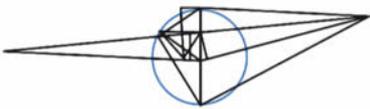
Dazu kommt, dass Sprachmodelle sequenziell von Input zu Output arbeiten, sprich ihre Antworten Wort für Wort generieren, aber diese nicht rückwirkend anpassen, was man auch daran erkennt, dass etwa ChatGPT sich bisweilen innerhalb einer Anfrage wiederholt und den gleichen Inhalt in verschiedenen Worten sagt. Sie sind deshalb auch nicht für Aufgaben gedacht, die mehrere Variablen berücksichtigen müssen, die nicht-lineares Denken, gedankliches Zwischenspeichern und die Manipulation von Zeichen erfordern. „Obwohl das Modell korrekte Lösungen nachahmen kann, produziert es regelmäßig kritische Logikfehler“, schrieben die Entwickler von OpenAI schon vor zwei Jahren über die mathematischen Einschränkungen von GPT.

LOGIK LERNEN

Eine Herausforderung besteht darin, Sprachmodelle mit einer Fähigkeit für „reasoning“ auszustatten – für logisches und schlussfolgerndes Denken. Ein Ansatz sind sogenannte Chain-of-Thought-Verfahren (CoT), in denen man die KI-Modelle mit gezieltem Prompting dazu bringt, ihre Argumentation beim Beantworten der Anfragen schrittweise offenzulegen, zu hinterfragen und gegebenenfalls zu korrigieren. Bereits im Sommer 2022 demonstrierten Forscher von Google mit dem Sprachmodell Minerva, dass sich mathematische und wissenschaftliche Fragen besser beantworten ließen, wenn das Sprachmodell seinen Lösungsweg als Teil der Antwort gleich mitlieferte. Bei den Mathematik-Datensätzen MATH und GSM8K, die jeweils Tausende Übungsaufgaben enthalten, schnitt Minerva besser ab als andere Sprachmodelle zu diesem Zeitpunkt.

Darauf aufbauend demonstrierten Forscher von Google im Januar 2023, dass CoT-Prompting die Leistung des Sprachmodells bei Rechenaufgaben und symbolischem Denken verbessern konnte. OpenAI gelang es im Mai, in einem „Prozess-

„Wenn wir uns Probleme im Alltag anschauen, dann sehe ich viele irrationale Entscheidungen, die wir nicht ansatzweise in einer Maschine darstellen können.“



Arbeiten noch komplett analog: Schülerinnen und Schüler bei der Mathematik-Olympiade in Amsterdam 2011.



vielversprechende Vorschläge wieder zurückgespielt. Durch das Hin- und Herwechseln zwischen diesen beiden Komponenten entstand über Millionen von Vorschlägen hinweg neues Wissen, in dem Fall eine neue Lösung für ein Problem.

LÖSUNGEN FÜR SCHWERSTE PROBLEME

„Solche Entwicklungen zeigen, welches Potenzial in der Technologie steckt. Dass eine KI zuverlässig Aufgaben einer Mathe-Olympiade lösen kann, ist für mich eine Art AlphaGo 2.0: Es demonstriert, dass KI nun in einem Themengebiet eine Form von Kreativität entwickelt, die uns vielleicht helfen kann, andere Probleme, auch außerhalb der Mathematik, zu lösen“, sagt Kristian Kersting. Sein Fachkollege Nils Jansen sieht einen Vorteil in der „Trennung zwischen den kreativeren neuronalen Netzen und den strukturierten symbolischen Methoden“ unter anderem darin, dass das Modell seine Vorschläge mithilfe klar definierter Regeln, wie es sie in einer Formalwissenschaft wie der Mathematik von Natur aus gibt, selbst auf Zulässigkeit überprüfen kann. Das beugt Halluzinationen vor.

Weitaus größere Pläne haben die beiden Ex-Google-Forscher Tony Wu und Christian Szegedy, die inzwischen für Elon Musks Start-up xAI arbeiten. Sie sind der Meinung, dass bereits in den kommenden Jahren ein Computersystem die Problemlösungsfähigkeiten der besten menschlichen Mathematiker erreichen oder sogar übertreffen wird. Damit würde es zumindest eine Definition von Allgemeiner Künstlicher Intelligenz erfüllen. Sie verweisen auf Erfolge wie das Liquid Tensor Project aus dem Jahr 2022, bei dem eine KI den formalen Beweis für ein hochkompliziertes Problem des deutschen Mathematikers Peter Scholze erbracht hatte. Dutzende Freiwillige übersetzten dafür zunächst das erforderliche formale Wissen in die Programmiersprache Lean. Die agierte anschließend als sogenannter Proof-Checker und überprüfte den theoretischen Beweis auf seine Zulässigkeit hin.

Die Vision von Szegedy und Wu ist es, ein Sprachmodell so zu trainieren, dass es Beweise für selbst die kompliziertesten mathematischen Probleme suchen kann. Kombiniert mit einer symbolischen, wissensbasierten Kom-



Nils Jansen von der Ruhr-Universität Bochum verspricht sich Vorteile von der Kombination aus maschinellem Lernen und symbolischer Informationsverarbeitung.

„Dass eine KI zuverlässig Aufgaben einer Mathe-Olympiade lösen kann, ist eine Art AlphaGo 2.0.“



Bleibt skeptisch: Der Mathematiker Geordie Williamson glaubt nicht, dass mathematisches Verständnis allein für eine AGI ausreicht.

ponente wie Lean, könnte ein solches System eine Antwort auf „selbst die schwersten Probleme der Mathematik, etwa das P=NP-Problem (siehe TR 2/22, S. 86), finden“, sagte Tony Wu im Dezember im Gespräch mit der ZEIT. Vorausgesetzt, es ist genug Rechenkapazität vorhanden.

MATHEMATIK ALS SCHLÜSSEL FÜR AGI?

Der Mathematiker Geordie Williamson äußert sich zurückhaltender zu solchen Prognosen. „Entwicklungen wie Lean sind wunderbar, nicht zuletzt, weil sie dafür sorgen, dass Mathematiker und Informatiker aus unterschiedlichen Disziplinen zusammenkommen, die verschiedene Ansätze für verschiedene Probleme mitbringen“, sagt er. Er glaube allerdings nicht, dass es ausreiche, ein Sprachmodell mit Milliarden Zeilen mathematischen Wissens zu füttern, um anschließend alle mathematischen Probleme lösen zu können. „ChatGPT hat gezeigt, wie viel Inhalt in den statistischen Eigenschaften menschlicher Sprache steckt. Ich glaube aber nicht, dass sich das auf mathematische Beweise übertragen lässt.“

Dazu komme, dass in der Forschung derzeit sehr viel Fokus auf logisches Denken und das Lösen von Problemen gelegt werde, sagt Williamson. „Das ist sicherlich ein wichtiger Bestandteil der Mathematik. Aber dabei wird oft vergessen, in die Welt zu schauen und neue und interessante Fragen und Beispiele zu finden.“ Die Mathematik bestehe letztlich aus mehr als Axiomen und Beweisen – und wir stünden erst am Anfang, wenn es darum geht, das Potenzial von Deep Learning auszuschöpfen.

Ähnlich sieht das Kristian Kersting. „Ich glaube daran, dass die Kreativität des Menschen einen Boost erhalten wird und wir durch den Einsatz neuer Tools alle ein bisschen intelligenter werden“, sagt er. Mathematisches Verständnis sei ein wichtiger Schritt in Richtung AGI, aber nicht das Endziel: „Mathematik passt gut in das Narrativ von einer Künstlichen Intelligenz, die alle Probleme lösen kann. Wenn wir uns aber unsere Probleme im Alltag anschauen, unsere sozialen Interaktionen, dann sehe ich sehr viel irrationale Entscheidungen, die wir noch nicht mal ansatzweise in einer Maschine darstellen können.“ ●

Wir schreiben Zukunft.



35%
Rabatt

2 Ausgaben MIT Technology Review
als Heft oder digital
inklusive Prämie nach Wahl

mit-tr.de/testen

 mit-tr.de/testen

 leserservice@heise.de

 +49 541/80 009 120

Hiroshi Ishiguro von der Universität Osaka erforscht die Beziehung zwischen Mensch und Roboter. Als Instrument dazu dient ihm unter anderem eine lebens-echte humanoide Kopie von ihm selbst.



Elektrisierte Beziehungen

Die rasanten Fortschritte bei der KI wecken Hoffnungen auf Maschinen, die Freunde oder gar Liebhaber sein können. In Japan kann man sich schon länger anschauen, wie so etwas aussieht. – Martin Kölling

Lovot ist darauf trainiert, um Zuneigung zu buhlen. Gezielt rollt der kleine Roboter auf ein kleines Mädchen zu, das am Rande eines Standes in einem Kaufhaus in Tokio steht. Mit großen Augen schaut sie das 43 Zentimeter kleine Wesen an. „Was hältst du davon?“, fragt die Mutter. „Kawaii“, wie süß, ruft das Mädchen und nimmt Lovot liebevoll in den Arm.

Die Reaktion ist Kalkül des Herstellers Groove X, der den Roboter bereits 2018 auf den Markt brachte. Schon der Name spiegelt das wider: eine Kombination aus Love und Robot, ebenso wie das kugelige Design. Mit Gesichts- und Spracherkennung, einer auf 37 Grad Celsius erwärmten Roboterhaut und wechselbarer flauschiger Kleidung soll der Roboter zum Sprechen und Kuschneln einladen. Dass es dem Chef des Roboterherstellers, Kaname Hayashi, um große Gefühle geht, macht der Slogan am Stand endgültig klar: „Powered by Love.“ Lovot ist einer der jüngsten Sprösslinge der langen japanischen Tradition, sich freundliche Roboter als Begleiter des Menschen auszudenken.

Dass es nicht nur in Japan ein großes Interesse an Beziehungen zu Maschinen gibt, konnte man zuletzt Anfang Januar beobachten. Bereits kurz nachdem OpenAI seinen GPT-Store online stellte, in dem Nutzer maßgeschneiderte Versionen von ChatGPT anbieten können, fanden sich dort zahlreiche Artificial Girl- und Boyfriend-Bots. So zahlreich, dass OpenAI mit dem Löschen und Sperren nicht hinterherkommt – denn eigentlich verstoßen diese Chatbots gegen die Nutzungsbedingungen des Unternehmens.

So sieht sich denn auch Hayashi als Pionier bei der Förderung der Liebe zwischen Mensch und Maschine. „Lovot bietet einen neuen Wert, den frühere Roboter nicht bieten konn-

ten“, sagt er. Seine Technologie ermögliche emotionale Erfüllung und Fürsorge. Und das ist nicht nur Eigenwerbung. Der Roboterexperte Hirofumi Katsuno von der Doshisha University bescheinigt Lovot, neben dem Roboterhund Aibo des Elektronik- und Unterhaltungsherstellers Sony einer der wenigen „relativ erfolgreichen“ Kommunikationsroboter zu sein. Mehr noch: Er sei ein Vorbote der Zukunft. „Zusammen mit meinen Forscherkollegen bezeichne ich diese Roboter als neue Companion-Spezies“, sagt er.

Die Entwicklung scheint eine Einschätzung des britischen Informatikers David Levy zu bestätigen. Der schrieb bereits 2009 in seinem Buch *Love and Sex with Robots*: „Menschen werden sich in Roboter verlieben, sie heiraten und Sex mit ihnen haben. Das ist langfristig unvermeidlich.“ Bisher schien das jedoch in den meisten Teilen der Welt eine ferne Technikvision. In Japan dagegen gibt es seit Langem eine sehr viel engere Beziehung zwischen Menschen und Maschinen.

Dass selbst nüchterne Alltagsroboter schon Emotionen wecken, haben die Entwickler des Technologiekonzerns Panasonic festgestellt. Sie vertreiben in Krankenhäusern beispielsweise den Transportroboter Hospi, eine Art rollender Schrank mit einem Bildschirm anstelle eines Kopfes. Takeshi Ando, Chef des Robotics Promotion Office von Panasonic, berichtet: „Je öfter die Mitarbeiter den Roboter benutzen, desto mehr schließen sie ihn ins Herz.“ Zu Weihnachten verkleiden sie Hospis beispielsweise als Weihnachtsmänner. „Wir sind fest davon überzeugt, dass Hospi mehr als nur ein gewöhnlicher Roboter geworden ist.“ Deshalb hegt er große Pläne. „Wir glauben, dass Roboter nach und nach die Gesellschaft durchdringen und irgendwann in die Haushalte einziehen werden.“

Je menschenähnlicher die Schöpfung wird, desto mehr Perfektion erwarten die Menschen.

Grund für diesen Optimismus ist eine rasante Entwicklung von KI und Robotik. Dabei soll generative KI helfen, die bislang eher recht begrenzte Intelligenz von Robotern zu verbessern. Erste Versuche, Roboter mit großen Sprachmodellen zu steuern, waren recht vielversprechend. Roboter von Google etwa verstanden allgemeine Anweisungen wie „Räum den Tisch ab“ und konnten komplexere Aktionen aus einzeln trainierten Grundfertigkeiten zusammensetzen. Allerdings ist die Forschung noch in einem frühen Stadium.

Unternehmen versprechen trotzdem schon bald humanoide Roboter, die neben Menschen in der Fabrik arbeiten sollen, wie der zweibeinige Optimus von Tesla oder der Figure 1 des US-Roboter-Start-ups Figure AI. Beide zeigen zwar bislang nur beeindruckende Videos ihrer Maschinen, aber Figure AI gelang es erst kürzlich, vom Onlinehändler Amazon, dem Chiphersteller Nvidia, Microsoft und dessen KI-Partner 675 Millionen Dollar einzuwerben. Und wenn schon der gegenwärtige Stand der KI Roboter so viel besser machen kann, was wäre dann erst mit AGI (Allgemeiner Künstlicher Intelligenz) möglich?

Ando glaubt, dass die Robotik – getrieben von enormen Investitionen in den USA und China – endlich auf den steileren Teil einer exponentiellen Wachstumskurve einschwenkt. „Die Geschäftsmöglichkeiten für Roboter, oder besser gesagt, ihre Fähigkeit, eine aktive Rolle im menschlichen Alltag zu spielen, werden schlagartig zunehmen“, sagt er. „Wir beginnen auch zu verstehen, dass es viele verschiedene Arten von Beziehungen zwischen Menschen und Robotern gibt“, sagt Ando; Roboter als Familienmitglieder, als Freunde – und wenn gewünscht auch als Liebhaber.

Streng genommen hat der Konzern bereits viele Roboter in Japans Wohnungen. Als Roboter gelten laut offizieller Definition Systeme, die ihre Umgebung wahrnehmen, Informationen verarbeiten und selbstständig Handlungen ausführen. Neben den Roboterstaubsaugern des Konzerns erfüllen auch Toiletten und Klimaanlage diese Kriterien. Panasonics Top-Toiletten öffnen selbstständig den Deckel und heizen die Klobrille auf, wenn sich ein Benutzer nähert. Und am Ende des Geschäfts wird automatisch gespült. Auch Klimaanlage erkennen die Anwesenheit von Personen und lenken die kalte oder warme Luft entsprechend.

Andos Abteilung konzentriert sich allerdings derzeit auf Roboter für Unternehmen. Denn der Konzern glaubt, dass sie zunächst in Fabriken, in der Logistik und in anderen Spezialfällen eingesetzt werden. Und selbst dort ist es schwierig genug, sowohl eine klare Daseinsberechtigung als auch ein tragfähiges Geschäftsmodell zu finden. Noch schwieriger wird es bei Humanoiden für den Hausgebrauch. „Aus technischer Sicht ist es schwierig, einen Roboter zu bauen, der in verschiedenen

Umgebungen alles kann“, erklärt der Experte. Selbst Roboter wie Hospi können noch nicht alles perfekt. Dies stellt die Entwickler von Humanoiden vor ein Dilemma: Je menschenähnlicher ihre Schöpfung wird, desto mehr Perfektion erwarten die Menschen. Deshalb setzen die Japaner zunächst auf abstrakte Formen mit zum Teil niedlichen Elementen wie den Augen auf Hospis Display. „Solche Dinge sind sehr wichtig, damit die Menschen den Robotern Unzulänglichkeiten verzeihen“, erklärt Ando.

Panasonics eigener Ausflug in die Welt der maschinellen Mitbewohner kommt daher als „schwacher Roboter“ daher: Nicobo sieht mit seinen runden Augen, dem kugeligen Körper und seinem kleinen Schwanz aus wie ein Haustier. Statt ihn auf perfekte Kommunikation zu trimmen, haben die Entwickler ihm Unberechenbarkeit einprogrammiert. Manchmal reagiert Nicobo auf Rufe, manchmal wendet er sich ab. Manchmal freut er sich, wenn er gestreichelt wird, manchmal nicht. Für Yoichiro Masuda, der das Projekt leitet, soll das den Reiz des Roboters ausmachen. „Gerade weil wir als unvollkommene, schwache Lebewesen existieren, sind wir in der Lage, Freude an Reaktionen zu empfinden.“ Das schaffe ein Gefühl des Miteinanders.

FREILANDLABOR JAPAN

Dass der Roboterdurchbruch vor allem in Japan gelang, ist für den Grundlagenforscher Hiroshi Ishiguro von der Universität Osaka kein Zufall. Vor 24 Jahren begann er zu erforschen, was humanoide Roboter auszeichnen muss, damit wir Menschen uns mit ihnen anfreunden können. Weltberühmt wurde er mit seinem ferngesteuerten maschinellen Doppelgänger, der neuerdings, beseelt von generativer Künstlicher Intelligenz, sogar selbstständig Interviews geben kann.

Nun leitet er eines der staatlichen Moonshot-Projekte, die bis 2050 ein enges Miteinander von Mensch und Maschine entwickeln sollen. „Ich glaube fest daran, dass ich so etwas in den USA oder europäischen Ländern nicht machen könnte“, sagt Ishiguro, der auch ein Roboterlabor am Grundlagenforschungsinstitut ATR leitet. Denn in den westlichen Kulturen sei die Akzeptanz von Robotern und virtuellen Avataren geringer.

Einen Grund dafür sieht Ishiguro in der japanischen Robotertradition. Noch bevor gefühlskalte Industrieroboter auf den Markt kamen, haben Manga-Zeichner der Bevölkerung und den Ingenieuren die Sehnsucht nach menschenfreundlichen Robotern eingepflanzt. Dies begann 1952 mit dem Roboterjungen Astro Boy, der als Mitglied einer japanischen Familie die Welt verteidigte. Ende der 60er-Jahre folgte die Roboterkatze Doraemon, die dem tollpatschigen Schuljungen Nobita immer wieder aus der Patsche half.



Die Lovot-Roboter sollen zum Kuscheln und Spielen animieren. Ihre Oberfläche ist 37 Grad Celsius warm und in flauschige Kleidung gehüllt.



Das harmlos wirkende Cartoon-Gesicht des Krankenhausroboters Hospi von Panasonic signalisiert: Ich bin zwar eine Maschine, aber auch nicht perfekt.



KI-gesteuerte Roboter wie der Optimus von Tesla sollen schon bald in Fabriken arbeiten. Bislang gibt es allerdings nur Videos der Maschine.



Der Roboter Goobo kommuniziert nur mit Bewegungen seines Schwanzes. Dennoch – oder vielleicht auch deswegen – wird er von seinen Nutzern geliebt.

Foto: Groove X Corporation

Bild: Panasonic

Bild: Mit freundlicher Genehmigung von Tesla, Inc.

Foto: Yukai Engineering Inc.

Von diesem Traum beseelt wurde Japan nicht nur Weltmarktführer bei Industrierobotern, sondern auch bei der Entwicklung humanoider Roboter. Das fing 1973 mit dem weltweit ersten humanoiden Roboter Wabot-1 an und gipfelte in Hondas Asimo und dem beinlosen Pepper, den der Technologieinvestor Softbank Robotics 2014 als ersten sowohl emotionalen als auch serienreifen Kommunikationsroboter vorstellte. Dessen Produktion wurde allerdings 2021 nach weltweit 21 000 verkauften Exemplaren vorerst eingestellt, weil die Nachfrage erlahmte.

Den zweiten Grund für die japanische Roboterbegeisterung sieht Ishiguro darin, dass Gefühle in Japan nicht auf Lebewesen beschränkt sind. In seinen Umfragen betrachteten die Europäer Roboter als Sklaven oder Diener. Die Abgrenzung zwischen Mensch und Maschine in westlichen Kulturen wird nach Ansicht der Japaner noch dadurch verstärkt, dass sich der Mensch als Krone der Schöpfung und als autonomes, vernunftbegabtes Wesen versteht. „Wir hingegen glauben, dass alles eine Seele hat“, erklärt der Forscher – sogar Hologramme.

Tatsächlich gab es vor sechs Jahren Medienberichte über Männer, die Hologramme der virtuellen Sängerin Hatsune Miku in privaten Zeremonien heirateten. Der Hersteller Gatebox verkauft noch immer Hologramme, sowohl von weiblichen als auch von männlichen Manga-Charakteren – seit Februar sogar mit der Sprachfunktion der KI-App ChatGPT von OpenAI. Einer der Hologramm-Liebhaber erklärte, dass seine Mutter nicht mitfeiern würde, dafür aber 40 Bekannte. Eine große gesellschaftliche Debatte über das Für und Wider der menschlichen Liebe zu Kunstwesen lösten die Berichte jedoch nicht aus. Denn auch die japanischen Religionen stehen Maschinenwesen offen gegenüber. In einigen Schreinen der japanischen Urreligion Shinto werden rituelle Reinigungen auch für Computer und andere Informationstechnologien durchgeführt. Und der buddhistische Kodai-Tempel in Kyoto hat 2019 in einer Zeremonie zur Überwindung des Leidens die traditionelle Steinstatue des Bodhisattvas Kannon durch einen Androiden ersetzt.

BINDUNGSFÄHIGE ROBOTER

Noch seien dies Einzelfälle, gibt selbst der Roboterprophet Ishiguro gibt zu: Zu teuer sind die Roboter, zu eingeschränkt die Konversation. Der kleine Lovot zum Beispiel kostet 498 000 Yen (3100 Euro), inklusive Versand, aber zuzüglich einer monatlichen Gebühr von mindestens 11 000 Yen (70 Euro).

Immerhin haben Ishiguro und andere Forscher Kriterien identifiziert, die Roboter erfüllen müssen, damit Menschen sie lieben lernen. Eine wichtige Erkenntnis: Es gibt nicht den einen Robotertyp, der alle Menschen gleichermaßen begeistert. „Menschen sind unterschiedlich“, sagt Ishiguro. „Es gibt viele verschiedene Ebenen emotionaler Beziehungen.“ Manche Menschen begnügen sich mit relativ einfachen Beziehungen, andere suchen nach

einer tiefen emotionalen Bindung, die Roboter bisher nicht bieten können.

Auch das Alter der Zielgruppe muss sich auf das Design auswirken, hat Ishiguro bei seinen Untersuchungen festgestellt. „Erwachsene wollen Roboter eher verstehen und brauchen daher eher menschliche, komplexe Persönlichkeiten als Gegenüber“, sagt der Visionär. „Kleine Kinder und ältere Menschen interagieren nicht gerne mit sehr menschenähnlichen Robotern, sondern bevorzugen einfache, niedliche Roboter.“

Wie beim Lovot spielt bei ihnen die Vorstellungskraft des Benutzers eine größere Rolle als bei smarten Humanoiden. Wie einfach solche Roboter sein können, haben der Robotikexperte Hirofumi Katsuno und sein Kollege Daniel White von der Universität Cambridge untersucht. „Haptische Wesen“ nennen sie eine Untergruppe von dummen Maschinen mit emotionalem Bindungspotenzial. „Im Gegensatz zu anderen Robotern mit künstlicher emotionaler Intelligenz konzentrieren sich diese neuen Roboter nicht speziell darauf, menschliche Gefühle auf der Grundlage psychologischer Theorien zu lesen“, erklären die Wissenschaftler. Stattdessen sind sie erfahrungsorientiert, sprich mit taktilen Sensoren ausgestattet.

Ein Vorreiter war die Roboterrobbe Paro, die als eine Art Tiertherapie in Altersheimen und Krankenhäusern eingesetzt wird. Sie blickt in Richtung des Sprechers und reagiert auf Berührungen. Der Roboterhersteller Yukai Engineering hat die Vereinfachung mit seinem Qoobo-Roboter weiter auf die Spitze getrieben: Die Entwickler haben sich für ein rundes Kissen mit weichem Kunstfaserfell entschieden, um sowohl Hunde- als auch Katzenfreunde anzusprechen und preiswert zu bleiben. Es wedelt mit seinem Schwanz, wenn es gestreichelt wird – und manchmal auch, um seinen Nutzer zu begrüßen.

Testnutzer berichteten, dass die Berührungen Erinnerungen an echte Haustiere weckten. In einigen Fällen war das Gefühl der Intimität sogar von Dauer, obwohl sich die Befragten des künstlichen Charakters von Qoobo bewusst waren. Katsuno und White berichten von einer jungen Frau, die sie nur Kaori nennen, die die Kreatur sogar in eine Welt mit anderen Figuren aus Anime-Filmen und ersten KI-Agenten wie Apples Sprachassistentin Siri einbettete. Diese Verbindung „gibt einen Einblick in die Art und Weise, wie Assistenzroboter als neue haptische Kreaturen in eine maschineninkludierte Multispezies-Gesellschaft integriert werden“, so die Forscher.

Katsuno sieht allerdings auch Chancen für die großen Gefühle, da der Mensch für ihn entwicklungsfähig sei. „Wir treten weniger in ein Zeitalter der Roboterrevolution als vielmehr in ein Zeitalter der menschlichen Revolution ein“, so der Experte. Das Zusammenleben mit Robotern werde sich von einem starren zu einem fließenden Menschenbild entwickeln, „das sich ständig mit der Technologie und der Umwelt verändert“. ●

Der buddhistische Kodai-Tempel hat 2019 die traditionelle Statue des Bodhisattvas Kannon durch einen Androiden ersetzt.

Im Bundesverband Deutscher Innovations-, Technologie- und Gründerzentren e.V. (BVIZ) - sind rund 160 Innovationszentren vereint, deren Hauptaufgaben darin bestehen, Existenzgründungen zu fördern und neue, innovative Technologiefirmen zu unterstützen. Die Mitgliedszentren des BVIZ nehmen gründungswillige Unternehmer gern auf, beraten sie qualifiziert in allen die Unternehmensgründung betreffenden Fragen, betreuen sie bei den ersten Wachstumsphasen und bieten ihnen eine hervorragende Infrastruktur – von modernsten Kommunikationsmöglichkeiten bis zu ausgestatteten Laboren. Der Verband vertritt in erster Linie die Interessen der Mitglieder gegenüber Öffentlichkeit, Politik und Wirtschaft. Darüber hinaus bietet er den Mitgliedern Erfahrungsaustausch, Know-how-Vermittlung, Zugang zu nationalen und internationalen Netzwerken sowie weitere Vorteile und Unterstützung.



Gründerberatung in Hürth unterstützt Startups

START HÜRTH unterstützt Startups im Rheinischen Revier

Seit 1998 existiert die START HÜRTH GmbH. Gestartet als klassisches Gründerzentrum mit Schwerpunkten wie z.B. CleanTech und Gründungen in der Chemiebranche ist Sie heute in der Digitalisierung und der Nutzung von Blockchain- und KI-Lösungen unterwegs. START HÜRTH ist im euronova Campus in Hürth-Kalscheuren auf dem ehemaligen Areal der MMC-Fernsehstudios ansässig, dort treffen Unternehmen und Startups aufeinander.

ERSTE ANLAUFSTELLE FÜR GRÜNDUNGER UND STARTUPS

START HÜRTH berät Startups und begleitet diese während und nach der Gründung kostenfrei bei der Entwicklung von Geschäftsmodellen, der Erstellung von Businessplänen, der Umsetzung von Gründungsvorhaben und der Netzwerkarbeit.

Entrepreneurship liegt START HÜRTH besonders am Herzen. Als Teil der regionalen Jury des Gründungsstipendium NRW und als Initiator des Existenzgründerpreises Rhein-Erft-Kreis unterstützt und fördert START HÜRTH insbesondere regionale Startups.

START HÜRTH IST ZUKUNFTSORIENTIERT

Als Partner und im Rahmen weiterer Aufgaben im städtischen Kontext, hat START HÜRTH sich ebenfalls bei der Anbahnung, Planung und der einleitenden Umsetzung der Strukturwandelprojekte in Hürth eingebracht. Durch den Ausstieg aus dem Braunkohleabbau wurde das Rheinische Revier vor große Herausforderungen gestellt. Im Zuge dessen werden für das Rheinische Revier, wozu auch der Rhein-Erft-Kreis zählt, Fördergelder von insg. bis zu 14,8 Mrd. Euro in den kommenden Jahren bereitgestellt.

Diese sollen gezielt eingesetzt werden, um die Region zukunftsfähig umzugestalten und Innovationsfelder auszubauen, z. B. durch die Etablierung des AI Village, einem Innovationscampus für künstliche Intelligenz.

REVIER & GRÜNDEN UND KI – KEIN PROBLEM

Gemeinsam werden im „Studio 6“ mit weiteren Konsortialpartnern, wie der Fraunhofer Gesellschaft, dem KI Bundesverband, der Rheinischen Fachhochschule Köln, KI.NRW und zwei weiteren geförderten Projekten, dem Kompetenzzentrum WIRKsam und dem Blockchain Reallabor, KI- und Blockchain-Lösungen vorangetrieben und Startups und Unternehmen miteinander vernetzt und eingebunden.

Zudem ist das komplette Team von START HÜRTH im Vorstand und Management des IDiTech e.V. vertreten. Das Institut für digitale Zukunftstechnologien e.V. ist ein einzigartiges Netzwerk, in dem sich engagierte Akteure treffen, um systematisch und interdisziplinär digitale Lösungen der Zukunft zu erschaffen. In einer auf nachhaltige Zukunft ausgerichteten Partnerschaft arbeitet der Verein mit Organisationen aus der Industrie, Startups, sowie Hochschulen und Forschungseinrichtungen und setzt gemeinsam Projekte mit Mitgliedern um.

DIE ZUKUNFT DER STARTUP-BERATUNG

START HÜRTH ist insgesamt bestens vorbereitet, um weiterhin Startups ausgezeichnet zu betreuen, ihnen den Weg für einen gelungenen Start zu ebenern und dabei zu unterstützen, Zukunftstechnologien für die Etablierung am Markt und einen nachhaltigen Erfolg zu nutzen.

Bei Fragen steht das Team von START HÜRTH gerne zur Verfügung:
E-Mail: info@start-huerth.com
Homepage: www.start-huerth.com

Gesellschafter der START HÜRTH GmbH:
Stadt Hürth, Kreissparkasse Köln, IHK Köln



AI Village:
www.ai-village.eu
Blockchain Reallabor:
www.blockchain-reallabor.de
Kompetenzzentrum WIRKsam:
<https://www.arbeitswissenschaft.net/forschung-projekte/wirkam>
Strukturwandel in Hürth:
<https://strukturwandel-huerth.de>

„Du kannst deiner letzten Folie noch etwas hinzufügen, Harry: Die Überlebenswahrscheinlichkeit ist größer null.“

David Doolette, Forschungsphysiologe bei der US Navy Experimental Diving Unit, zu Richard Harris nach dessen Präsentation über seinen ersten Wasserstoff-Tauchgang (Seite 56)

Report

- 49 KOLUMNE • Robotersprache vs. Bauchgefühl
- 50 TIEFSEE • Taucher atmen Wasserstoff
- 58 EXPERTE IN 5 MINUTEN • Pollenallergie
- 60 SCHIFFFAHRT • Abschied vom Schweröl
- 65 JUBILÄUM • Der starke Abgang des Fusionsreaktors JET
- 66 QUANTENCOMPUTER • Klare Quanten ohne Rauschen
- 73 DÉJÀ-VU • Der Geist in der Maschine
- 74 BILDUNG • Von Prompts und KI-Pannen in der Schule
- 78 PHYSIOLOGIE • Wie Hunger im Gehirn entsteht
- 86 ÖKONOMIE • Der Preis der Natur
- 88 SELTENE ERDEN • Recycling von Aschen, Halden und Magneten

Robotersprache versus Bauchgefühl

Drohen wir durch KI-Tools zu verblöden? ChatGPT und seine Freunde machen es uns bequem in Bereichen, in denen wir eigentlich kreativ sein sollten. Den Rest beherrschen sie einfach nicht. – Julia Kloiber



Julia Kloiber arbeitet als Mitgründerin der feministischen Organisation Superrr Lab an gerechten und inklusiven digitalen Zukünften.

Ich habe letzte Woche eine Fläche in der Beta-Version von Photoshop mithilfe von KI farbig gefüllt. Das wäre nicht weiter erwähnenswert, wenn es sich um ein komplexes Muster oder um einen verzwickten Verlauf gehandelt hätte. Aber in meinem Fall ging es um eine gewöhnliche weiße Fläche. Anstatt die Fläche in zwei Klicks über die Werkzeugpalette umzuwandeln, habe ich nur einmal auf den Button „Generatives Füllen“ geklickt. Zeiterparnis gleich null. Das Generieren dauert nämlich einen Moment. Das Ergebnis war wie gewünscht unspektakulär.

Diese Interaktion steht symbolisch für meinen Umgang mit KI-Tools. Ich verwende sie für die banalsten Sachen. Aus Bequemlichkeit. Wenn ich schnell einen

Text auf Englisch verfassen muss, bin ich dazu übergegangen, ihn schlampig auf Deutsch runterzutippen, um ihn anschließend in ein KI-Tool zu kippen und übersetzen zu lassen. Das Ergebnis ist nicht perfekt, aber irgendwie gut genug. Was anfangs noch ein eher punktueller Einsatz von generativen Werkzeugen war, ufert langsam aus. Jede noch so kleine englische Formulierung, bei der ich mir unsicher bin, landet in ChatGPT oder DeepL. Ich will checken, was die KI so vorschlägt. An mancher Stelle spare ich mir so ein paar Minuten Zeit, aber langfristig verblöde ich. Ich füttere die Systeme fleißig mit meinen Texten und Gedanken. Während der Computer immer schlauer wird, werde ich immer dümmer. Wenn es so weitergeht, dann wird es kein großes Kunststück für künftige AGIs sein, mich intellektuell zu überholen.

Aus Erzählungen weiß ich, ich bin nicht alleine. Eine Freundin hat sagenhafte 4000 Einreichungen auf eine Ausschreibung erhalten. Beim Sichten fiel ihr auf, dass in den Bewerbungen immer wieder dieselben Formulierungen auftauchen. Kein Zufall. Sie geht davon aus, dass die Hälfte der Bewerber*innen die Texte von ChatGPT hat generieren lassen. Steuern wir auf eine Zukunft zu, in der wir auf automatisch generierte Bewerbungen automatisch generierte Absage-E-Mails versenden?

Dabei kann ich die 4000 Bewerber*innen sogar ein Stück weit verstehen. Auch ich finde plötzlich die Formulierungen der KI vermeintlich besser, spannender, origineller als meine eigenen. Dabei ist Sprache etwas zutiefst Menschliches. Über sie drücken wir Gefühle, Meinungen und Kultur aus.

„Ein Würstchen inhalieren. Ein Nugget wegsaugen. Den Donut verschwinden lassen. Verdauen. Reflux. Magenschmerzen. Darmverschluss.“ In ihren Schreibseminaren stachelt die österreichische Schriftstellerin Stefanie Sargnagel die Teilnehmer*innen zum kreativen Umgang mit Sprache an. Es ist eine Kampfansage an abgekauten Formulierungen. An Texte, die Computer ausspucken. Die auf Wahrscheinlichkeiten basieren statt auf Bauchgefühlen. Ist Sprache, die von Computern generiert wird, überhaupt Sprache?

Die Zeit, diese Frage zu erörtern, bleibt mir im Alltag nicht. Denn während ich kreative Tasks an die Maschinen auslagere, bleiben die profanen Aufgaben für mich übrig. Steuerklärungen, Terminbuchungen, Presseverteiler erstellen. Für den langweiligen, bürokratischen Kram, für den ich so gerne Unterstützung hätte, funktionieren die Tools nicht gut genug.

Dabei wäre es so erstrebenswert, die stupiden, repetitiven Aufgaben auszulagern. Oder anders gesagt: Kann die KI bitte den ganzen langweiligen Scheiß übernehmen, während ich mir geistreiche Formulierungen überlege und andere Menschen damit intellektuell stimmiere!

Ich werde sie von nun an aushungern, die KI-Tools, die sich in meinen Arbeitsalltag geschlichen haben. Ich werde sie nicht weiter mit meinen Gedanken füttern, sondern lediglich die langweiligsten Aufgaben durch ihre digitale Innereienlandschaft wandern lassen. Das nimmt mir zwar nicht die Steuerklärung ab, aber wirkt gegen das Verblöden – jetzt schon. ●



Im Rausch der Tiefe

Wie ein abenteuerlustiger Mathelehrer, ein umtriebiger Physiologe und ein riesiges Netz von Unterwasserhöhlen in Florida zu einem technologischen Durchbruch beim Tiefseetauchen führten. – Samantha Schuyler (Übersetzung: Gregor Honse1)

Richard „Harry“ Harris war wie hypnotisiert von dem, was vor ihm lag: ein riesiger, schwarzer, klaffender Abgrund, den noch nie ein Mensch erkundet hat. Um hierherzukommen, auf 230 Meter Tiefe in der Pearse Resurgence, einer der gewaltigsten Wasserhöhlen der Welt, waren zwei Hubschrauber, drei Wochen Tests und zwei Tonnen Ausrüstung nötig. Als er in den Abgrund startete, spürte Harris den vertrauten Sog – vielleicht könnte er noch ein wenig tiefer gehen?

Er blickte zu seinem Tauchpartner Craig Challen, ein paar Meter rechts von ihm. Selbst durch Taucherbrille und Atemgerät, dessen dicke Schläuche wie Mammut-Stoßzähne aussahen, konnte Harris sehen, dass Challen dasselbe dachte. Sie tauchen schon seit Jahren in immer gefährlicheren unerforschten Höhlen. Damit gehörten sie zu den wenigen Menschen, die 2018 bei der Rettung einer thailändischen Fußballmannschaft aus einer Höhle helfen konnten.

Harris und Challen kennen das extreme Risiko und sich gegenseitig gut. Sie wollen beide unbedingt in dunkle Weiten vorstoßen. Trotzdem kehrten sie auf Harris' Zeichen hin um. Sie waren jetzt, im Februar 2023, weder in dieser Höhle, um ihren eigenen, drei Jahre alten Tiefenrekord von 245 Metern zu brechen. Noch wollten sie einen neuen Weltrekord aufstellen – dazu müssten sie über 308 Meter hinausgehen. Sie waren dort, um einen möglichen Weg zu noch größeren Tiefen zu erforschen: die Wasserstoffatmung.

Das Problem besteht seit mehr als einem Jahrhundert: Wie kann ein menschlicher Körper unter Wasser dem immensen Druck standhalten, für den er nicht geschaffen ist? Marine und Offshore-Ölgesellschaften auf der ganzen Welt haben viel in die Erforschung dieser Frage investiert. In den 1970er- und 1980er-Jahren begannen ihre Ergebnisse in die zivile Tauchcommunity einzusickern, wo Neugierige ihre Grenzen ausloten wollten. Zu diesen Wagemutigen gehörte auch der Highschool-Mathelehrer Sheck Exley aus Florida. Er wurde zu einer internationalen Ikone, weil er sogar einige Rekorde der militärischen und kommerziellen Profis gebrochen hatte.

Schon als Teenager erkundete Exley die Unterwasserhöhlen Nordfloridas. Seit seinem ersten Höhlentauchgang 1966 im Crystal River war er süchtig danach. 1972, im Alter von 23 Jahren, konnte er als erster Mensch weltweit 1000 Höhlentauchgänge verzeichnen. „Ich bin irgendwie in diese Höhlen gekommen, meine Augen haben sich angepasst, ich bin ein bisschen weiter hineingeschwommen und habe in die Dunkelheit geschaut“, sagte er 1992 gegenüber der Taucherzeitschrift *AquaCorps*. „In diese Dunkelheit habe ich seitdem ständig geschaut.“

Ab etwa 40 Metern Tiefe führt normale Luft – 78 Prozent Stickstoff, 21 Prozent Sauerstoff und 1 Prozent Spurengase – zu einer sogenannten Inertgas-Narkose. Sie wird auch „Martini-Effekt“ oder „Tiefenrausch“ genannt, weil sie ähnlich wie ein starker Drink euphori-

Craig Challen 2023 beim Tauchgang in der Pearse Resurgence in Neuseeland. Gemeinsam mit seinem Partner Richard Harris setzt er neue Maßstäbe im Tauchsport.

„In diese Dunkelheit habe ich seitdem ständig geschaut.“

sierend wirkt und das Urteilsvermögen einschränkt. Noch ein wenig tiefer, und der Sauerstoff wird giftig. Die US-amerikanische und die britische Marine verdünnen deshalb seit Jahrzehnten die Luft in den Tauchflaschen mit Helium, aber nur wenige Außenstehende wussten davon. Nachdem der deutsche Höhlentaucher Jochen Hasenmayer 1981 mit einem Heliumgemisch eine Tiefe von 143 Metern erreicht hatte, begann auch Exley damit – obwohl er wusste, dass nur wenige Jahre zuvor zwei Taucher in Florida an solchen Experimenten gestorben waren.

Heute verwenden Taucher, wenn sie tiefer als 40 Meter absteigen, in der Regel kein konstantes Gasverhältnis, sondern wechseln beim Ab- und Auftauchen zwischen verschiedenen Stickstoff-, Sauerstoff- und Heliumgemischen, je nach Standort, Wassertemperatur, individueller neurologischer Toleranz und vielen anderen Variablen. Dekompressionstabellen listen genau auf, wie lange welche Mixtur in welcher Tiefe eingeatmet werden muss. Ein zu schneller Aufstieg würde die angesammelten Gase im Blut wie beim Öffnen einer Mineralwasserflasche ausperlen lassen. Dies führt zur schmerzhaften und gefährlichen „Taucherkrankheit“.

Um die Dekompressionstabellen zu erstellen, sind Hightech und einschlägige Datenbanken nötig, die früher den wenigsten zur Verfügung standen. Exley konnte einen befreundeten Berufstaucher überreden, ihm eine Beispieltabelle zu geben, die allerdings nur bis 121 Meter Tiefe reichte. Mit einer Software extrapolierte er die Werte und durchbrach so 1987 die 200-Meter-Grenze in der Nacimiento-Höhle in Mexiko. Der Abstieg dauerte nur 24 Minuten, aber um aus dieser Tiefe wieder gesund hochzukommen, musste er insgesamt 11,5 Stunden unter Wasser bleiben. In dieser Dekomprimierungszeit spürte er, wie er gefährlich schwach wurde. Sein Blutzuckerspiegel sank, die Kälte drang in seine Glieder, die Haut an Händen und Gesicht schälte sich. „Damals hatte ich das Gefühl, dass ich noch tie-

fer hätte tauchen können“, sagte er damals dem Magazin *InDepth*. „Aber ich wusste, dass ich meine Dekompressionsgrenze erreicht hatte.“

1988 stellte Exley mit 237 Metern einen neuen persönlichen Rekord auf. Er verwendete eine präzisere Tabelle, die ihm der Physiologe Bill Hamilton erstellt hatte. Hamilton ist unter Tauchern als „Prinz der Gase“ bekannt und war an einigen der frühesten Arbeiten zur Dekompression bei Tiefen über 200 Metern beteiligt. Er hat an einer Software für Berufs- und Marinetaucher mitgewirkt, die extrem präzise Tabellen für eine beliebige Anzahl von Parametern erstellt. „Dadurch verfügte er über unglaubliche Datenmengen“, sagt Bill Stone. Der Luft- und Raumfahrt-Ingenieur ist selbst Höhlentaucher und hat ein frühes Kreislaufatemgerät (Rebreather) entwickelt und verkauft, das die ausgeatmete Luft von Kohlendioxid befreit. „Hamilton entwickelte stochastische Modelle, um herauszufinden, wie man die Dekompression beschleunigen kann, ohne sich zu schädigen“, so Stone. In den Achtzigern begann Hamilton, auch maßgeschneiderte Tabellen für Sporttaucher zu entwickeln. Damit wurde er für immer zum Liebling der Szene.

DER REKORDVERSUCH

Allen Fortschritten bei der Dekompression zum Trotz starb Exley 1994 bei dem Versuch, den 332 Meter tiefen Grund des Zacatón-Sinklochs in Mexiko zu erreichen. Er schaffte es bis auf 270 Meter. Wahrscheinlich wurde ihm das Hochdruck-Nervensyndrom (HPNS) zum Verhängnis: Sinkt ein Taucher zu schnell über 150 Meter, beginnt er unkontrollierbar zu zittern. Zusätzlicher Stickstoff im Helium-Sauerstoff-Gemisch kann die Symptome zwar dämpfen, narkotisiert den Körper aber auch stärker. Zudem erschwert die höhere Dichte des Stickstoffs in solchen Tiefen das Atmen.

Zwar gelang es Tauchern mit herkömmlichen Gasmischungen, unter 300

Meter abzusteigen, indem sie sich durch schwere HPNS-Symptome durchbissen. Irgendwann wird das Gasgemisch aber zu schwer, um es noch ein- und ausatmen zu können. „Auf zehn Metern Abstieg steigt der Druck um eine Atmosphäre. In 250 Metern Tiefe sind es also 26 Atmosphären“, sagt Challen, Harris' Tauchpartner. „Es wird zu einem physischen Problem, das Gas in und aus der Lunge zu bewegen.“ Um dieses Problem zu umgehen, müssten die Taucher etwas atmen, das leichter ist als Helium. „Und es gibt nur ein einziges leichteres Gas“, sagt Challen. „Nach Wasserstoff kommt nichts mehr.“

Die ersten Wasserstoffversuche fanden bereits in den 1990er-Jahren statt – allerdings nicht im Wasser, sondern in einer Überdruckkammer. Ein Team von Ärzten, Ingenieuren, Wissenschaftlern und Tauchern der französischen Compagnie Maritime d'Expertises (Comex), einem Hersteller von Tieftauchsystemen, simulierte in einem Projekt namens Hydra eine Tiefe von 701 Metern. (Dazu waren 15 Tage Kompression und 23 Tage Dekompression nötig.) 1996 wurde das Vorhaben eingestellt, weil sich kommerzielle Unternehmen immer mehr Tauchbooten und dem sogenannten Sättigungstauchen zuwandten, bei dem sich das inerte Gas vollständig im Blut löst. Dafür ist aber mitunter eine Dekompressionszeit von mehreren Tagen nötig, die deshalb nur in Druckkammern, nicht aber im Wasser verbracht werden kann. „Beim Berufstauchen gibt es keine Poesie – man will einfach nur effizient sein“, sagt der frühere Hydra-Beteiligte Jean-Pierre Imbert.

2012 bauten schwedische Taucher mit ihrem Hydrox-Projekt auf die Arbeit der Comex auf. Sie benutzten ebenfalls Wasserstoff, diesmal aber nicht in der kontrollierten Umgebung einer Druckkammer, sondern in freier Wildbahn. Fünf Minuten lang atmeten sie in 40 Metern Tiefe erfolgreich ein Wasserstoff-Sauerstoff-Gemisch. Allerdings behielten sie dies weitgehend für sich. Sie fürchteten,



Challen hilft Harris bei einem Tauchgang im Jahr 2020. Im Vordergrund zwei Rebreather – der eine mit einem Wasserstoffgemisch, der andere mit konventionellem Atemgas.

Richard Harris beim Einstieg in die Pearse Resurgence im Februar 2023.





Challen unter einem Habitat in der Pearse Resurgence, das den Tauchern erlaubt, sitzend und in trockener Umgebung den letzten Dekompressionsstop einzulegen.

dass Menschen ohne das nötige Fachwissen diesen Versuch auf eigene Gefahr nachahmen könnten. „Wir haben nicht viel darüber veröffentlicht oder erzählt, weil man wissen muss: Macht man es falsch, wird man kläglich scheitern“, sagte der beteiligte Tauchingenieur Åke Larsson später. „Aber es ist keine Raketenwissenschaft. Wenn man seine Hausaufgaben macht, ist es nicht kompliziert. Man muss es nur richtig machen.“

Das war die Ausgangslage, als sich 2020 praktisch alle Fachleute auf diesem Gebiet zur „H2 Working Group“ zusammenfanden. Sie wollten herausfinden, ob Wasserstoffatmung auch unter 200 Metern möglich wäre, ohne die aufwendigen Verfahren der Berufstaucherei. Zusammengetrommelt hatte sie Michael Menduno, erfahrener Höhlentaucher und Chefredakteur des Magazins *InDepth*, gemeinsam mit John Clarke, dem ehemaligen wissenschaftlichen Leiter der US Navy Experimental Dive Unit. Menduno war zum Schluss gekommen, dass die Tauch-Szene mit Helium an ihre Grenzen gestoßen war. Exley selbst hatte schon 1992 darauf hingewiesen: „Es scheint ein echtes Potenzial für Hydreliox zu geben“, also für ein Wasserstoff-Helium-Sauerstoffgemisch, sagte er damals in einem Interview mit Menduno.

Jeder Teilnehmer war Spezialist für einen anderen Aspekt – Mechanik des Atemgeräts, Berechnung der Gasmischungen, Fragen der Physiologie. Am Ende des ersten Treffens hatten sie so viele potenzielle Probleme gefunden, dass sie einen „Herausforderungsbaum“ erstellten, um den Überblick zu behalten. Der Baum verzweigte sich immer weiter; hatte jemand eine mögliche Lösung vorgestellt, ergaben sich daraus neue Probleme.

SELBSTVERSUCH IM SWIMMINGPOOL

Höhlentaucher Harry Harris trat der Arbeitsgruppe auf Einladung von Menduno bei. Sein Team hatte an der Pearse Resurgence in Neuseeland bereits eine Tiefe von 245 Metern erreicht. Aber die Höhle ging noch weiter, und sie wollten sie kartieren. Sie wussten, dass sie mit Helium nicht über 300 Meter hinauskommen würden. Hochentzündliches Wasserstoffgemisch sah aber auch nicht wie eine verlockende Alternative aus. „Ich will wirklich nicht als das Versuchskaninchen berühmt werden, das im Wasser explodiert ist“, erklärte er beim ersten Treffen. „Es wäre also schön, wenn wir das lösen könnten.“

David Doolette, Forschungsphysiologe bei der US Navy Experimental Diving Unit, war in den Neunzigern selbst in der Pearse-Höhle getaucht. Er war Wasserstoff gegenüber neugierig, aber auch skeptisch. Denn neben der Explosionsgefahr hat Wasserstoff noch ein paar andere unangenehme Seiten. „Aufgrund seiner großen Wärmeleitfähigkeit saugt er die Wärme mit jedem Atemzug bis zu einem gefährlichen Grad aus dem Körper“, erklärt Doolette. Zudem fehlten Erfahrungswerte zu den

„Ich will nicht als das Versuchskaninchen berühmt werden, das im Wasser explodiert ist.“

Dekompressionszeiten: „Sie zu berechnen, ist einfach. Die Herausforderung besteht darin, sie richtig zu berechnen.“

Andere teilten seine Vorbehalte. Nuno Gomes, ehemaliger Höhlentaucher und Weltrekordhalter, war besonders besorgt über die Dekompression. „Ich denke, wir müssen langsam vorgehen“, sagte er der Gruppe. „Beginnt mit flachen Tauchgängen und geht dann zu immer tieferen über.“ Auf einem Treffen der Arbeitsgruppe 2022 in Australien äußerte Imbert die Vermutung, dass ein Anteil von mehr als 3,5 Prozent Wasserstoff wahrscheinlich eine Detonation auslösen würde. „Harry nickte und sagte: ‚Nun, ich glaube nicht, dass das stimmt‘“, erinnert sich Stone. Imbert fragte, woher er das so genau wissen wolle. „Harry sagte: ‚Letzte Woche habe ich 7 Prozent in meinem Pool ausprobiert.‘ Alle wurden hellhörig.“

Allen wurde klar, dass Harris längst beschlossen hatte, Wasserstoff direkt in der Pearse-Höhle zu testen. Er hatte sich eine Wasserstoffkartusche in sein Haus in einem Vorort von Adelaide liefern lassen und beschlossen, „ein bisschen damit zu spielen“, wie er später erzählte. Er füllte Wasserstoff in seinen Rebreather und stellte ihn in den Pool im Hinterhof, um eine mögliche Explosion einzudämmen. Aus sicherer Entfernung begann er mit der Einleitung von Sauerstoff. (Sein Hund beobachtete ihn dabei hinter einem Zaun; seine Frau war nicht da.) Als nichts explodierte, probierte er den Rebreather aus. Sein erster Atemzug, so erzählte er mir später, fühlte sich leicht, glitschig und kalt an. Das Atmen war fast schon herrlich leicht. „Die Stimme hört sich mit Wasserstoff noch viel alberner an als mit Helium. Und ich war froh, dass dem Haus und dem Hund nichts passiert ist.“

Die anderen waren erstaunt, einige beunruhigt. „Diese Entscheidung muss jeder für sich selbst treffen“, meint Stone. „Die Pearse Resurgence ist kein Ort für Experimente. Wenn man dort hineingeht, sollte man Ausrüstung verwenden, von der man weiß, dass sie in dieser Tiefe funktioniert. Keine physiologischen Experimente in 300 Metern Tiefe. Das hat alle anderen Taucher, die über 200 Meter hinausgingen, umgebracht. Mein Rat an Harry und alle anderen, die dieses Spiel spielen wollen, ist der gleiche, den ich Exley gegeben habe: Geh! In! Eine Druckkammer! Simuliere das zuerst!“

„Die Gruppe war irgendwie gespalten“, erinnert sich Menduno. „Ich meine, jeder hat Harry unterstützt, aber einige dachten auch: Du wirst sterben. Sie waren verärgert und besorgt, dass ihr Freund losziehen und sich bei dieser Sache möglicherweise umbringen würde.“

VIELE TOTE FREUNDE

Schon hinter der ersten Ecke der Pearse Resurgence verschwindet das Licht, als hätten es die dunklen Wände – schwarzer Marmor, durchzogen von grauen Quarzadern – absorbiert. Manchmal verengt sich

die Höhle so sehr, dass man im Stehen die Decke berühren könnte. Manchmal breitet sie sich zu riesigen Kammern aus. An einer Stelle ragen zerklüftete Felsfinger aus den Wänden. Tiefere Teile der Höhle sind glatt und fast perfekt rund, nur durchbrochen von dunklen Spalten, die zu unerforschten Tunneln führen.

Jeder neu entdeckte Teil der Höhle erhält einen Namen. Bei ihrem Abstieg im Februar 2023 durchquerten Harris und Challen den Nightmare Crescent, den Needlebender, den Gargleblaster, die Weaver's Ledge, den Big Room und schließlich den Brooklyn Exit. Das Wasser hatte sechs Grad und war vollkommen klar. Abgesehen vom kurzen Zischen und Klicken der Rebreather, dem Seufzen der durch den Kreislauf gepumpten Gase, herrschte unheimliche Stille.

Auf 120 Metern öffnet sich die Höhle zu einem Plateau, das steil abfällt. „An diesem Punkt ist es, als stünde man am Abgrund“, erzählt Harris. „Und es fühlt sich an, als würde die Reise jetzt erst richtig losgehen.“

Hinter dem Plateau geht es weitere 50 Meter in die Tiefe. Bis zu 170 Metern Tiefe konnte Harris seine Position noch auf einer mentalen Landkarte verfolgen, indem er sich an bekannten Felsformationen orientierte. Um Kraft zu sparen und die Ansammlung von Kohlendioxid in den Gelenken zu vermeiden, ließen sie sich von Unterwasser-Scootern ziehen. Sie folgten Seilen, die zum Teil von ihnen selbst, zum Teil noch von Doolette vor 20 Jahren angebracht worden waren.

Obwohl Harris einen strengen Plan im Kopf hatte und hypersensibel auf jedes Geräusch seines Rebreathers lauschte, fand er einen Moment, um innezuhalten und zu denken: „Was wäre, wenn ich das nie wieder erleben würde?“

Bei 200 Metern mischte Harris Wasserstoff in sein Atemgas. Auf den nächsten 30 Metern überprüfte er die Reaktion seines Körpers. Er war ruhig und klar im Kopf. Mehr noch: Er bemerkte, dass das leichte Zittern in seinen Händen, das er normalerweise als frühes Anzeichen des Hochdruck-Nervensyndroms in dieser Tiefe bekam, verschwunden war. Er blickte zu seinem Tauchpartner Challen, der mit Helium tauchte: Dessen Hände zitterten sichtbar, als er mit einem Seil hantierte.

In 230 Metern Tiefe hatte Harris erreicht, was noch niemand zuvor geschafft hatte: Er schwamm frei in dieser unvorstellbaren Tiefe und atmete dabei

Wasserstoff. Aber sein Blick war auf den unerforschten Abgrund vor ihm gerichtet. „Ich würde lügen, wenn ich sagen würde, dass ich nicht davon träume, dort hinunterzutauchen“, sagte er später.

Die Gemeinschaft derjenigen, die davon besessen sind, zu lernen, wie der menschliche Körper unglaublichen Druck aushält, ist klein; meist ist jeder um höchstens eine Ecke mit jedem anderen bekannt. Wasserstoffskeptiker Doolette kennt Harris seit mehr als 20 Jahren – seit dieser Doolettes Qualifikationskurs für Tauchmedizin in Australien absolvierte. Damals arbeiteten beide auch in der Abteilung für hyperbare Medizin des Royal Adelaide Hospital. Harris wollte sich im Höhlentauchen weiterbilden, Doolette war bereits langjähriger Höhlentaucher.

„Die Stimme hört sich mit Wasserstoff noch viel alberner an als mit Helium. Und ich war froh, dass Haus und Hund nichts passiert ist.“



Richard Harris ist mit Wasserstoff in größere Tiefen vorgestoßen als je ein Mensch zuvor.

Schon bevor die H2-Arbeitsgruppe zu tagen begann, wusste Doolette, dass Harris über das Tauchen mit Wasserstoff nachdachte. „Es kam wahrscheinlich für einige Teilnehmer überraschend, aber nicht für mich“, sagte Doolette zu mir. Er hielt es für waghalsig, Wasserstoff bei einem tiefen Höhlentauchgang zu erproben. „Es gibt eine ganze Industrie, die sich mit Wasserstoff beschäftigt. Und deren Ansatz ist es, Wasserstoff und Sauerstoff voneinander zu trennen. Wenn man sie stattdessen zusammenmischen will, gibt es nicht einmal Verfahren dazu.“

Auch Stone stand der Expedition skeptisch gegenüber – bei jedem Tauchgang unter 200 Metern sollte das Konzept seiner Meinung nach zunächst getestet werden. „Ich mache das schon sehr lange, und ich habe viele tote Freunde“, sagt er. Er plädiert deshalb für Tauchroboter. „Wir bewegen uns in einen Bereich, in dem Robotik keine Science-Fiction mehr ist. Wir tun es bereits. Ist es perfekt? Nein. Aber es kann bald weit, weit über das Wasserstofftauchen hinausgehen.“

Als Taucher, sagt Doolette, verstehe er den Wunsch, dorthin zu gehen, wo noch nie jemand zuvor gewesen ist: „Höhlentaucher forschen aus Spaß an der Sache. Ein Roboter wird das nicht erleben.“ Ein weiterer Reiz sei es, herauszufinden, wohin eine Höhle führt und wie man ihr folgen kann. „Und wenn man dann endlich im Wasser ist, verschwindet für einen der Rest der Welt.“

Ein paar Wochen nach seinem Wasserstoff-Tauchgang hielt Harris einen Vortrag vor der H2-Arbeitsgruppe. Er entschuldigte sich für die Heimlichkeit und seine letzte Folie zeigte: $n=1$. „Das bedeutet, dass es ein einziges Mal erfolgreich war“, sagte er. Nach der Präsentation applaudierte die Gruppe. Doolette sagte: „Du kannst deiner letzten Folie noch etwas hinzufügen, Harry: Die Überlebenschance ist größer null.“

Doolette war erleichtert, dass Harris es zurück an die Oberfläche geschafft hatte. „Ich erkannte, dass es ein ziemlich bahnbrechender, bedeutsamer Tauchgang war“, sagte er mir. „Ich sehe keinen Sinn darin, tief zu tauchen, nur um tief zu tauchen, aber wenn man sich einem Forschungsprojekt verschrieben hat und dazu gehört, dass man in Höhlen taucht, um etwas zu erforschen und zu entdecken, dann sollte man das tun.“ ●

**das
könnte
folgen
haben...**

... aber nur gute.

Wer digital lebt und arbeitet, hört t3n Podcasts.



t3n.de
Spreading knowledge & future optimism

t3n digital
pioneers

Pollenallergien

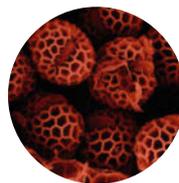
Mindestens jeder sechste Mensch in Deutschland leidet unter einer Pollenallergie, Tendenz steigend. Die Ursachen im Detail sind noch immer unklar. Sicher ist: Die Klimakrise verschärft die Lage. – Andrea Hoferichter; Grafik: Matthias Timm



Birke



Gräser



Beifuß



Erle

Vom Pollen zur Allergie

Pollen setzen Allergene frei. In der Regel sind das Eiweißmoleküle.

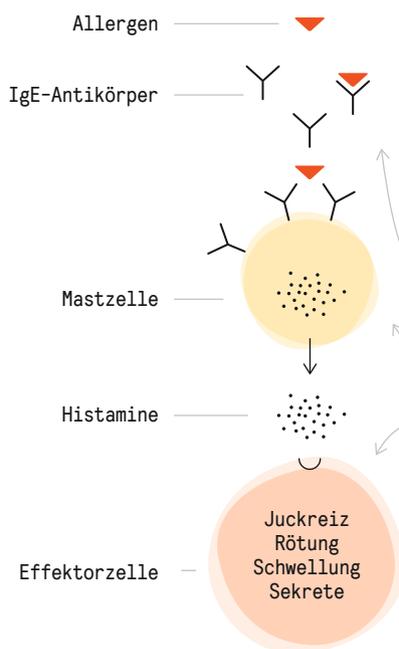
Das Immunsystem erkennt sie als Eindringlinge und bildet Antikörper vom Typ Immunglobulin E (IgE). Das Immunsystem ist sensibilisiert.

Wenn beim Zweitkontakt ein Allergen an zwei IgE-Antikörper an den Mastzellen bindet, findet eine chemische Vernetzung statt. Die Mastzelle ist aktiviert und setzt Histamine frei.

Histamine sind Botenstoffe, die Heuschnupfen-Symptome auslösen: Jucken, Schwellungen, Sekrete, selten einen allergischen Schock.

Nicht alle sensibilisierten Menschen entwickeln eine Allergie. Bei ihnen werden die Mastzellen nicht aktiviert. Warum das so ist, wird noch erforscht.

Wird eine Pollenallergie nicht frühzeitig durch Hypo-sensibilisierung behandelt, droht ein „Etagenwechsel“ in die Lunge. Heuschnupfen gilt laut WHO als häufigste Ursache für chronisches Asthma.



Gegenmittel

Hypo-sensibilisierung: Das Allergen wird chemisch leicht verändert und wöchentlich in verdünnten, steigenden Dosen unter die Haut gespritzt. Ist die „Erhaltungsdosis“ erreicht, folgen monatliche Spritzen über mindestens drei Jahre. Die Therapie funktioniert auch mit Tabletten oder Tropfen.

Der Effekt: Das Immunsystem bildet zunehmend Antikörper des Typs Immunglobulin G, die das Allergen abfangen. Die Aktivierung der Mastzelle unterbleibt.

Anti-IgE-Antikörper: blockieren die IgE-Antikörper

Cromone: bremsen die Ausschüttung von Histaminen aus den Mastzellen

Anti-Histaminika: blockieren den Histaminrezeptor der Effektorzelle

Glukokortikoide: wirken entzündungshemmend (Beispiel: Kortison)

Was auch hilft – oder eben nicht

Wirkung nachgewiesen

- Haare waschen
- Nasenspülung
- Pollen aussperren
- ans Meer reisen
- UV-Strahlentherapie
- Entspannungstherapie
- pflanzliche Mittel
- Akupunktur

Keine Evidenz

- Bioresonanztherapie
- Homöopathie
- Kinesiologie
- Darmsanierung
- Elektroakupunktur
- Eigenblut- und Eigenurintherapie
- Bachblütentherapie
- Sauerstoff-, Ozon- und Zelltherapie

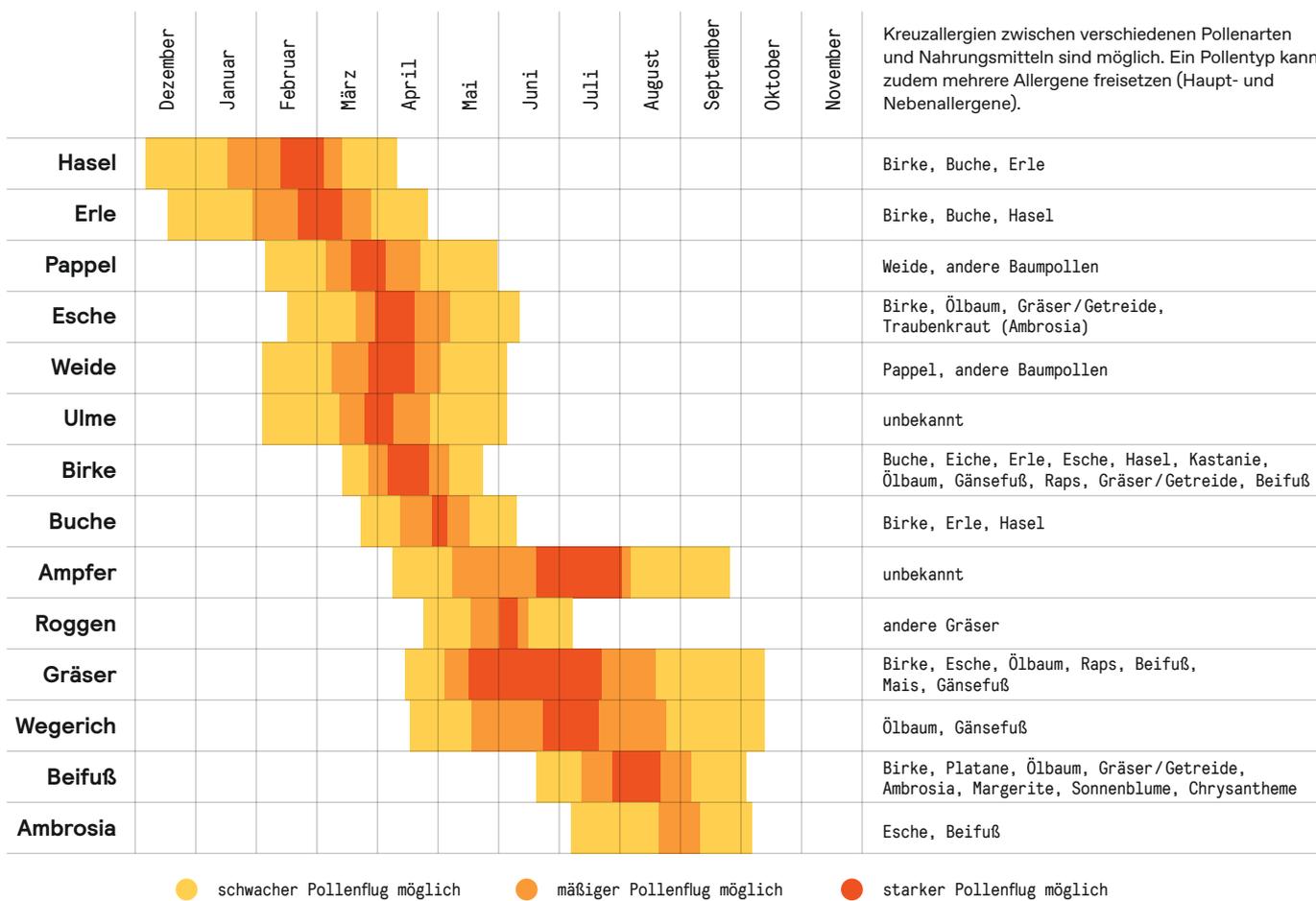
„Allergische Erkrankungen, vor allem Inhalationsallergien, haben ein epidemisches Ausmaß erreicht. Einer der häufigsten Auslöser sind die in Pollen enthaltenen Allergene.“

(Quelle: RKI)

Fast 14 Millionen Menschen in Deutschland leiden laut Hochrechnungen unter einer Pollenallergie. Ältere Menschen, erwachsene Frauen und Jungen im Kindesalter sind besonders häufig betroffen. Warum, ist unklar. Als Risikofaktoren gelten unter anderem eine genetische Vorbelastung und Luftverschmutzung.

Pollenflugkalender

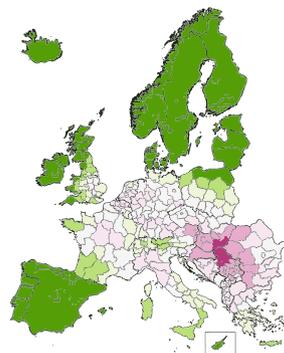
Kreuzallergien



Pollenwandel durch Klimakrise

Durch den Klimawandel kommen neue Pollen zu uns, etwa vom Olivenbaum oder der Ambrosia. Die Pollensaison startet zudem früher und endet später. Vor allem für Polysensible wächst damit die Gefahr, chronisches Asthma zu entwickeln.

Außerdem lassen höhere CO₂-Konzentrationen Pflanzen schneller wachsen und fördern die Pollenproduktion. Auch höhere Temperaturen und häufigere Stürme können die Allergenbelastung steigern.



Ambrosia um 2050

Anteil der sensibilisierten Menschen in Prozent. In 30 Jahren könnte jeder vierte bis fünfte Deutsche für Ambrosia-Pollen sensibilisiert sein.



Abschied vom Schweröl

Bis 2050 will die Schifffahrt klimaneutral werden. Dazu muss die Branche lernen, mit ganz neuen Treibstoffen umzugehen. – Gregor Honsel

Boden, Tische, Bildschirme – alles vibriert. Der Schiffsmotor nebenan, mit Kolben groß wie Bierfässer, versetzt das gesamte Gebäude in Schwingung. Durch die Fenster im Kontrollraum sieht man vier mannshohe Stahlgehäuse, umrankt von Röhren und Kabeln. Das sind die Zylinderköpfe. Der Rest des Motors ist von hier oben nicht zu sehen, die Kurbelwelle befindet sich zwei Stockwerke tiefer. „Eine mittelgroße Maschine für Frachtschiffe“, erläutert Klaus Rasmussen, Verkaufsleiter bei MAN Energy Solutions: lediglich 7500 Kilowatt und 1,7 Kubikmeter Hubraum. „Eine richtig große würde gar nicht in die Halle passen.“

Willkommen in der Welt der Schifffahrt, mit den ihr eigenen, kaum fassbaren Dimensionen. Diese „mittelgroße“ Maschine im MAN Research Center in Kopenhagen soll helfen, ein großes Problem zu lösen: Der Schiffsverkehr trägt rund drei bis vier Prozent zu den weltweiten menschengemachten Treibhausgasemissionen bei. Bis 2050 sollen diese Emissionen um 80 Prozent sinken, sieht das EU-Programm FuelEU Maritime vor. Die International Maritime Organization (IMO), eine Sonderorganisation der UN, plant gar eine Senkung auf null. Eine harte Nuss für die Branche.

Dass sie schnelle Kurswechsel hinbekommt, hat sie bereits gezeigt. Jahrzehntelang waren Containerschiffe vor allem mit billigem, aber dreckigem Schweröl unterwegs. Innerhalb weniger Jahre hat sich nun verflüssigtes Erdgas (LNG) als Treibstoff etabliert. Allerdings hilft es nur gegen den hohen Schwe-

„Der entscheidende Vorteil von Ammoniak: Es enthält keinen Kohlenstoff.“

felausstoß. Kohlendioxid setzt es immer noch frei. Deshalb steht nun die nächste Transformation an.

Bei voller Fahrt können die haushohen Zweitakt-Diesel täglich schon einmal mehrere Hundert Tonnen Treibstoff verbrennen. Dass sich diese Energiemengen nicht in Batterien speichern lassen, liegt auf der Hand. Es bleiben also nur chemische Energieträger – Wasserstoff, Ammoniak, Methan, Propan, Butan, Methanol, Ethanol, Diesel, synthetisch oder biologisch erzeugt. Doch welcher davon soll es sein?

METHANOL

Die Richtung gab die dänische Reederei Maersk praktisch im Alleingang vor. 2023 nahm sie den weltweit ersten Methanol-Containerfrachter in Betrieb: die Laura Maersk, mit etwas über 2000 Containern ein eher kleines Schiff. Kurz darauf folgte mit der Ane Maersk das zweite Schiff, diesmal für 16 000 Container. Zwei Dutzend weitere Frachter hat Maersk bereits geordert.

Der Alkohol Methanol hat gegenüber LNG einen entscheidenden Vorteil: Er ist bei Raumtemperatur flüssig statt gasförmig. Das bedeutet, er kann in normalen Tanks gebunkert werden. Entsprechend niedrig ist der Aufwand, ein Schiff umzurüsten.

Methanol ist ein wichtiger Grundstoff für die chemische Industrie und wird schon lange in großem Maßstab produziert und verschifft. Es dient unter anderem der Herstellung von Klebstoff,



MAN-Teststand für Schiffsmotoren in Kopenhagen. Zu sehen sind hier die Zylinderköpfe, die für eine Umrüstung auf Ammoniak komplett ausgetauscht werden müssen. Die Kurbelwelle befindet sich zwei Stockwerke tiefer.



Die Laura Maersk war das erste kommerzielle Containerschiff mit Methanol-Antrieb.

Schaumstoff oder als Lösungsmittel. Für Menschen ist Methanol zwar giftig, für Meeresorganismen aber kaum. „Nach Bewertung des gesamten Risikos scheint es der am wenigsten gefährliche Treibstoff zu sein, selbst im Vergleich zu heutigen konventionellen Treibstoffen“, urteilt das Öko-Institut (heise.de/s/AXX5K).

Der ideale Schiffstreibstoff also – sollte man meinen. Das Problem ist aber: Methanol wird heute praktisch ausschließlich aus fossilen Rohstoffen produziert. Dem Klima ist damit nicht geholfen. Es lässt sich zwar auch aus Biomasse herstel-

len, allerdings nicht im nötigen Maßstab: Die erforderlichen Ackerflächen sind begrenzt, und die Umweltbilanz des Biosprits ist umstritten (siehe TR 6/2022, S. 60).

Um Methanol klimaneutral zu synthetisieren, sind zwei Zutaten nötig: erstens grüner Wasserstoff, zweitens Kohlenmonoxid. Egal, ob man das dazu nötige Kohlendioxid direkt aus der Luft gewinnt, aus Biogas-Fermentern oder Fabrikschlotten: Die Abscheidung und Reduktion zu Kohlenmonoxid sind teuer und energiehungrig (siehe TR 2/2024, S. 34). „Wenn wir als Gesellschaft in Abscheidung von atmosphärischem CO₂ inves-

„Wenn alle unsere Schiffe mit E-Methanol fahren würden, bräuchten wir fünf bis sechs Prozent der derzeitigen Wind- und Solarkapazität weltweit.“

tieren, dann sollten wir diesen Kohlenstoff auch binden und nicht einfach am nächsten Tag verbrennen und wieder in die Atmosphäre freisetzen“, argumentiert Trevor Brown, Executive Director der Ammonia Energy Association. Und wenn man nicht in die Abscheidung von CO₂ aus der Atmosphäre investiere, gebe es auch „keine skalierbare Netto-Null-Zukunft für Kohlenwasserstoffe“.

AMMONIAK

Deshalb hat die Branche nun einen weiteren Treibstoff ins Visier genommen: Ammoniak (NH₃). Wie Methanol wird Ammoniak bereits seit Jahrzehnten industriell im Millionen-Tonnen-Maßstab hergestellt – vor allem für die Produktion von Kunstdünger. Zwar ist der Ausgangsstoff dafür wie bei Methanol fast ausschließlich „grauer“ Wasserstoff, also mit fossilen Mitteln hergestellter. Der entscheidende Vorteil von Ammoniak ist jedoch: Es enthält neben Wasserstoff keinen Kohlenstoff, sondern Stickstoff, und der kann relativ einfach aus der Luft gewonnen werden. Da die aufwendige Kohlenstoffgewinnung wegfällt, ist die Herstellung effizienter und preiswerter. „Aus Analysen für 2050 geht hervor, dass die Gesamtkosten von Ammoniak in vielen Fällen unter denen von E-Fuels, Methanol sowie Flüssigmethan und -wasserstoff liegen“, heißt es in einer Studie des Fraunhofer-Instituts für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (heise.de/s/zKKxD). Der weltweit günstigste Standort für die Produktion von grünem Am-

moniak ist demnach Chile mit 67 Euro pro Megawattstunde. Bezieht man noch die Kosten für den Transport hinzu, liegt Kanada vorne.

Als Schiffsantrieb bringt Ammoniak allerdings auch einen Haufen Nachteile mit sich. Es ist ein stechend riechendes Gas und es ist hochgiftig. Also muss die Besatzung durch doppelwandige Behälter und Rohre geschützt werden. Eine weitere Herausforderung: Entweicht unverbranntes Ammoniak in die Atmosphäre, entsteht Lachgas daraus, ein 300-mal stärkeres Treibhausgas als Kohlendioxid. Solche Emissionen zu verhindern, ist Job der Ingenieure im Kopenhagener MAN-Forschungszentrum. Hier arbeiten sie daran, die Verbrennung von Ammoniak in den gewaltigen Zylindern ihrer Testmaschine zu optimieren, um die goldene Mitte zwischen Verbrauch, Leistung und Sauberkeit zu treffen. Die erste Hürde besteht bereits darin, das Ammoniak überhaupt zu entzünden. Es entflammt erst bei 650 Grad. Herkömmliche Treibstoffe zünden bei 200 bis 300 Grad. Für die erforderlichen Temperaturen muss die Verdichtung auf 35:1 erhöht werden. Dafür wird der gesamte Zylinderkopf ausgetauscht, im Einzelfall auch weitere Teile des Motors.

Die entscheidenden Bauteile sind aber die Einspritzdüsen (Atomizer). Diese sind etwa so groß wie eine große Wasserflasche und haben viele kleine Düsen an den Seiten, durch die das Ammoniak mit einem Druck von 600 bis 700 bar einströmen und sich im Brennraum verteilen kann. Die Geometrie dieser Düsen

ist wesentlich dafür verantwortlich, wie schnell und rückstandslos das Gas verbrennt. „Simulieren lässt sich das bisher nicht“, erzählt einer der Ingenieure, die sich im Kontrollraum über die zahlreichen Kurven auf den zahlreichen Bildschirmen beugen. „Das ist im Wesentlichen Trial and Error.“

Den ersten erfolgreichen Probeauf mit Ammoniak meldete MAN im Juli 2023. Beim Besuch Mitte Februar testeten sie in Kopenhagen gerade den zehnten Atomizer. Der Einbau einer neuen Variante dauert rund einen Tag, der Testlauf einen weiteren. Doch trotz allen Feintunings: Damit das Ammoniak zündet, braucht es für jede Zündung noch eine kleine „Pilotinjektion“ aus einem herkömmlichen Treibstoff. Die ersten Tests begannen mit einer Beimischung von 10 bis 15 Prozent. Das Entwicklungsziel ist 5 Prozent. Viertaktmotoren, wie sie vor allem bei kleineren Frachtern, Fähren und Passagierschiffen eingesetzt werden, kommen ganz ohne Pilotinjektion aus.

Neben dem Motor befindet sich ein Gewirr aus glänzenden Rohren, die in Behältern münden, groß wie die Futterilos auf einem Bauernhof. „Das ist die Abgasnachbehandlung“, erklärt Rasmussen. Sie funktioniert nach demselben Prinzip wie bei anderen modernen Dieselmotoren und hat vor allem die Stickoxide im Visier. Bei Ammoniak als Treibstoff muss sie aber deutlich größer ausfallen. „Wir empfehlen unseren Kunden, etwa doppelt so viel Volumen dafür einzuplanen“, sagt Klaus Rasmussen.

Alternative Treibstoffe weltweit



Noch dominiert LNG unter den alternativen Antrieben. Bei den Bestellungen holt Methanol aber auf. Betrachtet man nicht die Stückzahl, sondern die Tonnage, ist die Dominanz noch stärker. Mehr als die Hälfte der Tonnage wird mit alternativen Antrieben geordert.

Auch die Tanks brauchen mehr Platz. Das liegt zum einen daran, dass sowohl Methanol als auch Ammoniak eine niedrigere Energiedichte haben als etwa Schweröl. Bei Ammoniak kommt aber noch ein weiterer Faktor hinzu: Um es gekühlt und / oder komprimiert zu lagern, braucht es zylindrische Tanks, die sich nicht – wie bei einem Flüssigtreibstoff – platzsparend in Nischen einbauen lassen, die für Fracht ohnehin nicht genutzt werden können. Insgesamt beanspruchen Ammoniaktanks deshalb knapp dreieinhalbmal so viel Raum wie herkömmliche Ölbunker. Bei Methanol sind es nur knapp zweieinhalbmal so viel. In beiden Fällen geht also entweder Laderaum verloren oder Reichweite. Lohnt sich eine Nachrüstung mit Methanol oder Ammoniak dann überhaupt noch?

Als Antwort zeigt Rasmussen eine trichterförmige Grafik: Oben steht die Zahl der insgesamt im Betrieb befindlichen Schiffszweitakter von MAN (23 000 Stück). Davon kommen nur elektronisch gesteuerte Maschinen für eine Umrüstung infrage. Und davon wiederum nur Fahrzeuge, deren Neubau mehr als 35 bis 50 Millionen Euro kosten würde. Übrig bleiben rund 1900 Schiffe, bei denen eine Umrüstung technisch und wirtschaftlich sinnvoll wäre. Aber selbst dieser kleine Bruchteil der gesamten Flotte könnte laut MAN jährlich immerhin 80 Millionen Tonnen CO₂ einsparen. Das entspricht dem Ausstoß von 40 Millionen Autos – fast so viel, wie in ganz Deutschland zugelassen sind.

INFRASTRUKTUR

Bleibt die Frage, woher der Treibstoff kommen soll. Die gesamte Schifffahrt würde nach Einschätzung der Klassifizierungsgesellschaft DNV 30 bis 40 Prozent aller klimaneutralen Treibstoffe weltweit benötigen, um allein ihre Klimaziele für 2030 zu erreichen (heise.de/s/eeeelx). Diverse Bemühungen zur Senkung des Verbrauchs sind darin bereits eingerechnet. „Wir haben 740 Schiffe“, verdeutlicht Maersk-Vizepräsident Morten Bo Christiansen die Dimensionen auf einem TED-Talk (heise.de/s/000wb). „Wenn die alle mit E-Methanol fahren würden, bräuchten wir fünf bis sechs Prozent der derzeitigen Wind- und Solarkapazität weltweit.“ Diese Grö-

ßenordnung sei „mindblowing“, sagte er, „aber das ist nur ein Grund mehr, nun damit anzufangen.“

Maersk hat bereits zahlreiche Lieferverträge für Methanol aus Biogas, Gülle und Windstrom geschlossen, mit Herstellern in den Niederlanden, Schweden und China. Um den Lieferanten ausreichend Investitionssicherheit zu geben, habe man langfristige Garantien gegeben. „Dadurch senken wir das unternehmerische Risiko für die Produzenten“, sagt Christiansen.

Wegen der effizienteren Herstellung dürfte Ammoniak etwas besser wegkommen. Doch sowohl synthetisches Methanol als auch Ammoniak benötigen grünen Wasserstoff, für den es nicht nur große Mengen an Wind- und Solarstrom braucht, sondern auch viele Elektrolyseure, deren Produktion ein weltweiter Flaschenhals ist (siehe TR 2/2024, S. 34).

Wie realistisch ist es also, diesen gigantischen Bedarf bedienen zu können? Um das abzuschätzen, hat die DNV eine Datenbank mit allen Produktionsanlagen für klimaneutralen Treibstoff erstellt. 2200 Projekte sind darin verzeichnet. „Allerdings sind die meisten dieser Projekte noch nicht gestartet oder haben noch nicht einmal eine Investitionszusage bekommen“, heißt es im DNV-Paper. Für ein Wasserstoffprojekt über ein Gigawatt dauere die Vorlaufzeit sechs bis zehn Jahre, schätzt die DNV. Das bedeutet: Was jetzt noch nicht angekündigt ist, wird 2030 auch nicht in Betrieb sein.

Für die Schifffahrt würde der gesamte absehbare Output zwar reichen, so die DNV. Allerdings sind Luftfahrt, chemische Industrie und Düngerhersteller an den gleichen Ressourcen interessiert. Zudem ist Ammoniak ein guter Wasserstoffträger (siehe TR 7/22, S. 78). Es hat eine weitaus höhere Energiedichte als verflüssigter Wasserstoff und lässt sich einfacher verschiffen. MAN entwickelt deshalb auch keine eigenen Wasserstoffmotoren, nicht einmal für potenzielle Wasserstofffrachter. „Wir glauben, dass Wasserstoff als Ammoniak transportiert werden wird“, sagt Rasmussen.

Diese enge Verzahnung zwischen Treibstoff, Rohstoff und Energieträger ist ein zweiseitiges Schwert. Einerseits entsteht dadurch ein wachsender Markt mit etablierter In-

frastruktur. Weltweit gibt es bereits rund 210 Ammoniak- und 130 Methanol-Terminals in den Häfen, hat die DNV ermittelt. Auch die geplanten deutschen LNG-Terminals an Nord- und Ostsee sollen schon für Ammoniak vorbereitet werden. Aber diese vielfältigen Einsatzmöglichkeiten bedeuten auch, dass die Branchen sich möglicherweise gegenseitig die Ressourcen streitig machen.

SHOWDOWN

Angesichts all dieser Unsicherheiten hätten viele in der Branche Angst, auf das falsche Pferd zu setzen, sagt Maersk-Vizepräsident Christiansen. „In einer idealen Welt würden wir erst einmal zehn Jahre lang Versuche machen, um herauszufinden, was das Beste ist. Aber wir müssen jetzt anfangen. Der Grund, warum wir uns für Methanol entschieden haben: Es funktioniert, und es funktioniert jetzt.“

Erst 2026 will MAN die erste Ammoniakmaschine auf den Markt bringen. Eine genaue Zahl potenzieller Kunden will Rasmussen nicht nennen. Nur so viel: „Es gibt eine Handvoll Projekte.“ Der Schweizer Konkurrent WinGD arbeitet ebenfalls an einem Ammoniakmotor. Die ersten beiden Maschinen sollen ab 2026 Tanker der belgischen Reederei Exmar antreiben. Ein Massengutfrachter soll folgen. Und auch der finnische Motorenbauer Wärtsilä hat einen Ammoniak-Viertakter angekündigt. MAN will sich bei den Viertaktern eher auf Methanol konzentrieren.

Ammoniak könnte also schnell aufholen. MAN erwartet, dass 2030 etwa 40 Prozent der geordneten Leistung bei

den Zweitaktmotoren auf Ammoniak entfallen werden, gefolgt von Methanol (35 Prozent) und LNG (23 Prozent).

Das zeigt: Ein „The-Winner-takes-it-all“-Szenario, bei dem ein Treibstoff irgendwann so dominant sein wird wie heute das Schweröl, ist nicht in Sicht. „Es wird auf jeden Fall Parallelstrukturen geben, je nach Schiffstyp und Region“, meint Professor Hendrik Dankowski vom Institut für Schiffbau und Maritime Technik der FH Kiel. Für Passagierschiffe beispielsweise kommt Ammoniak wegen der Gesundheitsrisiken wohl eher nicht infrage.

Damit die Sache in Bewegung kommt, sei aber auch eine flankierende Regulierung nötig, wie alle Beteiligten betonen. Klaus Rasmussen von MAN wünscht sich beispielsweise eine einfachere Zulassung von alternativen Antrieben. Die Reederei Maersk fordert eine CO₂-Steuer von 150 Dollar pro Tonne. Und Umweltschützer machen auf die problematische Rolle von Ammoniak-Emissionen aufmerksam, die genauso wie CO₂ reguliert werden müssen – und zwar entlang der gesamten Herstellungskette von der Quelle bis zur Welle (well-to-wake).

Wie auch immer der zukünftige Treibstoffmix aussehen wird – die Transformation setzt auf jeden Fall massive Investitionen voraus. „E-Methanol ist zwei- bis dreimal so teuer wie fossiler Treibstoff“, sagte Maersk-Mann Christiansen im TED-Talk. „Wir haben letztes Jahr acht Milliarden Dollar für Treibstoff ausgegeben. Wenn wir das nun verdoppeln oder verdreifachen, ist das ein ziemlich gruseliger Ausblick.“

Wer soll das bezahlen? „Am Ende wir Konsumenten, weil es ja letztendlich unser Konsum ist, der die Emissionen verursacht“, meint Christiansen. Die Zahlungsbereitschaft dafür sei durchaus vorhanden, meint auch MAN-Mann Rasmussen. „Vor allem bei Händlern von Konsumgütern, weil die Endkunden das so wollen.“ Tatsächlich haben laut Handelsblatt rund die Hälfte der großen Auftraggeber von Maersk – darunter Amazon, Disney, H&M und Microsoft – Klimaziele formuliert, die auch ihre Lieferkette umfassen.

„Methanol scheint der am wenigsten gefährliche Treibstoff zu sein, selbst im Vergleich zu konventionellen Treibstoffen.“

Das Interessante sei aber, so Christiansen: Auf dem Weg durch die Wertschöpfungskette „verwässere“ sich der Preisaufschlag. „Wenn man den Spritpreis verdoppelt, klingt das erst einmal dramatisch. Die Frachtkosten steigen dadurch aber nur um 10 bis 15 Prozent. Und für ein Paar Schuhe bleiben davon dann vielleicht noch fünf Cent übrig.“

TREIBSTOFFE IM VERGLEICH

	Methanol	Ammoniak	LNG
Chemische Formel	CH ₃ OH	NH ₃	CH ₄
Energiedichte (flüssig)	14,9MJ/l	12,7MJ/l	21,2 MJ/l
Lagerung	Raumtemp. / 1 bar	-33 °C/ 1 bar ; Raumtemp. / 10 bar	-162 °C/ 1 bar
Umrüstaufwand	niedrig	groß	groß
Tankvolumen (im Vergleich zu Diesel)	x 2,4	x 2,8 (gekühlt) x 3,4 (unter Druck)	x 1,7 (gekühlt)
Toxizität	mittel	hoch	niedrig
Wirkungsgrad synthetische Herstellung	41 – 45 % (langfristig bis 56 %)	52 % (langfristig bis 60 %)	–
Schiffe auf See / geordert*	27 / 151	0 / k. A.	1079 / 829
Produktion weltweit (2022)	ca. 111 Mio t	ca. 240 Mio t	ca. 478 Mio t ●

Starker Abgang

Vor 40 Jahren wurde der Fusionsreaktor JET eingeweiht. Jetzt wird er abgebaut, doch kurz vor dem Ende lieferte er noch einmal Rekordergebnisse. – Wolfgang Stielner

Im April 2024 wäre das Zentrum für Fusionsforschung im britischen Culham 40 Jahre alt geworden. Wenn es nicht Ende 2023 in Folge des Brexits geschlossen worden wäre. Aber Physiker, die sich damit beschäftigen, die Energiequelle der Sonne auf der Erde nachzubilden, lassen sich bekanntlich nicht so schnell unterkriegen: Sie verlegten das Jubiläum einfach ein Jahr nach vorne und feierten es bereits 2023. Technisch betrachtet war das durchaus korrekt. Denn die erste Plasma-Fusion in dem Fusionsreaktor wurde tatsächlich bereits im Juni 1983 gezündet; nur die offizielle Einweihung des Joint European Torus (JET) durch die Queen musste bis zum April 1984 warten.

Die Idee, aus der Verschmelzung von Atomkernen Energie zu gewinnen und damit ein Kraftwerk zu betreiben, ist ein Kind der technikoptimistischen 1950er-Jahre. Auf der theoretischen Ebene war bereits damals klar, dass man dafür ein enorm heißes Plasma herstellen müsste, das unter einem gigantischen Druck steht, damit es nicht gleich wieder auseinanderfliegt. Aber wie sollte man das bewerkstelligen?

Die sowjetischen Physiker Andrei Sacharow und Igor Tamm hatten darauf eine einfache, robuste Antwort gefunden: In ihrem „Tokamak“ genannten ringförmigen Reaktor erzeugt ein Stromfluss im heißen Plasma ein Magnetfeld, das hilft, das Plasma einzuschließen. Im sowjetischen Tokamak T3 gelang es den Forschern im Jahr 1968, mit zehn Millionen Grad über 10 Millisekunden einen Temperaturrekord aufzustellen. Dieses Reaktor-Design wurde danach auch im Westen zur Grundlage fast aller nachfolgenden Fusionsexperimente.

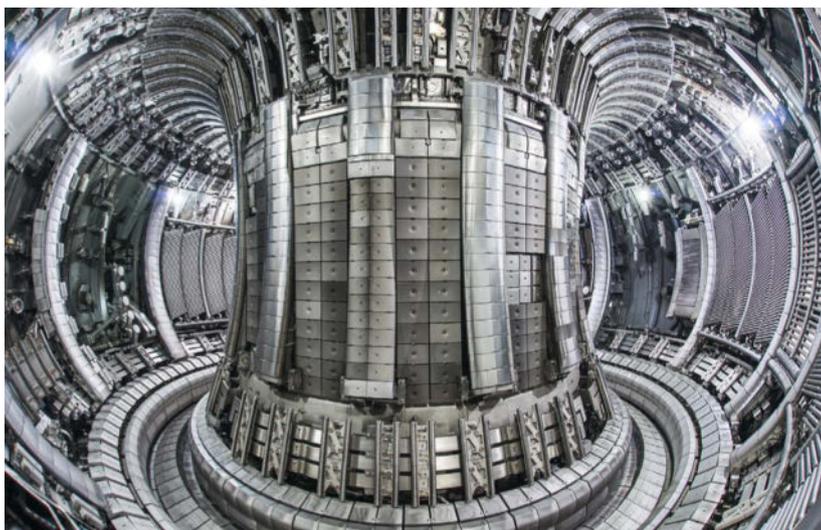
Nach ersten Erfolgen stellte sich schnell heraus, dass heißes Plasma ziemlich instabil ist – was die Fusionsreaktion in der Regel beendet. Um die Proble-

me in den Griff zu bekommen, musste ein größerer Reaktor her. 1973, in dem Jahr, in dem Großbritannien der Europäischen Gemeinschaft beitrug, beschloss Euratom, solch eine Versuchsanlage zu bauen – im britischen Culham. 1979 wurde der Grundstein gelegt. 1983 zündete das erste Experiment mit Wasserstoff.

Der JET war die weltweit größte Anlage ihrer Art, mit einem Durchmesser von 12 Metern, 15 Meter Höhe und einem Volumen von 200 Kubikmetern. Nach zahllosen Versuchen mit Wasserstoffplasmen zündeten die Forschenden 1991 im JET erstmals erfolgreich eine Fusionsreaktion mit den schweren Wasserstoffisotopen Deuterium und Tritium. Dabei setzten sie eine Energie von 3,4 Megajoule frei. Danach rüsteten sie den Reaktor um. 1997 gelang es den Forschenden in Culham erneut, eine Fusion mit Deuterium und Tritium zu zünden – diesmal

über vier Sekunden hinweg mit einer Energieausbeute von knappen 22 Megajoule. Das war zwar noch viel weniger Energie, als sie in die Fusion hineingesteckt hatten, aber sie hatten damit gezeigt, dass die Idee im Prinzip funktioniert.

Die Rekordmarke hielt bis 2021. Zu diesem Zeitpunkt war die Zukunft der Anlage schon äußerst ungewiss, denn die Briten hatten die EU verlassen und die Verhandlungen über weitere Forschungs Kooperationen stockten. Wie zum Trotz übertrumpften die Forschenden in der Endphase noch einmal ihre eigenen Rekorde: im Dezember 2021 mit 59 Megajoule und im Oktober 2023 mit 69 Megajoule Fusionsenergie. Da war das Ende von JET schon beschlossene Sache. Der Reaktor wird jetzt abgebaut. In Culham forschen die Briten alleine weiter – an einem kleineren Reaktor mit verbessertem Design. ●

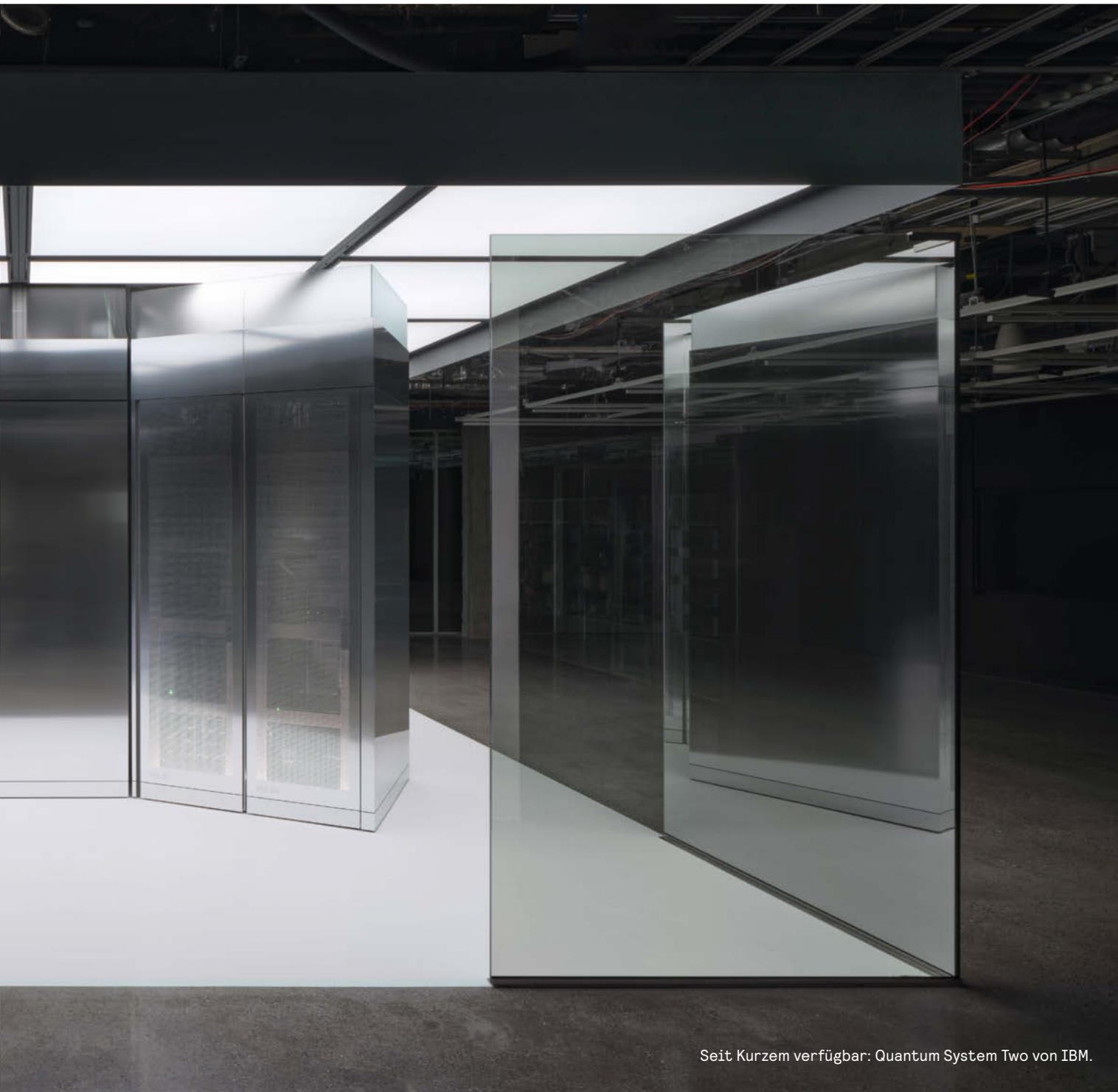


Blick in das Innere des JET-Fusionsreaktors. Hier wurde 1991 die erste kontrollierte Fusionsreaktion gezündet.



Klare Quanten

Entwickler von Quantencomputern hatten sich schon fast damit abgefunden, dass sie mit verrauschten, fehleranfälligen Systemen arbeiten müssen. Aber es scheint Wege aus dem Datennebel zu geben. – Michael Brooks (Übersetzung: Wolfgang Stießer)



Seit Kurzem verfügbar: Quantum System Two von IBM.

Foto: Aleko Syntelis / IBM

In den letzten 20 Jahren haben Hunderte von Unternehmen, darunter Giganten wie Google, Microsoft und IBM, ihre Claims um das Quantencomputing abgesteckt. Insgesamt haben Investoren bisher weit über fünf Milliarden Dollar in die Technologie gesteckt, um das nächste große Ding zu entwickeln.

Denn Quantencomputer nutzen Regeln, die für Materie auf atomarer und subatomarer Ebene gelten. Damit verarbeiten sie Informationen auf eine Weise, die mit herkömmlichen Computern unmöglich ist. Experten vermuten, dass diese

Technologie in so unterschiedlichen Bereichen wie der Arzneimittelforschung, der Kryptografie, dem Finanzwesen und der Lieferkettenlogistik zum Einsatz kommen wird. Die Verheißungen sind groß, der Hype ist es auch.

Letztlich hängen die Fortschritte beim Bau nützlicher Quantencomputer jedoch von einem zentralen Faktor ab: ob es gelingt, mit dem Rauschen umzugehen. Die empfindliche Natur von Quantensystemen macht sie extrem anfällig für die kleinste Störung – sei es durch Wärme, ein zufälliges Signal aus der um-

gebenden Elektronik oder eine physikalische Vibration. Dieses Rauschen richtet großen Schaden an, es erzeugt Fehler oder bringt sogar eine Quantenberechnung zum Erliegen. Es spielt keine Rolle, wie groß der Prozessor ist oder für welche Anwendungen er genutzt wird: Solange das Rauschen nicht gebändigt werden kann, wird ein Quantencomputer niemals die Leistung eines klassischen Computers übertreffen.

Viele Jahre lang dachten die Forschenden, dass sie sich – zumindest kurzfristig – mit verrauschten Schaltkreisen

„Ein Quantencomputer muss nicht besser sein als ein herkömmlicher Rechner. Es reicht, wenn er eine vergleichbare Leistung hat, aber weniger Energie verbraucht und billiger zu betreiben ist.“

begnügen müssten. Einige suchten nach sinnvollen Anwendungen innerhalb dieser eingeschränkten Möglichkeiten. Ihre Suche war nicht besonders erfolgreich. Aber das spielt jetzt vielleicht keine Rolle mehr, denn in den letzten Jahren lassen theoretische und experimentelle Durchbrüche hoffen, dass das Rauschproblem endlich in den Griff zu bekommen ist. Eine Kombination aus Hardware- und Softwarestrategien, um Quantenfehler zu unterdrücken, abzuschwächen und zu bereinigen, scheint vielversprechend. Der Ansatz ist nicht besonders elegant, aber „ich sehe immer mehr Beweise, die für Optimismus sprechen“, sagt Earl Campbell, Vizepräsident für Quantenwissenschaften bei Riverlane, einem Quantencomputer-Unternehmen mit Sitz in Cambridge, Großbritannien.

Sogar hartgesottene Skeptiker lassen sich überzeugen. Sabrina Maniscalco von der Universität Helsinki erforscht beispielsweise die Auswirkungen von Rauschen auf Berechnungen. Vor einem Jahrzehnt, sagt sie, hatte sie das Quantencomputing abgeschrieben. „Ich fand, es gäbe wirklich grundlegende Probleme und keine Gewissheit, dass es einen Ausweg geben würde“, sagt sie. Inzwischen entwickelt sie mit Quantensystemen verbesserte Versionen von lichtaktivierten Krebsmedikamenten. Die sollen in niedrigeren Konzentrationen wirken und durch Licht mit unschädlichen Wellenlängen aktiviert werden können. Sie glaubt, dass das Projekt nur noch zweieinhalb Jahre vom Durchbruch entfernt ist. „Ich bin eigentlich recht zuversichtlich, dass wir sehr bald in die Ära der Quanten-Utility eintreten werden“, sagt Maniscalco. Diese Quanten-Utility, der Quanten-Nutzen, ist an dem Punkt

erreicht, an dem es für bestimmte Aufgaben sinnvoller ist, einen Quanten- als einen klassischen Prozessor zu verwenden.

QUBITS IN DER CLOUD

Dieser bahnbrechende Moment käme dann nach mehr als einem Jahrzehnt der Enttäuschung. In den späten 2000er- und frühen 2010er-Jahren mussten die Entwicklerinnen und Entwickler, die reale Quantencomputer bauten und betrieben, feststellen, dass diese weitaus problematischer waren, als in der Theorie erhofft. Für einige schienen diese Probleme unüberwindbar zu sein. Andere, wie Jay Gambetta, ließen sich nicht beirren. Der ruhige australische Physiker Gambetta begann im Juli 2004, an der Yale University über die Quanteneigenschaften von Licht zu forschen. Drei Jahre später zog Gambetta weiter nach Norden, an die Universität von Waterloo in Ontario, Kanada, und erfuhr dort, dass IBM sich intensiver mit Quantencomputern befassen wollte. Im Jahr 2011 wurde Gambetta einer der neuen Mitarbeiter des Unternehmens.

Damals waren die IBM-Ingenieure damit beschäftigt, Quantenversionen binärer Ziffern, der Bits, herzustellen. In klassischen Computern hat die kleinste Informationseinheit zwei Zustände, 0 und 1, wie ein Schalter, der offen oder geschlossen ist. In Quantencomputern sind die Dinge weniger schwarz und weiß. Wenn es vom Rauschen isoliert wird, kann ein Quantenbit oder Qubit, wie es genannt wird, in jeder möglichen Kombination dieser beiden Zustände existieren, so wie eine geworfene Münze mitten im Flug. Diese Eigenschaft der

Qubits und ihr Potenzial, mit anderen Qubits „verschränkt“ zu werden, ist der Schlüssel zu den revolutionären Möglichkeiten der Quanteninformatik.

Ein Jahr nach seinem Eintritt in das Unternehmen entdeckte Gambetta ein Problem mit den Qubits von IBM: Jeder konnte sehen, dass sie ziemlich gut wurden. Wann immer er seine Physikerkollegen auf Konferenzen traf, baten sie ihn, ihre neuesten Ideen an IBMs Qubits zu testen. Nach ein paar Jahren wurde Gambetta von der Menge der Anfragen überfordert. „Ich fing an zu denken, dass das verrückt ist – warum sollten wir nur Experimente für Physiker durchführen?“, erzählt er.

Ihm kam der Gedanke, dass sein Leben einfacher sein könnte, wenn er einen Weg finden würde, den Physikern die Qubits von IBM zugänglich zu machen – vielleicht über Cloud Computing. Er erzählte seinem Chef davon – und hatte dann fünf Minuten Zeit, um die Idee den Führungskräften von IBM auf einer Versammlung Ende 2014 vorzustellen. Die einzige Frage, die gestellt wurde, war, ob Gambetta sich sicher sei, dass er es durchziehen könne. „Ich sagte ja“, erinnert er sich – und dachte: „Wie schwer kann das schon sein?“

Wie sich herausstellte: Sehr schwer, denn die IBM-Führungsriege gab Gambetta gerade einmal ein Jahr Zeit dafür. Eine gewaltige Herausforderung, zumal er damals kaum wusste, was die Cloud überhaupt ist. Glücklicherweise wussten einige seiner Kollegen Bescheid. So konnten sie die Fernzugriffsprotokolle des Teams – die nützlich waren, um die Maschine abends oder am Wochenende zu optimieren – aufrüsten, um eine Reihe von weltweit zugänglichen

Schnittstellen zu schaffen. Der erste Quantencomputer mit Cloud-Zugriff arbeitet mit fünf Qubits und ging am 4. Mai 2016 um Mitternacht in Betrieb. Das Datum, der Star Wars Day, wurde von Nerds für Nerds gewählt. „Ich glaube nicht, dass irgendjemand in der oberen Führungsebene davon wusste“, sagt Gambetta und lacht. Nicht, dass die Reaktion der IBM-Führung auf das Datum der Markteinführung für ihn im Vordergrund gestanden hätte. Viel mehr bereitete ihm die Frage Sorgen, ob ein System, in dem jahrelange Entwicklungsarbeit hinter den Kulissen steckte, den Anschluss an die reale Welt überleben würde. „Wir sahen zu, wie die ersten Aufträge hereinkamen. Wir konnten sehen, wie sie auf dem Quantencomputer anschlugen“, sagt er. „Als er nicht zusammenbrach, begannen wir uns zu entspannen.“

Das cloudbasierte Quantencomputing war augenblicklich ein Erfolg. In der ersten Woche meldeten sich 7000 Personen an, und am Ende des Monats waren es bereits 22000 registrierte Nutzer. Deren Projekte machten jedoch deutlich, dass das Quantencomputing ein großes Problem hat: Diese Tests mit nur wenigen zusammengeschalteten Qubits zeigten, dass viele der theoretischen Annahmen über das Rauschen, das sie erzeugen, völlig falsch waren. Das Ziel ist es jedoch, Quantenrechner zu erreichen, in denen Hunderttausende, wenn nicht gar Millionen von Qubits zusammenarbeiten.

Ein gewisses Maß an Rauschen war immer zu erwarten. Zwar arbeiten die Qubits bei Temperaturen knapp über dem absoluten Nullpunkt. Aber auch dort gibt es Wärmestrahlung. Daher rechnete jeder mit einigen zufälligen Stößen auf die Qubits. Aber es gab auch andere Störungen. Temperaturschwankungen in der Steuerelektronik verursachten Rauschen. Das Anlegen von Energieimpulsen, um die Qubits in den richtigen Zustand zu versetzen, verursachte Rauschen. Und das Schlimmste war, dass das Senden eines Steuersignals an ein Qubit Rauschen in anderen, nahe gelegenen Qubits erzeugte. „Man manipuliert ein Qubit und ein anderes dort drüben spürt es“, sagt Michael Biercuk, Direktor des Quantum Control Laboratory an der Universität Sydney in Australien.

Als dann die ersten Quantenalgorithmen auf einem Dutzend Qubits liefen, war die Leistung schockierend schlecht. 2022 berechneten Biercuk und



Sabrina Maniscalco von der Universität Helsinki nutzt Quantencomputer für die Suche nach Medikamenten.



Jay Gambetta hat IBMs Quantencomputer in die Cloud gebracht.



Michael Biercuk von der Universität Sydney hat berechnet, wie zuverlässig die ersten Cloud-Quantenrechner sind.

andere die Wahrscheinlichkeit, dass ein Algorithmus erfolgreich abläuft, bevor Rauschen die in den Qubits gespeicherte Information zerstört oder die Berechnung aus dem Ruder laufen lässt. Würde ein Algorithmus mit einer bekannten richtigen Antwort 30000 Mal ausgeführt, käme die richtige Antwort nur dreimal zurück.

Obwohl das Ergebnis enttäuschend schien, war es auch lehrreich. „Die Leute lernten eine Menge über diese Maschinen, indem sie sie tatsächlich benutzten“, sagt Biercuk. „Wir fanden eine Menge, von dem mehr oder weniger niemand wusste – oder sie wussten es und hatten keine Ahnung, was sie damit anfangen sollten.“

BEHEBUNG DER FEHLER

Nachdem die Forschenden sich von dieser schallenden Ohrfeige erholt hatten, begannen sie, sich zu sammeln. Und sie haben inzwischen eine Reihe von Lösungen gefunden, die gemeinsam das Rauschen unter Kontrolle bringen könnten. Grob gesagt, lassen sich die Lösungen in drei Kategorien einteilen: Die Basis ist die Fehlerunterdrückung. Sie funktioniert über klassische Software und maschinelle Lernalgorithmen, die das Verhalten der Schaltkreise und der Qubits kontinuierlich analysieren. Dann konfigurieren sie das Schaltungsdesign und die Art der Befehlsvergabe neu, damit die in den Qubits gespeicherten Informationen besser geschützt sind.

Dies ist einer der Punkte, an denen Biercuks Unternehmen Q-CTRL arbeitet; durch die Fehlerunterdrückung kann nach Angaben des Unternehmens die Wahrscheinlichkeit, dass Quantenalgorithmen eine korrekte Antwort liefern, um den Faktor 1000 erhöht werden. Die nächste Ebene, die Fehlerabschwächung, nutzt aus, dass nicht jeder Fehler eine Berechnung zum Scheitern bringt; viele von ihnen lenken sie lediglich aus der Bahn. Indem sie die Fehler untersuchen, die das Rauschen in einem bestimmten System mit einem bestimmten Algorithmus verursachen, können die Forscher eine Art „Anti-Rauschen“ auf den Quantenschaltkreis anwenden. Damit verringern sie die Wahrscheinlichkeit von Fehlern während der Berechnung und im Ergebnis.

Diese Technik, die der Rauschunterdrückung von Kopfhörern vergleichbar ist, ist keine perfekte Lösung. So

muss der Algorithmus beispielsweise mehrfach ausgeführt werden; das erhöht die Betriebskosten. Zudem schätzt der Algorithmus das Rauschen nur ab. Dennoch gelänge es so, die Fehler in der endgültigen Ausgabe zu reduzieren, sagt Gambetta. Das Unternehmen Algorithmiq aus Helsinki hat eine eigene Methode, um das Rauschen nach der Berechnung zu beseitigen. „Es beseitigt das Rauschen im Grunde genommen in der Nachbearbeitung, so als würde man das Chaos des Quantencomputers aufräumen“, sagt Sabrina Maniscalco, die neben ihrer Arbeit an der Universität auch Algorithmiqs CEO ist.

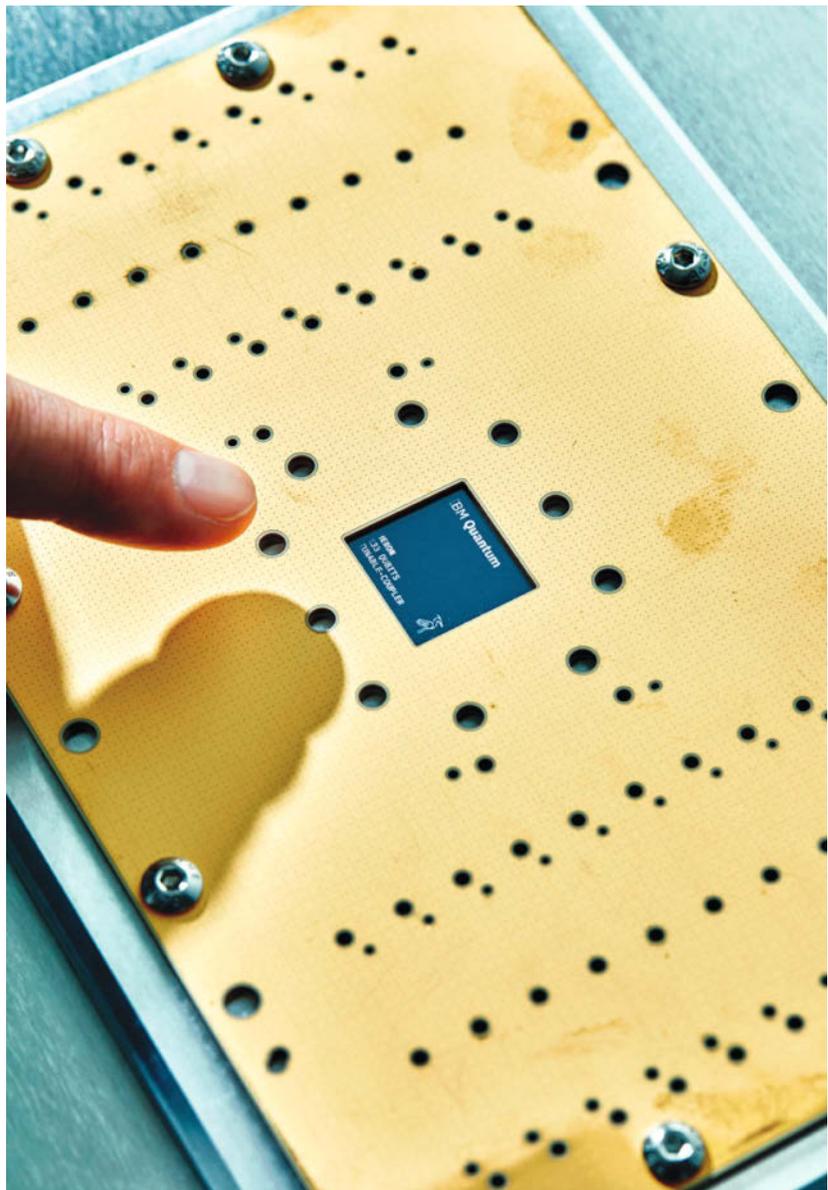
Darüber hinaus gibt es immer mehr Erfolge auf der dritten Ebene, der Quantenfehlerkorrektur (Quantum Error Correction, QEC). Anstatt die Informationen eines Qubits nur in einem Qubit zu speichern, werden sie bei der QEC in den Quantenzuständen einer ganzen Reihe von Qubits kodiert. Ein durch Rauschen verursachter Fehler in einem der Bits in der Reihe ist nicht so katastrophal wie in einem einzelnen Qubit: Durch die Überwachung jedes der zusätzlichen Qubits der Reihe ist es möglich, jede Abweichung zu erkennen und zu korrigieren, bevor die Information unbrauchbar wird.

Die Implementierung von QEC wird seit Langem als einer der wesentlichen Schritte auf dem Weg zu groß angelegten, rauschresistenten Quantencomputern gehandelt – zu Maschinen, die all die Versprechen der Technologie erfüllen können, wie etwa die Fähigkeit, gängige Verschlüsselungssysteme zu knacken. Das Problem ist, dass QEC eine Menge Overhead benötigt. Die als „Surface Code“ (Oberflächencode) bekannte Fehlerkorrektur-Architektur gilt dabei als eine Art Goldstandard. Sie erfordert jedoch mindestens 13 physische Qubits, um ein einziges nützliches „logisches“ Qubit zu schützen. Je mehr logische Qubits miteinander verbunden werden, desto größer wird diese Zahl: Ein praxistauglicher Prozessor könnte 1000 physische Qubits für jedes logische Qubit benötigen.

Allerdings gibt es inzwischen mehrere Gründe, sogar in dieser Hinsicht optimistisch zu sein. Im Juli 2022 veröffentlichte ein Google-Team beispielsweise eine Oberflächencode-Demo, bei der die Leistung nicht schlechter, sondern besser wurde, als mehr Qubits miteinander verbunden wurden (heise.de/s/0068).

„Ich sagte ja“, erinnert sich Jay Gambetta, „und dachte: Wie schwer kann das schon sein?“

Kleiner, aber feiner: Der Heron-Quantenchip von IBM verfügt über verbesserte Qubits, die sehr viel zuverlässiger arbeiten.





Nicht nur große Konzerne wie IBM und Google arbeiten an Quantencomputern. In Finnland entwickelt und produziert IQM eigene supraleitende Quantenschaltkreise.

Es gab auch vielversprechende Demonstrationen von theoretischen Alternativen zu Oberflächencodes. Im August 2023 zeigte ein IBM-Team, dem auch Gambetta angehörte, eine Fehlerkorrekturtechnik, mit der die Fehler in einem 12-Qubit-Speicherschaltkreis mit zusätzlichen 276 Qubits kontrolliert werden konnten (heise.de/s/VddMd) – eine große Verbesserung gegenüber den Tausenden von zusätzlichen Qubits, die für Oberflächencodes erforderlich sind. Und im September demonstrierten zwei andere Teams ähnliche Verbesserungen mit einer fehlertoleranten Schaltung, dem sogenannten CCZ-Gate, sowohl mit supraleitenden Qubits als auch mit Ionenfallen.

Auf kommerziell erhältlichen Quantenprozessoren findet noch keine Fehlerkorrektur statt (und ist im Allgemeinen nicht als Echtzeitprozess während der Berechnungen implementierbar). Biercuk ist jedoch der Ansicht, dass die Quanteninformatik nun endlich in Fahrt kommt. „Ich denke, wir sind auf dem richtigen Weg“, sagt er. „Ich sehe überhaupt keine grundlegenden Probleme mehr.“

Und diese Innovationen gehen einher mit allgemeinen Verbesserungen der Hardwareleistung: Es gibt immer weniger Grundfehler in den funktionie-

renden Qubits – und mehr Qubits pro Prozessor, wodurch größere und nützlichere Berechnungen möglich werden. Biercuk sagt, er beginne zu erkennen, wo er bald einen Quantencomputer den leistungsstärksten klassischen Maschinen vorziehen würde.

„Schauen Sie sich an, was Hochleistungsrechenzentren tagtäglich tun“, sagt Kuan Tan, CTO und Mitbegründer des in Finnland ansässigen Quantencomputer-Anbieters IQM. „Sie führen energieintensive wissenschaftliche Berechnungen durch, die ebenso mit Quantencomputern durchgeführt werden könnten, die viel weniger Strom verbrauchen.“ Ein Quantencomputer muss kein besserer Computer als jede andere Art von Maschine sein, um zahlende Kunden anzuziehen, sagt Tan. Er muss nur eine vergleichbare Leistung haben und billiger im Betrieb sein. Er geht davon aus, dass wir diesen „Quantenenergievorteil“ in den nächsten drei bis fünf Jahren erreichen werden.

NUTZEN FINDEN

Seit Langem wird darüber diskutiert, welches Ziel die Quanteninformatik anstreben sollte, um mit klassischen Computern konkurrieren zu können. Quanten-

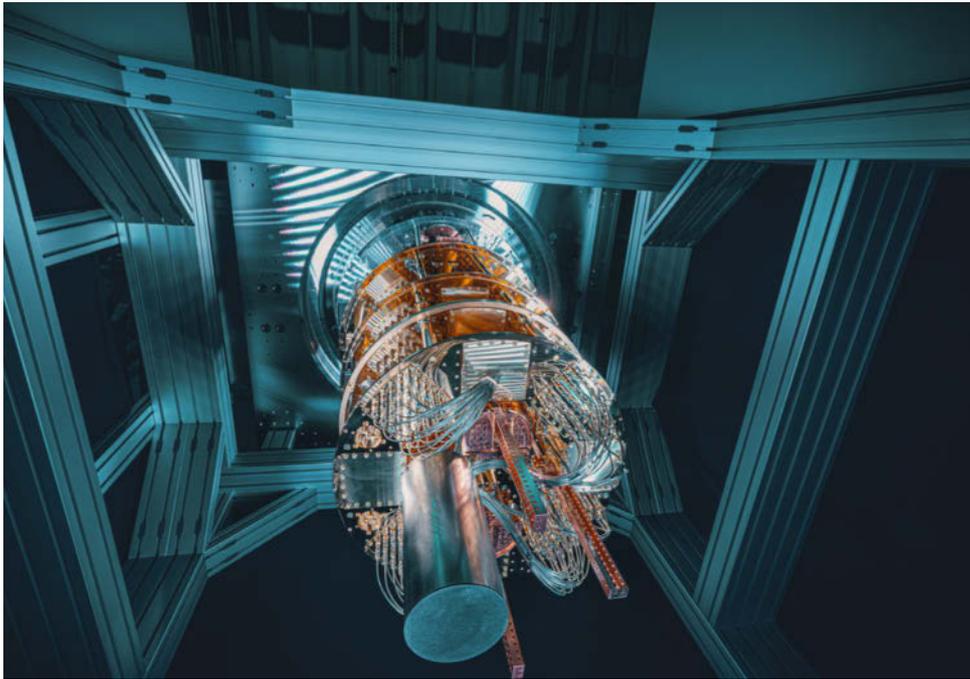
vorherrschaft, also der Nachweis, dass ein Quantencomputer ein Problem lösen kann, das kein klassischer Computer in einer angemessenen Zeitspanne lösen kann – das von Google verfolgte Ziel? Oder Quantenvorteil – überlegene Leistung bei einem nützlichen Problem, wie es IBM bevorzugt? Oder Quantennutzen, das neueste Modewort von IBM? Die Semantik spiegelt unterschiedliche Ansichten darüber wider, welche kurzfristigen Ziele wichtig sind.

Im Juni kündigte IBM an, seine Einstiegsprozessoren aus der Cloud zu nehmen. Dann wäre sein 127-Qubit-Eagle-Prozessor der kleinste Prozessor, den das Unternehmen zur Verfügung stellt. Viele bezweifeln allerdings, dass Eagle wirklich in der Lage ist, entsprechend vorbereitete klassische Maschinen zu übertreffen.

Im Dezember stellte IBM seinen bislang größten Quantenprozessor Condor mit 1121 Qubits vor. Der eigentliche Star dieser Veranstaltung war allerdings der Quantenchip Heron mit einer neuen verbesserten Architektur. Heron verfügt zwar nur über 133 Qubits, doch er soll bis zu fünfmal so leistungsfähig sein wie Eagle. Die Qubits seien nach Angaben des Unternehmens qualitativ sehr viel besser, sodass IBM plant, 2024 bis zu 5000 Qubit-Operationen hintereinander ausführen zu können, ohne dass es zu nennenswerten Problemen kommt. Dass die Quantenprozessoren von IBM sämtlich Vogelnamen tragen, liegt übrigens an Gambettas persönlichen Vorlieben: „Ich mag Vögel“, sagt er.

Heron hat ein modulares Design, das IBM schrittweise weiter ausbauen will. Flamingo soll 2025 auf den Markt kommen – mit vollständigen Quantenverbindungen zwischen den Chips, die einen ungehinderten Fluss der Quanteninformationen zwischen verschiedenen Prozessoren ermöglichen. Das würde wirklich groß angelegte Quantenberechnung erlauben. Damit könnte 2025 das erste Jahr sein, in dem das Quantencomputing nachweislich skalierbar sein wird, sagt Gambetta: „Ich strebe 2025 als wichtiges Jahr für die Demonstration von Schlüsseltechnologien an, die es uns erlauben werden, auf Hunderttausende von Qubits zu skalieren.“

Tan von IQM ist erstaunt über das Tempo der Entwicklung. „Es ist verblüffend, wie schnell dieser Bereich voranschreitet“, sagt er. „Vor zehn Jahren hätte ich nie erwartet, dass wir zu die-



Das europäische Start-up IQM ist eine Partnerschaft mit der Telekom eingegangen – für cloudbasierten Zugang zu Quantenrechnern.

sem Zeitpunkt einen Chip mit zehn Qubits haben würden. Jetzt sprechen wir bereits von Hunderten und in den nächsten Jahren möglicherweise von Tausenden.“

Das gilt nicht nur für IBM. Campbell ist zum Beispiel von Googles leisen, aber eindrucklichen Fortschritten beeindruckt. „Sie arbeiten anders, aber sie haben die Meilensteine auf ihrer öffentlichen Roadmap erreicht“, sagt er. „Sie scheinen zu halten, was sie versprechen.“ Auch andere bekannte Unternehmen setzen auf Quantencomputing. „Wir sehen, dass Intel seine Maschinen, die sie für die Herstellung von Chips verwenden, jetzt auch für die Herstellung von Quantenbauteilen einsetzt“, sagt Tan. Intel verfolgt allerdings einen ganz anderen technologischen Weg als IBM: die Herstellung von Qubits in Siliziumbauteilen, die das Unternehmen in großem Maßstab und mit minimalen geräuschverursachenden Defekten herstellen kann.

In dem Maße, in dem Quanteninformatik an Bedeutung gewinnt und Quantencomputer beginnen, Daten aus der realen Welt zu verarbeiten, wird allerdings auch technologische und geografische Diversität bedeutsam, um geopolitische und datenregulatorische Probleme zu vermeiden. So gibt es beispielsweise Beschränkungen zur Wahrung der nationalen Sicherheit – was die Marktchancen multinationaler Giganten wie IBM und Google möglicherweise einschränken wird.

Anfang 2022 erklärte Frankreichs Verteidigungsminister, Quantentechnologien seien von

„Ich strebe 2025 für die Demonstration von Schlüsseltechnologien an, die es erlauben werden, auf Hunderttausende Qubits zu skalieren.“

„strategischem Interesse“, und stellte ein neues nationales Forschungsprogramm in Aussicht. Im Juli 2023 kündigte die Deutsche Telekom eine neue Partnerschaft mit IQM für den cloudbasierten Zugang zum Quantencomputing an. Sie nannte diesen Schritt eine Möglichkeit für Telekom-Kunden, auf eine „wirklich souveräne Quantenumgebung zuzugreifen, die von Europa aus aufgebaut und verwaltet wird“.

All das ist nicht nur nationalistisches Getöse: Souveränität ist wichtig. Die Telekom ist federführend bei der Entwicklung einer EU-weiten Hochsicherheits-Kommunikationsinfrastruktur auf Quantenbasis. Da die Ära naht, in der große Quantencomputer eine ernsthafte Bedrohung für Standard-Verschlüsselungsprotokolle sein werden, wollen Regierungen und kommerzielle Organisationen Post-Quantum-Verschlüsselungsalgorithmen innerhalb ihrer eigenen Grenzen testen.

Noch ist dies kein Problem. Nur wenige Menschen glauben, dass ein Quantenprozessor, der bestehende Verschlüsselungsalgorithmen knackt, vor der Tür steht. Aber der Glaube an das Potenzial dieses Feldes, in wenigen Jahren einen Wandel herbeizuführen und auch in anderer Hinsicht nützlich zu sein, wächst. Und diese Zuversicht stützt sich inzwischen auf Erfolge in der Praxis. „Bei Algorithmiq glauben wir an eine Zukunft, in der der Quantennutzen bald eintreten wird, und ich kann diesen Optimismus auf Patente und Veröffentlichungen zurückführen“, sagt Maniscalco. ●

Geistreiche Simulation

An dieser Stelle blicken wir auf frühere Artikel der MIT Technology Review zurück, die heute wieder aktuell sind. Diesmal: die Simulation eines Gehirns im Computer. – Wolfgang Stielner

„Das ist ganz und gar nicht der Prototyp des verrückten Wissenschaftlers, kein Frankenstein-Erbe mit wirren Haaren und stechendem Blick; viel eher der abgeklärte Manager eines erfolgreichen Unternehmens“, schrieben wir in TR 1/2006. Die Rede war von Henry Markram, Neurowissenschaftler und seinerzeit Leiter des Blue Brain Project, in dem der Forscher Tausende von Neuronen in einem Supercomputer „biologisch plausibel“ modellieren wollte. Seine These war, dass sich dieses simulierte Gewebe verhalten werde wie echtes Gewebe – und dass man auf diese Weise vielleicht sogar ein menschliches Gehirn simulieren könnte. „Das kleinstmögliche Netzwerk, das man sinnvollerweise untersuchen muss, besteht aus mindestens 1000, besser noch 10 000 Neuronen“, sagte uns Markram damals. „Da gibt es keine Grenze nach oben.“ Und: „Dabei kann durchaus so etwas wie Intelligenz entstehen.“ Das klang, als „sei der Geist in der Maschine reine Fleißarbeit“, notierten wir mit innerlich hochgezogenen Augenbrauen.

Und was wäre, wenn ihm das wirklich gelänge? Wäre das nicht ein revolutionärer Schritt? Der Forscher hatte immerhin IBM überzeugt, modernste Großrechner zu spenden. Also machten wir uns auf den Weg und befragten zahlreiche Experten – Informatiker, Neurologen und auch Philosophen: Könnte so ein

simuliertes Gehirn wirklich intelligent werden? Was ist eigentlich diese Intelligenz? Und was ist mit Bewusstsein? Manche Experten hielten sein Vorhaben für illusorisch, reine Zeit- und Geldverschwendung. Andere waren skeptisch, aber vorsichtig optimistisch.

In gewisser Weise ähnelt die Debatte von 2006 der um große Sprachmodelle heute. Nur dass Markram viel näher an der Biologie bleiben wollte – und weniger vorzuzeigen hatte. Dennoch schien es zunächst, als könne er es schaffen: 2013 gelang es ihm, den Zuschlag für das Human Brain Project der EU zu bekommen – eine Milliarde Forschungsgeld über einen Zeitraum von zehn Jahren, um seine kühne These in einem großen Verbundprojekt zu testen. Doch Markram hatte sich übernommen, wurde von einer Mehrheit skeptischer Neuroforscher entmachtet, abgesetzt und wieder auf seine eigenen Ressourcen zurückgeworfen.

Die Ergebnisse, die Markram seitdem vorgelegt hat, sind interessant, liefern aber keine eindeutige Antwort auf die großen Fragen, die einst aufgeworfen wurden. Genau wie in der Debatte um die Intelligenz großer Sprachmodelle. Wahrscheinlich können wir also auch in zehn oder zwanzig Jahren noch über die Suche nach dem Geist in der Maschine schreiben. ●



TR 1/2006: Vielleicht war die Titelzeile damals etwas zu optimistisch.

Von Prompts und Pannen

Generative KI ist in der Schule angekommen, die Liste der Anwendungsmöglichkeiten wird immer länger. Besonders gut macht sie sich als Nachhilfelehrerin. – Andrea Hoferichter

An einem Frühlingstag im letzten Jahr wagte Patrick Bronner die Probe aufs Exempel – und richtete sich wie folgt an seine Matheklasse am Friedrich-Gymnasium in Freiburg: „Liebe Klasse 7B, ich erkläre euch jetzt gar nichts mehr. Ihr nehmt bitte das Tablet und lasst euch von ChatGPT mal erklären, wie man den Inkreis eines Dreiecks konstruiert. Ihr gestaltet damit einen Regel-Heftaufschrieb und lasst euch anschließend von ChatGPT Übungsaufgaben zum Thema generieren. Komplette Stillarbeit.“ Die Kinder seien engagiert zur Tat geschritten, er habe die Ruhe genossen, erzählt der Lehrer. Doch dann habe er bemerkt, dass einige Schüler schlicht Unsinn zeichneten – auf Anweisung des Chatbots. „Da habe ich gesagt: Tablets zu. Ich erkläre es euch, aber richtig!“

Bronner ist Experte auf dem Gebiet digitaler Medien und generativer KI im Unterricht. Seine Fortbildungen dazu sind derzeit stark nachgefragt. Schließlich hat sich seit der Einführung von ChatGPT Ende 2022 einiges getan. Viele Schulen haben Lizenzen für eine datenschutzkonforme Nutzung von ChatGPT und Co. erworben, mit Anwendungen für verschiedene Fächer und Jahrgangsstufen, Werkzeugen zur Unterrichtsvorbereitung und Klausurbewertung sowie Lehrer-Chatbots. Zudem bieten Schulbuchverlage KI-gestützte Lernplattformen an. Wie die neuen Werkzeuge sinnvoll genutzt werden können, ist nun die große Frage.

Da sich der praktische Erfahrungsschatz in Grenzen hält, heißt es selbst für Kenner der Materie häufiger „Trial and Error“: Ausprobieren, scheitern – und daraus lernen. Die Ursache für die Panne im Matheunterricht immerhin fand Bronner schnell heraus: Manche Prompts waren schlicht untauglich.

„Jemand hatte beispielsweise Innkreis statt Inkreis geschrieben und auch das Dreieck nicht erwähnt. Und wenn der Prompt unklar ist oder Rechtschreibfehler enthält, dann fängt das System eben an zu halluzinieren. Die Schüler müssen also vor allem lernen, Prompts richtig zu formulieren“, so Bronner. So empfehle es auch die Ständige Wissenschaftliche Kommission der Kultusministerkonferenz (SWK) in einem aktuellen Impulspapier (siehe Textkasten). Gelernt habe er im vergangenen Jahr außerdem, dass geschlossene Aufgabenstellungen nicht mehr taugen. Diese meistere die KI mittlerweile in der Regel fehlerfrei, ohne dass ein Schüler dabei etwas lernen könne.

Schummeleien, die auf solchen KI-Fähigkeiten fußen, waren nach dem Erscheinen von ChatGPT die wohl größte Befürchtung vieler Lehrkräfte, weswegen der Einsatz an vielen Bildungseinrichtungen in anderen Ländern sogar zunächst verboten wurde. Andere sahen in der Schummelgefahr vor allem Chancen. Sie könnten jene Lern- und Prüfkultur erzwingen, die Fachleute aus Didaktik und Pädagogik schon lange fordern, hin zu einem projektorientierten Unterricht, der die vier K – Kommunikation, Kollaboration, Kreativität und kritisches Denken – fördert, so die Hoffnung.

Erfüllt hat sie sich allerdings noch nicht. Das berichtet jedenfalls der Generalsekretär der Bundesschülerkonferenz Florian Fabricius. „Wir haben es immer noch mit Unterricht zu tun, der viel zu sehr darauf basiert, Daten auswendig zu lernen“, sagt er. „Zwar sind wir in den letzten Jahren ein wenig davon weggekommen, in Richtung kompetenzorientiertes Lernen. Aber das muss noch viel stärker passieren, weil Problem-

lösungskompetenzen und Kreativität immer wichtiger werden und auch die digitale Kompetenz.“

GEFAHR DER ENTFREMDUNG

Gerade wenn es um generative KI geht, sieht Fabricius eine „erstaunlich große Kluft zwischen Lehrkräften und Schülern“, noch größer, als sie es schon bei den digitalen Technologien gewesen sei. Die Situation sei mitunter absurd, berichtet er. „Die Hälfte der Schüler macht ihre Hausaufgaben mithilfe von ChatGPT, aber viele Lehrkräfte reden noch immer darüber wie über eine Zukunftsvision, wie über fliegende Autos. Es ist ein bisschen wie der Elefant im Raum, der nicht wirklich thematisiert wird und über den nicht konstruktiv gesprochen wird: Wie können wir die Technologie schon jetzt sinnvoll nutzen?“ Davon sei man aktuell noch weit entfernt, weil eben die nötige Aufklärung fehle.

Doris Weßels, Wirtschaftsinformatikerin, Professorin an der Fachhochschule Kiel und am SWK-Impulspapier beteiligt, sieht auch eine Spaltung unter den Lehrenden. „Wir haben Lehrkräfte, die von Anfang an mitgemacht haben, die mitgelernt haben. Diese Protagonisten entwickeln sich täglich weiter und sind experimentierfreudig“, erzählt sie. „Dann gibt es ein paar, die wir noch mit auf die Reise

„Liebe Klasse 7B, nehmt bitte das Tablet und lasst euch von ChatGPT erklären, wie man den Inkreis eines Dreiecks konstruiert.“

nehmen konnten, aber eben auch viele Lehrpersonen, die einfach immer noch auf null stehen, die entweder nicht mitgehen können oder auch nicht mitgehen wollen. Und die große Frage ist: Wie führt man diese Gruppen wieder zusammen?“ Das sei nun die Aufgabe der Führungskräfte in den Bildungseinrichtungen.

RUN AUF LEHRKRÄFTE-FORTBILDUNGEN

Immerhin: Die Nachfrage nach Fortbildungen ist laut Patrick Bronner seit einigen Monaten so hoch wie nie. Ganze Kollegien wollten sich zum Thema KI fortbilden lassen, weil Hausaufgaben und Referate plötzlich nicht mehr wie gewohnt funktionierten, berichtet er. „Ich hätte bis zu vier Fortbildungen pro Woche halten können – was leider nicht möglich war.“ Auch die Teilnehmerzahlen bei Online-Formaten seien regelrecht explodiert.

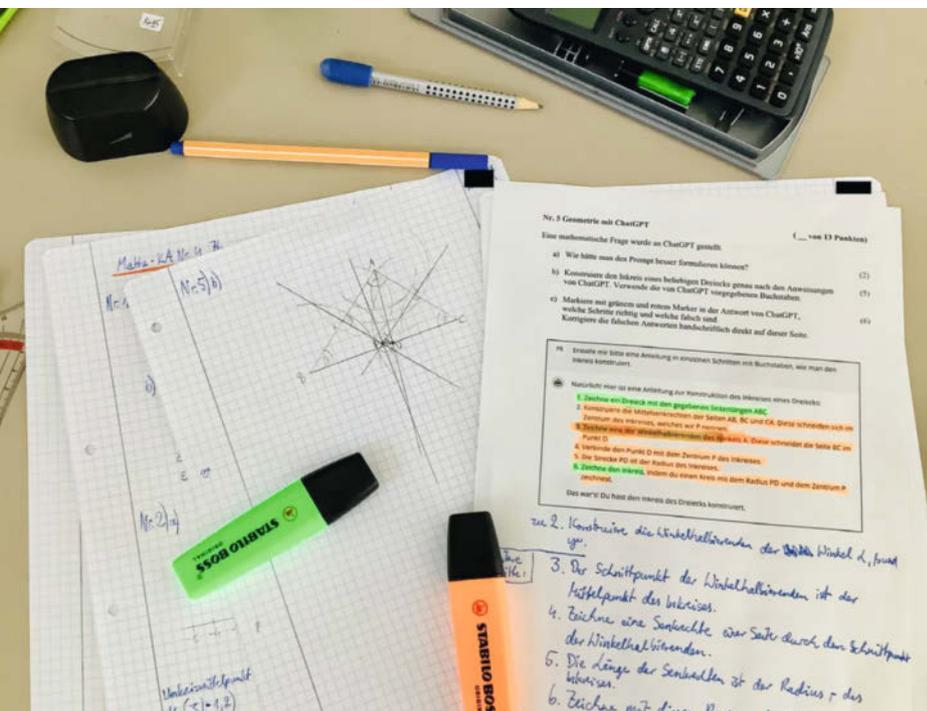
Ein Webinar, aufgezeichnet im November 2023, 420 Lehrkräfte nehmen teil: Zunächst erklärt Bronner die Voraussetzungen für den Einsatz von KI im Unterricht: „Die Grundlage ist eine Lizenz für die ganze Schule. Wir haben uns auf Fobizz geeinigt.“ Das Unternehmen bietet eine datenschutzkonforme Zusammenstellung zahlreicher Anwendungen auf der Basis von ChatGPT für viele Fächer und Jahrgänge. Auch Werkzeuge zur Unterrichtsplanung und zum Erstellen von Arbeitsblättern sind enthalten, zudem digitale Weiterbildungsprogramme und für die Schüler ein digitaler „Study-Buddy“. Andere Anbieter datenschutzkonformer Lizenzen sind etwa „schulKI“ und „DieSchulApp“.

Bronner berichtet außerdem, wie sich die generative KI im Unterricht nutzen lässt. Er zum Beispiel lässt gerne Erklärvideos erstellen, etwa wenn Schülerteams im Physikunterricht Schaltkreise löten oder wenn sie in Mathe die Werbung eines lokalen Baumarkts bewerten, die behauptet, der Stromverbrauch einer Lichterkette sei kostengünstiger als eine Tasse Kaffee. Auch der Personenchat lasse sich nutzen, erzählt der Lehrer. „In einem Projekt haben sich Schülerinnen und Schüler die Newton’schen Axiome durch Sir Isaac Newton persönlich erklären lassen und anschließend über eine Bild-KI noch Bilder von Newton im Comic-Stil erstellt. Dabei ging es auch um die Chancen und Risiken von KI-Bilderstellung.“ Das Thema Deep Fakes gehöre schließlich ebenso in einen zeitgemäßen Unterricht wie die Funktionsweise der großen Sprachmodelle, auf denen die KI fußt, und die Datengrundlage, die als Verstärker für Vorurteile wirken kann.

PRÜFUNGEN MIT PROMPTS

Nicht zuletzt müsse das Erlernte Bestandteil von Prüfungen werden, fordert der Lehrer. Im Mittelpunkt stehe dann oft ein Prompt, den er selbst erstellt habe. Die Schüler sollen diesen Prompt bewerten, ihn neu und besser formulieren. Außerdem gilt es, die Antwort des Chatbots zu zerpfücken sowie

Die Antwort von ChatGPT auf Fehler prüfen: Diese Aufgabe müssen hier Schüler im Freiburger Friedrich-Gymnasium lösen. Mit Grün markieren sie, was stimmt. Bei orange markierten Fehlern gilt es zudem, die richtige Lösung zu liefern – inklusive einer Erklärung.



mit roten und grünen Markern zu markieren: Was ist richtig, was ist falsch und warum? „Zu üben ist der kritische Umgang mit ChatGPT“, sagt der Lehrer. „Dazu brauchen die Schüler Textverständnis und enormes Fachwissen. Und sie haben dabei eines gelernt, nämlich dass ChatGPT noch ziemlich oft daneben liegt.“ Klausuraufgaben dieser Art funktionieren nicht nur im Physik- oder Matheunterricht, sondern auch in Deutsch oder Politik, wenn es etwa um ein kontroverses Thema wie den Israel-Konflikt geht und die Urteilsfähigkeit von ChatGPT ausgelotet werden sollte.

Bronner rechnet damit, dass KI-Tools bald auch im Abitur zugelassen werden. „Meine Prognose: 2028, spätestens 2030, werden die Schülerinnen und Schüler zeigen müssen, dass sie kollaborativ mit KI umgehen können.“ Gleichwohl werden die Schülerinnen und Schüler auch weiterhin Teilaufgaben ohne Hilfsmittel lösen müssen, nur mit Stift und Papier. „Wie es seit den 1980er-Jahren auch mit dem Taschenrechner gehandhabt wird“, sagt er.

An den Hochschulen sieht die Professorin Weßels bis zur Integration von KI in Lehre und Prüfungen noch einige Hürden. „Wir haben die Probleme des fehlenden Zugangs zu den KI-Tools für alle Hochschulen – diese Lizenzprobleme – noch immer“, moniert sie und hofft auf mehr Open-Source-Modelle, mit denen sich dieses Problem künftig einfacher umschiffen ließe. „Aber es bleiben natürlich rechtliche Herausforderungen, der Datenschutz zum Beispiel. Und es fehlen Ethik- und Sicherheitsstandards. Zumindest im Moment ist es ein bisschen wie auf Glatteis.“

Hinzu kommen die schon erwähnten Akzeptanzprobleme. Noch immer warten offenbar viele Lehrkräfte auf eine valide Anti-Schummel-App, die entlarven kann, was von einer KI generiert wurde und was nicht. „Das ist ein Mythos, der sich irgendwie festgesetzt hat, dass diese Programme schon irgendwann funktionieren werden und man dann weitermachen kann wie vor ChatGPT. Aber diese Möglichkeit wird es nicht geben und das muss ich praktisch täglich neu erklären“, beklagt Weßels. Auch emotionale Gründe könnten eine Rolle spielen. „Die neuen Tools erzeugen Neidgefühle“, hat sie festgestellt. „Die sogenannten Low-Performer profitieren vom KI-Einsatz übermäßig und die High-Performer zwar auch ein bisschen, aber relativ gesehen eben viel weniger. Wenn das in Vorträgen erwähnt wird, gibt es sofort Diskussionen, dass es nicht gerecht sei, dass jetzt auch die weniger Talentierten richtig gute Noten bekommen.“ Sie selber sehe darin kein Problem. „Dass alle besser werden, ist doch eine gute Sache.“

Als einen der größten Benefits der generativen KI bewertet die Hochschulprofessorin die Möglichkeit, sich mithilfe der Chatbots ein eigenes Lernsystem bauen zu können. „Ich kann zum Beispiel einen Text hochladen – darf dabei natürlich Urheberrechte nicht verletzen – und dann gebe ich ein: Ich hätte gerne ein Quiz mit 20 Fragen dazu. Belohne mich bei jeder richtigen Antwort mit einer kleinen

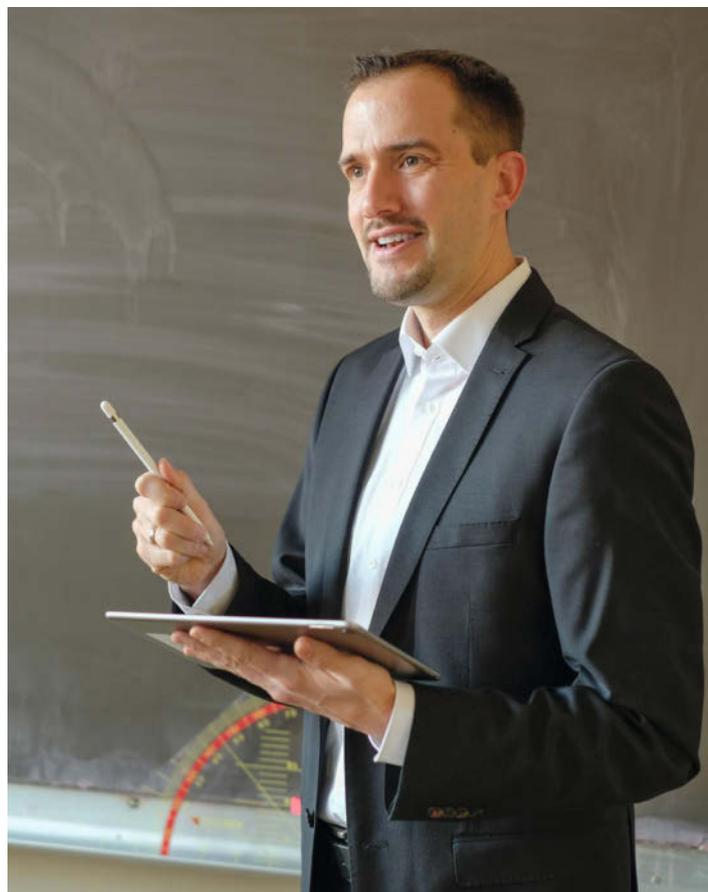
Überraschung. Und am Ende hätte ich das Ganze noch gerne in eine Tabelle gegossen, mit einer Übersicht, wie viele richtige und falsche Antworten ich gegeben habe. Und mit einem Klick habe ich eine Lerneinheit, die mir sogar Spaß macht und mich motiviert.“

NACHHILFE-LEHRER FÜR ALLE

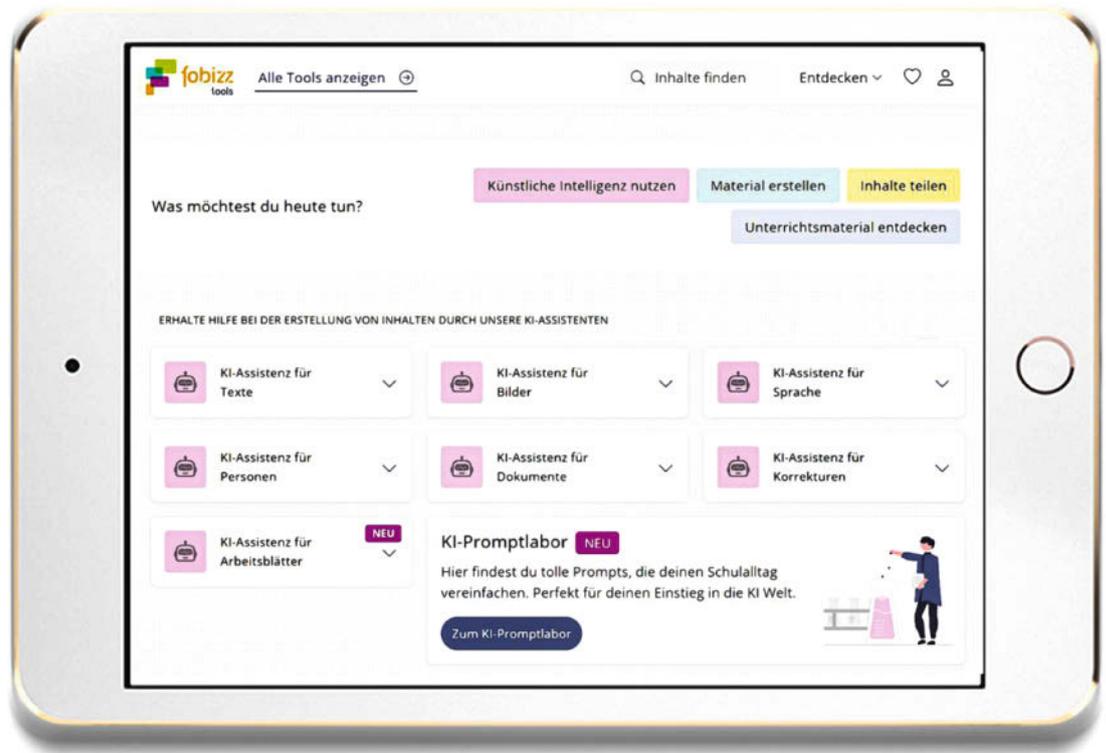
Eigens für Schulen entwickelte Lernplattformen, die mit generativer KI arbeiten, sollen im Grunde das Gleiche leisten. Manche haben aber offenbar unerwünschte Nebenwirkungen. Die Plattform Studyly des Klett-Verlags etwa fiel im Freiburger Friedrich-Gymnasium durch. „Das Versprechen des Verlags lautete: Dank KI werden Aufgaben differenziert und adaptiv individuell zugewiesen und der persönliche Lernerfolg gesteigert“, berichtet Patrick

Patrick Bronner nutzt das Tablet schon seit vielen Jahren im Unterricht und wirbt in Fortbildungen für einen sinnvollen Einsatz digitaler Medien.

„Die Schüler haben dabei gelernt, dass ChatGPT noch ziemlich oft daneben liegt.“



Fobizz ist ein Beispiel für eine datenschutzkonforme Lizenz auf der Basis von GPT. Die Palette der Schüler-Anwendungen ist bunt. Und Lehrkräfte können sich bei der Vorbereitung und Bewertung helfen lassen.



Bronner. „Leider kam der adaptive Modus weder bei den Schülerinnen und Schülern noch bei den Lehrkräften gut an.“ Unter anderem, weil die Plattform nicht innerhalb einer Aufgabe durch gestufte Hilfen unterstütze, sondern indem sie den Lernenden völlig unterschiedliche Aufgabentypen zuweise. Die Lehrer hatten Probleme, den Lernstand ihrer Schüler zu ermitteln. Und diese beklagten, sie könnten sich nicht mehr zu den Aufgaben untereinander austauschen. Die Arbeit mit der Lernplattform wurde nach wenigen Monaten eingestellt. „Wir haben dabei auch gelernt: Nicht überall, wo KI draufsteht, ist auch Gold drin“, so Bronner.

Das Tutorsystem PEER hingegen, entwickelt an der Technischen Universität München, kann er uneingeschränkt empfehlen. „Die Schüler können einen Aufsatz hochladen und sie bekommen in Echtzeit ein ausführliches Feedback zu verschiedenen Stellen und Verbesserungsvorschläge.“ Für den Matheunterricht sieht Bronner das größte Potenzial in KI-basierten Lehrer-Chatbots wie jenen von Fobizz oder Alena von TutorSpace. „Die Lernenden können hier mit einer Lehrkraft chatten, die super geduldig und immer verfügbar ist“, erzählt er. Selbst handschriftliche Rechnungen können als Bild in das KI-System eingespeist werden, das Fehler sofort diagnostiziert und die richtige Lösung der Aufgabe detailliert herleitet. „Solche Lehrer-Chatbots könnten auch eine Chance für mehr Bildungsgerechtigkeit sein. Vorausgesetzt, die Bundesländer machen solche Technologien kostenfrei zugänglich.“

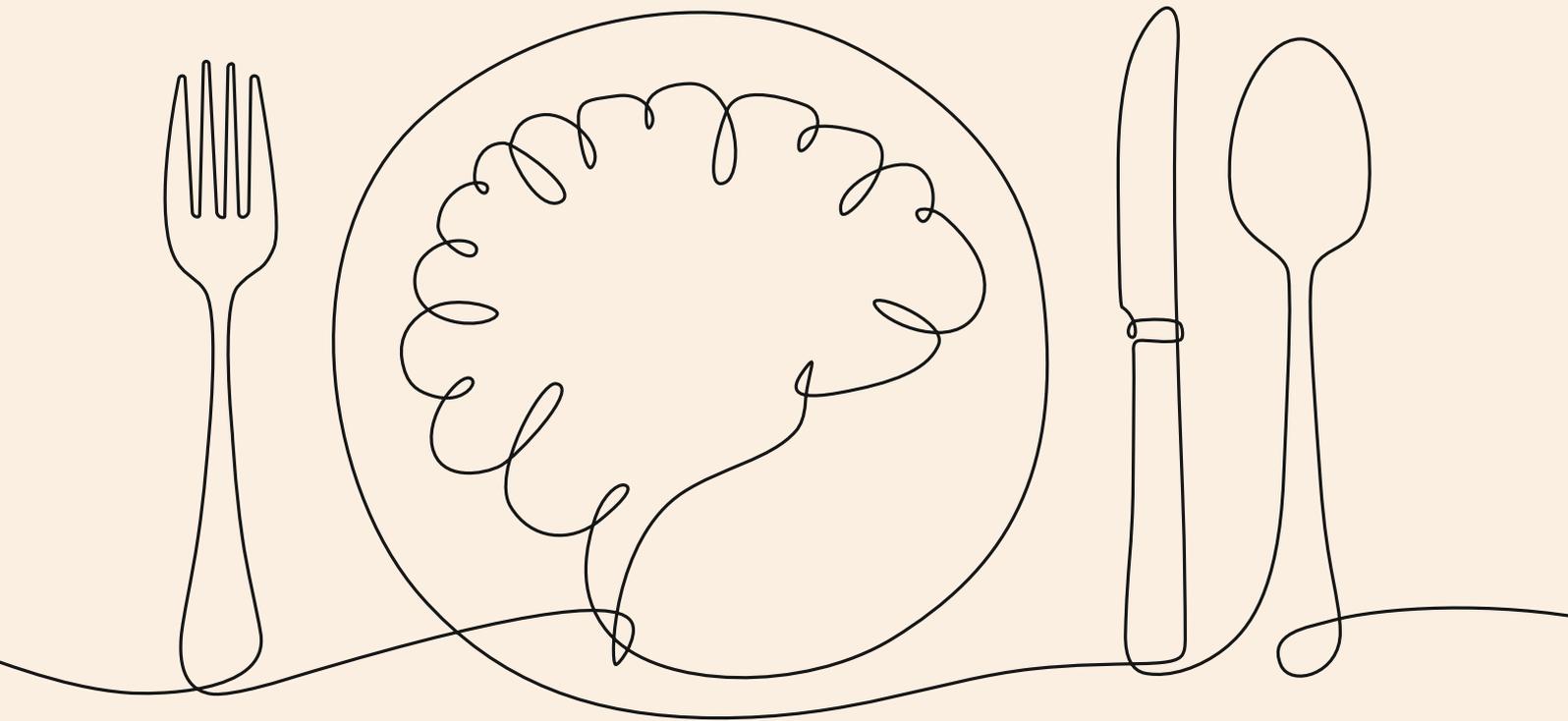
Die Forderung nach mehr sozialer Gerechtigkeit kommt auch aus der Bundesschülerkonferenz. Noch immer hätten nicht alle Schülerinnen und Schüler ein digitales Endgerät und Zugang zum Internet und damit die Basis für die Nutzung ge-

nerativer KI, moniert Florian Fabricius. Eine Studie der Universität Hildesheim und des Wissenschaftszentrums Berlin für Sozialforschung bestätigt, dass gerade Schulen in Brennpunktgebieten digital besonders schlecht ausgestattet sind. Kinder aus sozial schwachen Familien drohten noch weiter abgehängt zu werden, heißt es.

Kritisch sieht Fabricius auch, dass Schülerinnen und Schüler bei vielen Lehrkräften unter Generalverdacht stehen, sie würden schummeln, und mitunter auch ohne Beweis beschuldigt werden. Und er möchte noch etwas loswerden: „Die generative KI bringt natürlich eine große Faszination mit sich. Aber gleichzeitig haben wir auch einen Investitionsstau bei Schulgebäuden von 44 Milliarden Euro pro Jahr, zu große Klassen, Lehrkräftemangel. Wir haben also noch ganz andere Krisen im Bildungssystem. Und da mache ich mir auch persönlich Sorgen, dass das so ein bisschen runterfällt bei all diesen sexy Zukunftstechnologien.“

Auch Patrick Bronner plädiert dafür, digitale Medien und generative KI zwar unbedingt sinnvoll zu nutzen, ihre Bedeutung für die Bildung aber auch nicht überzubewerten. Die neuen Werkzeuge machten weder Lehrkräfte noch analoge Zeit im Klassenzimmer überflüssig, betont er. Grundlegendes Fachwissen müsse auch ohne KI sitzen und das Gefühl der Selbstwirksamkeit dürfe nicht zu kurz kommen. Das Bildungsziel von Schule sei nach wie vor die Entwicklung der Schülerinnen und Schüler zu kritikfähigen, werte- und verantwortungsbewussten, medienmündigen Menschen. „Und dazu gehören nicht nur Tablets und KI, sondern auch Sport, Musik und die Theater AG. Es geht um Persönlichkeitsentwicklung und nur ein Teil davon ist die Digitalität.“ ●

Hunger im Hirn



Wissenschaftler versuchen seit Jahrzehnten, die Geheimnisse des menschlichen Appetits zu entschlüsseln. Die Lösung würde neue Optionen für ein immer größer werdendes Problem eröffnen. – Adam Piore (Übersetzung: Jo Schilling)

Sie haben keine Ahnung, was Hunger ist, solange Sie nicht Brad Lowells Mäuse beobachtet haben. Vor ein paar Jahren haben der Neurowissenschaftler Lowell und sein Doktorand Mike Krashes herausgefunden, wie man den Drang nach Nahrung auf die Spitze treiben kann. Dazu stimulierten die Forscher von der Harvard University ein Neuronenbündel im Hypothalamus der Mäuse – dem Bereich des Gehirns, der sehr wahrscheinlich eine Schlüsselrolle bei der Regulierung unserer Grundbedürfnisse spielt.

Ein Video zeigt, was dann geschah: Zunächst ist die Szene ruhig. Die Kamera schwenkt langsam an einer Reihe von Plastikkäfigen entlang, in denen jeweils eine wohlgenährte Maus friedlich auf einem Bett aus Holzspänen ruht. Keine der acht Mäuse interessiert sich für die Futterpellets, die reichlich, aber unerreichbar in einem Gitter liegen, das unter der Käfigdecke hängt. Ihr Desinteresse ist nicht verwunderlich, denn jede Maus hat soeben das Äquivalent eines Festessens verzehrt.

Während die Sekunden auf einem Timer am unteren Rand des Bildschirms ablaufen, beginnt die Hälfte der Mäuse, sich zu rühren – ein Hinweis darauf, dass ein chemischer Botenstoff erste Neuronen anregt, die im Zusammenhang mit dem Appetit stehen.

Schon bald scheinen die Mäuse wie besessen zu sein. Einige stellen sich auf die Hinterbeine und strecken ihre Nasen durch die Gitter über ihnen nach den unerreichbaren Pellets. Andere klettern an den Wänden hoch, hängen an den Gitterstäben oder wühlen hektisch in den Holzspänen. „Es sieht aus, als würden sie den Verstand verlieren“, sagt Lowell.

Lowell ist einer der weltweit führenden Experten für die Schaltkreise im Gehirn, die Hunger, Sättigung und Gewichtsregulierung steuern. Auf das Video greift er zurück, wenn er deutlich machen möchte, dass Hunger wie ein Dämon ist: Er erwacht in den ältesten und primitivsten Teilen des Gehirns und befiehlt dann anderen neuronalen Apparaten, seinen Willen zu erfüllen – bis er bekommt, was er will.

Seine Forschung ist mehr als Grundlagenforschung. Sie könnte wichtige Auswirkungen auf die öffentliche Gesundheit haben. Mehr als 1,9 Milliarden Erwachsene weltweit sind übergewichtig, haben also einen Body-Mass-Index zwischen 25 und 30. 650 Millionen gelten als fettleibig oder adipös mit einem BMI über 30 – ein Zustand, der mit einer Vielzahl chronischer Gesundheitsprobleme korreliert, darunter Diabetes, Fettleber, Herzkrankheiten und einige Arten von Krebs. Ein Verständnis der beteiligten Schaltkreise könnte ein neues Licht auf jene Faktoren werfen, die diese Zahlen in den letzten Jahren in die Höhe haben schnellen lassen.

Und es könnte dazu beitragen, das Geheimnis hinter einer neuen Klasse von Medikamenten zu lüften, den sogenannten GLP-1-Agonisten, mit denen sich das Gewicht reduzieren lässt. Medikamente wie Wegovy und Ozempic gelten derzeit als bahnbrechend, da sie besonders wirksam Fettleibigkeit

Lowell sucht nicht weniger als den Kern des menschlichen Willens.

bekämpfen und einigen Personen geholfen haben, über 15 Prozent ihres Körpergewichts zu verlieren. Sie sind auch so etwas wie ein kulturelles Phänomen geworden: In den letzten drei Monaten des Jahres 2022 haben die US-Gesundheitsdienstleister mehr als 9 Millionen Rezepte für diese Medikamente ausgestellt. In Deutschland sind diese Wirkstoffe ebenfalls zugelassen, müssen jedoch von den Betroffenen selbst bezahlt werden, sofern sie nicht unter einem Diabetes leiden.

Allerdings kann niemand genau erklären, wie und warum sie wirken. „Die Medikamente erzeugen die guten Wirkungen, diese Sättigungseffekte, durch einen Aspekt dieses größeren Systems“, sagt Lowell, der ihre Entwicklung mit Erstaunen und echter Faszination beobachtet hat. „Eine der wichtigsten Komponenten, um herauszufinden, wie sie funktionieren, ist, dieses System zu definieren. Und genau das tun wir jetzt.“

DAS GEHEIMNIS DES HUNGERS

Was als kleine Empfindung beginnt, wird schnell zu einer Spirale. Aufdringliche Erinnerungen aus unseren Gedächtniszentren schieben sich in unser Bewusstsein. Bilder von Frikadellensandwiches. Der Geruch von Brot. Bei Mäusen der imaginäre Geschmack eines korkähnlichen Nahrungspellets. Die motivierenden und emotionalen Bereiche unseres Gehirns verleihen dem Bedürfnis, zu essen, einen nonverbalen Befehl, der so stark ist, dass er alles andere in den Schatten stellt. Unser präfrontaler Kortex schaltet sich ein und überlegt, wie wir uns die Nahrung beschaffen könnten (wenn wir uns in einer gefährlichen Situation wie einem Kriegsgebiet befinden, wägen wir ab, wie viel Gefahr wir zu riskieren bereit sind, um sie zu bekommen). Dann mobilisieren wir unsere sensorischen und motorischen Bereiche. Wir stehlen ein Huhn, versuchen, einen Fisch in einem Teich aufzuspießen, plündern den Kühlschrank auf der Arbeit oder schleudern unseren Körper gegen ein Metallgitter, in der Hoffnung, ein Nahrungspellet zu ergattern.

Indem Lowell die Hungerneuronen in diesen Mäusen stark erregte, löste er einen Sturm neuronaler Aktivität aus. Der breitete sich auf die Großhirnrinde und andere Verarbeitungszentren höherer Ordnung aus und führte direkt zu einer Kette komplexer zielgerichteter Verhaltensweisen (auch wenn diese nicht effektiv waren).

„Damit haben wir es geschafft, dass das Gehirn sagt: ‚Geh essen.‘ Aber das ist nicht wirklich eine Erklärung, wie das funktioniert“, sagt Lowell.

Um diese Frage zu beantworten, hat er sich mit Mark Andermann zusammengetan. Andermann ist ebenfalls Neurowissenschaftler (sein Büro liegt im Beth Israel Deaconess Medical Center in Boston neben Lowells). Er beschäftigt sich mit der Frage, wie Motivation die Wahrnehmung prägt. Gemeinsam folgen sie nun bekannten Teilen der neuronalen Hungerschaltungen in unbekannte Teile des Gehirns.

Mehr als 1,9 Milliarden Erwachsene weltweit sind übergewichtig. 650 Millionen gelten als adipös.

Die Wissenschaftler sind auf der Suche nach jenem Bündel von Neuronen, das unseren instinktiven Drang zu essen über die Gehirnstrukturen steuert: Sie suchen die Neuronen, die an der menschlichen Motivation, der Entscheidungsfindung, dem Gedächtnis, dem bewussten Denken und Handeln beteiligt sind. Damit wollen sie herausfinden, wie ein einfacher grundlegender Impuls sich durch das Gehirn ausbreitet – in diesem Fall das Signal des Körpers, dass die Energiespeicher zur Neige gehen und aufgefüllt werden müssen. Auch wie der Impuls unser bewusstes Erleben beherrscht und sich in etwas weitaus Komplexeres verwandelt: Eine Reihe komplizierter, oft gut durchdachter Handlungen, die darauf abzielen, Nahrung zu beschaffen, wollen sie erforschen.

Die Suche hat Lowell in den letzten Jahren so sehr in Anspruch genommen, dass seine Doktoranden einen Begriff für das schwer fassbare Bündel von Gehirnzellen geprägt haben, das er sucht: „Heiliger Gral“-Neuronen. Lowell sucht

nicht weniger als den Kern des menschlichen Willens.

Seine Suche begann bereits in den späten 1970ern, als der Neurowissenschaftler Richard Gold ihn als jungen Studenten in sein Labor für physiologische Psychologie an der University Massachusetts aufnahm. Golds Arbeiten an der Identifizierung neuronaler Strukturen, die an der Appetitregulierung beteiligt sind, galten als bahnbrechend. Sein Schwerpunkt war der Hypothalamus – eine primitive Struktur tief im Gehirn, die sich im Laufe der Evolution kaum verändert hat. Es wird angenommen, dass er wichtige Funktionen wie Körpertemperatur, Blutdruck, unseren Bedarf an Nahrung und Wasser und andere grundlegende Antriebe überwacht und ausgleicht.

Gold vermutete, dass der paraventriculäre Hypothalamuskern (PVH), ein winziger Fleck mit etwa 50 000 Neuronen im Hypothalamus, eine Rolle bei der Kontrolle des Appetits spielt. Nach heutigen Maßstäben waren die damaligen Untersuchungsinstrumente „stein-

zeitlich“, sagt Lowell. Er habe ein Rückziehmesser mit einem Draht verwendet, um Bündel von Projektionsneuronen zu durchtrennen, die vom PVH ausgingen und mit Neuronen außerhalb verbunden waren. Aber diese steinzeitlichen Methoden waren effektiv: Als die Nagetiere aus der Narkose aufwachten, waren sie von Hunger zerfressen und wurden schnell fettleibig.

Diese Erfahrung hinterließ einen bleibenden Eindruck bei dem damals sportlichen, 19-jährigen Fußballfan. Er hatte immer angenommen, dass Übergewichtige einfach nur „faul“ wären. Sein Experiment legte nahe, dass wahrscheinlich viel mehr dahintersteckte. „Gold und ein paar andere Labors haben den PVH als den Ort identifiziert, der für die Zurückhaltung beim Essen erforderlich ist“, erklärt Lowell. „Aber sie hatten nicht die Mittel, um weiterzusehen.“

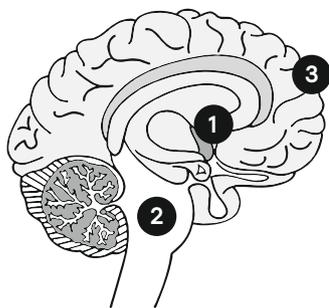
Herauszufinden, welche der 50 000 Neuronen im PVH tatsächlich den Appetit steuern, welche also den Hungerschalter stummschalten können, war eine damals unüberwindbare Herausforderung – ähnlich wie der Versuch, eine „riesige Schüssel Spaghetti“ zu entwirren, wie Lowell es ausdrückt. „Wie unterscheidet man einen Spaghettistrang von einem anderen? Das geht nicht. Sie sehen alle gleich aus.“

Als Lowell Anfang der 1990er-Jahre nach seiner Promotion an der Boston University sein eigenes Labor am Beth Israel Deaconess Medical Center eröffnete, untersuchte er den Stoffwechsel in Geweben wie Muskeln, Organen und Fett, die über das periphere Nervensystem mit dem Gehirn verbunden sind. Doch die Erfahrungen, die er während seines Studiums in Golds Labor gemacht hatte, nagten an ihm. „Das Gehirn ist ‚der Herr der Ringe‘“, sagt Lo-



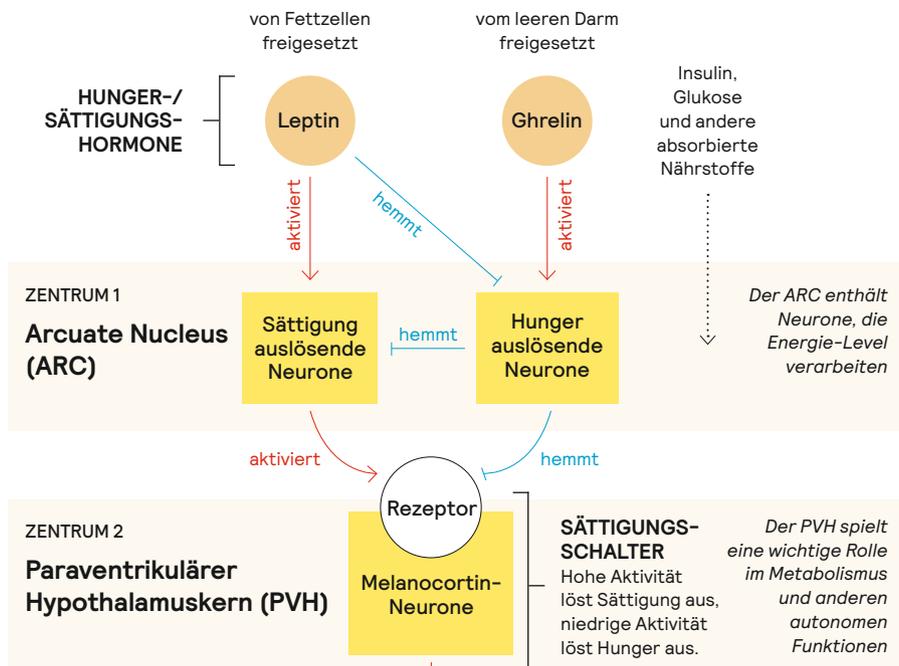
Genetische Veränderungen lassen Mäuse fettleibig werden. Sie werden seit 1949 als Versuchstiere gezüchtet.

Der Hunger-Sättigungs-Kreislauf



1

Hypothalamus



2

Hirnstamm



Zehntausende unkartierter Neurone - welche hängen mit dem Appetit zusammen?

Subkortikale Strukturen, die an Emotionen und Belohnungen beteiligt sind, tragen dazu bei, dass diese Informationen schließlich über direkte und indirekte Weiterleitung den Kortex erreichen.

3

Kortex

BEWUSSTES, ZIELGERICHTETES HANDELN

well. „Es ist der eine Ring, der alle anderen beherrscht. Und es war nicht wirklich interessant, all diese anderen Dinge zu studieren, solange der Hauptakteur da oben sitzt.“

DER EINSTIEGSPUNKT

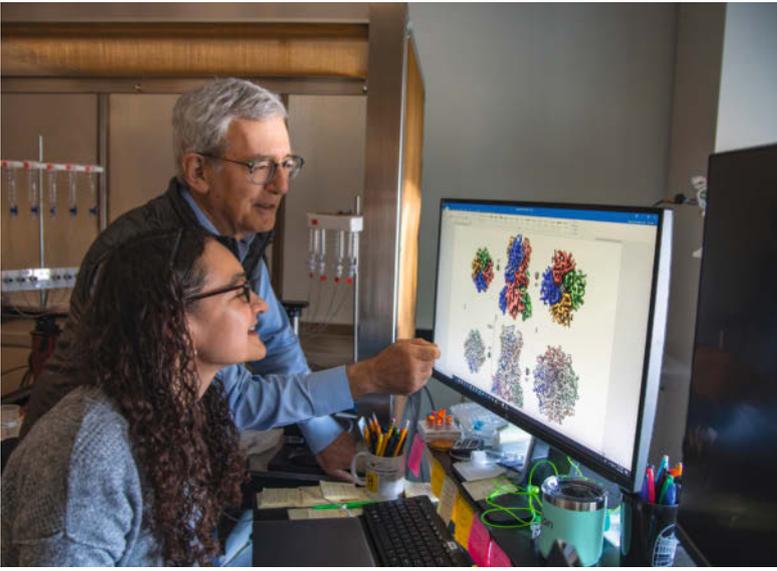
Zu Beginn seiner Karriere beneidete Lowell seine Kollegen, die den Sehsinn studierten. Seit Jahrzehnten vollzogen Neurowissenschaftler die am Sehen beteiligten neuronalen Schaltkreise nach, indem sie in die Augen von Mäusen leuchteten, feststellten, welche Neurone aufflamten, und diese dann verfolgten, um die entsprechenden Hirnschaltkreise zu kartieren. Für Lowell und seine Kollegen, die sich für Hunger interessierten, gab es keinen vergleichbaren Zugang.

Das änderte sich 1994, als Jeffrey Friedman, ein Forscher an der Rockefeller University, Lowell ermöglichte, die ersten „Spaghetti-Stränge“ zu identifizieren, die an der Hungerregulation beteiligt sind.

1949 hatten Forschende des Jackson Laboratory in Bar Harbor, Maine, Mäuse mit einer damals noch nicht identifizierten genetischen Mutation gezüchtet, die sie massiv fettleibig werden ließ. Sie stellten die Hypothese auf, dass die Mäuse nicht in der Lage waren, ein für die Gewichtsregulierung entscheidendes Protein zu produzieren – und deshalb fettleibig wurden.

Jahrzehnte später gelang es Friedman, die DNA-Sequenzen zu klonen, die bei den fettleibigen Mäusen abnormal waren. Er fand heraus, dass den Mäusen ein Schlüsselhormon fehlte, das Fettzellen freisetzen und mit dem das Gehirn die verfügbaren Energiespeicher des Körpers verfolgt. Friedman reinigte das Hormon und nannte es Leptin. Er identifizierte auch die DNA-Sequenz, die für die Herstellung des Leptin-„Rezeptors“ auf den Gehirnzellen erforderlich ist. Sie erkennen, wenn Leptin vorhanden ist, und setzen eine chemische Kaskade in Gang, die das Sättigungsgefühl fördert.

Die Entdeckung war ein weiterer Beweis für die Idee, dass Fettleibigkeit biologisch bedingt ist. Die Forschenden gingen davon aus, dass der Körper ein vorgegebenes Gewicht, eine bestimmte Fettmasse oder ein anderes messbares physiologisches Merkmal – einen „Sollwert“ – verteidigt. Der Appetit ist das Mittel, mit dem der Körper „Fehlerkorrekturen“ vornimmt, wenn eines der Merkmale vom Sollwert abweicht. Dann mobilisiert



Roger Cone hat Mäuse gezüchtet, die durch ähnliche Mechanismen verfetten wie Menschen. Mit seiner Mitarbeiterin Ciria Hernande analysiert er die Struktur von Ionenkanälen, die eine wichtige Rolle bei der Signalübertragung spielen.



Brad Lowell hat sein Forscherleben der Suche nach dem Hungerschaltkreis gewidmet.



Der Neurowissenschaftler Marc Andermann erforscht am Beth Israel Deaconess Medical Center in Boston, wie Motivation die Wahrnehmung prägt.

Wie kann der Gedanke an ein Frikadellensandwich jemanden dazu bringen, Schuhe und Mantel anzuziehen und auf die Suche zu gehen?

er Energie und Aufmerksamkeit, um die Homöostase – das gewohnte Gleichgewicht – wiederherzustellen.

Eine Behandlung für Fettleibigkeit rückte in greifbare Nähe. Die Biotech-Firma Amgen lizenzierte die Rechte an Leptin für 20 Millionen Dollar ein und hoffte, ein Medikament entwickeln zu können, das dessen Wirkung nachahmt. Der Amgen-Wirkstoff hatte jedoch bei den meisten fettleibigen Menschen nur eine sehr geringe Wirkung. War Leptin also nur ein Teil der Geschichte? Eine Hypothese, die sich scheinbar bestätigte, als andere Labors weitere am Hunger beteiligte Hormone und Signale entdeckten. Hinzu kam, dass viele fettleibige Menschen normale oder sogar hohe Leptinwerte aufweisen.

Es lag nahe, dass das Leptin irgendwo im Gehirn mit anderen Signalen kombiniert wird, die mit dem Energiehaushalt zusammenhängen, und dass diese Informationen dann mit einem homöostatischen Sollwert verglichen werden müssen.

Dies deutete auf eine hochkomplexe Reihe von neurologischen Schaltkreisen hin, die das Hungergefühl regulieren. Und obwohl Friedmans Entdeckung in Bezug auf Leptin mehr Fragen aufwarf, als sie beantwortete, war sie der Einstiegspunkt, auf den Lowell und die Hunger-Fachwelt gewartet hatten. Es war der Ausgangspunkt, um einen detaillierten Schaltplan zu entwerfen, der erklärte, wie die einzelnen Schaltkreise zusammenhängen.

Auf den Spuren des Leptins fanden Forschende in anderen Labors ein Gebiet von Neuronen als erstes Ziel des

Hormons: den Arcuate Nucleus (ARC). Diese erste wichtige Zwischenstation im Hungerkreislauf befindet sich an der Basis des Hypothalamus. Sie integriert Informationen, die von anderen Gehirnstrukturen stammen, sowie zirkulierende Nährstoffe und Hormone wie Leptin und Insulin. Dieser Input vermittelt wichtige Informationen über den aktuellen Zustand des Körpers, wie etwa den Stand der Energiespeicher und die Verfügbarkeit von Nährstoffen.

Die nächste Frage, die sich stellte, war, wie der ARC funktioniert und wohin er die Informationen weitersendet.

DEN HUNGER EIN- UND AUSSCHALTEN

1997 fiel das nächste Puzzleteil an seinen Platz: Roger Cone, damals Forscher an der Oregon Health and Science University, entdeckte einen zentralen Teil des Schalters, der den Hunger ein- und ausschaltet.

Er züchtete Mäuse mit einer Genmutation, die mit Melanocortinen zusammenhängt – einer anderen Klasse wichtiger Signalproteine. Mäuse mit dieser Mutation ähneln fettleibigen Menschen stärker als Mäuse mit Leptin-Mutationen: Ihre Fettleibigkeit setzt relativ spät ein und sie entwickeln Diabetes verursachende Insulin- und Glukosespiegel. Die Mutation sorgt dafür, dass die Schlüsselrezeptoren die Melanocortin-Hormone nicht mehr erkennen. Das beeinträchtigt das Sättigungsgefühl und veranlasst die Mäuse, weiter zu essen. Funktionieren die Melanocortin-Rezeptoren jedoch normal, scheint die Erkennung der Melano-

cortin-Hormone den Appetit zu dämpfen. Im Grunde genommen hatte Cone den „Sättigungsschalter“ des Gehirns gefunden.

Diese Entdeckung war entscheidend für das Verständnis der Leptin-Wirkung im ARC, der ersten Station des Hungerkreislaufs: Wenn das Leptin den ARC erreicht, löst es eine biochemische Kettenreaktion aus, die zur Freisetzung weiterer Melanocortin-Hormone führt und schließlich diese „Sättigungsschalter“ aktiviert.

Diese Sättigungsschalter befinden sich jedoch nicht nur im ARC, sondern auf Neuronen, die über den gesamten Hypothalamus, das Hinterhirn und das Vorderhirn verteilt sind. Das war der Hinweis für die Forschenden, dass einer dieser Bereiche der nächste wichtige Knotenpunkt im Hungerkreislauf sein muss. Welcher ist es also?

Einige dieser Schalter befinden sich im paraventriculären Hypothalamuskern (PVH) – einem Gehirnbereich, den Lowell bereits als Student im Labor von Richard Gold studiert hatte. Seit Lowell mit eigenen Augen gesehen hatte, wie gefräßig Mäuse wurden, wenn man den PVH ausschaltet, war er überzeugt davon, dass der PVH eine Station in diesem Schaltkreis war.

Im Jahr 2005 veränderten Lowell und sein Kollege Joel Elmquist Mäuse so, dass sie keine funktionalen Kopien von Sättigungsschaltern im Gehirn mehr bilden konnten. Wie erwartet, wurden die Mäuse fettleibig. Die Forscher schufen dann Paare mikroskopischer molekularer Scheren. Sie programmierten diese Scheren so, dass sie nur die mit den

PVH-Neuronen assoziierte DNA ausfindig machten und die kleine Sequenz wegschnitten, die die Entwicklung funktionaler Sättigungsschalter ausschließlich in diesem Teil des Gehirns verhinderte. Mit anderen Worten, sie „reparierten“ die Sättigungsschalter im PVH, während sie im restlichen Gehirn deaktiviert blieben. Wenn der PVH der magische Ort für Fettleibigkeit ist, sollte die Wiederherstellung der Sättigungsschalter dort das Problem der Fettleibigkeit lösen.

Tatsächlich wurden Lowells Knockout-Mäuse von Fettleibigkeit „geheilt“. Er hatte bewiesen, dass der PVH das nächste wichtige Relais im Hunger-Sättigungs-Schaltkreis ist.

Für Lowell war das ein persönlicher Erfolg, beantwortete aber immer noch nicht die vielleicht faszinierendste Frage: Wie gelangen diese Signale schließlich in die bewussten Teile des Gehirns, die Teile, die Maßnahmen zur Nahrungsbeschaffung veranlassen? Wie hat es der Hunger geschafft, die neuronale Maschinerie dieser scheinbar von Dämonen besessenen Mäuse in seine Gewalt zu bringen? Wie kann der Gedanke an ein Frikadellensandwich jemanden dazu bringen, Schuhe und Mantel anzuziehen und auf die Suche zu gehen?

Für die Antwort musste Lowell herausfinden, wohin die Signale im PVH führten – in der Hoffnung, dass sie ihn zu den übergeordneten Gehirnstrukturen führen würden. Dies wurde dadurch erschwert, dass die Neuronen im PVH Signale an eine Reihe verschiedener Bereiche senden – den Hirnstamm, Regionen, die die Schilddrüsenfunktion beeinflussen, und andere.

EINE MAGISCHE FERNSTEUERUNG

Im Sommer 2009, vier Jahre nachdem er die Rolle des PVH entdeckt hatte, wartete Lowell auf einer Wiese sitzend auf seinen Sohn. Er blätterte in der neuesten Ausgabe der wissenschaftlichen Zeitschrift *Neuron*. Ein Artikel beschrieb ein neues Laborgerät, das Bryan Roth an der University of North Carolina entwickelt hatte: eine „chemisch-genetische Fernbedienung“, mit der bestimmte Neuronen in Mäusen ein- und ausgeschaltet werden konnten. Das war der Durchbruch, auf den Lowell seine ganze Karriere lang gewartet hatte.

Lowell konnte jetzt neue Mäusestämme mit genetischer „Fernbedienung“ für die Neuronen züchten und bestimmte Populationen von Neuronen einfach ein- und ausschalten, indem er den Mäusen eine chemische Substanz verabreichte. (Mit einer anderen Technik, der Optogenetik, ist das ebenfalls möglich, allerdings muss er dazu Licht einer bestimmten Wellenlänge über ein Glasfaserkabel in das Gehirn einstrahlen.) Und er konnte die Auswirkungen des Ein- und Ausschaltens bestimmter Neuronen auf das Verhalten in Echtzeit beobachten. „Plötzlich war ich in der Lage, Dinge zu tun, von denen ich als Student nie zu träumen gewagt hätte“, sagt er.

Fünf Jahre später war es so weit: Lowell schaltete über die genetische Fernbedienung methodisch jedes Bündel von Neuronen, das aus dem PVH herausführt, ein und aus. Dabei beobachtete er, mit welchen Bündeln er das Sättigungsgefühl beeinflusste. Diesen Neuronen folgte er aus dem Hypothalamus heraus und landete in einem Gebiet im Hirnstamm, dem sogenannten parabrachialen Nucleus (PBN) – dem dritten wichtigen Knotenpunkt im Hunger-Sättigungs-Kreislauf.

Das war der Wendepunkt. Lowell hatte endlich einen Bereich des Gehirns gefunden, der direkte Verbindungen zu übergeordneten Hirnstrukturen aufweist, die alle Aspekte unseres bewussten Erlebens beeinflussen – einschließlich der Bereiche, die an Motivation, Belohnung, Emotionen, Verarbeitung von Sinnesreizen, Gedächtnis, selektiver Aufmerksamkeit und einer Vielzahl anderer Funktionen beteiligt sind. Irgendwo in diesem Bereich des Gehirns musste sich die letzte Station befinden: die Neuronen des „Heiligen Grals“, die dem Rest des Gehirns sagen: „Geh essen!“

DER HEILIGE HUNGER-GRAL

In den vergangenen acht Jahren haben Lowell und Andermann nach den Neuronen im PBN geforscht, die am Hunger beteiligt sind. Eine mühsame Suche – das PBN besteht aus Hunderttausenden Neuronen. Lowells Labor verfolgt den Hunger-Sättigungs-Schaltkreis vom PBN aus vorwärts. Andermanns Labor arbeitet rückwärts von dem Bereich des Gehirns aus, der das bewusste Erleben von Körperzuständen steuert: dem insularen Kortex. Das Ziel ist, sich in der Mitte zu treffen.

Gelingt es ihnen, diesen Schaltkreis nachzuvollziehen, können sie untersuchen, wie ein einfaches Signal – das Signal, dass wir hungrig sind – dazu führt, dass Hirnareale höherer Ordnung rekrutiert und auf das Erfüllen einer Aufgabe ausgerichtet werden. Sie könnten dann ein Modell dafür entwickeln, wie Tiere Wünsche in Handlungen umsetzen.

Allerdings ist nicht nur die schiere Anzahl der Neuronen im PBN eher entmutigend. Diese Verbindung zu finden, wird noch komplizierter dadurch, dass das PBN sich nicht nur um das Weiterleiten von Hungersignalen kümmert, sondern die Endstation für eine Vielzahl anderer Impulse und Bedürfnisse ist. Es ist ein riesiger Umschlagplatz für alle möglichen Informationen: sexuelle Erregung, Schmerzempfindungen, Hitze- und Kälteempfinden, Juckreiz und Übelkeit sowie Signale, die mit zahlreichen autonomen Funktionen wie Atmung, Blutdruck und Temperaturregulierung verbunden sind. Für jedes dieser Signale gibt es wahrscheinlich eine eigene Gruppe von speziellen, genetisch unterschiedlichen Neuronen im PBN. Die meisten dieser Neuronen sind bisher weder erforscht noch identifiziert. Und sie sehen alle identisch aus.

**Drei Jahre
verbrachte
Lowell da-
mit, 10 000
Neuronen in
37 Subtypen
zu sortieren.**

Hungrige Eichhörnchen nutzen komplexe Prozesse im Gehirn und vollbringen akrobatische Leistungen, um an Nahrung zu gelangen.



Manchmal mussten Lowell und Andermann den Weg der Nervenimpulse Neuron für Neuron verfolgen. Sie aktivierten ein einzelnes Neuron, von dem sie wussten, dass es Teil des Hunger-Sättigungs-Schaltkreises ist, und beobachteten dann, welche Neuronen daraufhin aufleuchteten. (Die DNA der Mäuse, mit denen Lowell arbeitet, enthält auch Sequenzen für fluoreszierende Tracer, die aufleuchten, wenn bestimmte Neuronen feuern, und dieses Licht kann mit hochentwickelter optischer Sensortechnik durch ein Fenster im Schädel erfasst und dann auf einem Computerbildschirm wiedergegeben werden.) So konnten sie die Zahl der potenziell beteiligten Neuronen von Hunderttausenden auf etwa 10 000 reduzieren.

Weitere drei Jahre verbrachte Lowell damit, diese 10 000 Neuronen anhand ihrer genetischen Signaturen in 37 verschiedene Subtypen zu sortieren. Jetzt experimentieren Lowell und Andermann mit jedem Subtyp einzeln, um weiter einzugrenzen, welche am Hungerkreislauf beteiligt sind. Dazu zeigen sie beispielsweise Mäusen Bilder, die diese mit einem Leckerbissen assoziieren, und schauen sich an, welches Neuron feuert. Dann töten sie die Maus, sezieren das Hirngewebe und identifizieren das genetische Profil dieses Neurons, um es einem der Subty-

pen zuzuordnen. Über diesen mühsamen Weg hoffen Lowell und Andermann, innerhalb der nächsten fünf Jahre die gesuchten Neuronen zu finden. Von dort aus können sie dann in die höherwertigen Bereiche des Gehirns vordringen, zum „Heiligen Gral“ des Hungers.

Dass sie auf dem richtigen Weg sind, bestätigen ihnen die jüngsten Entwicklungen bei Medikamenten zur Gewichtsreduktion. Die Erfahrungen von Patienten mit dieser neuen Klasse von Medikamenten zeigen, wie verblüffend viel Einfluss die Schaltkreise haben, die die Forscher gerade untersuchen. Mit den Wirkstoffen bleibt nicht nur das körperliche Hungergefühl aus – weil die Medikamente den „Sollwert“ des Körpers zu senken scheinen –, sondern auch alles andere, was normalerweise mit Hunger einhergeht, scheint zu verschwinden. So berichten die Patienten etwa, dass sie nicht mehr von aufdringlichen Gedanken ans Essen geplagt werden. Ein Effekt, den Andermann und Lowell auch bei ihren Mäusen beobachten konnten. Über neuronale Bildgebungsverfahren können sie tatsächlich feststellen, wann Mäuse an visuelle Hinweise denken, die sie in der letzten Minute oder Stunde gesehen haben.

Es bleibt abzuwarten, ob die Arbeit von Lowell und Andermann die hef-

tige Debatte darüber, wie diese Medikamente wirken und auf welche Teile des Gehirns sie einwirken, tatsächlich beenden wird. Wichtiger ist, dass die Entschlüsselung des Schaltkreises die Entwicklung neuer Generationen von Medikamenten ermöglichen könnte. Was Lowell jedoch am stärksten beschäftigt, ist der Gedanke, dass seine Forschung neue Erkenntnisse über Motivation, Entscheidungsfindung und eine Vielzahl anderer Funktionen liefern könnte – über den menschlichen Willen und das Überleben.

Um zu veranschaulichen, was er damit meint, erzählt er von einem Video mit einem hungrigen Eichhörnchen auf einer „Mission Impossible“. Um an Nahrung zu gelangen, klettert es eine Stange hinauf, schleudert sich durch die Luft, landet auf einer sich drehenden Scheibe. Anschließend schlängelt es sich – kopfüber an einer Leine entlangbalancierend – durch eine kleine Öffnung in einer Plastikbarriere. „Das Eichhörnchen handelt nicht reflexartig“, sagt er. „Dieser Parcours ist eine völlig neue Umgebung. Es muss komplexe Prozesse im Gehirn nutzen, um dieses Ziel zu erreichen.“ Wie schafft es dieses sehr einfache System, diese Kontrolle zu übernehmen? Es ist nur eine Frage der Zeit, bis Lowell die Spaghetti entwirrt hat und es herausfindet. ●

Der Preis der Natur

Die Umweltforscherin Gretchen Daily berechnet den ökonomischen Wert von Flora und Fauna. Ihr Ziel ist Naturschutz, der sich sowohl für die Gesellschaft als auch die Wirtschaft auszahlt. – Kathryn Miles (Übersetzung: Andrea Hoferichter)

Wie hoch ist der Geldwert einer Honigbiene, der eines Bergbachs oder der eines Mangrovenbaums? Gretchen Daily, Mitbegründerin des Stanford Natural Capital Project, hat sich beruflich der Beantwortung solcher komplexen Fragen gewidmet. Mithilfe neuer wissenschaftlicher Daten und innovativer Open-Source-Software hilft Daily Regierungen, internationalen Banken und Nichtregierungsorganisationen, den Wert der Natur zu quantifizieren. Und sie beziffert, was die Erhaltung und Wiederherstellung von Ökosystemen wirtschaftlich einbringt.

Die US-Ökologin promovierte in den 1990er-Jahren in Stanford. Es sei, wie sie sagt, eine revolutionäre Zeit für interdisziplinäre Ansätze zur Bewältigung wirtschaftlicher und ökologischer Krisen gewesen. In einem von der Königlich Schwedischen Akademie der Wissenschaften veranstalteten Gipfeltreffen kamen erstmals Ökologen und Ökonomen an einen Tisch. Sie wollten die Vorteile eines gemeinsamen Ansatzes zur Entwicklung von Wirtschafts- und Umweltpolitik erörtern.

„Die Menschheit ist lange davon ausgegangen, dass die Natur unendlich ist“, sagt Daily. „Wir wussten zwar, dass Zusammenbrüche von Zivilisationen zumindest teilweise auf das Zerstören der lokalen Umwelt zurückzuführen waren. Aber niemand dachte, dass das auf globaler Ebene passieren könnte.“ Der Klimawandel und seine unzähligen Auswirkungen hätten schließlich den Anstoß zum Umdenken gegeben. „Diese Krise hat uns alle gezwungen, die Annahmen zu überdenken, auf denen die Wirtschaftssysteme beruhen. Sie hat auch die Schwachstellen verschiedener Forschungsrichtungen aufgezeigt, die sich über Jahrzehnte und sogar Jahrhunderte hinweg aufgebaut hatten.“



Gretchen Daily erforscht, wie wertvoll die Natur für den gesellschaftlichen Wohlstand ist. Auch privat weiß sie den Wert der Natur zu schätzen, hier mit Huhn Joshie.

Im Jahr 1997 erschien Dailys Buch *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Es war eines der ersten zum Konzept der Ökosystemleistungen, die den Wert von Ressourcen wie sauberem Wasser, fruchtbarem Boden und Lebensräumen für die Artenvielfalt quantifizierten. Und das Buch regte eine noch nie da gewesene interdisziplinäre Zusammenarbeit an. „Vielen von uns wurde bewusst, dass Umweltprobleme im Grunde wirtschaftliche und soziale Probleme sind. Wir können die Vitalität und Sicherheit der Biosphäre nicht erhalten, wenn wir die Natur nicht wertschätzen“, betont Daily.

Diese Erkenntnis inspirierte die Ökologin, 2005 das Natural Capital Project zu gründen – eine internationale Kooperation zwischen Stanford, der Chinesischen Akademie der Wissenschaften, der Nature Conservancy, der Universität von Minnesota und dem World Wildlife Fund. Die Grundidee der Initiative: Die Kartierung und Modellierung des monetären Wertes der Natur würde auch die führenden Politiker der Welt dazu bringen, die inhärenten Vorteile der Naturerhaltung zu erkennen. Und tatsächlich arbeitet das Natural Capital Project mit Banken, Regierungen und gemeinnützigen Organisationen auf der ganzen Welt zusammen.

Um den Wert der Natur zu ermitteln, hat die Organisation das Open-Source-Softwaremodell InVEST entwickelt. Es kombiniert Unmengen an Daten, unter anderem aus Satellitenaufnahmen, Bodenuntersuchungen, Klimamodellen und Karten.

Der kolumbianischen Regierung half die Initiative zum Beispiel, einen Schutzplan für den karibischen Golf von Morrosquillo und sein Hinterland zu entwickeln: Der Fluss Río Sinú ist eine wichtige Trinkwasserquelle für viele flussabwärts gelegene Gemeinden. Allerdings entspringt er einem Gebiet, das finanziell auf Holzeinschlag, Viehzucht und Landwirtschaft angewiesen ist. Als Folge der Bewirtschaftung lagert sich zunehmend erodierter Boden im Fluss ab. Mithilfe von InVEST konnten Daily und ihr Team die Folgekosten der Schlammablagerung bezogen auf die Trinkwassergewinnung und die Wasserkraft beziffern. Sie ermittelten außerdem den Wert der flussaufwärts gelegenen Wälder, die wie ein Filter für erodierte Böden wirken und die Verstopfung der Flüsse verhindern können. „Die Gemeinden der Region profitieren in einer Weise von diesem Wald, die ihnen gar nicht bewusst war“, sagt Lisa Mandle, leitende Wissenschaftlerin beim Natural Capital Project. Die kolumbianische Regierung habe jetzt einen starken Anreiz, die Menschen bei Erhalt und Pflege dieses äußerst wichtigen Waldes zu unterstützen.

NEUES MASS FÜR DAS NATURKAPITAL

Ein ähnlicher Ansatz der Initiative hilft Ländern bei der Ermittlung ihres Bruttoökosystemprodukts (GEP). Nach dem Vorbild des Bruttoinlandsprodukts (BIP) ermöglicht es der GEP-Index den Ländern,



Die Asiabank ADB unterstützt den Schutz von Feuchtgebieten in den Philippinen. Das hilft nicht nur beim Klimaschutz, sondern sichert auch den Lebensunterhalt der Fischer.

„Die Gemeinden der Region profitieren in einer Weise von diesem Wald, die ihnen gar nicht bewusst war.“

den monetären Wert ihrer ökologischen Systeme zu bestimmen. Daily und ihr Team haben diesen Index 2014 sowohl auf kommunaler als auch auf nationaler Ebene in China erprobt. Im Jahr 2021 wurde er von der Statistischen Kommission der Vereinten Nationen anerkannt.

„Genauso, wie die Weltwirtschaftskrise den dringenden Bedarf an besseren makroökonomischen Leistungskennzahlen gezeigt hat, erfordert die aktuelle ‚große Degradierung‘ unseres Naturkapitals, dass wir auch die ökologischen Systemleistungen verfolgen“, sagt Daily. Die Informationen könnten helfen, Investitionen schlau zu steuern. Daily geht davon aus, dass die GEP-Metrik im nächsten Jahrzehnt weltweit eingesetzt werden wird. Derweil arbeitet sie mit ihrem Team daran, die Analyse und die Visualisierung ihrer Bewertungen für politische Entscheidungsträger, Investoren und lokale Gemeinschaften zu vereinfachen und die Informationen leichter zugänglich zu machen.

Die Idee, den Wert der Natur zu ermitteln, habe schon 30 Jahre auf dem Buckel, sagt Qingfeng Zhang von der Asiatischen Entwicklungsbank, die mit dem Stanford-Projekt zusammenarbeitet. „Doch ohne die Vision von Daily hätte sie nicht verwirklicht werden können.“ Dank Dailys Natural Capital Project habe die Bank eine Plattform zur Förderung nachhaltiger Investitionen geschaffen. Ihre Arbeit und die Auswirkungen auf die Politik seien monumental. „Gretchens InVEST-Modell und ihr GEP-Konzept verändern, wie Regierungen, Unternehmen und die Zivilgesellschaft die Natur betrachten“, betont Zhang. „Wir haben jetzt eine greifbare wirtschaftliche Grundlage, um in den Schutz und die Entwicklung der Natur zu investieren.“ ●

Magnete aus Müll

Bisher dominiert China den Markt für Seltene Erden, die für die Energiewende wichtig sind. Um unabhängiger zu werden, zapfen Forschende und Unternehmen zunehmend ungewöhnliche Quellen an. – Mureji Fatunde und Andrea Hoferichter

Für junge Menschen im Chemieunterricht sind sie oft der blanke Horror: die 17 Seltenerdmetalle mit den seltsamen Namen, die sich im chemischen Periodensystem der Elemente auf den unteren Plätzen tummeln. Bei vielen Unternehmen aber sind Samarium, Neodym oder Dysprosium – um nur ein paar Beispiele zu nennen – heiß begehrt. Denn diese Metalle spielen eine wichtige Rolle für die Energiewende. Unter anderem stecken sie in Magneten von Elektromotoren in Windrädern, Elektroautos und Wärmepumpen. Auch für Leuchtstoffe, Festplatten, Kernspintomografen und die Halbleiterproduktion werden sie gebraucht.

Die Internationale Energieagentur schätzt, dass die Nachfrage nach den Seltenen Erden bis 2040 um das Drei-

bis Siebenfache steigen wird. Und das ist ein Problem. Zwar sind die meisten dieser Metalle gar nicht so selten, wie ihr Name vermuten lässt, aber in vielen Erzlagerstätten kommen sie nur in sehr kleinen Konzentrationen vor und ihre Gewinnung lohnt sich vielerorts schlicht nicht. Die mit Abstand weltweit größte Menge liefert China, aber auch Myanmar, Vietnam und Russland zählen zu den Herkunftsländern. Das bedeutet nicht nur große wirtschaftliche Abhängigkeiten. Vielerorts leiden Menschen und Umwelt durch schlechte Arbeitsbedingungen und giftige, zum Teil radioaktive Stäube und andere Emissionen der Minen.

Immer mehr Start-ups und Unternehmen wollen die kritischen Metalle daher auch aus ungewöhnlichen und vor al-

lem inländischen Quellen bergen: zum Beispiel aus Flugaschen von Kohlekraftwerken, aus Abfällen der chemischen Industrie, Bergbaudeponien oder aus Elektroschrott. Die Recyclingidee ist schon seit vielen Jahren Gegenstand von Forschung. Nun scheint sie endlich Fahrt aufzunehmen. Das Potenzial immerhin ist beachtlich.

ALGEN ALS METALLFÄNGER

Allein in Deutschland schlummerten ein bis zwei Millionen Tonnen Seltene Erden in den Halden von Bergbauminen, Abwässern und Elektroschrott, sagt Thomas Brück von der Technischen Universität München. Er will die begehrten Metalle mithilfe von Blaualgen schürfen,



Ein ausgedienter Magnet, der das Seltenerdmetall Neodym enthält. Mit schlaun Verfahren wird daraus wieder ein neuer Magnet für Windräder oder Elektroautos.

mit fadenförmigen Cyanobakterien. „Unter anderem, weil man für ihre Aufzucht praktisch nur Licht und CO₂ aus der Luft braucht“, so der Forscher. Die Bakterien können, selbst wenn sie tot sind, aus einer Lösung große Mengen Seltenerdmetalle aufnehmen. Anschließend werden sie mit einem Sieb herausgefischt und die Metalle werden mit Säuren wieder herausgewaschen. Bis zu siebenmal könne eine Algencharge wiederverwendet werden, berichtet Brück. Eine andere Möglichkeit sei, die Biomasse zu verbrennen. Dann erhalte man die Oxide der Seltenerdmetalle als Produkt. Vor dem Prozess werden störende Metalle wie Eisen mit chemischen Methoden aus der Lösung entfernt.

„Eines unserer ‚Haustierchen‘ ist *Calothrix brevissima*, eine filamentöse, also fadenförmige Alge“, erklärt Brück. Diese Bakterien nehmen die Metalle nicht direkt auf, sondern wirken Brück zufolge als Adsorbens wie eine Art Ionentauscher. Sie tragen Zuckerpolymere mit ganz speziellen Strukturen auf ihrer Zelloberflä-

che, die wie Magneten auf die Seltene Erden wirken. „Das heißt, der Stoffwechsel der Algen spielt für unser Verfahren keine Rolle, und deshalb können wir eben auch mit toten Algen arbeiten.“ Auch Reststoffströme eignen sich für das Verfahren, also Algen, die zuvor zum Beispiel schon Pigmente, Proteine oder Fette für Fleischersatz und Treibstoffe produziert haben.

Zudem wirken bestimmte Stämme dieser Algen durch feine Unterschiede in ihren Oberflächenstrukturen sehr selektiv auf ein spezifisches Seltenerdmetall. Das sei ein großer Vorteil, betont Brück. „Seltenerdmetalle sind sich in ihren physikalischen Eigenschaften sehr ähnlich. Sie haben etwa den gleichen Radius und in ihren Verbindungen in der Regel auch die gleiche elektrische Ladung, sodass man sie mit üblichen Methoden nur sehr schwer trennen kann.“ Mit dem neuen Verfahren lassen sich laut Brück verschiedenste Quellen für Seltene Erden anzapfen, zum Beispiel Elektroschrott oder die

Abfälle aus der Produktion chemischer Katalysatoren. Da sei „noch viel zu holen“, sagt Brück. Im Fokus stünden derzeit die Abfälle von Bergbauminen.

SANFT MIT STROM

Auf Seltenerdmetalle aus Bergwerkhalten hat es auch das Start-up Phoenix Tailings in Massachusetts abgesehen. Mit seinem Verfahren gewinnt es neben den vier Seltenen Erden Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium auch Metalle für die Batterieproduktion zurück. Die Reststoffe lässt Phoenix zu Zuschlagstoffen weiterverarbeiten, etwa für die Zementindustrie.

Das Verfahren komme ohne gefährliche Chemikalien aus, wirbt das Start-up. Ein Abfallkonzentrat, das Oxide der Seltenen Erden enthält, arbeitet das Unternehmen mit verschiedenen Lösungsmitteln auf, trennt es und setzt die Oxide in einer elektrochemischen Zelle durch Elektronenzufuhr in die gewünsch-

ten Metall- und Legierungsprodukte um. Der Energiebedarf lasse sich gegenüber den üblichen Aufbereitungsmethoden auf 35 bis 45 Prozent senken, heißt es. Zudem gehe weniger Material verloren und das Endprodukt sei besonders rein. Eine kommerzielle Gewinnung laufe bereits und bis 2026 wolle man die Produktion auf jährlich über 3000 Tonnen Seltenerdmetalle steigern.

Selbst mit Pflanzen könnten sich Seltenerdmetalle künftig aus Halden und belasteten Böden bergen lassen. Ein internationales Team um Antony van der Ent von der Queens University in Brisbane, Australien, jedenfalls hat für eine aktuelle Studie eine ganze Reihe an Farnen identifiziert, die für das sogenannte Phytomining taugen könnten. Nickel – das zwar nicht zu den Seltenen Erden, aber wie diese zu den kritischen Rohstoffen zählt – wird schon seit einiger Zeit an mehreren Standorten durch Phytomining kommerziell gewonnen.

AUS ASCHE GELD MACHEN

Auf Flugaschen aus Kohlekraftwerken als Quelle für Seltene Erden setzt das Start-up Rivalia Chemical in New York. Zwar sind die Gehalte nicht so üppig wie jene der Bergbauabfälle, aber die Aufbereitung hat noch einen anderen Nutzen. Denn in der Vergangenheit wurden diese Abfallprodukte oft mit Wasser vermischt und in Teichen gelagert. In den USA ist dadurch laut der amerikanischen Umweltschutzorganisation Earth Justice das Grundwasser an mehr als 250 Kraftwerksstandorten so stark verschmutzt, dass die Belastungen über den zulässigen Werten für Trinkwasser liegen. Schließlich stecken neben Seltenerdmetallen auch Quecksilber, Kadmium und Arsen in der Asche. Bei Extremwetter könnten sich die Gifte zudem auch oberirdisch weiter verteilen und die Gesundheit von Wildtieren und Menschen gefährden.

Rivalia will also zwei Fliegen mit einer Klappe schlagen: die giftige Brühe aus den Teichen entschärfen und zugleich die begehrten Seltenerdmetalle bergen. Die Technologie dafür hat die Gründerin und Umweltingenieurin Laura Stoy während ihres Studiums am Georgia Institute of Technology entwickelt. Der Kern der neuen Aufbereitungsmethode ist ein ausgetüftelter Wechsel von Erhitzen und Abkühlen, bei dem sich die Seltenerdmetalle in einer ionischen Flüssigkeit – einem Salz in flüssigem Zustand – lösen. Mithilfe von Säuren und Laugen werden ebenfalls enthaltene weitere Metalle aus dieser Lösung entfernt. Die Produkte des Prozesses sind ein flüssiges Seltenerdkonzentrat und ein fester Rückstand, der unter anderem Eisen enthält.

Weitere Aufarbeitungsschritte würden laut Rivalia die Käufer der Produkte übernehmen. Der feste Rückstand könne in die Betonindustrie gehen und auch dort zum Klimaschutz beitragen, sagt Stoy. Er eigne sich als Alternative zum Portlandzement, dessen Produktion mit einem hohen CO₂-Ausstoß verbunden sei. Noch sei das Verfahren in der Ent-

wicklung und es sei unklar, wann eine kommerzielle Produktion beginnen könne. Im Vergleich zum klassischen Bergbau bestehe das Risiko, preislich nicht mithalten zu können, räumt Stoy ein. Sie sei aber optimistisch. Laut Schätzungen steckt in den Aschen ein wahrer, über vier Milliarden Dollar schwerer Schatz, allein in Form von Seltenen Erden und nur in den USA. Auch das treibt die Umweltingenieurin an.

MAGNETE WIE NEU

In Texas kümmert sich das junge Unternehmen Noveon Magnetics um das Recycling von Eisen-Neodym-Bor-Magneten. Dafür gewinnt es die kritischen Metalle zunächst aus ausrangierten Magneten zurück, wie sie etwa in Motoren, ausrangierten Festplatten oder in der Medizintechnik verwendet werden. Aus diesen Materialien stellt Noveon neue Magnete her, die dann etwa in Generatoren in Windkraftanlagen und Motoren in Elektrofahrzeugen zum Einsatz kommen können. Für den neuen Typ der Hochleistungsmagneten EcoFlux werde weniger Material benötigt als für herkömmliche Varianten, heißt es aus dem Unternehmen. Mit der patentierten M2M-Technologie ließen sich die Ausgangsmaterialien zu 99,5 Prozent recyceln. Die Leistung der recycelten Magnete sei ebenso gut wie jene von Magneten aus Primärrohstoffen.

Das Unternehmen produziert nach eigenen Angaben schon im kommerziellen Maßstab und strebt mittelfristig eine Produktion von 10 000 Tonnen pro Jahr an. Das Geschäft könnte sich lohnen. Außerhalb Chinas gibt es nicht einmal zehn Hersteller solcher Magnete. Nach Prognosen des DOE wird sich die Nachfrage nach Seltenerdmetallen allein in den USA bis 2050 mehr als vervierfachen, und Noveon ist der einzige Anbieter in den USA.

In Deutschland recycelt das Pforzheimer Start-up HyProMag Seltenerdmetalle. Es verwandelt sie durch eine chemische Reaktion mit Wasserstoff in ein lockeres, entmagnetisiertes Pulver, von dem Beschichtungsmaterialien, Klebstoffe, Schrauben und andere Rückstände mechanisch getrennt werden können. Anschließend werden aus dem Pulver wieder neue Magneten gefertigt. Im Vergleich zur Primärproduktion könne 90 Prozent Energie eingespart werden und fast alle toxischen Nebenwirkungen entfielen, heißt es aus dem Unternehmen. Entwickelt wurde die Technologie an der University of Birmingham. In Birmingham soll in diesem Jahr auch eine erste Recyclinganlage in Betrieb genommen werden, finanziert vom kanadischen Unternehmen Mkango. Weitere in Deutschland und den USA sollen folgen.

METHODE SALMIAK

Trotz der vielen aktuellen Erfolgsmeldungen ist die Idee, Seltene Erden aus Elektroschrott zu ernten, nicht neu. Ein Team um Martin Bertau von der TU Bergakademie Freiberg beispielsweise arbeitet schon seit vielen Jahren an geeigneten Methoden.

In Flugaschen in den USA steckt ein über vier Milliarden Dollar schwerer Schatz, allein in Form von Seltenen Erden.

Mit Proben aus dem Blaualgenreaktor untersucht Thomas Brück, wie schnell sich die Algen vermehren. Sie sollen später Seltenerdmetalle aus Abfällen ziehen.



Der grüne Pflanzensaft von *Phyllanthus balgooyi* in Malaysia enthält bis zu 20 Prozent extrahierbares Nickel. Mit ähnlichen Phytomining-Verfahren wollen Forschende künftig auch Seltenerdmetalle aus Böden und Bergbauhalden ziehen.



Um 2015 sind die Preise für die Seltenen Erden auf ein Niveau gesunken, auf dem das Leuchtstoffrecycling nicht mehr wirtschaftlich war.

Zunächst entwickelte es Verfahren für Leuchtstoffröhren und die erste Generation Energiesparlampen. „Das Verfahren war auch in der Anwendung und es wurden damit rund 30 Tonnen Seltenerdmetalle wiedergewonnen“, berichtet er. Um 2015 seien die Preise für die Seltenen Erden aber auf ein Niveau gesunken, auf dem das Leuchtstoffrecycling nicht mehr wirtschaftlich gewesen sei. Aktuell arbeitet seine Gruppe an einer Recyclingmethode für die neue Generation Energiesparlampen, die mit einer lutetiumhaltigen Schicht funktionieren.

Für die Seltenen Erden in Eisen-Neodym-Bor-Magneten hat das Team ebenfalls eine Recyclingmethode parat. Sie funktioniert mit gasförmigem Chlorwasserstoff, der aus Salmiak, einem Abfallprodukt der Chemieindustrie, gewonnen wird. „Das mischen wir, erhitzen das im Drehrohren auf ungefähr 180 Grad und dann stürzt sich der Chlorwasserstoff regelrecht auf die Metalle. Neodym und Eisen lassen sich anschließend laugen und recyceln. Übrig bleibt elementares Bor, das man einfach abfiltrieren und wiederverwerten kann.“ Auch Ammoniak gehe aus dem Prozess hervor, ein Rohstoff für die Düngemittelindustrie. „Der Charme ist: Ich führe ausschließlich Abfallstoffe zusammen und es kommen am Ende nur verkaufsfähige Produkte heraus“, betont Bertau. Zudem funktioniert das Recyclingverfahren auch für Kobalt-Samarium-Magnete, die unter anderem in Festplatten, in Tonabnehmern von E-Gitarren oder manchen Lautsprechern enthalten seien.

GEMISCHTE STIMMUNG

So divers die Technologien zum Wiederbeleben der Seltenerdmetalle sind, so

verschieden ist auch die Gemütslage der Entwickler. In den USA scheint geradezu Goldgräberstimmung zu herrschen. Die genannten Start-ups werden staatlich gefördert und geben sich optimistisch. „Das Thema wird von allen Parteien unterstützt“, berichtet die Rivalia-Gründerin Stoy. Sie rechne noch mit vielen Jahren Forschungsförderung und auch damit, dass sich der Wettbewerb um die neuen Quellen für Seltene Erden verschärfen wird. Doch selbst das macht ihr keine

schlechte Laune. „Ich möchte eine Akteurin in einem großen Ökosystem sein, in dem viele Leute Seltene Erden produzieren“, sagt sie. „Das ist das beste Ergebnis für alle.“

Aus Deutschland sind hingegen auch kritische Töne zu hören. Der Münchener Forscher Thomas Brück berichtet, sein Projekt, die Seltenen Erden aus Bergbauhalden zu gewinnen, könne schon viel näher an der praktischen Anwendung sein. Eigentlich sollte es in diesen Monaten in

Die Mountain Pass Mine für Seltene Erden ist die einzige aktive Mine in den USA. Gewinn hat sie laut der Nachrichtenagentur Reuters im letzten Quartal nicht gemacht. Die Preise für Seltene Erden sind zu stark gefallen.



die industrielle Testphase starten. Fördermittel seien bereits bewilligt worden. „Es ging um 1,2 Millionen Tonnen Abraum, also Bergbauabfälle, in dem bis zu vier Prozent Seltene Erden enthalten sind“, so Brück. Auch die Infrastruktur für das Waschen und Sieben – die beiden Hauptprozessschritte – sei vorhanden gewesen. „Aber dann hat die aktuelle Energiepreiskrise zugeschlagen und der Partner ist aus finanziellen Gründen wieder ausgestiegen“, berichtet der Forscher. Das Aus ärgere ihn sehr. Er hätte sich mehr staatliche finanzielle Unterstützung für den Industriepartner gewünscht. Das laufe in deutschen Forschungsprojekten deutlich schlechter als etwa bei EU-Projekten oder in den USA.

ROHSTOFFREICHES DEUTSCHLAND

Martin Bertau sieht eine weitere Baustelle auf dem Weg zu einem nachhaltigeren Wirtschaften mit den Seltenen Erden, die wiederum sein Verfahren zum Magnetrecycling kräftig ausgebremst hat. „Ein Riesenproblem ist, dass Magneten von Windrädern und anderer Elektroschrott noch immer größtenteils ins Ausland verkauft werden“, sagt er. Die Seltenen Erden darin seien dann für das Recycling in der Regel schlicht verloren. Vor allem aus diesem Grund habe ein Recyclingunternehmen, das die von ihm entwickelte Methode für das Seltenerdrecycling aus Magneten anwenden wollte, seine Anlagen nach nur wenigen Jahren Betrieb wieder abbauen müssen. Der Export von Elektroschrott sorgt außerdem maßgeblich mit dafür, dass in der EU nur etwa ein Prozent der Seltenen Erden recycelt wird. Das erklärte Ziel der Europäer, eine Recyclingquote von 15 Prozent bis 2030 zu erreichen, ist noch in weiter Ferne.

„Wir müssen endlich mit der Mär aufhören, wir wären ein rohstoffarmes Land. Wir müssen die Materialien aber im Land halten und auch die Chemieindustrie, die für das Recycling unverzichtbar ist“, betont Bertau. Zudem gelte es, rechtliche weiße Flecken zu beseitigen, die das Anzapfen weiterer Quellen verhinderten. Das betreffe zum Beispiel Deponien mit Schlacken aus der thermischen Phosphorsäureproduktion für Düngemittel, wie sie bis in die 1990er-Jahre üblich war. „Das sind in Deutschland ungefähr 22,5 Millionen Tonnen, etwa die Hälfte in Knappsack bei Köln, die andere in Piesteritz, hier in Sachsen-Anhalt. Darin stecken je nach Quelle zwischen 250 000 bis 500 000 Tonnen Seltene Erden“, so Bertau. Das liegt etwa im Bereich des geschätzten globalen Jahresverbrauchs für 2022. Für das Bergen dieses Schatzes gibt es laut Bertau kein Regelwerk. Die Aufarbeitung sei seiner Meinung nach weder ausdrücklich erlaubt noch verboten. „Sie ist schlicht nicht vorgesehen.“

Auch andere Rahmenbedingungen sind offenbar kontraproduktiv. „Wenn mir ein Recycler berichtet, es sei für ihn billiger, goldhaltige Platinen im Bergwerk zu entsorgen, als sie zu recyceln, dann läuft doch was schief. Jedes Jahr versenkt er zig Tonnen Gold. Wenn wir uns so einen Luxus leisten, ist klar, dass Deutschland in vielen Punkten noch im Tiefschlaf steckt.“ Aber das ließe sich ändern – mit schlauen Anreizen für das Sammeln von Elektroschrott und für das Recycling der Seltenen Erden sowie mit einer Regelung für die Aufarbeitung der Phosphorschlacken, betont der Forscher. Ein bisschen Risikobereitschaft sei ebenfalls gefragt. „Wir haben die Technologien und müssen sie nur noch einsetzen. Dann kann man sie auch wunderbar exportieren. Und das ist es ja am Ende, was wir alle ökologisch, ethisch und auch wirtschaftlich wollen.“ ●

IMPRESSUM

MIT Technology Review ist die deutsche Lizenzausgabe der MIT Technology Review aus den USA.

Redaktion

yeebase media GmbH, Kriegerstraße 40, 30161 Hannover, Telefon: 0511/165 944-0, Fax: 0511/165 944-99, www.technologyreview.de, E-Mail: info@technology-review.de
Chefredakteur: Luca Caracciolo

Leitende Redakteurin: Dr. Jo Schilling

Redakteure/-innen: Aylin zur Borg (Social Media), Andrea Hoferichter, Gregor Honsel, Jennifer Lepies (Online), Dr. Wolfgang Stieler
Mitarbeiter dieser Ausgabe: Michael Brooks, Mureji Fatunde, Andreas Gaulke, Alex Cameron Hall, Grace Huckins, Julia Kloiber, Martin Kölling, Eike Kühl, Jens Lubbadeh, Kathryn Miles, Adam Piore, Samantha Schuyler, Veronika Szentpétery-Kessler, Christian Wölbart
Coverillustration: Matthias Timm

Infografiken: Steffi Martens, Matthias Timm

Fotoredaktion: Marei Stade (Ltg.), Lara Bögner

DTP-Produktion: Matthias Timm (Ltg.), Vanessa Bahr, Dörte Bluhm, Lara Bögner, Beatrix Dedek, Madlen Grunert, Lisa Hemmerling, Steffi Martens, Marei Stade, Ninett Wagner, Heise Medienwerk GmbH & Co. KG, Rostock

Hergestellt und produziert mit Xpublisher: www.xpublisher.com

Xpublisher-Technik: Kevin Harte, Thomas Kaltschmidt, Pascal Wissner

Verlag

yeebase media GmbH, Kriegerstraße 40, 30161 Hannover, Telefon: +49 (0) 511 16 59 44-0, Fax: +49 (0) 511 16 59 44-99

Herausgeber: Christian Heise, Ansgar Heise

Geschäftsführung: Jörg Mugke, Tobias Schäffer

Mitglied der Geschäftsleitung: Luca Caracciolo, Hagen Pfennigstorf

Anzeigenleitung: Sharlyn Franz, sharlyn.franz@yeebase.com,

Verena Schlüter, verena@pryntad.com, +49 (0) 40 46 89 71 470, media.t3n.de/vertrieb/TR_Mediadaten_2024_Pryntad.pdf

Anzeigenpreise: Es gilt die Preisliste vom 1. Januar 2024

Leiter Vertrieb und Marketing: André Lux

Vertriebsabteilung: 0511/53 52-157 (Aboservice: 0541/8 00 09-120),

Vertrieb Einzelverkauf: DMV der Medienvertrieb GmbH & Co. KG,

Meßberg 1, 20086 Hamburg; Tel. 040/3019-1800, Fax: 040/3019-1451815;

E-Mail: info@dermedienvertrieb.de

Sonderdruck-Service: Julia Conrades

Druck: Dierichs Druck + Media GmbH & Co. KG, Frankfurter Str. 168, D-34121 Kassel, ISSN 1613-0138

Aboservice

Heise Medien GmbH & Co. KG, Leserservice, Postfach 24 69, 49014 Osnabrück, Telefon: 0541/80009-120, Fax: 0541/800 09-122, E-Mail: leserservice@heise.de, Internet: www.heise.de/abo

Abonnement-Preise

Standardabo inkl. Versandkosten: Inland € 108,80, Österreich € 120,00, Schweiz CHF 204.00, restl. Europa € 128,00, im restl. Ausland

€ 134,40; ermäßigtes Abo für Auszubildende, Schüler und Studenten

(gegen Vorlage eines Nachweises) inkl. Versandkosten: Inland € 70,00,

Österreich € 77,20, Schweiz CHF 131.20, restl. Europa € 82,40, restl.

Ausland € 86,40. Das Plus-Abonnement – inkl. Zugriff auf die App für

iOS und Android, auf Heise Magazine (www.heise.de/magazine/tr)

sowie das Artikel-Archiv von Technology Review kostet pro Jahr € 9,20

(Schweiz CHF 8.00) Aufpreis. Der Bezug der Zeitschrift Technology

Review ist im Mitgliedsbeitrag des Verbandes BVIZ e.V., des hightech

presseclub e.V. und des Vereins Munich Network e.V. enthalten.

Für VDI-, VBIO-, VDE-, GI- (Gesellschaft für Informatik), bdvb e.V., /ch/

open und JUG Switzerland-Mitglieder gilt ein ermäßigter Preis: Inland

€ 81,60, Österreich € 90,00, Schweiz CHF 153.60, restl. Europa

€ 96,00, im restl. Ausland € 100,80 gegen Vorlage eines schriftlichen

Nachweises des Verbandes bzw. Vereins einmal pro Jahr. Eine Haftung

für die Richtigkeit der Veröffentlichungen kann trotz sorgfältiger Prü-

fung durch die Redaktion vom Herausgeber nicht übernommen wer-

den. Kein Teil dieser Publikation darf ohne ausdrückliche schriftliche

Genehmigung des Verlags in irgendeiner Form reproduziert oder unter

Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet werden. Für unverlangt

eingesandte Manuskripte kann keine Haftung übernommen werden.

Printed in Germany,

Copyright 2024 by Heise Medien GmbH & Co. KG

„Erfunden wurde Gaia-X vom Wirtschaftsministerium. Bei der IT-Strategie haben jedoch andere Ressorts das Sagen, allen voran Finanzen und Inneres. Und diese wollen nichts von EU-Providern und Open-Source-Cloud wissen.“

Christian Wölbart, c't-Redakteur, über die Stolpersteine auf dem Weg zur digitalen Souveränität (Seite 104)

Review

- 95 AUSPROBIERT • Mit der Curveplate die Kurve kriegen
- 96 HARDWARE • Fernglas mit KI, Energiewende als Baukasten und eine poetische Uhr
- 100 MEDIEN • *Leben im All*, Adam Frank • *How Life Works*, Philip Ball
- 102 MEINUNG • Zugdaten an der Grenze bitte aussteigen • Keine Cloud für Europa
- 106 DER FUTURIST • Verbotene Früchte

Die Kurve kriegen

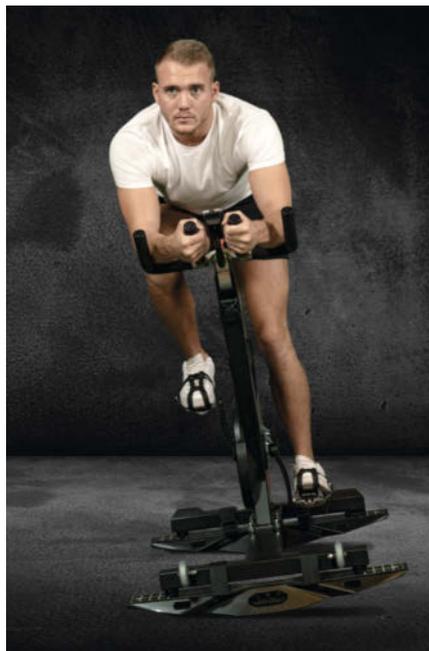
Die Curveplate will statischen Fahrrad-Heimtrainern Leben einhauchen, indem sie die schweren Geräte in die Kurve legt. Fühlt sich das wirklich an wie Radfahren?

Im Winter ist Radsport nichts für Feiglinge: Meist ist es dunkel, nass oder kalt oder alles gleichzeitig. Das muss man wollen – oder drinnen strampeln. Der Markt für Spinning-Räder oder Smart Bikes (wie zum Beispiel das Peloton) ist vielfältig. Im Vergleich zum Radfahren draußen haben diese Räder jedoch sämtlich einen Nachteil: Sie stehen fest und stabil, es bewegt sich nur der Fahrer oder die Fahrerin. Das ist ungewohnt und führt gerne mal zu Verspannungen und Gelenkproblemen.

Aus dem Grund trainiere ich im Winter mit einem auf einer Rolle installierten Straßenrennrad. Die Rolle steht auf einem Wackelbrett, um meine Hüftbewegungen auszugleichen und ein wenig mehr Straßenfeeling zu simulieren. Hier kommt die Curveplate ins Spiel, sie soll Ähnliches für starre Cycling-Ergometer leisten. Sie wird unter den Standfüßen des Bikes installiert und soll die Beweglichkeit eines echten Fahrrades ins Wohnzimmer bringen. Ich habe sie an einem Stages-Smart-Bike ausprobiert.

Die zwei Platten, aus denen die Curveplate besteht, sind leicht und machen einen sehr stabilen Eindruck. Es ist einfacher, sie mithilfe einer zweiten Person unter die Standfüße zu schieben, es geht aber auch allein. Auf den Platten sind Markierungen für die Standfüße eingezeichnet, damit das Rad auch in der Mitte steht. Befestigt werden die Standfüße mit Klettbindern. Das hat mich erst etwas skeptisch gemacht, jedoch grundlos – die Riemen halten das Rad stets fest und stabil auf den Platten.

Beim Aufsteigen auf das Rad musste ich etwas höher klettern als sonst, sitze aber wie gewohnt und merke gleich zu Beginn die leichten Bewegungen des Rades auf den gebogenen Platten. Als ich losfahre, bewegt sich das Rad im Takt der Tritte kaum merklich um



Sich „in die Kurve legen“ zu können, ist das namensgebende Prinzip hinter dem Ergometer-Upgrade Curveplate.

die Mittelachse, ganz so, als würde ich draußen fahren. Das ist sehr angenehm und nach ein paar Minuten fällt es mir kaum noch auf. Mein ganzer Körper bewegt sich fast wie auf dem Rad an der frischen Luft.

Trete ich etwas kräftiger in die Pedale oder fahre gar Sprints, verstärken sich auch die Bewegungen. Als ich mich das erste Mal in die Kurve lege, beschleicht mich ein mulmiges Gefühl: Ob ich wohl gleich zusammen mit dem schweren Rad auf der Seite liege? Erreicht das Rad jedoch eine gewisse Neigung, ist Schluss und die Bewegung endet sicher und sta-

bil. Dabei muss ich mich dann allerdings schon deutlich am Rad festhalten, denn was die Curveplate nicht kann, ist die Physik auszutricksen.

Wo draußen durch die Geschwindigkeit des Rades und die Drehung der Laufräder Flieh- und Kreiselkräfte die Neigung von Rad und Fahrer stabilisieren, wirkt drinnen ausschließlich die Schwerkraft. Das lädt nicht unbedingt dazu ein, sich beim Abfahren virtueller Strecken aktiv in die Kurven zu legen – das muss man aber auch nicht. Die leichten Ausgleichsbewegungen machen jedenfalls auch längere Fahrten wesentlich angenehmer. Vielleicht kann man die Beweglichkeit sogar nutzen, um zum Beispiel bei Spinning-Kursen zusätzliche Übungen für Kraft und Koordination einzubauen. Das habe ich allerdings nicht ausprobiert.

Wenn man mit einem stationären Cycling-Ergometer und nicht mit Rennrad und Rolle trainiert, macht die Curveplate längeres Ausdauertraining oder Fahrten auf virtuellen Trainingsplattformen angenehmer und ermüdungsärmer. Und vielleicht ist es nur Einbildung, aber auch nach einer Stunde auf den Curveplates tut mein Hinterteil ein bisschen weniger weh als sonst.



Andreas Gaulke ist Rennradfahrer und -trainer mit Herzblut, hat es aber im norddeutschen Winter gerne warm, trocken und virtuell bergig.

OPTIK

Naturführer am Auge

Das Swarovski AX Visio 10x32 verheiratet das Fernglas mit Informationen: Auf Knopfdruck erkennt es knapp 9000 Vogelarten, Säugetiere oder Insekten und zeigt den Namen der Geschöpfe vor dem Objektiv im Sichtfeld an. Möglich macht das eine 13-Megapixel-Kamera im Scharnier.

Das Motiv erkennt das Fernglas über eine integrierte KI, eine Internetverbindung ist nicht erforderlich. Auch Videos kann das Fernglas aufnehmen und direkt über Bluetooth an ein Smartphone senden. Zusätzlich kann auf Geräten in der Umgebung ein Live-Feed des Fernglases gestreamt werden. Die Elektronik soll eine Akkulaufzeit von bis zu 15 Stunden erreichen, der Akku ist zudem wechselbar.



Produkt: AX Visio 10x32
Hersteller: Swarovski
Preis: 4600 Euro



Produkt: Experimentierkasten Eco-Haus
Hersteller: Kosmos
Preis: 79 Euro

BILDUNG

Energiewende spielen

Ob Miniatur-Wärmepumpe, Photovoltaik oder ein winziger Rasenmäroboter: Der Experimentierkasten Eco-Haus von Kosmos führt Kinder spielerisch an die Energiewende heran und ist für ein Alter ab acht Jahren ausgelegt. Mit Experimenten zur Dachbegrünung, Wärmedämmung und solaren Energieerzeugung sollen Zusammenhänge zwischen moderner Haustechnik und den erneuerbaren Energien aufgezeigt werden. Die Anleitung enthält – ganz im Sinne des Ökogedankens – außerdem Tipps, wie die Inhalte des Experimentierkastens wiederverwertet werden können.

KÜNSTLICHE INTELLIGENZ

Schlaues Kaninchen

Künstliche Intelligenz im Hosentaschenformat – das soll Rabbit r1 sein, ein KI-Gadget für den Alltag. Rabbit interagiert mit Apps, Programmen oder Websites, indem es die menschliche Bedienung der Benutzeroberfläche nachahmt. So ist die KI durch genug Training mit jeder Anwendung kompatibel, nicht nur mit ausgewählten Apps. Die Ausführung der Befehle erfolgt in der Cloud von Rabbit.

Die Bedienelemente beschränken sich auf einen Touchscreen, ein Scrollrad, einen Button zur Spracherfassung und eine Acht-Megapixel-Kamera. Wer etwas vom Rabbit wissen will oder eine Aufgabe für ihn hat, spricht einfach ins Mikro – oder zeigt ihm den geöffneten Kühlschrank, um sich Vorschläge für das Abendessen geben zu lassen. Neben WLAN ist ebenfalls ein Slot für SIM-Karten verbaut, da das Gerät auf die Verbindung zur Cloud angewiesen ist.



Produkt: r1
Hersteller: Rabbit
Preis: 185 Euro

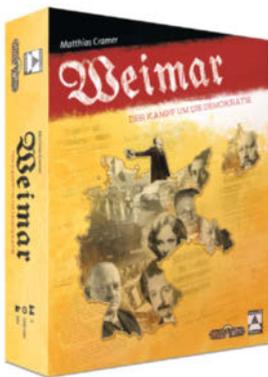


SPIELE

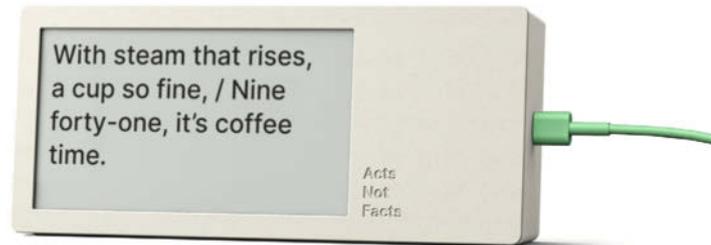
Geschichte umschreiben

Ein normales Brettspiel ist Weimar nicht, eher eine interaktive Geschichtssimulation – mit einer Spielzeit von sechs Stunden. Vier Spieler schlüpfen in die Rollen der Parteien SPD, KPD, DNVP und Zentrum. Ziel ist es, die eigene Partei an die Macht zu bringen und den Aufstieg der Nationalsozialisten zu verhindern.

Im Parlament ringen die Spielenden um die Ausrichtung der nationalen Politik. Und teilweise agieren sie auf den Straßen, wo sie mit Ereignissen während der Weimarer Republik konfrontiert werden. Diese erfordern oft harte Entscheidungen, beispielsweise ob Truppen entsendet werden, um Demonstrationen niederzuschlagen.



Produkt: Weimar
 Hersteller: Skellig Games
 Preis: 129 Euro,
 Versand ab August



Produkt: Poem/1
 Hersteller: Acts Not Facts
 Preis: 169 US-Dollar, Versand ab August

UHREN

Zeit für Poesie

Was geschieht, wenn man eine Uhr mit ChatGPT kreuzt? Es entsteht die Poem-Clock. Ist der unscheinbare weiße Plastikkasten mit dem WLAN verbunden, erwacht das E-Paper-Display zum Leben und zeigt einen Reim, der die genaue Zeit enthält. Jede Minute generiert die Poem/1 per ChatGPT einen neuen Vers. Blind verlassen sollte man sich auf den Dichter im Regal aber nicht: In seltenen Fällen lügt die KI bei der Uhrzeit, um einen sinnigen Reim zu erzeugen. Um ein Abo wie bei so vielen KI-Services muss sich der Käufer hier nicht sorgen, ein Teil des Kaufpreises geht in die Serverkosten – für mindestens fünf Jahre. Technisch versierte Nutzer können ändern, woher die Uhr die Reime bezieht, um so eigenen Text anzuzeigen.

ELEKTROMOBILITÄT

Urbaner Flitzer

Der CE 02 ist BMWs Antwort auf die wachsende Nachfrage nach elektrischen City-Flitzern. Das E-Bike zielt auf Autofahrer ohne Motorradführerschein ab, denn es darf auch mit Autoführerschein gefahren werden. Zusätzlich ist noch eine Fahrschulung, aber keine Prüfung nötig. Die großen Reifen sollen den Fahrkomfort maximieren, auch bei schlechtem Untergrund wie Kopfsteinpflaster. Erhältlich ist der CE 02 als Motorroller mit einer Reichweite von 45 Kilometern und maximal 45 km/h sowie als Leichtkraftrad mit einer Reichweite von 90 Kilometern und einer Höchstgeschwindigkeit von 95 km/h. Aufgeladen werden kann das Fahrzeug bisher nur an der Haushaltssteckdose – ein Adapter für Ladesäulen sei in Arbeit.



Produkt: CE 02
 Hersteller: BMW
 Preis: 8500 Euro

POSTLEITZAHL 1

**12459 Berlin**

Optische Technologien, Mess- und Feingerätetechnik, Bio- und Medizintechnik, Umwelt- und Energietechnik, Gerätebau

Technologie- und Gründerzentrum Schöneweide

Gründen und mieten in Schöneweide.

Moderne Büro-, Labor- und Werkstattflächen auf ca. 20.000 m². Coworking-Arbeitsplätze, Konferenz- und Seminarräume, Empfangs- und Sicherheitsdienst sowie Kantine mit Dachterrasse.

Tel.: 030 6576-4420

E-Mail: info@corona-immobilien.de

www.tgs.berlin

**14476 Potsdam**

Biowissenschaft, Diagnostik, Chemie, Polymere, Physik, Optik, Informatik

Potsdam Science Park

Wir bieten: 18.000 m² Mietflächen für Labore und Büros, 3 ha verfügbare Gewerbeflächen, Startup Space, Startup Academy, Welcome Service, Sprachschule, Transferservice, sowie eine hochmoderne Forschungsinfrastruktur durch die Konzentration exzellenter wissenschaftlicher Einrichtungen. Sprechen Sie uns an!

Standortmanagement Golm GmbH

Am Mühlberg 11

Tel.: +49 331 237351135

E-Mail: info@potsdam-sciencepark.de

www.potsdam-sciencepark.de

**12555 Berlin**

Umwelt- und Energietechnik, Bio- und Medizintechnik, Optoelektronik und Informationstechnologie

Technologie- und Gründerzentrum**Innovationspark Wuhlheide**

Gründen – Mieten – Bauen

Modern ausgestattete Büro-, Werkstatt-, Werkhallen- und Laborflächen auf ca. 50.000 m², Konferenzraumservice, individuelle IT-Lösungen und Bistro.

Tel.: 030 6576-4420

E-Mail: info@corona-immobilien.de

www.ipw-berlin.info

POSTLEITZAHL 3

**34131 Kassel**

Produktions-/Verfahrenstechnik, Technische Dienstleistungen, Informationstechnologie

FIDT Fördergesellschaft für innovative Dienstleistungen und Techniken mbH

Top-Standort für den Einstieg in den Markt, perfekte Verkehrsanbindung. Breitband-IT-Infrastruktur, flexible Flächen von 13 – 200 m², vernetzt im Haus und in der Region.

Tel.: 0561 93897-0

www.fidt.de

Unser Service für Technologiepartner

Die Rubrik „Technologiepartner“ ist eine Plattform für Technologie- und Gründerzentren sowie für Technologieparks. Als Technologie- und Gründerzentrum haben Sie die Möglichkeit, die Leser von MIT Technology Review auf Ihr Zentrum und Ihre Dienstleistungen aufmerksam zu machen.

POSTLEITZAHL 3

**35394 Gießen**

u. a. Biotechnologie, IT, Kreativwirtschaft,
Social Entrepreneurship, Umwelt- und Nachhaltigkeit,
Kommunikation u. Marketing

Technologie- und Innovationszentrum**Gießen GmbH**

Büro-, Labor- und Lagerflächen für Startups, Beratung,
Weiterbildung, Events, Coworking, Foto- und Videostudio,
Prototyping, Makerspace, kostenfreie
Seminarräume und Parkplätze.

Tel.: +49 641 948226-0

Fax: +49 641 948226-29

E-Mail: info@tig-gmbh.de

www.tig-gmbh.de

POSTLEITZAHL 4

**40225 Düsseldorf**

Biotechnologie, Medizintechnik, Chemie / Pharma,
Umweltschutz

Life Science Center Düsseldorf

Büros und Labore (bis S2-Standard) für Existenz-
gründer & etablierte High-Tech-Firmen und Dienstleister;
Universitätsnähe; Netzwerk von Experten aus Wissen-
schaft, Wirtschaft & Finanzen

Dr. Thomas Heck

Tel.: 0211 913147-50

E-Mail: heck@lsc-dus.de

www.lsc-dus.de

POSTLEITZAHL 5

**50829 Köln**

Biotechnologie / Pharma, Medizintechnik,
Chemie, IKT, Cleantech

BioCampus Cologne / RTZ Köln

Der BioCampus Cologne – einer der größten Biotechno-
logieparks Deutschlands – gemeinsam mit dem RTZ
Köln. Wir bieten innovativen Unternehmen die perfekte
Infrastruktur an einem international führenden Techno-
logie-Standort. Vom Gründer bis zum Global Player – bei
uns finden sie optimale Wachstumsbedingungen inmit-
ten der Rheinmetropole.

André van Hall

Tel.: +49 221 93336-0

E-Mail: info@biocampuscologne.de

www.biocampuscologne.de

www.rtz.de

POSTLEITZAHL 8

**86159 Augsburg**

Wasserstofftechnologie, Carbonfasertechnologie, Luft-/
Raumfahrt, Mechatronik, Automation, Robotik, 3D Druck,
Umwelttechnologie, Ressourceneffizienz.

Der Augsburg Innovationspark:

Wir beschleunigen Innovationen inProduktionsfirmen!

70 Hektar Flächenneben der Universität, 14 Technologie-
Forschungseinrichtungen, ein Technologiezentrummit
3000 m² Technikumsflächen sowie Event-Flächen. Erster Ein-
druck hier, YouTube: „Augsburg Innovationspark Imagefilm“

Tel.: 0821 809030-40

E-Mail: info@augzburg-innovationspark.com

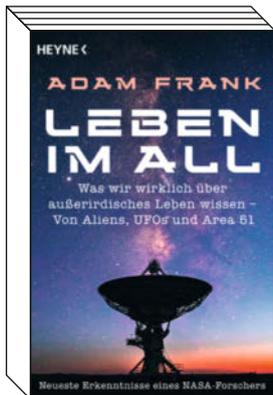
www.augszburg-innovationspark.com

MIT Technology Review: Angebot für Technologiepartner

Mit einem Eintrag unter der Rubrik „Technologiepartner“ haben Sie monatlich die Möglichkeit, die Leser von MIT Technology Review auf Ihr Zentrum/Ihre Dienstleistungen aufmerksam zu machen. Ihr Angebot wird nach Postleitzahlen sortiert aufgenommen. Für einen Jahreseintrag (5 Zeilen à 40 Zeichen + Logo) berechnen wir exklusiv nur 1200 Euro (zzgl. MwSt.). Gerne sende ich Ihnen Informationen und Unterlagen zu, ich freue mich auf Ihre Anfrage.

Adam Frank liebt Aliens, erforscht außerirdisches Leben und nimmt seine Leser mit auf einen amüsanten Trip durch die UFO-Geschichte, zu SETIs Radioteleskopen und auf Exoplaneten. – Jo Schilling

Ist da jemand?



Adam Frank: Leben im All.
Was wir wirklich über außerirdisches
Leben wissen – Von Aliens,
UFOs und Area 51, Heyne, 288 Seiten,
18 Euro (E-Book 12,99 Euro)

Kennen Sie das, wenn Sie ein Buch lesen und das Gefühl haben, eigentlich mit dem Autor in einer netten Bar zu sitzen und sich amüsant zu unterhalten? Dabei beschleicht Sie dann das angenehme Gefühl, dass Ihr Gegenüber dazu noch sehr klug ist und Ihre Neuronen gerade völlig schwerelos mit ziemlich abgefahrenem Kram füttert? So fühlt sich die Lektüre von *Leben im All. Was wir wirklich über außerirdisches Leben wissen – von Aliens, UFOs und Area 51* von Adam Frank an.

Frank ist – wie er gleich auf der ersten Seite schreibt – seit seiner Kindheit „besessen“ von Aliens. Das sind viele, aber nur wenige dieser Besessenen werden Astrophysiker. Und noch weniger von ihnen leiten Forschungsgruppen bei der NASA, die sich mit Technosignaturen, also den Anzeichen fortgeschrittener Zivilisationen auf fremden Planeten, beschäftigen.

Mein Gesprächspartner ist also kein einfacher UFO-Freak, auch wenn sich die ersten 60 Seiten seines Buches mit der Geschichte der menschlichen Auseinandersetzung mit außerirdischem Leben beschäftigen. Das Fermi-Paradoxon und die Drake-Gleichung nutzt er geschickt, um seiner Leserschaft zu vermitteln, welche Rolle die Wissenschaft in einem Feld spielt, das bis vor Kurzem nur von Überzeugungen ohne faktischen Unterbau geprägt war. Frank rollt charmant auf, wie unser Bild von Aliens entstanden ist (die fliegenden Untertassen waren ein Stille-Post-Phänomen, nachdem der Hobby-Pilot Kenneth Arnold 1947 seltsame sichelförmige Flugobjekte gesichtet hatte) und was der „Kicherfaktor“ grüner Männchen für die ernst-

hafte Suche nach außerirdischem Leben bedeutete (beinahe das Aus).

Aber nun – so Frank – sei die Zeit reif, wissenschaftlich fundiert nach außerirdischem Leben zu suchen. Und er nimmt seine Leserinnen und Leser mit auf eine Logikreise, die anfangs immer wieder in die Vergangenheit abdriftet. Habitable Zonen, die Kardaschow-Skala, Dyson-Sphären – diese Konzepte sind die Grundlage, wenn es um Exoplaneten, die Entstehung von Leben oder um UAPs geht („Unidentified Aerial Phenomena“ ist die neue, politisch korrekte Bezeichnung für das, was früher UFOs waren). Er erklärt leicht verständlich, witzig und spricht mich immer direkt an.

Mit der Zeit stellt sich beim Lesen allerdings die Frage: Was wissen wir denn nun und weshalb ist Frank so hoffnungsfroh, dass wir bald mehr wissen werden? Ich bin kurz davor, von meinem Barhocker zu steigen, dann, endlich, kommt das Kapitel: „UFOs ernsthaft auf den Grund gehen; wie eine richtige wissenschaftliche Untersuchung aussieht“. Ab hier nimmt die Forschung Fahrt auf. Es geht um Grenzen der Physik, der Biologie, um Dimensionen und um den Abschied von der Vorstellung, dass Aliens uns bereits besucht haben oder demnächst besuchen werden.

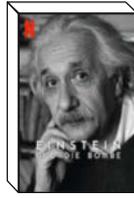
Und dann kommen wir zum Kern der Geschichte: der modernen, gezielten Suche nach außerirdischem Leben da draußen. Herzstück der Hoffnungen ist die Tatsache, dass 2000 der erste Exoplanet entdeckt wurde. Es gibt also um Sonnen fliegende Brocken, die theoretisch Leben beherbergen könnten. Und damit gibt es endlich wirklich etwas zu suchen.

ZEITGESCHICHTE

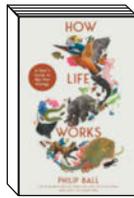
Einsteins Angst

Was Einstein mit der Atombombe zu tun hat, ist schwer zu fassen. Er war Pazifist, hat an keinem Forschungsprogramm teilgenommen und war dennoch – Kraft seiner Prominenz – ein wichtiger Faktor bei der Entstehung der Bombe: mit einem 1939 verfassten Brief an US-Präsident Roosevelt. Darin empfiehlt er, das amerikanische „Atomprogramm schnellstmöglich voranzutreiben“.

Die Netflix-Doku *Einstein und die Bombe* beleuchtet die Hintergründe dieses Schritts. Sie rollt den Weg des Schweizer Juden in das Exil auf. Wir beobachten ihn während seines kurzen Asyls in einer Holzhütte im britischen Roughton und wie es zu seiner Rede in der Albert Hall und zur anschließenden Flucht in die USA kam. Die Doku zeichnet Einsteins Weg mit nachgestellten Szenen und Originalaufnahmen nach. Jedes Wort aus dem Mund des Darstellers soll jedoch – so der Vorspann – von Einstein stammen. Der Dokumentation gelingt es, Einsteins innere Konflikte, seine Zerrissenheit – letztlich die Menschlichkeit und Unzulänglichkeit des Genies – sichtbar zu machen. – Jo Schilling



Einstein und die Bombe, Netflix-Dokumentation



Philip Ball: *How Life Works*, Chicago University Press, 560 Seiten, 27,50 Euro (E-Book 12,99 Euro)

BIOLOGIE

Mehr als Maschinen

Der Wissenschaftsjournalist Philip Ball veröffentlicht in einem schwindelerregenden Tempo extrem fundierte Sachbücher zu einer verblüffend breiten Themenpalette. In *How Life Works* will er nichts weniger als das neue Bild der Genetik und der Zellbiologie zeichnen, das sich in den vergangenen 20 Jahren herauskristallisiert hat. „Das neue Bild widerlegt die seit langem bestehende Vorstellung, dass lebende Systeme als Maschinen betrachtet werden müssen“, schreibt Ball. „Es hat noch nie eine von Menschenhand geschaffene Maschine gegeben, die so funktioniert wie Zellen.“ Und wie Ball über Chromosomen, DNA, Genregulierung, Netzwerke und Proteine schreibt, ist spannend, lehrreich und manchmal macht es ein bisschen schwindelig im Kopf.

Einen Fehler hat er allerdings gemacht: Der Titel verspricht mehr, als das Buch einlösen kann. Wer wissen will, wie „das Leben funktioniert“, ist nach der Lektüre zwar schlauer, aber der Antwort nur ein bisschen näher. Denn die hat im Moment keiner. Nicht einmal Philip Ball. – Wolfgang Stielner

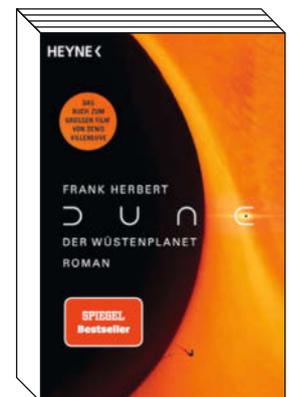
KLASSIKER NEU GELESEN

Aufstand in der Wüste

Die Science-Fiction-Trilogie um den Wüstenplaneten *Dune* von Frank Herbert galt lange als unverfilmbar. Nun ist sie von Regisseur Denis Villeneuve in eine Art düstere Wagner-Oper verwandelt worden, mit tragischen Helden, vielen Kämpfen, Feuer und Blut. Im Kern dreht sich die Geschichte um Paul Atréides, einen jungen Adeligen, dessen Familie bei einem Überfall auf den Wüstenplaneten Arrakis getötet wird und der sich an seinen Feinden mithilfe der Wüstenbewohner, den „Fremen“, rächt. *Dune Part 2* erzählt die Geschichte dieses Rachefeldzugs, in dessen Verlauf Paul zum „Mahdi“ aufsteigt, einer prophetischen Erlöser-Gestalt, um den „Dschihad“, den „heiligen Krieg“ gegen die Kolonisatoren des Planeten zu entfesseln.

Doch unter der Oberfläche steckt mehr: Jede gute fantastische Erzählung reflektiert zentrale Ideen und Probleme der Zeit, in der sie entstanden ist, und bricht sie in den bunten Facetten einer fiktiven Welt. Natürlich ist das auch mit *Dune* so. Der erste Teil von *Dune* ist 1965 erschienen. Mitte der 1960er-Jahre stellte US-Präsident John F. Kennedy die Doktrin auf, dass die USA den ehemaligen Kolonien der sogenannten Dritten Welt helfen müssten, sich aus ihrer Rückständigkeit heraus zu vollwertigen, modernen Demokratien zu entwickeln. Die Geschichte des – weißen – Außenseiters Paul, der den Fremden als religiöser Führer das Paradies verspricht, nur um sie für seine Zwecke zu verheizen, lässt sich durchaus als Kritik dieser Doktrin lesen. Wenig überraschend sind die zentralen Themen der Trilogie zudem Drogen und Bewusstseinsweiterung und Ökologie.

Das geht im Getöse des Films allerdings ein wenig unter. Es lohnt sich daher durchaus, noch einmal einen Blick in die Bücher zu werfen. Schon allein, um zu sehen, wie Herbert sich exzessiv zahlreicher Sprachen, Religionen und Mythen bedient hat – „Arrakis“, der Name des Wüstenplaneten, stammt beispielsweise aus dem Persischen, „Shai Hulud“, die Fremden-Bezeichnung für die großen Sandwürmer der Wüste, spielt mit arabischen Begriffen. Man muss allerdings etwas Zeit mitbringen. Allein die ersten drei Bücher haben rund 1700 Seiten – und die zweite Trilogie um *Dune* aus den 1980er-Jahren ist nicht kürzer. – Wolfgang Stielner



Frank Herbert: *Dune – der Wüstenplanet*, Heyne, 800 Seiten, 12,99 Euro (E-Book 9,99 Euro)

Alle Daten bitte aussteigen!

Echtzeitdaten zu Zugverspätungen werden teilweise immer noch nicht zwischen europäischen Nachbarländern ausgetauscht. Dabei gäbe es eine einfache Abhilfe.

„Ich rechne damit, dass wir 2021, 2022 oder 2023 so weit sind, dass wir in Teilen unseres Netzes vollautomatisch fahren können“, sagte der damalige Bahnchef Rüdiger Grube 2016 in einem FAZ-Interview. Ziemlich schlecht gealtert, diese Aussage. Heute sind autonome Züge – zumindest im Fernverkehr – nicht nur nicht in Sicht: Der Bahn fehlen immer noch die grundlegendsten digitalen Daten.

Das durfte ich erleben, als ich kürzlich mit der Bahn von Kopenhagen nach Hannover gefahren bin. Der EC 399 fuhr in Kopenhagen schon mit mehr als einer Stunde Verspätung ab. Davon wussten aber weder der DB-Navigator noch die Bahn-Webseite. Sie wähten den Eurocity schon in Odense, als er Kopenhagen noch nicht einmal verlassen hatte. Erst als der Zug eigentlich die deutsche Grenze hätte passieren sollen, zeigten sie plötzlich die reale Verspätung an. Zu diesem Zeitpunkt war sie schon seit rund dreieinhalb Stunden bekannt. Hätte man rechtzeitig eine Brieftaube vorausgeschickt (circa 200 Kilometer Luftlinie), hätten die Bahngäste deutlich früher gewarnt werden können.

Kann es tatsächlich sein, dass im Jahr 2024 keine Echtzeitdaten zwischen allen europäischen Nachbarländern ausgetauscht werden? Genauso ist es, bestätigt die Bahn: „Mit vielen europäischen Bahnen gibt es bereits Kooperationen für den Austausch von Echtzeitdaten (ÖBB, SBB, SNCF)“, teilt eine Bahnsprecherin mit. „Die dänische Bahn gehört hier tatsächlich noch nicht dazu. Wir sind aber mit den entsprechenden Partnern im Austausch, um weitere Daten zu integrieren.“ Die besondere Ironie dabei: Die dänischen Echtzeitdaten sind durchaus öffentlich zugänglich, beispielsweise über Websites wie zugfinder.net. Nur eben nicht über das System der Bahn.

Der Journalist und Verkehrsaktivist Jon Worth (siehe TR 5/2023, S.26), der sich wie kein Zweiter mit dem grenzüberschreitenden Bahnverkehr in Europa auskennt, erlebt dieses Problem regelmäßig: „An den Grenzen zu Tschechien und Österreich ist es dasselbe.“ Es gebe zwar prinzipiell ein System zum Austausch von Echtzeitdaten zwischen den mitteleuropäischen Eisenbahnen. „Aber in den letzten zwölf Monaten habe ich nie gesehen, dass es richtig funktioniert.“

Das Kommunikationschaos kann mitunter absurde Ausmaße annehmen. Als ich im letzten Herbst aus Südtirol nach Hause fahren wollte, bekam ich einen Tag vor der Rückfahrt eine automatisch generierte Mail von der Deutschen Bahn, dass es mit der Verbindung irgendwelche Probleme gebe. Nur: Nirgendwo war herauszufinden, bei welchem Zug denn nun – der von Brixen nach München oder von München nach Hannover? Das ist ja nicht ganz unwesentlich, wenn man seine Reisepläne ändern will. Doch nicht einmal die DB-Hotline wusste eine Antwort. Am nächsten Morgen dann – Überraschung! Der Zug nach München fällt komplett aus. Irgendein Informationsbruchstück hatte es also offenbar durch das System von Italien nach Deutschland geschafft und dort eine automatische Mail getriggert. Aber die genaue Ursache war nicht einmal für die Hotline zu ergründen.

Gewiss, dies sind nur Anekdoten. Aber regelmäßige Bahnfahrer dürften bestätigen: Diese Anekdoten sind durchaus repräsentativ.

Mögliche Lösungen gibt es in zwei Geschmacksrichtungen: ausgeklügelt und aufwendig – oder quick and dirty. Die aufwendige Lösung besteht im sogenannten European Train Control System (ETCS). Dort werden Ortungsinforma-



Ein Zug im Nirgendwo – und die Bahn-App weiß leider häufig auch nicht, wo er gerade steckt.

tionen über „Balisen“ ermittelt – kleine Sender, die fest an den Gleisen angebracht sind.

Allerdings wurde das ETCS in den vergangenen Jahren nur schleppend ausgebaut. Bis 2030 will die Bahn deutschlandweit 8000 Streckenkilometer damit ausrüsten. Im Moment sind es erst 500. „Es geht alles viel zu langsam“, sagt Sören Claus, Geschäftsführer des Forschungsverbunds Smart Rail Connectivity Campus (SRCC) in Annaberg-Buchholz. „Es gibt zu wenig Investitionsmittel und zu wenig Investitionssicherheit.“

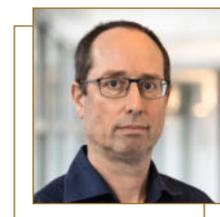
Doch ließe sich ein Zug nicht auch per Satellit genau genug orten, ganz ohne Balisen? Dazu gab es ebenfalls ein Forschungsprojekt. Es fand zum Teil auf Sardinien, zum Teil im Erzgebirge statt. „Auf Sardinien lief es noch ganz gut, aber im Erzgebirge war es nur halb erfolgreich“, sagt Claus. Wetter, Wald und Berge hätten die Genauigkeit zu stark beeinträchtigt. Dazu kommt noch die Angst vor Hacker-Angriffen auf die Satellitensignale.

All dies erklärt, warum es mit autonomen Fernzügen so bald nichts wird. Doch es ist keine Entschuldigung dafür, dass die Deutsche Bahn nicht weiß, wo ihre eigenen Züge stecken – auch nicht, wenn sie im Ausland sind. Praktisch jedes noch so abgerockte Leihrad wird via GPS zuverlässig getrackt. Das sollte doch auch mit kompletten Zügen funktionieren. Dazu würde schon ein altes Smartphone an Bord reichen, das regelmäßig seine Position durchgibt.

Aber die Zuverlässigkeit! Aber die Genauigkeit! Aber die Tunnel! Aber die Funklöcher!, schallt es mir an dieser Stelle wahrscheinlich entgegen. Zu einer ordentlichen Bahn-Infrastruktur gehören Tests, Zertifikate, Standards, Protokolle, Gesetze, Gremien, Verträge!

Das mag für sicherheitskritische Funktionen tatsächlich so sein. Aber in diesem Fall geht es nicht um Sicherheit, sondern um Service. Hier wäre eine Quick-and-dirty-Lösung allemal besser als gar keine. Mag ja sein, dass GPS & Co. mal um zehn Meter danebenliegen. Bei meiner Fahrt durch Dänemark lagen die Bahn-Daten aber mehr als hundert Kilometer daneben. Es kann doch nicht sein, dass die Tiers, Limes und Bolts dieser Welt besser über ihre Flotten Bescheid wissen als der riesige Bahn-Konzern.

Die Katze beißt sich hier regelmäßig in den Schwanz. Quick-and-dirty-Lösungen kommen nicht, weil dirty. Außerdem sind ja ausgeklügelte und aufwendige Lösungen in Sicht. Aber die kommen auch nicht, weil aufwendig. Das Warten auf eine perfekte Technik darf kein Vorwand sein, sich bis dahin mit hirnerweichend dummer Technik abzufinden.



Gregor Honsel, TR-Redakteur, hält der Bahn die Treue – auch, wenn es manchmal schwerfällt.

Keine eigene Cloud für Europa

Mit Gaia-X wollte die Bundesregierung die digitale Souveränität Europas stärken und die heimische Wirtschaft fördern. Doch das versprochene Ökosystem aus zertifizierten Clouddiensten lässt weiter auf sich warten.

Gaia-X – da dürften bei den meisten IT-Interessierten dunkle Erinnerungen an ein nebulöses Projekt der Bundesregierung aufploppen. Irgendwas mit Cloud, aber europäisch, also etwas teurer als bei den Amis, dafür ohne NSA.

Viel klarer lässt sich auch leider nicht sagen, was Gaia-X sein sollte. Denn als Wirtschaftsminister Peter Altmaier das Projekt 2019 vorstellte, blieben seine Ausführungen schwammig und widersprüchlich. Er versprach eine „souveräne europäische Dateninfrastruktur“. Die heimischen Anbieter wollte er stärken, aber Microsoft & Co. bloß nicht ausschließen. Einen „Airbus der künstlichen Intelligenz“ streute er auch noch ein.

Auch später, als europäische Konzerne wie die Telekom das Ruder bei Gaia-X übernahmen, blieb das Konzept wolkig. Interoperable Clouddienste, Datenschutz, vernetzte Kataloge ... Gaia musste für all das und noch mehr herhalten.

Mittlerweile hinkt das zentrale Vorhaben den ursprünglichen Zeitplänen weit hinterher. Zudem zoffen Beteiligte sich immer wieder über die Rolle der Hyperscaler, also der dominanten US-Cloudanbieter Amazon, Microsoft und Google. Diese nutzen das Durcheinander gekonnt aus, um Sand ins Getriebe zu steuern. „Die haben ausreichend Berater und abgestellte Vollzeitmitarbeiter, die alles infrage stellen können. Oder überall Bedingungen einbauen können“, schimpfte Yann Lechelle, Chef des mittlerweile ausgetretenen französischen Hosters Scaleway, Ende 2021 in einem Interview mit dem Magazin c't. Die Hyperscaler hätten das Projekt „strategisch torpediert und in Richtung eines Papiermonsters gepusht“, bestätigt auch Frank Karlitschek, Chef des Stuttgarter Open-Source-Unternehmens Nextcloud, gegenüber c't.

Doch es wäre falsch, Gaia-X bereits als gescheitert zu bezeichnen. Zählt man die Projekte hinzu, die von der Politik im Zusammenhang mit Gaia-X gefördert werden, aber faktisch nur lose angekoppelt sind, sind erste Erfolge sichtbar. Da ist etwa der „Sovereign Cloud Stack“, der es erleichtern soll, Clouddienste über mehrere Betreiber zu verteilen und zu migrieren. Oder Catena-X, ein gemeinsamer Datenraum für Autohersteller und Zulieferer, um etwa CO₂-Daten einfacher als bisher über die gesamte Lieferkette sammeln zu können.

In diesem Jahr laufen die ersten Förderprojekte aus. Dann wird es spannend. Manche hoffen, dass der Staat das

Ökosystem weiter anschiebt, indem er Gaia-X-konforme Dienste einkauft, etwa für Behörden oder den Gesundheitssektor. Die Ampel scheint sich aber kaum noch für das Vorhaben der Vorgängerregierung zu interessieren. Im Koalitionsvertrag taucht „Gaia-X“ nur ein Mal auf: im Zusammenhang mit Agrardaten.

Ein Problem ist auch das Ressortprinzip: Erfunden wurde Gaia-X vom Wirtschaftsministerium. Bei der IT-Strategie haben jedoch andere Ressorts das Sagen, allen voran Finanzen und Inneres. Und diese wollen nichts von EU-Providern und Open-Source-Cloud wissen. Stattdessen setzen sie sich lieber bei den Hyperscalern in den goldenen Käfig. Zum Beispiel fädelt das Finanzministerium eine Microsoft-Cloud für Bund und Länder ein. Das Innenministerium schloss einen 3,9-Milliarden-Euro-Deal mit Oracle. Zum Vergleich: Für Projekte im Gaia-X-Umfeld gibt es rund 300 Millionen Euro Fördergelder.

Gleichzeitig kapern die Hyperscaler den Slogan der „digitalen Souveränität“ und werben nun selbst mit „souveränen Clouds“. Marketing konnten sie schon immer. Gut denkbar ist, dass sie ihre proprietären Clouddienste in Zukunft mit einem Gaia-X-Stempel versehen. Die Mindestanforderungen sind dafür lax genug. Spätestens dann wäre die ursprüngliche Vision, die europäischen Player zu stärken, ad absurdum geführt. Bleibt zu hoffen, dass Trump nicht wiedergewählt wird und der Bundesregierung beim nächsten Handelsstreit einfach den Stecker zieht.



Christian Wölbart ist c't-Redakteur und taucht regelmäßig in die Abgründe der öffentlichen Digitalisierung ein.

ORGANSPENDE

Bisschen unheimlich, aber unheimlich hilfreich

Wer denkt schon gerne über das eigene Ableben nach? Immer wieder, wenn die Diskussion über mangelnde Spenderorgane aufs Tapet kommt, sind diese Gedanken aber gefragt. Ein guter Anlass: Der Start des „Online-Registers mit Entscheidungslösung“ am 18. März wurde verkündet.

Im Grunde bedeutet das Register nur, dass der bekannte Organspendeausweis nun online ausgefüllt werden kann und im Fall der Fälle niemand im Portemonnaie des Sterbenden danach wühlen muss. Für das Personal in den Kliniken ist es sicher ein Fortschritt – mehr Organspendewillige sind durch die Neuerung aber wohl nicht zu erwarten. Zumal die Widerspruchslösung – nach der man automatisch als spendenwillig gilt, widerspricht man nicht ausdrücklich – hierzulande nicht in Sicht ist. Dabei verzeichnete etwa Spanien mit Widerspruchslösung im letzten Jahr fast 50 posthume Organspendenden je eine Million Einwohner, in Deutschland waren es nicht einmal elf.

Für Deutsche, deren Leben davon abhängt, ist das fatal. Allein an der Medizinischen Hochschule Hannover (MHH) warten laut einem Mediziner dort zurzeit etwa 1000 Patientinnen und Patienten, darunter auch Kinder und Jugendliche, auf ein Spenderorgan – viele von ihnen leider vergeblich.

Womöglich hilft es, sich für ein Leben nach dem Tod zu entscheiden – auch wenn es das eines anderen Menschen ist –, wenn man wie ich so einen Fall persönlich kennt. Die Leber eines Verstorbenen hat einer Bekannten viele Jahre Leben geschenkt und auch der Familie frühes Leid erspart. Bei mir kommt

noch hinzu, dass ich schon lange eine Verfechterin des Recyclings bin – auch was meinen Körper betrifft: Was noch taugt, bitte sehr gerne wiederverwenden, und alles andere am Ende klimafreundlich kompostieren oder pyrolysieren.

Auch den Tod aus der Tabuzone zu holen, könnte die Hürde, sich mit dem Thema auseinanderzusetzen, senken. Die Aktion des Vereins Junge Helden, der ein Tattoomotiv für willige Spenderinnen und -spender entworfen hat und damit unter anderem für mehr Sichtbarkeit des Themas sorgt, ist daher nur zu begrüßen. Und nicht nur Freunden der Statistik hilft bei einer Entscheidung womöglich folgende Botschaft: Die Wahrscheinlichkeit, selbst ein Spenderorgan zu brauchen, ist deutlich höher, als nach dem Tod selbst Organspender zu werden.



Andrea Hoferichter hat ihren Organspendeausweis schon vor vielen Jahren unterschrieben – mit nur leicht mulmigem Gefühl.

TECHNIKUNTERRICHT MACHT ENDLICH SPAS!



Make:Education

Mit **Make Education** erhalten Sie jeden Monat kostenlose Bauberichte und Schritt-für-Schritt-Anleitungen für einen praxisorientierten Unterricht:



Für alle weiterführenden Schulen



Fächerübergreifend



Digital zum Downloaden



Monatlicher Newsletter

Jetzt kostenlos downloaden: make-magazin.de/education

Verbotene Früchte

„Tachchen, sind Sie hier der Inhaber?“

David Demain war so überrascht über das Auftreten der drei Polizisten in seinem Laden, dass ihm die Gurken aus der Hand fielen und über den Boden rollten. Eine Gurke beendete ihren Lauf direkt an dem Schuh einer älteren Dame. Die blickte ebenfalls erschreckt auf die Uniformierten. Erst jetzt bemerkte David, dass einer von ihnen eine Sackkarre dabei hatte.

„Ja, das ist mein Laden. Wie kann ich Ihnen helfen?“

„Verkaufen Sie Linsen?“, fragte einer der Beamten. Er sah nicht aus, als ob er heute Abend Linsensuppe kochen wollte.

„Ja. Natürlich. Wir haben Berglinsen, rote Linsen, gelbe Linsen, Beluga ...“

„Ihr gesamter Linsenbestand ist hiermit beschlagnahmt. Es besteht eine unmittelbare Bedrohung der öffentlichen Sicherheit.“

Linsen – ein Sicherheitsrisiko? Was war hier los? Bevor er Fragen stellen konnte, fingen sie an, den Laden abzusuchen. Sie räumten alle verbliebenen Linsen aus den Fächern und for-

dernten ihn auf, auch noch die im Lager befindlichen Kartons auf ihre Sackkarre zu laden.

„Ab sofort ist Ihnen der Verkauf jeglicher Linsen untersagt“, sagte der Polizist. „Sie sind außerdem verpflichtet, alle weiteren Packungen, die Sie erhalten, entweder sofort selbst zu vernichten oder bei Ihrer nächstgelegenen Polizeidienststelle abzugeben.“

„Darf ich fragen, was das Problem mit Linsen ist?“

Der Beamte sah ihn verdutzt an.

„Noch nie von den Reifenplättern gehört?“

„Reifenplättern?“

„Na, diese Spinner, die Linsen in Autoventile drücken, um die Luft abzulassen. Vornehmlich in die von SUVs.“

David brauchte ein paar Tage, um wirklich zu verstehen, was da passiert war. Die Regierung hatte sich offenbar für ein generelles Linsenverbot ausgesprochen, nachdem sich immer mehr Menschen als Reifenplättern betätigt und großen Autos die Luft abgelassen hatten. Weil der erste Reifenplättern auf YouTube dafür die Verwendung von Berglinsen empfohlen hatte, hatte die

Hülsenfrucht den Zorn der FDP auf sich gezogen.

Linsen waren eines der wichtigsten Produkte seines Ladens, viele seiner Kunden waren Vegetarier. Was sollte er ihnen in Zukunft anbieten?

David hatte eine Idee. Aus den Nachrichten wusste er, dass der erste Plättern, der die Berglinsen propagiert hatte, in Potsdam aktiv war, der Stadt mit der höchsten SUV-Dichte Deutschlands.

Nächtelang legte sich David in Potsdams Villenviertel auf die Lauer. Und irgendwann sah er ihn: eine dunkel gekleidete Gestalt mit tief ins Gesicht gezogener Baseballkappe, vor einem Porsche Macan kniend und mit gezielten schnellen Bewegungen an den Reifen hantierend.

David stieg aus seinem Auto und ging langsam auf den Mann zu. Er hob die Hände in die Höhe, um ihm klarzumachen, dass er ihm nichts tun wollte. „Entschuldigen Sie, bitte, nicht weglaufen. Ich will nur mit Ihnen reden. Ich bin wegen der Linsen hier.“

Der Mann erschrak und sein erster Impuls war, zu flüchten, er hielt dann aber verdutzt inne, als er das Wort Berglinsen hörte.

„Mein Bioladen steht vor dem Bankrott. Ich brauche meine Linsen wieder. Ich flehe Sie an, bitte nutzen Sie keine Linsen mehr. Sonst muss ich dichtmachen.“

„Okay“, sagte der Reifenplättern. „Aber wie soll ich meine Arbeit machen?“

„Hier.“ David reichte ihm etwas.

„Was ist das?“

„M&Ms Minis. Die sind ein bisschen größer als Berglinsen und nicht alle passen. Aber die kleinsten von ihnen kriegt man noch in ein Autoventil. Hab's ausprobiert.“

Der Mann nahm eine der Mini-Schokolinsen und drückte sie in ein Ventil. Es zischte leise. „Tatsache. Geht sogar fast noch besser.“

David grinste. „Sag ich doch. Bitte verkünden Sie das auf YouTube. Dann muss die FDP endlich mal etwas Sinnvolles tun.“ – Jens Lubbadeh



Wer digital lebt und arbeitet, liest t3n_

Im Abo immer inklusive digitaler Ausgabe für nur 48 Euro im Jahr.



t3n.de/abo75



t3n.de
Spreading knowledge & future optimism

t3n digital pioneers



SPRECHEN Wir ~~schreiben~~ Zukunft.

Hören Sie die MIT Technology Review als Podcast.

Unsere Podcast-Formate:

Weekly

Einmal in der Woche ordnen wir Nachrichten aus den Bereichen Wissenschaft und Technik ein. Was sind echte technische Durchbrüche und was nur Hype?

Deep Dive

Richtig tief abtauchen in ein Thema kannst du in unserem monatlichen Fach-Podcast, in dem die Redaktion ein Thema aus der aktuellen Ausgabe mit einem Gast genauer beleuchtet.

Unscripted

Chefredakteur Luca Caracciolo interviewt einmal im Monat spannende Persönlichkeiten aus Wissenschaft, Technologie und Gesellschaft. Wie ticken die Menschen, die unsere Welt und ihre Krisen erforschen?



Jetzt Reinhören:
technology-review.de/podcast