

Das menschliche Gehirn ist eines der komplexesten Produkte der biologischen Evolution. Aufgebaut aus Milliarden von Neuronen, die in eine Vielzahl von Netzwerken eingebettet sind, verarbeitet das Nervensystem in jedem Moment riesige Mengen an sensorischen Informationen, gleicht diese mit Vorwissen ab und erzeugt daraus zielgerichtetes Verhalten und neue Gedächtnisinhalte. Diese Leistungen beruhen auf dynamischen Vorgängen, die durch Rückkopplungsschleifen auf vielen räumlichen und zeitlichen Skalen charakterisiert sind. So können Synapsen – die Kontaktstellen zwischen Neuronen – ihre Stärke innerhalb kürzester Zeit verändern. Gleichzeitig sorgen sie dafür, dass wir uns Jahrzehnte später an kleinste Details erinnern, die wir als Kind erlebt haben.

Brückenschlag

Will man die Funktionen des Gehirns aus seiner Struktur und Dynamik heraus verstehen, so ist eine enge Zusammenarbeit von Neurowissenschaftlern mit Physikern, Informatikern und Mathematikern notwendig. Heuristische Erklärungsversuche können dieser enormen Komplexität nicht gerecht werden. Der Brückenschlag über Fächer Grenzen und methodische Paradigmen hinweg ist das zentrale Anliegen der „Computational Neuroscience“.

Von besonderem Interesse ist die Frage, wie Nervensysteme „rechnen“ – wie also beispielsweise eine Fliege aus visuellen Sinneseindrücken auf ihre Eigenbewegung im Raum schließt, oder wie einer Unterhaltung trotz starker Störgeräusche folgen können. Wie werden die Sinnesreize in den Entladungsmustern der beteiligten Neuronen kodiert? Wie wer-



ZUKUNFT DES GEHIRNS

den die Berechnungen physiologisch realisiert? Und wo liegen die physikalischen Grenzen für Präzision und Verlässlichkeit? Diese und ähnliche Themen werden unter dem Begriff „Neural Computation“ zusammengefasst und eröffnen einen Weg, die biologischen Grundlagen unseres eigenen Denkens zu verstehen.

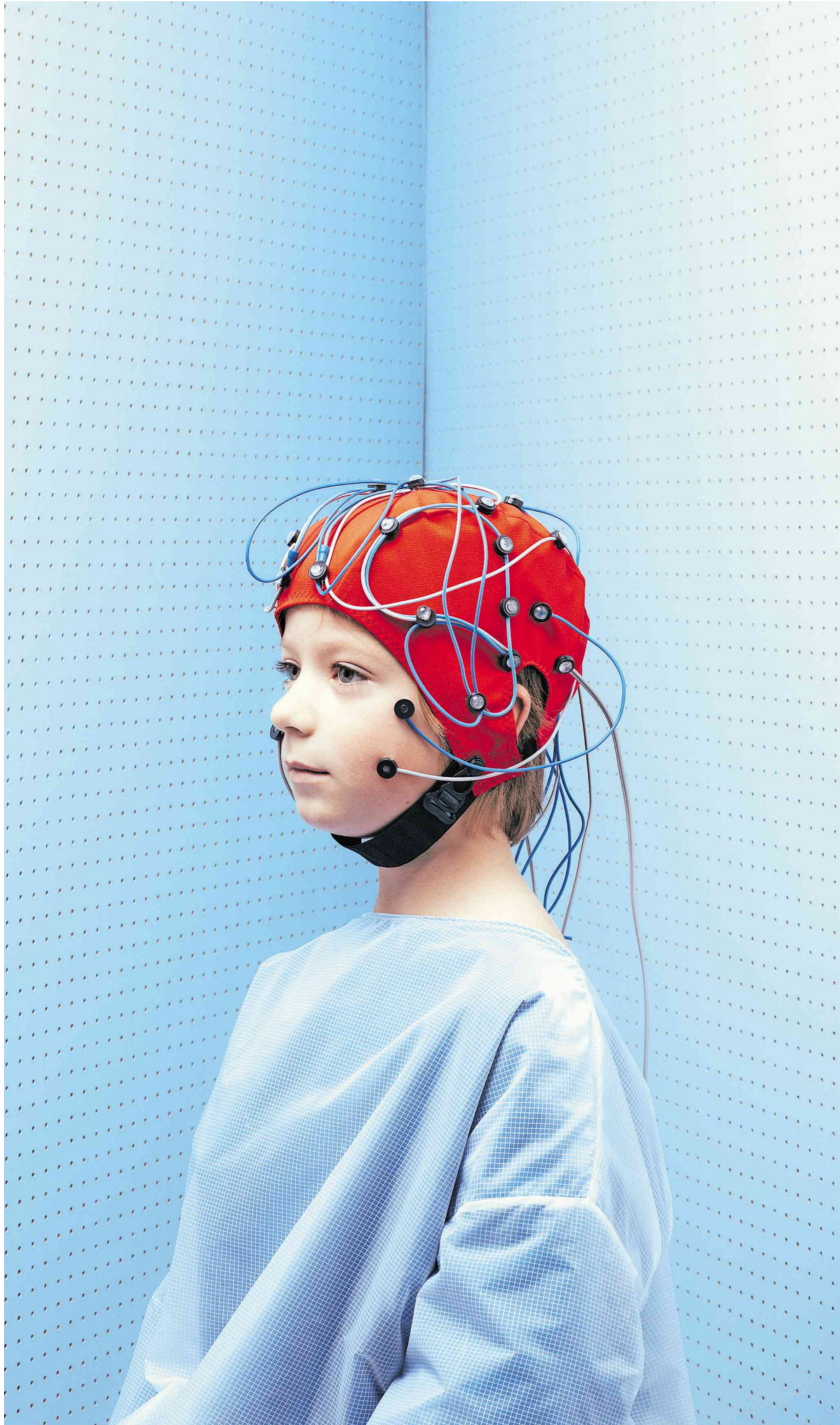
Computational Neuroscience sollte daher auch nicht mit „rechnergestützte Neurowissenschaften“ übersetzt werden: Selbst wenn Computer bei der Analyse experimenteller Daten und bei numerischen Simulationen biophysikalischer Modelle unersetzlich sind, beinhaltet die Computational Neuroscience auch rein mathematisch-theoretische Ansätze.

Kopie oder Karikatur?

Wie aber kann man die Komplexität des Gehirns in theoretischen Ansätzen abbilden? In einem durch die EU finanzierten Großprojekt, dem „Human Brain Project“, versuchen Forscher seit langem aus Dutzenden wissenschaftlichen Einrichtungen das gesamte Gehirn in feinsten Details zu modellieren und auf Höchstleistungsrechnern zu simulieren. In letzter Konsequenz erfordert dies, alle dynamischen Prozesse der weit über hundert Milliarden Nerven- und Gliazellen in einer Art digitaler Kopie zu erfassen. Wobei die meisten Nervenzellen eine stark verzweigte räumliche Struktur aufweisen, mehrstufige elektrochemische Signale erzeugen und mit Tausenden anderen Zellen kommunizieren. Selbst die aufwendigsten Neuronen-Simulationen auf den größten Supercomputern verblissen angesichts der Vorgänge im realen Gehirn. Sollten technische Durchbrüche eines Tages realistische Simulationen ermöglichen, so wären die aller Voraussicht nach so komplex, dass wir sie nicht verstehen könnten.

Unsere Kunst liegt deshalb im geschickten Vereinfachen. So bemerkte der russische Physiker Jakob I. Frenkel (1894 bis 1952) bereits vor hundert Jahren: „Ein gutes theoretisches Modell eines komplexen Systems sollte wie eine gute Karikatur sein: Es sollte die wichtigsten Eigenschaften des Systems hervorheben und die unwichtigen Details ausblenden. Der einzige Haken an diesem Rat ist, dass man nicht weiß, welches die unwichtigen Details sind, bis man das Gesamtsystem verstanden hat. Deshalb sollte man eine Vielfalt an Modellen untersuchen und sein Leben (oder theoretische Erkenntnis) nicht auf ein einziges Modell setzen.“

Die Konzentration auf einen als wesentlich identifizierten Aspekt prägt auch die bahnbrechenden Arbeiten der Computational Neuroscience. So erkannte John J. Hopfield im Jahr 1982, dass die kollektive Dynamik von rückgekoppelten Netzwerken eingesetzt werden kann, um Gedächtnisinhalte zu speichern und selbst dann noch assoziativ wiederzuerkennen, wenn ein als Test präsentiertes Muster unvollständig oder verrauscht ist. Im Gegensatz zu traditionellen Computeralgorithmen wird der Abgleich mit den gesicherten Mustern nicht explizit programmiert. Er ergibt sich vielmehr aus der Dynamik des Systems, die von selbst zu den als Attraktoren eingetragenen Mustern hinläuft. Um diese Einsicht zu erzielen, musste Hopfield die Beschreibung der Neuronen auf ein Minimalmodell reduzieren und zahlreiche biologische Details vernachlässigen.



Das müssen Computer erst einmal nachmachen. Ein junger Proband bei Hirnstrommessungen im Labor.

Foto Getty

Das Denken ist hartes Brot, verehrte Maschine!

Mit dem „Rechnen“ fangen wir an: Wie Theorie und Experiment zusammen dem Gehirn die Geheimnisse der Kognition abringen.

Von Andreas V.M. Herz

Auch in unseren eigenen Arbeiten treten die Vorteile stark vereinfachter Beschreibungen deutlich hervor.

Der Raum im Kopf

Seit einiger Zeit beschäftigen wir uns mit der räumlichen Orientierung und Navigation von Säugetieren. Bereits vor gut fünfzig Jahren hatte John O'Keefe entdeckt, dass es im Hippocampus, einer für Lernen und Gedächtnis zentralen Hirnstruktur, Nervenzellen gibt, die jeweils nur aktiv sind, wenn wir uns an einem bestimmten Ort aufhalten. Bewegten sich Keefes Versuchstiere, wurden diese „Ortszellen“ nacheinander aktiviert, und das Aktivitätsmuster der gesamten Neuronen-Population repräsentiert den Ort des Tieres mit hoher Genauigkeit.

Forschern 2014 der Nobelpreis für ihre Entdeckungen verliehen wurde, war von einem biologischen GPS-System die Rede.

Wie aber können Abstände im Raum überhaupt mit periodischen Aktivitätsmustern im Gehirn gemessen werden? Eine kurze Überlegung zeigt, dass einzelne Zellen dies nicht vermögen, da sich das Tier ja in beliebiger Richtung zum Gitter und im Allgemeinen auch auf gewundenen Pfaden bewegt. Aus der Aktivität eines einzigen Gitterneurons kann damit weder auf die Position des Tieres noch auf die zurückgelegte Wegstrecke geschlossen werden. Man muss also die Aktivität mehrerer Gitterneurone betrachten. Sollten deren Gitter dieselbe Größenskala haben

und nur gegeneinander verschoben sein, so wäre die gesamte Zell-Population räumlich periodisch aktiv, so dass weiterhin keine eindeutige Ortsbestimmung möglich wäre. Die einzelnen Gitter müssten also gegeneinander verdreht sein. Experimentell wurde dies jedoch nicht beobachtet. Damit bleibt als letzte Möglichkeit ein Multi-Skalen-Code, bei dem die Aktivitäten von Gitterneuronen mit unterschiedlich großen Gitterabständen gemeinsam ausgelesen werden. Informationstheoretische Berechnungen zeigen, dass dies funktioniert und dass ein solcher Code besonders effizient ist, wenn die Gitterabstände nur diskrete Werte annehmen, so dass sich „Module“ gleichartiger Gitterneurone ergeben. Um die Präzision der Ortsbestimmung zu optimieren, sollten die Skalen zudem in einem festen Verhältnis zueinander stehen, so wie dies später auch beobachtet wurde.

Das bei diesen Experimenten entdeckte Verhältnis von 3:2 entspricht ebenfalls unserer Theorie: Bei diesem Wert sind großräumige Navigationsfehler besonders selten. Bei unseren mathematischen Analysen zur Decodierung von Gitterneuronen haben wir die präzise zeitliche Struktur ihrer Aktivitätsmuster vollkommen außer Acht gelassen. Nur so war es möglich, eine geschlossene mathematische Theorie zu formulieren, die quantitative Vorhersagen erlaubt, welche allein mit Computersimulationen nie hätten getroffen werden können.

Einige Prinzipien, mehr noch nicht

Auch wenn also hier und da neuronale Funktionsprinzipien sichtbar werden, besteht kein Zweifel daran, dass wir von einem umfassenden Verständnis des Gehirns noch weit entfernt sind. Gleichzeitig führen Entwicklungen im Bereich von Elektrophysiologie, Optogenetik und der hochauflösenden Rekonstruktion ganzer Nervenetze zu einer immer rascher ansteigenden Flut an neuen Beobachtungen und Hypothesen.

Auf lange Sicht gesehen erscheint es deshalb wichtig, verstärkt Experimente vorzunehmen, die direkt darauf abzielen, bestehende Theorien zu verwerfen. Diese Strategie hat sich in der Physik bewährt und wird es erlauben, Schritt für Schritt eine integrale Hirntheorie aufzubauen, von der auch technische Anwendungen profitieren werden, vor allem im Bereich künstlicher intelligenter Systeme. Jakob Frenkel bemerkte völlig zu Recht, dass man nicht weiß, welche Details vernachlässigt werden dürfen, solange das Gesamtsystem nicht verstanden ist. Biologische Systeme sind Produkte der Evolution. Bei ihrer Modellierung kommt deshalb erschwerend hinzu, dass wir nie feststellen können, ob ein bestimmtes Detail unwichtig ist: Wir können zwar experimentell testen, ob dieses Detail für eine spezifische Funktion bedeutungslos ist, können jedoch nicht ausschließen, dass es für eine andere Aufgabe wesentlich ist. Erst wenn wir alle erdenklichen Funktionen überprüft haben, können wir davon ausgehen, dass dieses eine Detail in der Tat vernachlässigbar ist.

Einige Prinzipien, mehr noch nicht

Aus prinzipiellen Erwägungen heraus kann es also wohl nie zu einer vollständigen Entschlüsselung des Gehirns kommen. Dies sollte uns jedoch nicht bekümmern. Auch in Zukunft werden wir faszinierende neue Theorien sehen, die schlaglichtartig gewisse Aspekte des Denkens beleuchten und spannende Experimente stimulieren werden. Vielleicht ist dies auch das Beste, was wir erhoffen können: Ein farbenprächtiges Mosaikfenster aus teilweise überlappenden, teilweise komplementären Theorien, durch das die neurobiologische Wahrheit hindurchschimmert, die für uns in ihrer Vollständigkeit jedoch verborgen bleiben muss.

Pragmatisch gesehen sollten wir daher ein breitgefächertes Forschungsprogramm anstreben. Diese Einsicht spiegelt sich auch in der Struktur des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung initiierten „Bernstein Netzwerkes“ wider, eines Verbunds von mehr als 200 Arbeitsgruppen im Bereich der Computational Neuroscience. Das Netzwerk ist nach dem Physiologen und Biophysiker Julius Bernstein (1839 bis 1917) benannt. Seine Membrantheorie lieferte eine erste biophysikalische Erklärung dafür, wie sich elektrische Erregungen in Nervenzellen ausbreiten. Die einzelnen Gruppen im Netzwerk forschen ohne zentrale Lenkung und unabhängig voneinander; die jährliche Bernstein-Konferenz dient dem wechselseitigen Austausch und der internationalen Vernetzung. Daraus ist eine bunte Vielfalt an Forschungsprojekten entstanden – ganz im Sinn von Frenkel. Unterstützt durch die Volkswagen-Stiftung erleben Bernstein-Studenten im gemeinsamen Smart-Start-Programm hautnah diese Vielfalt an Inhalten und Methoden. Mit breiten Erfahrungen in computergestützter Datenanalyse, biophysikalischer Simulation und mathematischer Modellierung sowie einem guten Gespür für die Chancen und Grenzen interdisziplinärer Forschung sind sie ideal für spätere Herausforderungen in Wissenschaft und Technik vorbereitet.

Der Autor ist Professor für Computational Neuroscience an der LMU München.

Sein Beitrag ist das Ergebnis eines Vortrags in der Reihe „Zukunft des Gehirns“, die von der Gemeinnützigen Hertie-Stiftung und dieser Zeitung initiiert wurde.

Ein Hundeleben

Der Hund ist des Menschen bester Freund, und das seit Jahrtausenden. Es versteht sich daher von selbst, dass der Wolfsabkömmling mit seinem Spezi vieles bereitwillig teilt: Freude wie Leid. Schließlich sind beste Freunde füreinander da und fühlen mit, wenn es beim anderen einmal nicht rund läuft. Steht Homo sapiens unter Strom, lässt das seinen vierbeinigen Kumpel nicht kalt. Das Umgekehrte scheint allerdings nicht der Fall zu sein. Glaubt man den Erkenntnissen schwedischer Forscher, prallt tierischer Stress am Menschen einfach ab. Handelt es sich bei der vielgerühmten Freundschaft also um eine emotionale Einbahnstraße? Die Ergebnisse der neuen Untersuchung nähren in der Tat einen solchen Verdacht. Darin ging es nicht etwa um akute Stressreaktionen, zumal sich Henne und Ei in dem Fall schwer auseinanderhalten lassen: Klingelt etwa der Postbote an der Haustür, steigt mit der Alarmbereitschaft des Hundes meist auch jene des Halters. Unklar bleibt dabei, ob der erhöhte Stresspegel des Tiers nur der psychischen Erregung geschuldet ist oder ob er auf die körperliche Anstrengung zurückgeht. So wird das Stresshormon Kortison auch dann vermehrt ausgeschüttet, wenn der Briefträger, statt in Angststarre zu verfallen, das Weite sucht und sich daher nur mit hohem sportlichen Einsatz stellen lässt. Die Studienautoren um Lina Roth von der Universität Linköping wollten allerdings nicht das klären, sondern vielmehr prüfen, ob sich die Stresslevel von Mensch und Hund über ein Jahr gemittelt aneinander angleichen – und falls ja, wer dabei wen beeinflusst. Bei 58 Hundehaltern und deren vierbeinigen Begleitern bestimmten sie dazu den Kortisongehalt in den Haaren. Dieser erlaubt zumindest Rückschlüsse auf das durchschnittliche Stressniveau. Das Resultat der Untersuchung lässt tief blicken. Denn es zeigt, dass der beste Freund des Menschen auch stimmungsmäßig immer bei Fuß gehen muss. Was das Stressniveau im Jahresmittel angeht, liefen die Hunde jedenfalls im Gleichtakt mit ihren Gebieter. Als ausgesprochen sensibel erwiesen sich diesbezüglich die Weibchen, während sich die Rüden weniger bereitwillig anpassen. Wie sich ferner ergab, reagierte das Kortisonssystem der treuen Vierbeiner vor allem auf bestimmte menschliche Wesenszüge, darunter neurotische Tendenzen und Streitsucht. Umgekehrt hatte das Temperament der Tiere keinen Einfluss auf den Stresshormonpegel der Hundehalter. Spielt es also keine Rolle, ob man sich einen aggressiven Kläffer zulegt oder einen sanftmütigen Schoßhund? Offenbar nicht. Es gibt allerdings auch noch eine andere Erklärung für den unterschiedlichen Umgang mit Stress bei Hund und Herrchen: Während der Mensch ein nervtötendes Haustier jederzeit austauschen kann, verfügen Vierbeiner nicht über diese Option. Sie können den Launen ihrer Gebieter nicht entkommen. NvL.

Aussterbelücken in der Roten Liste

Mit Hilfe einer neuen Datenbank haben britische Forscher der Royal Botanical Gardens in Kew das Aussterberisiko von Samenpflanzen ermittelt und dokumentiert. Bisher sind gut 335 000 Arten erfasst. 600 Arten müssen demnach als ausgestorben gelten. Das sind viermal so viel, wie in der Roten Liste der Weltnaturschutzunion aufgeführt sind. Die gegenwärtige Aussterberate – 2,3 Arten pro Jahr – liegt gut fünfünftelmal so hoch, wie durch natürliche Prozesse allein zu erwarten wäre. Wie Aelys Humphreys und ihre Kollegen in „Nature Ecology & Evolution“ schreiben, ist die große Lücke in der Dokumentation der Artenverschiebungen noch lange nicht geschlossen. Es werden auch immer noch neue Arten gefunden, ebenso wie verloren geglaubte Arten in winzigen Restvorkommen wiederentdeckt. 431 solcher wiederentdeckter Pflanzenarten sind festgehalten. „Das dokumentiert den nach wie vor hohen Forschungsbedarf“, kommentiert Jens Mutke vom Nees-Institut für Biodiversität der Universität Bonn die Studie. Dirk Albach von der Universität Oldenburg warnt, dass ein Aussterben schwer zu bestimmen sei und die Lücken größer sein könnten: „Das Problem der Roten Listen und der Liste hier ist auch das in der Studie angesprochene funktionale Aussterben. Das bedeutet, Arten sind zum Aussterben verdammt, wenngleich noch einige Individuen leben.“ Auch Thomas Borsch vom Botanischen Garten Berlin gibt zu bedenken: „Gut untersucht sind weniger als zehn Prozent aller Blütenpflanzenarten. Dazu kommt leider auch, dass die Erforschung der Artenvielfalt durch bürokratische Einschränkungen de facto immer mehr erschwert wird und in Teilen der Welt gerade zum Erliegen kommt.“ jom

Einmal Erbgut an einem Tag

Mit Künstlicher Intelligenz kann das Erbgut kranker Menschen jetzt im Zeitraffertempo sequenziert und für Ärzte sichtbar gemacht werden. Seite N2

Die Rückkehr der Natalie Zemon Davis

Von 1978 bis 1996 lehrte die Historikerin in Princeton. Jetzt wurde dort mit Lorraine Daston und Peter Brown ihr neunzigster Geburtstag gefeiert. Seite N3

Zwei Stiche für den Innovationsriesen China

Radikal neu oder radikal das Alte stärken? Ein Gespräch mit den Präsidenten der Max-Planck- und der Fraunhofer-Gesellschaft. Seite N4