

Die Presse

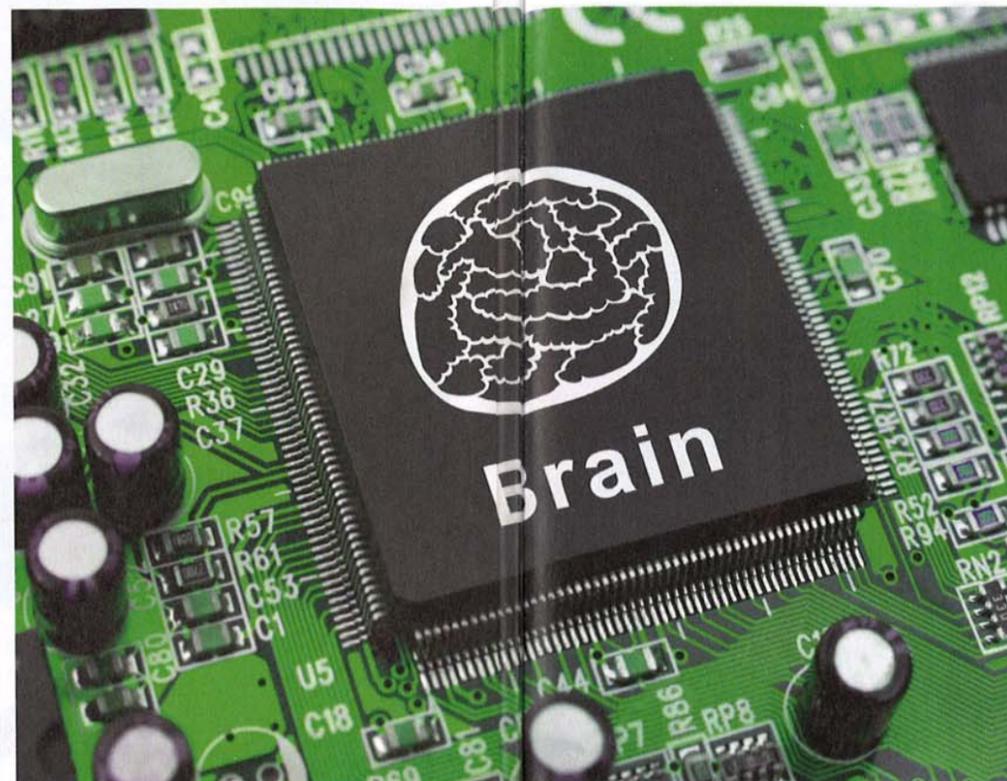
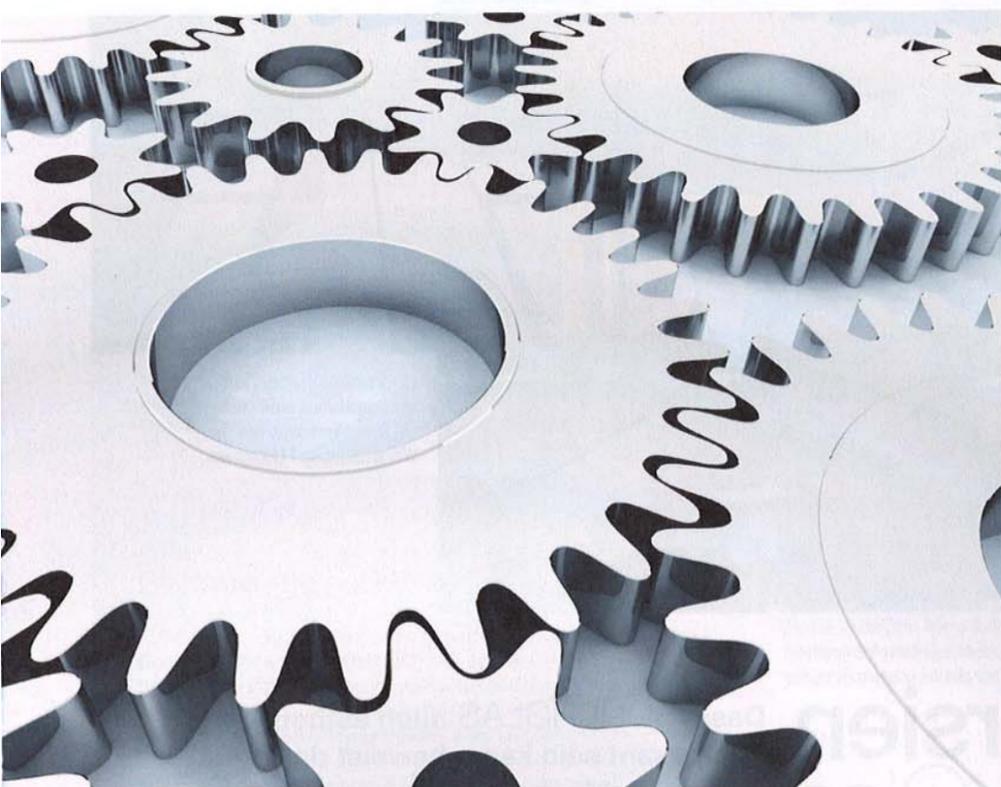
forschung

Magazin für Technologie und Innovation

Februar 2010

Vorbild Gehirn

Neue Theorien zur Funktionsweise des Nervensystems sollen die Entwicklung von LERNFÄHIGEN COMPUTERN ermöglichen.



Das menschliche **GEHIRN** als fließender Computer

Neurowissenschaftler und Informatiker versuchen, das Gehirn so zu verstehen, dass wichtige Mechanismen als Grundlage für neue COMPUTERMODELLE dienen können.

TEXT: REINHARD KLEINDL UND VERONIKA SCHMIDT

Grundlegende Fragen sind noch nicht beantwortet, gibt Wolfgang Maass vom Institut für Grundlagen der Informationsverarbeitung (IGI) an der TU Graz zu. Doch Maass hat bei der Erforschung des menschlichen Gehirns neue Erfolge vorzuweisen. Seine Gruppe arbeitet „Bottom up“, tastet sich von der Ebene einzelner Nervenzellen zur Beschreibung immer größerer Netzwerke vor. Dabei sind Maass und seine Mitarbeiter keine Biologen, sondern Informatiker. Die Forscher versuchen, das Gehirn als Computer zu verstehen. Die

kleinste Einheit ist dabei ein einzelnes Neuron – eine Nervenzelle. Allerdings könnte dazu ein völlig neues Konzept eines Computers nötig sein. Herkömmliche Computer müssen erst programmiert werden, bevor sie arbeiten können, Speicher und Prozessor sind getrennt, und alle Programme müssen ihre Aufgaben in kleinen, definierten Einzelschritten abarbeiten. All das sind Eigenschaften, die auf das Gehirn nicht zutreffen.

„Das menschliche Gehirn funktioniert nicht nach dem Prinzip der Fließbandarbeit“, so Maass. Deshalb hat er gemeinsam mit Henry Markram das Konzept des „Liquid Computing“ entwickelt. Dabei wird eine große Anzahl von Neuronen zufällig vernetzt. Ein Signal – etwa ein Bild oder die Signatur eines Geruchs – regt diesen „See“ von Neuronen an und erzeugt dort ein charakteristisches Bild, eindeutig wie ein Fingerabdruck. Schließlich gibt es sogenannte „Readout Neurons“, Aus-

leseneuronen, die bestimmte Informationen über den Zustand des Neuronensees nach außen mitteilen. Im Neuronensee übernimmt dabei nicht jeder Schaltkreis nur eine bestimmte Aufgabe, sondern durchaus auch mehrere. Es passiert eine allgemein nützliche Vorverarbeitung, sodass sogar verschiedene Ausleseneuronen zugleich unterschiedliche Ergebnisse ablesen können.

Lernfähige Modelle. Dass so eine „Liquid State Machine“, kurz LSM, tatsächlich wichtige Eigenschaften eines Computers besitzt, lässt sich auf mathematischem Weg nachweisen. LSM haben einen großen Vorteil gegenüber klassischen Computermodellen, wie etwa jenem der „Turingmaschine“: Sie sind lernfähig. Dass die Forscher auf der richtigen Spur sind, zeigen aktuelle Experimente: In Zusammenarbeit mit den Frankfurter Hirnforschern Danko

Nikolic und Wolf Singer konnte eine wichtige Vorhersage dieses Modells experimentell bestätigt werden. Sie bezieht sich darauf, wie das Neuronennetzwerk einer LSM Informationen über kurze Zeiträume speichert. „Das Gehirn funktioniert wie ein Wasserteich, in den Steine hineingeworfen werden“, veranschaulicht Stefan Häusler, Mitarbeiter von Maass. „Die dadurch entstandenen Wellen verschwinden nicht sofort, sondern überlagern sich und sammeln Informationen, wie viele und wie große Steine hineingeworfen wurden.“

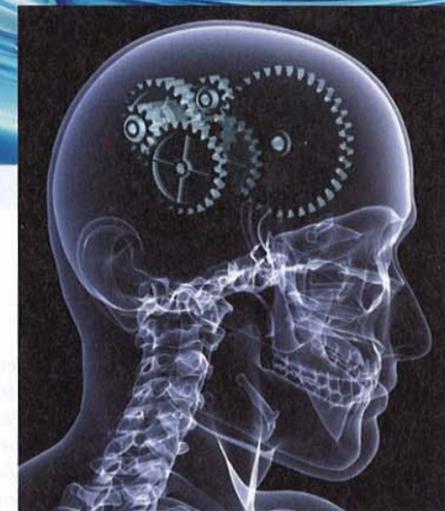
Innere Uhr im Hirn? Bisher weiß man deutlich mehr über die Verarbeitung von räumlichen Daten im Gehirn, etwa dem Erkennen von Bildern. Wie zeitliche Information behandelt wird, ist weitgehend unklar. Das Gehirn hat schließlich keinen Taktgeber und keine innere Uhr wie ein gewöhnlicher Computer, um Zeiten zu ver-

gleichen. Doch auch Netzwerke von Neuronen bieten Möglichkeiten, zeitliche Information zu verarbeiten, wie die Forscher aus Graz und Frankfurt nun zeigen konnten.

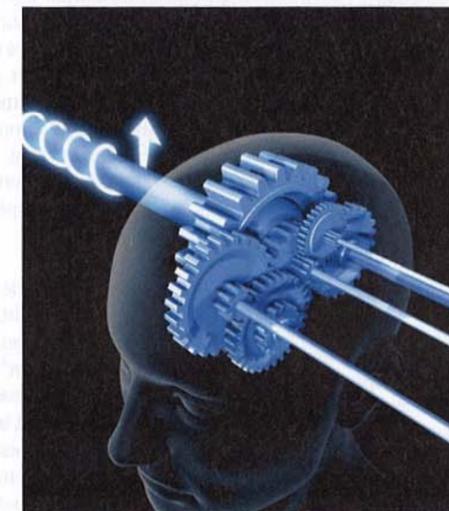
Bei der Erkennung von mehreren Buchstaben hintereinander bleibt immer ein „Schatten“ des alten Buchstabens im Neuronensee übrig – zu schwach, um die Erkennung des aktuellen Buchstabens zu behindern, aber doch stark genug, um auch noch den vorhergehenden Buchstaben zu identifizieren.

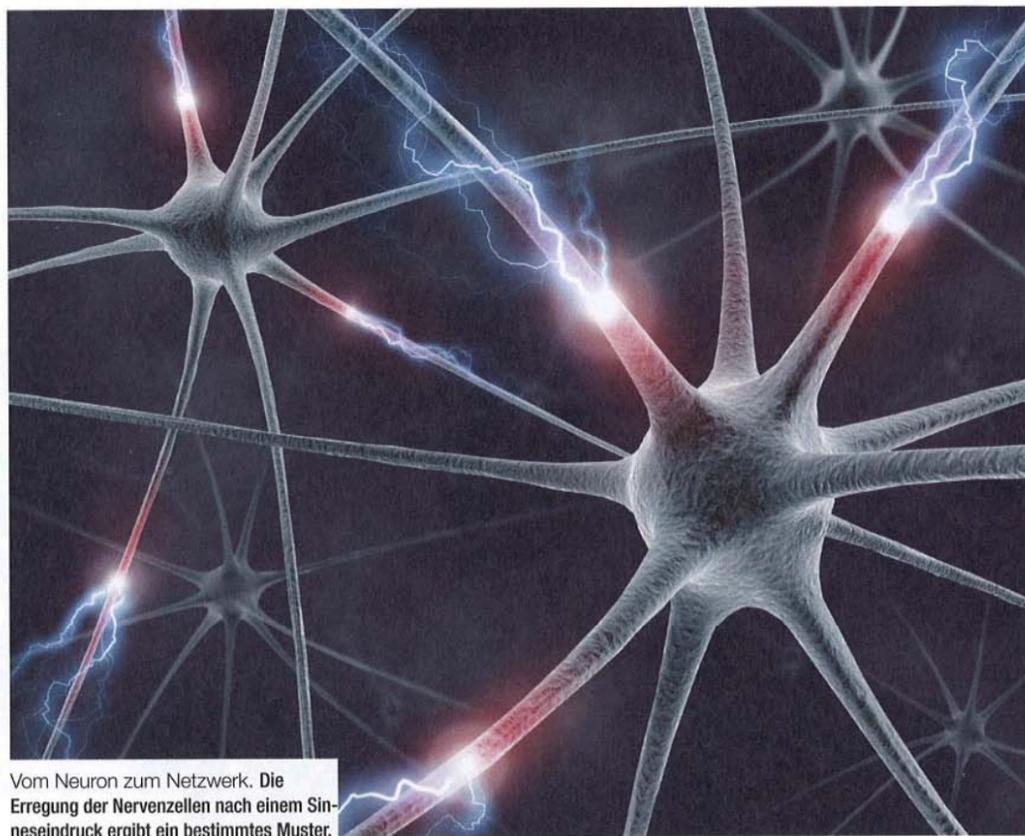
Diese versteckten Daten könnten genutzt werden, um aufeinanderfolgende Buchstaben zu vergleichen oder sogar die Zeit zwischen ihnen abzuschätzen. »

Das Gehirn funktioniert **wie ein Wasserteich**, in den Steine geworfen werden.



Das Werk im Gehirn stellte man sich früher wie eine Maschine vor, später wie einen Computer. Heute dienen Wellen am Wasserteich als Modell.





Vom Neuron zum Netzwerk. Die Erregung der Nervenzellen nach einem Sinnesindruck ergibt ein bestimmtes Muster.

DAS GEHIRN

BESTENS UNTERSUCHT. Das menschliche Gehirn, etwa 1,5 Kilogramm schwer, besteht aus 50 bis 100 Milliarden Nervenzellen. Diese sind über mindestens 1000-mal so viele Synapsen miteinander verbunden. Neben Mäuse-, Ratten- und Wurmgehirnen ist das menschliche das am besten untersuchte Gehirn im Tierreich.

NERVENsache. Die Nervenzellen sind eingebettet in „Gliazellen“, die eine Stützfunktion haben, aber auch eine funktionale Infrastruktur bilden. Sie sind für die Versorgung zuständig, aber auch an der Informationsübertragung beteiligt. Das Gehirn verbraucht etwa ein Viertel des Energiebedarfs im menschlichen Körper – im Ruhezustand. Mit nur zwei Prozent der Körpermasse verbraucht es etwa 20 Prozent des Sauerstoffs im Körper.

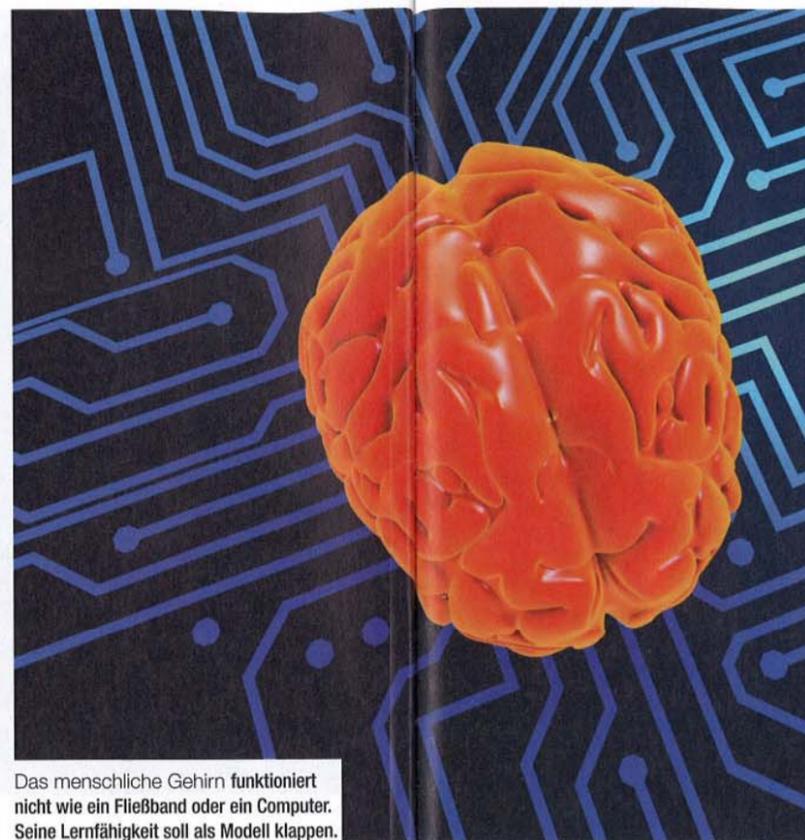
» Diese Experimente wurden von Danko Nikolic am Max-Planck-Institut des renommierten Hirnforschers Wolf Singer in Frankfurt durchgeführt. Dafür mussten sich die Forscher Zugang zu einigen hundert Neuronen verschaffen und ihre Aktivität aufzeichnen. Nur so konnten sie herausfinden, was tatsächlich im Neuronensee eines lebenden Gehirns vor sich geht. Auch das Entschlüsseln der Information ist komplex und benötigt computerunterstützte Mustererkennung. Hier kamen wieder die Grazer Informatiker ins Spiel – ein schönes Beispiel für interdisziplinäres Arbeiten.

Altes Modell. Die Theorie des Liquid Computing widerspricht sehr deutlich älteren Vorstellungen wie dem sogenannten „Attraktoren“-Modell. Der Begriff des Attraktors stammt aus der Mathematik und wird in der Chaostheorie verwendet. Er bezeichnet einen stabilen Zustand, dem sich ein chaotisches System annähern kann. Auch in Netzwerken von Neuronen kann es solche stabilen Zustände geben, und das Attraktorenmodell besagt, dass gerade sie wesentlich sind und dort die relevante Information liegt. Allerdings gibt es Experi-

mente, die dem widersprechen: Versuche an Heuschrecken ergaben, dass verschiedene Düfte komplexe, sich ständig ändernde Muster in den Neuronennetzwerken auslösten. Diese Muster stabilisierten sich zwar nach einiger Zeit, doch es konnte gezeigt werden, dass diese stabilen Daten kaum noch ausgelesen wurden. Die Erkennung der Düfte musste also in der komplexeren, ersten Reak-

Forscher peilen Simulationen von Teilen des Hirns an.

tion der Neuronen passiert sein. Eine wesentliche Neuerung des Liquid-Computing-Modells ist, dass es keine solchen stabilen Attraktorzustände benötigt. Vielleicht hat die Wahl eines so konträren Ansatzes wie jenes des Liquid Computing auch philosophische Implikationen. Das Bild des Menschen als Maschine, dessen Verhalten sich genau determinieren lässt, verliert so jedenfalls an Schärfe. Wer trotzdem eine Entmystifizierung der menschlichen Seele durch



Das menschliche Gehirn funktioniert nicht wie ein Fließband oder ein Computer. Seine Lernfähigkeit soll als Modell klappen.

ein besseres Verständnis des Gehirns fürchtet, kann vorerst noch beruhigt sein. Auf die Frage nach Ausblicken für die Zukunft sagt Maass: „Ich denke, wir werden in fünf Jahren mehr davon verstehen, was in diesen neuronalen Schaltkreisen passiert.“ Ein vollständiges Verständnis des Gehirns wird wohl, wenn überhaupt möglich, deutlich länger dauern. Zumindest eine umfassende Simulation

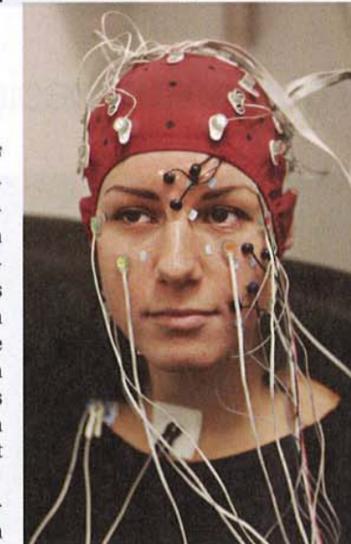
von Teilen des Gehirns peilen die Forscher aber an. Eine wichtige Voraussetzung dafür ist sicherlich die interdisziplinäre Zusammenarbeit: Weder Neurobiologen noch Physiker oder Computerwissenschaftler können im Alleingang aus den Grundlagen des Gehirns neue Funktionsweisen für Computer entwickeln. Die Forschungen von Maass und seiner Arbeitsgruppe werden von fünf EU-Projekten des Future-Emerging-Technologies-Programms (FET) so-

wie vom Wissenschaftsfonds FWF unterstützt. Maass' Institut (IGI) koordiniert z. B. für drei Jahre das EU-Projekt „Brain-i-Nets“ mit europäischen Informatikern, Neurowissenschaftlern und Physikern. Der Subtitel des Projekts heißt „Neue vom Gehirn inspirierte Lernparadigmen für große neuronale Netzwerke“. Es setzte sich bei den FET-Programmen der EU als eines von neun geförderten Projekten (176 Einreichungen) durch und hat ein Budget von 2,6 Millionen Euro. Gemeinsam mit Partnern in London (University College), Frankreich (Centre National de la Recherche Scientifique), Schweiz (École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Uni Zürich) und der Universität Heidelberg werden die Lernmechanismen im Hirn Schritt für Schritt erforscht, um die Entwicklung lernfähiger Computer voranzutreiben. Koordinator Robert Legenstein vom IGI erklärt, welche Methoden dabei zur Anwendung kommen: „Mit optogenetischen Methoden werden Neuronen auf molekularem Niveau so verändert, dass sie durch die Anwesenheit von Licht aktiviert oder inhibiert werden können.“ Man kann einzelne oder vernetzte Nerven-

TURINGMASCHINE

ALS THEORETISCHES MODELL vom britischen Mathematiker Alan Turing 1936 postuliert, ist die „Turingmaschine“ der Prototyp eines modernen Computers. Sie besteht aus einem Programm, Speicher und einem Lese- und Schreibkopf. Es gibt nur drei Befehle: Lesen, Schreiben und Bewegen des Schreibkopfs.

UMSCHREIBEN. Dennoch kann so eine Maschine alle Probleme lösen, die von einem Computer gelöst werden können. Laut der Church-Turing-Hypothese kann eine Turingmaschine sogar alle mathematischen Probleme lösen, die auch ein Mensch lösen kann. Eine „universelle“ Turingmaschine ist grob gesprochen eine solche, die ihr eigenes Programm umschreiben kann. (Das ist naheliegend: Jeder PC kann das auch.)



Messdaten von lebenden Gehirnen. Während bisher die elektrische Spannung der Hirnströme an der Oberfläche gemessen wurde, kann man inzwischen auch die Aktivität einzelner Neuronen im Inneren messen.

Im Alter nicht mehr flexibel

Lernen im Alter. Die Wissenschaftler untersuchen, an welchen Faktoren es liegt, dass sich ältere Gehirne neues Wissen viel schwieriger merken als jüngere.

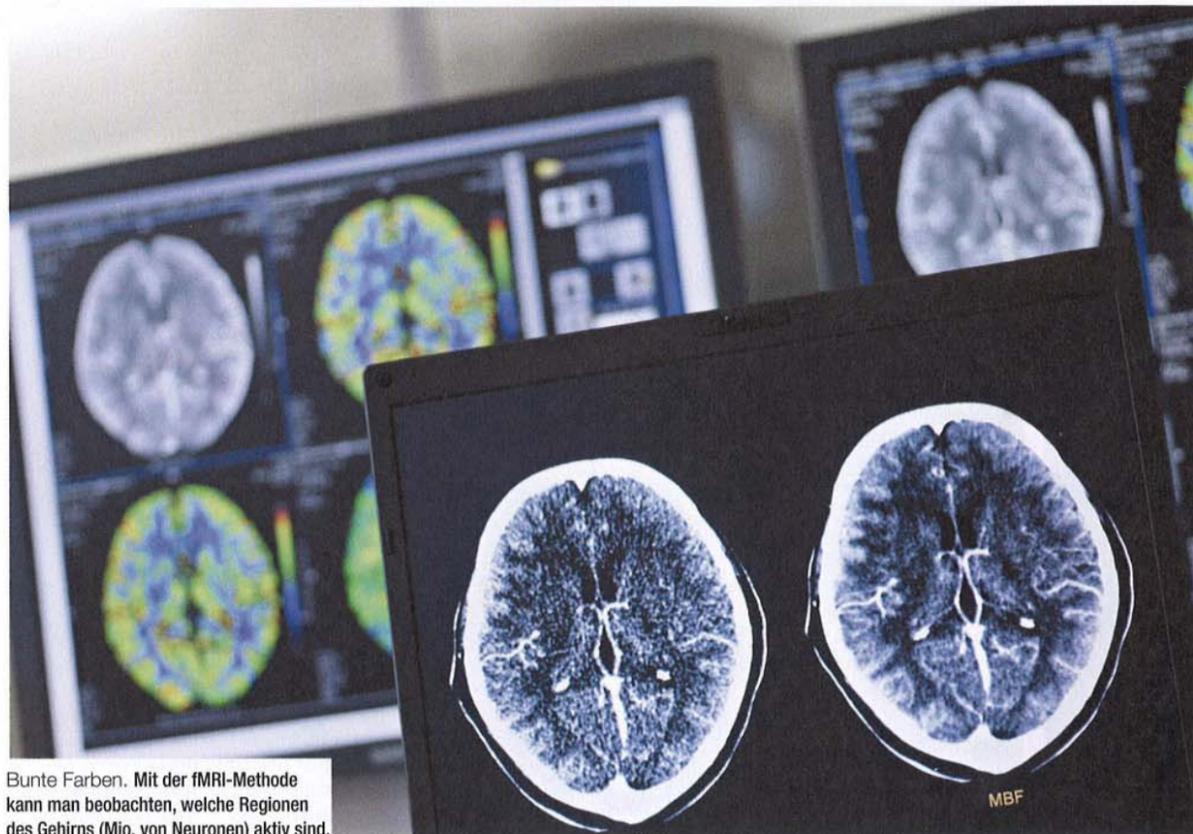


DEM GEDÄCHTNIS AUF DER SPUR

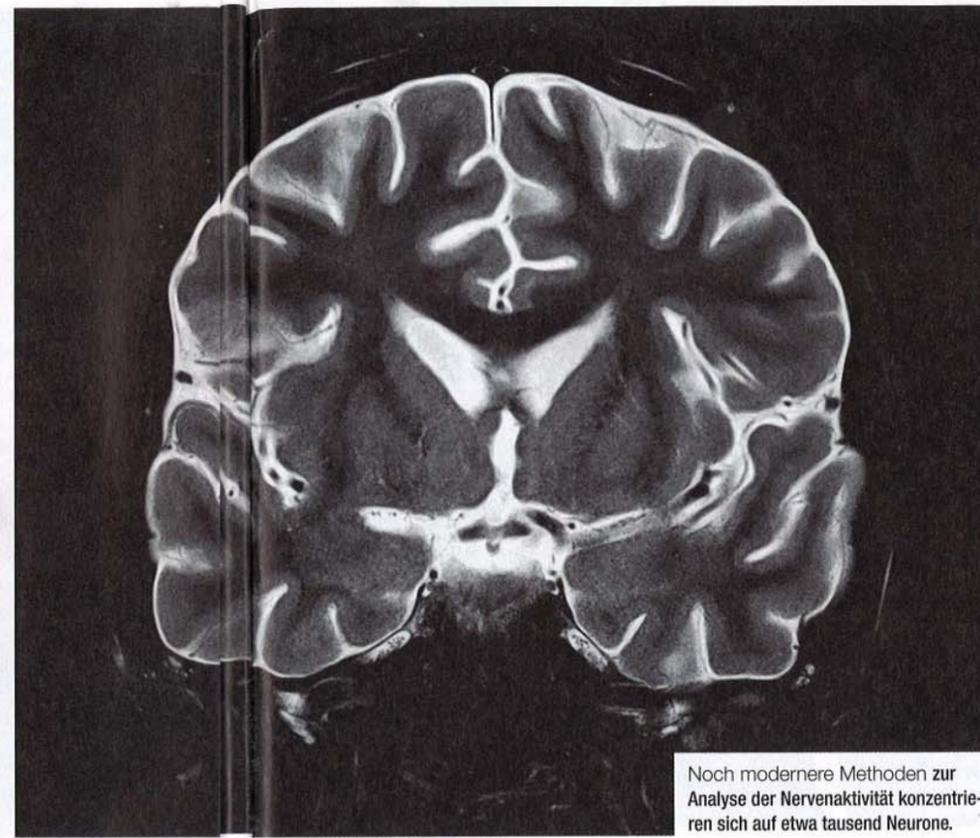
NICHTS KAPUTT. „Im Alter haben die Synapsen anscheinend keine Lust mehr, sich einfach zu verändern“, sagt Michael Kiebler, Leiter des Departments für neuronale Zellbiologie der MedUni Wien. Es ist vom „gesunden Altern“ die Rede: Auch wenn keine neurodegenerativen Krankheiten wie Alzheimer oder Parkinson den Menschen beeinträchtigen, nimmt die Fähigkeit, sich Dinge zu merken, im Alter merklich ab. „Die Speicherkapazität wird immer schlechter – obwohl nichts kaputt ist“, sagt Kiebler. Bisher haben die Forscher noch nicht herausgefunden, was sich dabei auf molekularem Niveau ändert. „Warum braucht man drei-, viermal so lang, um neue Information – Sprachen oder Fachwissen – zu speichern?“ Möglichkeiten für den Verlust „dieser Plastizität“ gibt es viele: Vielleicht bilden sich immer weniger Synapsen, vielleicht tritt eine Hemmung auf?

EINZELNE ZELLEN UNTERSUCHEN. „Solche Dinge kann man nicht mit der modernen fMRI-Technik analysieren: Im funktionellen Magnetresonanz-Imaging sehen Sie zwar tolle Farbkleckse. Aber das sind zehn Millionen Zellen, die da aufscheinen“, sagt Kiebler. Um zu erkennen, wie die Verknüpfung neuer Synapsen vorangeht, muss man im Einzelzellverfahren arbeiten. „Man kann durch molekulare Tricks einzelne Nervenzellen grün leuchten lassen und beobachten, was mit dieser Zelle passiert, wenn die Maus lernt.“ In Lerntests an alten Mäusen (über 24 Monate) sieht man, dass die Lernkapazität dramatisch abnimmt. „Die Synapsen sind nicht mehr so veränderbar, aber was die molekulare Grundlage ist, wissen wir noch nicht.“

GEDÄCHTNIS VERÄNDERN. Auch der große Star der Neurowissenschaft, Eric Kandel, forscht am gesunden Altern. „Es gibt mittlerweile Firmen, die an der Veränderbarkeit von gespeicherter Information arbeiten: Seit man weiß, dass Gedächtnisinhalte im aktiven ‚Working memory‘ veränderbar sind, hofft man so z. B. Kriegsveteranen zu helfen“, sagt Kiebler. Man könnte etwa den Soldaten dramatische Szenen des Krieges am Bildschirm vorspielen, dazu bekommen sie Medikamente, die eingebrannte Erinnerungen lösen können – so kann möglicherweise das aktive Gedächtnis, die Erinnerung an das Grauen, geschwächt werden.



Bunte Farben. Mit der fMRI-Methode kann man beobachten, welche Regionen des Gehirns (Mio. von Neuronen) aktiv sind.



Noch modernere Methoden zur Analyse der Nervenaktivität konzentrieren sich auf etwa tausend Neurone.

Am lebenden Organismus beeinflusst der Netzwerkzustand die Synapsen.

LIQUID-STATE-MACHINE

DIE LSM (Liquid State Machine) besteht aus einem Netzwerk von Knoten, die mit äußeren Datenquellen und untereinander verbunden sind. Einfache Ausleseeinheiten können lernen, aus dem Netzwerk korrekte Rechenergebnisse abzulesen. Das Netzwerk selbst präsentiert den Ausleseeinheiten verschiedene Kombinationen der Eingangsinformation. Jene müssen nur lernen, die richtigen auszuwählen.

WIRD DIE INFORMATION wieder zurück ins Netzwerk geschickt, wird aus einer Liquid-State-Machine ein „universeller“ Computer, gleichwertig mit der universellen Turingmaschine. Diese Aussage lässt sich streng mathematisch beweisen. Postuliert wurde das Modell von Wolfgang Maass, Thomas Natschläger und Henry Markram zur Beschreibung von Vorgängen im Gehirn.

» zellen im Experiment an- bzw. ausschalten und die Folgen für das Gedächtnis erforschen. „Spannend ist auch die Methode des Photonen-Imaging“, sagt Legenstein: „Mit Zwei-Photonen-Lasern kann man im lebenden Organismus tausende Neuronen gleichzeitig messen.“ So können die Forscher Veränderungen im Gehirn beobachten, die bei Lernvorgängen passieren.

„Man nimmt sich nicht das gesamte Gehirn auf einmal vor, sondern konzentriert sich z. B. auf tausend Neuronen im visuellen Kortex“, erklärt er: „Der Laserstrahl tastet das Gewebe Punkt für Punkt ab und liest die Aktivitäten der Nervenzellen heraus. Es ist ähnlich wie eine Kamera, nur eben mit einem Laser.“ Dabei kann ersichtlich werden, auf welcher Ebene welche Information verarbeitet wird.

Plastische Synapsen. Auch die „synaptische Plastizität“ liegt im Fokus der Forschungen: Sie besagt, dass die Stärke der Signalübertragung an den Schnittstellen der Neuronen (Synapsen) bei Lernprozessen verändert wird. Es gibt chemische Substanzen (Neuromodulatoren), die den Infor-

mationsfluss in einer Synapse verstärken oder hemmen. „Belohnung oder Alarmbereitschaft können die Aufmerksamkeit erhöhen und lang anhaltende Änderungen der Stärke von Synapsen induzieren“, sagt Legenstein. Dopamin und Acetylcholin sind bekannte Beispiele, die auf die Synapsenstärke wirken. „Am lebenden Orga-

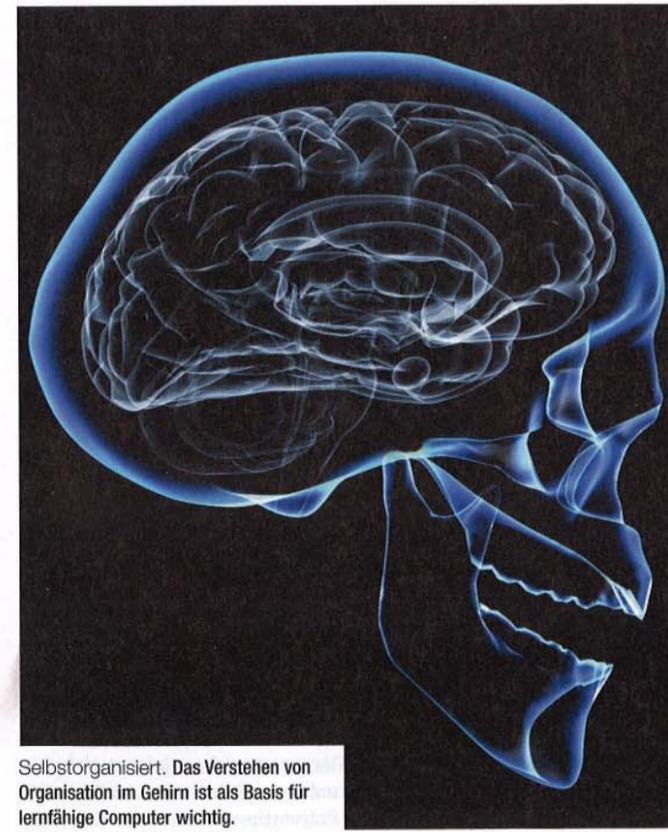
„Das Gehirn ist massiv parallel, alles wird gleichzeitig verarbeitet.“

ROBERT LEGENSTEIN, TU GRAZ

nismus ist aber auch interessant, wie der sogenannte ‚Netzwerkzustand‘ Einfluss auf die Plastizität hat.“ Ist das Netzwerk insgesamt sehr aktiv, ändert sich die Empfindlichkeit der einzelnen Synapsen. Den Vergleich mit einem herkömmlichen Computer, der bei hoher CPU-Auslastung alle Vorgänge langsamer erledigt, weist Legenstein

zurück: „Der Computer als serielles System verarbeitet ein Bit nach dem anderen. Das Gehirn ist aber massiv parallel – alles wird gleichzeitig verarbeitet.“ Das macht die Erforschung des Systems Gehirn so aufregend: Wie der Informationsfluss geleitet und gelenkt wird, wollen die Forscher an lokalen Netzwerken bzw. Schaltkreisen von Nervenzellen herausfinden.

Rosen im Teich. Um die Auswirkungen auf das Liquid-Computing-Modell zu erklären, bedient sich Legenstein der Analogie mit dem Wasserteich, in den Steine geworfen wurden: „Die Überlagerung der Wellen ist von Gegebenheiten des Teichs abhängig. Wenn man nun Seerosen pflanzt oder eine neue Struktur hineinbaut, dann breiten sich die Wellen anders aus. So könnte man beispielsweise Information kanalisieren. Das heißt, über synaptische Plastizität kann die Art, wie Information integriert wird, organisiert werden.“ Und in einem selbstorganisierten System wie dem Gehirn ist das Verstehen und Lenken von Organisation ein wichtiger Schritt – und legt die Basis zur Umsetzung des lernfähigen Computers. ■



Selbstorganisiert. Das Verstehen von Organisation im Gehirn ist als Basis für lernfähige Computer wichtig.

10.000 Synapsen pro Nervenzelle

Synapsen sind Schnittstellen. Der kleine Spalt zwischen zwei Neuronen gehört zur Synapse: Sie verändert sich, wenn Information gespeichert wird.



LANGFRISTIGE SPEICHERUNG

„WÄHREND ICH MIT IHNEN SPRECHE, verändern sich in Ihrem Gehirn hunderte Synapsen“, sagt der Hirnforscher Michael Kiebler (MedUni Wien). Jede Nervenzelle kann an den Dendriten (Verzweigungen, die Information aufnehmen) bis zu 10.000 Synapsen bilden (Schnittstellen zur Informationsübertragung zwischen Neuronen). „Damit erhöht sich die Speicherkapazität der 100 Milliarden Nervenzellen um den Faktor 10⁴.“ Ein verändertes Muster an neu verbundenen, umprogrammierten Synapsen ist die Basis für langfristige Informationsspeicherung.

SYNAPSEN UND PROTEINE. „Da kommen die mRNA-Bindeproteine ins Spiel, an denen unser Labor forscht“, so Kiebler. mRNA ist Boten-RNA, also Vorlage zur Bildung von Proteinen, die normalerweise für die ganze Zelle produziert werden. Im Spezialfall der mRNA, die für Synapsen zuständig sind, verhindern aber die RNA-Bindeproteine, dass die RNA in ein Protein übersetzt werden kann. „Wenn die mRNA-Bindeproteine etwa bei der Synapse 9789 die mRNA freigeben, kann das Protein dort gebildet werden, an allen anderen Synapsen aber nicht.“ So werden Synapsen neu verschaltet, so passiert Lernen und Gedächtnis. „Die Kontaktstellen verändern nicht nur ihre Form, sondern auch ihre Molekülzusammensetzung. Wenn man etwas mehrfach trainiert, bleibt eine solche Veränderung an der Synapse langfristig bestehen – wir kennen Gedächtnisleistungen über viele Jahrzehnte.“ Vor allem das assoziative Gedächtnis – etwa wenn man sich zu einem Gesicht eine Telefonnummer merkt – funktioniert über den „Umbau“ der Kontaktstellen.

BESSER LERNEN. „Obwohl die Mechanismen für Lernvorgänge so wichtig sind, kennt man viele der verantwortlichen Moleküle noch nicht“, sagt Kiebler. Sein Team forscht z. B. an Molekülen der RNA-Bindeproteine Staufen und Pumilio: Beide sind für die lokale Umsetzung von Proteinen an Synapsen wichtig, und für beide fand das Wiener Team – am Maus- bzw. Rattenmodell – heraus, dass sie auch die Entwicklung der Dendriten und die Entstehung der Synapsen regeln. Weltweit suchen Forscher nun nach Methoden, bestimmte RNA-Bindeproteine zu hemmen: „Damit mehr Synapsen veränderbar sind und man besser lernen kann.“

FOTOS: SIEMENS (2), FOTOLIA/ SEBASTIAN KAULITZKI, FOTOLIA/V. YAKOBCHUK