

# Rechnen wie das Gehirn

Mit klassischen Computern fällt es immer schwerer, den Hunger der Menschheit nach Rechenleistung zu stillen. Auf der Suche nach Alternativen lassen sich die Forscher auch vom Nervensystem inspirieren. Das Ziel ist es, biologische Konzepte auf die technische Informationsverarbeitung zu übertragen.

von THOMAS BRANDSTETTER

Das biologische Original: Über Synapsen, Kontakte zwischen verschiedenen Nervenzellen, werden im Gehirn Signale übertragen.

**A**uch wenn Computer oft als technisches Analogon zum Gehirn betrachtet werden, weist ihre Funktionsweise kaum Parallelen mit dem menschlichen Denkorgan auf. Seit Beginn des Zeitalters der Informationstechnologie arbeiten Rechenmaschinen nach dem immer gleichen Prinzip: Daten werden als Abfolge von Nullen und Einsen dargestellt, alle Abläufe bei Berechnungen sind exakt im Rhythmus einer Systemuhr getaktet – und dabei ist die Verarbeitung von Informationen strikt von ihrer Speicherung getrennt.

Im Gehirn dagegen gibt es so eine Trennung nicht. Informationen werden analog und in unregelmäßigen Abständen von einer Nervenzelle zur nächsten übertragen. Millionen Jahre evolutionä-

## KOMPAKT

- Das Gehirn geht beim Übermitteln und Verarbeiten von Informationen völlig anders vor als ein Computer.
- Dennoch ist es bereits gelungen, einzelne biologische Konzepte in die Rechentechnik zu übertragen.
- Ein Vorteil neuronaler Prozesse ist ihr sparsamer Verbrauch an Energie.

rer Entwicklung haben dieses System auf ein Höchstmaß an Effizienz getrimmt, weshalb das Gehirn gewöhnlich mit einer Leistung von rund 25 Watt auskommt. Doch damit kann es Aufgaben erledigen, die jedes moderne, energie-fressende System der Künstlichen Intelligenz hoffnungslos überfordern würden. Zugleich passt die starre Funktionsweise herkömmlicher Computer ohnehin nicht so recht zu den Anforderungen der KI. Was liegt also näher, als sich bei der Entwicklung neuartiger Computersysteme vom Gehirn inspirieren zu lassen?

### Der Flaschenhals moderner Rechner

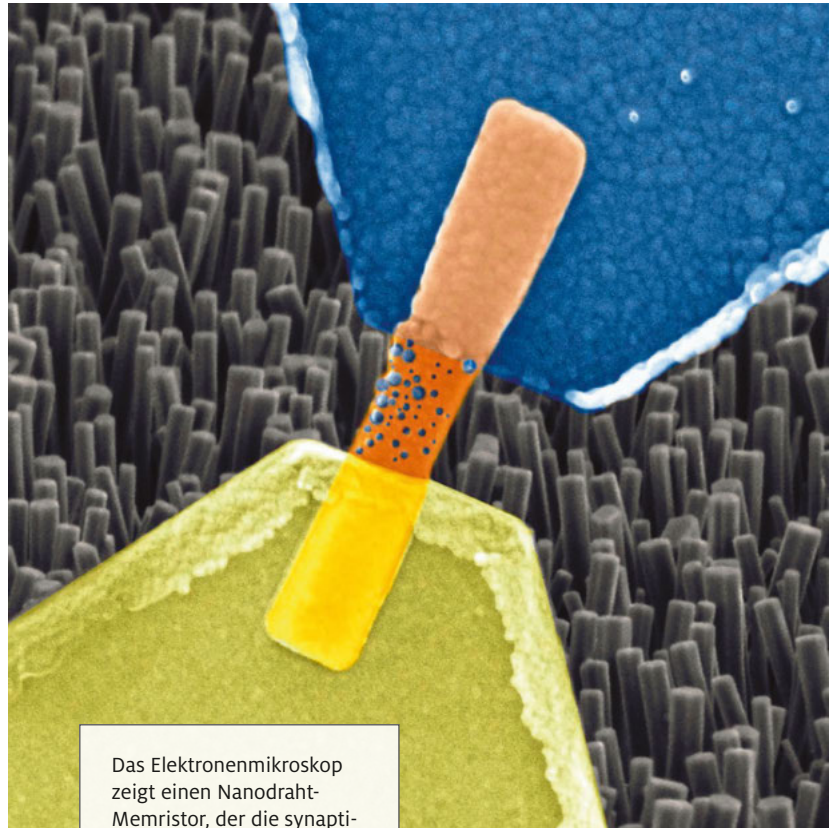
Die zentralen Bauelemente eines herkömmlichen Computerchips sind die Transistoren. In milliardenfacher Ausführung dicht an dicht in einen Silizium-Kristall geschrieben, verarbeiten diese digitalen Schalter Daten, die sie dafür zunächst aus dem Speicher holen und dann wieder dorthin zurückschieben müssen. Doch da der Zeitaufwand für das Auslesen und Beschreiben der Speicher schon lange nicht mehr mit der Geschwindigkeit der Prozessoren Schritt halten kann, entwickelt sich dieser interne Datenverkehr zunehmend zu einem Flaschenhals moderner Computersysteme.

Im Zentrum der biologischen Informationsverarbeitung stehen dagegen die Synapsen. Sie bilden die Verbindungen zwischen den einzelnen Nervenzellen, über die sie ihre elektrischen Pulse – die Spikes – zu ihren Nachbarn schicken. Wird eine Nervenzelle – ein Neuron – von genügend solcher Spikes angeregt, beginnt es seinerseits zu feuern, und die Datenverarbeitung ist in vollem Gang. Gleichzeitig werden die Synapsen während ihrer Übertragung verstärkt, und die Information in Form dieser Veränderungen wird gewissermaßen gleich mitgespeichert.

### Künstliche Synapsen

Als technisches Pendant zur Synapse gilt der „Memristor“ – ein Kofferwort aus Memory (Speicher) und Resistor (Widerstand). Dabei handelt es sich im Wesentlichen um elektrische Widerstände, deren Leitfähigkeit sich verändert, wenn sie von einem elektrischen Strom durchflossen werden. Da sie diesen neuen Zustand dann auch beibehalten, können die Widerstände, ähnlich wie Synapsen, Informationen gleichzeitig übertragen und speichern.

„Dieses Konzept ist ungefähr seit dem Jahr 2000 Gegenstand intensiver weltweiter Forschung, unter anderem beim US-amerikanischen IT-Konzern IBM, wo man dabei auf Oxid-Materialien setzt“, berichtet Regina Dittmann, die sich im Bereich Elektronische Materialien des Forschungszentrum Jülich mit der Weiterentwicklung von Memristoren beschäftigt. „Ein paar Jahre später konnten wir die von IBM beobachteten Schaltphä-



Das Elektronenmikroskop zeigt einen Nanodraht-Memristor, der die synaptische Übertragung imitiert.

nomene durch die Bewegung von Sauerstoff-Ionen erklären.“

Heute gilt diese Memristor-Variante als eine der meistversprechenden für Anwendungen in sogenannten neuromorphen Computersystemen. Bei dieser Technik wird ausgenutzt, dass beim Anlegen einer elektrischen Spannung in einem oxidischen Material Sauerstoff-Leerstellen entstehen, die das eigentlich hochgradig isolierende Material leitfähig machen. „Das ist wie ein Verschluss, denn man auf- und zumacht“, erklärt Dittmann. „Und im Idealfall sind auch kontinuierliche Zwischenzustände des Widerstands möglich, wodurch potenzielle Anwendungen noch effizienter werden“.

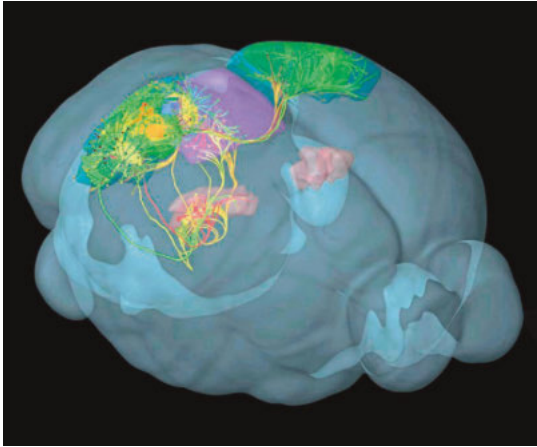
Einfache Memristoren, die sich nur ein- und ausschalten lassen, werden bereits in Massenproduktion hergestellt und kommerziell angeboten. Und auch erste Prototypen von künstlichen neuronalen Netzwerken aus einigen Hundert solcher Bauteile existieren bereits und sind auch schon in der Lage, einfache Klassifizierungsaufgaben zu bewältigen

– zum Beispiel das Erkennen handgeschriebener Ziffern. Allerdings: Aktuell wird die Funktion der Synapsen in Anwendungen der Künstlichen Intelligenz noch durch herkömmliche Computer und ausschließlich über die Software realisiert. „Dabei muss sich der Algorithmus bei jedem Trainingsschritt merken, wie stark eine Verbindung zwischen zwei Neuronen in dem künstlichen neuronalen Netz sein soll“, sagt Dittmann. „Deshalb verbrauchen diese KI-Anwendungen viel Energie.“

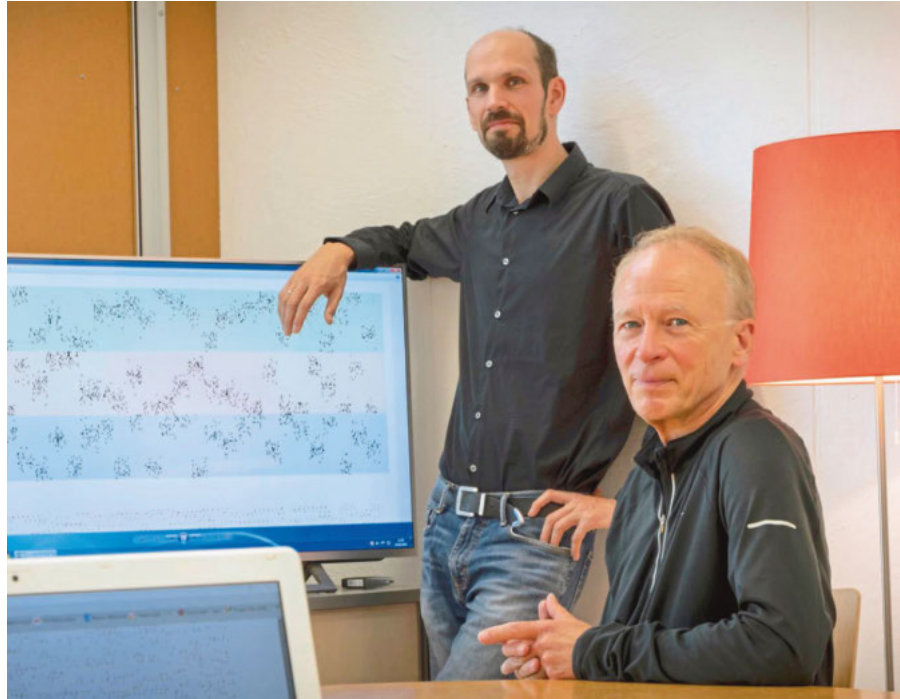
### Anwendungen fürs Internet der Dinge

Doch die Jülicher Wissenschaftlerin geht nicht davon aus, dass die Memristor-Technologie in naher Zukunft herkömmliche Computer ablösen wird. „Ich nehme an, dass es erste Anwendungen eher im sogenannten Internet der Dinge, auf Englisch: Internet of Things, geben wird“, meint sie: „zum Beispiel bei Sensoren, die den Gesundheitszustand älterer Menschen in ihrer gewohnten Umgebung überwachen.“ Schließlich kommt es dort, wo Daten schnell und





Oben: Die farbige Darstellung des visuellen Systems einer Maus zeigt die Vernetzung von vier Arealen im Kortex des Tiers (grün, gelb, rot, orange) mit weiteren am Sehen beteiligten Bereichen im Thalamus (rosa) und Mittelhirn (violett). Rechts: Die Grazer Forscher Robert Legenstein und Wolfgang Maass (rechts) setzen den Sehsinn technisch um.



unmittelbar vor Ort aufgenommen und klassifiziert werden sollen, häufig auf die Energieeffizienz an – etwa damit sich die Systeme dezentral per Batterie betreiben lassen. Außerdem sind bei solchen Anwendungen häufig auch die anfallenden Datenmengen überschaubar und können auch von kleinen Netzen bewältigt werden.

### Eine enorme Energieeffizienz

Künstliche Synapsen stellen die unterste Ebene dar, auf der Forscher die Funktionsweise biologischer Nervensysteme nachzubilden versuchen. Doch auch auf höheren Ebenen kann das Gehirn als Vorbild für Computersysteme dienen. So ist dort nie mehr als ein Prozent der Neuronen gleichzeitig aktiv. Da das Gehirn vor allem auf Neuigkeiten ausgelegt ist und ständig versucht, auf seine Umwelt zu reagieren und sie vorherzusagen, verdichtet es Informationen extrem, was ebenfalls zu einem hohen Maß an Energieeffizienz beiträgt.

Allein die Netzhaut mit ihren vier Schichten von Neuronen komprimiert beispielsweise die auf das Auge auftretenden Informationen bereits auf ein Hundertstel. Und neuromorphe Computerchips wie der von Forschern an der

Technischen Universität Dresden mitentwickelte SpiNNaker2 versuchen, solche Prinzipien umzusetzen. Sie arbeiten zwar mit konventionellen Transistoren, nutzen auf höherer Ebene aber ähnliche Prinzipien der Codierung wie die Netzhaut, um Informationen auf das Wesentliche zu reduzieren und so die Effizienz zu steigern.

Um die Funktionsweisen des Gehirns zu entschlüsseln und für die Computertechnologie nutzbar zu machen, versuchen Neuroinformatiker wie Wolfgang

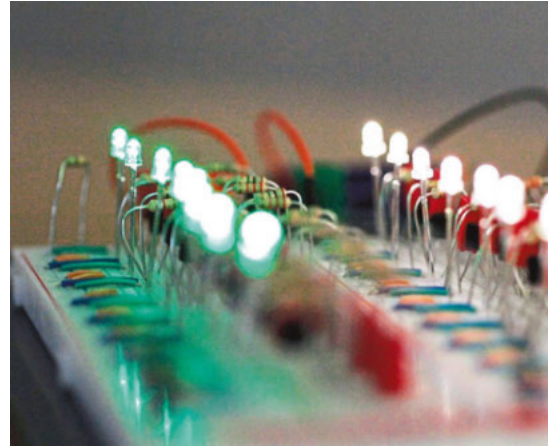
## Erstmals ließ sich das biologische Sehen imitieren

Maass vom Institut für Grundlagen der Informationsverarbeitung der Technischen Universität Graz, sie zunächst am Computer zu simulieren. Im Herbst 2022 haben er und sein Team in der Fachzeitschrift „Science Advances“ darüber berichtet, wie es ihnen erstmals gelungen ist, auf diese Art die biologische Funktion des Sehens nachzubilden. Grundlage für die Computersimulation der Grazer Wissenschaftler ist das Modell eines 51978

Neuronen umfassenden Teils des visuellen Kortex einer Maus.

„Das ist einer der am genauesten untersuchten Teile eines Gehirns“, sagt Maass. So konnten die Forscher als Grundlage für ihre Simulation auf eine Art Karte zurückgreifen, die die Wahrscheinlichkeiten wiedergibt, mit denen einzelne Neuronen im Mausgehirn miteinander verbunden sind. Als Input für die Simulation dienten die gleichen Bilder, die auch die lebendigen Mäuse gesehen haben, etwa einfache Streifenmuster oder Bilder von anderen Tieren wie Hunden oder Papageien. Um festzustellen, ob die Simulation funktioniert, hat das Team um Maass die Ergebnisse seiner Simulation mit Messungen an den Neuronen lebender Mäuse verglichen. Sie erfolgten, während die Nager die Bilder betrachteten.

Bei einer Aufgabe etwa bekam eine Maus eine Folge von Bildern zu sehen und musste jedes Mal reagieren, wenn das aktuelle Bild sich vom vorhergehenden unterschied. „Das ist schon einigermaßen komplex, weil so ein Bild sehr viele verschiedene Informationen enthält“, sagt Maass. „Aber eine Maus schafft das mit einer Trefferquote von etwa 80 bis 90 Prozent – und auch das



Links: Die Illustration stellt symbolisch die unzähligen Verbindungen zwischen Neuronen des menschlichen Gehirns dar. Dieses enthält rund 100 Milliarden Nervenzellen und noch viel mehr Verknüpfungspunkte. Oben: In einer simplen technischen Realisierung eines solchen neuronalen Netzwerks kommunizieren verbundene Oszillatoren miteinander.

Computermodell hat diese Trefferquote erzielt.“ Außerdem hat sich bei den Experimenten herausgestellt, dass das Modell des Mausgehirns gegenüber Eingabefehlern äußerst robust ist.

So kam es mit absichtlich in die Bilder eingebauten falschen Pixeln besser klar als herkömmliche Algorithmen der Künstlichen Intelligenz. „Das ist wichtig für technische Anwendungen wie das autonome Fahren, wo fatale Unfälle geschehen können, weil das Sehen nicht richtig funktioniert“, erläutert Maas. „Die Industrie hat großes Interesse am biologischen Sehen, auch weil es viel energieeffizienter ist als die Netzwerke, die aktuell dort zum Einsatz kommen.“

### Neuronale Spikes nachbilden

Eine weitere Möglichkeit, vom Gehirn inspirierte Funktionen technisch umzusetzen, sind Oszillatorknetzwerke. Bei einem solchen System werden die Spikes eines biologischen neuronalen Netzwerkes durch Schwingungen miteinander vernetzter, elektrischer Oszillatoren nachgebildet. Wie die Neuronen im Gehirn beeinflussen sie sich dabei gegenseitig, und ihr kollektives Schwingungsverhalten lässt sich nutzen, um Berechnungen auszuführen. Ähnlich wie Mem-

ristor-Netzwerke steckt zwar auch diese Technologie noch in den Kinderschuhen, doch sie wurde bereits erfolgreich für einfache Aufgaben der Mustererkennung eingesetzt.

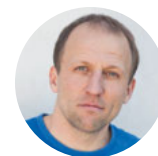
Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs „Neuroelektronik: Biologisch inspirierte Informationsverarbeitung“ der Universität Kiel beschäftigen sich Hermann Kohlstedt und sein Team mit globalen Eigenschaften solcher Netzwerke. Dabei sind die Forscher auf eine verblüffende Parallele zum menschlichen Gehirn gestoßen. Einer Modellvorstellung aus der Neurobiologie zufolge kann das menschliche Gehirn besonders gut auf äußere Einflüsse reagieren, wenn sich die Aktivität der Neuronen an einem kritischen Punkt befindet. „Das ist eine plausible Theorie, der viele Forscher Beachtung schenken“, sagt Kohlstedt.

### Das Optimum am kritischen Punkt

Demnach herrscht unterhalb des kritischen Punktes zu viel Ruhe im Gehirn, über dem Punkt ist das Organ dagegen zu stark angeregt. „Und in beiden Fällen läuft die Informationsverarbeitung nicht optimal“, erläutert der Kieler Wissenschaftler. In der Natur sind es laut der Theorie äußere Einflüsse, die über die

Sinneseindrücke das Gehirn in den optimalen, kritischen Zustand versetzen. Schließlich mussten Lebewesen im Verlauf der Evolution immer wieder neu lernen, mit ihrer Umgebung zurechtzukommen. „Wir konnten nun zeigen, dass sich auch ein technisches System durch äußere Einflüsse an einen solchen kritischen Punkt bringen lässt“, berichtet Kohlstedt. „Wir sehen das als einen weiteren Schritt auf dem Weg zu einer biologisch inspirierten Verarbeitung von Informationen.“

So suchen die Forscher unermüdlich nach Anregungen aus Biologie und Neurowissenschaft, um die Informationstechnik leistungsfähiger und effizienter zu machen. Und auch wenn das große, übergeordnete Ziel – die Funktionsweise des Gehirns vollständig zu verstehen und nachzubilden – unerreichbar sein mag: Allein der Weg dorthin verspricht bereits wertvolle neue Erkenntnisse und Technologien. ■



**THOMAS BRANDSTETTER** hat in bild der wissenschaft bereits mehrfach über neue Computertechniken berichtet, etwa im Januar 2022 über das Rechnen mit Licht.