



Die Hirn-Maschinen

Leistungsfähige Supercomputer stoßen bald an Grenzen. Daher entwickeln Forscher neuartige Architekturen für futuristische Rechner. Ihr Vorbild ist das menschliche Gehirn

Text: REINHARD BREUER, Fotos: WOLFRAM SCHEIBLE



Das Heidelberger Forscherteam feilt an den Feinheiten des neuartigen Rechners.

Regelmäßig brechen Supercomputer ihre eigenen Geschwindigkeitsrekorde. Seit über 50 Jahren verdoppelt sich ihre Rechenleistung gemäß der sogenannten Moore'schen Regel alle zwei bis drei Jahre. Mit etlichen Milliarden Transistoren, die bald nur noch wenige Nanometer klein sein werden, ist ihr Rechentempo längst in aberwitzige Höhe geschossen. Das grenzt an ein technisches Wunder. Trotzdem denken die Computerwissenschaftler über alternative Rechnerarchitekturen nach, um die Schwierigkeiten heutiger konventioneller Superrechner zu umgehen.

Sie sollen ähnlich wie das menschliche Gehirn funktionieren und damit auch

Aufgaben lösen, die bislang dem Menschen vorbehalten waren: Bilder erkennen, Sprache verstehen, durch eine komplexe Umgebung navigieren. Auch sonst müssen die Supercomputer von heute häufig passen – etwa wenn es darum geht, aus unstrukturierten Datenmengen vernünftige Schlüsse zu ziehen, Entwicklungen vorherzusagen oder Entscheidungen zu treffen.

KOMPAKT

- Neuromorphe Computer sind sehr zuverlässig und haben nur einen geringen Energiebedarf.
- Die Neuronen aus Silizium passen eigenständig ihr Verhalten an.
- Ziel ist eine Maschine, die ständig weiter dazulernt.

Was macht Supercomputer problematisch? „Das ist vor allem ihr enormer Energiebedarf: Sie sind sehr energieineffizient“, erklärt Karlheinz Meier, Physiker und Computerexperte von der Universität Heidelberg. Der Grund ist ihre Architektur, die der Ungar John von Neumann schon in den 1940er-Jahren entworfen hat. Dabei sind Prozessoren und Datenspeicher voneinander getrennt. Fast die gesamte Energie wird dafür benötigt, Daten hin und her zu transportieren. Meier beklagt weitere Schwächen der Supercomputer. „Wir brauchen Software, die jeden Rechenschritt exakt vorschreibt – Zeile für Zeile“, sagt der Physiker. Doch diese Programme werden immer komplizierter, sind daher immer schwerer zu verstehen – und enthalten zwangsläufig Defekte. So müssen dauernd Software-Updates installiert werden.

Das Ende der teuren Megafabriken

Zunehmend problematisch ist auch die mangelnde Fehlertoleranz der Rechner. Wenn man heute Mikroprozessoren baut, mit mehreren Dutzend Milliarden Transistoren und Leiterabständen unter 10 Nanometer, dann muss man bei der Produktion alles exakt im Griff haben, betont der Heidelberger Wissenschaftler. Kein Wunder, dass neue Chipfabriken viele Milliarden Dollar kosten. Das wird künftig nicht mehr tragbar sein, ist Meier überzeugt. Die Probleme von Softwarebedarf, extremer Zuverlässigkeit und Energieineffizienz seien starke Argumente dafür, neuartige Computer zu konstruieren: „Wenn man da ein fehlertolerantes System mit geringem Energiebedarf hätte – so wie unser Gehirn –, dann wäre das ein großer Vorteil.“

Wie viele seiner Kollegen weltweit denkt Karlheinz Meier längst über eine solche Alternative nach, die er dem menschlichen Gehirn abschauen will: einen „neuromorphen Computer“. Er soll eine höhere Fehlertoleranz und gesteigerte Energieeffizienz bieten – und zudem lernfähig sein. Auf Neurocomputern würde die Software durch interne Lernprozesse im Netzwerk künstlicher Neuronen ersetzt.

In Europa gibt es das „Human Brain Project“ – eine EU-Initiative, die Hirnforscher seit 2013 mit einer Milliarde Euro



Die Herstellung der neuromorphen Chips auf einem Wafer erfordert hohe Reinheit.



Die biologisch inspirierte Technik (Detailbild auf dem Monitor) entsteht im Team.

fördert. Knapp zehn Prozent dieser Summe fließen über zehn Jahre in die Entwicklung neuromorpher Hardware. In diesem Rahmen entstehen derzeit zwei solche Rechner: der „BrainScaleS“, den Meier und sein Team in Heidelberg bauen, sowie der „SpiNNaker“, den der Computerarchitekt Steve Furber an der britischen University of Manchester entwickelt.

Prinzipien des Gehirns adaptieren

Ein Teil der Forscher nutzt Neurocomputer, um das Hirn besser zu verstehen. Andere, darunter die in Heidelberg und Manchester, versuchen einige der Prinzipien, nach denen das menschliche Gehirn funktioniert, für ihre Rechner zu adaptieren. „Ich nenne das bioinspiriertes Computing“, sagt Meier.

Was die Forscher und Entwickler schon immer faszinierte: Warum kommt unser Gehirn mit gerade mal 20 Watt aus – der Leistung einer schwachen Glühlampe –, während die schnellsten Supercomputer etliche Megawatt, also das Millionenfache, verbrauchen. Dennoch erbringt das Gehirn Leistungen, die Superrechner nicht schaffen – und das mit unzuverlässigen Bausteinen: einem kleinen Haufen organischer, langsamer und veränderlicher Neuronen, die bequem in einer Schuhschachtel Platz fänden.

„Unser Gehirn ist so energieeffizient, weil Rechnen und Datensicherung ineinander übergehen und praktisch iden-

tisch sind“, erklärt Karlheinz Meier. In konventionellen Rechnern verschlingt der Datentransport die meiste Energie. Der derzeit schnellste Supercomputer der Welt, der „Summit“ des Oak Ridge National Laboratory im US-Bundesstaat Tennessee, verbraucht dafür 15 Megawatt – mehr als eine typische Kleinstadt.

Das menschliche Gehirn begnügt sich mit der Leistung einer Glühlampe

Die Rechner der nächsten Generation mit Milliarden mal Milliarden Operationen pro Sekunde („Exascale-Computer“) sind vielleicht schon die Dinosaurier unter den Computern – noch bevor man sie überhaupt gebaut hat. Wenn sie auch mit immer mehr parallel arbeitenden Recheneinheiten immer schneller rechnen können, verbrauchen sie zu viel Energie.

Ein Netz künstlicher Neuronen

Die Idee, künstliche Neuronen aus Silizium zu bauen und gehirntartig zu großen Netzwerken zusammenzuschließen, ist nicht neu. Biologische Neuronen sind, vereinfacht gesagt, so aufgebaut, dass sie von rund 10000 Zuleitungen gespeist werden: den „Synapsen“. Doch sie besitzen nur eine Ableitung, ein „Axon“, über das sie Signale an andere Neuronen weitergeben. Sobald sich in dem Netzwerk genügend solche Eingangssignale aufsummiert haben und die Spannung einen bestimmten Schwellenwert übersteigt, „feuert“ das Neuron und schickt Spannungsimpulse, genannt „Spikes“, entlang des Axons.

Wie biologische Neuronen sammeln auch ihre künstlichen Abbilder aus Silizium die meiste Zeit intern die einlaufenden Spikes auf, was kaum Energie verbraucht. Nur gelegentlich, eben wenn ein bestimmter Schwellenwert erreicht wird, feuern sie einen elektrischen Puls ab. Im Gegensatz dazu müssen konventionelle Rechner dauernd Energie aufwenden, um



WISSEN



Human Brain Project

Die „Neuromorphic Computer Plattform“ ist eine von sechs sogenannten Infrastruktur-Plattformen des „Human Brain Project“ – ein großes internationales Flaggschiff-Projekt, das die Europäische Union mit einer Milliarde Euro fördert. Das Projekt vernetzt Neurowissenschaften und informationstechnische Forschung – mit dem Ziel, das menschliche Hirn über Computersimulationen besser zu verstehen. Die Forscher hoffen, dass sie so auch neue Erkenntnisse über Erkrankungen des Gehirns gewinnen. Auf der anderen Seite wollen sie grundlegend neue Computertechniken und Robotersteuerungen entwickeln, die vom neuen Wissen über die Funktionsweise des Gehirns profitieren.

ihre Prozessoren am Laufen zu halten – unabhängig davon, ob sie gerade rechnen oder nicht.

„Was wir bisher machen“, erklärt Karlheinz Meier, „sind sogenannte Punktneuronen: simple Gebilde, die aufaddieren, was über die Zuleitungen hereinströmt und dann gelegentlich einen Spike als Output erzeugen.“ Die wichtigste Frage sei, wie viel Biologie man hineinstecken muss, um die Rechenleistung etwas zu steigern. „Noch ist ungeklärt, welche Aspekte der Nervenzellen und Neuronetzwerke nicht nur für ihr biologisches Überleben wichtig sind.“

Auf Umwelteinflüsse reagieren

Die Kunst des Lernens in biomorphe Computer zu implantieren, ist eines der wichtigsten Ziele bei der Entwicklung dieses neuartigen Rechnertyps. Denn erst, wenn die Silizium-Neuronen per Sensorik auch auf Umwelteinflüsse reagieren und damit eigenständig ihr „Verhalten“ ändern können, werden sie quasi in Echtzeit ähnlich komplexe Leistungen

bewältigen, wie sie das menschliche Gehirn zustande bringt.

Steve Furber entwickelt seit 2005 in Manchester den biomorphen Computer SpiNNaker. Sowohl der Ort als auch der Mann sind geschichtsträchtig. 1948 entstand in der Stadt im Nordwesten von England der erste programmgesteuerte Computer, das „Manchester Baby“. Er hatte einen Speicher von 128 Bytes und verarbeitete pro Sekunde 700 Befehle. Mit 5 Joule pro 32-Bit-Operation verbrauchte das Gerät insgesamt 3,5 Kilowatt.

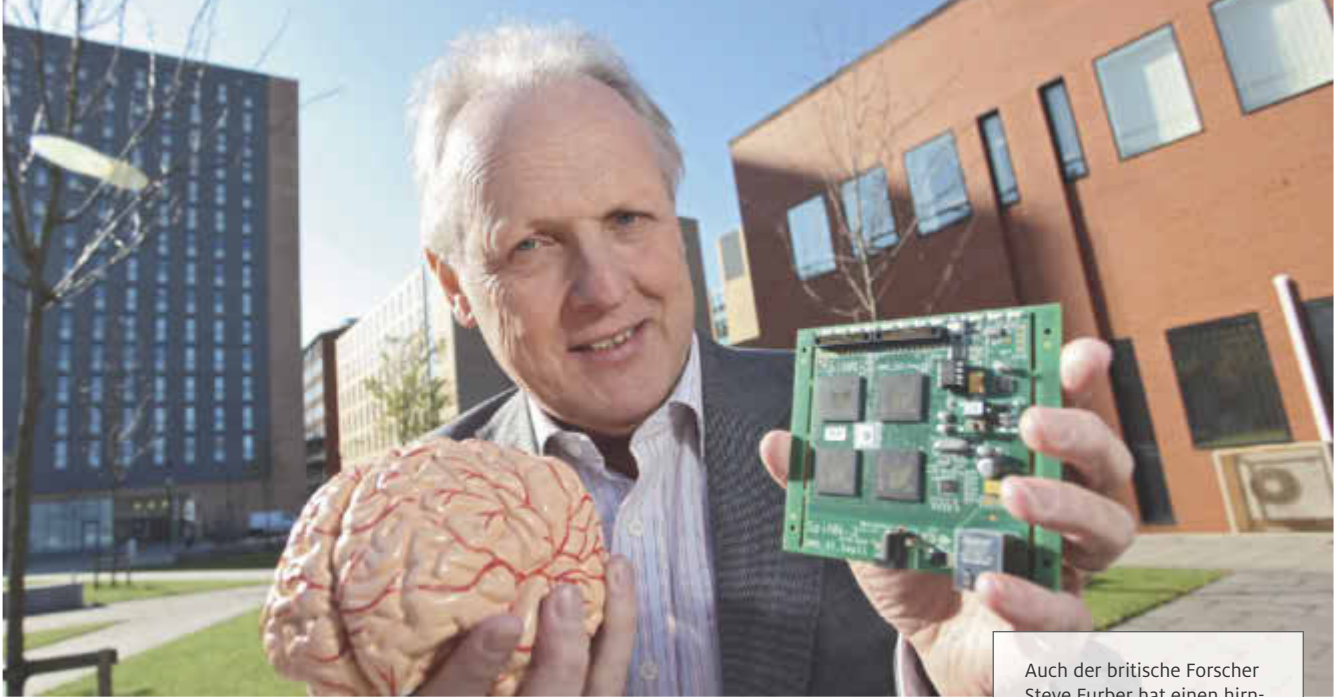
Der britische Computerwissenschaftler ist einer der erfolgreichsten Pioniere auf dem Gebiet der Mikroelektronik. 1985 erfand Furber den sogenannten ARM-Prozessor, von dem heute an die 60 Milliarden Exemplare in Handys und anderen Alltagsgeräten stecken. Jeder dieser Prozessoren läuft mit 40 Milliwatt Leistung und führt pro Sekunde 200 Millionen Operationen aus, die jeweils 0,2 milliardstel Joule an Energie verbrauchen. Damit ist ihr Energieverbrauch um den Faktor 28 Milliarden geringer als beim

Manchester Baby. „Würde der Benzinverbrauch von Autos ebenso drastisch verbessert“, sagt Steve Furber, „könnten sämtliche Fahrzeuge Englands pro Jahr mit insgesamt zwei Litern Kraftstoff herumfahren.“

Ambitionierte Ziele

In dem SpiNNaker-System des britischen Wissenschaftler-Teams stecken seit Ende 2018 auf 500 000 Wafern eine Million Rechenkerne. Jeder davon kann mehrere Neuronen simulieren, also per Software darstellen. Das Ziel der Forscher um Steve Furber ist es, bis zu eine Milliarde biologische Neuronen in Echtzeit zu simulieren. Zum Vergleich: Ein menschliches Gehirn hat etwa 100 Milliarden davon.

Und was genau macht diese Simulationsmaschine neuromorph? „Wir nutzen eine Software, die von äußeren Ereignissen gesteuert wird“, erklärt Furber. „Dadurch ist das Gerät in Echtzeit mit seiner Umgebung verbunden.“ Eine Sekunde Rechenzeit entspricht auch einer Sekunde biologischer Zeit. Zum Vergleich: Ein



Auch der britische Forscher Steve Furber hat einen hirntypischen Rechner geschaffen.

Rechnen nach Art des Gehirns

Neuromorphe Computer, wie sie unter anderem Forscher an der Universität Heidelberg entwickeln, basieren auf der Funktionsweise von Neuronen und neuronalen Netzen im menschlichen Gehirn. Dadurch verbrauchen sie viel weniger Energie als herkömmliche Mikrochips. Die hohe Energieeffizienz beruht darauf, dass die am biologischen Vorbild orientierten Chips Informationen analog verarbeiten – wie die Zellen im Gehirn. Wie echte Neuronen sammeln ihre nachgebildeten Pendant elektrische Ladung an, bis eine bestimmte Menge angehäuft ist. Erst wenn der Schwellenwert überschritten wird, senden sie Informationen an andere künstliche Neuronen. Konventionelle digitale Rechner hingegen geben Informationen ständig und mit einer bestimmten Frequenz weiter. Auch die Verbindungen zwischen den technischen Neuronen sind dem biologischen Original nachgeahmt.

Menschliches Gehirn und neuromorpher Computer

Synapsen

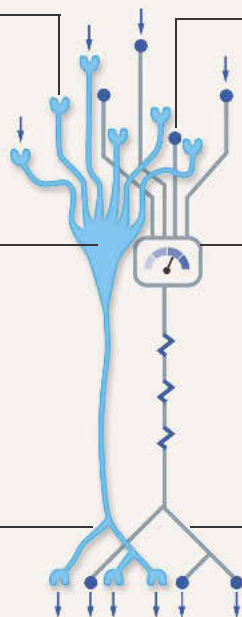
Jedes Neuron besitzt etwa 10 000 feine Verknüpfungen, die kurze Spannungsimpulse („Spikes“) von anderen Neuronen empfangen.

neuronaler Zellkörper

Sowohl biologische Neuronen als auch neuromorphe Systeme arbeiten mit Spannungen und Strömen, die sich kontinuierlich ändern. Das unterscheidet sie von der Digitaltechnik mit wenigen festen Werten.

Axon

Lange Fasern übertragen die Spannungsimpulse zu anderen Neuronen.



Verknüpfungen

Jedes nachgebildete Neuron empfängt Signale über mehrere Tausend Verbindungen, die deutlich einfacher gestaltet sind als die biologischen Vorbilder.

nachgebildetes Neuron

Wie die echten Neuronen addieren auch die nachgebildeten die Signale so lange, bis ein Schwellenwert überschritten wird. Dann feuern sie mehrere Spikes an andere Neuronen ab.

elektrische Leitung

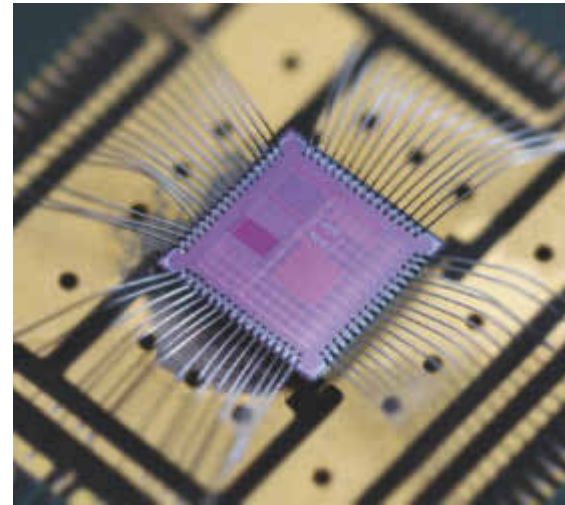
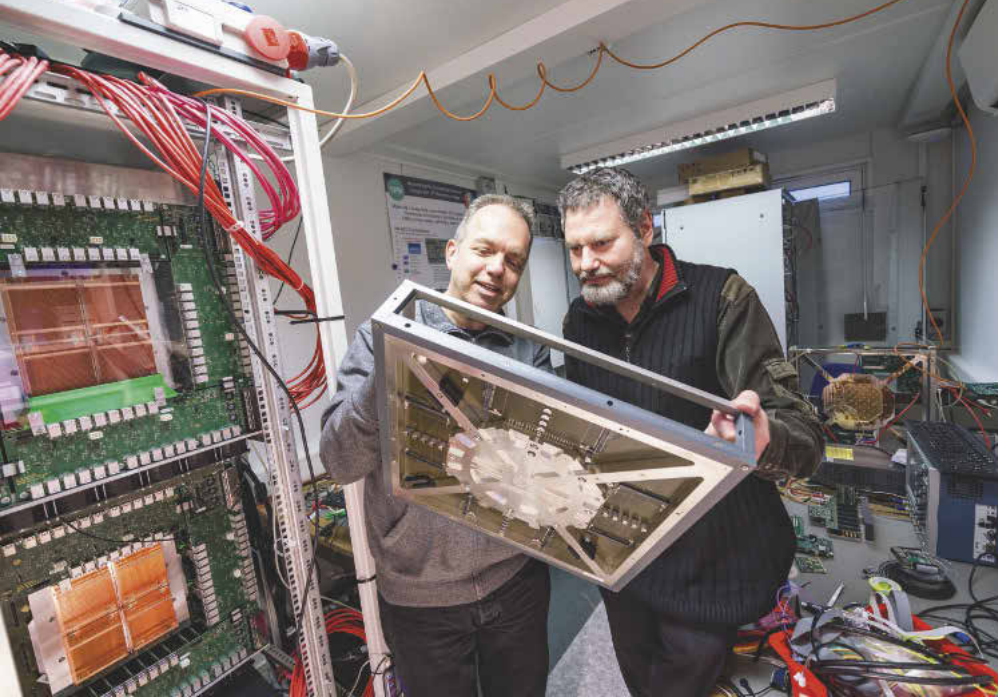
Leitfähige Drähte imitieren die Axonen zum Übertragen der Spikes.

Standard-Computercluster benötigt für eine Sekunde biologischer Zeit etwa zweieinhalb Stunden Rechenaufwand. „Was Parallelcomputer so langsam macht, ist die Synchronisation“, erläutert der Computerforscher: „Die Teilrechner müssen dauernd auf den langsamsten warten.“

Austausch kleiner Datenhäppchen

Steve Furbers Maschine verarbeitet die Ereignisse dagegen blitzschnell – sie ist rund 10 000 Mal so schnell wie ein konventioneller Parallelcomputer. „Deshalb ist SpiNNaker auch gut für die Robotik geeignet, etwa zur Steuerung von Kameras, Armen, Beinen und Bewegungen von Objekten“, kommentiert Karlheinz Meier. Damit haben die Forscher in Manchester bereits Testbeispiele gerechnet: das Videospiel PACMan oder Sudokus der Größe 9x9. Was den SpiNNaker hirnhähnlich macht, ist die Kommunikation zwischen seinen vielen ARM-Prozessoren. Diese sind in dem Computer über eine Art internes Internet miteinander vernetzt und tauschen darüber Datenpakete aus. Aber im Gegensatz zum weltweiten Internet, wo die beförderten Datenpakete groß sind, werden hier nur kleine Datenhäppchen ausgetauscht, erklärt Steve Furber. Sie repräsentieren die Spikes.

Ein biomorphes System anderen Typs entwickelt das Heidelberger Forscherteam mit seinem BrainScale-Computer. Im Gegensatz zum SpiNNaker werden hier die Kunstneuronen nicht simuliert, sondern real in Silizium nachgebildet,



Experten sagen: „emuliert“. Ein Vorteil: Das Tempo der Datenverarbeitung ist gegenüber den Simulationen der Rechenmaschine aus Manchester nochmals um den Faktor 10000 schneller. Eine Sekunde auf dem Heidelberger Gerät entspricht demnach fast drei Stunden in der biologischen Wirklichkeit.

Allerdings: Genau deshalb eignet sich der Emulator nicht direkt für einen Einsatz in der Robotik. „Es wäre für den Rechner so, als stünde die Welt fast still – wie in extremer Zeitlupe“, erklärt Karlheinz Meier. „Er würde die ganze Zeit sozusagen nachdenken – ohne dass etwas passiert.“

Derzeit betreiben die Heidelberger einen Prototyp ihres Neurocomputers: mit 20 Wafern, auf denen insgesamt vier Millionen künstliche Punktneuronen aufgebracht sind. Jeder Wafer wird über 16000 Verbindungen mit elektrischen Spikes gespeist.

Wie steht es um die zwei großen Versprechungen der neuromorphen Computerarchitektur: Energieeffizienz und Fehlertoleranz? Jeder Wafer verzehrt rund ein Kilowatt elektrische Leistung, der BrainScaleS-Prototyp zieht also im Betrieb 20 Kilowatt. Von den 20 Watt, mit denen das menschliche Gehirn auskommt, ist das um Größenordnungen entfernt. Das liegt einmal daran, dass der neuromorphe

Computer 10000 Mal so schnell rechnet wie die Biologie, sagt Meier. „Daher benötigt unser Rechner auch 10000 Mal so viel Energie.“ Zum anderen haben die vielen konventionellen Zusatzcomputer „drum herum“ ebenfalls einen großen Energiebedarf.

Hohe Toleranz gegenüber Fehlern

Besser steht es da schon um die Fehlertoleranz. Beim menschlichen Gehirn liegt sie nach Ansicht der Neurobiologen bei etwa 10 bis 20 Prozent. Das heißt: Bis zu ein Fünftel der Nervenzellen im Gehirn können ausfallen, etwa durch eine Verletzung – und das Organ kann seine Aufgaben dennoch weitgehend erfüllen. „Bei unserer Maschine steckt die Information sozusagen in allen Neuronen, ähnlich wie im Gehirn“, erläutert Physiker Meier.

Ist die Neuro-Hardware aus Heidelberg aber auch so tolerant gegenüber Fehlern wie unser Gehirn? „Das kommt darauf an“, meint Meier. „Solange man nur einige neuronale Chips bewusst abschaltet oder entfernt, ist das kein Problem.“ Doch je mehr einzelne Neuronen und Synapsen wegfallen, desto deutlicher verschlechtert sich die Rechenleistung des Computers. Allerdings: „Ein normaler Mikroprozessor würde einfach versagen – er ginge schlicht kaputt.“

Der erste Prototyp umfasst 20 Wafer mit vier Millionen künstlichen Neuronen

Oben links: Johannes Schemmel (links im Bild), Nachfolger von Karlheinz Meier, mit seinem Mitarbeiter Björn Kindler. Auf dem Metallteil, das die beiden festhalten, wird der Wafer zum Herstellen der Chips montiert. Rechts: Chip mit elektrischen Leitungen.

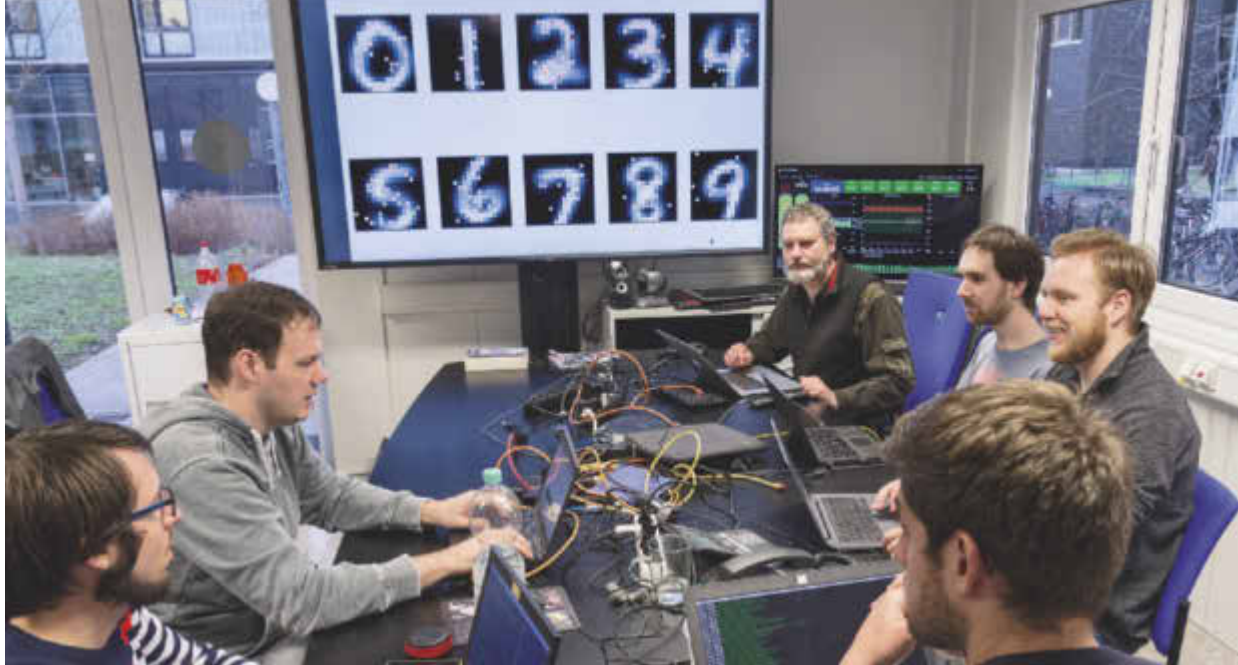
Was man mit dem BrainScaleS-Prototyp anstellen kann, hat das Team um Karlheinz Meier an einigen Beispielen demonstriert. So gelang es, gestützt auf 80000 Probemuster, handgeschriebene Ziffern und Buchstaben mit hoher Zuverlässigkeit zu erkennen. „Aber eigentlich sind das langweilige Aufgaben für unser System“, sagt der Heidelberger Wissenschaftler. Interessanter seien Beispiele aus der Biologie.

Die Forscher vom Neckar erzeugten dazu Digitalversionen biologischer Sensordaten – das Riechsystem von Insekten sowie die nächtliche Ortung von Mäusen durch Eulen. „Insekten erkennen ja Rosen nicht, weil sie Rosen sehen, sondern weil sie chemische Rezeptoren haben, die bestimmte Gemische von Duftmolekülen aufspüren können“, erläutert Meier. Das Experiment, das von einem Neurobiologen konzipiert wurde, funktionierte „effizient und fehlertolerant“.

Winzige Unterschiede in der Phase

Wie Eulen bei Dunkelheit Mäuse fangen, hat mit Schallortung zu tun. Wenn die Nachtjäger im Dunkeln in einer Scheune sitzen, können sie das Rascheln von Mäu-

Eine der Aufgaben, die künftige Neurocomputer besonders gut lösen sollen, ist das Erkennen von Mustern, etwa bei Ziffern (rechts). Darin übertrifft die Technik herkömmliche Rechner. Unten: Blick in den Computerraum.



sen lokalisieren, indem sie die Phasendifferenz der Schallwellen zwischen ihren Ohren messen. Der Unterschied ist winzig klein. Mäuse, die herumlaufen, erzeugen für das Eulengehirn Signale mit Phasendifferenzen von 100 Mikrosekunden. „Dass die Eule das messen kann, ist beeindruckend, denn die Synapsen sind bei beiden Tieren ziemlich verschieden, die sind ja nicht geeicht“, meint Meier. Das System kalibriert sich selbst.

Das Rascheln der Maus

Bei einer Nachbildung im Rechner werden die Unterschiede in der Signallaufzeit durch einen Lernprozess kompensiert: Das nähere Signal läuft über einen längeren, das fernere Signal über einen kürzeren Weg, sodass am Ende beide Signale in dem Neuron synchron zusammentreffen. Eine erste Version des Heidelberger neuromorphen Computers schaffte es

innerhalb von zehn Nanosekunden, diese Phasendifferenzen zu messen – und das Rascheln der Maus zu orten.

Außerdem konnten die Wissenschaftler auf dem Heidelberger Neurorechner Sudoku-Rätsel fast beliebiger Größe lösen und auch sogenannte Färbungsprobleme. Bei diesen Aufgaben sollen Landkarten so eingefärbt werden, dass niemals Länder mit der gleichen Farbe aneinanderstoßen. Haben bei der Kartenfärbung zwei benachbarte Länder die gleiche Farbe, wird das Neuron, das dafür verantwortlich ist, gesperrt – und die Farbkombination dadurch ausgeschlossen. „Mit solchen ‚inhibitorischen Netzwerken‘ bewältigt unsere Maschine die Aufgabe beliebig schnell“, freut sich Physiker Meier.

Das Ziel der Computerforscher in seinem Team ist jedoch der „BrainScaleS-2“. Bis 2023 soll das gegenüber dem Prototyp deutlich verbesserte Gerät seinen Betrieb

aufnehmen. Darin wollen die Heidelberger Wissenschaftler die Elektronik besser integrieren und dadurch den Leistungsbedarf pro Wafer auf 0,5 Kilowatt halbieren. Angepeilt sind 5000 Wafer, die bereits am Berliner Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM) gefertigt werden. Das futuristische Rechenggerät mit seinen 75 Millionen Hardware-Neuronen und zahlreichen Zusatzeinrichtungen wird insgesamt drei Megawatt Leistung benötigen.

Baumartige Strukturen

Ein weiterer Fortschritt, an dem die Forscher arbeiten: Neben den simplen künstlichen Neuronen kommen zusätzlich komplexere, „dendritische“ (baumartige) Silizium-Neuronen zum Einsatz. Damit folgen die Wissenschaftler dem Vorbild biologischer Neuronen, die keine Punkte sind, sondern oft ausgedehnte baumartige Gebilde – eine Anpassung an vielerlei Aufgaben, die mit Fehlerkorrektur und Lernen zu tun haben. Das veränderte Design ermöglicht es, dass auf den Chips interne Lernprozesse stattfinden. „Das kann noch niemand auf der Welt“, sagt Meier stolz.

Einen wesentlichen Teil der Energie wird auch bei der nächsten Generation des neuromorphen Computers die Elektronik um die Kunstneuronen herum verschlingen, wie schon bei dem heutigen Prototyp. So werden auf jedem Chip zusätzlich zwei klassische Mikroprozessoren montiert. Der Grund: Die Prozessoren ermöglichen einen Einblick in alle synap-

tischen und neuronalen Daten auf dem Chip. Sie können selbst kleine Rechnungen ausführen und von außen verbesserte Lernregeln in das System einbringen. So lässt sich nicht nur genau erkennen, was im Inneren des Neurocomputers geschieht, sondern die Prozesse lassen sich auch aktiv steuern.

Zehn Terabit pro Sekunde

Die Mikroprozessoren in allen Chips des künftigen Neurorechners werden jedes der 75 Millionen Neuronen konfigurieren, jede Synapse einzeln auslesen und analysieren können. In dem System wird ständig eine riesige Menge an Daten zirkulieren: Pro Sekunde sind dort zehn Terabit unterwegs, also 10^{13} Bits. Ein Zehntel dieser Daten wird zur Kontrolle und Steuerung laufend ein- und ausgelesen. „Der Brain-Scales-2 wird nicht nur ein neuartiger Computer sein“, erklärt Karlheinz Meier. „Er ist ein Forschungssystem. Daher müssen wir genau wissen, was darin passiert.“

Die Heidelberger Emulationsmaschine wird funktionieren wie ihr biologisches Vorbild. Wie das menschliche Gehirn folgt sie physikalischen Gesetzen, die dafür sorgen, dass Ladungen in diese oder jene Richtung fließen. Das Besondere wird sein, dass der Nutzer alles separat einstellen kann – die Form und Stärke der neuronalen Verbindungen ebenso wie

die Art, wie die künstlichen Neuronen auf neue Daten reagieren.

„Was hier entsteht, ist eine kontinuierlich lernende kognitive Maschine“, erklärt Meier. Ähnlich wie das Gehirn sei sie eine „Vorhersagemaschine“. Sie wird sich mit riesigen Datenmengen speisen lassen – etwa aus der Teilchenphysik, von Aktienmärkten oder zur Klimaforschung.

Das neuromorphe System werde ständig laufen und selbst erkennen, welche Zusammenhänge in den Daten stecken. Man könne es zum Beispiel mit den globalen Wetterdaten der letzten Jahrzehnte füttern. Die Maschine werde dann eigenständig die nötigen Regeln finden, um Regen oder Stürme besser vorhersagen zu

In Memoriam Prof. Karlheinz Meier

Der Physiker Karlheinz Meier, der in diesem Beitrag häufig zitiert wird, starb wenige Wochen nach den Recherchen und seinem Gespräch mit dem Autor im Alter von 63 Jahren. Der gebürtige Hamburger kam 1992 an die Universität Heidelberg und war Ordinarius für Experimentalphysik am Kirchoff-Institut für Physik, das auf seine Initiative hin 1999 gegründet wurde. Meier war einer der führenden Wissenschaftler des Human Brain Project der Europäischen Union.



können, erklärt der Heidelberger Physiker: „Unser System soll pausenlos lernen, seine Erkenntnisse nutzbringend anwenden und daraus wiederum hinzulernen.“ ■



REINHARD BREUER

ist Wissenschaftsjournalist und Astrophysiker. Er hofft, dass sich mit Neurocomputern auch die Rätsel des Universums lösen lassen.



WOLFRAM SCHEIBLE

hat die Arbeit des Heidelberger Forscherteams in seiner Fotoreportage dokumentiert.

JETZT BEWERBEN UM DEUTSCHLANDS

AUSZEICHNUNG FÜR NACHHALTIGE FORSCHUNG.

Der Deutsche Nachhaltigkeitspreis Forschung prämiert Wissenschaftler, die vorbildliche Lösungen für die ökologischen und sozialen Herausforderungen der Zukunft anbieten. In diesem Jahr stellt das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) das Thema „Urbane Mobilität der Zukunft“ in den Mittelpunkt. Bis zum 10. Mai 2019 können Forschungseinrichtungen, Hochschulen und Unternehmen unter www.forschungspreis.de Projekte einreichen, die Kommunen Lösungswege für den Verkehr der Zukunft anbieten und gleichzeitig Wechselwirkungen auf die Lebensqualität, Sicherheit und Umwelt berücksichtigen.

