

## «Lernen findet auf ganz verschiedenen Ebenen statt»

**Fritjof Helmchen untersucht als Hirnforscher, wie Informationen in den Gehirnen von Säugetieren verarbeitet werden und was sich in den Neuronennetzwerken ändert, wenn die Tiere neue Fähigkeiten erlernen. Die heutigen KI-Modelle könnten von der Biologie noch vieles lernen, ist er überzeugt.**

**Herr Helmchen, wie würden Sie als Hirnforscher Intelligenz definieren?**

Fritjof Helmchen: Intelligenz bedeutet für mich, dass ein Agent – beispielsweise ein Tier, ein Mensch oder eben auch eine Maschine – mit der Aussenwelt interagiert und dass das Verhalten dieses Agenten sinnvoll ausgerichtet ist auf die Ziele, die erreicht werden sollen. Beim Tier besteht das Ziel beispielsweise darin, Futter zu finden und sich fortzupflanzen. Die Frage ist dann: Wie effektiv ist dieser Agent bei der Lösung der Aufgaben? Dabei spielt Flexibilität eine grosse Rolle. Wie gut reagiert der Agent, wenn Probleme auftauchen oder wenn er mit Neuem konfrontiert wird?

**Das heisst also, ein intelligenter Organismus ist in der Lage, neue Lösungen zu finden?**

Genau. Die Konfrontation mit Problemen oder Neuem erfordert neue Lösungen, die über das hinausgehen, was man vorher gemacht hat. Dazu braucht es ein gewisses Mass an Kreativität.

**Wenn Sie nun von dieser Definition ausgehen: Sind die heutigen KI-Modelle intelligent, wie der Name suggeriert?**

Die KI-Modelle haben in den letzten Jahren auf jeden Fall grosse Fortschritte gemacht und man kann ihr Verhalten inzwischen durchaus als intelligent bezeichnen. KI-Modelle sind viel effektiver geworden, nicht nur darin, relevante Informationen zu finden und zusammenzustellen, sondern auch darin, Entscheidungen zu treffen. Sie sind auch in der Interaktion mit den Usern viel besser geworden. Dennoch würde ich die künstliche Intelligenz im-

mer noch klar unterscheiden von der biologischen Intelligenz. In vielen Bereichen hinken die technischen Lösungen den intelligenten Systemen in der Biologie noch weit hinterher. Roboter zum Beispiel sind bei der Kontrolle von flexiblen Bewegungen noch weit weg von ihren natürlichen Vorbildern. Man darf nicht vergessen: In der Biologie findet sich Intelligenz an Orten, wo man es gar nicht erwartet. Insekten zum Beispiel zeigen ein hochintelligentes Verhalten. Man muss sich nur etwa Flugmanöver von Fliegen anschauen: was die Gehirne dieser Tiere dabei leisten, ist schon phänomenal.

**Und im Vergleich zu Säugetieren haben Insekten ja viel weniger Neuronen zur Verfügung.**

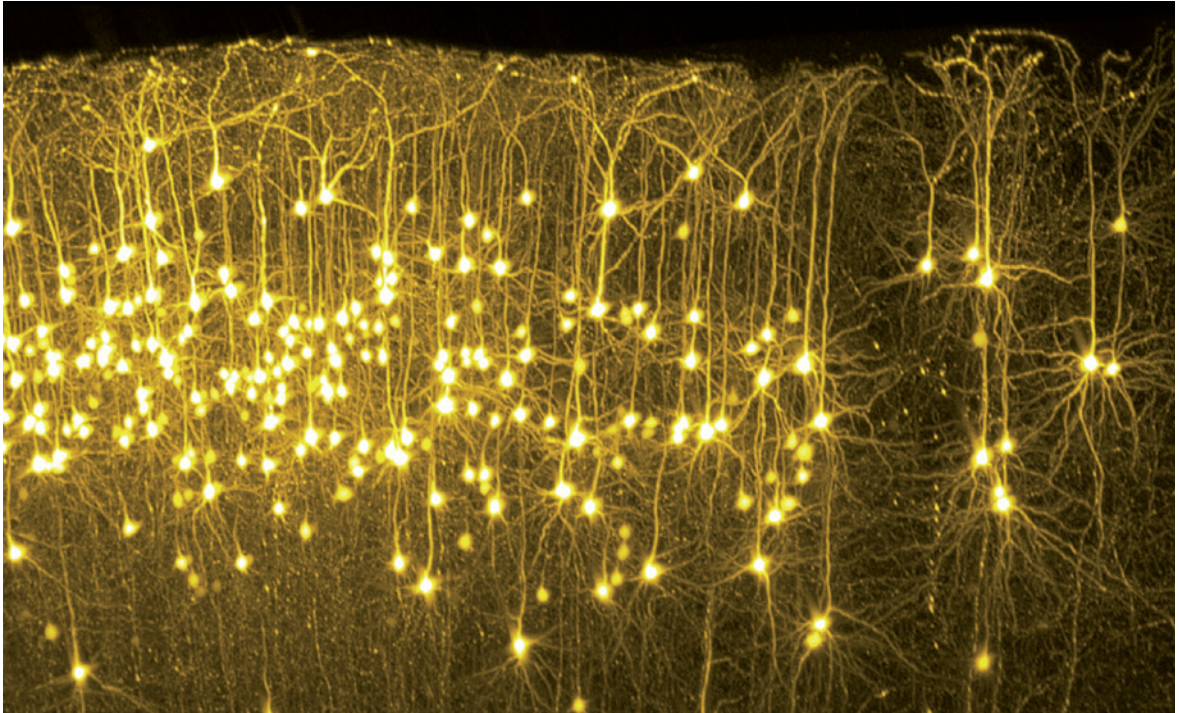
Richtig, das ist extrem effizient. Generell finde ich dies einen wichtigen Aspekt: Die technische Intelligenz hat einen sehr hohen Energieverbrauch. Ein intelligentes KI-System verbraucht vielleicht 200 000 mal mehr Energie als ein menschliches Gehirn. In der Natur sind die Energieressourcen begrenzt. Daher musste die Biologie clevere Lösungen in Form von hochkomplexen aber energieeffizienten Gehirnen finden. Bei KI-Modellen hingegen ist der Energieverbrauch kein limitierender Faktor, zumindest im Moment noch.

**Ein anderer Punkt ist, dass KI-Modelle viele Input-Daten benötigen, also ganz anders lernen als beispielsweise Kinder, die aus Erfahrungen lernen. Worin genau unterscheiden sich die biologischen und künstlichen Lösungen?**

Genau diese Frage untersuchen wir mit unserem Forschungsnetzwerk: Was genau geschieht eigentlich im Gehirn, wenn wir lernen? Wir verstehen das erst ansatzweise. Bei einigen Aspekten wissen wir inzwischen allerdings, dass biologisches und maschinelles Lernen unterschiedlich funktioniert.

**Was heisst das konkret?**

Maschinelles Lernen verwendet simplifizierte Netzwerke, welche aus einer grossen Zahl gleicher einfacher Bausteine bestehen. Zum Lernen brauchen



Blick auf ein komplexes und dynamisches Netzwerk von Nervenzellen mit ihren verzweigten Fortsätzen in der Hirnrinde einer Maus. Die gefärbten Neuronen wurden mit einem modernen Lichtscheiben-Mikroskop ([mesospim.org](http://mesospim.org)) aufgenommen. Die hellen Zellkörper sind etwa ein Hunderstel Millimeter gross. (Bild: F. Voigt, W. Luo, C. Földy, F. Helmchen)

sie sehr viele Input-Daten. Biologische Gehirne sind völlig anders aufgebaut. Sie bestehen aus verschiedenen Zelltypen mit unterschiedlichen Funktionen und jede einzelne Zelle führt bereits komplizierte Berechnungen aus. Zudem findet das Lernen im Gehirn auf verschiedenen Ebenen statt, nicht nur auf einer. Das ist ein verschachtelter Prozess, der von der molekularen über die zelluläre Ebene bis hin zur Netzwerkebene reicht.

**Stimmt es, dass beim Lernen nicht nur die Neuronen, sondern auch die Gliazellen, also die Stützzellen, beteiligt sind?**

Das ist eine relativ neue Erkenntnis und vieles ist noch unklar. Gliazellen sind an sich schon lange bekannt. Sie galten aber lange nur als Stützzellen, welche die neuronalen Netzwerke füttern und unterstützen. In den letzten 20 Jahren haben immer mehr Studien gezeigt, dass diese Zellen jedoch viel mehr machen. Sie sind ebenfalls an den Rechenleistungen des Gehirns beteiligt und spielen auch beim Lernen und beim Gedächtnis eine Rolle.

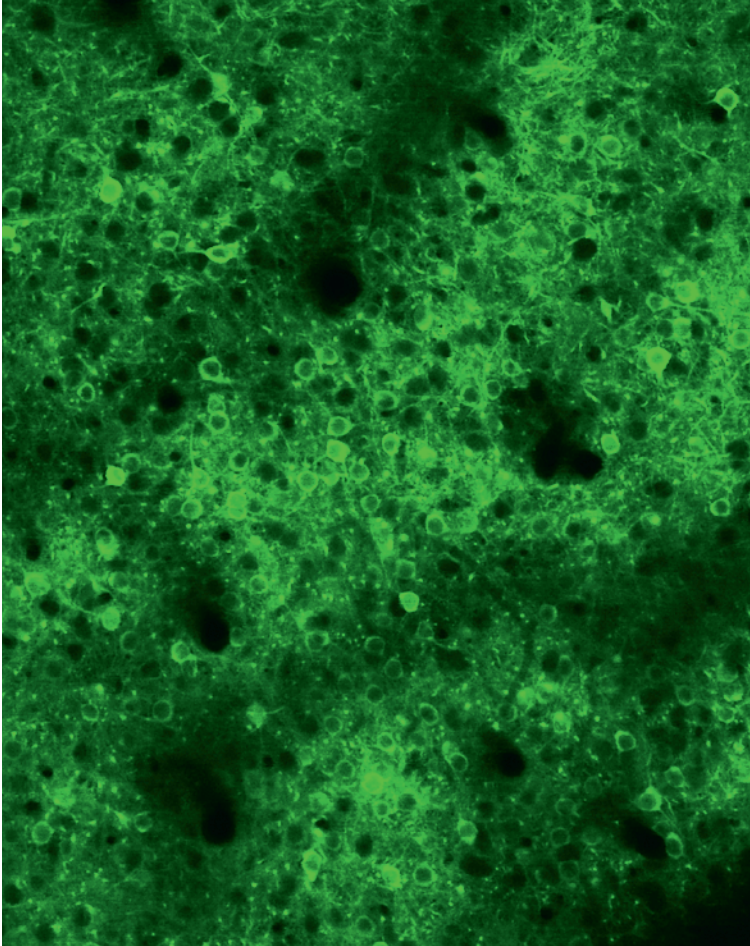
**Wie beeinflussen eigentlich die Emotionen und die körperliche Erfahrung die**

**Vorgänge im Gehirn? Weiss man, wie das zusammenhängt?**

Das ist ein interessantes Forschungsfeld, bei dem man ebenfalls vieles noch nicht versteht. Bei den Emotionen kommen auch die tieferliegenden Gehirnanteile ins Spiel, welche emotionales und soziales Verhalten massgeblich steuern. Das sind sehr komplexe Vorgänge, bei denen jedoch immer viele Hirnregionen involviert sind. Auch Verhaltensstörungen, Autismus oder Aufmerksamkeitsdefizite lassen sich nicht einfach an einem Ort im Gehirn festmachen. Deshalb ist es auch so schwer zu verstehen, was da genau abläuft.

**Was sind im Moment die wichtigsten Entwicklungen in Ihrem Forschungsfeld?**

Die Hirnforschung war immer beschränkt durch die Methodik. Früher war es zum Beispiel nicht möglich, Aktivitätsmuster in grossen Populationen von Nervenzellen zu messen, also in Verbänden von Tausenden bis Hunderttausenden von Zellen. Das hat sich in den letzten 20 Jahren geändert. Heute können wir mit Hilfe von bildgebenden Verfahren Aktivitätsmuster in ganzen Hirnarealen mit hoher Auflösung messen. Bei uns im Labor verfolgen wir



Blick ins Gehirn einer lebenden Maus. Das Nervenzellnetzwerk mit den ringförmigen Zellkörpern wurde mit einem fluoreszierenden Indikator angefärbt. Dieser erlaubt wiederholte Messungen der Aktivitätsmuster in diesem Netzwerk über viele Wochen, z.B. während Lernen. Die dunklen Schatten sind ungefärbte Blutgefäße. (Bild: A. v.d. Bourg, L. Egolf, F. Helmchen)

zum Beispiel bei Mäusen solche Aktivitätsmuster in Neuronennetzwerken. Wir können über Wochen hinweg dieselben Nervenzellen beobachten und so besser verstehen, wie sich das Gehirn einer Maus verändert, wenn sie eine neue Aufgabe erlernt.

#### Wie genau macht man diese Bilder?

Sehr viele dieser Untersuchungen basieren auf Fluoreszenzmessungen. Man färbt die Zellen in den untersuchten Hirnregionen mit fluoreszierenden Farbstoffen an. Diese leuchten dann verschieden stark, je nachdem, wie aktiv die entsprechenden Zellen sind. Nervenzellen sind ja elektrische Gebilde, meistens möchten wir die elektrische Aktivität in Form von Nervenimpulsen messen. Zum Teil geschieht das indirekt über biochemische Variablen, beispielsweise über die Kalzium-Konzentration in den Zellen.

**Dadurch werden also ganze Netzwerke sichtbar?**

Ja, damit können wir die Funktionsweise immer grösserer Netzwerke im Detail studieren. Wichtig ist, dass wir verschiedene Skalen verknüpfen können. Man muss zum einen berücksichtigen, wie die einzelne Zelle Signale verarbeitet und mit anderen Zellen kommuniziert, zum anderen aber auch, welche Informationen im Netzwerk als Ganzes verarbeitet werden. Daran sind verschiedene Zelltypen beteiligt, beispielsweise erregende Zellen, hemmende Zellen, Gliazellen und verschiedene Untertypen. Es wird immer deutlicher, dass die Rechenleistung im Gehirn auf eine sehr verteilte Art und Weise erbracht wird.

#### Das ist also ein verschachteltes Zusammenspiel?

Das ist ein sehr komplexes Geschehen. Beim Lernen beispielsweise finden auf unterschiedlichen Ebenen Anpassungen statt. Es kann sein, dass sich die Eigenschaften von einzelnen Zellen ändern, dass sie zum Beispiel erregbarer werden oder weniger

erregbar, was letztlich molekulare Änderungen bedingt. Es kann auch sein, dass sich die Verknüpfung der Zellen untereinander verändert, dass sich sogar neue Kontaktstellen, sogenannte Synapsen, bilden oder bestehende abgebaut werden. Auf grösserer Skala können sich die Signalflüsse innerhalb des Netzwerks sehr flexibel verändern. All diese Prozesse gibt es in dieser Art bei der künstlichen Intelligenz nicht.

**Wie behalten Sie als Forscher den Überblick über diese komplexen Zusammenhänge?**

Es gibt inzwischen einige Grossprojekte, mit denen man eine gewisse Systematik in die Hirnforschung bringen will. Man versucht beispielsweise, die unterschiedlichen Zelltypen komplett zu kartieren und zu katalogisieren. Weiterhin ist es ein grosses Ziel, die Verknüpfungsmuster der Neuronen im Detail aufzulösen, also den kompletten Schaltkreis eines Gehirns zu entschlüsseln. Vor wenigen Jahren ist dies bei der Fruchtfliege bereits gelungen und in absehbarer Zeit wird man dieses Ziel auch beim Zebrafischlarven-Modell erreichen. Aber selbst für das relativ kleine Mausgehirn sind wir noch Jahre von einer Auflösung des Gehirnschaltkreises entfernt. Das sind gigantische Datenmengen und eine Komplexität, die man sich kaum vorstellen kann.

**Bis wir das menschliche Gehirn so darstellen können ist es also noch ein weiter Weg?**

Vor allem weil menschliche Gehirne nochmals viel grösser und komplexer sind und weil wir sie nicht mit der gleichen Auflösung untersuchen können wie bei Versuchstieren. Beim Menschen können Hirnareale nicht mit Fluoreszenzstoffen wie bei Laborieren eingefärbt werden, und die zur Verfügung stehenden Bildgebungsmethoden haben eine geringere räumliche Auflösung, sie können keine einzelnen Zellen erkennen.

**Ich stelle mir diese Untersuchungen bei Mäusen sehr anspruchsvoll vor. Müssen Sie die Tiere für diese Messungen eigentlich fixieren?**

Nicht unbedingt. Wir verfügen inzwischen über miniaturisierte Mikroskope, die bloss noch ein, zwei Gramm schwer sind. Mit denen können wir Aktivitätsmuster auch messen, wenn sich die Mäuse frei



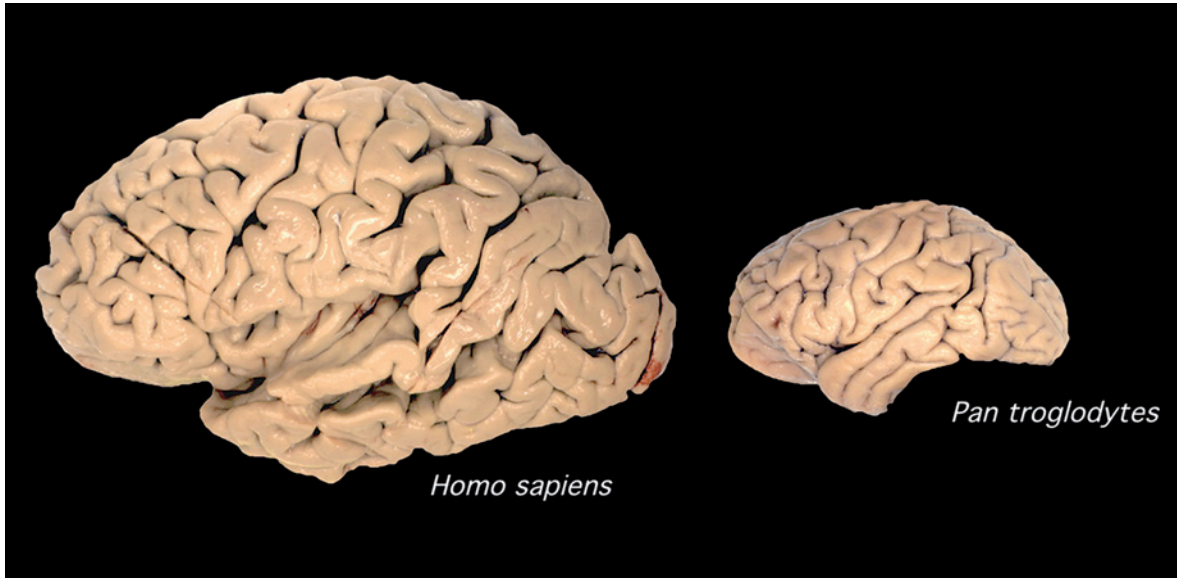
**Zur Person**

Fritjof Helmchen ist Professor für Neurowissenschaften und Co-Direktor des Brain Research Institute an der Universität Zürich. In seiner Forschung konzentriert er sich auf die Entwicklung und Anwendung optischer Methoden, mit denen er neuronale Aktivitäten auf subzellulärer, zellulärer und Schaltkreisebene untersucht. Ziel ist es, die Funktion neuronaler Schaltkreise und die Prinzipien der Informationsverarbeitung im Gehirn von Säugetieren besser zu verstehen und zu erkennen, wie sich Gehirnstrukturen verändern, wenn Tiere neue Fähigkeiten erlernen. Fritjof Helmchen ist seit 2018 Mitglied des SNF-Forschungsrats und derzeit Direktor des Zentrum für Neurowissenschaften Zürich (ZNZ). Zusammen mit Esther Stoeckli leitet er zudem den universitären Forschungsschwerpunkt «Adaptive Brain Circuits in Development and Learning».

bewegen. In jedem Fall braucht es natürlich zuerst eine Habituationsphase. Aber wenn sich die Tiere einmal an die Geräte gewöhnt haben, kann man sie über längere Zeit hinweg beobachten und die Lernprozesse im Gehirn im Detail verfolgen.

**Sie sind auch Co-Direktor des universitären Forschungsschwerpunkts «Plastische Hirnnetzwerke für Entwicklung und Lernen». Worum geht es in diesem Schwerpunkt?**

In diesem Forschungsschwerpunkt der Universität Zürich arbeiten ganz unterschiedliche Gruppen zusammen, von der Grundlagenforschung an Tiermodellen über die experimentelle Hirnforschung am Menschen bis hin zur klinischen Forschung. Dazu



Das menschliche Gehirn (l.) ist das komplexeste Organ, das die Biologie bisher hervorgebracht hat. Im Durchschnitt wiegt es 1,3 bis 1,5 Kilogramm. Im Vergleich dazu haben Schimpansen (r.) ein viel kleineres Hirn, das nur etwa 400 Gramm schwer ist. Und ein Mausgehirn wiegt sogar nur 0,4 Gramm. (Bild: T. Preuss, Yerkes Primate Research Center. Aus Bradbury J. 2005: Molecular Insights into Human Brain Evolution. PLoS Biology 3/3/2005)

kommen Gruppen, die sich mit Lernstörungen beschäftigen, beispielsweise mit Rechtschreibe- oder Leseschwäche, mit Rechenschwäche (Dyskalkulie) und mit Autismus. Die neurobiologischen Grundlagen dieser Störungsbilder versteht man erst ansatzweise. Wir Grundlagenforscher stoßen bei diesen Themen natürlich an gewisse Grenzen, wir können bei Mäusen ja Leseschwäche nicht direkt untersuchen. Aber wir hoffen doch, dass unsere Erkenntnisse den anderen Gruppen helfen, grundsätzliche Erkenntnisse über Lernstörungen zu gewinnen, damit man daraus Interventionen entwickeln kann, die den betroffenen Kindern in ihrem Alltag helfen.

**Wie erleben Sie die Zusammenarbeit in diesem Schwerpunktprogramm? Da kommen ja ganz unterschiedliche Disziplinen zusammen.**

Das ist ein sehr fruchtbarer Austausch. Die verschiedenen Gruppen haben ganz verschiedene Perspektiven und untersuchen die Vorgänge im Gehirn auf unterschiedlichen Skalen. Ich finde es sehr spannend, dass wir ein solches interdisziplinäres Programm an der Universität Zürich durchführen können. Denn wie gesagt: Es reicht nicht, nur eine Ebene anzuschauen, wenn man das menschliche Gehirn verstehen will.

**Ein weiterer Schwerpunkt Ihrer Arbeit liegt in der Geräteentwicklung. Welche Entwicklungen gibt es da?**

Wir arbeiten vor allem im Bereich der Mikroskopie-Entwicklung. Wir entwickeln lichtmikroskopische Methoden, mit denen wir sowohl die anatomischen Details als auch die Aktivitätsmuster in den Neuronennetzwerken genauer studieren können. Für die Anatomie kann man dabei einen Trick anwenden: Man verbessert nicht die Genauigkeit des Mikroskops, sondern vergrößert die Probe. Dadurch wird die Auflösung effektiv besser.

**Und wie genau erreicht man das?**

Das nennt sich Expansions-Mikroskopie. Man bringt Hydrogele in das Gewebe ein, diese nehmen dann Wasser auf und expandieren dabei. Beim Aufquellen werden die räumlichen Verhältnisse der Gewebestrukturen zum Glück nicht zerstört. Das ist ein sehr vielversprechender moderner Ansatz, weil man damit unterschiedlichste Gewebe mit hoher Auflösung untersuchen kann.

**Nutzen Sie in Ihrer Forschung auch KI-Modelle?**

Die KI war immer darauf ausgerichtet, Muster zu erkennen, und Mustererkennung brauchen wir bei der Datenanalyse tagtäglich. KI-Modelle helfen uns

zum Beispiel, in Fluoreszenz-Aufnahmen von Neuronenpopulationen die darunterliegenden elektrischen Aktivitätsmuster zu erkennen.

**Gibt es auch den umgekehrten Weg, nämlich dass Ihre Forschung die KI-Entwickler beeinflusst?**

Das hoffen wir! Ich sehe da ein grosses Potenzial. Die heutige KI basiert auf einem brute force Ansatz. Man baut grosse Netzwerke aus einfachen Einheiten und lässt diese dann mit einem unglaublichen Energieaufwand arbeiten. Die KI könnte da noch viel von der Biologie lernen. Allerdings müssen wir Neurowissenschaftler dafür erst einmal besser verstehen, wie die biologischen Netzwerke wirklich rechnen und intelligentes Verhalten hervorbringen. Ein anderer Bereich, wo KI von der Biologie lernen könnte, ist die Frage, wie man aus Fehlern lernt. Das funktioniert bei KI ganz anders als in der Biologie.

**Wo ist der Unterschied?**

In der Biologie steht den einzelnen Zellen immer nur die lokale Information zur Verfügung. Daraus müssen sie ableiten, wie sie sich nach Fehlern anzupassen haben. Bei KI-Netzwerken hingegen wird die Fehlerinformation sozusagen global verteilt. Das kann in der Biologie so nicht funktionieren. Wenn wir besser verstehen, wie Fehler in biologischen Systemen verarbeitet werden, könnte man vielleicht auch neuartige KI-Netzwerke bauen.

**In der Biologie funktioniert die Fehlerbehandlung also viel lokaler?**

Wenn es einen Fehler gibt, dann kann man diese Information nicht einfach allen Nervenzellen zur Verfügung stellen, damit sie sich dann entsprechend anpassen. Das geht nicht, weil jede Zelle nur ihre Nachbarn «sieht», also eine sehr eingeschränkte Sicht hat. Trotzdem ist sie in der Lage, sich so zu anpassen, dass am Ende eine sinnvolle Entwicklung im Sinne von Lernen entsteht.

**Wo ist die KI der biologischen Intelligenz heute überlegen?**

KI-Modelle können riesige Datenmengen in unglaublicher Geschwindigkeit verarbeiten. Da kommt das menschliche Gehirn nicht mehr mit. Auch bei der Mustererkennung ist KI viel besser geworden. Das betrifft zum Beispiel die Diagnostik in der Medizin. Wenn KI zuverlässig bessere Resultate liefert

als der Mensch, dann sind wir gefordert, das auch zu nutzen.

**Ist es vielleicht sogar ein Vorteil, dass biologische und künstliche Intelligenz unterschiedlich funktionieren?**

Ich denke schon. Die KI kann den Menschen Aufgaben abnehmen, die das menschliche Gehirn überfordern. Gleichzeitig gibt es auch Aspekte des menschlichen Daseins, die wir nicht mit KI abbilden können und vielleicht auch nicht abbilden sollten. Ich denke da an zwischenmenschliche Beziehungen und soziales Verhalten, all diejenigen Aspekte, die für uns Menschen als Individuen und als Spezies wichtig sind.

**Als Hirnforscher erleben Sie gerade eine sehr aufregende Zeit?**

Wir haben in den letzten Jahrzehnten in der Hirnforschung einen steilen Anstieg erlebt. Ich denke, dieser Weg ist noch lange nicht zu Ende. Das menschliche Gehirn hat noch viele Geheimnisse, die es zu lüften gilt.

**Wenn Sie Ihren Forschungsbereich mit der Zeit vergleichen, als Sie Ihre wissenschaftliche Karriere angefangen haben: Was sind die grössten Unterschiede?**

Vieles, von dem wir vor 25 Jahren nur träumen konnten, ist heute möglich geworden. Die Methodik hat sich enorm weiterentwickelt. Das ist zum einen faszinierend. Auf der anderen Seite verstehe ich auch die Sorgen, wie sich insbesondere die KI weiterentwickeln wird. Da gibt es doch einige Fragen, die wir genauer anschauen und als Gesellschaft neu regeln müssen, gerade auch im Hinblick auf die kommenden Generationen. Wir müssen Wege finden, wie wir junge Menschen auch in einer veränderten Welt gut auf das Leben vorbereiten können.

Interview: Felix Würsten

**Weiterführende Informationen**

Webseite der Forschungsgruppe Helmchen: [www.hifo.uzh.ch/en/research/helmchen.html](http://www.hifo.uzh.ch/en/research/helmchen.html)

Webseite des Forschungsschwerpunkts «Plastische Hirnnetzwerke für Entwicklung und Lernen» der Universität Zürich: [www.adabd.uzh.ch/de.html](http://www.adabd.uzh.ch/de.html)