

## Maschinelles Lernen

# Computer entdecken sich selbst

**Obwohl Computer menschliches Denken lediglich nachahmen, werden sie durch raffinierte Tricks ihrer Programmierer immer leistungsfähiger. Wissenschaftler versuchen sogar, Robotern Neugier zu vermitteln, um sie zu selbstständigem Lernen anzuregen.**

Bis zum Ende des 20. Jahrhunderts waren viele IT-Spezialisten der Überzeugung, dass Computer eines Tages mindestens so leistungsfähig sein würden wie menschliche Gehirne, aber inzwischen wächst die Erkenntnis: Formale Logik, Algorithmen und digitale Elektronik reichen nicht aus, um unsere komplexen Denkvorgänge zu übernehmen. Dies gilt insbesondere für das maschinelle Lernen, also die Anpassung an neue äußere Bedingungen.

Heute wie vor 50 Jahren funktionieren die meisten

Computer nach Prinzipien aus der künstlichen Intelligenz, d.h. die Programmierer rüsten sie mit einer möglichst großen Zahl von Verhaltensregeln nach dem Schema *Wenn-Dann* aus und versuchen, schon im Voraus jede mögliche Reaktion in jedem nur denkbaren Kontext zu berücksichtigen. Das macht Computer zwar zuverlässig, aber letztlich auch recht „starrköpfig“. Die reale Welt lässt sich nicht in einfache Regeln zwingen, dafür ist sie viel zu kompliziert. Dazu kommt, dass sich Computer und Gehirne auf der „Hardware-Ebene“ extrem unterscheiden. Nervensysteme sind hochempfindliche, wandlungsfähige Gebilde, die durch unzählige chemische Reaktionen gesteuert werden, die Einheiten des Computers dagegen sind geätzte Halbleiterkristalle.

Trotz dieser grundsätzlichen Unterschiede ist es aber gelungen, interessante Modelle zu entwickeln, die die Funktionsweise des Gehirns simulieren: die

neuronalen Netze. In der Natur bestehen sie aus Geflechtern von Nervenzellen, die milliardenfach immer dieselben drei Arbeitsschritte ausführen: Sie empfangen über synaptische Kontaktstellen Signale, verarbeiten sie in ihrem Inneren und leiten sie an andere Nervenzellen weiter. Dass das Gehirn lernen kann, liegt an seiner Fähigkeit, diese Weitergabe zu modifizieren, so dass sich das Gesamtsystem an wech-

**„Die reale Welt lässt sich nicht in einfache Regeln zwingen.“**

Wenn eine Zelle A einen Impuls auslöst, der in Zelle B eine Antwort hervorruft, wird der Kontakt von Zelle A zu Zelle B verstärkt. Antwortet Zelle B nicht oder feuert sie wiederholt kurz vor A, wird der Kontakt geschwächt. Durch diese so genannte „spike time dependent plasticity“ werden häufig genutzte Nervenbahnen weiter ausgebaut, andere hingegen, die selten gebraucht werden, verfallen. Diese Plastizität des Gehirns, also die Fähigkeit zur physiologischen und strukturellen Veränderung, gilt als Grundlage des Lernens.

Lernvorgänge lassen sich mit künstlichen neuronalen Netzen simulieren. Sie bestehen aus miteinander verbundenen Zahlenelementen (genauer: Variablen in einem Datenfeld), deren Verbindungen sich ähnlich wie beim natürlichen Lernen verstärken oder abschwächen, je nachdem wie intensiv sie genutzt werden. Auf diese Weise können Netzwerke entstehen, die sich selbst optimieren.

Üblicherweise lernt ein künstliches neuronales Netz jedoch nicht aus eigenem Antrieb heraus, sondern indem es seine Ausgabewerte mit einem vom Menschen gewünschten Ergebnis vergleicht. Ein Lernalgorithmus passt die Verbindungsstärken in einer Weise an, dass die Abweichung möglichst gering wird. Am Ende reagiert das Netz so, wie sein Herr es befohlen hat.

Inzwischen werden künstliche neuronale Netze in vielen technischen Systemen eingesetzt. Den größten praktischen Nutzen bringt die Identifizierung komplexer Muster, etwa in der Gendiagnostik, Müllsortierung oder Schrifterkennung. In einer Lernphase trainiert man mit dem Computer zum Beispiel ein, welche Pixelmuster einer Handschrift als A gedeutet werden sollen, und anschließend gibt der Computer dieses A trotz unterschiedlicher Schreibstile wieder aus.

Besonders wertvolle Erkenntnisse für das maschinelle Lernen gewinnt man beim Einsatz neuronaler Netze in autonomen, lernfähigen Robotern. Solche Maschinen nehmen ihre Umgebung über Sensoren wahr und setzen die gemessenen Inputwerte mit Hilfe eines Controllers in Befehle an die Motoren um. Dabei fungiert ein neuronales Netzwerk als das „Elektronengehirn“ des Roboters: Es vergleicht die jeweils ankommenden Sensorwerte mit den Erwartungswerten, auf die der Roboter seine Motorbewegungen eingestellt hatte. Weicht das Ergebnis von dieser Erwartung ab – schießt also der Roboter zum Beispiel über das Ziel hinaus – dann wird der Unterschied

in ein Lernsignal für das neuronale Netz umgewandelt, damit beim nächsten Mal eine genauere Vorhersage gelingt. So ist der Roboter in der Lage, sich selbstständig weiterzuentwickeln, ohne ständig umprogrammiert zu werden. Etwas ambitionierter ausgedrückt: Der Roboter erhält durch das Lernmodell eine Art Selbstwahrnehmung; er bringt sein Verhalten mit den Vorstellungen, die er über die Sensoren von sich selbst gewonnen hat, in Einklang.

Wie Ralf Der und Nihat Ay vom Max-Planck-Institut der Universität Leipzig feststellten, gibt es jedoch ein Problem: Nur wer bereit ist, ständig Neues zu lernen, kann in Situationen, die ihm noch nie begegnet sind, flexibel reagieren. Dies gilt auch für Computer.

Bei der gegenseitigen Anpassung von Controller und Selbstmodell gelangt der Roboter letztlich immer in einen stabilen Endzustand; sein oberstes Lernziel ist also das Nichtstun. Das überrascht nicht, denn die unmittelbaren Folgen des Nichtstuns kann das Selbstmodell am besten prognostizieren. Dieses Phänomen unterdrückt jeden Versuch, Neues zu wagen, weil das Modell dann ja Wissen über Unbekanntes besitzen müsste – ein Widerspruch in sich selbst.

Den beiden Leipziger Wissenschaftlern gelang es jedoch, die Aktivität ihres Roboters zu erhalten, indem sie ihn zum Lernen in eine zeitumgekehrte Welt schickten. Das war relativ einfach, denn mit dem Selbstmodell lässt sich die Dynamik nicht nur vorwärts, sondern auch in der Zeit rückwärts modellieren. Wir müssen uns dafür nur einen Film vorstellen,

der das reale Roboter-Verhalten in einer virtuellen Welt rückwärts abspielt. So wird ein vormals auf Nichtstun erpichter Roboter nicht fauler, sondern immer aktiver.

Mathematisch gesprochen berechnet das Selbstmodell nicht die künftigen Sensorwerte, sondern rekonstruiert die bereits früher gemessenen Werte (also seine Vergangenheit) und vergleicht sie mit der Wirklichkeit. Die Abweichung zwischen beiden ist nun die neue Größe, die es zu minimieren gilt.

Während dieser Minimierung fängt der Roboter interessanterweise an, seine Bewegungsmöglichkeiten zu erweitern, so als sei er neugierig auf sich selbst geworden. Künstliche Wesen mit zeitumgekehrtem Lernen beginnen von selbst, das ganze Spektrum ihrer Bewegungsmöglichkeiten auszutesten: Roboterhunde hüpfen plötzlich über einen Zaun, künstliche Schlangen verlassen ihren Käfig. Begegnen sich zwei von ihnen, kann es zu Handlungen kommen, die einem Ringkampf ähneln.

Für das maschinelle Lernen humanoider Roboter mit praktischen Einsatzmöglichkeiten – zum Beispiel in der Altenpflege – ist aber noch viel Forschungsarbeit notwendig. „Spezifisch menschliche Bewegungsformen sind unter Selektionsdruck in Jahrmillionen der Evolution entstanden und stellen nur einen winzigen Ausschnitt aus dem Spektrum denkbarer Bewegungsformen dar“, erklärt Ralph Der. „Deshalb

kann man nicht erwarten, dass Roboter ausgerechnet diese Verhaltensmuster bevorzugen.“

Fortschritte erzielen die Forscher derzeit dadurch, dass sie stabile Bewegungsmuster in einem Langzeitgedächtnis ab-

speichern und selbstbestimmte Entwicklungsprozesse von außen durch „Lob und Tadel“ zu beeinflussen versuchen.

Trotz aller Fortschritte lehren uns solche Experimente vor allem eines: Hochachtung vor den Leistungen lebender Gehirne. Mit nur wenigen Gramm Hirnmasse orientieren sich Zugvögel über Tausende von Kilometern, mit ein paar Milligramm entkommt eine Fliege der Hand, die nach ihr schlägt. Vielleicht verhalfen uns die Gehirnsimulationen autonomer Roboter aber wenigstens zu einem besseren Verständnis unseres

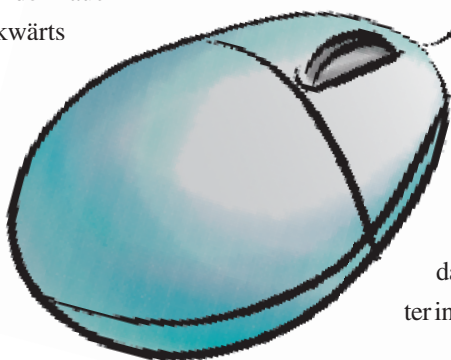
**„Das oberste Lernziel des Computers ist das Nichtstun.“**

**Von Menschen, Mäusen und Maschinen**

John Steinbecks Roman *Of Mice and Men* handelt von Lennie, einem geistig Behinderten, der mit Robotern eines gemeinsam hat: Er ist bärenstark, aber unfähig, seine Kraft so zu kontrollieren, dass er keinen Schaden anrichtet.

Mäuse spielen in dieser Geschichte eine traurige Nebenrolle: Lennie mag ihr weiches Fell, aber leider zerdrückt er sie beim Streicheln. Und er bricht auch einer Frau versehentlich das Genick, die seinen täppischen Liebkosungen zu entkommen versucht.

Selbst; die Frage, ob Computer dann über einen freien Willen verfügen werden, stellt sich zurzeit noch nicht. 🌸



Dr. med. Claudia Borchard-Tuch  
Mitglied der Redaktion

## Kreative Ideen

## OK, Computer entdecken sich selbst, aber...

**...warum hat der Mensch den Computer erfunden und nicht umgekehrt? Die Antwort ist einfach: Weil Computer sich nicht entspannt in die Badewanne legen können, um nachzudenken.**

Jeder, der schon einmal eine Prüfung bestanden hat, weiß, dass Lernen Zeit und Energie benötigt. Durch ständige Wiederholungen von Lerninhalten wer-

Vielen Menschen wird Angst bei dem Gedanken, dass humanoide Roboter eines Tages Alte und Kranke füttern, waschen oder ins Bett bringen sollen. Wer verhindert, dass die Maschinen ihnen die Knochen brechen, weil sie ihre Gebärden falsch deuten und ihre Rufe nicht verstehen?

Hilfsbedürftige mit Maschinen allein zu lassen wäre unmenschlich. Die Verantwortung muss immer ein Mensch übernehmen, der mitfühlt, weil er selbst Mensch ist.

Bei Steinbeck ist der Hilfsbedürftige am Ende Lennie, den eine aufgebrachte Menge lynchen will. Sein Freund George übernimmt Verantwortung, indem er ihn aus Mitleid erschießt. Aber das ist ein anderes Thema.

den Verbindungen zwischen Nervenzellen vom kaum sichtbaren Waldpfad zur sechs-spurigen Autobahn. Nach der Hebb'schen Regel verbessern Nervenzellen ihre Verknüpfung, je häufiger sie gleichzeitig aktiv sind, und mit ihrer Kopplungsstärke steigt die Wahrscheinlichkeit, dass sie schneller feuern als andere Nervenzellen. Lernen und Verlernen sind neurobiologisch also eine Veränderung der Stärke synaptischer Verbindungen. Dies ist der Stand, auf dem man auch mit Computern heute angekommen ist. Künstliche neuronale Netze „lernen“, indem sie häufige Verknüpfungen zwischen Input und Output verstärken und seltene auf Null setzen.

In puncto Größe sind Computer dem Gehirn gegenüber im Vorteil; der Science-Fiction-Autor Douglas Adams beschrieb in seinem Buch „Per Anhalter durch die Galaxis“ mit *Deep Thought* ja sogar einen, der so groß wie eine Stadt ist. Im Gegensatz dazu ist der Raum unseres Gehirns durch die Schädelknochen eng begrenzt.

„In puncto Größe sind Computer dem Gehirn gegenüber im Vorteil.“

Schon heute muss bei fast jeder Geburt ein Dammschnitt gemacht werden, damit der kindliche Kopf überhaupt noch herauskommen kann. Er hat eine Größe erreicht, die aus rein anatomischen Gründen kaum noch zu steigern ist. Dummerweise können wir nach der Geburt auch keine weiteren Nervenzellen mehr bilden, die dann stetig neues Wissen abspeichern. Unser Zentralnervensystem (ZNS) musste also platzsparende Wege gehen.

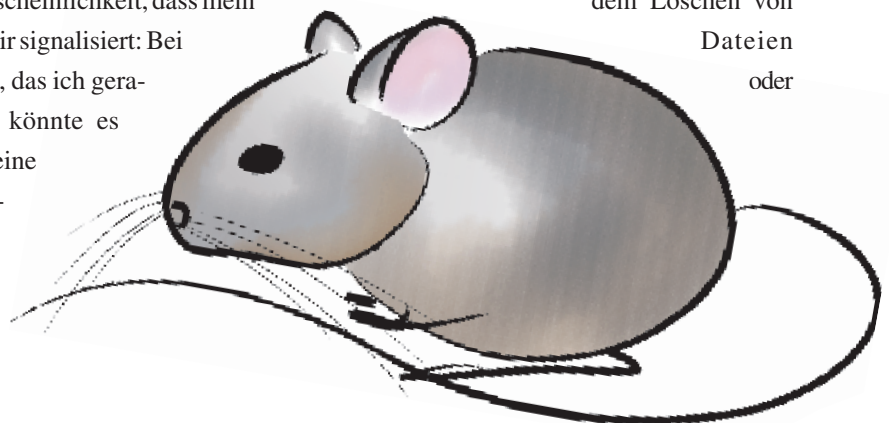
Eine Möglichkeit sind Assemblies, d.h. Verbünde von kooperierenden Modulen. Es gibt im Gehirn z.B. keine Nervenzelle, die das Bild einer Maus gespeichert hat, aber es gibt ein System für einzelne Aspekte eines Tiers. Und je mehr solcher Aspekte erkannt werden, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass mein Gehirn mir signalisiert: Bei dem Bild, das ich gerade sehe, könnte es sich um eine Maus handeln.

Diese Module sparen Platz, da wir damit nicht für jeden neu zu lernenden Inhalt eine neue Nervenzelle benötigen, sondern bestehende Systeme lediglich anders verschalten oder ausweiten. IT-Programmierer basteln solche Lösungen mit objektorientierten Ansätzen ja inzwischen eifrig nach

und auch auf der Hardwareebene machen sich intelligente Chips diese Erkenntnisse der Neurobiologie schon ganz gut zunutze.

Wie auf einer Kreidetafel werden auch im Gehirn ständig neue Informationen geschrieben und unnötige gelöscht. Das Kurzzeitgedächtnis funktioniert dabei ähnlich elektrisch wie der RAM-Speicher eines PCs, der beim Ausschalten des Stroms auf den Leerzustand zurückgesetzt wird. Das Langzeitgedächtnis speichert dagegen dauerhaft benötigte Informationen wie eine Art Festplatte, indem Dendriten aussprossen. Werden sie nicht mehr benutzt, verkümmern sie und man vergisst das einmal Gelernte – ein Prozess, der beim Menschen allerdings Jahre dauert. Computer können

das beträchtlich schneller: Mit dem Löschen von Dateien oder



Formatieren der Festplatte hat man schnell ein völlig leeres Elektronengehirn.

Normalerweise ist Vergesslichkeit ein unerwünschtes Phänomen, doch wenn psychische Krankheiten auf fehlerhaften Lernprozessen beruhen, dann wünscht sich manch ein Psychotherapeut, dass er auch die „Festplatte“ seines Patienten neu formatieren könnte. Das gilt zum Beispiel für posttraumatische Belastungsstörungen, die durch grauenvolle Erlebnisse bei Katastrophen entstehen. Auch bei chronisch Schizophrenen, schwer Depressiven oder Süchtigen könnte es manchmal sinnvoll sein, wenn man noch einmal völlig bei Null anfangen könnte. Aber im Gegensatz zur Festplatte des PCs

kann das Gehirn die **„Das Gehirn kann die Erinnerungen eines ganzen Lebens speichern und vergisst die meisten nie mehr, selbst wenn wir sie gerne aus dem Gedächtnis löschen würden.“**

Wie kommt diese fast unbegrenzte Speicherkapazität zustande? Nach unterschiedlichen Schätzungen besteht das ZNS aus 25 bis 100 Milliarden Nervenzellen. Jede einzelne davon kann mit bis zu 10.000 anderen verknüpft sein, im Mittelwert sind es wohl rund 2.000 Synapsen pro Neuron. Unsere individuelle Persönlichkeit beruht also auf der unvorstellbar großen Anzahl von über  $10^{14}$  möglichen Verschaltungen. Neurone sind zudem nicht einfach nur kleine Schaltstellen, die einen Impuls weiterleiten, sondern sie verrechnen Dutzende oder sogar Tausende eingehender Reize. Dadurch, dass eine Nervenzelle mehrere weitere erregen kann, die wiederum eine noch höhere Anzahl aktivieren, könnte sich eine Erregung lawinenartig ausbreiten. Bei epileptischen Anfällen geschieht in der Tat genau das.

Ein PC-Programm arbeitet brav aber stur ein Modul nach dem anderen ab. Für das menschliche Gehirn dagegen

ist Parallelarbeit der Normalzustand. Es steuert Herzschlag, Atmung und Verdauung, wir können auf und ab gehen, sehen und hören, reden und nachdenken, und das alles gleichzeitig.

Damit es dabei nicht zur Übererregung kommt, muss es neben dem Gaspedal im Gehirn auch eine Bremse geben. Jeder kennt die dezent beruhigende Wirkung, die ein Glas Rotwein nach einem fürchterlichen Arbeitstag mit sich bringt. Wo im Gehirn wirkt Alkohol? Neben den aktivierenden gibt es auch hemmende Synapsen, die unter seinem Einfluss die Ausbreitung elektrischer Impulse reduzieren. Ob eine Nervenzelle eine Erregung weitergibt,


hängt von einem Summationsprinzip ab, bei dem die Anzahl aktivierender Eingänge mit den hemmenden verrechnet wird.

Das bringt uns zu der letzten und wohl wichtigsten Frage, wie das Gehirn etwas völlig Neues erfinden kann. Interessanterweise fallen uns kreative Ideen regelmäßig nicht ein, wenn wir angestrengt danach suchen. Jeder kennt aber auch das Phänomen, dass uns die Lösung eines Problems ausgerechnet dann in den Sinn kommt, wenn wir gelangweilt in der Badewanne liegen.

Mit der folgenden Erklärung können Sie Ihren Arbeitgeber überzeugen, künftig mehr zuhause zu arbeiten: Angestregtes Nachdenken über ein Problem erzeugt dominante Gedankengänge, die wir in Windeseile immer wieder durchjagen, wenn wir keine Lösung finden. Seitenwege, also nicht direkt zugehörige Assoziationen, werden dabei gehemmt. Genau das verhindert aber, dass wir eine originelle Lösung finden. Erst in der entspannten Situation ist diese Hemmung aufgehoben. Die Erregung aus einem vorher gehemmten Bereich kann nun in das Bewusstsein durchbrechen und es macht ganz laut Klick – heute wie

vor über 2000 Jahren, als Archimedes mit dem Ausruf *Heureka* („ich hab’s“) aus der Wanne sprang und nackt durch die Straßen von Syrakus rannte.

Für das Entstehen origineller Ideen ist ein Prozess wichtig, den die Elektronengehirne mit Absicht nicht beherrschen, nämlich eine riesige Menge von Minifehlern. Nervenzellen produzieren ständig Spontanimpulse, selbst wenn sie eigentlich gar nichts tun sollen. Sie müssen das sogar, da sie sonst degenerieren. Damit diese laufend auftretenden Signale aus Millionen von Neuronen, insbesondere solche aus den Gedächtnisspeichern, unser konzentriertes Denken nicht stören, werden sie von den umliegenden Neuronen abgebremst und verpuffen. Aufmerksamkeit auf eine bestimmte Arbeit bremst Spontanerregungen anderer Hirnteile. Erst im entspannten Zustand, z.B. in der warmen Badewanne, wenn die Aufmerksamkeit frei schwebt und sich auf nichts Konkretes richten muss, kommt ein solcher Spontanimpuls plötzlich ins Bewusstsein durch. Gerade daraus können kreative, neue Ideen entstehen, da wir plötzlich Sachverhalte zusammenbringen, die eigentlich gar nichts miteinander zu tun haben. Und das kann die Grundlage für eine wirklich originelle Erfindung sein.

Allerdings sind Programmierer auf bestem Wege, auch die spontanen Fehler gut nachzuahmen. Das Betriebssystem auf meinen Computer beweist es mir seit Jahren. Aber besonders originelle Ideen hat es dabei noch nicht produziert. 



Prof. Dr. Erich Kasten  
Institut für Medizinische Psychologie  
Universität zu Lübeck