

In welche Richtung ist denn der schwarze Fleck unterwegs? Kommt uns die Spinne etwa zu nah? Der Output der Bipolarzellen wird verschaltet: Amakrinzellen bündeln die Informationen und leiten wichtige Richtungsinformationen ans Hirn weiter.

Der direkte Draht ins Hirn ist dann noch einmal energiesparender: Die Netzhaut verpackt allen wichtigen Input in einem Code, den schließlich die Ganglienzellen über den Sehnerv ins Gehirn schicken. Siehst du, wie die Netzhaut hier schon richtiggehend »mitdenkt« und wesentliche Informationen aus der Flut von Licht-Daten herausfiltert? Das spart Energie und Verarbeitungszeit – ein evolutionärer Vorteil.

Kleiner Exkurs für alle Fans von Netflix & Co: Mit einem ähnlichen Prinzip werden heutzutage Videostreams effizient enkodiert. Statt 30 Bilder pro Sekunde à 4096 x 2160 Pixel zu übertragen, können Algorithmen ganze Bildfolgen so komprimieren, dass sie nur die Änderungen zwischen aufeinanderfolgenden Bildern übertragen müssen. Bei Übertragungsfehlern kann man das manchmal beobachten, weil dann die Ränder von bewegten Personen oder Gegenständen verpixelt erscheinen, während der unbewegte Hintergrund scharf bleibt. Oder es kommen nur die Änderungen zwischen den Einzelbildern an, und der Hintergrund erscheint grau. Erst der nächste »Keyframe« überträgt dann wieder alle Pixel, und das Bild ist gleichmäßig scharf.

Der Sehnerv ist unser neuronaler Bilddaten-Highway. Über ihn wird der komprimierte Stream von Daten aus der Netzhaut direkt ans Gehirn gemeldet. Dort verarbeitet zunächst der Thalamus die Daten, er ist unser »Tor zum Bewusstsein« und steuert, welchen Eingangssignalen das Hirn Vorrang einräumt. Was für wichtig befunden wird, dem widmen wir unsere volle Aufmerksamkeit. Aber auch im Thalamus gibt es Verschaltungen, und es wird nach Dringlichkeit sortiert. Zusätzlich strömen Impulse auch aus anderen Hirnarealen dort zusammen. Sie geben Informationen, in welcher Verfassung wir uns gerade befinden. Das ist wichtig, um zu entscheiden, was Priorität erhält. Ein Schrei kann in einer vollen Bar total belanglos sein –, aber nachts im Park ist er möglicherweise ein Notsignal.

Die Signale wandern weiter in den primären visuellen Kortex im hinteren Teil des Gehirns, der für die Verarbeitung von Seheindrücken zuständig ist. Die verschiedenen Daten werden weiter gefiltert. Reize von benachbarten Stellen auf der Netzhaut landen hier zum Teil in benachbarten Zellen. Gleichzeitig sorgen verschiedene Abzweigungen der Nervenbahnen dafür, dass Reize, die die beiden Augen liefern, abgeglichen werden und so komplexe Strukturen erkannt werden.

Das alles sieht man ja nicht von außen, deshalb schauen Wissenschaftler mithilfe von bildgebenden Verfahren dem Gehirn bei der Arbeit zu. Um genauer herauszukriegen, was die Schichten des visuellen Kortex denn nun eigentlich tun, helfen Untersuchungen

unter Magnetresonanztomographie (fMRT), die zeigen, welche Hirnareale gerade aktiv sind.

Wenn ein Proband während einer Untersuchung verschiedene Bilder gezeigt bekommt, sieht man, welche Neuronen im Hirn gleichzeitig feuern. Aus den verschiedenen Bildern lässt sich eine Art Landkarte des Gehirns erstellen. Durch geschickte Bildauswahl kann man dann Rückschlüsse ziehen, was für ein Seheindruck genau welches Hirnareal aktiviert: alte und junge Menschen, streitende Menschen, süße Katzenbabys, Schlangen in Angriffspose und so weiter. Die Forscher haben die Bilder vorher genau katalogisiert und die Auswahl so verfeinert, dass sie durch geschickte Kombinationen und per Ausschlussverfahren ziemlich genau beschreiben konnten, welche Gemeinsamkeiten Bilder haben, die ein scharf abgegrenztes Hirnareal aktivieren.

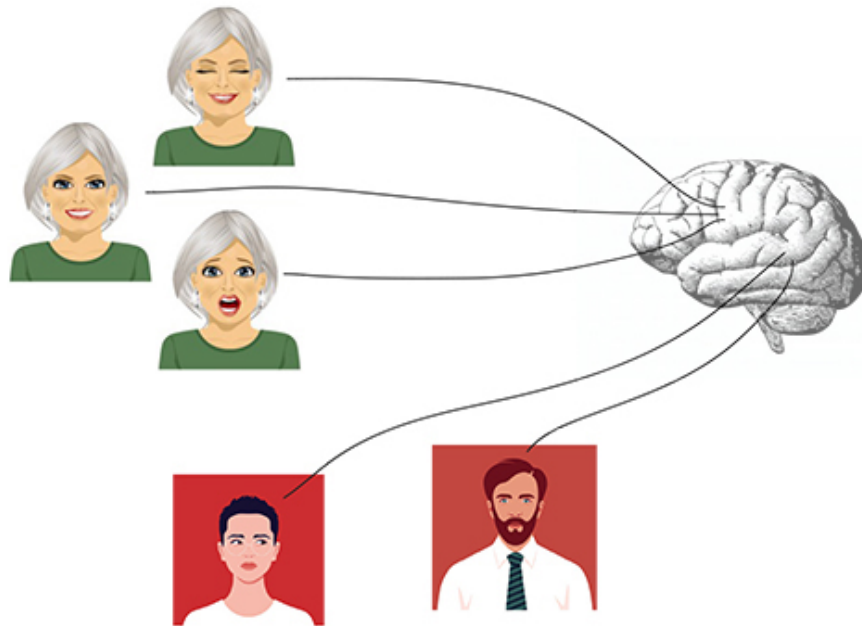
So konnten sie beispielsweise zeigen, dass das Gehirn den Datenstrom aus den Augen erst nach Richtungen im Raum (»hoch«, »runter« etc.) filtert. Welche Ecken und Kanten sieht das Auge? Wie sind die harten Linien orientiert?

Auch Farben spielen früh eine Rolle. Und je weiter das Gehirn dann die Signale verarbeitet, desto spezialisierter werden die Hirnareale. Es gibt dabei einen »Was«-Strang, der vor allem für die Erkennung von Objekten oder Gesichtern zuständig ist, und einen »Wo«-Strang, der bei der Bewegungserkennung und Orientierung hilft. Wird sich all dies auf die Arbeit mit KI übertragen lassen? Je mehr die Grundlagenforschung uns über das Gehirn verrät, umso eher werden wir es nachbilden können.

Wir erkennen: Unser Gehirn macht die Daten immer abstrakter. Von so etwas wie »rohen Pixeln« zu einfachsten Bausteinen (Ecken, Kanten, Farben) über Muster und Formen bis hin zu abstrakten Konzepten wie »Mensch«, »Freude« oder »gehen« werden die Daten gecheckt.

Tatsächlich haben Wissenschaftler von der Uni Leicester vor einigen Jahren vermeldet, das »Jennifer-Aniston-Neuron« identifiziert zu haben: ein Neuron, das speziell auf Bilder der Schauspielerin Jennifer Aniston reagiert. Die Forscher haben diesen Zusammenhang erkannt, als sie acht Epilepsiepatienten untersuchten, denen sie aus medizinischen Gründen Elektroden ins Hirn gepflanzt hatten. Jennifer Aniston war nur eine von vielen Personen oder Gegenständen, die die Forscher den Patienten zeigten. Und zu ihrem Erstaunen erwies sich, dass das Gehirn unterschiedlichste Bilder von derselben Person immer wieder mit den gleichen Neuronen darstellt. Dabei ist besonders interessant, dass diese Neuronen nicht eins zu eins nur für das Gesicht stehen, sondern auch mit dem gesamten semantischen Kontext assoziiert sind. Im Falle von Jennifer Aniston also etwa mit dem Gedanken an die Serie »Friends«.

Die Abbildung zeigt, dass besondere Gesichter, zum Beispiel das der Mutter, oft eine bestimmte Stelle im Gehirn »aktivieren«.



*Verschiedene Bilder von Personen, die uns wichtig sind, aktivieren dieselbe Stelle im Gehirn.*

Diese Verknüpfung ist natürlich nicht angeboren. Woher sollte ein Baby auch Jennifer Aniston kennen? Dabei muss es sich um eine erlernte Verbindung handeln – und das spielt sich genauso ab, wie wir im Frühkindstadium das Gesicht unserer Mutter erkennen und entsprechend an einem ganz bestimmten Platz im Gehirn abspeichern. Das Konzept, komplexe Eingabedaten (»Pixel«, bzw. das semantische Konzept dahinter) höchst effizient im Gehirn durch Vernetzung abzubilden, ist nicht nur ein enormer evolutionärer Vorteil, sondern auch die Kernidee hinter vielen KI-Modellen im Computer.

Aber was bedeutet »lernen« eigentlich? Was passiert in unserem Gehirn, wenn wir zum Beispiel Vokabeln lernen? Und hier denke ich gerade nicht an die oft unkreative Karteikarten-Lernerei, sondern an den Moment, wenn du im Frühling auf einer Parkbank in Paris sitzt, die Sonne scheint dir auf die Jeans, ein Schmetterling landet auf deinem Knie, du hältst gespannt den Atem an und hörst ein Kind neben dir voller Glück sagen: »Un papillon!« Wie könnte man danach jemals das Wort »papillon« für Schmetterling vergessen?

Lernen, das sind im Ergebnis Verknüpfungen im Gehirn, doch sie sind nicht eins zu eins austauschbar: Das Gehirn schafft Assoziationen durch die Verbindung der verschiedensten Eingangssignale wie Bilder, Geräusche oder Gefühle, und das Ganze funktioniert noch besser, wenn es getrieben ist von Emotionen. Lernen kann daher auch ein Effekt sein, wenn unsere Erwartungen sich plötzlich nicht erfüllen: Wenn wir glauben, dass man auf Glatteis gut rennen kann, wir also loslaufen und schmerzvoll ausrutschen. Der Lerneffekt wird im Hirn vermerkt: Glatteis hat Eigenschaften, die zum Rennen nicht geeignet sind.

Diese Beispiele stehen für eher zufälliges Lernen. Der Mensch ist nun aber faszinierenderweise auch in der Lage, gezielt zu lernen. Lernpsychologen unterscheiden etwa das Lernen mit dem Ziel, Wissen zu erwerben (hier wären wir jetzt bei den Karteikarten) oder wir lernen, um Fähigkeiten und Fertigkeiten automatisiert zu beherrschen (etwa Autofahren).

Ob wir alt sind oder jung: Lernen ist enorm vielfältig und komplex. Versucht man, den kleinsten gemeinsamen Nenner zu finden, landet man wieder bei den Neuronen. Sie bilden die Grundlage dafür, wie wir Informationen verarbeiten, speichern und assoziieren. Man spricht in diesem Zusammenhang vom sogenannten Hebb'schen Lernen. Dahinter steckt die Idee: »Cells that fire together, wire together« oder »Zellen, die gemeinsam feuern, sind miteinander verbunden«. Wiederholt man etwas regelmäßig, so wird dieser Verbindungsdraht zwischen den Zellen, wie man sich das bildlich vorstellt, immer dicker. Wissenschaftlich haltbar ist: Werden verschiedene Neuronen gleichzeitig aktiviert, wachsen zwischen ihnen Verbindungen. So können wir verschiedene Eindrücke miteinander assoziieren.

Die Forscher, die das Jennifer-Aniston-Neuron entdeckten, verfeinerten ihr Experiment weiter. In einem neuen Versuch kombinierten sie Personen mit Orten, etwa Jennifer Aniston und den Eiffelturm. Als der Proband später nur den Eiffelturm zu Gesicht bekam, konnte man auf den fMRT-Bildern nachweisen, dass auch das Jennifer-Aniston-Neuron aktiviert war. Eine Assoziation war nachgewiesen, und das nach nur einem einzigen »Trainingsbeispiel«. Natürlich ist die betreffende Assoziation noch

schwach, aber geht man von der Hebb'schen Regel aus, ist das ja nur eine Frage der Zeit: Je öfter beide Neuronen gleichzeitig aktiviert werden, umso eher müsste die Assoziation ausgelöst werden. Es können sich so regelrechte Nervenautobahnen im Gehirn bilden.

Das Gleiche passiert etwa, wenn wir eine Rose sehen und an ihr riechen. Dabei assoziieren wir ganz unterschiedliche Arten von Sinneseindrücken miteinander und speichern sie unter einem Konzept ab: Rose. Doch eine Verbindung oder Assoziation kann sich auch wieder zurückbilden, wenn sie nicht gebraucht wird – von der Autobahn zum Trampelpfad, bis wir sie schließlich vergessen.

Den Vorgang, dass sich unser Gehirn umbauen kann, bezeichnet man als Neuroplastizität. Während du gerade diesen Text liest, baut sich dein Gehirn um. Selbst, wenn du alles, was hier steht, schon wusstest. Unsere hundert Milliarden Neuronen im Gehirn optimieren ständig ihre Verbindungen und passen sich an unsere Umgebung an. Egal, was wir gerade machen. Ob Ballerspiel oder Geigenunterricht.

Besonders viel tut sich natürlich im Gehirn von Babys und kleinen Kindern. Sie haben schon eine Menge Veranlagungen, müssen aber noch einiges lernen: Laufen, Sprechen, Schuhe binden. Manchmal sieht man kleine Kinder mit Augenklappe. Wer dann denkt: Oh, das arme Kind, da stimmt wohl was nicht mit dem abgeklebten Auge, dem sei gesagt: Das ist das gesunde Auge! Denn wenn bei Babys ein Auge unterentwickelt ist und immer nur unscharfe Bilder liefert, lernt der visuelle Kortex, dass die Signale von diesem Auge nicht so gut zu gebrauchen sind wie jene des anderen. Also werden die Nervenbahnen vom gesunden Auge stärker und die vom kranken schwächer. Unternimmt man nichts, kann das Kind auf dem schlechteren Auge völlig erblinden. Deckt man aber das gesunde Auge ab, wird das Gehirn gezwungen, die Nervenbahnen vom schlechteren Auge zu festigen (Seheindrücke hängen also nicht mehr am seidenen Faden) und damit zu retten.

Die Fähigkeit, Assoziationen zu bilden, ist ein wesentlicher Bestandteil unseres Lernvermögens. Assoziationen können aber nicht nur zwischen verschiedenen Arten von Eingangssignalen bestehen, so wie bei dem Beispiel mit der Rose: Haptik, Farbe und Geruch. Wir können Bilder mit Gefühlen assoziieren, unsere Emotionen mit einbinden. Du erinnerst dich an den Schmetterling? Vielleicht ist beim Lesen des obigen Abschnitts ja auch dein Dopaminspiegel ein bisschen angestiegen. Das Glückshormon Dopamin kann die Bildung neuer Nervenverbindungen begünstigen. Eine geniale Erfindung der Natur! Wenn wir neue Erfahrungen machen, egal ob positiv oder negativ, werden Botenstoffe ausgeschüttet, die die entsprechenden Assoziationen stärken. Sonst würden wir hundertmal auf Glatteis ausrutschen. Gleichermäßen sorgt die Freude beim