

MATTHIAS UHL

## **IST DENKEN DIGITAL?**

Mit Blick auf die Dominanz digitaler Technologie in unserem Leben liegt es nahe zu fragen wie Denken, Fühlen und jegliche anderen Vorgänge in unserem Gehirn vonstatten gehen. Wirken in der menschlichen Informations- und Datenverarbeitungszentrale, die jeder zwischen seinen Ohren mit sich trägt, die gleichen Prinzipien wie in den silikonbasierten Herzstücken moderner Rechner oder gibt es Unterschiede. Der Betrachtung der Dichotomie folgend, der sich dieser Sammelband widmet, lautet die sich aufdrängende Frage unausweichlich: Wie sind die Verarbeitungsprozesse im Gehirn beschaffen – analog oder digital?

Die Antwort sei an dieser Stelle schon vorweggenommen: Unser Denken und Fühlen ist analog. Präziser gesagt: Das Organ, auf das diese inneren Zustände zurückgehen, basiert auf analogen Prozessen. Zwar gibt es ein Element in den Funktionszusammenhängen unseres Gehirns, das auf den ersten Blick erstaunlich digital wirkt, bei näherer Analyse zeigt sich jedoch, dass es sich auch hierbei um eine Komponente der analogen Prozesse menschlicher Informationsverarbeitung handelt. Diese kurze Antwort auf die Ausgangsfrage soll in den nachfolgenden drei Abschnitten näher erläutert werden. Dabei werden im ersten Teil ‚Wetware‘ die Grundlagen der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit dem Gehirn dargelegt. Daran anschließend erfolgt unter der Überschrift ‚Nervenzellen‘ eine Darstellung der Funktionsweise eben dieser und die Aufarbeitung des auf dieser Ebene möglichen Digitalitätsverdachts. Abschließend wird mit der Perspektive ‚Vom Input zum Output‘ der Frage nachgegangen, wie und in welcher Weise die Verarbeitungsprozesse im Gehirn erfolgen.

### **1. Wetware**

Der Terminus ‚Wetware‘ wurde, mit nicht gerade hochachtungsvollen Absichten, von Computerexperten geprägt, um damit das aus 70% Flüssigkeit bestehende Organ zu bezeichnen, welches unsere Spezies zur

dominierenden Lebensform dieses Planeten gemacht hat: unser Gehirn. Um sich mit der Frage nach dessen genauem Funktionsmodus auseinander zu setzen, ist es wichtig sich darüber klar zu werden, dass es zwei wissenschaftliche Betrachtungsweisen dieses Organs gibt, die beide viel an Erkenntnissen angesammelt haben, jedoch durch eine explanatorische Lücke voneinander getrennt sind. Die erste dieser beiden Perspektiven ist der Top-Down-Ansatz, mit dem das Gehirn als Ganzes in den Blick genommen wird. Dabei hat sich herausgestellt, dass es in sehr komplexer Weise strukturiert ist. Laut Wolf Singer „tun wir gut daran, uns das Gehirn als distributiv organisiertes, hochdynamisches System vorzustellen [...]“<sup>1</sup>. Distributive Organisation bedeutet hier, dass es sich bei den zirka 1.400 Kubikzentimetern Gehirngewebe, die der Durchschnittsmensch besitzt, um keine universale Rechen- oder Symbolsystemmanipulierungsmaschine handelt. Vielmehr sind verschiedene Aufgaben oder Fähigkeiten an unterschiedlichen Stellen dieses Gewebekontinuums lokalisiert. Diese Verteilung ist der Grund für immer wieder zu beobachtende und teilweise hoch selektive Ausfälle. Ein von einem solchen Vorfall im visuellen System des Gehirns betroffener Patient war es, der dem Buch des Neurologen Oliver Sacks, *Der Mann, der seine Frau mit einem Hut verwechselte*<sup>2</sup>, den Titel gab. Andere Beispiele für die Auswirkungen von partiellen Hirnschäden können zum Beispiel der Verlust der Grammatik sein oder die Unfähigkeit Schmerzen zu empfinden.

Könnte man den oberen Teil des knöchernen Schädels wie einen Deckel abheben und so einen Blick auf das Gehirn werfen, so würde man auf eine graurosa, fleischige Masse von puddinghafter Konsistenz blicken. Auf Grund der vielen Windungen und der zentralen Furche, die sich von vorne nach hinten zieht, wäre die Ähnlichkeit mit einer Walnuss nicht von der Hand zu weisen. Untersuchungen, unter anderem im Kontext von Gehirnoperationen, haben ergeben, dass sich die Oberfläche dieses Organs gleich einer Landkarte in verschiedene funktionale Regionen aufteilen lässt. Ganz grob kann man sagen, dass der hintere Teil das visuelle System beherbergt. Weiter vorne schließen sich die Bereiche an, die für die Sensorik und die Motorik zuständig sind. Der vorderste Teil, der sich hinter der Stirn befindet, ist der so genannte assoziative Kortex, der über keine in dieser Weise spezifischen Areale verfügt. Auf dieser Ebene betrachtet stellt sich die Arbeit des Gehirns als ein netzwerkartiges Miteinander von zum größten Teil hochspezialisierten Verarbeitungs-

---

1 Singer, Wolf: *Der Beobachter im Gehirn*, Frankfurt a.M. 2002, S. 111.

2 Sacks, Oliver: *Der Mann, der seine Frau mit einem Hut verwechselte*, Hamburg 1987.

einheiten dar. Häufig wird angesichts dieser Beschaffenheit auch von der Modularität unseres kognitiven Systems gesprochen. Kommt es in dieser komplexen Struktur zu partiellen Ausfällen, so kann der Rest in vielen Fällen sehr wohl weiter arbeiten, muss aber ohne das jeweilige Modul auskommen. Auf der Bewusstseins- und Verhaltensebene des Betroffenen kann sich ein derartiger Defekt in den schon erwähnten Ausfällen niederschlagen. Dabei können Menschen der Fähigkeit verlustig gehen Bewegungen zu sehen, so dass sie, auch wenn sie wissen, dass sich die Autos auf der Straße bewegen außer Stande sind deren Geschwindigkeit einzuschätzen und sich dementsprechend zu verhalten. Auch kann es zum vollständigen Verlust des Bewusstseins einer Körperhälfte, ja sogar einer Hälfte der gesamten wahrgenommenen Welt kommen. Sogar die Idee dessen, was ‚links‘ oder ‚rechts‘ heißt, kann auf diese Weise abhanden kommen – es existiert keine kognitive Struktur mehr, die ein derartiges Wort in das verbliebene Weltbild integrieren könnte.<sup>3</sup> Derartige Patienten sind, wenn sie auf die betroffenen Gliedmaßen in ihrem Bett stoßen, mitunter überzeugt, jemand habe sich einen makabren Spaß gemacht und ihnen ein Leichenteil ins Bett gelegt.

Auf dieser Betrachtungsebene unseres Gehirns ist die Frage nach analoger oder digitaler Verarbeitung deplaziert. Die hier mögliche hirntopografische Zuordnung von Funktionen und Leistungen endet mit in sich hochkomplexen Modulen, die jeweils spezifische Verarbeitungsleistungen erbringen. In welcher Weise diese Leistungen erbracht werden, kann von dieser makroskopischen Ebene aus nicht näher bestimmt werden. Die angeführten Ausfälle sind in diesem Zusammenhang lediglich Symptome dafür, dass ein Bestandteil des Gesamtsystems nicht mehr zur Verfügung steht. Sie erlauben keine Aussagen über die internen Mechanismen dieser funktionalen Einheiten.

Die Gegenperspektive zum Top-Down- ist der Bottom-Up-Ansatz, der die Funktionsweise des Gehirns ausgehend von der Untersuchung der kleinsten Bausteine erklären will. Dies sind die Nervenzellen bzw. – wenn man weiter ins Submikroskopische geht – deren einzelne Bestandteile wie Membranproteine und Transmittersubstanzen. Hier ist die Analyseebene, auf der die Verarbeitungsprozesse, die im Gehirn geleistet werden, als elektrische und vor allen Dingen chemische Vorgänge nachvollzogen werden können. Einen schönen Vergleich, welcher Komplexität man sich bei dieser Betrachtungsweise gegenüber sieht, gibt Susan Greenfield:

---

3 Ramachandran, Vilaynur S.: *Die blinde Frau, die sehen kann*, Reinbeck bei Hamburg 2002, S. 191 ff.

Der Amazonaswald erstreckt sich über eine Fläche von rund 4.300.000 Quadratkilometer und enthält etwa 100 Milliarden Bäume, also etwa soviele Bäume, wie wir Nervenzellen im Gehirn haben. Aber diese Metapher ist hier noch nicht zu Ende: Wenn wir nun die riesige Zahl von Verbindungen zwischen den einzelnen Neuronen in Rechnung ziehen, können wir sagen, dass es im Gehirn so viele Nervenverbindungen gibt wie Blätter im Amazonasdschungel.<sup>4</sup>

Wer einzelne Nervenzellen betrachtet, muss sich bewusst sein, dass er sich einem oder doch wenigen Exemplaren in einem Verbund mit insgesamt 100 Milliarden Zellen widmet. Bis in die 50er Jahre des vergangenen Jahrhunderts war es unter Biologen und Medizinern sogar umstritten, ob sich das Gehirn überhaupt aus separaten Zellen zusammensetzt oder ob es sich um ein kontinuierliches Netzwerk handelt.<sup>5</sup> Erst das Elektronenmikroskop belegte die Theorie des zellulären Aufbaus und führte im Verlauf der weiteren Forschung dazu, dass man sich darüber bewusst wurde, dass jede Nervenzelle mit 10.000 bis 100.000 Nachbarn in Verbindung steht.

## 2. Nervenzellen

Funktional lässt sich eine Nervenzelle dreiteilen: in Signaleingang, Signalverarbeitung und Signalweiterleitung. Dem entsprechen anatomisch die Dendriten, der Zellkörper und das Axon. Das zentrale Element in diesem Gefüge ist der Zellkörper, den man sich mehr oder weniger rund oder pyramidenförmig vorstellen kann. Hier befindet sich der Zellkern und damit die physiologische Schaltzentrale. Vom Zellkörper gehen eine Fülle von Fortsätzen aus, die sich verzweigen und in Kontakt mit anderen Zellen stehen. Bei ihnen handelt es sich um die Dendriten, die an ihren Kontaktstellen, den Synapsen, von anderen Zellen erregt oder gehemmt werden und die für den Signaleingang der Zelle verantwortlich sind. An einer Stelle des Zellkörpers entspringt ein längerer Fortsatz, der sich ebenfalls verzweigt und Signale an andere Zellen weiterleitet. Bei ihm handelt es sich um das Axon.

Das Axon und was man über die Funktionsweise dieses Outputs der zellulären Informationsverarbeitung herausgefunden hat, ist der Bestandteil einer Nervenzelle, der den Verdacht der Digitalität nahe legt.

---

4 Greenfield, Susan A.: *Reiseführer Gehirn*, Heidelberg 2003, S. 105.

5 Changeux, Jean-Pierre: *Der neuronale Mensch*, Reinbeck bei Hamburg 1984, S. 39.

Grund dafür ist die Beschaffenheit des Aktionspotenzials, des elektrochemischen Ereignisses durch das sich Signale entlang dieser Leitungsbahn fortpflanzen. Der Begriff der ‚Leitungsbahn‘ legt Assoziationen mit elektrischen Leitungen nahe; das biologische Pendant, um das es jedoch hier geht, funktioniert grundsätzlich anders. So kommt es nicht zu einem Elektronenstrom durch einen elektrischen Leiter, da ein solcher hier nicht vorhanden ist. Was stattfindet sind vielmehr Potenzialverschiebungen zwischen dem Inneren dieser von Membran umgebenen Struktur und dem umgebenden Medium. Ursache für diese Potenzialverschiebungen sind Ionenströme durch die Membran. Diese Ströme entstehen, weil spezielle Membranproteine, hochspezialisierte Eiweißmoleküle, zeitweise durchlässig für Ionen, also geladene Teilchen, werden. Dabei kommt es zuerst zu einem Einstrom von Natriumionen und kurz darauf zu einem Ausstrom von Kaliumionen. Dieses Geschehen dauert zwischen ein und zwei Tausendstelsekunden. Im Anschluss daran wird durch aktiven Transport der geladenen Teilchen durch die Membran der ursprüngliche Zustand wieder hergestellt. Die Membran, die das Axon umgibt, ist dabei Teil der Zellwand, die den weitläufigen Zellkörper der Nervenzelle lückenlos umschließt.

Das auffälligste Merkmal des Aktionspotenzials ist, dass es immer in gleicher Weise erfolgt. Ganz gleich wo im Gehirn und zu welchem Anlass, wann immer eine Zelle Signale durch ihr Axon in Richtung ihrer Nachbarn sendet, haben diese die Form von Aktionspotenzialen. Diese Uniformität des elektrochemischen Ereignisses, das für die neuronale Weiterleitung verantwortlich ist mag es nahe legen hier an eine digitale Codierung zu denken. Dem ist jedoch nicht so:

Untersuchungen auf zellularer Ebene haben bereits frühzeitig gezeigt, dass die Informationsverarbeitung im Gehirn anders als im zurzeit üblichen Computer keinen absoluten Taktgeber zur Verfügung hat. Dies hat tief greifende Auswirkungen auf die Frage der Codierung von Informationen im Nervensystem. Der Versuch, die Informationsverarbeitung im Nervensystem als ausschließlichen Binärcode zu verstehen, kann deswegen nicht gelingen, weil für die einzelnen Impulse keine strengen Zeitfenster definiert sind, die es ermöglichen würden, dem Eintreffen oder Nichteintreffen eines Signals den Wert 0 oder 1 ähnlich zuzuordnen, wie das in einem Rechnersystem geschieht.<sup>6</sup>

Die Aktionspotenziale der Axone sind zwar standardisierte Ereignisse im physiologischen Geschehen unserer Nervenzellen. Von diesem unifor-

---

6 Linke, Detlef: *Das Gehirn*, München 2002, S. 81.

men Charakter lässt sich jedoch keineswegs auf eine digitale Beschaffenheit des Gesamtsystems zurück schließen. Um dieser theoretischen Verlockung zu widerstehen – schließlich handelt es sich um elektrochemisches Geschehen im Millisekundenbereich, das wie der kleinste gemeinsame Nenner aller Nervenzellen wirkt – sei hier eine Analogie ins Feld geführt. Von den Aktionspotenzialen auf systemische Digitalität zu schließen wäre ungefähr so, als wenn man von der Gleichförmigkeit der Wassertropfen aus allen tropfenden Hähnen der Welt auf einen digitalen Charakter des Leitungssystems schließen wollte.

Die Konstanz des elektrochemischen Geschehens entlang der Axone dient im Zusammenhang der neuronalen Verarbeitung einer letztlich analogen Signalübertragung zu den Zielzellen. Je nachdem, wie viele Aktionspotenziale in welcher Frequenz die Synapsen erreichen, werden unterschiedlich viele Neurotransmitter ausgeschüttet. Diese Botenstoffe überbrücken als rein chemische Signale den winzigen Spalt zur nächsten Zelle und interagieren mit der gegenüberliegenden Membran.

### **3. Vom Input zum Output**

Wie aber macht das Gehirn dann das was es macht: Denken, Fühlen, Träumen und Sonstiges? Für all diese Leistungen müssen Verarbeitungsprozesse stattfinden. Das bis zu einem Meter lange Axon – so lang können die Fortsätze der Zellen werden, die Signale ins Rückenmark senden – tut nichts derartiges, sondern leitet nur mit hoher Akkuratess weiter. Das entscheidende Geschehen muss anderswo in der Nervenzelle erfolgen.

Die Signalverarbeitung der Zelle muss also logisch gefolgert Angelegenheit von Dendriten und Zellkörper sein. Und genau so verhält es sich auch. An der Membran der Dendriten und ebenso an der des Zellkörpers spielt sich das Geschehen ab, das letztendlich dazu führt, dass am Beginn des Axons, dem so genannten Axonhügel, ein Aktionspotenzial entsteht. Dieses entsteht immer, wenn am Axonhügel ein bestimmtes elektrochemisches Potenzial überschritten wird, und nimmt dann seinen Weg entlang des Axons. Der Gehirnforscher Gerhard Roth beschreibt den Signalverarbeitungsprozess einer Nervenzelle wie folgt:

Der wichtigste Faktor für die Integrationsleistung einer Nervenzelle ist das zahlenmäßige Verhältnis von erregenden und hemmenden Synapsen und natürlich die Tatsache, wo diese ansetzen. Eine gleichzeitige Erregung und eine Hemmung, hervorgerufen durch die selbe Zahl erregender und hemmender Synapsen an den-

selben Stellen, sind gleich stark und heben sich gegenseitig auf, während unterschiedliche Zahlenverhältnisse der beiden Synapsentypen, kombiniert mit unterschiedlichen Ansatzorten, sehr unterschiedliche Erregungszustände hervorrufen. Erregende Synapsen sind vermehrt in distalen Dendritenbereichen zu finden, während hemmende Synapsen dazu tendieren, in der Nähe des Axonhügels anzusetzen. Dadurch können letztere, selbst wenn sie viel geringer an Zahl sind, den Erregungsfluss sehr effektiv, sozusagen in der ‚Hinterhand‘ beeinflussen.<sup>7</sup>

Die Erregung und Hemmung durch eingehende Signale bezieht sich in diesen Ausführungen auf den elektrochemischen Zustand der Zellmembran. Erregung bedeutet, dass sich die Potenzialverhältnisse der Membran der Feuerschwelle des Axonhügels annähern. Hemmung bedeutet, dass genau dies verhindert wird. Durch die Gestalt der Nervenzelle, die man sich zu diesem Zweck als Gummihandschuh mit extrem verästelten Fingern vorstellen kann, und die Vielzahl der Synapsen, die sich auf ihrer Oberfläche befinden, kommt es auf diese Weise zu einer komplexen dreidimensionalen Verrechnung der eingehenden Signale. An einer recht kontaktarmen Nervenzelle sind es ungefähr 10.000 Synapsen, die theoretisch gleichzeitig im Stande sind das Membranpotenzial zu beeinflussen. Die Bedeutung der einzelnen Synapse für das Gesamtgeschehen in der Zelle resultiert dabei aus der Kombination von Ansatzort, Aktivität und Wirkungsweise. Und nur, wenn das daraus resultierende elektrochemische Gewitter im Mikrobereich an einer Stelle der Zelle, nämlich dem Axonhügel, einen bestimmten Grenzwert überschreitet, kommt es zu einem ausgehenden Signal, das wiederum bei etlichen tausend oder zehntausend Zellen in deren Potenzialgewitter eingreift.

Bei dieser Betrachtung wird ersichtlich, warum das Gehirn in Betracht der Dichotomie Analog/Digital klar auf der Seite des Analogen anzusiedeln ist. Die basalen Verarbeitungsprozesse der Nervenzellen haben einen durch und durch kontinuierlichen Charakter. Bei Richard L. Gregory findet sich diese Charakteristik in einer pointierten Gegenüberstellung wieder: „Bei digitalen Rechenoperationen werden verschiedene rechnerische oder logische Schritte (Algorithmen) durchlaufen. Analoge Systeme vermeiden es, diese Schritte zu durchlaufen [...] – sie vermeiden zu rechnen.“<sup>8</sup> Jede Synapse verfügt über ein Spektrum von möglichen Zuständen, und der den Output generierende Prozess der Zelle ist eher

---

7 Roth, Gerhard: *Fühlen, Denken, Handeln*, Frankfurt a.M. 2003, S. 121.

8 Gregory, Richard L.: *Auge und Gehirn*, Reinbeck bei Hamburg 2001, S. 109.

mit dem Mischen eines Drinks aus tausenden von Zutaten als mit einem binären Kalkül vergleichbar.

Dementsprechend sind unsere mentalen Zustände auf der Ebene ihrer Hardware bzw. Wetware analoge Ereignisse. Die anfangs erwähnte explanatorische Lücke zwischen Top-Down- und Bottom-Up-Ansatz tritt hier jedoch ganz offensichtlich hervor: So viel man auch weiß und erklären kann auf beiden Betrachtungsebenen, ungeklärt bleibt wie genau die eine mit der anderen zusammen hängt. Das Fernziel der Forscher ist eine Theorie, die eben diese Verbindung herstellt. Bei allen Entdeckungen, die auf dem Weg dahin erfolgen mögen, ist es jedoch auszuschließen, dass sich unser Denkkaparat noch als digitales System offenbart. So wirkmächtig digitale Technologie in unserer Lebenswelt ist und so wirkmächtig sie auch als Model für daten- und informationsverarbeitende Prozesse ist, bei der Erklärung des Geschehens in unserem Kopf versagt sie, weil am Grunde unserer Gedanken keine Nullen und Einsen zu finden sind, sondern ein analoger Reichtum elektrochemischer Zustände.