

## Über den neuronalen Kode zur Sprache der Wahrnehmung?

Anmerkung zu Miguel A. L. Nicolelis & Sidarta Ribeiro:  
**Die Sprache der Wahrnehmung.**  
Spektrum der Wissenschaft, Juni 2007, p. 50-57.

Peter Jaenecke

Die Geschichte beginnt mit einer Lüge: Auf dem Titelblatt des Juniheftes 2007 von *Spektrum der Wissenschaft* wird aus der Hirnforschung der Beitrag *Wie entsteht die Empfindung von Raum und Zeit?* angekündigt; im Heft selbst findet man aber unter Hirnforschung nur den Titel *Die Sprache der Wahrnehmung*. In den Redaktionsstuben wissenschaftlicher Verlage scheint man wohl keine hohe Meinung von der Urteilsfähigkeit potentieller Leser zu haben; hier hofft man auf die Signalwirkung aufmacherischer Titel. Das hat, wie die folgende Gegenüberstellung von Originaltiteln und deren „Übersetzungen“ zeigt, in Deutschland Tradition:

**William F. Allman:** Apprentices of Wonder/Menschliches Denken – Künstliche Intelligenz. Von der Gehirnforschung zur nächsten Computer-Generation (Droemer/Knauer)  
**Bryan Appleyard:** Understanding the Present/Der halbierte Mensch (Kindler)  
**Alan Baddely:** Your Memory/So denkt der Mensch (Droemer/Knauer)  
**Howard Gardner:** The Mind's New Science/Dem Denken auf der Spur (Klett-Kotta).

Die Beispiele ließen sich beliebig fortsetzen. ‚Denken‘ gilt offensichtlich als ein besonders zugkräftiges Schlüsselwort. Ein Lektor könnte so argumentieren: „Übernehmen wir den Titel ‚Apprentices of Wonder‘ auf deutsch, würden wir mit Sicherheit einen Ladenhüter produzieren.“ Einverstanden. Aber dieses Argument hat die Form: „Schrieben wir nicht ‚Echter Bohnenkaffe‘ auf die Packung, würde uns die Zichorie, die wirklich drinnen ist, keiner abkaufen“. Für geistige Waren gilt offenbar das Verbraucherschutzgesetz nicht.

Was bei den Überschriften beginnt, setzt sich im Beitrag selbst fort: Auch in dem Artikel *Die Sprache der Wahrnehmung* erfährt man nichts über die Sprache der Wahrnehmung; man erfährt noch nicht einmal, was mit solch einer Sprache gemeint sein könnte. Mechanorezeptoren, so heißt es p. 50, „übersetzen die wichtigsten Merkmale eines Berührungsreizes – ob bei Nager oder Mensch – in eine Sprache, die das Gehirn versteht: Elektrizität.“ Diese faselige Vorstellung von Sprache durchzieht die gesamte Arbeit:

In der Ankündigung (p. 4) wird behauptet, Studien am Tastsinn von Nagern enthüllten allgemeine Gesetze der Sinneswahrnehmung. Gemäß der Kastenrubrik *In Kürze* (p.52) möchten Hirnforscher seit Jahrzehnten „verstehen, wie das Gehirn die Fluten elektrischer Impulse, die über seine Nervenzellen strömen, in Gedanken, Gefühle und Empfindungen übersetzt.“ Und was haben sie herausgefunden? „Früher vermuteten sie, dass bei einer Sinneswahrnehmung die einzelnen Signale auf streng getrennten Bahnen in die höheren Hirnzentren gelangen. Doch offenbar wird die Information schon auf dem Weg dahin von Neuronen-Ensembles aus weit verteilten Zellen komplex verschlüsselt.“ (ebda.) Sind die allgemeinen Gesetze mit der Sprache der Wahrnehmung identisch? Was heißt es, elektrische Impulse in Gedanken, Gefühle und Empfindungen zu übersetzen? Für wen verschlüsselt das Gehirn die eingehende Information?

„Lange galt es in den Neurowissenschaften als zutiefst rätselhaft, ja unergründlich, wie das Gehirn elektrische Impulse in ... feine und vielfältige Wahrnehmungen überträgt. Diesen neuronalen Kode aufzubrechen heißt die Türen zum Verständnis unseres Innersten, unseres tiefsten Wesens zu öffnen. Wenn wir sprechen, lieben, hassen können, wie wir die Welt um uns herum wahrnehmen [sic], auch unsere Erinnerungen, Träume, selbst die Geschichte unserer Art – das alles beruht auf dem Zusammenspiel einer Fülle von elektrischen Signalen, die wie plötzliche Stürme durch das Gehirn fegen.“ (p. 50). Diese blumigen Ausführungen spannen die Erwartungen hoch: wir erwarten nichts weniger als bis zum zutiefst Rätselhaften unseres Wesens vorzudringen.

Helfen sollen uns dabei Experimente mit Ratten, deren Spürhaare unter unterschiedlichen Bedingungen gereizt wurden. „Die Rezeptoren an der Haarbasis übersetzen jede winzige Abbiegung des Haars in schnelle Folgen kleiner ... neuronaler Impulse, die über Nervenfasern ins Gehirn gelangen. Diese Entladungen signalisieren Ort, Intensität und Dauer der Berührungseizes. Die Weiterleitung geschieht über das Trigeminiussystem, das zum somatischen System gehört und darauf spezialisiert ist, taktile Signale aus dem Gesicht weiterzuschicken und zu verarbeiten.“ (p. 52) Da wenigstens ein Teil der Menschheit ebenfalls über Spürhaare verfügt, können die aus den Experimenten mit Ratten erhaltenen Ergebnisse offenbar unmittelbar Aufschluß über unser tiefstes Wesen geben.

### **Die Experimente mit Rattenspürhaaren**

Die Experimente betrafen zunächst die Abgrenzung des rezeptiven Feldes einzelner Neuronen, das ist jener Bereich eines Sinnesorgans, bei dessen Stimulation eine bestimmte Hirnzelle anspricht. Es zeigte sich, daß die Neuronen vom Nucleus ventralis posteriomedialis (einem speziellen Thalamuskern) sehr große rezeptive Felder auf der Rattenschnauze haben, die neben einem Hauptspürhaar noch etliche andere, manchmal sogar alle Spürhaare auf einer Gesichtshälfte umfassen. Wurde das Hauptspürhaar bewegt, feuerte das Neuron am schnellsten und stärksten; die benachbarten Tastaare erregten das Neuron weniger und langsamer (p. 54). Auf die Berührung verschiedener Haare in ihrem Feld reagiert ein Neuron „mit unterschiedlicher Zeitverzögerung – was bedeutet, dass sich ihr Einzugsbereich zeitabhängig verschiebt. Genau genommen lassen sich das Zentrum und die Grenzen eines rezeptiven Feldes also gar nicht allgemein angeben, sondern man kann es nur jeweils für einen bestimmten Zeitpunkt nach der Reizung definieren ... Dank dieser räumlich-zeitlichen Dynamik können sich die Neuronen sofort neu organisieren, wenn sich der Informationsfluß aus dem Gesicht verändert.“ (p.54)

Gleichzeitige Aktivitätsmessungen an fünf Stationen des Trigeminiussystems, die sich über den Hirnstamm, den Thalamus bis zur Hirnrinde erstreckten,

ergaben, daß die Beugung eines einzelnen Spürhaars von wachen Tieren komplexe Wellen elektrischer Aktivität erzeugte. „Statt dass die Sinnesinformation über festliegende, getrennte Bahnen lief, sah es so aus, als würden ganze Zellpopulationen die Information aufnehmen, als würde die Botschaft über viele Neuronen verteilt.“ Erst wenn große Populationen von individuell reagierenden Neuronen zusammenwirken, scheint das Rattengehirn in der Lage zu sein, die Information eines taktilen Reizes genau auszuwerten (p. 55).

Bei weiteren Messungen wurden die Ratten unter wechselnden äußeren Bedingungen den gleichen taktilen Reize ausgesetzt. Die Neuronen reagierten völlig verschieden, je nach dem, ob das Tier gerade die Spürhaare zum Tasten bewegte oder nicht (p. 55). Durch die Betätigung der Spürhaare „veränderten sich ganz offensichtlich die Eigenschaften der Nervenzellen. Solches Verhalten verhilft somit dazu, aufeinanderfolgende Berührungseize im Thalamus wie in der Hirnrinde zuverlässig abzubilden.“ (p. 56). „Einige Neuronen des betreffenden Hirnrindengebiets veränderten ihre Aktivität schon im voraus, bevor die Spürhaare überhaupt die Türöffnung berührten. Anscheinend beeinflußt schon, dass das Tier die Aufgabe erwartet, die Eigenschaften der Neuronen und bereitet sie auf die anstehende Arbeit vor.“ (p. 56)

Der Wahrnehmungsvorgang stützt sich also nicht „auf einzelne spezialisierte Neuronen, auch nicht allein auf hintereinandergeschaltete Module aus in Säulen angeordneten tonnenförmigen Neuronennestern. Eher scheint das Säugerhirn mit dynamischen Zellensembles zu arbeiten: es ist das Zusammenspiel von vielen Einzelneuronen, die weit verteilt sein können und auf ein breites Spektrum von Signalfrequenzen ansprechen ...“ (p. 56f). „Welche Zellen zu einem Ensemble gehören, ändert sich wahrscheinlich fließend und kann sehr schnell wechseln. Das einzelne Neuron mag gleichzeitig in diverse solche Netze eingebunden sein. Auch können sich seine Entladungseigenschaften fortwährend verschieben. Dies hängt vom augenblicklichen Zustand des Sinnesorgans ab, von früheren Wahrnehmungserfahrungen sowie vom übrigen Geschehen im Gehirn. Wichtig ist auch, ob das Tier die Umweltinformation aktiv einholt oder sie passiv erfährt sowie, was es von der Situation erwartet.“ (p. 57)

## Diskussion der Ergebnisse

Was ist neu an den Ergebnissen? Vor 30 Jahren glaubten die meisten Neurowissenschaftler, dass Wahrnehmungen über eine strikte Vorwärtsverschaltung von den Sinnesorganen in die höheren Hirnstrukturen gelangen (p. 52). Die wichtigste Vorhersage dieses sogenannten Labeled-line Modells war, daß der Einzugsbereich der einzelnen Neuronen in den Tönnchen auf jeweils ein bestimmtes Spürhaar beschränkt sein sollte (p. 53). Die oben beschriebenen Ergebnisse bedeuteten daher für viele Hirnforscher einen Schock (p. 55).

Für viele Hirnforscher! Aber es gibt noch andere Forscher, die kognitive Vorgänge untersuchen. Bereits BAXT fand 1871 über tachistoskopische Experimente heraus: Je kontrastreicher der visuelle Reiz, desto kürzer, und je komplexer oder je kleiner seine Gestalt, desto länger dauert die Erregungsleitung.<sup>1</sup> Allein dieser Befund läßt sich schwer mit dem 100 Jahre später postulierten Labeled-line Modell der Hirnforscher vereinbaren. Weitere Widersprüche hätte man z.B. aus den zahlreichen Bildfolgeexperimenten entnehmen können.<sup>2</sup> Allerdings wurden die Experimente nicht mit Ratten, sondern nur mit Menschen durchgeführt.

Diese Säugetiere verfügen bekanntlich über ein Gedächtnis, das sie nicht abschalten können. Folglich sind automatisch bei ihren Wahrnehmungen immer Gedächtnisvorgänge beteiligt. Außerdem zeichnen sie fortlaufend (und ebenfalls automatisch) das Wahrgenommene in ihrem Gedächtnis auf; bei ihnen läuft gewissermaßen ständig eine Art Überwachungskamera mit. Solche Aufzeichnungen sind notwendig, damit sie ein Zeitgefühl ausprägen können, das ihnen (wenn auch manchmal mit Mühe) ermöglicht zu sagen, welches Ereignis in der Vergangenheit früher oder später war.

<sup>1</sup> BAXT (1871): *Ueber die Zeit, welche nöthig ist, damit ein Gesichtseindruck zum Bewußtsein kommt*, p. 331-333, 334.

<sup>2</sup> Hier sei nur auf die umfangreiche Arbeit von TURVEY (1973): *On peripheral and central processes in vision* verwiesen.

Wenn nun damals kognitive Psychologen den Hirnforschern vorwarfen, die Interpretation der physiologischen Ergebnisse, insbesondere aber das daraus abstrahierte Labeled-line Modell, könne nicht stimmen, weil es die Gedächtnisprozesse vernachlässige, wurden sie von den Hirnforschern der Ignoranz bezichtigt und dahingehend belehrt, daß die Hirnforschungsergebnisse eindeutig seien.

Nun ging es aber gar nicht um die experimentellen Ergebnisse selbst, sondern nur um ihre einseitige, allein aus dem neurophysiologischen Blickwinkel erfolgte Interpretation. Die Kognitionsforscher sagten sich nämlich, daß immer dann, wenn das Gedächtnis mit im Spiel ist, notwendig ganze Zellpopulationen mit ganz unterschiedlichem Zeitverhalten aktiv sein müssen, und zwar schon weit vor dem eigentlichen Experiment. Es sei nicht zulässig anzunehmen, ein Versuchstier nehme immer erst dann etwas wahr, wenn der Versuchsleiter bei ihm einen Reiz auslöst. Vielmehr baue sich das Tier fortlaufend aus seinen früheren Erlebnissen und gegenwärtigen Wahrnehmungen ein Bewußtseinszustand auf, der mit jedem neuen Eindruck wechselt und dabei die Aufmerksamkeit lenkt, ein in der Gedächtnispsychologie unter dem Namen ‚Priming‘ bekannter Effekt. Außerdem sei z.B. aufgrund der Bildfolgeexperimente kaum anzunehmen, daß die Erregungsleitung die Sinnesdaten bloß weiterleite, man müsse vielmehr davon ausgehen, daß sie auf ihrem Weg bereits eine Verarbeitung und vor allem eine Reduzierung des Umfangs erfahren, so daß in der Hirnrinde gar nicht der an den Sinnesorganen applizierte Reiz ankomme. Daß dies alles zutrifft, scheinen nun die Experimente von NICOLETIS & RIBEIRO vollauf bestätigt zu haben, so daß man sagen kann: Was bisher nur von Menschen bekannt war, konnte nun auch bei Ratten nachgewiesen werden.

Über die angekündigte Sprache der Wahrnehmung haben wir allerdings nichts erfahren. Und wie steht es mit der Antwort auf die eingangs (p. 52) gestellten Fragen: „Wie ... können Ratten dank des Trigeminiussystems in Sekundenbruchteilen die Weite einer Öffnung berechnen? Wie gelingt es den riesigen Zellpopulationen dieses Neuronennetzes festzustellen, welche sensorische In-

formation vorliegt? Wie verarbeiten sie den Reiz?“ „Wie muß man sich die neuronale Kodierung, die Repräsentation von Sinnesinformation vorstellen? Welchen Gesetzmäßigkeiten oder Regeln folgt das Gehirn dabei?“ Auch sie bleiben unbeantwortet.

### Neuronaler Kode

Mit der Erforschung des neuronalen Kodes sind offenbar die im Artikel erwähnten, nur ungenau beschriebenen Mustererkennungsaufgaben gemeint, mit denen etwas über die kodierten Botschaften der Neuronen herausgefunden werden sollte (p. 55). Dabei wurden bestimmte einzelne Spürhaare gereizt und die dadurch ausgelösten räumlich-zeitlichen Entladungsmuster von vollständigen Hirnrindenpopulationen aufgezeichnet. Mit diesen Daten wurde ein künstliches neuronales Netz trainiert. Anschließend wurde dem Netz ein neues Entladungsmuster dargeboten; es sollte herausfinden, welches der Spürhaare bei dieser Rindenaktivität gereizt worden war. Es konnte diese Aufgabe mit hoher Genauigkeit ausführen, wenn die Entladungsmuster von ganzen Zellpopulationen stammten (p.55).

Welche Einsichten über den neuronalen Kode lassen sich daraus gewinnen? Zunächst bleibt weiterhin unklar, was unter solch einem Kode zu verstehen ist. Die Trainingsdaten bestanden aus der Tabelle

Spürhaar 1 ↔ Entladungsmuster  $M_{11}$ ,  $M_{12}$ , ...

Spürhaar 2 ↔ Entladungsmuster  $M_{21}$ ,  $M_{22}$ , ...

...;

sie repräsentiert in der Tat einen (mehrdeutigen) Kode; von ihm sind jedoch nur die Entladungsmuster neuronalen Ursprungs. Auch wurde bei der Erkennungsaufgabe kein Kode entschlüsselt, denn die Zuordnungen waren ja im voraus bekannt. Es wurde lediglich gezeigt, daß die Reizung eines bestimmten Spürhaars in den meisten Fällen Aktivitätsmuster hervorruft, deren Ähnlichkeit ausreicht, das zugehörige Spürhaar herauszufinden.

Daß die Aktivitätsmuster mehr oder weniger ähnlich sein müssen, folgt aus der Natur der Sache: eine Unähnlichkeit verfehlte den Zweck der Sinneswahrnehmung. Doch bei bestimmten Aufmerksamkeitssituationen oder Gedächtnisvorgängen sollte es auch stark abweichende Muster geben; diese fallen jedoch bei den obigen Erkennungsaufgaben heraus. Außerdem sagen die Aufgaben nichts darüber aus, was die Ratte mit ihren Wahrnehmungen macht, also z.B. wie sie aus taktilen Reizen die Breite einer Öffnung abschätzt.

### Verhaltensexperimente

Einen Aufschluß darüber erhofften die Autoren durch Verhaltensexperimente zu erhalten: Die Ratten wurden mit unterschiedlichen Türweiten konfrontiert, von denen einige zu schmal für den Durchlaß waren. Es wurde das Verhalten der Ratten beobachtet und zugleich wurde die zeitliche Folge der Entladungsmustern aufgezeichnet. Bei diesen Experimenten wurden viele Spürhaare gleichzeitig stimuliert. Dabei zeigten sowohl die Neuronen von der sensorischen Rinde als auch die vom Thalamus ein hochdynamisches Verhalten. Dies beruht offenbar darauf, daß die Neuronen nicht nur über die auf- und absteigenden Bahnen, sondern auch aus Querverbindungen Signale erhalten, die bei ihnen zu unterschiedlichen Zeiten eintreffen und so ihr Verhalten sehr vielfältig beeinflussen können (p. 55). Es wurden wiederum Erkennungsaufgaben mit einem künstlichen neuronalen Netz durchgeführt; sie galten den Autoren als Prüfstein dafür, ob die beobachteten Rückkopplungseffekte wirklich zur Kodierung der Sinnesinformation beitragen – ob die verschiedenen vorwärts- bzw. zurückweisenden Signale nötig sind, um die Situation richtig zu bewerten (p. 56).

Trainiert wurde das Netz mit den an den Neuronenpopulationen gemessenen räumlich-zeitlichen Entladungsmustern während der Entscheidungsphase, d.h. die Eingangsdaten bestanden wiederum aus einem mehrdeutigen, jetzt jedoch zeitabhängigen Kode der Form

Verhalten 1 ↔ Entladungsmuster  $M_{11}(1), M_{11}(2), \dots, M_{12}(1), M_{12}(2), \dots$

Verhalten 2 ↔ Entladungsmuster  $M_{21}(1), M_{21}(2), \dots, M_{22}(1), M_{22}(2), \dots$

...,

wobei die eingeklammerten Zahlen den zeitlichen Verlauf angeben. Anhand der Aktivitätsmuster von gleichzeitig bis zu 50 Zellen der primären sensorischen Rinde konnte das System mit großer Genauigkeit vorhersagen, ob eine Ratte eine Türweite richtig beurteilen würde (p. 56).

Die Autoren glaubten daher auf dem richtigen Weg zu sein, die Sprache des Nervensystems deuten zu lernen (p. 56), und in der Kastennotiz (p. 56) heißt es: „Ein künstliches neuronales Netz versteht, was eine Ratte wahrnimmt. Es registriert die Aktivitätsmuster von Hirnzellen des sensorischen Systems bei einem Tastsinnesreiz und weiß daraufhin, ob das Tier die Tastaufgabe besteht.“ Tatsächlich handelt es sich hier aber gar nicht um Wissen, sondern nur um die Erkennung von Mustern, und um die Sprache des Nervensystems zu verstehen, müssen auch die dargestellten Inhalte bekannt sein. Wir haben es jedoch nur mit Folgen von Aktivitätsmustern zu tun, denen vom Experimentator ein bestimmtes Verhalten zugeordnet wurde. Die ursprüngliche Frage, wie die Ratten aus taktilen Reizen die Breite einer Öffnung abschätzen und welchen Gesetzmäßigkeiten und Regeln das Gehirn dabei folgt, bleibt weiterhin unbeantwortet.

## Resümee

„Geknackt ist der neuronale Kode, die Sprache des Gehirns, ... noch lange nicht“, so das Fazit von NICOLELIS & RIBEIRO am Ende ihrer Arbeit (p. 57). Das ist eine realistische Bewertung des gegenwärtigen Erkenntnisstandes, zumal wir auch über unser tiefstes Wesen keinen Aufschluß erhalten haben.

In der obigen Formulierung kommt wiederum die sich durch die ganze Arbeit ziehende ungenaue Sprachvorstellung der Autoren zum Ausdruck: Ein Kode ist nun einmal keine Sprache. Man hätte sich von den Autoren klarere Angaben über ihren Untersuchungsgegenstand gewünscht, vor allem hätte man

gern gewußt, welche Bedingungen erfüllt sein müssen, um sagen zu können, der neuronale Kode sei geknackt worden.

Die für Hirnforscher neuen Befunde verdanken die Autoren allein dem verbesserten Stand der Experimentiertechnik. Denn ebenso wie die früheren Experimente, so beruhen auch die von NICOLELIS & RIBEIRO weiterhin auf einer einfachen monokausalen Denkweise: Ein Reiz wird ausgelöst und alle danach beobachteten Aktivitätsmuster gelten dann als Wirkung dieses Reizes. Sind jedoch größere Neuronenpopulationen beteiligt, ergeben sich notwendig Wechselwirkungen, und diese sind – wie der Name schon sagt – nicht mehr monokausal.

Es ist zu erwarten, daß in etwa 30 Jahren die Hirnforscher erneut ein Schock treffen wird: Neue Befunde werden dann nämlich ergeben, daß es nicht möglich ist, allein durch Verfolgen von Aktivitätsmustern einen Einblick in die Arbeitsweise des Gehirns zu erhalten. Vielmehr müsse man sich, so die zukünftige Erkenntnis, statt mit Aktivitätsmustern, also mit den Produkten von bestimmten Hirnprozessen, mit diesen Prozessen selbst beschäftigen.

BAXT, N. (1871): Ueber die Zeit, welche nöthig ist, damit ein Gesichtseindruck zum Bewusstsein kommt und über die Größe (Extension) der bewussten Wahrnehmung bei einem Gesichtseindrucke von gegebener Dauer. *Pflüger's Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere* **4**, 1871, p. 325-336.

TURVEY, M. T. (1973): On peripheral and central processes in vision: Inferences from an information-processing analysis of masking with patterned stimuli. *Psychological Review* **80**, 1973, p. 1-52.

<http://www.peterjaenecke.de/kognition.html>

31.07.07