

Im Druck als: Mallot HA (2009) Neuronale Implantate: künstliche Hardware, natürliche Kognition? In: Hildt E., Engels E.-M. (Hrsg.) *Der implantierte Mensch. Therapie und Enhancement im Gehirn*. (Band 5 der Reihe "Lebenswissenschaften im Dialog", hrsg von K. Köchy, S. Majetschak), Freiburg / München, Verlag Karl Alber; pp 87-104

Hanspeter A Mallot

Neuronale Implantate: künstliche Hardware, natürliche Kognition?

Neuroimplantate mit direkten Schnittstellen zum Nervensystem, wie etwa das Cochlea-Implantat oder Elektroden für die tiefe Hirnstammstimulation bei der Parkinsonschen Erkrankung, werden inzwischen regelmäßig und mit großem Erfolg eingesetzt. Diese Technologie wirft die Frage nach dem Verhältnis von künstlicher Hardware und natürlicher Kognition auf. Die zwei Seiten dieses Verhältnisses sind einerseits mögliche Einflüsse neuronaler Implantate auf Kognition, Bewusstsein oder die personale Identität des Patienten, andererseits die Frage, ob aus kognitionswissenschaftlicher Sicht Designprinzipien für Neuroimplantate formuliert werden können, die für das Funktionieren der Implantate zu berücksichtigen sind. Der vorliegende Aufsatz geht dieser zweiten Frage nach, indem er zunächst die Bedeutung der Kognitionswissenschaft für die Fragestellung darlegt und dann einige Funktionsprinzipien des „kognitiven Apparates“ anhand von Beispielen zusammenstellt. In der Schlussdiskussion wird anhand des Begriffs des Konstruktivismus noch kurz auf mögliche Beeinflussungen der Kognition durch Implantate eingegangen.

1. Der kognitive Apparat: Embodiment oder Funktionalismus?

In der kartesischen Denktradition werden das phänomenale Erleben und das Selbstbewusstsein als weitgehend von ihren neuronalen Korrelaten unabhängige Leistungen des „Geistes“ verstanden. Diese Unterscheidung zwischen dem Gehirn und seiner Physiologie einerseits und dem Mentalen und dem subjektiven Erleben andererseits beruht auf guten wissenschaftsmethodischen und erkenntnistheoretischen Argumenten. Die Beobachtungen, die uns Auskunft über das subjektive Erleben geben, vor allem unsere eigene Introspektion, können wir nicht mit anderen teilen; sie sind daher von grundsätzlich anderem erkenntnistheoretischen Status als die mit der naturwissenschaftlichen Methode von Vorhersage, Experiment und Falsifikation¹ erzielten „objektiven“ Erkenntnisse über das Gehirn, seinen Aufbau und seine Funktionsweise. Die „kartesische Teilung“ zwischen Körper und bewusstem Erleben ist somit zunächst methodischer Natur und tatsächlich wurde der genaue Verlauf der Grenze durch Methodenentwicklungen immer wieder in Richtung auf den subjektiven, phänomenologischen Bereich verlagert. Am Anfang dieser Entwicklung steht die Entwicklung der „Psychophysik“ (also einer Naturwissenschaft geistiger Phänomene) im 19. Jahrhundert durch Hermann von Helmholtz, Gustav Theodor Fechner, Ernst Mach und andere. Die Entwicklung der kognitiven Neurowissenschaft in den letzten Jahrzehnten setzt diese Tradition fort. Während sich die Psychophysik zunächst auf vergleichsweise „einfache“ Leistungen, wie etwa die visuelle Wahrnehmung konzentrierte, erweitert die kognitive Neurowissenschaft den Bereich der Naturwissenschaft bis weit in den Bereich des Erinnerungsvermögens, der Handlungssteuerung und der

¹ R. Carnap, *Philosophical foundations of physics: An introduction to the philosophy of science*, New York 1966; K.R. Popper, *Objective knowledge*, Oxford 1972.

Bewertung von Ereignissen. Als „harter Kern“ auf der subjektiven Seite der kartesischen Teilung bleibt das phänomenale Bewusstsein, für das das Argument der Erklärungslücke, etwa im Sinne von Nagel², weiterhin Gültigkeit behauptet: das subjektive Erleben lässt sich bisher nicht auf physiologische Vorgänge „reduzieren“ und eine solche Reduktion ist auch kaum vorstellbar.

Die Kognitionswissenschaft hat seit der Mitte des 20. Jahrhunderts begonnen, „höhere“ mentale Leistungen in das naturwissenschaftliche Weltbild einzuordnen. Der Begriff der Kognition in seiner modernen Bedeutung stammt aus der Psychologie, eine der frühesten Erwähnungen dürfte die von Eduard Tolman³ sein, der den Begriff der kognitiven Karte für den Teil des Ortsgedächtnisses prägte, den man heute zusammen mit entsprechenden Teilen des Langzeitgedächtnisses für Ereignisse und Referenzwissen als „deklarativ“ bezeichnet. Ulrich Neisser⁴ formalisierte den Kognitionsbegriff durch die Betonung des naturwissenschaftlichen Ansatzes und identifizierte die Verarbeitung sensorischer Daten und die Rolle nicht direkt beobachtbarer, „mentaler“ Zustände als wesentliche Elemente der Kognitionswissenschaft. Vor allem der letzte Punkt unterscheidet den kognitiven Ansatz vom Behaviorismus; dabei muss natürlich auch in der Kognitionswissenschaft die Einführung unbeobachtbarer Erklärungen naturwissenschaftlichen Kriterien einschließlich dem der Einfachheit (Occams Klinge) genügen.

Eine weitere treibende Kraft für die Entwicklung der Kognitionswissenschaft war die technische Theorie der Informationsverarbeitung, also der Informatik und der künstlichen Intelligenz, z.B. durch Norbert Wiener, Claude Shannon, Warren Weaver, Marvin Minsky und andere. Die Naturwissenschaftlichkeit kognitionswissenschaftlicher Erklärungen wurde dabei vor allem an ihrer mathematischen oder algorithmischen Formalisierbarkeit festgemacht, nicht so sehr an der Realisierung im stofflichen Substrat, also an den physikochemischen Eigenschaften biologischer Gehirne. Newell & Simon⁵ z.B. definieren Kognition geradezu als Symbolmanipulation im Sinne einer Turing-Maschine, also über einen Algorithmus und ausdrücklich nicht über die Implementierung im Gehirn. Dieser Ansatz ist funktionalistisch indem er Kognition (und Bewusstsein) unabhängig vom Substrat definiert, und eröffnet damit eine Möglichkeit des Vergleiches zwischen Mensch und Computer. Mit der gleichzeitigen Festlegung auf einen bestimmten Mechanismus verengt er aber auch den Kognitionsbegriff und schließt denkbare andere Mechanismen aus. Tatsächlich argumentieren Newell & Simon⁶, dass kognitive Leistungen notwendig auf dem Mechanismus der Symbolmanipulation beruhen müssten („physical symbol systems“); nachfolgende Versuche, solche Symbolsysteme im Gehirn zu identifizieren gingen aber nicht wesentlich über die Ergebnisse von McCulloch & Pitts⁷ hinaus, die bereits die prinzipielle Implementierbarkeit einer Turingmaschine mit einfachen Modellneuronen gezeigt hatten.

Angeregt durch die Entwicklung der Theorie neuronaler Netzwerke in den 1980er Jahren, die Ergebnisse der kognitiven Neurowissenschaft und die Erfahrung, die man mit der Konstruktion „kognitiver“ Roboter gemacht hat, stellt sich das Problem in der Kognitionswissenschaft inzwischen neu. Das Dogma der symbolbasierten Informationsverarbeitung im Gehirn ist in Robotik und Bildverarbeitung aufgeweicht und hat einer Denkrichtung Platz gemacht, die in den verschiedenen Disziplinen wahl-

² T. Nagel, „What is it like to be a bat?“, in: *Philosophical Review*, 83/1974, S. 435-450.

³ E.C. Tolman, „Cognitive maps in rats and men“, in: *Psychological Review*, 55/1948, S. 189-208.

⁴ U. Neisser, *Cognitive Psychology*, New York 1967.

⁵ A. Newell, H.A. Simon, „Computer science as an empirical enquiry: symbols and search“, in: *Communications of the ACM*, 19/1976, S. 113-126.

⁶Ebd..

⁷ W.S. McCulloch, W. Pitts, „A logical calculus of ideas immanent in nervous activity“, in: *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5/1943, S. 115-133.

weise als „new artificial intelligence“, „embodiment“, „artificial neural networks“, „behaviour-based approach“ etc. bezeichnet wird. Protagonisten dieser Entwicklung sind z.B. der Philosoph George Lakoff⁸, der Robotiker Rodney Brooks⁹ der Evolutions- und Verhaltensbiologe Marc Hauser¹⁰ und die Entwicklungspsychologin Elizabeth Spelke¹¹. Neuronale Netze und Robotik haben gezeigt, dass der rein symbolische Ansatz nicht ausreichen wird, um überzeugende Anwendungen zu generieren. Vielmehr werden analoge, auf Signalfluss, Populationskodierung und dynamischen Rückkopplungen beruhende Mechanismen benötigt, um kontinuierliche Regelungsprozesse zu realisieren, die bei Wahrnehmung und Motorsteuerung von großer Bedeutung sind. Etwas vereinfacht kann man den Unterschied so zusammenfassen, dass der symbolbasierte Ansatz Informationsverarbeitung vor allem als Erkennen und Entscheiden versteht, während der analoge Ansatz die Aspekte von Regelung und Homöostase in den Vordergrund stellt. Der Körper, der in dem funktionalistischen, auf Erkennen und Entscheiden konzentrierten Ansatz keine Rolle spielt, ist im verhaltensorientierten Ansatz Teil des Regelkreises, und hat damit entscheidende Einflüsse auf die Art und Strukturierung der zentralen Verarbeitung und die Gesamtleistung des Systems.

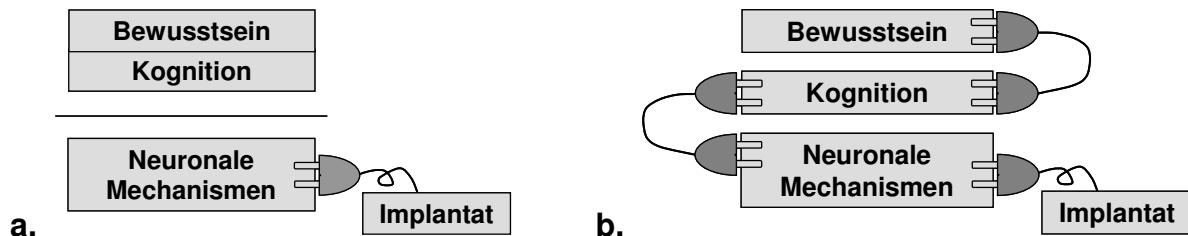


Abb. 1: Zwei Sichtweisen des Verhältnisses von Implantat, Gehirn, Kognition und Bewusstsein. **a.** Kartesischer Ansatz: Bewusstsein und Kognition sind von den neuronalen Mechanismen getrennt. Das Implantat wechselwirkt nur mit diesen Mechanismen. **b.** „Embodiment“: Gehirn, Kognition und Bewusstsein interagieren miteinander. Das Implantat muss daher auch kognitive Funktionsprinzipien berücksichtigen.

Welche Konsequenzen haben diese Überlegungen für den Entwurf von Neuroprothesen und ihre Integrierbarkeit in den kognitiven Apparat des Menschen? Die Schnittstelle von Neuroprothesen mit dem Gehirn liegt auf dem physikochemischen Niveau der elektrischen Aktivität der Nervenzellen und der neurochemischen Transmitter und Neuromodulatoren. Dies unterscheidet sie von nicht-invasiven Prothesen, z.B. Hörgeräten oder Brillen und von Kulturtechniken wie lesen, schreiben oder zeichnen, die natürlich auch die kognitiven Fähigkeiten des Menschen verbessern. Obwohl aber die Schnittstelle auf dem Niveau der Neurophysiologie liegt, genügt es nicht, nur diese Aspekte der Kopplung zu berücksichtigen (Abb. 1a). Wenn der kognitive Apparat wesentlich von den neuronalen Mechanismen bestimmt ist (Abb. 1b), müssen die Eigenschaften dieses Apparates auch beim Entwurf von Neuroprothesen berücksichtigt werden. (vgl. Abb. 1). Ein von einer Elektrode übertragenes Signal muss eben nicht nur die Zielzelle erregen, sondern dies auch in einer Weise tun, die im Gesamtkontext der kognitiven Verarbeitung nutzbar ist.

⁸ G. Lakoff, *Women, fire and dangerous things. What categories reveal about the mind*, Chicago und London 1987.

⁹ R.A. Brooks, *Cambrian intelligence: the early history of new AI*, Cambridge MA 1999.

¹⁰ M. Hauser, *Wild minds. What animals really think*, London 2000.

¹¹ Zum Beispiel: E.S. Spelke, K.D. Kinzler, „Core knowledge“, in: *Developmental Science*, 10/2007, S. 89-96.

Hierzu soll in Abschnitt 2 zunächst die Frage der neuronalen Kodierung behandelt werden, beginnend mit der Informationsmenge, die für einen sinnvollen Einsatz der Prothese übertragen werden muss. Weitere Themen dieses Abschnittes sind die Populationskodierung als generelles Prinzip neuronaler Kodierung und die Selbstorganisation neuronaler Verarbeitungsstufen, die für die Rehabilitationsfähigkeit des Systems von größter Bedeutung ist. In Abschnitt 3 wird die Interaktion zwischen verschiedenen sensorischen Modalitäten diskutiert, zunächst die Rekalibrierung der Eingänge aus verschiedenen Sinnesmodalitäten, die die gleiche Wahrnehmung oder das gleiche Objekt betreffen. Eine Möglichkeit der multimodalen Integration ist der Aufbau modalitätsübergreifender („amodaler“) Repräsentationen, der am Beispiel der visuell-somatosensorischen Grundlagen des Körperschemas besprochen wird. Schließlich wird als Modell der zu erwartenden kognitiven Probleme nach Einsetzen einer Neuroprothese der Wiedererwerb der Sehkraft durch Augenoperationen diskutiert. Insgesamt zeigen die Beispiele, dass der kognitive Apparat grundsätzlich die Flexibilität besitzt, die die Voraussetzung für den Einsatz von Neuroprothesen ist. Soweit diese Prothesen funktionieren, sollten sie die Kognition nicht oder nicht in grundsätzlich anderer Weise verändern, wie das nichtinvasive Prothesen (Brille, Hörgerät, Beinprothese) auch tun.

2. Der neuronale Kode

2.1. Effizienz neuronaler Informationsverwertung

Dass die Wahrnehmung sensorische Information sehr effizient auswerten kann, lässt sich an einer großen Anzahl von experimentellen Befunden belegen. Vor allem für elementare visuelle Wahrnehmung, z.B. die Detektion von schwachen Lichtreizen, können theoretische Grenzwerte bestimmt werden, über die ein Sensor prinzipiell nicht hinauskommen kann. Die Leistungen solcher „optimalen Beobachter“ werden in vielen Fällen vom visuellen System erreicht. Ein Beispiel aus der Objekterkennung ist der von Johansson¹² eingeführte „point walker“, ein bewegtes Muster aus wenigen Punkten, das man zum Beispiel erhält, wenn man einem schwarz gekleideten Menschen Lichtpunkte an Kopf, Hände, Füße, und die großen Gelenke setzt. In Ruhe sieht man nur ein uninterpretierbares Punktmuster, das sich bei Bewegung der Person aber sofort zu einer „Gestalt“ zusammenschließt. Man kann Bewegungsart und Richtung erkennen, kann verschiedene Personen am Gang unterscheiden und ihnen sogar Absichten zuschreiben.¹³

Die Effizienz neuronaler Repräsentationen ergibt sich auch daraus, dass jeweils nur die für eine Aufgabe notwendige Information gespeichert wird. Ein besonders überzeugendes Beispiel hierfür ist die Wechselwirkung zwischen Augenbewegungen und visuell gesteuertem Verhalten. Land & Hayhoe¹⁴ zeigen zum Beispiel, dass in komplexen Verrichtungen wie der Zubereitung einer Tasse Tee die Augenbewegung immer den nächsten Handlungsschritt antizipiert. Die Versuchsperson blickt auf den Kessel und ergreift in; sie blickt zum Deckel des Kessels und öffnet ihn; sie blickt zum Wasserhahn und lässt Wasser in den Kessel einströmen und so weiter. Diese

¹² G. Johansson, „Visual perception of biomotion and a model for its analysis“, in: *Perception and Psychophysics*, 14/1973, S. 202-211.

¹³ R. Blake, M. Shiffrar, „Perception of human motion“, in: *Annual Review of Psychology*, 58/2007, S. 47-73.

¹⁴ M.F. Land, M. Hayhoe, „In what way do eye movements contribute to everyday activities?“, in: *Vision Research*, 41/2001, S. 3559-3565.

„just-in-time“ Organisation der Wahrnehmung, die sich in vielen anderen Beispielen in ähnlicher Weise nachweisen lässt, ermöglicht es, den erforderlichen Gedächtnisinhalt niedrig zu halten. Dies ist natürlich nur deshalb möglich, weil die erforderliche Information jederzeit durch Augenbewegungen abgerufen werden kann. Sinnesorgane sind nicht nur afferent innerviert, sondern stehen immer auch unter efferenter Kontrolle durch das Gehirn. Umgekehrt sind auch Muskeln in der Regel sowohl afferent und efferent innerviert. Für periphere Prothesen bedeutet dies allgemein, dass sie möglichst in einer geschlossenen sensomotorischen Schleife betrieben werden sollten. Hierfür sind bidirektionale Schnittstellen erforderlich, die Information sowohl von der Prothese ins Nervensystem als auch vom Nervensystem zur Prothese übertragen.

2.2. Populationskodierung

Die Kodierung neuronaler Informationen erfolgt auf dem zellulären Niveau in Form von Aktionspotentialen, bei denen die Rate (Frequenz, Anzahl pro Zeiteinheit), zeitliche Muster, und räumliche Verteilungen eine Rolle spielen. Ein zentrales Prinzip, das bereits von Johannes Müller¹⁵ beschrieben wurde, ist unter dem Namen „spezifische Sinnesenergie“ bekannt. Zu jedem Sinnesorgan und sensorischen Nerven gehört nach Müller eine „Kraft“ oder „Energie“, die dazu führt, dass die Erregung des betreffenden Nerven die Wahrnehmung einer bestimmten Modalität erzeugt.

„Wir empfinden nicht das Messer, das uns Schmerz verursacht, sondern den Zustand unserer Nerven schmerhaft; die vielleicht mechanische Oscillation des Lichtes¹⁶ ist an sich keine Lichtempfindung; auch wenn sie zum Bewusstseyn kommen könnte, würde sie das Bewusstseyn einer Oscillation sein: erst dass sie auf den Sehnerven als den Vermitteler zwischen der Ursache und dem Bewusstseyn wirkt, wird sie als leuchtend empfunden“.¹⁷

Reizt man etwa das Auge durch Druck auf den Augapfel (inadäquate Reizung), so entsteht wie bei Reizung mit Licht (adäquate Reizung) eine visuelle Wahrnehmung, das so genannte Druckphosphen.¹⁸ Der Grund dafür, dass ein Reiz als Licht und nicht etwa als Druck wahrgenommen wird, ist also nicht, dass seine physikalische Energie in Form elektromagnetischer Wellen geeigneter Wellenlänge dargeboten wird, sondern dass die Umwandlung in neuronale Erregungsmuster im Auge stattgefunden hat. Bezogen auf die zugehörigen neuronalen Korrelate im Gehirn bedeutet das, dass visuelle Wahrnehmungen bei Erregungen im visuellen Kortex entstehen, während taktile Wahrnehmungen auf Erregungen im somatosensorischen Kortex zurückgehen und so weiter. Die physikochemischen Vorgänge der neuronalen Erregung selbst sind in beiden Fällen mehr oder weniger gleich. In der neueren Literatur verwendet man hierfür den Begriff der Kanalkodierung, der anzeigt, dass der aktivierte Kanal, nicht die Aktivierung selbst, die Information trägt. Die Müllersche „Kraft“ bezeichnet man dann als Spezifität der Nervenzelle, zuweilen auch als Etikett oder englisch „label“ („labelled line coding“).

¹⁵ J.P. Müller, (1837) *Handbuch der Physiologie des Menschen für Vorlesungen*. 1. Band, 3. Aufl., Coblenz 1837, S. 779ff. (<http://vlp.mpiwg-berlin.mpg.de/library/data/lit16133?>).

¹⁶ Müller hat offenbar noch keine Kenntnis der physikalischen Natur des Lichtes. Trotzdem ist seine sinnesphysiologische Analyse zutreffend.

¹⁷ J.P. Müller, (1837) *Handbuch der Physiologie des Menschen für Vorlesungen*. 1. Band, 3. Aufl., Coblenz 1837, S. 780.

¹⁸ Zum Beispiel: R. Stigler, „Beiträge zur Kenntnis des Druckphosphens“, in: *Pflügers Archiv*, 115/1906, S. 248-272.

Die Spezifität eines sensorischen oder motorischen Neurons, d.h. das „Etikett“, das seine Kodierungseigenschaften beschreibt, ist das rezeptive bzw. das motorische Feld dieses Neurons. Es wird bestimmt, indem man die Aktivität des Neurons mit dem jeweils dargebotenen Reiz bzw. mit der jeweils ausgeführten Bewegung korreliert.¹⁹ Im einfachsten Fall entspricht das rezeptive Feld dem „optimalen Reiz“, d.h. dem Reiz, auf den das Neuron am stärksten reagiert (auf den es „abgestimmt“ ist). Ähnliche Reize werden entsprechend schwächer beantwortet. Im motorischen System korreliert die Erregung der Zelle nicht mit einem vor der Erregung stattfindenden Reiz sondern mit einer nachher stattfindenden Bewegung, die sie auslöst oder kontrolliert; das motorische Feld entspricht dementsprechend der Bewegung, die einer starken Erregung der Zelle im Mittel folgt. Ähnliche Bewegungen werden überwiegend von anderen Neuronen kontrolliert, gehen jedoch auch mit einer entsprechend schwächeren Erregung der beobachteten Zelle einher. Insgesamt ergibt sich die Situation einer Populationskodierung, in der jeder Kanal (jedes Neuron) eine bestimmt Spezifität (sein Etikett) aufweist, wobei aber die Spezifitäten verschiedener Neurone überlappen. Jeder Reiz und jede Bewegung wird daher von einer Population von Neuronen kodiert.

Populationskodierung hat eine Reihe von informationstechnisch interessanten Eigenschaften, wie z.B. Subpixel-Auflösung, Kontrastverschärfung und Adaptierbarkeit sowie Fehlertoleranz, auf die hier aber nicht näher eingegangen werden soll. Interessant ist ein Experiment von Wessberg et al.²⁰, in dem einem Makaken Elektroden in großen Bereichen des Frontal- und Parietallappens eingepflanzt wurden. Die mit den Elektroden abgeleiteten Aktivierungen wurden zunächst mit der jeweiligen Armbewegung des Affen korreliert; im zweiten Schritt wurde dann eine Regressionsrechnung durchgeführt, die es erlaubt, anhand der neuronalen Erregungen Voraussagen über die zu erwartende Armbewegung zu machen. Mit diesen Voraussagen wurde schließlich ein Roboterarm gesteuert, dessen Bewegungen dann tatsächlich gut mit denen des Affen übereinstimmten. Damit ist ein erster Schritt zur neuronalen Ansteuerung von Armprothesen gemacht.

2.3. Neuronale Karten und selbstorganisierende Kodes

Nervenzellen mit ähnlicher Spezifität sind im Gehirn häufig benachbart. Dies gilt zum Beispiel für die Retinotopie des primären visuellen Cortex, in dem die Spezifität jeder Nervenzelle einfach einem kleinen Bereich im Gesichtsfeld entspricht oder für die Somatotopie des Hautsinnes, bei der Neurone des somatosensorischen Kortex spezifisch Hautreize kodieren, die an jeweils bestimmten Körperstellen auftreten. Neuronale Karten sind auch für komplexere Spezifitäten nachgewiesen worden, wie z.B. für Ansichten von Gesichtern aus verschiedenen Richtungen.²¹ Die Spezifität einer Nervenzelle, die ja ein wichtiges Element des neuronalen Kodes darstellt, ist also in vielen Fällen durch ihre Position auf der Cortexoberfläche gegeben. Modelle, die die

¹⁹ S.W. Kuffler, „Discharge patterns and functional organization of the mammalian retina“, in: *Journal of Neurophysiology*, 16/1953, S. 37-68.

²⁰ J. Wessberg, C.R. Stambaugh, J.D. Kralik, P.D. Beck, M. Laubach, J.K. Chapkin, J. Kim, J. Biggs, M.A. Srinivasan, M.A.L. Nicolelis, „Real-time prediction of hand trajectory by ensembles of cortical neurons in primates“, in: *Nature*, 408/2000, S. 361-365.

²¹ K. Tanaka, „Columns for Complex Visual Object Features in the Inferotemporal Cortex“, in: *Cerebral Cortex*, 13/2003, S. 90-99.

Selbstorganisation solcher neuronaler Karten in realistischer Weise beschreiben, sind durch Kohonen²² und durch von der Malsburg²³ vorgeschlagen worden.

Neuronale Karten vor allem für komplexere Spezifitäten sind häufig in hohem Grade plastisch veränderbar, was etwa für die Ansteuerung mit Neuroprothesen ein großer Vorteil sein kann. Kartenplastizität ist im somatosensorischen System gut untersucht.²⁴ Hier konnte z.B. gezeigt werden, dass durch Stimulation bestimmter Hautregionen die Repräsentationen dieser Regionen vergrößert werden. Bei ausbleibender Stimulation, etwa nach Amputationen, bleibt die Repräsentation des amputierten Gliedes zunächst erhalten, wird aber dann von Regionen übernommen, die noch Reize empfangen, so dass die Repräsentation des amputierten Gliedes schrumpft.²⁵ Insgesamt ist die Spezifität der corticalen Neurone, die ja wie gesagt einen wichtigen Teil des neuronalen Kodes darstellt, in hohem Maße plastisch und zwar sowohl was die rezeptiven Felder selbst betrifft, als auch in Bezug auf die resultierenden neuronalen Karten. Hierbei wird letztlich die Inputstatistik des Reizes wiedergespiegelt, d.h. häufigere und wichtiger Reize werden genauer repräsentiert und beanspruchen größere Cortexbereiche. Hierdurch wird der neuronale Kode den jeweiligen Gegebenheiten angepasst. Ein theoretisches Konzept, das diese Befunde zusammenfasst, ist die Idee des Bayesschen Lernens²⁶, durch das das Gehirn seine Kodierung und Repräsentation jeweils reizabhängig optimiert. Ein solches Bayes-Netzwerk wäre z.B. in der Lage, versteckte Regelmäßigkeiten in Eingangsdaten aufzuspüren und für das Gehirn nutzbar zu machen. Wenn die Neuroprothese die relevanten Informationen übermittelt, und sei es auch nur in impliziter Form, könnten nachgeschaltete Hirnareale so durch neuronale Plastizität und Rehabilitation diese Informationen nutzbar machen. Eine Übersicht über den Bayes-Ansatz geben Doya et al.²⁷

3. Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Sinnesmodalitäten

Als Modalitäten bezeichnet man in der Wahrnehmungsforschung die sechs grundsätzlichen Sinnessysteme des Menschen, also Sehen, Hören, Riechen, Schmecken, Hautsinn und Kinaesthesia. Wahrnehmungen können auf einzelne Modalitäten bezogen sein, sind aber häufig amodal, also das Produkt der Integration verschiedener Kanäle. Bei der Erkennung einer Person spielen z.B. das Sehen (Gesichtserkennung, Bewegungswesen), das Hören (Stimme) sowie u.U. der Geruch oder das Tasten eine Rolle. Die Wahrnehmung (das „Perzept“) als mentaler Zustand im Sinne der Kognitionswissenschaft ist in diesem Fall nicht von einer einzelnen Modalität bestimmt, sondern Repräsentation eines „Objektes“, das sich in verschiedenen Wahrnehmungsdimensionen unterschiedlich darstellt.

Sinnesprothesen stellen im Erfolgsfall neue Kanäle dar, die mit den vorhandenen Sinnesmodalitäten koordiniert werden müssen. Im einfachsten Fall handelt es sich

²² T. Kohonen, "Self-organized formation of topologically correct feature maps", in: *Biological Cybernetics*, 43/1982, S. 59-69.

²³ C. von der Malsburg, "Self-organization of orientation sensitive cells in the striate cortex", in: *Kybernetik*, 14/1973, S. 85-100.

²⁴ D.V. Buonomoan, M. Merzenich, "Cortical plasticity: from synapses to maps", in: *Annual Review of Neuroscience*, 21/1998, S. 149-186.

²⁵ Zum Beispiel: V.S. Ramachandran, "Plasticity and functional recovery in neurology", in: *Clinical Medicine*, 5/2005, S. 368-373.

²⁶ Thomas Bayes, 1702-1761.

²⁷ K. Doya, S. Ishii, A. Pouget, R.P.N. Roa, *Bayesian Brain. Probabilistic approaches to neural coding*, Cambridge MA 2007.

hierbei um Rekalibrierungen, wenn Messungen aus verschiedenen Sinneskanälen die gleiche Wahrnehmungsgröße betreffen. Komplexer ist die Integration verschiedener Merkmale zu einem kohärenten Objekt oder der Ersatz eines ganzen Sinnesorgans.

3.1. Rekalibrierung

Intermodale Kalibrierungen sind auch im natürlichen System erforderlich, etwa wenn durch das Längenwachstum des Beines die gesehene und vestibulär wahrgenommene Eigenbewegung mit der propriozeptiven²⁸ Wahrnehmung der Beinbewegung neu in Beziehung gesetzt werden muss. Die Plastizität dieser Rekalibrierung zeigt ein klassisches Experiment von Rieser et al.²⁹ in dem Versuchspersonen zunächst gebeten werden, den Weg zu einem visuell dargebotenen Ziel mit verbundenen Augen abzuschreiten („walking without vision“). Die dabei zurückgelegte Distanz entspricht in guter Näherung der visuell gezeigten. In einer Adaptationsphase geht die Versuchsperson dann auf einem Laufband, das mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit läuft, aus der sich die propriozeptiv wahrgenommene Gehgeschwindigkeit ergibt. Das Laufband mit der Versuchsperson befindet sich auf einem Anhänger, der von einem Traktor gezogen wird. Die Geschwindigkeit des Traktors bestimmt die gesehene Eigenbewegung der Versuchsperson. Ist die Geschwindigkeit des Traktors nun höher als die des Laufbandes, so „lernt“ die Versuchsperson in wenigen Minuten, dass ein Schritt nun einer größeren Sehdistanz entspricht. Testet man sie nachher wieder in der „walking-without-vision“ Aufgabe, so macht sie zu wenig Schritte, da sie ja annimmt, mit jedem Schritt eine größere Sehdistanz zurückzulegen. Ist umgekehrt die Geschwindigkeit des Traktors niedriger als die des Laufbandes, schießt die Versuchsperson in der abschließenden Testaufgabe über das Ziel hinaus.

Ähnlich wie für die Ausbildung von rezeptiven Feldern, die ja auch multimodal sein können, sind für die multimodale Integration statistische Modelle vorgeschlagen worden, die die Information aus verschiedenen Kanälen in statistisch optimaler Weise kombinieren und dabei auch die Zuverlässigkeit der sensorischen Information berücksichtigen.³⁰

Ein besonders treffendes Beispiel für die Rekalibrierbarkeit der Wahrnehmung sind die Experimente mit Bildumkehr, die Ivo Kohler³¹ durchgeführt hat und die in einem berühmten Lehrfilm des Institutes für den wissenschaftlichen Film dokumentiert sind. Hierbei trägt die Versuchsperson eine Schirmmütze, an deren Schirm von unten ein Spiegel angebracht ist. Mit einer Brille wird das Gesichtsfeld so eingeschränkt, dass die Versuchsperson nur noch durch diesen Spiegel in die Welt sehen kann, wodurch alle Bilder auf dem Kopf stehend erscheinen. Die Versuchsperson berichtet nach einigen Tagen, dass einzelne Objekte wieder aufrecht erscheinen, insbesondere wenn sie sie berührt. Dabei ist interessant, dass diese Aufrichtung einzelne Objekte

²⁸ Als Propriozeption bezeichnet man Wahrnehmungen, die aus dem Stellungssinn der Muskeln und Gelenke gewonnen werden. Sie werden mit den vestibulären, auf das Gleichgewicht bezogenen, Wahrnehmungen als Kinaestesie zusammengefasst.

²⁹ J.J. Rieser, D.H. Pick, A.E. Ashmead, J. Garing, „Calibration of Human Locomotion and Models of Perceptual-Motor Organization“, in: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21/1995, S. 480-497.

³⁰ M.O. Ernst, M.S. Banks, „Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal way“, in: *Nature*, 415/2002, S. 429-433.

³¹ I. Kohler, Über Aufbau und Wandlungen der Wahrnehmungswelt. Insbesondere über ‚bedingte Empfindungen‘ *Österreichische Akademie der Wissenschaften, Philosophisch-historische Klasse*. 227/1, Wien 1951.

betrifft, während andere noch invertiert erscheinen. Nach etwa einer Woche kann die Versuchsperson sich wieder koordiniert zwischen Hindernissen bewegen und lernt am Ende sogar wieder, Fahrrad zu fahren. Nach Absetzen der Brille gibt es einen umgekehrten Effekt, der jedoch sehr viel schneller wieder abklingt.

Insgesamt zeigen diese Beispiele, dass Rekalibrierungen grundsätzlich möglich sind, wenn auch im Einzelfall unterschiedlich gut oder schnell.

3.2. Körperschema und amodale Objektrepräsentationen

Damit die aus verschiedenen Sinnesmodalitäten gewonnene Information sinnvoll genutzt werden kann, muss das Gehirn in der Lage sein, Daten aus den verschiedenen (natürlichen und künstlichen) Modalitäten, die zum jeweils gleichen Wahrnehmungsobjekt gehören, richtig aufeinander zu beziehen. Hierzu muss eine amodale Repräsentation aufgebaut werden. Diese Fähigkeit ist z.B. im Zusammenhang mit der visuellen, somatosensorischen und propriozeptiven Wahrnehmung der eigenen Hand untersucht worden, wobei die amodale Repräsentation in diesem Fall als Körperschema bezeichnet wird. Man setzt z.B. eine Versuchsperson an einen Tisch und bittet sie, eine Hand hinter einer Trennwand abzulegen, so dass sie diese Hand nicht mehr sehen kann.³² Gleichzeitig platziert man eine Handattrappe, also z.B. eine Gummihand, auf der einsehbaren Seite der Trennwand in einer Position, die auch von der echten Hand bequem einzunehmen wäre. Berührt man nun die echte Hand und die Handattrappe synchron, so gibt die Versuchsperson an, die Berührung in der Handattrappe zu spüren. Ergreift man einen Finger der Handattrappe und biegt ihn nach hinten, so spürt die Versuchsperson einen Schmerz; eine Reaktion lässt sich auch physiologisch durch Hautwiderstandmessung in der unbeteiligten Hand nachweisen. Die Handattrappe ist offenbar in das Körperschema der Versuchsperson integriert worden. Dazu ist es übrigens nicht erforderlich, dass die Handattrappe besonders realistisch ist. Man kann den künstlichen Arm unnatürlich verlängern, durch ein zusammengerolltes Handtuch ersetzen oder ganz weglassen und stattdessen die Tischplatte berühren; auch diese unrealistischen Attrappen werden in das Körperschema integriert.

Neuronale Grundlagen des Körperschemas wurden z.B. bei Makaken untersucht.³³ Im intraparietalen Cortex von Japanmakaken findet man so genannte bimodale Neurone, die sowohl ein visuelles als auch ein somatosensorisches rezeptives Feld aufweisen. Diese Felder können z.B. in der somatosensorischen Modalität (Tastsinn) die Hand und in der visuellen Modalität die Hand und ihre unmittelbare Umgebung bis zum Abstand von einigen Zentimetern umfassen. Bewegt sich die Hand, so bewegt sich das visuelle rezeptive Feld mit ihr. Gibt man nun dem Affen ein Werkzeug in die Hand, und lässt ihn aus einem größeren Bereich Objekte zu sich heranziehen, so verändert sich das visuelle rezeptive Feld so, dass es jetzt nicht nur die Hand sondern auch das ganze Werkzeug umfasst. Das passiert nicht, wenn der Affe das Werkzeug nur passiv in der Hand hält, ohne seine Greifaktivitäten mit Hilfe des Werkzeuges auszuweiten. Für die Prothetik zeigt dieses Beispiel zweierlei: erstens können künstliche Objekte in das Körperschema integriert werden und zweitens sind amodale Objektrepräsentationen wie das Körperschema flexibel und können veränderte und somit vermutlich auch neue Sinneseingänge berücksichtigen.

³² K.C. Armel, V.S. Ramachandran, "Projecting sensation to external objects: evidence from skin conductance response", in: *Proceedings of the Royal Society (London), B* 270/2003, S. 1499-1506.

³³ A. Maravita, A. Iriki, "Tools for the body (schema)", in: *Trends in Cognitive Sciences*, 8/2004, S. 79-86.

3.3. Wiedererwerb der Sehkraft

Der vielleicht größte denkbare Eingriff in den Wahrnehmungsapparat besteht darin, eine ganze Sinnesmodalität zu den vorhandenen hinzuzufügen. Hierbei ist weniger an exotische Sinne gedacht, die uns Zugang zu Magnetfeldern oder Polarisationsmustern des Lichtes geben könnten, sondern an den Wiedererwerb z.B. der Sehkraft nach erworbener oder angeborener Blindheit. Philosophisch ist die Frage schon im 17. Jahrhundert von William Molyneux (1656-1698) in einem Brief an John Locke formuliert worden:

„Suppose a man born blind, and now adult, and taught by his touch to distinguish between a cube and a sphere of the same metal, and nighly of the same bigness, so as to tell, when he felt one and the other, which is the cube, which the sphere. Suppose then the cube and the sphere placed on a table, and the blind man be made to see: quaere, whether by his sight, before he touched them, he could now distinguish and tell which it the globe, which the cube.“³⁴

Die Molyneuxsche Frage hat eine bedeutende Rolle in der Philosophie des Empirismus gespielt, auf die hier aber nicht weiter eingegangen werden soll.³⁵ Es gibt aber eine ganze Reihe von Fällen, in denen Patienten mit angeborener Blindheit die Sehkraft in ihrem späteren Leben tatsächlich wieder erlangt haben, z.B. durch eine Katarakt-Operation. Ein solcher Fall ist der von Oliver Sacks³⁶ beschriebene Patient Vergil, der im Alter von 50 Jahren operiert wurde und von Anfang an nicht nur augenärztlich sondern auch psychologisch betreut wurde. Vergil hat erhebliche Schwierigkeiten, die Lichtreize, die nach der Operation auf ihn einstürzen, zu ordnen und in einen Zusammenhang mit seinem bisher vor allem auf taktiler und akustischer Wahrnehmung beruhenden Weltverständnis zu bringen. So legt er sich z.B. eine Sammlung von Modellobjekten an, die er gleichzeitig betasten und anschauen kann, um so den Zusammenhang zu erlernen. Schwierigkeiten machen z.B. die Wahrnehmung von Hindernissen, auf die er bisher erst reagierte, wenn er sie (mit dem Blindenstock) ertastete, die jetzt aber schon sichtbar sind, lange bevor sie verhaltensrelevant werden. Ein ähnliches Problem ist die andauernde Gegenwart von Sprechern, auch wenn sie gerade nichts sagen. Bewegungen in der Realität oder in Fernsehbildern werden nicht verstanden und führen vielmehr zu großer Verwirrung. Selbst Buchstaben, die Vergil als Tastobjekte kennt und lesen kann, werden visuell nicht erkannt. Schließlich beginnt Vergil, sein Auge wieder zu schließen, wenn er eine schwierige Aufgabe ausführen muss. Das Fazit, das Sacks aus diesem Fall zieht, ist ernüchternd: Vergil hat das Sehen nicht erlernt, auch nicht in Spezialanwendungen wie lesen oder Ähnliches. Die Fülle uninterpretierbarer Reize erzeugt auf der anderen Seite psychologische Probleme bis hin zur Depression. Demgegenüber gibt es aber auch ermutigendere Beispiele wie den von Fine et al.³⁷ beschriebenen Patienten MM, der nach einer Hornhauttransplantation seine Sehkraft wieder erlangt. In diesem Fall war der Verlust der Sehkraft allerdings erst im Alter von dreieinhalb Jahren durch einen Unfall eingetreten.

³⁴ Zitiert nach S. Gallagher, *How the body shapes the mind*, Oxford, New York 2005, S. 153.

³⁵ Für Übersichten vgl.: S. Gallagher, *How the body shapes the mind*, Oxford, New York 2005, S. 153ff; R. Gregory, "Seeing after blindness", in: *Nature Neuroscience*, 6/2003, S. 909-910.

³⁶ O. Sacks, *An Anthropologist on Mars*, New York 1995.

³⁷ I. Fine, A.R. Wade, A.A. Brewer, M.G. May, D.F. Goodman, G.M. Boynton, B.A. Wandell, D.I.A. MacLeod, "Long-term deprivation affects visual perception and cortex", in: *Nature Neuroscience*, 6/2003, S. 915-916.

4. Neuroprothesen und der konstruktivistische Ansatz der Wahrnehmung

Wahrnehmung ist nach David Marr³⁸ der Aufbau einer Repräsentation der Umwelt durch Interpretation der Sinnesdaten, d.h. durch Informationsverarbeitung. Dieser konstruktivistische Ansatz geht auf ältere Traditionen wie das durch von Uexküll³⁹ und Gibson⁴⁰ entwickelte Konzept des Regelkreises aus Wahrnehmung und Verhalten und das Konzept des „unbewussten Schließens“ und die Urteilstheorie der Wahrnehmung bei von Helmholtz⁴¹ zurück. Mit der Unterscheidung zwischen repräsentierter Information und ihrer neuronalen Implementierung ist der Ansatz von David Marr funktionalistisch, zumindest in einem heuristischen Sinn: Die Informationsverarbeitung im Gehirn unterscheidet sich unter dem Gesichtspunkt der Berechenbarkeit („computational theory“) nicht von entsprechenden Berechnungen, die ein Roboter durchführen muss, um die gleiche Information zu erhalten.⁴² Diese Berechnung zielt darauf, die optische Abbildung, die von der Außenwelt zum Bild führt, zu invertieren, wobei wegen der Unterbestimmtheit des Problems allgemeine Vorannahmen der Art „die visuelle Welt besteht aus diskreten Objekten“ oder Ähnliches erforderlich sind. Die Betonung der „Leiblichkeit“ (embodiment) der Kognition ändert daran nur insofern etwas, als sie die Rolle der verfügbaren Sinnesorgane beim Aufbau der Repräsentation und die aufgabenabhängige Auswahl der zu repräsentierenden Daten betont. Ziel ist jetzt nicht mehr die vollständige Erhebung aller Umweltdaten, sondern nur noch die Erhebung der für erfolgreiches Verhalten mindestens erforderlichen Informationen. Diese Informationen werden anhand von sensorischen Daten unter Berücksichtigung der bekannten Eigenschaften der Sinnesorgane, und unter Hinzunahme der erwähnten allgemeinen Vorannahmen berechnet.

In diesem Konzept entsteht durch Implantate, solange die von ihnen gelieferte Information für das Gehirn interpretierbar ist, keine grundsätzlich neue Situation. Sie sollten also die Kognition nicht mehr oder in anderer Weise beeinflussen als ein gewöhnliches Hörgerät oder eine Brille. Voraussetzung ist allerdings, dass die für die Konstruktion der Umweltrepräsentation erforderliche Information tatsächlich geliefert wird und dass dies in einer Kodierung geschieht, die vom Gehirn zumindest nach Rehabilitation erkannt werden kann. Welche Informationen und Kodierungen im Einzelnen erforderlich sind, ist ein Forschungsgegenstand der Kognitionswissenschaft.

³⁸ E. Marr, *Vision. A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*, New York 1982.

³⁹ J. von Uexküll, G. Kriszat, *Streifzüge durch die Umwelten von Tieren und Menschen. Ein Bilderbuch unsichtbarer Welten*, Berlin 1934.

⁴⁰ J.J. Gibson, *The perception of the Visual World*, Cambridge MA 1950.

⁴¹ H. von Helmholtz, *Handbuch der physiologischen Optik*, Leipzig 1867, S. 449.

⁴² Vgl. H.A. Mallot, *Computational Vision. Information Processing in Perception and Visual Behavior*, Cambridge MA 2000.