

Bindungsprozesse im Gehirn (Temporal Binding)

- besteht ein Zusammenhang mit dem Bewußtsein?

von Werner Held (1998)

Wie schafft es das Gehirn, aus einzelnen Nervenimpulsen ganzheitliche szenische Wahrnehmungen und Vorstellungen zu erzeugen? Dieser Vorgang, Binding genannt, gehört zu den ganz großen aktuellen Problemen der Gehirnforschung. Der Direktor des Max-Planck-Instituts für Hirnforschung, Wolf Singer, hat ein hochkarätiges Team von Mitarbeitern in Frankfurt um sich geschart, unter ihnen Andreas Engel und Pascal Fries. Dort widmet man sich innerhalb des Hauptuntersuchungsbereichs der visuellen Wahrnehmung seit langem der Erforschung der Bindungsmechanismen. Binding bedeutet Integration von einzelnen Nervenimpulsen zu kohärenten Ganzheiten. Binding ist bislang der Überbegriff für die Bündelung der Sinnesdaten aus den einzelnen rezeptiven Feldern, aber auch für die Integration verschiedener Sinnesmodalitäten zu einheitlichen Wahrnehmungseindrücken. Um die Funktion des Bindings innerhalb der visuellen Wahrnehmung verstehen zu können, muß man sich die Hauptaufgaben des Sehsystems verdeutlichen.

Prinzipien der visuellen Wahrnehmung: Merkmalanalyse und Segmentierung

Es gibt eine Vielzahl von Merkmalen, die für die visuelle Wahrnehmung von Bedeutung sind (Farbe, Form, Oberflächenstruktur, Entfernung, räumliche Orientierung und Bewegungsrichtung). Für diese Einzelmerkmale gibt es jeweilige rezeptive Felder. So hat man beim Affen 30, bei der Katze 20 verschiedene rezeptive Felder für den Sehsinn gefunden. Ein entscheidender Schritt für das Erkennen ist die Festlegung, welche Merkmale zu einem Objekt, zu einer Figur gehören. Die erfaßten Merkmale müssen dann zu einem Objekt gebunden werden, weil ungebundene Merkmale nicht in das Arbeitsgedächtnis eingehen können. Dieser Prozeß der Segmentierung in zusammengehörige Objektbereiche ist die Voraussetzung für eine Figur-Hintergrund-Unterscheidung (ein Beispiel ist das bekannte Bild des am Boden schnüffelnden Dalmatiners von gleichfarbigem Hintergrund). Die 7 Kriterien, nach denen solch eine Gestaltbildung im Gehirn erfolgt, wurden bereits in den 20er und 30er Jahren von der Gestaltpsychologie (vor allem von Köhler) entdeckt: *Kontinuität, Nähe, Ähnlichkeit, "Gemeinsames Schicksal", Geschlossenheit, "Gute Fortsetzung" und Symmetrie*. Allerdings hängt die Segmentierung auch von der Aufmerksamkeit des Beobachters und dessen Vorwissen über die Situation ab. Das Team um Singer und Engel versucht nun die physiologischen Korrelate der Gestaltbildung zu finden. Das erwies sich lange Zeit als schwierig, da die frühere Hypothese der Bindungsneuronen (Merkmale konvergieren auf ein einzelnes Neuron) nur auf eine Repräsentation elementarer Merkmale beschränkt blieb. Man fand zwar im Sehkortex einzelne Neurone für Hell/Dunkel-Unterschiede, Farbe, Bewegungsrichtung, relativen Abstand von Objekten aber kein "Großmutterneuron", ein Bindungsneuron für komplexe Objekte wie eine ganze Großmutter. In neuerer Zeit wendeten die bemerkenswerten Einzelzelleableitungen von Logothetis dann aber ein Stück das Blatt, er fand heraus, daß einzelne Neurone durchaus eine Spezifik aufweisen können, daß sie auf ein bestimmtes Portrait feuern. Nichts destotrotz wäre die Ausschließlichkeit eines solchen Mechanismus sehr unökonomisch. Man muß nur bedenken, wie viele verschiedene Objekte, dann je ein

Bindungsneuron benötigen würden. Es war offensichtlich, daß man für komplexe Merkmale einen zweiten Mechanismus finden muß.

Die Hypothese des Temporal Bindung

Die Idee, wie dieser Mechanismus funktionieren könnte, stammt von Milner (1974) und vom Neuroinformatiker Christoph von der Malsburg (1981): Neuronen können durch eine Synchronisation ihrer Impulse zu zeitlich kodierten Assemblies (nach Hebb 1949) zusammengeschlossen werden. Diese stellen dann ein Objekt dar. Die zeitliche Korrelation sollte die Genauigkeit von wenigen Tausendstel Sekunden aufweisen. Ein zusammengehöriges Objekt sollte sich durch einen exakt gleichen Takt der Neurone nachweisen lassen. Umgekehrt sollten dann Neurone, die nicht im selben Takt feuern, unterschiedliche Objekte bilden und damit die Segmentierung und Figur-Hintergrund-Unterscheidung ermöglichen. Die Hypothese bewahrheitete sich: diese zeitlichen Synchronisationen konnten von Singer gefunden werden und zwar nicht nur zwischen rezeptiven Feldern desselben Areal, sondern auch zwischen V1 und V2 (V1 bis V5 sind Zentren für die visuelle Wahrnehmung am hintersten Ort des Gehirn, der okzipitalen Sehrinde = Visueller Kortex) und zwischen der linken und rechten Hemisphäre im Bereich des Sehkortex. Inzwischen sind solche Korrelationen in und zwischen vielen kortikalen und subkortikalen Arealen bestätigt worden. Weiterhin zeigte es sich, daß diese zeitlichen Korrelationen durch veränderte Reize beeinflussbar sind und daß die Synchronisationen nur dann in starker Form auftreten, wenn die Neuronen auf das selbe Objekt antworten. Bei verschiedenen Objekten wird die zeitliche Koppelung schwächer oder verschwindet ganz.

Indizien für die funktionelle Relevanz dieser Synchronisationen

Der Nachweis einer funktionellen Relevanz der Synchronisationen für kognitive Leistungen gilt im allgemeinen als erbracht, wenn die Synchronisation beginnen, wenn die kognitive Leistung anfängt und die Synchronisation aufhören, wenn die kognitive Leistung beendet ist. Um dies zu testen operierten Singer und Engel ein Auge von Katzen so, daß es schief stand. Bei dieser sogenannten Schielamblyopie ergibt sich am schiefgestellten Auge eine herabgesetzte Sehschärfe, räumliche Verzerrungen und charakteristische Störungen der Mustererkennungen (besonders bei Details). Daher ist eine gestörte Gestaltbildung und ein gestörtes Binding die Folge. So wird nur das gesunde Auge zum aktiven Fixieren benutzt. Erstaunlicherweise zeigten einzelne Neuronen im Sehkortex keine veränderte Antwortrate. Es zeigt jedoch, daß die Zellen, die vom gesunden Auge innerviert werden, Synchronisationen zeigen; die Zellen, die Eingang vom operierten Auge erhalten, hingegen kaum Synchronisationen aufweisen. Das Faktum, daß keine anderen Abnormalitäten festgestellt wurden, stützt die These, daß Synchronisationen funktionell bedeutsam sind. Weitere Untersuchungen zeigten die Bedeutung von Synchronisationen bei der Integration von sensorischen mit motorischen Aktivitäten. Fries et al. (1997) wiesen nach, daß Katzen, die darauf trainiert waren, visuell getriggerte motorische Antworten zu geben, Synchronisationen zwischen visuellen, assoziativen, somatosensorischen und motorischen Arealen zeigten. Diese Korrelationen im Beta- (14 - 30 Hz) und Gamma-Bereich (30 - 80 Hz) tauchten dann auf, wenn die Tiere ihre Aufmerksamkeit auf den Stimulus fokussierten und hielten an, bis die Aufgabe beendet war. Das Synchronisationsmaß erhöhte sich auch mit der

Aufgabenschwierigkeit. Saue lieferte eine Aufstellung der zahlreichen Experimente in den letzten Jahren, die viele Indizien für die funktionelle Relevanz ergaben. Allerdings hielt er sich aufgrund der nur rudimentären kognitiven Aufgaben mit Aussagen über Bestätigungen der funktionellen Rolle zurück.

Zusammenhang zwischen Temporal Binding und Aufmerksamkeitsbewußtsein

Singers und Engels jüngste Untersuchungsreihen beschäftigen sich mit dem vermuteten Zusammenhang zwischen Binding und Bewußtsein, genauer dem Aufmerksamkeitsbewußtsein. Sollten die Synchronisationen auch beim Aufbau der phänomenalen Zustände und bei der Selektion visueller Information beim Zugang zur Aufmerksamkeit sein? Dazu benutzten sie ebenfalls bei schielenden Katzen den Mechanismus des binokulären Wettstreits (binocular rivalry). Wenn beiden Augen (durch einen Spiegel getrennt) unterschiedliche Bilder (hier: in verschiedenen Richtungen laufende Streifenmuster) angeboten werden, die sich nicht zu einem einheitlichen Perzept zusammenfügen lassen, wechselt durch einen zentral gesteuerten Mechanismus (gleichermaßen auch bei normalsichtigen Menschen und Tieren nachweisbar) durchschnittlich alle drei Sekunden die Wahrnehmung von einer Augenseite zur anderen. Und zwar ohne daß sich der Stimulus verändert. Nur jeweils ein Auge kann aktiv fokussieren. Die jeweilige Dominanz eines Auges wurde aus der Richtung der jeweiligen Augenbewegungen abgeleitet. Unter Ausnutzung dieses Phänomens läßt sich nun untersuchen, wie sich neuronale Antworten auf Muster, die wahrgenommen werden, unterscheiden von Antworten auf Muster, die nicht zur Wahrnehmung kommen. Als Vergleich diente die Darbietung der laufenden Streifen auf einem Auge. Zwischen dieser monokularen und der binokularen Stimulation zeigte sich sowohl bei denen vom dominanten als auch vom unterdrückten Auge angetriebenen visuellen corticalen Neuronen weder in der Stärke noch in der Frequenz der Antworten ein Unterschied. Unter den Bedingungen der binokulären Rivalität ergab sich aber gegenüber der monokulären Vergleichsgröße ein deutlicher Unterschied hinsichtlich des Synchronisationsverhaltens. Neurone, die den dominanten Stimulus repräsentieren, verstärken ihre Synchronisation, wohingegen die Zellen, die die Impulse aus dem unterliegenden Auge prozessieren, ihre zeitliche Korrelation herabsetzen. Bei der Entladungsrate der Neuronen, die auf sowohl das dominante wie auch das unterdrückte Auge antworten, ergeben sich jedoch unter den Rivalitätsbedingungen keine Veränderungen!

Folgerung

Bei schielenden wachen Katzen ist auf den frühen Verarbeitungsstufen dynamische Selektion und Unterdrückung von Nervenimpulsen eher mit Veränderungen im Synchronisationsverhalten als in der Entladungsrate verknüpft. Die binokuläre Rivalität könnte auch illustrieren, wie die Abhängigkeit der Synchronisationen von der Modulation der Feuerungsrate abhängt: die Signale aus dem unterdrücktem Auge schaffen es nicht, die Fokussierungsbewegung des Auges auszulösen, weil nicht synchronisierte Neurone (für Objekterkennung) im Sehcorpus nicht die Möglichkeit besitzen, Impulse zu den Neuronen für die Bewegung der Augen zu prozessieren. Daher könnten Änderungen im Synchronisationsverhalten auf die Feuerungsrate in nachfolgenden Verarbeitungsschritten

einwirken.

Antwortraten versus Synchronisationen

Hier sind wir nun bei einer der großen aktuellen Fragen angekommen, welcher Mechanismus der entscheidende ist: Antwortrate der Neuronen (gemeint ist die Frequenz der Entladungen = Häufigkeit der Schwingungen und die Amplitude = Höhe des Ausschlags) oder die Synchronisation dieser Entladungen. Singer stellt nun diese zwei Möglichkeiten zur Identifikation von neuronalen Assemblies gegenüber. Frühere Binding-Hypothesen gingen vor allem in die Richtung, daß eine gemeinsame Verstärkung der Antwortamplitude die Unterscheidungen zwischen den Assemblies ermöglicht. Dieser Mechanismus hat aber den Nachteil darin, daß er nicht alle Unzweideutigkeiten ausschließen kann und das Verarbeitungstempo reduziert. Die Verarbeitungsgeschwindigkeit ist durch die Geschwindigkeit begrenzt, mit der sich Assemblies formieren und sich wieder auflösen können, denn verschiedene durch die Antwortrate kodierte Assemblies können sich zeitlich nicht überlappen. Würden sie es doch tun, wären sie ununterscheidbar. Der Grund dafür ist, daß mehrere Assemblies das gleiche Neuron benutzen. Weil aber Assemblies, die durch ihre Feuerungsrate kodiert sind, einige Zeit brauchen, um unterscheidbar zu sein (sie müssen erst die synaptischen Potentiale integrieren) vermutet Singer, daß ein Wechsel der Assemblies im Cortex mindestens 100 ms benötigt. Tatsächlich schätzt man aber, daß Analyse von Wellenmustern, also Verarbeitungen im Bereich von etwa zehn Millisekunden vollbracht werden können. Das scheint mit einer Erhöhung der Feuerungsrate nicht möglich, daher muß es einen schnelleren Mechanismus geben. Durch eine zeitliche Synchronisation wäre dies gegeben, denn im Prinzip kann sich bei jedem Spike das Assembly ändern. Bei 40 Hz wäre dies also bis zu 40 mal pro Sekunde. Auch die Unzweideutigkeit der stimulusbezogenen Ratenfluktuationen wäre damit vermieden. Die Nervenzelle muß hierzu nicht nur auf traditionelle Weise (über den Weg von Dendriten zum Zellkörper und weiter zum Axon) Aktionspotentiale prozessieren, sondern sie muß auch als Koinzidenzdetektor dienen. Diese Funktion wird vermutlich in den NMDA-Rezeptoren der postsynaptischen Membran bewirkt (Flohr, Volgushev). Softky (1994) wies eine Koinzidenzdetektion in den Dendriten der Nervenzellen im Submillisekundenbereich nach.

Die Grundannahme Singers und Engels dabei ist, daß Synchronisation eine zusätzliche Codierdimension derselben Nervenaktivität darstellt, die die konventionelle Codierung durch Antwortraten komplementär ergänzt.

Diese komplementären Vorgänge beschreibt er im Sehkortex wie folgt. Die vom Sehsystem durchgeführte Analyse von Objektmerkmalen beruht darauf, daß Neuronen in verschiedenen kortikalen Arealen in spezifischer Weise ihren Aktivitätszustand verändern und dadurch das jeweilige Merkmal repräsentieren. Hierbei spielt die durchschnittliche Frequenz der Aktionspotentiale eine entscheidende Rolle: je mehr das detektierte Objektmerkmal den Präferenzen des Neurons entspricht, desto höher ist die Zahl der Entladungen pro Zeiteinheit. Die Bindung der Merkmale zu perzeptiven Gestalten wird demgegenüber wahrscheinlich durch die komplementäre Eigenschaft neuronaler Aktivitätsmuster der synchronisierten Feuerung zum Ausdruck gebracht. So erscheint es also mal wieder unsinnig, mit einer Entweder-Oder-Fragestellung zu operieren, wenn sich beide

Mechanismen ergänzen (falls man bei den Synchronisationen überhaupt von einem Mechanismus sprechen kann)

Kontroverse Punkte

Auf der ASSC-Website (Association for the Scientific Studies of Consciousness) findet sich ein sehr aufschlußreiches elektronisches Seminar (<http://www.phil.vt.edu/assc/esem3.htm>), in dem ein zusammenfassender Text von Singer und Engel von anderen Forschern dieses Bereichs diskutiert wird. Es lassen sich vor allem drei besonders kontroverse Punkte herausfiltern.

1. Verallgemeinerbarkeit

Obwohl die Ergebnisse aus der sehr frühen Verarbeitungsstufe der Area 17 (primärer Sehkortex) und 18 (sekundärer Kortex) stammen, vermuten Singer und sein Team, daß diese Mechanismen auch auf spätere Verarbeitungsstufen höherer Ordnung anwendbar sein könnten. Dem stehen aber die Ergebnisse der Logothetis-Gruppe (1996) gegenüber, die bei späteren Verarbeitungsstufen am inferotemporalen Cortex (unterer Schläfenlappen) beim Affen eine hohe Korrelation (78 %) der Antwortrate mit der vom Affen berichteten Wahrnehmung festgestellt haben. Singers Gruppe konnte bei ihrem Experiment nur bei 26 % der vom dominanten Auge innervierten Neuronen eine starke Synchronisation nachweisen. Welche der beiden Mechanismen ist nun näher am visuellen Bewußtsein? Grace mutmaßt, daß der schnelle Mechanismus der Synchronisation evtl. nur bei überlebenswichtigen Prozessen wie der Merkmalsanalyse in den primären Sinnesarealen benötigt werden würde. Als Indiz für unterschiedliche Prozesse für frühe und späte Verarbeitungsstufen könnte auch die von Logothetis entdeckte Tendenz gewertet werden, daß je weiter man sich vom temporalen Kortex auf den okzipitalen Kortex zubewegte, die Korrelation des Verhaltens mit der Antwortrate abnahm, also man sich in das Terrain der Dominanz des Synchronisationsmechanismus bewegen könnte. Revonsuo kam bei seinen Experimenten zu dem Ergebnis, daß zwar eine 40 Hz - Synchronisation bei der Gestaltbildung nachweisbar ist, wenn der Stimulus aber dann eine Weile kontinuierlich angeblickt wird, die Synchronisationen keine Rolle mehr zu spielen scheinen. Sein Schluß ist, daß die Synchronisation bei der Konstruktion eines Perzepts eine Rolle spielen, aber nicht den Inhalt per se darstellen.

Daher ist es fraglich, ob sich nicht unterschiedliche Binding-Mechanismen finden lassen werden und dann der Begriff des Binding unterteilt werden muß zwischen frühen Verarbeitungsschritten auf der Ebene der rezeptiven Felder und späteren intermodalen Integrationen, die eine Lernabhängigkeit aufweisen.

2. Funktionelle Relevanz und Bedeutung der Synchronisationen

Damit Synchronisation überhaupt etwas auslösen können, müssen sie, so Koch, zuerst einmal eine Wirkung auf das postsynaptische Neuron ausüben, das dann wohl eine höhere Feuerungsrate aufweisen dürfte, als es mit einem nichtsynchronisierten Input der Fall wäre.

Grace mutmaßt gar, daß Synchronisationen keinen spezifischen Bindungsmechanismus darstellen, sondern eine unspezifische Erhöhung der Wahrscheinlichkeit einer Feuerung erreichen, also sozusagen als Informationspforte dienen. Koch bemerkt, daß es weiterhin unklar sei, ob die Synchronisationen mit den Inhalten der visuellen Aufmerksamkeit oder mit der einer phänomenalen Organisationsebene korreliert sind. Revonsuo nimmt an, daß die Synchronisationen eine höhere Organisationsebene als das Einzelzellniveau darstellt, sowie letzteres ein höheres Niveau als die Quantenphänomene in den Mikrotubuli. Wenn man das Verhältnis Synchronisation/Rate analog der Konzeptionen der Quantenphysik interpretiert, könnte man die Synchronisationen Zustände verschränkter Superpositionen nennen (in denen allen miteinander verschränkten Bereiche miteinander "kommunizieren"), die einen Wahrscheinlichkeitshorizont für das Auftreten eines Ereignisses aufspannen. Das Feuern der Zelle käme dann der Reduktion dieser Wellenfunktion gleich, dem akausalen Entstehen einer aktuellen Information (Feuern oder Nicht-Feuern der Zelle). Wenn diese Interpretation auch etwas weithergeholt erscheint, ist eine Ähnlichkeit zur Quantenphysik gegeben in Punkto des Komplementärverhältnisses zwischen Globalität und Einzelereignis. Damit würde Singers Term der Codierungsdimension für die Synchronisationen irreführend sein, da dort noch keine Information entstanden ist.

3. Bewußtsein

Da die meisten Bindingprozesse nicht bewußt werden (Synchronisation finden sich beispielsweise auch bei narkotisierten Katzen), liegt es auf der Hand, daß man nach Kriterien suchen muß, nach denen man die Bindingprozesse, die bewußt werden, von den Bindingprozessen unterscheiden könnte, die kein Bewußtsein erreichen. Singer und Engel geben, außer der Hypothese, daß für die Frage der Wahrnehmbarkeit das Synchronisationsmaß eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung sei, keinerlei Ausblick auf solche Kriterien, also ergänzen Crick & Koch: neuronale Aktivität wird dann bewußt, wenn sie

- a, zu einer expliziten Repräsentation integriert wird
- b, direkten Zugang zu den planenden Stadien im Gehirn hat
- c, genügend lange aufrecht erhalten wird

Zusammenfassung

Trotz aller noch kontrovers diskutierter Punkte, kommt man an der Miteinbeziehung der Synchronisationen bei der Planung und Interpretation von Experimenten nicht mehr vorbei. Eine Vielzahl laufender und kommender Untersuchungen wird über die Klärung der Rolle des Temporal Bindings entscheiden. Die Frage muß als völlig unentschieden gelten, ob Temporal Bindung auch eine wichtige Funktion bei der Entstehung von höheren Verarbeitungsmechanismen wie dem Bewußtsein spielt. Singer mutmaßt, daß dem so sein könnte, mit Hinweis darauf, daß das Gehirn immer gleiche Verarbeitungsprinzipien auf unterschiedlichen Ebenen verwendet. Man kann sich in der Tat auch schlecht vorstellen, daß die zu Bewußtseinsvorgängen notwendigen Bindungsmechanismen keiner zeitlichen Codierung folgen sollten. Da die Synchronisationen sehr schnell und damit auch sehr flüchtig sind, sind sie schwerer greifbar und daher bisher auch noch weniger verstanden als der Mechanismus der Antwortraten. Die Frage, ob mit dem Mechanismus der räumlich verteilten

Synchronisationen ein Anknüpfungspunkt zu quantenphysikalischen Überlegungen gegeben ist, wird innerhalb der Gemeinde der Hirnforscher nahezu einhellig negativ beschieden. So betont auch Engel, daß für den Aufbau dieser Synchronisationen keinerlei quantenphysikalische Konzepte wie Nichtlokalität (eine instantane Verbundenheit räumlich getrennter Teilchen wie beim EPR-Paradoxon und beim Doppelspaltexperiment) notwendig sind, der Aufbau dieser Synchronisation läßt sich klassisch nachvollziehen. Dabei übersieht er allerdings, die klassische Physik (im Gegensatz zu Quantenmechanik) mit ihren einzigen Bestandteilen lokale Teilchen und lokal wirksame Felder kein Konzept für räumlich verteilte Ganzheiten besitzt. Ebenso bietet sie für den Gestaltsprung, einem akausalen Entscheidungsprozeß, kein Erklärungskonzept an (Stapp 1993). Es läßt sich also zusammenfassend sagen, daß sich durch das Konzept des Temporal Bindings der Spalt zwischen klassischen und quantenphysikalischen Ansätzen im Bereich der Hirntätigkeit und des Bewußtseins bislang nicht verkleinert hat.

Literatur

Engel, Andreas K. et al: *Temporal Binding, Binocular Rivalry, and Consciousness* , electronic seminar, abgelegt unter: <http://www.phil.vt.edu/assc/esem3.html>

Engel, Andreas K.: *Prinzipien der Wahrnehmung: Das visuelle System* in: Roth, Gerhard & Prinz, Wolfgang (Hrsg): *Kopfarbeit - Gehirnfunktionen und kognitive Leistungen*, Heidelberg 1996

Engel, Andreas K. & Singer, Wolf: *Neuronale Grundlagen der Gestaltwahrnehmung* in: *Spektrum der Wissenschaft*, Dossier: Kopf oder Computer, 1998

Singer, Wolf et al.: *Neuronal assemblies: necessity, signature and detectability* in: *Trends in Neuroscience* Vo. 1, No. 7, October 1997

Singer, Wolf: *Bewußtsein, etwas "Neues, bis dahin Unerhörtes"* in *Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften*, Bericht und Abhandlungen Band 4, Akademie Verlag, Berlin 1997

Softky, W.R.: *Sub-millisecond coincidence detection in active dendritic trees* in: *Neuroscience* 58, 13-41

Stapp, Henry: *Mind, Matter and Consciousness*, 1993

Tallon-Baudry et al.: *Stimulus Specificity of Phase-Locked and Non-Phase-Locked 40 Hz Visual Responses in Human* in: *The Journal of Neuroscience*, July 1, 1996, 16(13):4240-4249