

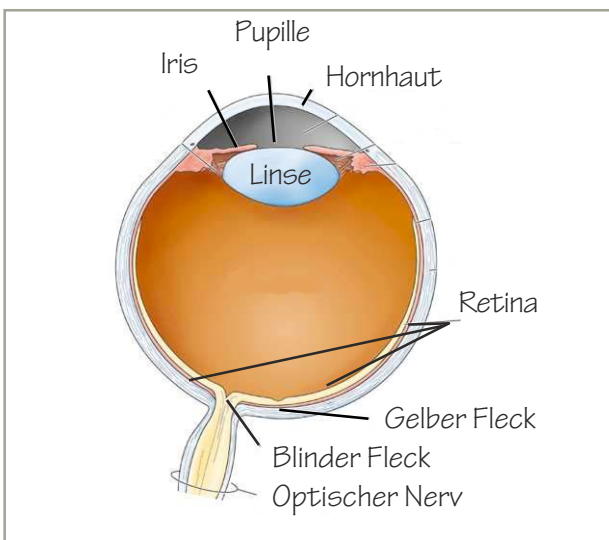
Sehen



Menschen sind auf ihr Sehvermögen angewiesen um in ihrer Umwelt zurechtzukommen. Den Blick stets nach vorn gerichtet, nutzen wir unser Sehvermögen, wie auch andere Primaten, um die vielen Seiten der Umwelt, die von uns entfernt sind, aufzufassen. Licht ist eine Form elektromagnetischer Strahlung, die in unseren Augen auf Photorezeptoren der Netzhaut wirkt. Dies löst die Erzeugung neuronaler Impulse aus, welche dann durch die Bahnen und Netzwerke der Sehrinden fließen. Verschiedene Bahnen zum Mittelhirn und der Großhirnrinde erledigen unterschiedliche visuelle Aufgaben - das Erkennen und Nachvollziehen von Bewegung, Form, Farbe und anderer Eigenschaften der sichtbaren Welt. Manche, aber nicht alle, dieser Eigenschaften, gelangen zum Bewusstsein. Im Cortex sind Neurone in diversen visuellen Gebieten spezialisiert verschiedene visuelle Entscheidungen zu treffen.

Das kann ins Auge gehen - Licht

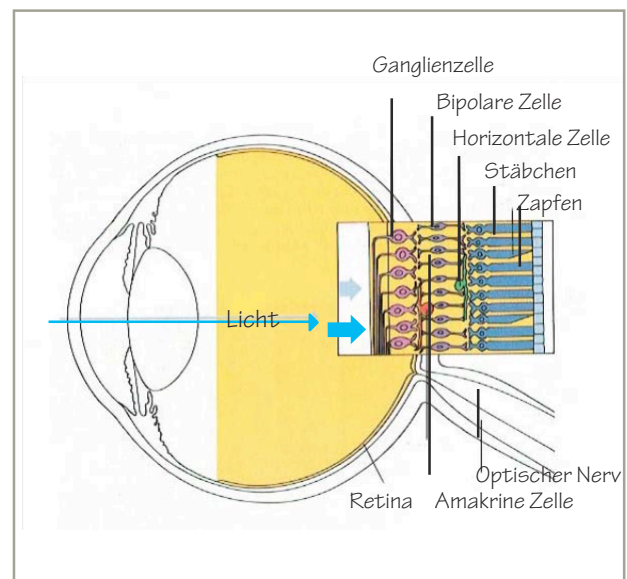
Licht gelangt durch die Pupille ins Auge, wird durch Hornhaut und Linse gebrochen und fokussiert, und landet auf der Netzhaut (auch Retina genannt) an der Augenhinterwand. Die Pupille ist von der pigmentierten Iris umgeben, die sich entsprechend der Lichtstärke erweitern oder verengen kann. Es ist verlockend das Auge mit einem Fotoapparat zu vergleichen, der ein „Bild“ von der Welt macht, aber dies ist aus einigen Gründen eine irreführende Metapher. Erstens, wird nie ein statisches Bild gemacht, da die Augen dauernd in Bewegung sind.



Das menschliche Auge. Einkommendes Licht wird von der Linse auf die Netzhaut fokussiert. Dort wandeln Rezeptoren die Lichtenergie in Aktionspotentiale um, die durch den optischen Nerv wandern.

Zweitens, auch wenn die Netzhaut ein Bild an das Gehirn weitergeben würde, es zu „sehen“ würde eine weitere Person verlangen - eine Person im Gehirn! Um diesen Widerspruch zu umgehen, müssen wir uns dem eigentlichen großen Problem des Sehens stellen - wie nutzt das Gehirn die Information von den Augen, um die sichtbare Welt zu erfassen und Entscheidungen in ihr treffen zu können?

Sobald das fokussierte Licht auf die Netzhaut trifft, reagieren die 125 Millionen Photorezeptoren, indem sie elektrische Impulse erzeugen. Diese Signale werden über Synapsen geleitet um letztendlich retinale Ganglienzellen zu erregen, dessen Axone sich sammeln und zusammen den optischen Nerv bilden. Dieser geht ins Gehirn und leitet dort Aktionspotentiale zu den unterschiedlich spezialisierten Seharealen.




Die Retina. Das Licht geht zuerst durch die Fasern des optischen Nerves und durch ein Geflecht an Zellen bis es die Stäbchen und Zapfen an der Hinterwand erreicht.

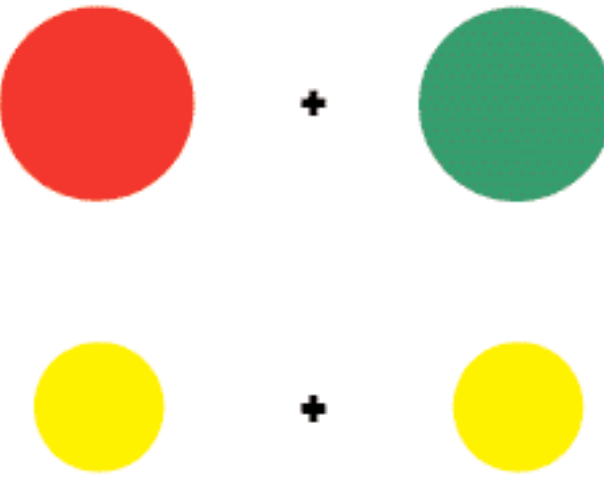
Man weiß schon viel über diese früheste Etappe der visuellen Verarbeitung. Unter den Photorezeptoren sind die sogenannten Stäbchen deutlich in der Mehrzahl; sie sind auch 1000 Mal empfindlicher auf Licht als die andere Art, die Zapfen. Grob gesagt, siehst du in der Nacht mit den Stäbchen und am Tag mit den Zapfen. Es gibt drei Arten von Zapfen, die jeweils auf Licht unterschiedlicher Wellenlänge reagieren. Es wäre eine zu grobe Vereinfachung zu sagen, dass Zapfen das Farbsehen ausmachen, aber sie sind dafür unentbehrlich. Wenn sie zu lange einer bestimmten Farbe ausgesetzt sind, adaptieren die Pigmente in den Zapfen und tragen für eine gewisse Weile weniger zur Farbwahrnehmung bei (siehe Experiment Kasten).

In den letzten 25 Jahren wurden wichtige Entdeckungen gemacht: über die Phototransduktion (die Umwandlung von Licht in elektrische Signale in den Stäbchen und Zapfen), über die genetische Ursache von Farbenblindheit, der ein Fehlen bestimmter visueller Pigmente zugrunde liegt, über die Funktion der Netzwerke der Netzhaut und über die Existenz zweier unterschiedlicher Arten von Ganglienzellen. Etwa 90% dieser Zellen sind sehr klein, während andere 5% große M-Typ, oder **magnocelluläre**, Zellen sind. Wir werden später sehen, dass Abnormalitäten in den M-Typ Zellen für bestimmte Formen der Dyslexie verantwortlich sind (Kapitel 9).

Ein Experiment zur Farb-Adaptation

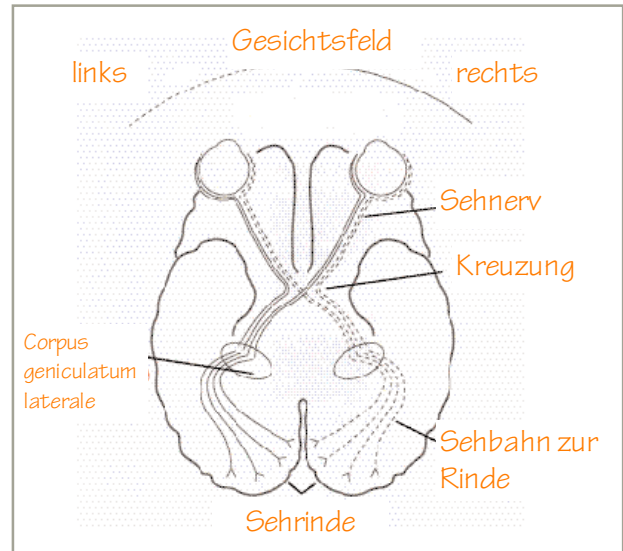


Konzentrier dich etwa 30 Sekunden lang auf das obere Kreuz (+) zwischen den großen Kreisen. Jetzt schau auf das untere Kreuz. Die zwei gelben Kreise scheinen ihre Farbe gewechselt zu haben. Kannst du dir das erklären?



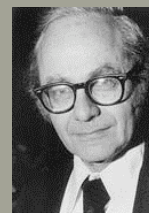
Der nächste Schritt

Von jedem Auge aus geht ein **optischer Nerv** ins Gehirn. Die Fasern beider Nerven treffen sich in einer Struktur, der Sehnervkreuzung (Chiasma opticum). Die Hälfte der Fasern kreuzen zur anderen Seite, wo sie sich mit der „ungekreuzten“ Hälfte des anderen Nerven vereinigen. Zusammen bilden diese Faserverbände den **Tractus opticus**, der nun Fasern von beiden Augen zur Hirnrinde leitet (über eine synaptische Verschaltung in der Struktur Corpus geniculatum laterale). In der Rinde wird die innere „Abbildung“ des visuellen Raumes erstellt. Ähnlich wie beim Tastsinn (Kapitel 5), wird die rechte Seite der visuellen Welt in der linken Hemisphäre dargestellt und andersrum. Die neuronale Abbildung nutzt folglich Informationen von beiden Augen und somit reagieren Neurone in den visuellen Arealen im hinteren Teil des Großhirns (genannt Areal V1, V2, usw.) auf Bildreize in beiden Augen. Dies nennt man **Binokularsehen**.

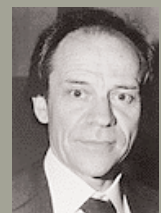


Der Weg vom Auge zum Gehirn.

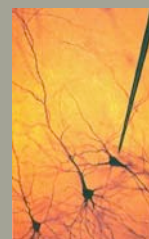
Die Sehrinde besteht aus mehreren Arealen die sich mit den unterschiedlichen Aspekten des Sehens beschäftigen, wie Form, Farbe, Bewegung, Entfernung, usw. Die Zellen dort sind in Säulen angeordnet. Eine wichtige Eigenschaft von Zellen, die auf visuelle Reize reagieren, ist das **rezeptive Feld** - das Gebiet auf der Netzhaut, auf das die Zelle, bei entsprechendem Bildreiz, reagiert. In V1, den Ort der ersten Verarbeitung in der Rinde, reagieren die Zellen am stärksten auf Linien und Kanten in bestimmter Ausrichtung. Eine wichtige Entdeckung war, dass alle Nervenzellen in einer Säule auf Linien oder Kanten mit der gleichen **Ausrichtung** reagieren; die nächste Säule von Zellen auf eine etwas andere Ausrichtung und so über die ganze Fläche von V1. Das bedeutet das visuelle Zellen der Rinde eine eigene Ordnung zur Verarbeitung des Gesehenen haben; diese Ordnung ist jedoch nicht unveränderlich. Inwieweit das Verhalten einer einzelnen Zelle vom linken oder rechten Auge beeinflusst wird, kann sich durch Erfahrung ändern. Wie bei allen anderen sensorischen Systemen weist auch die Sehrinde **Plastizität** auf.



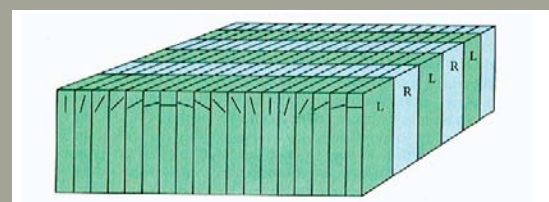
David Hubel



Torsten Wiesel



David Hubel und Torsten Wiesel (oben) haben elektrische Signale von Zellen der Sehrinde abgeleitet und erstaunliche Eigenschaften entdeckt. So zum Beispiel die Spezifität zur Ausrichtung, die Organisation in Kolonnen (unten) und die Plastizität des Systems. Für diese Entdeckungen bekamen sie dann auch den Nobelpreis.



An der Forschungsfront

Kannst du was sehen, wenn du blind bist? Sicherlich nicht. Aber die Entdeckung mehrerer Seh-Areale hat gezeigt das wir zum Teil "sehen" ohne es wahrzunehmen. Es gibt Leute mit erworbenem Schaden der primären Sehrinde (V1), die angeben, nichts zu sehen, die aber, es doch irgendwie schaffe recht präzise nach Gegenständen zu greifen, wenn man sie dazu auffordert

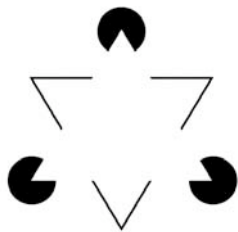
Dieses faszinierende Phänomen nennt man "blindsehen". Es wird wahrscheinlich ermöglicht durch paralele Bahnen zu anderen Seh-Arealen.

Aber Sachen unbewusst sehen ist ein tägliches Phänomen auch unter Normalsichtigen. Wenn du dich beim Autofahren mit dem Beifahrer unterhältst, schenkst du dem Gespräch auch deine bewusste Aufmerksamkeit, fährst aber weiterhin unfallfrei das Auto. Diese Fähigkeit beruht auch auf eine Art "blindsehen".

Die aufwendige Verschaltung der Sehrinde ist eins der größten Rätsel, das Wissenschaftler zu lösen versuchen. Verschiedene Arten von Neuronen sind über die sechs Schichten der Hirnrinde verteilt und in sehr genauen lokalen Schaltkreisen untereinander verbunden, die wir erst seit Kurzem zu verstehen anfangen. Einige der Verbindungen sind erregend, andere hemmend. Einige Neurowissenschaftler vermuten einen „typischen“ kortikalen Schaltkreis wie Chips im Computer. Andere sind damit nicht einverstanden. Man glaubt mittlerweile, dass die Schaltungen in den verschiedenen Sehrindengebieten sich sehr ähneln, es aber kleine Unterschiede gibt, die für die dafür verantwortlich sind, dass jeder Teil der Sehrinde verschiedene Aspekte der sichtbaren Umwelt bearbeitet. Auch durch die Untersuchung optischer Illusionen haben wir Einsichten gewonnen über die Verarbeitung der visuellen Information die auf den verschiedenen Ebenen stattfindet.



Die Fliesen dieses bekannten Cafes in Bristol (links) sind in Wirklichkeit rechteckig, obwohl sie diesen Anschein erwecken. Die Anordnung führt zur Illusion durch spezielles Aktivieren der verarbeitenden Netzwerke. Das Kanizsa Dreieck (rechts) gibt es eigentlich gar nicht – aber du siehst es trotzdem! Dein visuelles System "entscheidet" das ein weißes Dreieck dem Bild aufliegt!



Entscheidungen und Unentschlossenheit

Eine Schlüsselaufgabe der Großhirnrinde ist, sensorische Information von mehreren Quellen zu verarbeiten und darauf zu reagieren. **Entscheidungen treffen** ist ein unentbehrlicher Teil dieser Fähigkeit. Das ist der „kognitive“ Teil des Vorgangs, das auf Wissen beruhende Denken. Die zur Zeit verfügbare sensorische Information muss abgewogen und Entscheidungen getroffen werden (zum Beispiel etwas tun oder es zu lassen). Einige Entscheidungen sind schwierig zu treffen und benötigen langes Nachdenken, während andere leicht fallen und



Bloß schwarze und weiße Punkte? Auf den ersten Blick ist es schwer Ränder oder Flächen auf dem Bild auszumachen. Aber sobald du weißt, dass es ein Dalmatiner sein soll, "springt" der Hund raus. Das Gehirn nutzt die zusätzliche Information um das Bild zu sehen.

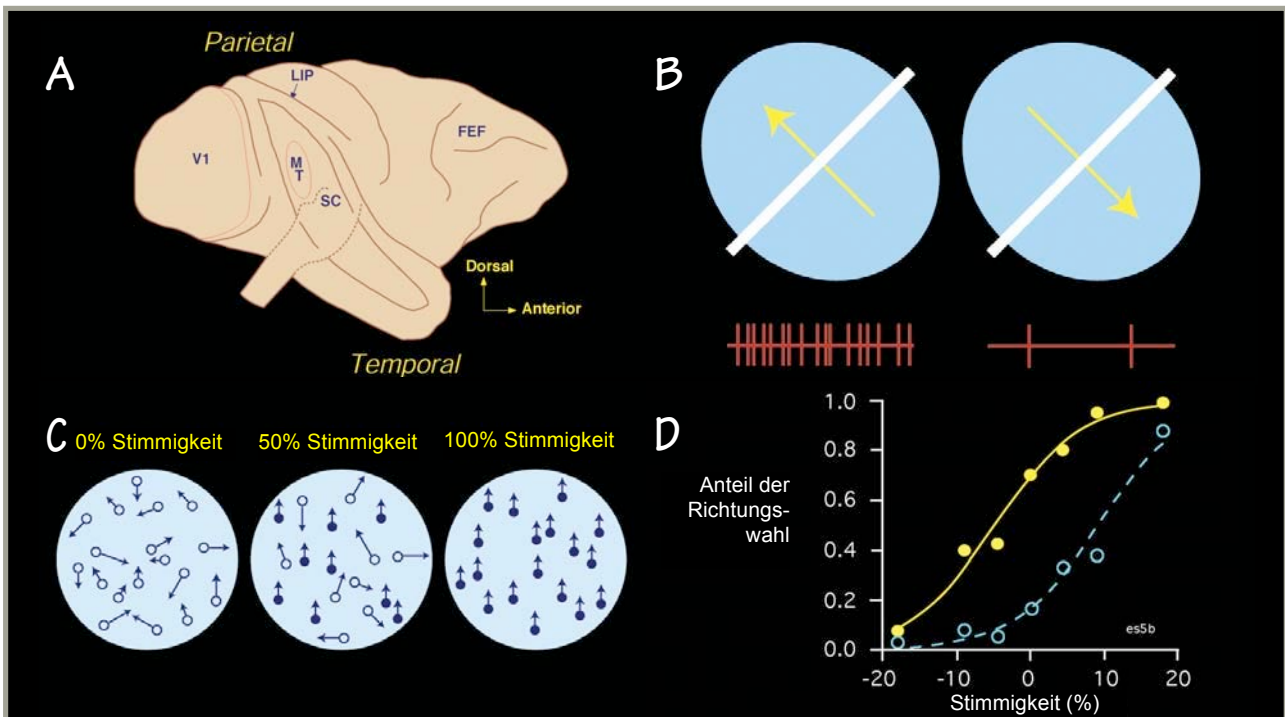
automatisch ablaufen. Sogar zur einfachsten Entscheidung gehört jedoch das Wechselspiel zwischen sensorischer Information und bestehendem Wissen.

Eine Möglichkeit die neuronale Grundlage des Entscheidens zu verstehen wäre, Jemandem im Alltag zu folgen und währenddessen die Aktivität der Neurone aufzuzeichnen. Stellen wir uns vor, wir könnten mit Millisekunden-Genauigkeit die Aktivität jedes einzelnen der 10^{11} Neuronen im Gehirn aufnehmen. Dann würden wir nicht nur vor sehr viel gesammelten Daten stehen, sondern auch vor der riesigen Aufgabe alles zu auswerten. Noch unvollstellbarer wäre es, alles zu deuten. Um das genauer zu verstehen, überleg dir kurz die vielen Gründe warum Leute etwas tun. Jemand, den wir zum Bahnhof gehen sehen, könnte vielleicht mit dem Zug fahren wollen, oder er muss Jemanden von dort abholen, oder er möchte sich einfach nur die Züge anschauen. Ohne die Absichten zu kennen, wird es sich als sehr schwierig erweisen die Zusammenhänge zwischen Aktivierungsmuster im Gehirn und Verhalten zu deuten.

Experimentelle Neurowissenschaftler führen deshalb Verhaltensexperimente unter **streng kontrollierten Versuchsbedingungen** durch. Dies kann man erreichen, indem man eine bestimmte Aufgabe stellt, die Probanden lange üben lässt, damit sie ihr Bestes geben können, und man dann die Leistung überwacht. Am besten ist es eine Aufgabe zu stellen, die kompliziert genug ist, um interessant zu sein, jedoch auch ausreichend einfach ist, damit man später analysieren kann, was passiert. Ein gutes Beispiel ist die Darbietung von Reizen - meistens nicht mehr als zwei - woraufhin der Proband eine visuelle Entscheidung treffen muss (z.B. welche Lichtquelle größer oder heller ist). Obwohl so eine Aufgabe einfach ist, bringt sie den vollständigen Ablauf einer Entscheidung mit sich. Sensorische Information wird aufgenommen und analysiert, es wird zwischen richtiger und falscher Antwort entschieden und je nach Ergebnis können Belohnungen folgen. Diese Art von Forschung ist eine Art „Physik des Sehens“.

Wahrnehmung von Bewegung und Farbe

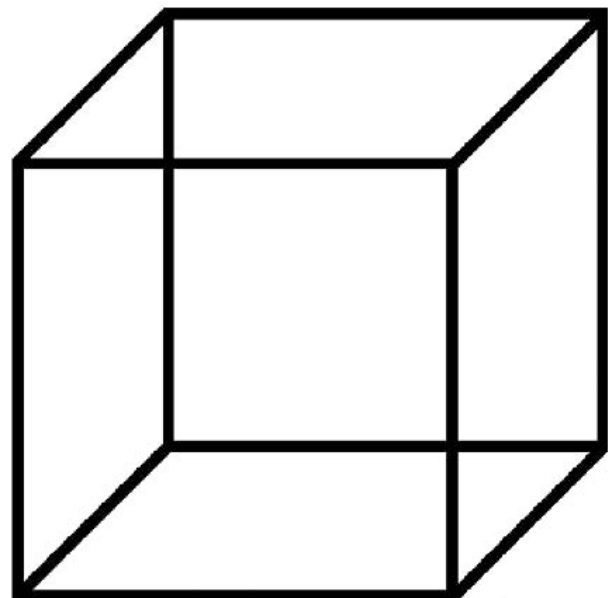
Ein zurzeit sehr beliebtes Forschungsgebiet ist, wie Neurone zu Entscheidungen über **visuelle Bewegung** beitragen. Ob sich ein Gegenstand bewegt oder nicht, und in welche Richtung, sind äußerst wichtige Entscheidungen die Mensch und Tier treffen müssen. Bewegt sich ein Gegenstand im Verhältnis zu anderen, bedeutet das grundsätzlich, dass er eigenständig ist und nicht Teil der Umgebung. Die Regionen der Sehrinde, die Informationen zur Bewegung auswerten, können auf einem anatomisch begrenztem Gebiet gefunden werden, indem man die Verbindungsmuster zwischen den Gebieten untersucht, z.B. durch bildgebenden Verfahren (Kapitel 14) oder indem man die Aktivität einzelner Neurone in Versuchstieren ableitet.



Bewegungsempfindlichkeit. A. Seitenansicht eines Affengehirns mit der primären Sehrinde (V1) ganz links und dem Areal MT (auch V5 genannt), wo sich die bewegungsempfindlichen Neurone befinden. B. Die Aktionspotentiale (rote senkrechte Linien) eines bewegungsempfindlichen Neurons die in Häufigkeit ab- bzw. Zunehmen, je nachdem wohin sich der Reiz bewegt. Die Zellsäulen in V5 verrechnen jeweils verschiedene Bewegungsrichtungen. C. Ein runder Bildschirm in einem Experiment zur Bewegungsempfindlichkeit worin sich Punkte ganz unstimmig (0% Stimmigkeit) oder alle in dieselbe Richtung bewegen (100% Stimmigkeit). D. Die Richtungsangabe des Affen ist abhängig von der Stimmigkeit der Punktebewegung (gelbe Linie). Elektrische mikrostimulation bestimmter Säulen verschiebt die Angaben zur entsprechenden Richtung (blaue Linie).

Neurone einer solchen Region, Areal MT oder V5, wurden in Affen abgeleitet, die einfache Entscheidungen trafen über ein Muster sich bewegender Punkten. Die meisten Punkte bewegen sich zufällig in alle Richtungen, ein kleiner Teil aber bewegt sich durchgehend in eine bestimmte Richtung - nach oben, unten, links oder rechts. Der Beobachter muss entscheiden wohin sich das Muster insgesamt bewegt. Die Aufgabe kann leichter oder schwerer gemacht werden, indem man den Anteil sich gleichsinnig bewegender Punkte vergrößert bzw. verringert. Die Ergebnisse zeigten, dass die Aktivität von Zellen in V5 genau die Stärke der Bewegung widerspiegelt. Die Neurone reagieren spezifisch auf jeweils eine bestimmte Richtung der Bewegung und werden aktiver sobald sich der Anteil in diese Richtung bewegender Punkte erhöht.

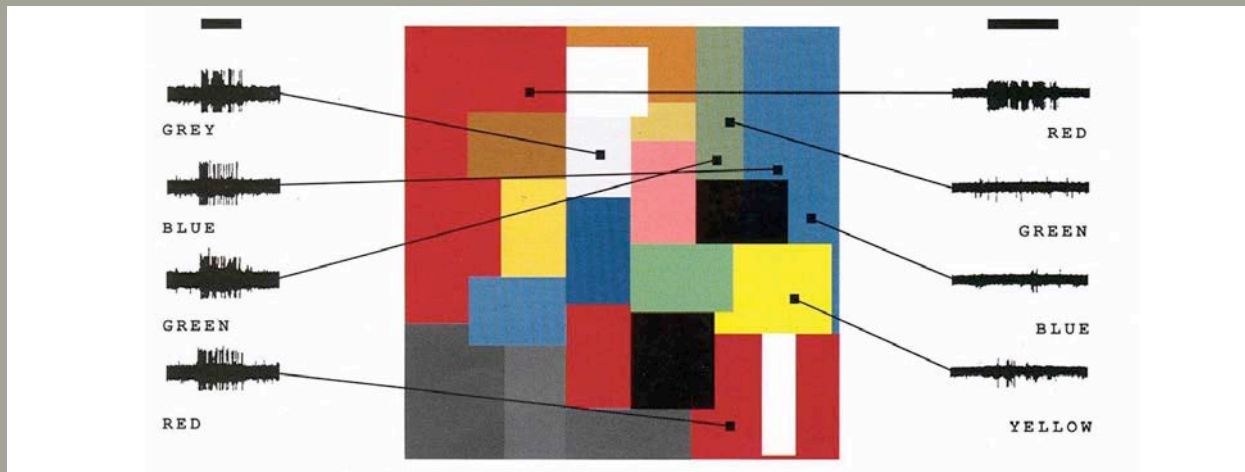
Erstaunlicher Weise können einige **einzelne** Neurone genauso gut die Richtung der Punkte auffassen, wie der Beobachter selbst, sei es Affe oder Mensch. Mikrostimulation solcher Neurone mit der ableitenden Elektrode kann sogar das Einschätzungsvermögen eines Affen beeinflussen. Das ist bemerkenswert, da eine Vielzahl an Neuronen auf Bewegung reagieren und man erwarten würde, dass Entscheidungen durch die Aktivität vieler Neurone getroffen werden und nicht nur durch einige einzelne. Wahrnehmung von Farbe geschieht auf ähnlicher Art und Weise (siehe An der Forschungsfront Kasten oben).



Der Necker-Würfel ruft dauernde Wahrnehmungswechsel hervor. Das Bild auf der Netzhaut ändert sich nicht, aber wir sehen den Würfel zuerst mit dem oberen linken Eck zu uns gewandt, und dann tritt das Eck nach hinten. Seltener nehmen wir sogar einfach einige interessant geordnete Linien auf einer flachen Oberfläche wahr. Es gibt viele solche in der Wahrnehmung schwankende Figuren und einige davon werden benutzt um die neuronalen Signale zu erforschen, die bei der Wahrnehmung eine Rolle spielen.

An der Forschungsfront

Farbempfindliche Zellen. Bestimmte Neurone feuern unterschiedlich je nach Wellenlänge des Lichts. Einige reagieren am stärksten auf langwelliges Licht, andere auf kurzwelliges. Ob das allein zur Farbwahrnehmung ausreicht, ist nicht ganz klar. Erkennst du den Unterschied in den Aktivitätsmuster der Zellen links und rechts?



Links. Dieses ausgeklügelte Farbmuster nennt man Mondrian, nach dem Künstler Piet Mondrian. Es wird beleuchtet mit unterschiedlichen Kombinationen von kurz-, mittel- und langwelligem Licht sodass jedes Rechteck die gleiche Lichtmischung reflektiert, obwohl wie sie verschiedenfarbig sehen, wegen der umgebenden Rechtecke. Die abgeleitete Zelle links aus V1 feuert jedes Mal etwa gleich. Sie kann Farbe nicht "wahrnehmen", sie reagiert einfach nur auf das gleichstarke Licht.

Rechts. Eine Echtfarben-empfindliche Zelle feuert bei einem Rechteck was wir als rot sehen, aber deutlich weniger bei anderen Rechtecken. Dies geschieht obwohl alle Areale die gleichen drei Wellenlängen reflektieren. V4 könnte also die Hirnregion sein, die uns das Farbsehen ermöglicht, obwohl einige Wissenschaftler glauben, dass auch andere Areale dabei mitwirken.

Believing is seeing

Areal V5 erkennt nicht nur reelle Bewegungen visueller Reize, sondern auch wahrgenommene Bewegung. Wenn zum Beispiel im Rahmen einer optischen Illusion, Punkte als sich bewegend wahrgenommen werden, während in Wirklichkeit nur die sie umgebenden Punkte sich bewegen, so werden die entsprechenden Neurone auch im Einklang mit der nach rechts oder links wahrgenommenen Bewegung feuern. Wenn die Bewegung vollkommen zufällig ist so feuern die Neurone, die rechts bevorzugen, etwas mehr wenn der Beobachter Rechtsbewegung wahrnimmt (und andersrum). So sind also die Aktivität der Neurone und die subjektive Wahrnehmung nicht zwingend einstimmig mit der „wahren“ Bewegung des Reizes.

Andere Beispiele visueller Unentschlossenheit sind tatsächlich zweideutige Reize, so wie der Necker-Würfel (siehe Abbildung). Bei solchen Reizen kann sich der Beobachter nicht festlegen und schwankt von einer "Sichtweise" zur anderen. Ähnlich unentschlossen bleibt man, wenn das eine Auge ein senkrecht Linienmuster sieht und das andere ein horizontales. Die Wahrnehmungswechsel zwischen eher senkrechten und dann eher horizontalen und dann wieder senkrechten Linien nennt man **binokulare Rivalität**. Es gibt Neurone in vielen Sehrindenregionen die den Wahrnehmungswechsel widerspiegeln.

Die sichtbare Welt ist ein faszinierender Ort. Das Licht geht durch unsere Augen und zeigt uns die Welt um uns herum, von den einfachsten Gegenständen zu den wunderbarsten Kunstwerken, die uns bezaubern. Millionen von Neuronen sind an der Wahrnehmung beteiligt, jedes mit seiner Aufgabe; sei es der Photorezeptor in der Netzhaut oder das Neuron in V5, das entscheidet ob sich etwas bewegt oder nicht. All dies passiert ohne jede Anstrengung in unserem Gehirn. Wir verstehen noch nicht alles, aber die Wissenschaft schreitet immerzu mit großen Schritten voran.

Colin Blakemore hat dazu beigetragen wie sich das visuelle System entwickelt. So zum Beispiel bahnbrechende Studien in Zellkulturen zur Erforschung der Wechselwirkung zwischen verschiedenen Teilen der Sehbahn im Embryonalen Gehirn (links). Rechts sehen wir Axone (grün gefärbt), die aus der sich entwickelnden Hirnrinde wachsen um anderen Fasern (orange gefärbt) "die Hand zu geben" und sie zur Rinde zu führen.

