

Prinzipien der Bildverarbeitung im visuellen System des Menschen

von Ingo Stödt

ingo.stoeldt@informatik.uni-ulm.de

Inhalt	
Sehen	1
Das menschliche Auge; Die Retina	2
Das Neuron; Neuronale Reizleitung	3
Bildverarbeitung in der Retina; Rezeptive Felder	4
Seitliche Hemmung;	5
Die Sehbahn; Corpus Geniculatum Laterale; Der visuelle Kortex	6
Wörterklärungen; Literatur	8

Sehen

Dem Sehen fällt unter den fünf menschlichen Sinnen zweifelsfrei die größte Bedeutung zu. Ohne die Fähigkeiten des **menschlichen Auges und des Gehirns** wäre die Entwicklung in Technik und Kommunikation, wie wir sie heute erleben können, wohl kaum möglich gewesen.

Wir profitieren dabei von einem **visuellen System**, das in der Evolution den höchsten Entwicklungsstand erreicht hat: Es ist das **Bildsehen**. Im Gegensatz zum **Helligkeits- und Lichtrichtungssehen** spielt hierfür das von Objekten reflektierte Licht eine entscheidende Rolle.

Als bilderzeugende Apparate dienen **Komplexaugen**, wie sie Krebse oder Insekten besitzen, sowie **Linsenaugen**, ähnlich wie beim Menschen. Im Fokus vorliegender Ausarbeitung liegt das Hauptaugenmerk auf dem menschlichen Sehapparat.

Das menschliche Auge

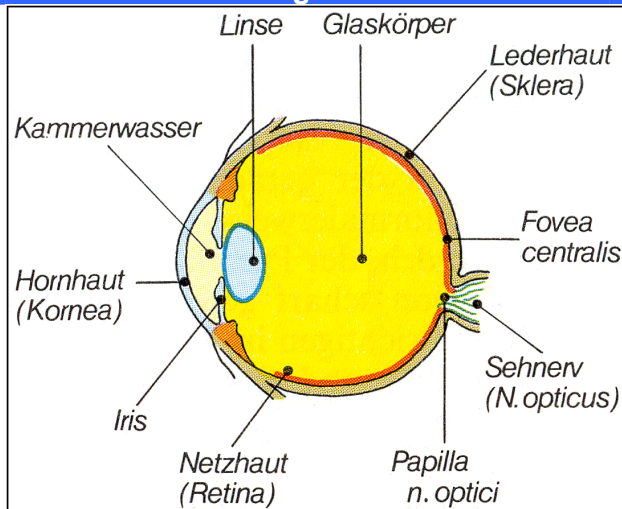


Abbildung 1: Aus [4], S.301: Rechtes Auge, Horizontalschnitt

Abbildung 1 zeigt einen Querschnitt durch das menschliche Auge. Einfallende Lichtstrahlen passieren den optischen Apparat, also die **Hornhaut**, das **Kammerwasser**, die **Linse** sowie den **Glaskörper**, bevor sie auf der **Retina** auftreffen.

Die **Iris** reguliert die Menge des einfallenden Lichts, indem sie die Größe der Pupille – also die Öffnung, durch die das Licht auf die Linse trifft – anpasst. Durch Veränderung der Wölbung der Linse, die das Licht bricht, wird ein Scharfstellen für unterschiedliche Entfernungen erreicht.

In der **Retina** befinden sich die **photorezeptiven Zellen**. Sie reagieren auf das einfallende Licht, indem sie durch minimale elektrische Potentialänderungen Signale weiterleiten. Es ist der erste Schritt auf dem Weg zur Bilderzeugung.

In der im Zentrum der Retina gelegenen **Fovea**, der sogenannten „Sehgrube“, sehen wir am schärfsten. Zum Rand hin nimmt die Sehschärfe ab. Blind sind wir an der Stelle, wo der **Sehnerv** austritt, weshalb diese Stelle der Retina auch als „blinder Fleck“ bezeichnet wird.

Die Retina (Netzhaut)

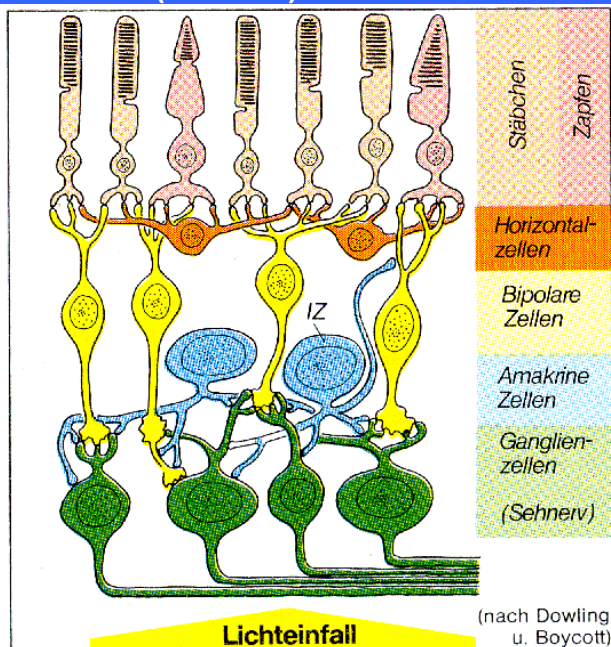


Abbildung 2: Aus [4], S.301: Netzhaut (Retina): schematischer Aufbau

Die Retina kleidet die Innenseite der Lederhaut bis weit nach vorne aus. Einzig die Stelle, an welcher der Sehnerv austritt, bleibt frei.

Auf der Retina trifft das Licht auf. Es dringt durch mehrere lichtdurchlässige Schichten bis hin zu den **Photorezeptorzellen**. Hier unterscheidet man zwischen **Zapfen** und den **Stäbchen**. Während Zapfen farbrezeptiv sind, vermitteln Stäbchen nur hell-dunkel-Eindrücke.

Den Photorezeptoren nachgeschaltet sind die Bipolaren Zellen, deren Fortsätze mit den **Ganglienzellen** in Kontakt stehen. Ihre Axone bündeln sich im Sehnerv.

Neben der Informationsweiterleitung von den Photorezeptoren bis zum Sehnerv besteht aber auch noch eine Verschaltung untereinander. Diese Aufgabe erfüllen die **Horizontalzellen** und die **Amakrinen Zellen**.

Das Neuron

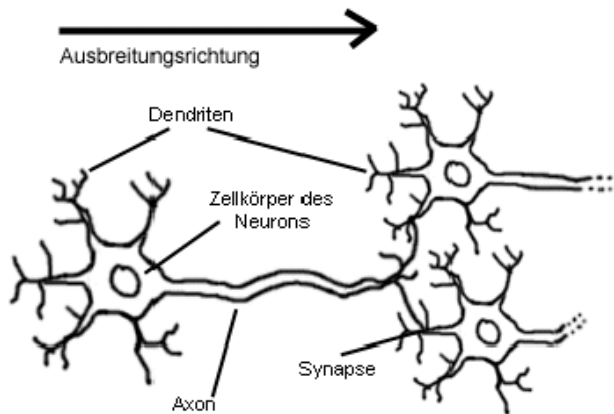


Abbildung 3: Aus [5], Neurone

Der Zellkörper eines Neurons besteht aus einem Zellkern und Fortsätzen, die weit verzweigt sein können. Bei den Fortsätzen unterscheidet man **Axone**, die Signale weitergeben und **Dendriten**, die Signale empfangen.

Als Synapsen bezeichnet man Verbindungsstellen zweier Neurone, an denen Signalübertragung stattfinden kann.

Innerhalb der Zelle erfolgt die **Weiterleitung eines Signals** elektronisch binnen einer tausendstel

Sekunde, indem durch eine plötzliche Veränderung der Zellmembran Natriumionen einströmen können und ein **Aktionspotential** bilden: Die Nervenzelle „feuert“. Das ursprüngliche Potential wird durch den Ausstrom von Kaliumionen wiederhergestellt.

Zahlen und Fakten

- Die Retina enthält 130 Millionen Photorezeptoren und vier weitere Gruppen von Neuronen
- Die Neuronen führen pro Sekunde mindestens 10 Milliarden Berechnungen durch.
- Der Sehnerv besteht aus rund einer Million Nervenfasern
- Die Sehzentren der Großhirnrinde umfassen 1 – 10 Milliarden Nervenzellen
- Jedes Neuron bildet mindestens 1000 Synapsen zu anderen Nervenzellen aus.
- Ein Kubikmillimeter Großhirnrinde enthält 30 000 – 100 000 Neuronen

Neuronale Reizleitung

Aus [1], 3. Struktur und Funktion der Nervenzellen, S.171: Jedes Neuron baut über die sie umgebende Zellmembran eine **Potentialdifferenz** von 60-80mV auf, deren Ursache eine Ungleichverteilung von K^+ -, Na^+ - und Cl^- -Ionen ist. Unter dem Einfluss äußerer Reize wird dieses „Ruhepotential“ bei Sinneszellen durch **Depolarisation** oder **Hyperpolarisation** verändert.

Eine Übertragung der Potentialänderungen auf andere Neurone erfolgt in der Regel auf chemischem Weg an spezifischen Schaltstellen, den Synapsen. Durch Ausschüttung einer **Überträger-substanz (Transmitter)** wird eine **Potentialänderung (Erregung)** in der nachfolgenden Zelle ausgelöst. Da Nervenzellen Informationen sowohl von mehreren anderen erhalten als auch selbst an viele andere Signale weitergeben, die erregend oder hemmend wirken, werden bei der Verrechnung der Informationen die Prinzipien der Addition, Subtraktion und Multiplikation wirksam.

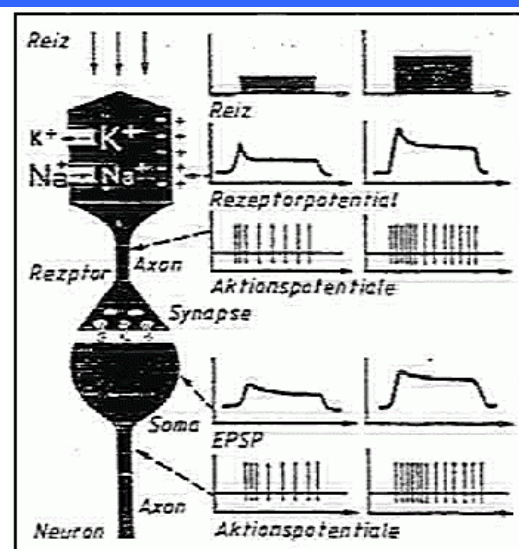


Abbildung 4: Aus [1], S.171: Neurophysiologische Grundprozesse bei Informationsaufnahme und -verschlüsselung in einer erregten Sinneszelle und der nachgeschalteten Nervenzelle.

Bildverarbeitung in der Retina

Die Retina kann man sich als ausgebreitetes Netz, als Matrix von Zellen vorstellen. Die optische Abbildung der Umwelt führt zu einem Erregungsmosaik der **Sehzellenmatrix**. Dieses **Erregungsmuster** wird nun bereits in der Retina selbst weiterverarbeitet. Hier sind zwei Prinzipien von Bedeutung: Die seitliche Hemmung und die rezeptiven Felder.

Rezeptive Felder

Als rezeptive Felder bezeichnet man die **Umgebung einer Ganglienzelle**, aus der sie Informationen von Photorezeptoren erhält. In der Retina sind diese beinahe kreisrund und überlappen sich gegenseitig.

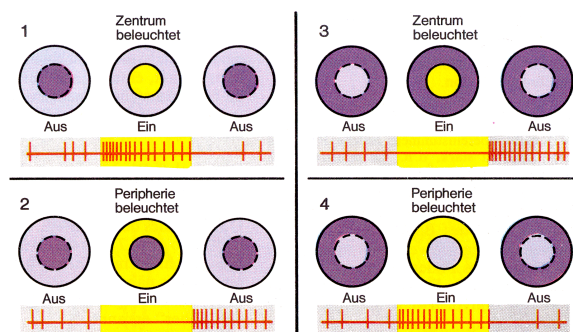
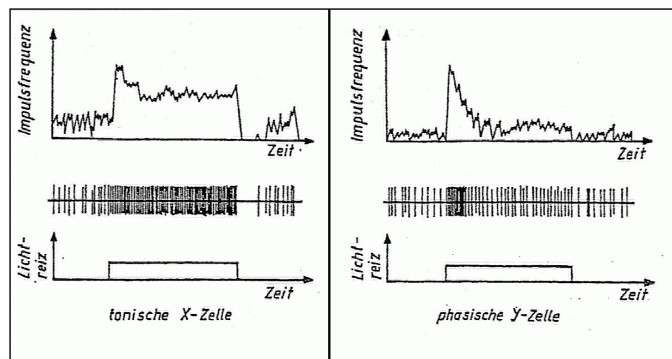
Aufgrund der Tatsache, dass es rund **130 Millionen Photorezeptoren**, aber nur **eine Million retinale Ganglienzellen** gibt, leiten in der Retina zahlreiche Zapfen und Stäbchen ihre Signale an ein und die selbe Ganglienzelle. Dies erklärt auch, weshalb wir in der Fovea scharf sehen: Hier leiten Ganglienzellen die Signale weniger Photorezeptoren weiter, während in der Peripherie die Rezeptiven Felder einen viel größeren „Einzugsbereich“ besitzen.

Bei den rezeptiven Feldern unterscheidet man zwei Haupttypen. Bei einem „**ON-Zentrum-Feld**“ wird die Ganglienzelle bei Belichtung ihrer Feldmitte erregt, während die Belichtung eines ringförmigen Bereichs um das Feldzentrum herum zur Hemmung führt. Beim „**OFF-Zentrum-Feld**“ verhält es sich umgekehrt.

Der Sinn dieser Feldorganisation besteht darin, dass die retinale Ganglienzelle nicht auf homogene, großflächige Lichtreize antwortet, sondern bevorzugt auf **kleine Lichtmuster** wie Punkte, Striche oder auch Kanten.

Eine weitere Unterscheidung besteht zwischen X- und Y-Zellen. Während die **tonische X-Zelle** solange „feuert“, wie der Lichtreiz anhält, reagiert die **phasische Y-Zelle** nur unmittelbar auf Lichtveränderungen, also beispielsweise zu Beginn und am Ende eines Lichtreizes.

Abbildung 5: Aus [1], S.174: Antworten von tonischen und phasischen ON-Ganglienzellen bei Belichtung der Feldmitte.



Wie Abbildung 6 erkennen lässt, „feuert“ ein ON-Zentrum, sobald die Feldmitte Lichtsignale erhält oder sobald ein Lichtsignal aus der Peripherie verschwindet. Ein OFF-Zentrum: „feuert“, sobald die Peripherie beleuchtet wird oder sobald ein Lichtsignal aus der Feldmitte verschwindet.

Abbildung 6: Aus [4], S.313: Rezeptive Felder der Retina: EIN-Zentrum (1,2), AUS-Zentrum (3,4)

Seitliche Hemmung

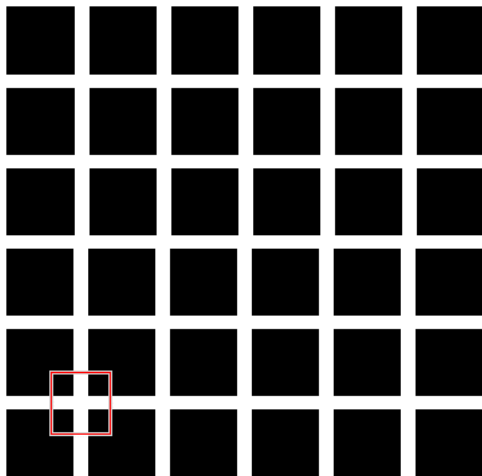


Abbildung 7: Ein sog. "Hermann-Gitter"

Als Folge der seitlichen bzw. horizontalen **Verschaltung der retinalen Nervenzellen** (vgl. Abschnitt „Die Retina“) ergibt sich das Prinzip der seitlichen Hemmung. Wie dieses Prinzip funktioniert, verdeutlicht folgendes Beispiel.

Wir kennen alle den Effekt der grauen Punkte an den Kreuzungen zwischen schwarzen Quadraten. Der Grund hierfür ist eben diese seitliche Hemmung (vgl. Abb. 7).

Gegeben seien **ON-Zellen**, die ihr Zentrum mit dem Faktor 5 und (hier im Beispiel) vier Peripherieabschnitte je mit dem Faktor -1 gewichten.

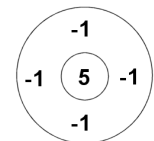


Abbildung 10: **ON-Zelle**

Die Zahlen in Abbildung 9 repräsentieren die Aktivität von ON-Zellen an der jeweiligen Stelle (vgl. Abb. 8). Die Zahlen wiederum spiegeln den **Grauwert** wieder, der an dieser Stelle interpretiert wird

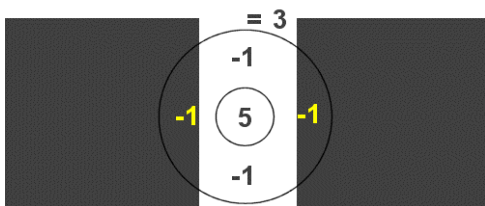
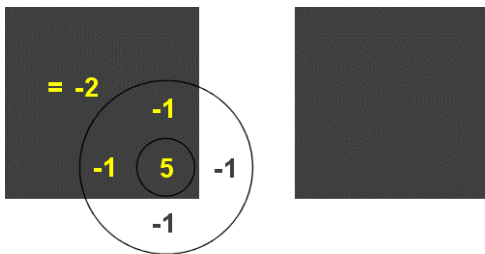


Abbildung 8: Ausschnitt von oben mit zwei ON-Zellen. Nur Zahlen auf weißem Hintergrund sind für die Werteberechnung von Bedeutung



Abbildung 11: Grauwerttabelle für das angegebene Beispiel

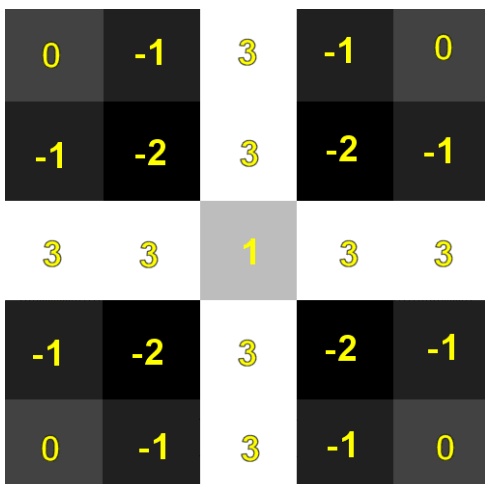


Abbildung 9: Jede Zahl repräsentiert den Wert der ON-Zelle an dieser Stelle – und somit den interpretierten Grauwert

Wird die ON-Zelle auf ihrer gesamten Fläche erregt, wie es in der Mitte des Ausschnitts der Fall ist, ergibt sich eine 1, also ein etwas dunklerer Grauton als in den Zwischenräumen zweier Quadrate. Daher die dunklen Flecken an den Kreuzungen!

Das Ergebnis der seitlichen Hemmung ist eine **Verstärkung der Kontraste**.

Die Sehbahn

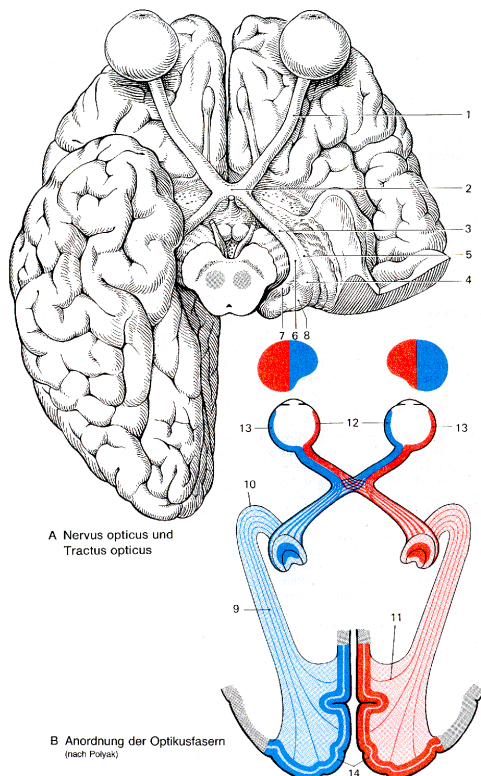


Abbildung 12: Aus [3], S.333: **Sehbahn**

Man bezeichnet den Weg, auf dem die visuellen Informationen aufgenommen, weitergeleitet und verarbeitet werden, als Sehbahn.

Die von beiden Augen austretenden Sehnerven treffen zunächst in der **Sehnervenkreuzung** (Chiasma opticum) im Zwischenhirn aufeinander. Hier werden die Nervenstränge so kombiniert, dass die Stränge aus dem rechten Sehfeld (nicht des rechten Auges!) in die linke Gehirnhälfte zusammengeführt werden und diejenigen aus dem linken in die rechte Hälfte.

Die Axone der retinalen Ganglienzellen des jeweiligen Gesichtsfeldes enden im entsprechenden **Kniekörper**, auch **Corpus Geniculatum Laterale** (CGL) genannt. Sie sind dort verschaltet mit Nervenfasern, die zum **visuellen Kortex**, also den **Sehzentren der Großhirnrinde** führen.

Der Corpus Geniculatum Laterale

Ähnlich wie die retinalen Ganglienzellen enthält auch der Corpus Geniculatum Laterale kreisförmige

Der visuelle Kortex

rezeptiven Felder. Sie bilden eine **Umschaltstation** und regulieren den Informationsfluss zwischen dem linken und rechten Auge und dem visuellen Kortex. Der CGL ist in **sechs Schichten** gegliedert, von denen vier Farbinformationen weiter geben und zwei Informationen zur Form von Objekten.

Wie schon der Corpus Geniculatum Laterale besteht auch der visuelle Kortex aus **sechs Zellschichten**. Die vom Zwischenhirn kommenden Nervenfasern münden zunächst in **Schicht IV**. Dort befinden sich einfache Kortexzellen, von denen Verbindungen zu den darunter liegenden Schichten führen. Die komplexen Zellen befinden sich grundsätzlich außerhalb der Schicht IV.

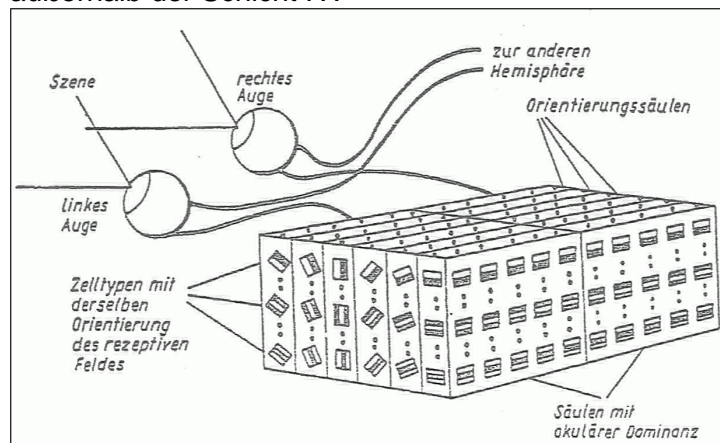


Abbildung 13: Aus [1], S.175: **Funktionelle Organisation einer Hypersäule (Modul) der primären Sehrinde**

Im visuellen Kortex findet man Gewebeblöcke, die sogenannten **„Hypersäulen“**, die bis zu 200 000 Neurone enthalten können. Deren eine Hälfte ist dabei mit dem linken, die andere mit dem rechten Auge verschaltet. Innerhalb einer solchen Hypersäule, die jeweils die Information aus einer kleinen Fläche des Sehfelds verarbeitet, werden bestimmte **Bildanalysen** durchgeführt. In Hypersäulen werden außerdem Farbinformationen und Tiefeneindrücke kodiert.

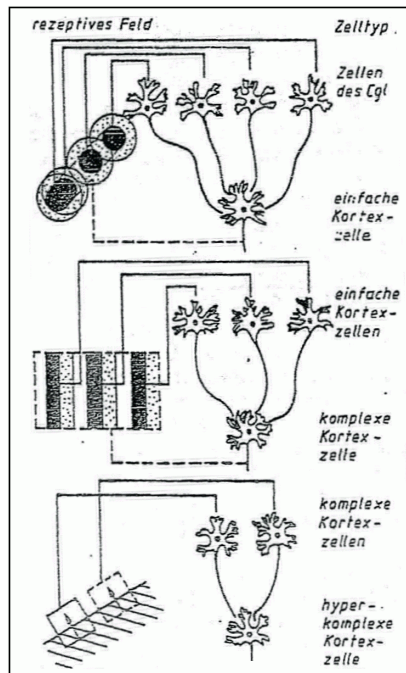


Abbildung 14: Aus [1], S.175:
Hierarchische Gliederung von rezeptiven Feldern

Die Nervenzellen im primären visuellen Kortex reagieren auf spezifische Mustermerkmale, allerdings nicht auf runde Lichtflecken, sondern auf Lichtstreifen mit bestimmter Beschaffenheit und Orientierung

Einfache Zellen

- Erregende und hemmende Bereiche nebeneinander angeordnet. Reagieren optimal auf Streifen einer bestimmten Orientierung

Komplexe Zellen

- Reagieren optimal auf Bewegung eines richtig orientierten Streifens (Länge unwichtig) über das rezeptive Feld. Viele Zellen reagieren optimal auf bestimmte Bewegungsrichtung.

Hyperkomplexe Zellen

- Reagieren auf Linien, Ecken und Winkel bestimmter Länge, die sich in einer bestimmten Richtung bewegen.

Begriffserklärungen**Neuron**

Nervenzelle, bestehend aus einem Zellkern, sowie bis zu einem Meter langen Fortsätzen, den **Dendriten**, die Signale empfangen und den **Axonen**, die Signale weiterleiten. Das Bindeglied zwischen Neuronen, an dem auch die Signalübertragung statt findet, nennt man **Synapse**.

Retina

- Photorezeptorzelle
- Bipolare Zellen
- Ganglienzellen

- Rezeptives Feld

Netzhaut, Bestandteil des Auges

Zapfen und Stäbchen, wird durch Licht erregt

Zwischenstation von Photorezeptoren zu Ganglienzellen Neuron, deren Axone sich zum Sehnerv zusammen schließen und aus dem Auge austreten.

Kreisförmige Anordnung von vielen Photorezeptoren um eine zentrale Ganglienzelle, die deren Signale bündelt und weiterleitet.

Sehbahn

- Sehnerv
- Sehnervenkreuzung

- Corpus Geniculatum Laterale
- Visueller Kortex

Weg der Bildinformation vom Auge zur Sehrinde

Bündel vieler Axone von Ganglienzellen aus der Retina

Aufteilung des Sehnervs in die linke und in die rechte Gehirnhälfte

Umschaltstation zwischen Augen und Sehrinde

Sehrinde, Ort an der Hinterseite des Gehirns, an dem die ankommenden Signale verarbeitet werden

Literatur

- [1] H. Füller. Prinzipien der Bildverarbeitung im visuellen System des Menschen Augenoptik – Berlin, Springer-Verlag, 170 – 177, 1987.
- [2] A. Pinz. Bildverstehen Kapitel 2, Über das Sehen, 9 – 20, Springer-Verlag, 1994.
- [3] Werner Kahle. Taschenatlas der Anatomie Band 3: Nervensystem und Sinnesorgane, 6. Auflage, Thieme-Verlag, 1991.
- [4] A. Silbernagl, A. Despopoulos. Taschenatlas der Physiologie 156 Farbtafeln, 4. Auflage, Thieme-Verlag, 1991.
- [5] P. Pichler. Prinzipien der Bildverarbeitung im visuellen System des Menschen Proseminar Computer Vision, Fakultät für Informatik an der Universität Ulm, 2002.
- [6] S. Inacker. Sehen - Zusammenfassung der Prüfungsliteratur für Vordiplom Psychologie (Nebenfach) 1998 Allgemeine Psychologie I und II Goldstein, Sehen – Die zentrale Verarbeitung <http://wesley.informatik.uni-freiburg.de/~inacker/uni/psycho/html/node61.html>