

# Vorlesung „Bildverarbeitung in der Medizin“

## Teil 2: Sehvorgang und Wahrnehmung

Jürgen Braun, Dagmar Krefting – Institut für Medizinische Informatik



CHARITÉ CAMPUS BENJAMIN FRANKLIN

Einführung

2

### Einführung Bildverarbeitung in der Medizin

- I. Licht
- II. Aufbau des Auges
- III. Netzhaut und retinale Verarbeitung des Sehreizes
- IV. Photochemischer Reiz und Farbsehen
- V. Sehbahn und Sehreizverarbeitung im Gehirn

### Ziele der Vorlesung

Nach dieser Veranstaltung sollten Sie wissen:

- welche Natur Licht hat
- was wichtige Bestandteile des Auges und deren Eigenschaften sind
- den Aufbau der Netzhaut und Typen von Photorezeptoren
- die retinale Vorverarbeitung des Sehreizes
- Grundlagen des photochemischen Reizes und des Farbsehens
- Reizweiterleitung und Umschaltungen in der Sehbahn
- Struktur und Reizwege der Sehirinde
- Stufen der kortikalen Verarbeitung und Interpretation des Sehreizes
- visuelle Intelligenz, Potential und Eigenheiten der Wahrnehmung

Einführung

3

### I. Licht

Licht bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von etwa 300.000.000 m/s durchs Vakuum. Sichtbares Licht hat einen Wellenlängenbereich von etwa 400 bis 800 nm, was einem Frequenzbereich zwischen 375 und 7,5x10<sup>14</sup> Hz entspricht

Obwohl Sonnenstrahlen Wirklichkeit parallel verlaufen werden sie als radiale Linien wahrgenommen, die einem Punkt entspringen. Dieser Effekt tritt immer auf, wenn die Kanten eines Abbildungsgegenstands nicht parallel zur Projektionsfläche liegen. Die Tiefenwahrnehmung in der Ferne ist eine Leistung höherer Areales visuellen Kortex, in denen Erfahrungen mit Abdeckungen und Überschneidungen, die die Tiefenwahrnehmung unterstützen, durch die Gegenstandsform und die Wahrnehmung der Ferne funktional, auch mit einem Auge (im Gegensatz zum plastischen Sehen in der Nähe).

1. Licht

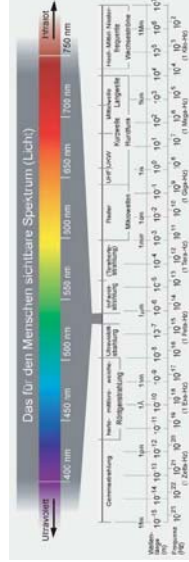
### Einführung Bildverarbeitung in der Medizin

- I. Licht
- II. Aufbau des Auges
- III. Netzhaut und retinale Verarbeitung des Sehreizes
- IV. Photochemischer Reiz und Farbsehen
- V. Sehbahn und Sehreizverarbeitung im Gehirn

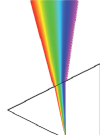
Einführung

2

### I. Das elektromagnetische Spektrum



Licht: elektromagnetische Welle, durch Brechung Zerlegung in seine Spektralfarben



1. Licht

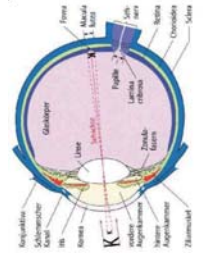
5



Udjat-Auge, Ägyptisches Museum Bonn  
Auge des Falakoretas Haus (zwischen 1300 und 700 v. Chr), das dem Mythos nach von seinem Onkel Seth geraubt wurde. Mit Hilfe des Magisches Trock, einigmal Kuru Augen Amulett (Udjat) (das was heil geworden ist) wurde es "udjat" ("das was heil geworden ist") genannt. Es symbolisierte im Alten Ägypten Vervollständigung und Heilung.

### II. Aufbau und Funktion des Auges

Funktion des dioptrischen Apparates (Hornhaut, Linse, Glaskörper): Erzeugung eines verkleinerten, umgekehrten Bildes auf der Netzhaut.



Quelle: Schmidt, Theorie Physiologie des Menschen, Springer-Verlag, Berlin, 1997

2. Aufbau des Auges

6

## II. Die Hornhaut



- Hornhaut (Cornea, C):
- Aufbau: 2 Epithelschichtengrenzen eine Bindegewebschicht (Stroma) zur Augenkammer und zur Luft ab
  - Lichtstreuung minimiert durch parallele Anordnung von Collagenfasern gleichen Durchmessers
  - nicht vaskularisiert (Verminderung von Streuung)
  - schmerzempfindlich (N. trigeminus)

### Lederhaut (Sklera, S):

- Collagenfasern unterschiedlichen Durchmessers in weitgehend ungeordneter Anordnung
- robust

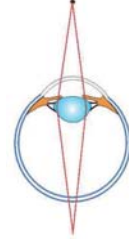
Quelle: www.sinnestherapie.de

2. Aufbau des Auges

7

## II. Die Linse

- durchsichtiges, elastisches Gewebe
- direkt hinter der Iris an einem Kranz von Zonulafasern aufgehängt
- ringförmiger Ziliarmuskel kann die Form der Linse (→ Brennweite) verändern



- Fernsicht (Fernakkommodation):
- Ziliarmuskel entspannt
  - Zonulafasern ziehen die Linse auseinander (relativ flache Form der Linse)
  - Nahe Gegenstände erscheinen unscharf (Fokussierung auf einen Brennpunkt hinter der Netzhaut)

### Nahakkommodation:

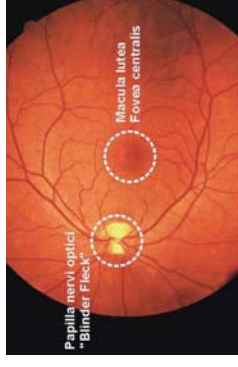
- Ziliarmuskel kontrahiert
- Kräfte, die über die Zonulafasern auf die Linse wirken werden zum Teil kompensiert (Linse abgerundet)
- Brennweite wird reduziert, Bild eines nahen Gegenstandes auf die Netzhaut fokussiert

Quelle: www.sinnestherapie.de

2. Aufbau des Auges

8

## II. Der Augenhintergrund



- Die Betrachtung des Augenhintergrunds mit einem Ophthalmoskop zeigt:
- Blutgefäße der Netzhaut,
  - Eintritt von Sehnerv und Blutgefäßen ins Auge (Papilla nervi optici), an dieser Stelle befinden sich keine Photorezeptoren (Blinder Fleck)
  - Ort des schärfsten Sehens (Fovea centralis, keine Blutgefäße)

Quelle: www.sinnestherapie.de

2. Aufbau des Auges

9

## II. Optische Täuschung: Der blinde Fleck

Wird das rechte Auge zugehalten und mit dem Linken auf das Kreuz fokussiert, verschwindet bei einem bestimmten Abstand der schwarze Kreis.



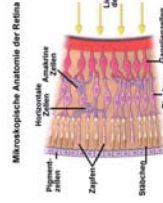
Die Stelle, an der Sie den schwarzen Kreis nicht mehr sehen können, ist der Blinde Fleck. An dieser Stelle im Gesichtsfeld bildet sich der Sehnervenkopf (Papille) ab. Dort sind keine Rezeptoren, auf der Papille wir sind deshalb blind.

2. Aufbau des Auges

10

## III. Die Netzhaut

Die Netzhaut (Retina): Schichten von Zellkörpern (nukleäre Schichten) und Schichten die nur aus Nervenfasern bestehen (plexiforme Schichten)

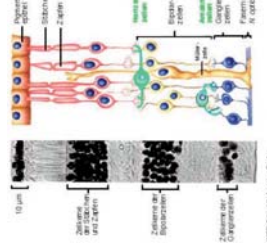


- Photorezeptoren (Lichtsinnesezellen), Umwandlung Licht in elektrische Signale
- Orientierung zur hinteren Augenhaut, überdeckt vom Pigmentepithel
- unterschiedliche Bipolarzellen, Horizontal- und Amakrinzellen zur lateralen Verschaltung der Netzhautzellen (Signalvorverarbeitung)
- Ganglienzellen (Neurone deren Axone den Sehnerv bilden), erzeugen das Ausgangssignal zur Weiterleitung über den Sehnerv ins Gehirn

3. Netzhaut, retinale Informationsverarbeitung 11

## III. Signalverarbeitung in der Netzhaut

Es existieren 2 Hauptrichtungen der Informationsverarbeitung in der Netzhaut:



- Photorezeptoren - Bipolarzellen - Ganglienzellen  
 üblicher Weg des Signalfusses von sekundären Sinneszellen über interneurone zu Projektionsneuronen.  
 Photorezeptoren - Horizontalzellen - Photorezeptoren und Bipolarzellen - Amakrinzellen - Ganglienzellen  
 laterale (quer-verlaufende) Informationswege, Verknüpfung von Zellen zu einem neuronalen Netz zur Durchführung komplexer Verarbeitungsprozesse (Kontrastverstärkung, Bewegungssehen)

Mit einer Vielfalt von Zelltypen und deren komplexen Verschaltungen ist die Netzhaut ein äußerst komplexes und leistungsfähiges System.

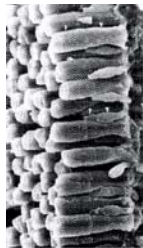
Quelle: www.sinnestherapie.de

3. Netzhaut, retinale Informationsverarbeitung 12

### III. Stäbchen und Zapfen

- Es gibt zwei verschiedene Typen von Photorezeptorzellen:
- Stäbchen (für schwarz/weiß Sehen)
  - Zapfen (für das Farbsehen)

Stäbchen sind lichtempfindlicher als Zapfen, besitzen allerdings geringeres Detailauflösungsvermögen (Sehschärfe). Der durchschnittliche Abstand der Photorezeptoren beträgt etwa 6µm.



Elektronenmikroskopische Aufnahme einer Retina Stäbchen (groß), Zapfen (klein), das Pigmentepithel ist abpräpariert.

Quelle: www.simesphysiologie.de

3. Netzhaut, retinale Informationsverarbeitung 13

### III. Stäbchen und Zapfen

Anzahl von Photorezeptoren in der Netzhaut eines menschlichen Auges:

- ca. 120 Millionen Stäbchen
- ca. 7 Millionen Zapfen

Stäbchen:

- optimiert für die Detektion sehr geringer Lichtintensitäten (Dämmerungssehen)
- elektrische Reaktionen auf Lichtintensitäten von nur wenigen Photonen/s (großer Querschnitt (ca. 1 µm<sup>2</sup>), hoher Rhodopsingehalt und hochverstärkende Signaltransduktion)

Zapfen:

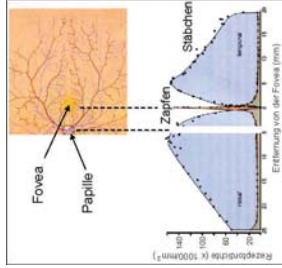
- schnelle Signaltransduktion für das Bewegungssehen bei Tage
- Farbwahrnehmung
- die wesentlich unempfindlicher Zapfen-Photorezeptoren benötigen eine etwa 30-fach höhere Lichtintensität zur Reaktion als die Stäbchen

3. Netzhaut, retinale Informationsverarbeitung 14

### III. Die Fovea

Gründe für das scharfe Sehen in diesem Teil der Netzhaut:

- hohe Zapfendichte
- jedem Zapfen ist eine Ganglienzelle zugeordnet, d.h. jeder Zapfen produziert einen Bildpunkt (Peripherie der Netzhaut: bis zu 130 Photorezeptoren je Ganglienzelle)



Fovea = Bereich des schärfsten Sehens  
Zapfendichte Peripherie: ~10.000/mm<sup>2</sup>  
Fovea: ~140.000/mm<sup>2</sup>

Quelle: www.simesphysiologie.de

3. Netzhaut, retinale Informationsverarbeitung 15

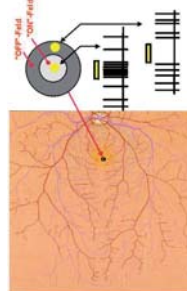
### III. Retinale Verarbeitung des Sehreizes

Durch die laterale Verschaltung der Photorezeptoren mittels Horizontalzellen hat jede Ganglienzelle ein relativ großes Einzugsgebiet:

→ rezeptives Feld (etwa 50 µm Durchmesser)

Die Horizontalzellen können die Information der Photorezeptoren invertieren, sodass innerhalb eines rezeptiven Feldes ON-OFF Bereiche entstehen.

Beleuchtung des inneren Bereiches (ON-Feld, nahe der Ganglienzelle, die den Reiz weiterleitet) bewirkt eine Aktivierung (On-Response), außerhalb des ON-Feldes erzeugt man durch Belichtung eine Hemmung der Ganglienzelle.

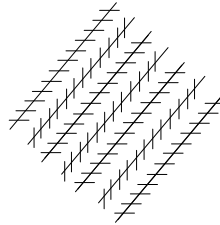


Bei Dunkelheit vergrößert sich das rezeptive Feld bis zur Peripherie der Netzhaut → Erhöhung der Lichtempfindlichkeit durch räumlichen Summation → Verminderung der Sehschärfe.

Quelle: www.simesphysiologie.de

3. Netzhaut, retinale Informationsverarbeitung 16

### III. Optische Täuschung durch laterale Inhibition



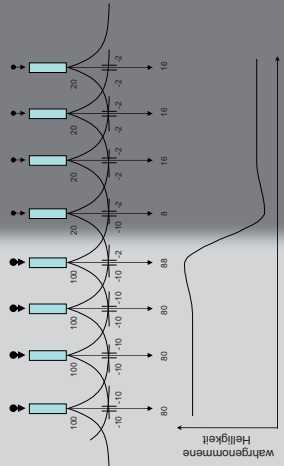
Zöllner Illusion: Parallele lange Gerade erscheinen kürzer als kürzere Gerade, wenn die laterale Wechselwirkungen den Winkel zwischen kurzen und langen Geraden beeinflussen können

Hermann-Gitter: in den weißen Kreuzungspunkten der Geraden erscheinen die Peripherie der rezeptiven Felder an diesen Punkten mehr Licht absorbiert

3. Netzhaut, retinale Informationsverarbeitung 18

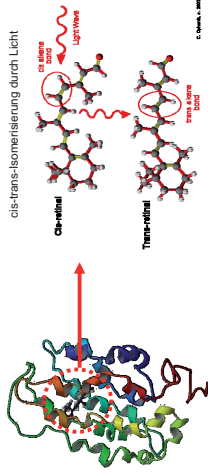
### III. Laterale Inhibition

Die Netzhaut kann den Unterschied der Lichtintensität zweier nah beieinander liegender Punkte erhöhen (Kontrastverstärkung): Hemmung der Aktivität benachbarter Photorezeptoren und Ganglienzellen (laterale Inhibition)



3. Netzhaut, retinale Informationsverarbeitung 17

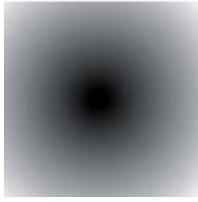
#### IV. Der photochemische Reiz in der Retina



Einfallendes Licht trifft auf Rhodopsin (ca. 300000 Moleküle/ $\mu\text{m}^2$  Retinafläche) Lichtempfindlicher Baustein im Molekül: Retinal  
Lichteinfall führt zur cis-trans Isomerisierung des Retinals  $\rightarrow$  Signalkaskade  
Visuelle Signaltransduktionskaskade: Protonen  $\rightarrow$  elektrochemische Signale  
Licht erst bei mehreren gleichzeitig aktivierten Stäbchen wahr.

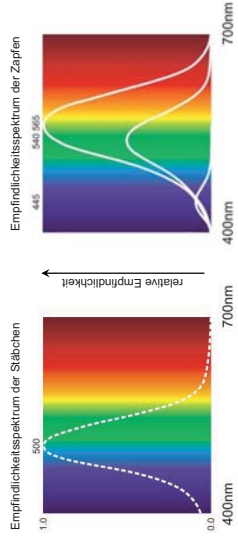
#### IV. Der photochemische Reiz in der Retina

Schauen Sie sich den "Nebel" in der linken Hälfte der folgenden optischen Täuschung an. Fixieren Sie dessen Mittelpunkt für etwa 30 Sekunden. Blicken Sie danach in die rechte, weiße Hälfte. Was sehen Sie?



Sie sollten nun etwas Helles sehen können, das die Form des "Nebels" hat und leuchtet. In der Mitte sollte die neue Form am hellsten leuchten. Dieses Nachbild sehen Sie durch die Ermüdung der Fotorezeptoren, deren Potential nach dem langen Fixieren der rechten Hälfte vorübergehend erschöpft ist.

#### IV. Farbsehen

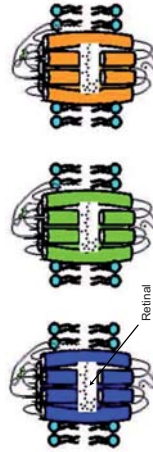


Menschen sind Trichromaten, d.h. sie besitzen drei Zapfenarten mit unterschiedlichen Absorptionsmaxima (665nm = rot, 540nm = grün, 445nm = blau).

Die Springspinne ist ein Tetrachromat

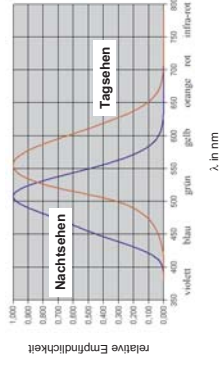
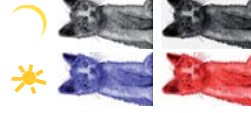
#### IV. Farbsehen

In der Information, welche Zapfenart wie stark angeregt wird, liegt die Farbinformation für das Gehirn.  
Die Spezialisierung der 3 Zapfenarten auf unterschiedliche Farben kommt durch verschiedene Opsin Proteine zustande: Blau-, Grün- und Rotopsin.  
Die Opsin Proteine sind durch Genduplikation entstanden und weisen nur geringe Strukturunterschiede auf.  
Chromophor ist bei allen Zapfen Retinal. Je nachdem in welchem Opsin das Retinalmolekül eingelagert ist, absorbiert im blauen, grünen oder gelb/roten Bereich des Spektrums.



#### IV. Farbsehen und Hellempfindlichkeit

Bei Nacht sind alle Katzen grau. Aber die blauen Katzen erscheinen in hellerem Grau als die Roten, wegen der höheren Empfindlichkeit der Stäbchen für kurzwelliges Licht. (Purkinje Phänomen)

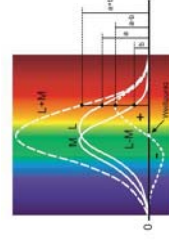


#### IV. Farbvorverarbeitung auf der Retina

Aufgrund des geringen Wellenlängenunterschieds zwischen den Absorptionsmaxima der roten (L) und grünen (M) Zapfen leitet das Auge das Differenzsignal L-M zur rot-grün Unterscheidung weiter.

Im Gegenzug wird die Summe aus L+M (=gelb) zur Helligkeitswahrnehmung genutzt

Die Differenz gelb-blau (=L+M-S) dient der Blau-Gelb Unterscheidung



Es werden wahrgenommen:  
• 128 verschiedene Farbtöne  
• Zwischen 16 (im blauen Bereich) und 26 (im roten Bereich) Farbtöne  
• ca. 380.000 Farben bei einer 85% achromatischen Unterscheidung von nur ca. 15 Farben!



9% aller Männer und 0,5% aller Frauen sind farbenblind

#### IV. Lichtmengenadaptation des Auges

**Pupillenreflex:**  
Die Pupille kann die Menge des einfallenden Lichtes um den Faktor 16 verändern



- Sensorempfindlichkeit: Veränderung der Rhodopsinkonzentration in den Fotorezeptoren
- Räumliche Summation: Veränderung der Retinafläche, die eine einzelne Nervenzelle erregt
- Zeitliche Summation: Addition von vielen unterschwelligen Reizen zu einem überschwelligen Reiz, der ein Aktionspotential auslöst

4. Photochemischer Reiz, Farbsehen

25

#### IV. Augenbewegung - Sakkaden

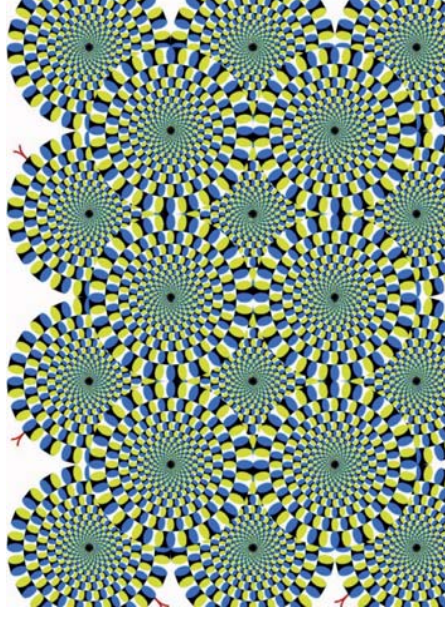
Beim Ablesen des Blickfeldes macht das Auge (unbewußt) ruckartige Bewegungen (Sakkaden), die jeweils 10 bis 80 Millisekunden dauern und die durch eine längere Fixierungsperiode voneinander getrennt sind.

Eine normal-sichtige Person macht etwa zwei Sakkaden pro Sekunde. Schaut man seine eigenen Augen abwechselnd im Spiegel an, nimmt man die Sakkaden selbst nicht wahr, sondern nur ein zweiter Beobachter.

Nachfolgende optische Täuschung nutzt die Sakkaden aus. Scheiben im peripheren Bereich des Bildes scheinen sich zu bewegen, fokussiert man jedoch auf das Zentrum einer Scheibe, steht diese still.

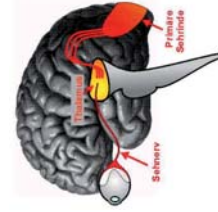
4. Photochemischer Reiz, Farbsehen

26



#### V. Die Sehbahn

Ausgangssignal der Netzhaut ist durch laterale Verschaltungen von verarbeitet. Die Axone der Ganglienzellen verlassen das Auge im "blinden Fleck" und sammeln sich im Sehnerv.



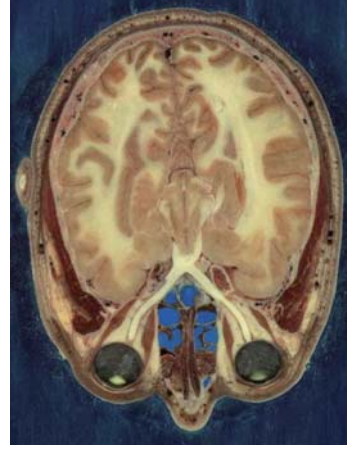
Im weiteren Verlauf erreicht der Sehnerv den Thalamus, die zentrale Verschaltungsstation aller Sinnesinformation auf dem Weg zur Großhirnrinde (Bewußtsein). Axone der Ganglienzellen enden im Corpus geniculatum laterale (seitlicher Kniehöcker), einem Kern auf der Hinterseite jeder der beiden Thalamushälften. Hier findet die Umschaltung auf Thalamuszellen statt, deren Fasern in den Okzipital-lappen ziehen und dort in der primären Sehbahn auf Rindenneurone verschaltet sind.

Quelle: www.sinnphysiologie.de

5. Sehbahn, kortikale Reizverarbeitung

28

#### V. Die Sehbahn

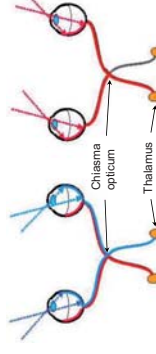


5. Sehbahn, kortikale Reizverarbeitung

29

#### V. Das chiasma opticum

Die Sehnerven der beiden Augen verlaufen überkreuz in Richtung Thalamus.



In der Kreuzung (chiasma opticum) werden Axone der Ganglienzellen sortiert:  
- Axone, die von der linken Seite beider Netzhäute kommen, werden in die linke Gehirnhälfte geführt  
- Aus den rechten Seiten der Netzhäute verlaufen die Axone zur rechten Gehirnhälfte.

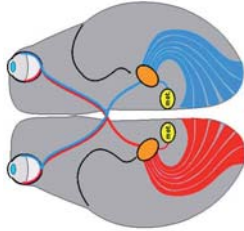
Daher wird das Bild des in Blickrichtung rechts liegenden Teils unserer Umwelt dem linken Thalamus und umgekehrt zugeführt. Die beiden Seiten unseres Sehfeldes werden in der jeweils kontralateralen Gehirnhemisphäre verarbeitet.

Quelle: www.sinnphysiologie.de

30

## V. Die primäre Sehirnde

Aus dem Thalamus verläuft die Sehbahn durch die weit aufgefächerte "Sehstrahlung" (Radiatio optica) in den Okzipitallappen und mündet dort in der primären Sehirnde.



Zusätzlich verlaufen Thalamusaxone zu motorischen Zentren (Colliculus superior, Area praetectalis), die lichtgesteuerte Bewegungen im Auge (Pupillenreflex, reflektorische Blickmotorik) kontrollieren.

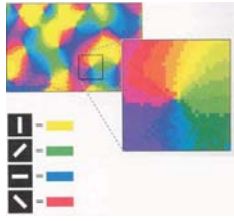
Quelle: [www.simesphysiologie.de](http://www.simesphysiologie.de)

5. Sehbahn, kortikale Reizverarbeitung

31

## V. Elementares Sehen

Das Organisationsprinzip der primären Sehirnde (V1) ist die Retinotopie: Lichtpunkte, die auf der Netzhaut nebeneinander abgebildet werden, werden auch in V1 nebeneinander verarbeitet. Die Projektion der Netzhaut auf die primäre Sehirnde ist nicht proportional. Die Fovea nimmt etwa die Hälfte der Sehirnde ein. Sie ist entsprechend ihrer Bedeutung als Ort des schärfsten Sehens (höchsten Ganglienzellendichte) kortikal überrepräsentiert. Die Neurone in V1 sind quervernetzt, sodass auch laterale Inhibition funktioniert.



In V1 werden im wesentlichen Lichtbaiken registriert. Dabei werden Orientierung der Striche, ihre Farbe und Herkunft aus dem rechten oder linken Auge aufgenommen. Neurone mit ähnlichen Orientierungspräferenzen gruppieren sich im visuellen Kortex in einem Windradmuster.



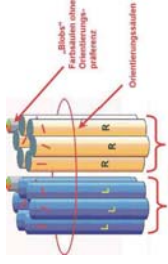
D.H. Hubel  
T.N. Wiesel  
Nobelpreis in Medizin, 1981  
"for their discoveries concerning information processing in the visual system"

5. Sehbahn, kortikale Reizverarbeitung

32

## V. Säulenstruktur der primären Sehirnde

In der primären Sehirnde zeigen Neurone in einer "Säule" von 30 - 100 µm Durchmesser die gleiche Präferenz für die Orientierung von Lichtbaiken.



Neurone in Nachbarsäulen zeigen eine andere Orientierungspräferenz. Die Wahrnehmung von Linien ist also je nach deren Ausrichtung auf mehrere Orientierungssäulen verteilt.

Sehirnde Primaten: Orientierungssäulen, die Informationen über einen Punkt der Netzhaut eines Auge verarbeiten, sind in einem Bündel zusammengefasst (okulare Dominanzsäulen). Für jeden Ort des binokularen Gesichtsfeldes gibt es je eine okulare Dominanzsäule für rechtes und linkes Auge sowie Farbenspezifische Säulen ohne Orientierungsspezifität (Blobs). Diese funktionellen Module der primären Sehirnde werden als Hyperkolonnen bezeichnet.

Quelle: [www.simesphysiologie.de](http://www.simesphysiologie.de)

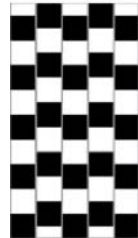
33

## V. Interpretation der Umwelt durch das Gehirn

Die optische Information, die das Auge erreicht, ist nur ein winziges, auf dem Kopf stehendes, Abbild der Umgebung.  
→ visuelles System im Gehirn leistet umfangreiche Informationsverarbeitung, um die komplexe, uns selbstverständliche Wahrnehmung der Umwelt zu ermöglichen.

Dazu macht das Gehirn eine Vielzahl von Annahmen über die Umwelt, z.B. über Perspektive ("Wenn sich etwas entfernt, wird nicht das Objekt kleiner, sondern nur sein Bild") oder über Entstehung einer Gestalt aus einzelnen Details ("Die Zeichen -> stellen ein Gesicht dar").

Solche Annahmen können das visuelle System in die Irre führen (Grundlage einiger optischer Täuschungen).



Quelle: [www.simesphysiologie.de](http://www.simesphysiologie.de)

5. Sehbahn, kortikale Reizverarbeitung

34

## V. Referenzobjekte beim Sehen

Bei der Entstehung eines Bildes im Gehirn vergleicht das visuelle System die einzelnen Objekte.  
Häufig wird dabei ein Objekt als Wichtigstes, d.h. Referenzobjekt ausgewählt.



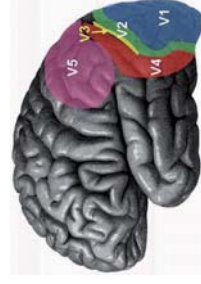
Beim Zählen der Elefantenbeine ist die Schwierigkeit, daß zwei nicht zusammenpassende Referenzsysteme hat. Nimmt man den Elefanten als Referenz, kann man dessen Beine nicht zählen. Nimmt man die Beine als Referenz, passen die nicht zum Tier.

Quelle: [www.simesphysiologie.de](http://www.simesphysiologie.de)

35

## V. Primäre und sekundäre Sehirnde

Aus dem Thalamus kommende, visuelle Information wird in der primären Sehirnde (V1) nur grob analysiert. Andere Bereiche der Großhirnrinde (~ die Hälfte der gesamten Cortexfläche) erhalten die Information aus V1 und verarbeiten sie weiter. Diese Rindenbereiche (V2-V5) bezeichnet man als sekundäre Sehirnde.



Die Rindenbereiche im Okzipitallappen (V1-V4) leisten eine grundlegende Analyse von Form, Farbe und Bewegung. Zur visuellen Wahrnehmung kommt es jedoch erst durch kognitive Prozesse im Assoziationskortex des Parietal- und Temporalapparats.

Die verschiedenen Bereiche der sekundären Sehirnde verarbeiten parallel unterschiedliche Aspekte der visuellen Information.

Quelle: [www.simesphysiologie.de](http://www.simesphysiologie.de)

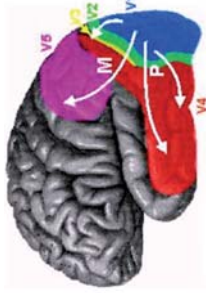
36

## V. Informationsfluß primäre → sekundäre Sehrinde

Information wird auf 2 Wegen aus der primären in die sekundäre Sehrinde geleitet:

P - Weg: bringt die Signale in den Temporallappen, dessen unterer Teil die primäre Sehrindeinformation auf Form und Farbe hin analysiert

M - Weg: führt aus der primären Sehrinde in den Parietallappen. Hier wird die Information auf Ort und Bewegung hin analysiert



Quelle: [www.sinnphysiologie.de](http://www.sinnphysiologie.de)

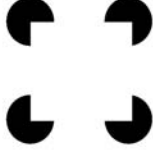
5. Sehbahn, kortikale Reizverarbeitung 37

## V. Elementares Sehen

In V2 versucht das Gehirn, aus einzelnen Elementen Gegenstände zu konstruieren. Die Wahrnehmung eines Gegenstandes beruht auf einem Vergleich des optischen Signals mit einem bekannten Gegenstand. Bei diesem Verarbeitungsvergange können auch Fehler passieren:

in der nebenstehenden optischen Tauschung werden Sie ein Quadrat erkennen. Es sind jedoch nur vier Kreise, bei denen ein Viertel fehlt, und ein weißer Hintergrund vorhanden.

Aufgrund von Erfahrungen versucht das Gehirn, etwas Bekanntes als Muster wiederzuerkennen.



Bewegungsanalyse erfolgt in V3. Hier werden Bewegungen einfacher Konturen und Objekte registriert. Eine besondere Leistung ist die Gestaltinvarianz bei Bewegung (Zusammengehörigkeit einzelner visueller Komponenten zu einer Gestalt auch während einer Bewegung).

Ortsbestimmung, Analyse von Raumtiefe / Entfernung sind Funktionen von V5.

5. Sehbahn, kortikale Reizverarbeitung 38

## V. Visuelle Objekterkennung

Der über die P-Bahn versorgte untere Schläfenlappen analysiert Form und Farbe eines Gegenstandes und identifiziert den Gegenstand. Im Schläfenlappen gibt es unterschiedliche Neuronenverbände, die auf konkret definierte Objekte reagieren, z.B. ein Haus oder ein Gesicht.

Läsionen im Schläfenlappen können verschiedene Behinderungen zur Folge haben:  
 - Farbenagnosie: Unfähigkeit, einem Objekt eine Farbe zuzuordnen  
 - Prosopagnosie: Unfähigkeit, Gesichter zu erkennen

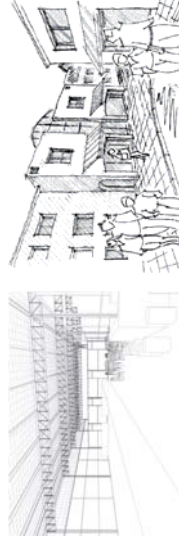


Im Gegensatz zu V1 ist das Ordnungsprinzip der Sehrinde im Schläfenlappen nicht die Retinotopie, sondern eine kategoriale Ordnung. Bemerkbare Neuronenverbände reagieren auf ähnliche Objekte.

5. Sehbahn, kortikale Reizverarbeitung 39

## V. Visuelle Raumerkennung

Die Analyse von Bewegung und Position von Objekten im Raum geschieht in V5 (Parietalregion der sekundären Sehrinde).

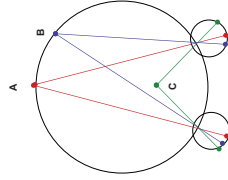


Bei weiter entfernten Objekten helfen relative Verschiebungen der Bilder naher und ferner Objekte (Parallaxe), perspektivische Bildanalyse sowie das Wissen um die tatsächliche Größe von Objekten.

5. Sehbahn, kortikale Reizverarbeitung 40

## V. Plastisches Sehen

Befindet sich ein Objekt weniger als ca. 30 cm vor den Augen, kann aus der Differenz der beiden Bilder, die vom linken und rechten Auge kommen, Entfernung und Größe des Objekts abgeleitet werden.



Beim Fixieren des entfernten Punktes (A) sind die Augen so ausgerichtet, dass der Punkt in der linken und rechten Fovea abgebildet wird.

Alle Punkte (B), die auf einem Kreis liegen, der durch A und die beiden Knotenpunkte der Augen geht, werden auf korrespondierenden Netzhautstellen abgebildet (Horopterkreis).

Liegt ein Punkt nicht auf dem Horopterkreis (C) differieren die Bilder vom linken und rechten Auge (Querdissparation) wobei durch die zentrale Verarbeitung ein plastischer Tiefeneindruck entsteht.

5. Sehbahn, kortikale Reizverarbeitung 41

## V. "Visuelle Intelligenz"

Für eine frisch geschlüpfte Schwarzrossel besteht „Mama“ („Papa“) aus zwei Kreisen, wobei der eine nur ein 1/3 des Durchmessers des anderen haben darf.



Für eine Kröte ist „Beute“ ein Rechteck das sich längs der längeren Achse bewegt und ein „Feind“ ein Rechteck das sich quer dazu bewegt.



Visuelle Intelligenz bezeichnet die Interpretation des Gesehenen.

5. Sehbahn, kortikale Reizverarbeitung 42

## V. Nichtinvasive Bestimmung von Hirnaktivität



Elektro-Enzephalographie (EEG)



funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT)



Lokalisierung und Co-Registrierung von EEG- und fMRT-Daten nach visueller Aktivierung mit Kanisza-Figuren. (aus Murray, J. Neurosci. 22(12), 2002)

5. Sehbahn, kortikale Reizverarbeitung

43

Zusammenfassung

44

## Zusammenfassung Sehvorgang im Auge

- Licht gelangt durch die Hornhaut (Bindegewebe aus sehr homogenen, parallel angeordneten Kollagenfasern) in das Auge
- Linse bündelt das Licht nach Durchtritt durch die Pupille, der Ziliarmuskel sorgt dafür, daß der Brennpunkt der Linse auf der Netzhaut liegt
- Photorezeptoren in der Netzhaut sorgen für die Umwandlung des optischen in ein neuronales (elektrisches) Signal
- Stäbchen sind auf Detektionsempfindlichkeit, Zapfen auf das hochauflösende Farbsehen bei Tage optimiert
- Vorverarbeitung des visuellen Signals in der Netzhaut, bevor es von den Ganglienzellen über den Sehnerv an das Gehirn weitergeleitet wird

## Zusammenfassung Sehbahn

- Die Sehbahn führt von der Netzhaut über den Thalamus zur Sehirnde
- Im chiasma opticum werden die Sehnerven getrennt, d.h. die Signale jeder Gesichtshälfte zur jeweils gegenüberliegenden Gehirnhälfte geleitet
- In den seitlichen Kniehöckern des Thalamus werden die Fasern der Ganglienzellen in zweifacher Hinsicht sortiert:
  - rechtes oder linkes Auge und
  - Bewegungssehen oder Farbsehen
- Verschaltung mehrerer Thalamusneuronen auf ein Neuron der Sehirnde sorgt für die Entstehung von zusammengesetzten rezeptiven Feldern
- Die Sehirnde zeigt drei deutliche Ordnungsprinzipien:
  - Okuläre Dominanzsäulen, Orientierungssäulen und Farbsäulen
  - Das Grundmodul der primären Sehirnde ist die Hyperkolumne (Größe: etwa 3 x 1 x 1 mm ). Sie verarbeitet die Information aus einem kleinen Bereich des binokularen Gesichtsfeldes

45

Zusammenfassung

## Zusammenfassung Bildverarbeitung in der Sehirnde

- Fast die Hälfte der Großhirnrinde dient der Verarbeitung visueller Signale
- Zur Wahrnehmung von Bildern werden visuelle Informationen registriert, analysiert, und interpretiert
- Aus der primären Sehirnde verlaufen zwei Leitungsstränge in die sekundäre Sehirnde: P- und M-Pfade
- Die sekundäre Sehirnde analysiert die Rohdaten, die die primäre Sehirnde aus der Netzhaut erhält
- Die Verarbeitung erfolgt parallelisiert in drei Stufen:
  - elementares Sehen, visuelle Objekterkennung, visuelle Raumerkennung
  - Verschiedene Abschnitte der Sehirnde sind auf diese unterschiedlichen Verarbeitungsstufen spezialisiert
- Die Kombination der drei Verarbeitungswege zu einer einheitlichen Wahrnehmung ist noch unverständlich
- Es existiert ein bidirektionaler Informationsfluß: das Gehirn stellt Arbeitshypothesen auf, die in umgekehrter Richtung von höheren Regionen zurück zu V1 überprüft werden

Zusammenfassung

46

## Zusammenfassung Kortikale Verarbeitungsschritte

- In V1 findet eine erste Eigenschaftsextraktion statt: Orientierung, Bewegungsrichtung, Kantengeschwindigkeit, Kontrast, Farbe, Form, Konturmerkmale
- Die Komplexität der untersuchten Merkmale des Objektes steigt mit jeder höheren Region im visuellen Kortex
- Die Informationen beider Verarbeitungsströme werden im Stirnlappen zu einer vollständigen Raum-Objekt- Repräsentation kombiniert
- Die Objekterkennung ist nach 150 ms abgeschlossen (lässt auf nur 5 - 10 neuronale Verarbeitungsschritte schließen)
- Das Sehen des menschlichen Gehirns beschränkt sich nicht auf die Analyse der aufgenommenen visuellen Reize. Es stellt ständig Vorhersagen auf, welche es auf entgegengesetztem Weg validiert.

Zusammenfassung

47

## Zum Abschluß der kortikalen Verarbeitungsschritte

Versuchen Sie, im folgenden Bild zu jedem Wort die Schriftfarbe zu nennen. Lesen Sie also nicht die Wörter selbst vor. Je schneller Sie es schaffen, desto besser schneiden Sie bei diesem Test ab.

**ROTGELB**  
**BLAUGELB**  
**SCHWARZ**  
**ROTBLAUROT**  
**SCHWARZ**  
**BLAUGELBROT**

Die Wahrnehmung der Farben steht im Konflikt zur Wahrnehmung der Wörter.

Zusammenfassung

48