

Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
Philosophische Fakultät
Informationswissenschaft
Proseminar Website Usability – Markus Daus

Die Anatomie und die Physiologie des menschlichen Auges

Vorgelegt von
Daniel Ritter
Matrikelnummer: 905396
daniel@daniel-ritter.de

Inhaltsverzeichnis

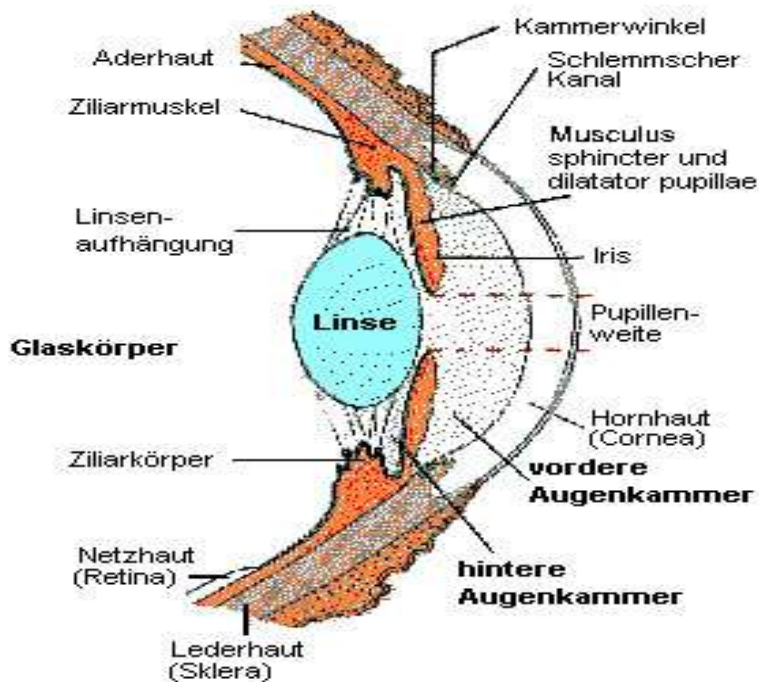
Einführung	3
Anatomie	4
Augapfel	5
Äussere Augenhaut	5
Mittlere Augenhaut	6
Innere Augenhaut	7
Schutzeinrichtungen	7
Der Bewegungsapparat	9
Physiologie	10
Optische Funktionen	10
Signalverarbeitende Funktionen der Netzhaut	12
Exkurs: Farbspektrum	13
Bipolarzellen der Retina	14
Nervus opticus	15
Visueller Cortex	15
Schlusswort	16
Quellenangaben	17

Einführung

Das Auge ist das wichtigste Sinnesorgan des Menschen. Untersuchungen bestätigen, dass 70 - 80 % der menschlichen Wahrnehmung über das Auge erfolgt. Die zentrale Rolle des Auges wird in der Informationstechnik genauso deutlich, wie in den meisten anderen Bereichen des Lebens. Einen Grossteil unserer Informationen nehmen wir mit dem Auge auf. Ob es nun ein Spaziergang durch den Park, die Lektüre einer Zeitung oder das Ansehen einer Web-Seite am Computer ist, das Auge ist ständig unser Fenster zur Welt. Daraus folgt zwingend, dass wir durch das Auge auch limitiert sind. Wir sind nur dazu in der Lage visuelle Reize aufzunehmen, die unser Auge empfangen und verarbeiten kann.

In dieser Arbeit werde ich die Physiologie des menschlichen Sehens beschreiben. Ich werde zunächst auf den anatomischen Aufbau des Auges eingehen. Danach werde ich die Funktionsweisen der einzelnen Teile des Auges erläutern. Ziel der Arbeit soll es sein, einen Überblick über die sehr komplexen Vorgänge der visuellen Sinnesverarbeitung zu schaffen.

Anatomie



Das Sehorgan besteht aus vier verschiedenen Hauptteilen welche alle verschiedene Funktionen abdecken. Der Augapfel (Bulbus oculi) ist das Rezeptororgan, also der Teil des Auges, welcher Lichtreize von aussen aufnimmt. Die Augenhöhle (Orbita), die Augenlider (Palpebrae), die Bindehaut (Tunica conjunctiva) und der Tränenapparat (Apparatus lacrimalis) dienen zum Schutz des Auges. Diese vier Vorrichtungen sind die so genannten Schutzeinrichtungen des Auges. Zum Bewegungsapparat des Auges gehören die äusseren Augenmuskeln (Mm. Bulbi) und die Tenon Kapsel (Vagina bulbi), welche den Augapfel wie eine Gelenkkapsel umgibt. Als Verbindung zwischen dem Auge und dem Gehirn dient der Sehnerv (Nervus opticus). Er verbindet die Sinnesepithel des Augapfels mit dem Gehirn.

Augapfel

Der Augapfel besitzt die Form einer minimal abgeflachten Kugel. Der

Durchmesser des Augapfels beträgt ca. 11,5 Millimeter. Der Augapfel hat nach vorne hin eine lichtdurchlässige Hornhaut, die Cornea. Der Rest ist lichtundurchlässig. Die Wände des Augapfels können in drei verschiedene Schichten eingeteilt werden. Die äussere Augenhaut (Tunica fibrosa bulbi) beinhaltet die weisse Augenhaut (Sclera) und die Hornhaut (Cornea). Zur mittleren Augenhaut gehören die Aderhaut (Choroidea), der Cillarkörper, der Strahlenkörper sowie die Regenbogenhaut (Iris). Teile dieser beiden Schichten, wie zum Beispiel die Regenbogenhaut und die weisse Augenhaut sind nach aussen hin sichtbar. Die innere Augenhaut zieht sich über die ganze innere Hinterseite des inneren Augapfels und wird Netzhaut (Retina) genannt.

Weiterhin ist der Augapfel in drei verschiedene Innenräume unterteilt. Die vordere Augenkammer (Camera anterior bulbi) bezeichnet den Bereich des Augapfels, welcher vor der Iris liegt. Die hintere Augenkammer ist analog dazu der Raum hinter der Iris. Der Rest des Augapfels wird vom Glaskörper (Corpus vitreum) eingenommen.

Direkt hinter der Iris in der hinteren Augenkammer ist die Linse aufgehängt. Hornhaut, Linse, Glaskörper und der Inhalt der Augenkammern, das Kammerwasser (Humor aquosus), eine galertartige Flüssigkeit mit der der Augapfel gefüllt ist bilden zusammen die optischen Medien des Auges.

Bruchmembran und Iris, zusammen mit der dazugehörigen Muskulatur, bilden den Nah- und Fernsehen ermöglichenden Akkomodationsapparat.

Die äussere Augenhaut

Sclera

Die Sclera ist eine weisse Hautschicht, welche fünf Sechstel des Auges überdeckt. Sie variiert in ihrer Dicke zwischen 1,5 Millimetern und 0,4 Millimetern. Ihre dickste Stelle ist in der Nähe des Sehnervaustritts an der Hinterseite des Augapfels. Sie besteht aus dicht gepackten Lamellen kollagener

Fasern. Sie ist der Schutzmantel des Augapfels. Die Sclera ist relativ stabil und flexibel. So kann sie das Auge vor Einflüssen von Aussen in einem begrenzten Masse schützen.

Cornea

Die Hornhaut ist vorne in die Sclera eingebettet und hat dieselbe Konsistenz. Im Gegensatz zur Sclera ist sie jedoch lichtdurchlässig. Durch die Hornhaut dringt das Licht in den Augapfel ein. Die Lichtdurchlässigkeit der Cornea wird durch einen anderen Quellungsgrad der Kollagenfasern und durch einen erhöhten Wassergehalt in der Haut erreicht. Die Hornhaut ist in die weisse Hautschicht vorne eingelassen und hat einen Durchmesser von ca. 12 Millimetern. Sie ist durch die stärkere Krümmung ihrer Hinterfläche am Rand verdickt. Die Hornhaut ist im Gegensatz zur Sclera mit sehr feinen Nerven durchzogen.

Die mittlere Augenhaut

Choroidea

Die Aderhaut nimmt den grössten Teil der mittleren Augenhaut ein und liegt als dünne, gefäß- und pigmentzellenreiche Schicht zwischen Sclera und Retina.

Corpus ciliare

Der Strahlenkörper ist ein verdickter Teil der mittleren Augenhaut, welcher von der Basis der Iris aus ungefähr ein Drittel in den Augapfel hinein reicht.

Iris

Die Iris liegt zwischen Cornea und Linse. Sie macht die Augenfarbe eines Menschen aus. Die Iris ist an Muskeln befestigt, die eine Vergrößerung und Verkleinerung der Fläche ermöglichen, mit welcher die Iris die Linse bedeckt. So kann der Lichteinfall in das Innere des Auges reguliert werden.

Innere Augenhaut

Die Netzhaut gliedert sich in 2 Teile, die Pars caeca retinae und die Pars optica retinae. Die Pars caeca umspannt den Teil der Auginnenwand, an den durch Lichteinfall durch die Pupille, kein Licht gelangen kann. Deshalb enthält dieser Teil der Netzhaut auch keine Rezeptoren um Lichtreize aufzunehmen. Der für das Umwandeln von Lichtreizen in Nervenreize verantwortliche Teil der Netzhaut ist die pars optica retinae. Auf diesem Teil der Netzhaut sind die Lichtrezeptoren des Menschen in Form von ca 120 Millionen Stäbchenzellen und ca 6-7 Millionen Zapfenzellen zu finden. An der Stelle schärfsten Sehens (Fovea centralis) befinden sich ausschliesslich Zapfenzellen in einer höheren Konzentration. An der Stelle, welche den Sehnerv mit der Netzhaut verbindet, befindet sich der „blinde Fleck“. An dieser Stelle fehlen sämtliche Nerven- und Sinneszellen. Deshalb ist dieser Bereich unfähig dazu einfallendes Licht zu verarbeiten.

Schutzeinrichtungen

Orbita



Die Augenhöhle wird durch zahlreiche verschiedene Knochen des Gesichtsschädels gebildet. Sie besitzt eine in etwa pyramidale Form mit einer nach innen liegenden Spitze. Der Grossteil des Auges liegt gut geschützt innerhalb dieser Knochenhöhle und ist so sehr gut vor äusseren Einflüssen geschützt.

Palpebrae

Die Augenlider dienen in erster Linie dazu, die Augenhornhaut ständig feucht zu halten. Die Hornhaut wäre bei Ausbleiben des Lidschlages oder beim Austrocknen aus anderen Gründen nicht mehr funktionsfähig. Natürlich sind die Lider auch unabdingbar für das Schlafen. Zusätzlich schützen sie die Augen über Reflexe vor dem Eindringen von Fremdkörpern und können die Augen reinigen, falls z.B. Staub oder Sand unter die Lider gelangen. Das Oberlid ist grösser als das Unterlid. Am äusseren Rand der Lider wachsen in zwei bis drei Reihen millimeterlange Haare, die Wimpern (Cilia). Direkt über den Augenlidern wachsen die Augenbrauen (Supercilium) welche verhindern, dass Schweißstropfen von der Stirn in das Auge abfliessen können.

Tunica conjunctiva

Die Bindehaut überspannt die Innenseite der Lider und ermöglicht ein fast reibungsloses Gleiten der Augenlider auf der Augenaussenhaut. Sie wird durch den Tränenapparat ständig feucht gehalten, um ein Austrocknen des Auges zu vermeiden.

Glandula lacrimalis

Die Tränendüse ist ein zweigeteiltes Organ welches auf beiden Seiten des Gesichtes im oberen Teil des Augenwinkels liegt. Die Drüse produziert ständig Tränenflüssigkeit, ein dünnflüssiges, eiweissarmes, durchsichtiges und geruchloses Sekret. Die Tränenflüssigkeit gelangt über winzige Kanäle zunächst in den Bindehautsack, von dort wird sie durch den Lidschlag in den Tränensee, und dann durch die Tränenkanäle in die Tränenpunkte im Auge

gesaugt. Der Tränenabfluss wird durch zwei weitere Kanäle auf der anderen Augenseite gewährleistet. Die verbrauchte Tränenflüssigkeit fließt in den unteren Nasengang. Am Tag werden pro Auge ca. 0,6-1,0 Milliliter Tränenflüssigkeit ausgeschüttet.

Der Bewegungsapparat

Die Augenmuskeln

Der Augapfel wird durch 6 Muskeln in der Augenhöhle sehr präzise bewegt. Die Muskeln werden eingeteilt in 4 gerade und 2 schräge Augenmuskeln. Alle Augenmuskeln sind an einem, die Orbita auskleidenden, Fettkörper befestigt. Eine Augenbewegung findet nie durch die Kontraktion eines einzelnen Muskels statt. Wird das Auge bewegt, so kontrahieren immer mindestens zwei der sechs Muskeln.

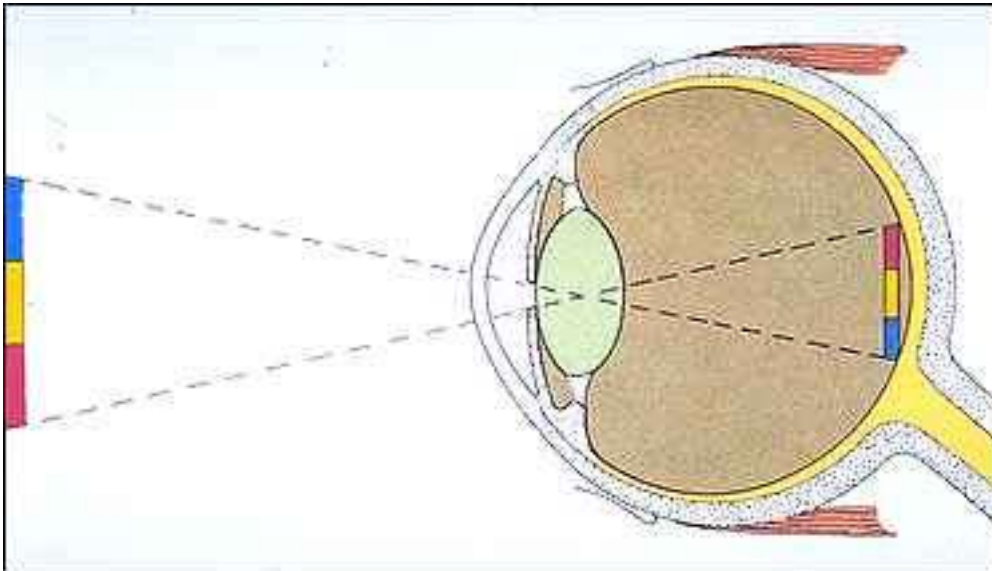
Nervus opticus

Der Sehnerv bildet die Verbindung vom blinden Fleck der Netzhaut zum Gehirn. Er ist ein ca. 4,5 Zentimeter langer Nervenstrang. Ca. 2,8 Zentimeter des Nervs liegen in der Augenhöhle, der Rest zieht sich in die innere Schädelgrube hinein. Innerhalb der Orbita hat er eine leichte S-Form um die Bewegungsfähigkeit des Augapfels sicherzustellen. Im Schädelinneren ist der Sehnerv schliesslich nach ca einem Zentimeter mit der Sehnervkreuzung (Chiasma opticum) verbunden.

PHYSIOLOGIE

Die Funktionen des Auges sind zweigeteilt. Ein variables optisches System sorgt dafür, dass Licht verschiedenster Intensität in das Auge einfallen kann und dort in verschiedener Stärke gebrochen werden kann. Dieses einfallende Licht wird auf die Netzhaut projiziert. Die Netzhaut leistet eine Umsetzung der Lichtreize in Nervenreize. Diese Nervenreize können vom Gehirn verarbeitet werden, so dass im Kopf ein Abbild der Umwelt entstehen kann.

Optische Funktionen



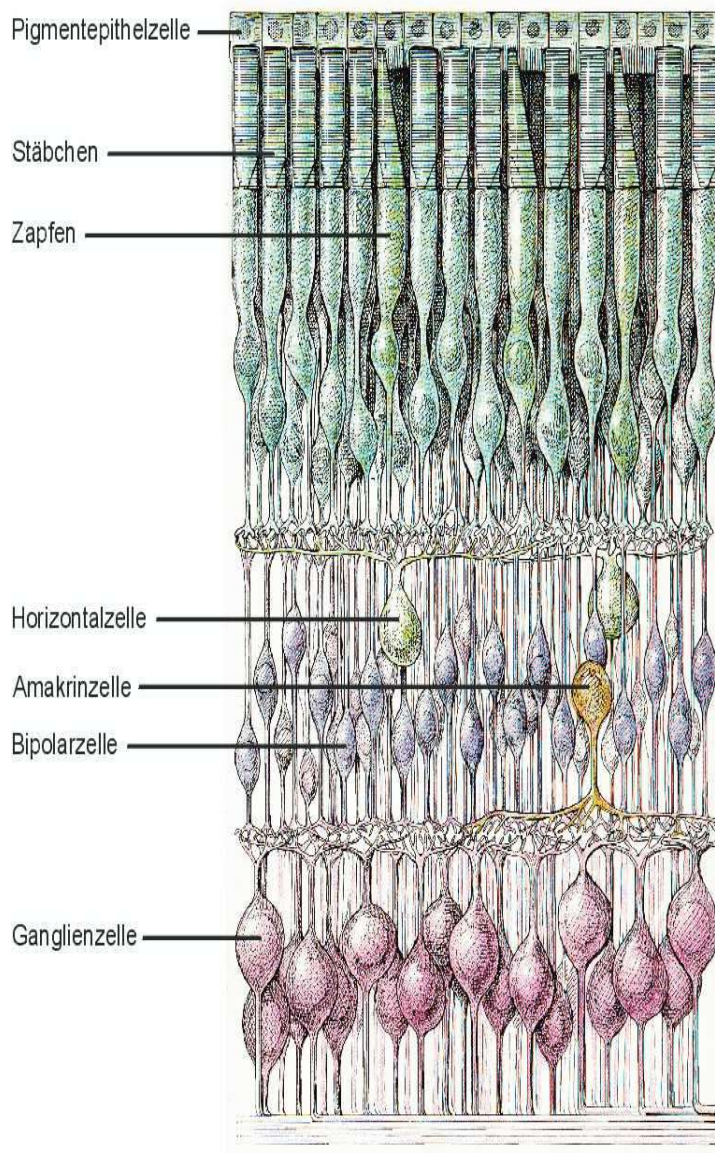
Die optischen Funktionen des Auges sind mit denen einer klassischen Fotokamera zu vergleichen. Die Hornhaut, die vordere Augenkammer und die Linse bilden das Objektiv. Diese Teile des Auges zusammen brechen das Licht und werfen ein umgekehrtes Abbild der Aussenwelt auf die Netzhaut. Die Linse kann durch die Augenmuskeln bewegt werden, so dass sie verschiedene Krümmungsgrade erhält. Durch die verschieden starke Krümmung ist es möglich Nah und Fern scharf zu sehen. Für das scharfe Sehen von nahen Dingen ist eine starke Krümmung der Linse nötig, für weit entfernte Dinge eine weniger starke bis nicht vorhandene Krümmung. Durch den Augeninnendruck begradigt sich die Linse wieder von selbst,

nachdem sie durch die Muskelanspannung gekrümmt wurde.

Ein gesundes Auge kann eine perfekte Brechung des Lichtes gewährleisten so dass das Abbild genau auf und um den Punkt des schärfsten Sehens projiziert werden kann. Verschiedene Krankheiten wie zum Beispiel die Nahsichtigkeit, die Fernsichtigkeit und die Alterssichtigkeit machen die richtige Brechung des Lichtes im Auge unmöglich. Es erscheint kein scharfes Bild mehr auf der Netzhaut. Aus diesem Grund wird dann durch Sehhilfen eine „Vorbrechung“ des Lichtes ausserhalb des Augapfels ausgeführt, so dass das in seiner Funktionalität behinderte Auge mit dem vorgebrochenen Licht doch noch ein scharfes Bild erzeugen kann.

Die Iris regelt die Intensität des Lichteinfalls in das Auge. Auch sie kann durch Muskeln zusammengezogen werden. Passiert dies, so vergrössert sich die Pupille und es kann mehr Licht in den Augapfel eindringen. Dies ermöglicht das klare Sehen auch bei schlechten Lichtverhältnissen. Bei zu starker Lichteinstrahlung wird die Iris grösser, so dass sie einen Grossteil der Pupille bedeckt. Ein grosser Teil des Lichtes wird daran gehindert ins Augennere zu gelangen. Dies ist Vergleichbar mit der Funktion einer Blende an einer Fotokamera. Während man auf die Krümmung der Augenlinse bewusst Einfluss nehmen kann ist die Funktion der Iris vollkommen automatisiert. Die Iris eines jeden Auges wird synchron gesteuert. Sie werden immer beide gleichzeitig in geöffnete oder geschlossene Position gebracht. So hat man im Dunklen sehr grosse Pupillen, da die Iris sich maximal zurückgezogen hat um möglichst viel des Restlichtes ins Auge zu lassen. Bei einem Blick in die Mittagssonne hingegen verschliesst sie sofort einen Grossteil der Pupille um die Augen zu schützen und einen Teil des überschüssigen Lichtes abzuwehren.

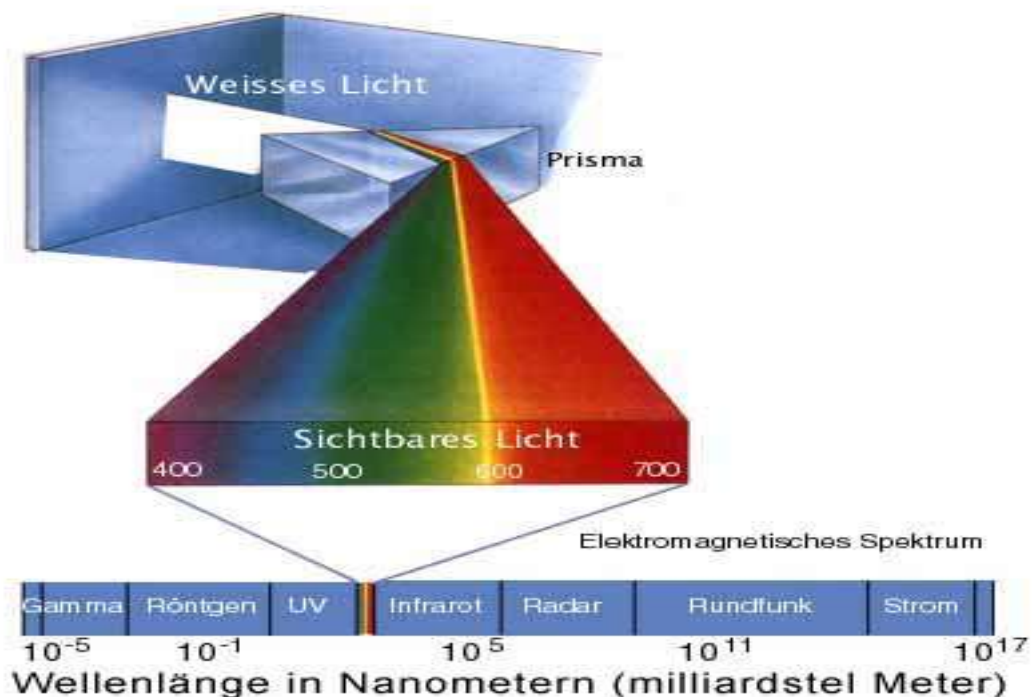
Signalverarbeitende Funktionen der Netzhaut



Die Stäbchen und Zapfen in der Retina dienen dazu die Lichtreize aufzunehmen und in elektrische Reize umzuwandeln, welche schliesslich vom Gehirn zu dem Sinneseindruck Sehen verarbeitet werden. Es wird kein wirkliches Bild übertragen, sondern nur ein Impulsmuster, welches das Hirn interpretieren kann. Hierbei fallen den Stäbchen und den Zapfen als Rezeptoren unterschiedliche Aufgaben zu. Während die Stäbchen nur die Intensität des Lichtes wahrnehmen können, sind die Zapfen für die Wahrnehmung von Farben und Licht verantwortlich. Die Stäbchen „messen“ also die Intensität des Lichtes, die Zapfen können Licht verschiedener Wellenlängen unterscheiden.

Chemisch wird das Hell- und Dunkelsehen durch den sich in den Stäbchen befindenden Sehfärbstoff Rhodopsin geleistet, welcher bei Lichteinfall chemisch zerfällt. Bei Lichteinfall zerfällt das Rhodopsin in das Eiweiß Opsin und in den Vitamin A, aus denen es durch Energieaufwand wieder aufgebaut wird. Bei starkem Licht ist das Rhodopsin so gut wie ausgebleicht, bei Dunkelheit ist es komplett vorhanden. Deshalb kann bei einem Mangel an Vitamin A auch Nachtblindheit entstehen, es fehlt eines der Elemente, die zum Sehen in relativer Dunkelheit benötigt werden. Die chemische Funktionsweise der Zapfen ist nicht bekannt. Jedoch ist leicht feststellbar, welche Farben von ihnen aufgenommen werden können. Sie entsprechen dem vom Menschen wahrnehmbaren Farbspektrum.

Exkurs: Das vom Auge wahrnehmbare Farbspektrum



Das elektromagnetische Spektrum umfasst eine grosse Breite von vom Menschen messbarer Wellen. Das von den Zapfen wahrnehmbare Spektrum ist im Vergleich zur Gesamtbreite sehr gering. Der Mensch kann mit den Zapfen seiner Netzhaut Wellenlängen zwischen 380 und 760 Nanometern

wahrnehmen. Hier entsprechen die Wellenlängen den wahrnehmbaren Farben. Nach der medizinischen Duplizitätstheorie des Sehens werden Nachts und bei Dämmerung die Zapfen nicht genutzt oder funktionieren zumindest nicht richtig. Bei schlechten Lichtverhältnissen sieht man die Welt in hell-dunkel Abstufungen. Schon der Volksmund sagt: „Nachts sind alle Katzen grau“.

Die Bipolarzellen der Retina

Nach der Rezeption der Reize durch die Zapfen und Stäbchen werden die Reize durch einen chemischen Transmitterprozess an die tiefer in der Retina liegenden Bipolarzellen weitergeleitet. Nach „Wanderung“ des Reizes durch diese Schicht erreicht der Reiz schliesslich die Ganglienzellen und über diese den Sehnerv und damit den Weg zum Gehirn. Auf dem Weg durch die verschiedenen Schichten der Netzhaut wird der Reiz bereits vorverarbeitet. Die Nervenzellen in der Retina korrespondieren miteinander auf chemischer Basis und verändern so den Reiz schon bevor er das Gehirn erreicht. Es wird davon ausgegangen, dass das Reizbild bereits in der Retina verbessert wird und zum Beispiel Schärfe und Farbbrillanz „vorgeregelt“ werden. Die Netzhaut arbeitet dabei wie ein neuronaler Rechner, ähnlich wie das Gehirn selbst. Interessant ist auch, dass die Retina in der embryonalen Entwicklung noch ein Teil des Gehirns ist und sich von diesem ablöst. So wird die Rechenarbeit der Retina etwas klarer. Um die Funktionsweisen der einzelnen Retinaschichten exakt nachvollziehen zu können, ist wohl ein Medizinstudium notwendig, da ich selbst nach mehrmaligem Lesen der relevanten Passagen mit vielen Fragen im Kopf zurückgeblieben bin. Ich möchte den interessierten Leser hier auf medizinische Literatur verweisen.

Die sogenannte Flimmerfusionsfrequenz gibt die Anzahl der Lichtreize an, die nötig sind um ein flimmerfreies Bild in unserem Gehirn zu erzeugen. Beim Stäbchensehen sind dies 22-25 Lichtreize pro Sekunde, beim „Zapfensehen“ an die 80 Reize pro Sekunde. Trotzdem kann das Auge nach Arbeit an Computermonitoren oder nach zu langem Fernsehen ermüden und die Reize

nicht mehr richtig an das Gehirn übermitteln. Das liegt daran, dass diese Werte nur gelten wenn das Auge beim Sehen nicht bewegt wird. Beim Fernsehen und bei Computerarbeit wandert das Auge ständig auf dem Bildschirm herum. So wäre theoretisch nur ein 25 Hertz-Bild notwendig um flimmerfreies arbeiten an Rechnern zu ermöglichen. In Wirklichkeit liegt der Wert für ein angenehmes Arbeitsbild, welches keine Ermüdung oder Kopfschmerzen auslöst bei über 100 Hertz. Bei niedrigeren Frequenzen eines künstlichen Bildes erzeugt die Belichtung der Netzhaut in Verbindung mit einer Augenbewegung ständig eine scheinbare Unschärfe, welche durch das Gehirn kompensiert werden muss. Das Sehen ist dann anstrengend für Auge und Gehirn.

Nervus opticus

Nach der Rezeption des Bildes und der chemischen Vorverarbeitung durch die Netzhaut wird der Sehreiz von den Ganglienzellen in einen elektrischen Nervenreiz transformiert, welcher über den Sehnerv in das Gehirn weitergeleitet wird. Zunächst erreicht der Reiz das Sehkreuz (Chiasma Nervi Opticum). Hier kreuzen sich die Sehnerven beider Augen. Hier wandern die Sehnervenfasern des einen Auges mit den Axonen des anderen Sehnervs weiter durch den Sehschacht (Tractus opticus).

Nach der Kreuzung erreichen die Nerven die erste Schaltstelle für das Sehen im Gehirn, die beidseitig angelegten *Corpi geniculatum laterale*. Von hier aus werden die Reize in die in der Mitte des Gehirns liegende Prätectale Region und in den linken und rechten visuellen Cortex in der Hinterseite des Gehirns weitergeleitet. Alle diese Teile des Gehirns sind doppelt vorhanden oder zweigeteilt.

Visueller Cortex

Im visuellen Cortex sorgen verschiedene „corticale Säulen“ für die Verarbeitung der Reize in ein von uns wahrgenommenes Bild der Aussenwelt. Säulen des rechten und des linken Auges wechseln sich während der Arbeit ab. Verschiedene Säulen verarbeiten verschiedene Qualitäten der eingehenden Signale. So reagieren manche der Säulen auf Farben, andere auf

Helligkeitsreize, andere auf Bewegungsreize und andere auf Strukturerefassungsreize. Durch Berechnungen des Gehirns können nun Gegenstände vom Hintergrund losgelöst werden und als Gegenstände erkannt werden. Bewegungen werden deutlich. Auch Gegenstände die aus verschiedenen Positionen gesehen werden, können trotzdem als eine Sache angesehen werden. So nehmen wir ein Auto, welches an uns vorbeifährt immer als dasselbe Auto wahr. Auch wenn wir es einmal von vorne, einmal von der Seite und einmal von hinten sehen. Der visuelle Cortex leistet auch das Zusammensetzen von 2 getrennten Bildern, welche von beiden Augen geliefert werden in ein einziges Bild. Dazu werden die „Bildraten“, welche im sich überschneidenden Feld beider Augen liegen übereinandergelegt. Auch das Problem des weiter oben erwähnten „blinden Flecks“ wird so gelöst. Die Informationen die im blinden Fleck des einen Auges verloren gegangen sind, werden vom anderen Auge nachgeliefert und man hat den Eindruck eines kompletten Bildes. Beim Sehen werden auch Erfahrungswerte weiterverarbeitet. Durch das Wissen um wahrscheinliche Größen von gesehenen Dingen ist eine Entfernungsabschätzung möglich. Sieht man zum Beispiel einen winzigen Wohnblock, geht man davon aus, dass er sich in der Ferne befindet, nicht davon dass er ganz nah ist und einfach nur sehr klein.

Schlusswort

Da das Bild, welches von unserer Umwelt im Kopf entsteht, nur eine verarbeitete Illusion elektromagnetischer Reize ist, sind wir in unserer visuellen Wahrnehmung sehr limitiert. Man könnte sich durchaus Tiere oder Insekten mit einem anderen Augenaufbau vorstellen, welche vielleicht eine grössere Breite des Farbspektrums wahrnehmen können oder deren Gehirne die eingehenden Reize einfach anders deuten und komplett andere Bilder der Welt erstellen. Wir können sogar unsere Wahrnehmung der Welt durch Medikamente, Drogen oder optische Werkzeuge so weit verändern, dass sie mit dem altbekannten Weltbild nicht mehr viel gemein hat. Es ist bekannt, dass zum Beispiel die Werbung sehr stark mit optischen Reizen arbeitet und diese in Formen zu bringen versteht, welche besondere Wirkungen auf unsere Wahrnehmung und auch auf

die daraus entstehenden Gefühlswelten ausüben.

Aus diesen Gründen sollte man sich des Öfteren fragen, ob man seinen Augen im Moment gerade trauen sollte oder nicht.

Quellenangaben

Schieber, Schmidt – Anatomie, 4. Auflage, Springer Verlag

Schmidt, Thews – Physiologie des Menschen , 23. Auflage, Springer Verlag