

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Forschung	3
1.3 Die CAVE an der TU Berlin - eine plausible, stereoskopische, virtuelle Umgebung	5
2 Grundlagen des stereoskopischen Sehens	7
2.1 Physiologische Grundlagen	7
2.2 Stereoskopisches Sehen	9
2.3 Wahrnehmung der Raumtiefe	11
2.4 Raumwahrnehmung für die stereoskopische Videoproduktion und die CAVE	15
3 Technische Realisation einer virtuellen Umgebung	17
3.1 Grundlagen und Grenzen der visuellen Wahrnehmung	17
3.1.1 Sichtbares Licht	17
3.1.2 Hellempfindlichkeit und Empfindungsbereich	18
3.1.3 Farbwahrnehmung	20
3.1.4 Sensumotorik	22
3.1.5 Örtliches Auflösungsvermögen	23
3.1.6 Zeitliches Auflösungsvermögen	25
3.2 Adaption der Technik an die visuelle Wahrnehmung	26
3.2.1 Optische Aufnahmesysteme und Parameter	26
3.2.2 Optische Wiedergabesysteme und Parameter	35
3.2.2.1 Aktive Projektionssysteme	37
3.2.2.2 Passive Projektionssysteme	38
3.2.3 Verfahren der Stereoskopie	40
3.2.3.1 Verfahren für stereoskopische Filmaufnahmen	41
3.2.3.2 Verfahren für stereoskopische Filmwiedergabe	42
3.3 Grundlagen und Grenzen der auditiven Wahrnehmung	48
3.3.1 Schall	48
3.3.2 Physiologische Grundlagen	50
3.3.3 Auditive Wahrnehmung	51
3.3.4 Auditive Lokalisation	53
3.3.5 Auditive Wahrnehmung in geschlossenen Räumen	55
3.4 Adaption der Technik an die auditive Wahrnehmung	57
3.4.1 Akustisches Aufnahmesystem für eine CAVE	57
3.4.1.1 Mikrofonierung zur akustischen Akquise	57

3.4.1.2 FABIAN – ein System zur automatisierten Akquise kopfbezogener BRIRs	59
3.4.2 Akustisches Wiedergabesystem für eine CAVE.....	61
4 Nachhallfreie Audioproduktion eines Streichquartetts	64
4.1 Vorbereitung.....	64
4.2 Durchführung.....	66
4.3 Postproduktion	71
4.4 Fehler und Hemmnisse bei nachhallfreien Audioproduktionen	73
5 Stereoskopische Videoproduktion und Postproduktion eines Streichquartetts	74
5.1 Ermittlung der Perspektiven	75
5.2 Vorbereitung.....	78
5.3 Durchführung.....	79
5.4 Postproduktion und Visual Composing	84
5.5 Fehlerquellen und Probleme bei stereoskopischen Videoproduktionen.....	93
6 Integration der Streichquartett-Panoramen in die CAVE	95
7 Zusammenfassung und Ausblick	98
Abkürzungen	100
Quellenverzeichnis.....	102
Anhang	108
Abbildungsverzeichnis	121

Alle erwähnten Firmen- und Markennamen gehören ihren Eigentümern.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Fähigkeit zur dreidimensionalen Wahrnehmung des Raumes ist ein wichtiges Resultat der evolutionären Entwicklung des Menschen, das in großem Maße zu seinem Überleben beigetragen hat. Mit Hilfe der zwei Augen, deren Sichtfelder sich überlagern ist das Gehirn in der Lage, ein visuelles, räumliches Abbild der Umwelt zu konstruieren und eine genaue Abschätzung der Entfernung zu Objekten zu ermöglichen. Ebenso ist die Ortung und räumliche Wahrnehmung von Schallwellen mit Hilfe der Ohren und die neuronale Weiterverarbeitung der daraus resultierenden auditiven Signale möglich. Obwohl der Mensch fünf Sinne besitzt, werden zur räumlichen Erfassung der Umwelt im Wesentlichen der dominierende visuelle und der auditive Sinn eingesetzt. In unmittelbarer Umgebung spielt der taktile (Tast) Sinn noch eine Rolle, jedoch nicht bei Distanzen, die über die Armlänge, die natürliche Grenze taktiler Erfassungen, hinausgehen.

Um die im Fokus stehende Raumwahrnehmung unter Laborbedingungen untersuchen zu können, bietet sich die Schaffung einer virtuellen Umgebung an. Je höher in dieser so genannten virtuellen Realität (VR¹) der Grad der Immersion –das Gefühl des „Eintauchens“– für die Probanden ist, umso plausibler ist die VR. Da der Mensch seine Informationen für die Wahrnehmung aus den visuellen und der auditiven Sinneseindrücken bezieht, muss eine virtuelle Umgebung so gestaltet sein, dass die erzeugten Informationen für die Sinnesindrücke denen der Realität möglichst gleichen [1, S. 84]. Die Generierung dieser die Realität repräsentierenden Informationen stellt eine große Herausforderung an eine technische Realisierung einer VR dar, insbesondere hinsichtlich der vom visuellen Sinn zu erfassenden 50 Milliarden bzw. der vom auditiven Sinn zu erfassenden eine Million Bit je Sekunde an Information [2, S. 13].

Die DFG-Forschergruppe SEACEN² hat sich im Rahmen des Teil-Projektes P9 „audio-visual perception of acoustical environments“³ das Ziel gesetzt eine möglichst plausible, virtuelle Umgebung zu schaffen, um den Einfluss akustischer und optischer Eigenschaften von Konzertsälen als Stimuli für die visuelle und auditive Raumwahrnehmung zu untersuchen. Dazu stellt die Forschergruppe am Fachgebiet Audiokommunikation der TU Berlin eine opto–akustische virtuelle Umgebung - eine CAVE⁴- her. Die CAVE besteht aus einem stereoskopischen 180° umfassenden Panorama-Projektionssystem, das mit Binauraltechnik⁵ zu einer

¹ Virtual Reality

² Simulation and Evaluation of Acoustical Environments – Simulation und Evaluierung von akustischen Umgebungen

³ audio-visuelle Wahrnehmung von akustischen Umgebungen

⁴ CAVE - Cave Automatic Virtual Environment – mittels Computer simulierte künstlich erschaffene Umgebung

⁵ Verfahren zur Reproduktion realer Schallfelder [2, S. 14]

plausiblen virtuellen Umgebung kombiniert wurde (Abbildung 1). Darin werden den Probanden sechs akustische und optische virtuelle Räume dargeboten, die unabhängig voneinander variiert werden können. Durch die Integration der stereoskopischen Halbpanoramen von sechs Konzertsälen mit deren jeweiliger binauraler¹ Klangcharakteristik und einem im Vordergrund befindlichen stereoskopisch aufgenommenen Streichquartett soll eine plausible Immersion bei den Probanden erzeugt werden. Des Weiteren können insbesondere *cross modale*² Effekte zwischen visueller und auditiver Wahrnehmung, die beispielsweise bei der Kombination eines stereoskopischen Konzertsaal-Hintergrundbildes mit der Binaural-Charakteristik eines anderen Konzertsaaes auftreten, untersucht werden (Abbildung 2). Die Auswertung der physikalischen und perzeptiven Messergebnisse soll bei der Schaffung eines empirischen Modells helfen. Mit dessen Hilfe sollen die Parameter der Raumwahrnehmung auf der Grundlage der physikalischen Raumeigenschaften prognostiziert werden können. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen zur Erhöhung des Verständnisses von intramodalen Prozessen der Wahrnehmung beitragen. Sie sind eine wichtige Voraussetzung für die Weiterentwicklung der Simulationstechnik und der Gestaltung von audio-visuellen, virtuellen Umgebungen [3, S. 189 -190].

Die vorliegende Arbeit führt zunächst in die Grundlagen des menschlichen stereoskopischen Sehens, in grundlegende stereoskopische Aufnahme- und Wiedergabeverfahren in der Videotechnik und in die technischen Grundlagen zur Realisation einer virtuellen Umgebung ein. In Kapitel 4 wird die Schaffung von technischen Voraussetzungen und die Durchführung der Audioaufnahmen eines Streichquartetts im reflexionsarmen Raum am Institut für Technische Akustik der TU Berlin dokumentiert. Die Aufnahmen dieser nachhallfreien Audioproduktion werden anschließend mit den bereits akquirierten Impulsantworten der sechs Konzertsäle gefaltet und können so den Ohren als binaurales, plausibles Schallfeld dargeboten werden. In Kapitel 5 wird die stereoskopische Greenscreen-Videoaufnahme³ des

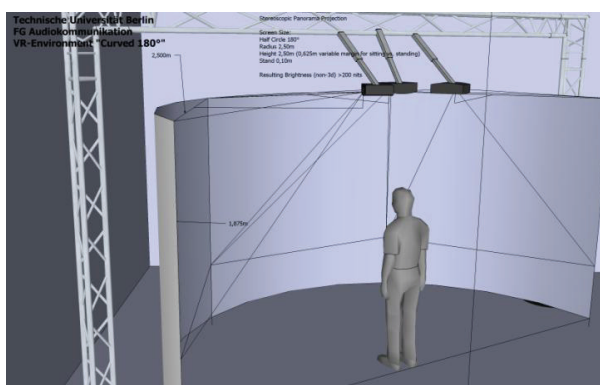


Abbildung 1: Prinzip der CAVE an der TU Berlin
[3, Abb. S. 209]

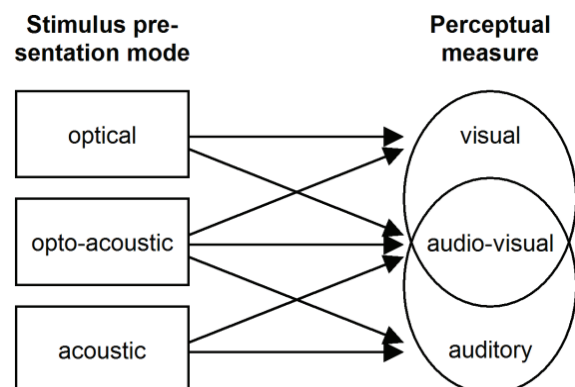


Abbildung 2: Untersuchung cross modaler Effekte
[3, Abb. S. 211]

¹ lat. „mit beiden Ohren“

² Überschneidungseffekte

³ Film-/ Videoaufnahmetechnik zur Erzeugung eines transparenten Bildhintergrundes

Streichquartetts erläutert. Unter Beachtung von Perspektiventoleranz und korrekter Montage von stereoskopischem Streichquartet-Greenscreen-Video mit den Konzertsaal-Panoramen folgt die Darstellung der stereoskopischen Video-Postproduktion. Durch synchrone, aber variable Kombination der binauralen Audioaufnahmen der sechs Konzertsäle mit dem im Vordergrund befindlichen Streichquartet-Video und den stereoskopischen Hintergrundpanoramen der sechs Konzertsäle entstand die in Kapitel 6 beschriebene Integration zu einer virtuellen Umgebung - der CAVE. Nach einer Zusammenfassung wird ein kurzer Ausblick in die weitere Entwicklung und mögliche Anwendungsbereiche des vorliegenden variablen, binauralen, stereoskopischen 180° umfassenden Panorama-Projektionssystems gegeben.

1.2 Stand der Forschung

Um eine virtuelle Realität mit einer plausiblen Immersion zu schaffen, ist es notwendig, den Wahrnehmungsprozess zu verstehen. Die in diesem Zusammenhang auftretenden Fragen grenzen z.T. an Bereiche der Philosophie in Bezug auf grundsätzliche Fragestellungen wie: Was ist Realität? Was nimmt der Mensch mittels seiner Sinne von der Umwelt wahr? Wie kann die erfahrbare Realität mittels Technik so realistisch wie möglich abgebildet werden? Um die komplexen Mechanismen der menschlichen Wahrnehmung zu verstehen, wurde ein Modell entwickelt, das den Wahrnehmungsprozess in einzelne Schritte untergliedert (Abbildung 3). Die kreisförmige Anordnung veranschaulicht die Dynamik und die ständigen Veränderungen des Prozesses [4, S. 4]. Die vom Menschen erfassten Reize (beachtete Stimuli) erregen die Rezeptoren der Sinnesorgane. Auf der Netzhaut (Retina) des Auges entsteht ein Abbild des beachteten optischen Reizes, und der von den Gehörknöchelchen auf das Trommelfell auftreffende Schall wird als erregende Schwingung weiter ins Innenohr geleitet. Die Sinneszellen wandeln die Erregungen in elektrische Signale um (Transduktion), die über neuronale Netze an das Gehirn weitergeleitet werden. Im Seh- bzw. Hörzentrum erfolgt die neuronale Verarbeitung der in elektrische Signale transformierten Stimuli (Abbildung 4). Die Auswertung der zahlreichen neuronalen Signale ermöglicht schließlich eine bewusste, sensorische Erfahrung – die Wahrnehmung. Um die wahrgenommenen Reize in zutreffende Kategorien einordnen zu können, ist *Erkennen* notwendig. Der Unterschied zwischen Wahrnehmung und Erkennen wird bei der Betrachtung von Dr. P., dessen Erkennen nur fehlerhaft funktionierte, deutlich. So wurde von ihm eine wahrgenommene Parkuhr fälschlicherweise als Mensch erkannt, obwohl bei ihm keine Beeinträchtigung im Sehen bestand. Die Ursache war ein Hirntumor, der die Fähigkeit, bekannte Objekte korrekt zu erkennen bzw. einzuordnen, verhinderte (Agnosie). Während der neuronalen Verarbeitung werden die aufgenommenen Informationen mit bereits vorhandenen im Gehirn

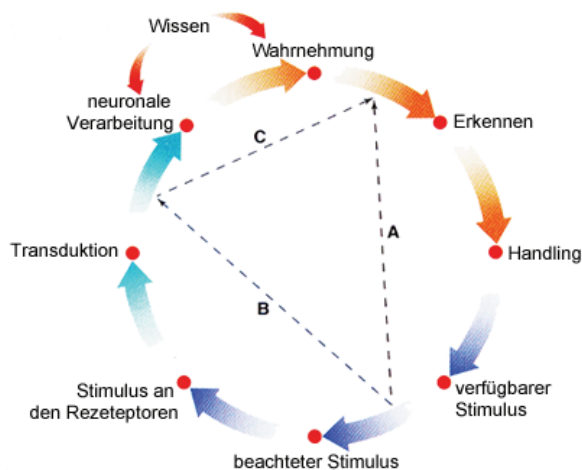


Abbildung 3: Wahrnehmungsprozess
[4, Abb. S. 4]

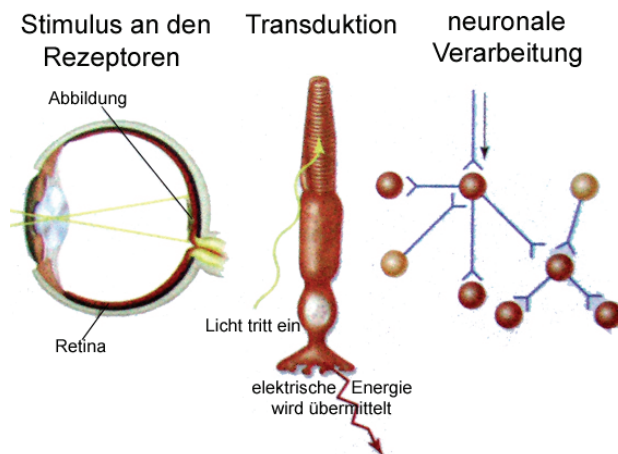


Abbildung 4: drei Teilschritte des Wahrnehmungsprozesses [4, Vgl. Abb. S. 5]

gespeicherten Informationen bzw. vorhandenem Wissen verglichen und können so genauer klassifiziert und bewertet werden. Als wichtiges Resultat des Wahrnehmungsprozesses wird von einigen Forschern *Handlung* insbesondere zur Sicherung des Überlebens angesehen. Ein genaues Abbild der Umwelt schafft Voraussetzungen zur Handlung und ermöglicht dadurch dem Menschen, wie auch anderen Lebewesen, eine optimale Anpassung an die Umwelt. Da sich die Umwelt bzw. der Bezug zu ihr (z.B. durch eine vorangegangene Handlung) ständig ändert, ist eine permanente Wahrnehmung der Umwelt und eine entsprechend angepasste Handlung notwendig. Daraus resultiert die kreisförmige Anordnung aller Teilschritte des Wahrnehmungsprozesses (Abbildung 3) [4, S. 4-7].

Diese Erkenntnisse aus der Wahrnehmungspsychologie wurden bzw. werden z.T. bei der Erzeugung virtueller Umgebungen berücksichtigt. So ist neben der Erzeugung von stereoskopischen Bildern und Filmen mit immer besserer Qualität und Auflösung, die Synchronität sowie eine hohe zeitliche Auflösung von Filmen wichtig. Insbesondere sollte die virtuelle Umgebung *Handlung* als Reaktion auf die (virtuelle) Wahrnehmung erlauben, ohne dass dabei Beeinträchtigungen der Immersion entstehen. Das war bei den seit Anfang der 70er bis Mitte der 80er Jahre des 20. Jh. entwickelten HMDs¹ nicht immer der Fall. Dabei sind zwei direkt vor den Augen des Benutzers positionierte kleine Anzeigen in einem helmähnlichen Gehäuse untergebracht [1, S. 87]. Während sich der Benutzer durch Kopfbewegungen in der virtuellen Welt umsehen kann (Handlung), werden aufgrund des HMD-Gewichtes der taktile und auch der Gleichgewichtssinn gereizt, wodurch die Immersion gestört werden kann. Die durch diese und weitere Nachteile wie eine geringe Bildauflösung und schnelles Ermüden gekennzeichneten HMD-Systeme wurden zunehmend durch Projektionssysteme mit größeren Darstellungen in hoher Auflösung verdrängt [1, S. 87].

¹Head Mounted Display – eine mit dem Kopf verbundene Anzeige

Anfang der 90er Jahre des 20. Jh. wurde in Chicago an der University of Illinois die CAVE entwickelt (Abbildung 5). Diese mittels 3D Projektoren und leistungsfähigen, bildverarbeitenden Computern auf Leinwänden realisierte würfelförmige virtuelle Umgebung befreite die Anwender von den schweren HMD-Systemen und machte eine neue Art der virtuellen Realität erfahrbar (Abbildung 6). Obwohl VR-Anwendungen in Bereichen wie Automobilindustrie, Medizin oder Architektur eingesetzt werden [5, S. 9-12], sind Zusammenhänge bzw. Wechselwirkungen zwischen Sehen und Hören bislang nur wenig erforscht. Es existieren zahlreiche Studien im Bereich Wahrnehmung von Raumakustik, die sich jedoch darauf konzentrieren, technisch messbare („objektive“) Raumeigenschaften zu finden mit deren Hilfe Voraussagen über („subjektive“) Raumwahrnehmungen wie Raumeindruck, auditiv wahrgenommene Raumgröße oder Präsenz möglich sind. Nur wenige Studien beziehen sich auf die technische Simulation von Realität in der Raumakustik. Die bisher vorwiegend empirisch untersuchten audio-visuellen Wechselwirkungen sind im Wesentlichen noch Teil der Grundlagenforschung [3, S. 189-192]. Eine der wenigen vergleichbaren CAVE-Anwendungen wurde an der RWTH Aachen umgesetzt [8]. Mit drei Teil-Projekten zu raumakustischen Themen u.a. „Perceptual-based optimization of room acoustic auralization parameters“ ist die RWTH Aachen ebenfalls in das SEACEN-Projekt mit eingebunden [9].

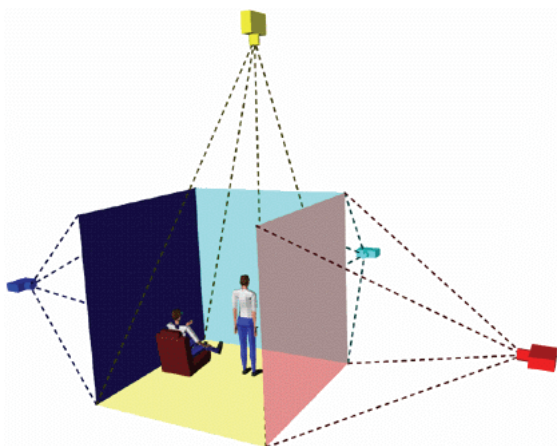


Abbildung 5: Prinzip-Aufbau einer CAVE [6]

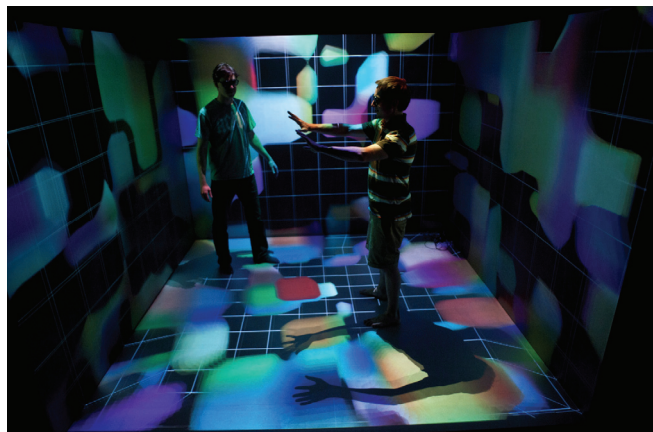


Abbildung 6: in einer CAVE [7]

1.3 Die CAVE an der TU Berlin - eine plausible, stereoskopische, virtuelle Umgebung

Das Ziel von VR Anwendungen besteht darin, Sinneswahrnehmungen zu erzeugen, die eine plausible Immersion, also ein vollständiges Eintauchen in die virtuelle Welt, ermöglichen [1, S. 84]. Dabei liegt die auf Teilaspekte fokussierte Forschungsstrategie beim SEACEN-Projekt, im Gegensatz zu den wenigen zum Thema *Audio Visuelle Raumwahrnehmung* existierenden Studien, auf einem integrierten, opto - akustisch ausgewogenen Ansatz. Durch die Schaffung methodischer Voraussetzungen soll die experimentelle Trennung von akustischen und optischen Einflüssen auf die Raumwahrnehmung ermöglicht werden. Dazu

Um die hohen Anforderungen einer plausiblen Immersion zu erreichen, wurden für die TUCAVE (Abbildung 7) neben qualitativ hochwertigem Equipment, wie fünf hoch auflösenden, mit hoher Bildfrequenz betriebenen Projektoren und stereoskopischen Shutter-Brillen, insbesondere neue Verfahren für die Daten-Akquise verwendet. Auf diese Verfahren, welche Daten liefern, die eine plausible, virtuelle Umgebung erzeugen können, wird in dieser Arbeit in den Kapiteln 4 zur Audioproduktion und Kapitel 5 zur Videoproduktion eingegangen.



2 Grundlagen des stereoskopischen Sehens

Um eine plausible, virtuelle, stereoskopische Umgebung zu erzeugen, sind Kenntnisse über das stereoskopische menschliche Sehen notwendig. Diese Grundlagen sollen im Folgenden dargelegt werden. Einführend sollen dabei die Grundlagen des menschlichen visuellen Systems erläutert werden.

2.1 Physiologische Grundlagen

Das menschliche Auge ist das Sinnesorgan des Menschen, das optische Reize durch Lichteinfall erfasst und zum Gehirn weiterleitet (Abbildung 8). Es ist kugelförmig und hat einen Durchmesser von ca. 2,5 cm. Vom umgebenden Gewebe wird das Auge durch die schützende Lederhaut abgegrenzt. Die darunter befindliche Aderhaut versorgt das Auge mit Nährstoffen. Die unterste Schicht –die Netzhaut– dient dank ihrer lichtempfindlichen Rezeptoren als „Leinwand“ auf der das Abbild der Umwelt entsteht. Der gallertartige Glaskörper hält das Auge in Form und schützt alle empfindlichen Teile. Die außen liegende Hornhaut bricht das einfallende Licht, das nur durch den durchsichtigen Teil der Hornhaut einfallen kann. Durch das Zusammenwirken von Linse und Hornhaut entsteht auf der Netzhaut ein scharfes, verkleinertes, umgekehrtes, spiegelverkehrtes Bild (Abbildung 9). Da sich die Netzhaut nur langsam an Änderungen der Leuchtdichte anpassen kann, regelt die sich durch An- bzw. Entspannung der Muskulatur schnell schließende Regenbogenhaut (Iris) die Menge des einfallenden Lichtes und schützt so die Netzhaut vor zu großer Lichteinstrahlung. Die Iris funktioniert also ähnlich einer Kamerablende auch in der Hinsicht, dass beim Nahsehen eine Verkleinerung der Pupille (Blende) eine Erhöhung der Tiefenschärfe zur Folge hat [10, S. 12-13].

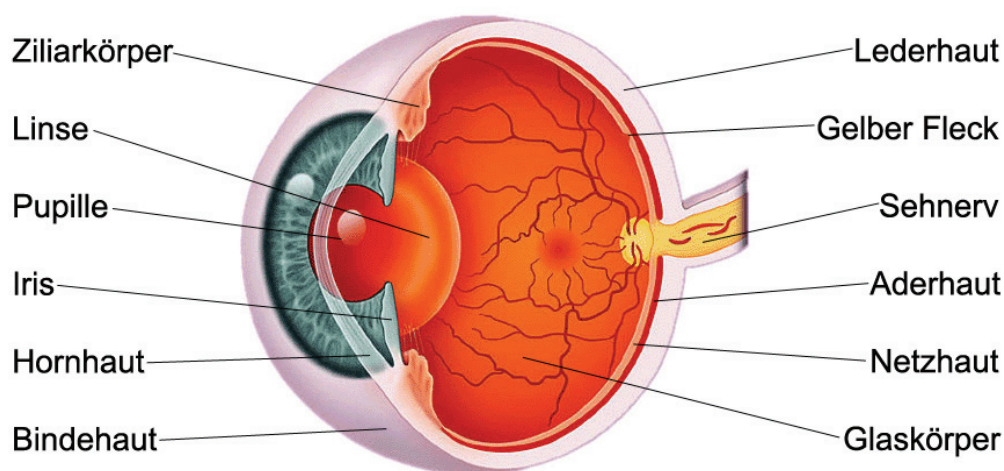


Abbildung 8: Anatomie des menschlichen Auges [11, Vgl. Abb. S. 2]

Die in der Netzhaut vorhandenen Fotorezeptorzellen sind aus lichtempfindlichen Molekülen aufgebaut, die sich bei Lichteinfall strukturell verändern. Entsprechend ihren Eigenschaften sind die Rezeptoren in Zapfen und Stäbchen unterteilt (Abbildung 9, rechts). Während die Stäbchen eine eher geringe Auflösung und weniger scharfes schwarz-weiß Sehen ermöglichen, gewährleisten die Zapfen das Farbsehen, eine hohe Auflösung und Schärfe. Insbesondere sind in der Fovea centralis -dem Punkt des schärfsten Sehens- (kleines Areal innerhalb des Gelben Fleckes) viele Zapfen konzentriert, woraus die Eigenschaft dieser Region –scharfes und hoch auflösendes Farb-Sehen- resultiert. Bei Fixation eines Objektes werden die Augen so gedreht, dass das Objekt auf die Fovea centralis fällt und damit scharf und hoch aufgelöst wahrgenommen werden kann (Abbildung 9, links). In der Peripherie des Sehfeldes auf der Netzhaut werden dagegen hauptsächlich globale und Bewegungsinformationen erfasst [12, S. 50-51]. Die in den Rezeptoren enthaltenen, lichtempfindlichen sogenannten Sehpigmente lösen nach einer Stimulation mit Licht elektrische Signale aus, die durch ein Netzwerk von Neuronen fließen [4, S. 30]. Dabei gelangen die Informationen über eine synaptische Verbindung zu (bipolaren) Nervenzellen. Diese sind wiederum mit Ganglienzellen verbunden, deren Ausläufer (Axone) sich im optischen Nerv bündeln und aus dem Auge heraus weiter zum Gehirn führen. Jede der 800.000 Ganglienzellen enkodiert Informationen aus einem kleinen Netzhaut-Areal. Die Feuerrate des Axons einer Ganglienzelle entspricht in ihrem Betrag der auf diese Ganglienzelle auftreffenden Lichtmenge [12, S. 51].

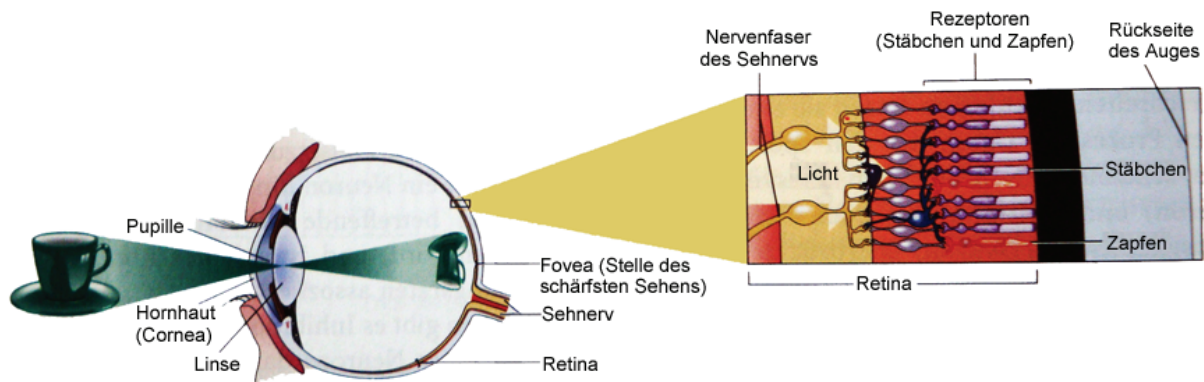


Abbildung 9: Objektabbildung auf der Netzhaut (links); Rezeptoren in der Netzhaut (rechts) [4, Abb. S. 30]

Jede Netzhaut ist senkrecht in eine linke und eine rechte Hälfte geteilt ist. Dementsprechend werden auch die in elektrischen Signalen verschlüsselten Informationen auf geteilten Wegen weitergeleitet. An der Kreuzung der Sehbahnen (Chiasma opticum) verzweigen sich die optischen Nerven beider Augen derart, dass die rechte Hälfte jeder Netzhaut in der rechten Großhirnhemisphäre und die linke Hälfte jeder Netzhaut in der linken Großhirnhemisphäre repräsentiert werden (Abbildung 10). Das ermöglicht dem visuellen System den örtlich direkten Vergleich beider Netzhaut-Teilbilder, was letztlich die Grundlage der Wahrnehmung räumlicher Tiefe darstellt. Der größte Teil der Sehnervenfaser (90%) enden im sogenannten seitlichen Kniehöcker (CGL - Corpus Geniculatum Laterale) im Thalamus des Zwischenhirns

– der ersten höheren Verarbeitungsstufe. In dieser Schaltstation werden Informationen vorgefiltert und z.T. bewertet [10, S. 26]. Vom CGL werden die Informationen über die Sehbahnen weiter zu der im hinteren Schädelbereich befindlichen primären Sehrinde geleitet. In dieser scheckkartengroßen 3 mm dicken primären Sehrinde erfolgt die Datenanalyse. Entsprechende Forschungen an Katzen zeigten, dass sich die Sehrinde in abwechselnde für das linke und das rechte Auge senkrecht durch parallele Schichten verlaufende Blöcke gliedert. In dieser Zauberwürfel – ähnlichen Struktur verarbeitet jeder „Mini-Würfel“ die Signale eines spezifischen Netzhaut-Bereiches (Abbildung 11). Somit wird die gesamte Netzhaut als zusammenhängendes Areal in der Sehrinde repräsentiert. Letztlich entsteht im Gehirn mittels komplex miteinander verbundener Nervenzellen das dreidimensionale Abbild unserer komplexen Umwelt [10, S. 30-31].

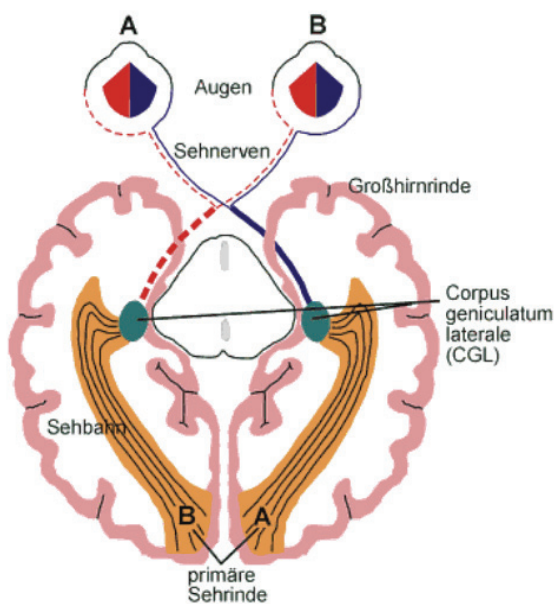


Abbildung 10: Schnitt durch das Gehirn mit den wichtigsten Stationen der Sehbahnen [10, Abb. S. 30]

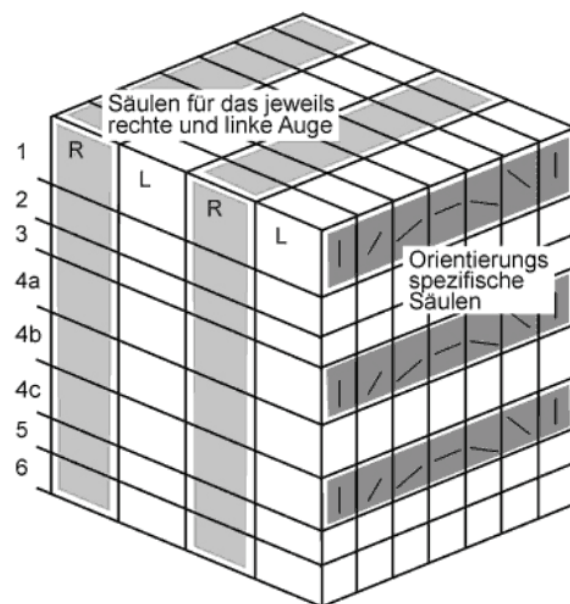


Abbildung 11: Aufbau der Sehrinde [10, Abb. S. 31]

2.2 Stereoskopisches Sehen

Das räumliche Sehen ermöglicht dem Menschen sich optimal in seiner Umwelt zu orientieren und zu bewegen. Insbesondere können Abstände zwischen bzw. Entfernungen von Objekten genau bestimmt werden. Zu den wichtigsten Voraussetzungen des stereoskopischen Sehens gehört die dicht nebeneinander liegende Anordnung der Augen im Abstand von durchschnittlich 6,3 cm, woraus sich ein großer Überlappungsbereich der beiden Gesichtsfelder ergibt. Die daraus resultierende, wichtigste Komponente des visuellen Systems für die Tiefenwahrnehmung ist die *Querdisparation*. Diese führt zu einer durch den Augenabstand bedingten leicht unterschiedlichen Perspektive jedes Auges [1, S. 85]. Damit verbunden ist