

# **Der Zusammenhang zwischen Wahrnehmungsgröße und Abstandsinformation**

# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung .....	3
1.1 Erklärungsversuche und Forschungsergebnisse der Gegenwart .....	8
1.2 Zielrichtung und Abgrenzung der aktuellen Arbeit .....	21
1.3 Intention und Erläuterung der Versuchsreihen .....	25
2. Grundlagen und Methodiken bezüglich des subjektiven visuellen Wahrnehmungsraums .....	27
2.1 Die nativistische und die empiristische Anschauung .....	27
2.2 Räumliche Anordnungen der wahrgenommenen Objekte .....	31
2.3 Über die visuell vermittelte Richtungs- und Lagebestimmung .....	33
2.4 Visuelle Auswertungen der korrespondierenden Netzhautstellen ...	42
2.5 Visuelle Auswertungen der disparaten Netzhautstellen .....	44
2.6 Die Größenkonstanzleistung .....	47
2.7 Psychophysikalische Grundlagen und Schwellenwerte .....	50
2.8 Physiologische Grundlagen .....	54
3. Experimentelle Untersuchung .....	60
3.1 Versuchsaufbau und Ablauf zur Durchführung der Experimente ...	60
3.1.1 Zusammensetzungen der Versuchsteilnehmer .....	66
3.1.2 Erläuterungen und Ablauf der 2 Versuchsreihen .....	66
3.2 Graphische Darstellungen der Messergebnisse .....	71
3.2.1 I.Versuchsreihe .....	71
3.2.2 II.Versuchsreihe .....	93

3.3 Auswertung und Aufbereitung der Messdaten .....	102
3.3.1 Auswertungen der I.Versuchsreihe .....	102
3.3.2 Auswertungen der II.Versuchsreihe .....	120
3.3.3 Fehlerbetrachtungen der Versuchsreihen I und II .....	122
3.4 Diskussion der Messdaten .....	124
4. Zusammenfassung und Ausblick .....	135
Begriffsverzeichnis mit kurzer Erklärung.....	137
Literaturverzeichnis .....	141
Bildquellenverzeichnis .....	143

## 1. Einleitung

Jede Theorie über das räumliche Sehen hat sich mit der Tatsache auseinander zu setzen, dass die durch die Netzhaut empfangene zweidimensionale Anordnung der optischen Eindrücke in bestimmter Weise verändert wird.

Da bei der optischen Abbildung der dreidimensionale Raum auf eine gekrümmte zweidimensionale Fläche projiziert wird, soll diese Dimensionsreduktion als Transformation bezeichnet werden.

Die visuelle Verarbeitung im Nervensystem die zu einer dreidimensionalen Räumlichkeit führt, entspricht dann einer Rücktransformation. Da in dieser Arbeit der Schwerpunkt in der visuellen Größenwahrnehmung und Abstandsinformation liegt, werden andere Aspekte wie z.B. die Farbwahrnehmung, Adaptation, Muster- und Formerkennung nicht berücksichtigt.

Zur Erklärung der Bestimmung der dritten Dimension und der Wechselwirkung zwischen der zweidimensionalen Anordnung der Retinabilder und der dritten Dimension, wurden bis heute fünf Theorien aufgestellt, auf die nach kurzen Erläuterungen eingegangen werden soll [1].

Bei den vorgestellten Theorien, liegt der Schwerpunkt jeweils auf den Erklärungsversuchen der Größenkonstanzleistung, der subjektiven Größen- und Entfernungswahrnehmung. Untersuchungen über die Metrik des Sehraums werden auch berücksichtigt, da diese bei den Arbeiten über die Entfernungswahrnehmung mit berücksichtigt wurden.

Hierbei soll unter Sehraum die zusammenhängende Form- und Tiefengliederung der gesehenen Objekte oder der Sehdinge gemeint sein. Man kann den Sehraum auch als eine Art Abbildung des physikalisch, objektiven Raumes auffassen. Der physikalische Raum (in unserer betrachteten Größenordnung) unterliegt den Gesetzen der „euklidischen Geometrie“. Im subjektiven Sehraum wird das Sehding in einer subjektiven Entfernung vom Beobachter wahrgenommen. Die subjektive Entfernung der extremen Punkte, eines wahrgenommenen Objektes, bezeichnet man als seine Sehgröße.

Anstelle von Sehgröße wird in der älteren Literatur [2] häufig der Begriff „scheinbare Größe“ benutzt, auf die in dieser Arbeit komplett verzichtet wird. Diese Bezeichnungsweise ist nicht eindeutig und soll deshalb kurz erläutert werden (vgl. Abb.1):

Als scheinbare Größe bezeichnet man die Tangente des Gesichtswinkels, unter dem der Gegenstand gesehen wird. Bei kleinem Gesichtswinkel ist die Tangente dem Winkel gleich. Der Gesichtswinkel wäre dann ein Maß für die scheinbare Größe. Eben dieser bestimmt aber auch die Größe des Netzhautbildes. Somit wäre die scheinbare Größe eindeutig durch sein Netzhautbild bestimmt und ist eine rein physikalische Angelegenheit. Aus diesem Grunde ist es besser, die Bezeichnung „scheinbare Größe“, in Gleichbedeutung mit Gesichtswinkel, fallen zu lassen. In dieser Arbeit wird stattdessen der Begriff *visuelle Wahrnehmungsgröße* verwendet.

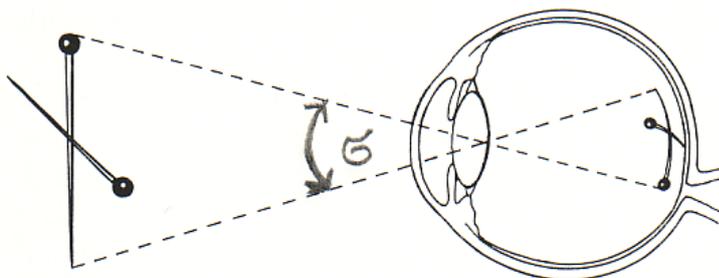


Abb.1: Optische Abbildung eines Objektes. Der Gesichtswinkel  $G$  bestimmt die Größe des Netzhautbildes.

Die Größe des Netzhautbildes wird durch den Gesichtswinkel bestimmt, sein Analogon im visuellen Wahrnehmungsraum ist der Sehwinkel.

## Es folgt ein kurzer Abriss der fünf Sehraumtheorien

### 1. Theorie auf Grund von Verstandesurteilen

Diese Theorie geht davon aus, dass die Tiefenanordnung und Größenkonstanzleistung lediglich Verstandesurteile sind, die durch Erfahrung und logische Verarbeitung zustande kommt. Hauptvertreter dieser Theorie ist Fechner [3]. Diese Theorie stützt sich auf die Beobachtung, dass wir uns bei unübersichtlichem Gesichtsraum, z.B. in der Dunkelheit gut an bekannten Größen orientieren können.

Konsequenz dieser Auffassung wäre, dass bei jedem Netzhautbild eine Information über Entfernung des Objektes und seine Lageverhältnisse zur Sehrichtung mitgeliefert werden. Würde sie aber mitgeliefert, dann wäre ein Verstandesurteil nicht mehr notwendig. Diese Theorie steht auch im Widerspruch zu den optischen Täuschungen, die durch Erfahrung nicht aufgehoben werden können.

Die Theorie der Verstandesurteile kann auch nicht erklären, wie es zu einer Größenkonstanzleistung kommt, wenn verschiedene Wahrnehmungsobjekte in unterschiedlichen Entfernungen angeordnet sind. Darauf deuten Untersuchungen von Holaday [4] hin.

Obwohl man in besonderen Fällen sich der Erfahrung bedient, eignet sich diese Theorie nicht zur Erklärung der visuellen Größenwahrnehmung.

### 2. Projektionstheorie

Diese Theorie ist eine Analogie zur optischen Projektion. Sie wurde zunächst von Wundt [5] und Hering [6], später von v. Sterneck [7] vertreten. Sie war gegen Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts die populärste Auffassung. Wundt und Hering betrachteten die visuelle Wahrnehmung als eine Art der Rückprojektion. Nach Wundt wird das Netzhautbild auf einen physikalischen Ort der Blickrichtungsschnittpunkte projiziert.

Hering vertrat die Ansicht, dass bei der Rückprojektion die vorgestellte und die physikalische Entfernung nicht übereinstimmen. Dies veranlasste Hering den Sehraum als „inkommensurabel“ zu betrachten. Die offensichtliche Abhängigkeit der subjektiven Wahrnehmungsgröße von der subjektiv wahrgenommenen Entfernung war der Ausgangspunkt zahlreicher Untersuchungen, anfangs des 20. Jahrhunderts.

Zur Erforschung der metrischen Beziehungen zwischen physikalischen Raum und Sehraum führte man u.a. Alleenversuche ein. Bei diesen Versuchen mussten die Testpersonen zwei Punktreihen parallel zur Blickrichtung in regelmäßigen Abständen einstellen, so dass sie immer den gleichen Abstand zur Blickrichtung behielten. Diese Versuche wurden zunächst von Hillebrand [2], dann von Schubotz [8], Poppelreuter [9] und zuletzt von Blumenfeld [10] durchgeführt.

Diese Versuche ergaben keine mathematische Funktion zur Berechnung der visuellen Wahrnehmungsgröße. Jedoch machte Blumenfeld die Beobachtung, dass die eingestellten Konfigurationen abhängig von der Intention waren. Je nachdem, ob die Versuchsperson einen gleichen Abstand zur Blickrichtung oder eine Parallelität der Alleen einstellte, ergaben sich unterschiedliche Einstellungen.

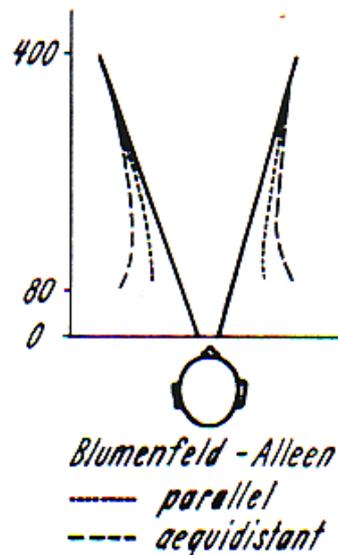


Abb.2: Blumenfeld-Alleen.

Blumenfeld zog aus diesem an sich merkwürdigen Ergebnis keine Konsequenzen.

Einen anderen Ausgangspunkt nahm der Mathematiker v. Sterneck [7], [11]. Er untersuchte das Verhältnis der wahrgenommenen Entfernung zur physikalischen Entfernung. Ihm gelang eine mathematische Formulierung dieses Verhältnisses. Seine Untersuchungen bezogen sich auf Entfernungen im Bereich 20m bis 20Km. Das Abhängigkeitsverhältnis formulierte er wie folgt:

$$wE = (D \cdot c) / (D + c),$$

wE = wahrgenommene Entfernung

D = objektive Entfernung

c = Konstante

Die Konstante c deutete v. Sterneck als Radius des Sehraumes. Sie variierte zwischen 20m und 20km.

Mit seiner Formulierung konnte v. Sterneck z.B. die scheinbare Änderung des Erhebungswinkels von Bergen deuten, je nachdem, ob man die Berge von unten nach oben oder vom Berg zu Tal überblickte.

Die Untersuchungen von v. Sterneck widersprachen der Auffassung von E. Hering, dass der Sehraum zum physikalischen Raum „inkommensurabel“ sei. Die Projektionstheorie, auch in ihrer Spezifizierung durch v. Sterneck, beschreibt die subjektive Wahrnehmungsgröße und die wahrgenommene Entfernung zwischen dem optischen Horizont und dem Bereich ab 20m.

### 3. Funktionstheorie

Die subjektive Wahrnehmungsgröße wird als Ergebnis einer Art Kräfteparallelogramms durch das Zusammenwirken der Impulse wie Konvergenz, Akkommodation, Helligkeit gedeutet. Diese Annahme kann mit dem Konzept des „Reafferenzprinzips“ nach Holst und Mittelstädt [12] bestätigt werden.

Die Funktionstheorie geht davon aus, dass nur die Konvergenz der Augenachsen und die Querdisparation der Netzhautbilder die einzigen Informationsquellen für die Tiefeninformation sind. Die Funktionstheorie rechnet nicht mit der Möglichkeit, dass die

Empirie und das Seitwärtsblicken weitere Informationsquellen darstellen können. Die Funktionstheorie kann mit ihrem Konzept die Größenkonstanzleistung nicht erklären.

#### 4. Bewegungstheorie

Die zweidimensionale Anordnung der Netzhautbilder wird durch eine Art innere Bewegung erfasst. Das Bewegungserlebnis entscheidet über die räumliche Ausdehnung und subjektive Wahrnehmungsgröße der Objekte. Als Vertreter dieser Theorie gilt Linschoten [13] mit der „Attraktionstheorie“. Seine experimentellen Untersuchungen nehmen allerdings nur zu der Tiefendimension einzelner Wahrnehmungsobjekte Stellung. Auf das Phänomen der Größenkonstanzleistung und der subjektiven Wahrnehmungsgröße geht Linschoten experimentell nicht ein.

#### 5. Axiomatische Theorie

Diese Theorie geht davon aus, dass der Sehraum eine eigene Räumlichkeit darstellt. Diese Räumlichkeit weicht in seinen axiomatischen Grundlagen vom euklidischen Raum ab. Im Sehraum gilt nicht das Parallelenaxiom von Euklid. Solch einen Raum bezeichnet man nach Gauss, Bolyai und Lobatschewski als einen nichteuklidischen Raum. Da diese Theorie in der angelsächsischen Welt bis in die heutige Zeit ein großes Ansehen besitzt, soll sie kurz erläutert werden.

Begründer dieser Theorie ist der Mathematiker Luneburg [14]. Luneburg nahm an, dass der Sehraum in einem metrisch fassbaren Verhältnis zum physikalischen Raum steht. Er nahm an, dass der Sehraum einer hyperbolschen Geometrie unterliegt, also ein Riemannscher Raum mit konstanter negativer Krümmung. Die Theorie von Luneburg stützt sich auf 4 Tatsachen:

1. Zwischen empfundener, visueller Entfernung und physikalischer Entfernung bestehen meistens Unterschiede. In größeren Entfernungen unterschätzt man die Entfernungen der gesehenen Objekte. Unendlich entfernte Objekte, wie z.B. die Gestirne, erleben wir in einer endlichen Entfernung.
2. Planhoropter (frontoparallele Gerade) sind gekrümmte Kurven, die im Sinne von Helmholtz in der Nähe konkav und in größerer Entfernung konvex zum Beobachter verlaufen. Mit Horopter ist der Komplex sämtlicher Punkte des Außenraumes gemeint, die bei einer gegebenen Konvergenzstellung der Augen, binokular einfach gesehen werden. Des weiteren erscheinen sie in der selben Entfernung wie der binokulare Fixationspunkt



Abb.3 : Planhoropter.

3. Parallele Geraden und äquidistante Linien ergeben verschiedene Kurven. Die Blumfeld-Alleen sind der empirische Beweis dafür. Das Auseinanderfallen von Äquidistanz und Parallelität steht im Widerspruch zum Parallelenaxiom von Euklid.

4. Die Ames-Räume, deren Rückwand nicht rechtwinklig konstruiert ist werden von Beobachtern, welche monokular von der Frontseite her, durch ein Guckloch hineinblicken, als rechtwinklig empfunden. Das gelingt nur bei spezieller Konstruktion der Quadratmuster welche sich auf der Rückwand befinden. Bei kleinen Quadraten, müssen sie nach innen konvex und bei größeren konkav gestaltet werden.

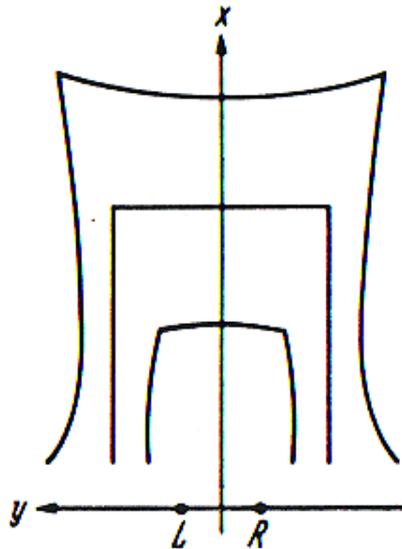


Abb.4: Krümmungseigenschaften frontoparalleler Linien der Kästen.

Nach der Luneburg'schen Theorie entstehen die Größenkonstanz und die subjektive Größenwahrnehmung ausschließlich durch den Abbildungsvorgang aus einem euklidischen in einen nichteuklidischen Raum.

Als Informationsquelle für den Abstand nahm er nur die jeweilige Konvergenzstellung beider Augen an.

Nach seinem Tod wurden die Arbeiten von Luneburg durch seine Schüler Blank, Boeder, Hardy, Rand und Rittler [15], fortgesetzt. Sie versuchten in speziellen Experimenten die Krümmungskonstante  $K$  des visuellen Sehraums zu bestimmen und seine aufgestellte psychometrische Distanzfunktion zu verifizieren. Diese Untersuchungen dauerten 5 Jahre und wurden in dem Werk „The geometry of binocular space perception“ veröffentlicht. Sie bestätigten seine Annahme, dass es sich beim Sehraum um einen Riemannschen Raum mit konstanter negativer Krümmung handelt. Sie konnten mit diesem Konzept die Größenkonstanz, die Blumenfeld-Alleen und den Planhoropter nach Helmholtz erklären.

Die fünf kurz vorgestellten Theorien können jeweils Teilbereiche der visuellen Wahrnehmung erklären oder deuten.

## 1.1 Erklärungsversuche und Forschungsergebnisse der Gegenwart

Die Untersuchungen, beginnend ab 1940 bis Ende des 20. Jahrhunderts, hatten nicht das Ziel vor Augen, eine neue Sehraumtheorie aufzustellen und experimentell zu verifizieren. Sie teilten sich in mehrere unterschiedliche Richtungen und Fragestellungen auf und berührten jeweils Teilaspekte der visuellen Wahrnehmung. Ein Richtungszweig verfolgte nur die Frage nach dem Wesen der Größenkonstanzleistung des visuellen Systems. Einer der ersten Forschergruppen, die der Frage der Größenkonstanz experimentell nachgingen waren Holway

und Boring [16]. Ihre Experimente sind repräsentativ für alle experimentellen Untersuchungen, in denen gezeigt wird, wie die subjektive Größenwahrnehmung von den verfügbaren Entfernungskriterien beeinflusst wird.

Sie untersuchten die Größenkonstanz des visuellen Systems in verschiedenen Entfernungen. In dieser Studie mussten 5 Probanden ringförmige Objekte, welche in 2 Beobachtungskorridoren, die 90° zueinander standen, vergleichen. Das zu vergleichende Objekt wurde dabei in den Entfernungen von 3m – 36m variiert. Dabei hatte es eine konstante Größe von 1°. Der Beobachter hatte die Aufgabe in einer konstanten Entfernung von 3m, seine Größenwahrnehmung so einzustellen, dass er es als gleich groß empfand. Die Beobachtungsbedingungen erfolgten binokular, monokular, monokular mit künstlicher Pupille und monokular mit einem Reduktionstunnel. So konnten die Beobachtungssituationen bezüglich der Entfernungskriterien variiert werden. Allerdings wurden die Entfernungskriterien im Außenraum konstant gehalten.

Holway und Boring führten zwei neue Formulierungen, bezüglich der Größenwahrnehmung, ein.

- a. Schwinkelgesetz: die subjektiv wahrgenommene Größe ist nur vom Netzhautbild abhängig.
- b. Gesetz der perfekten Größenkonstanz: die subjektiv wahrgenommene Größe hängt nur von der physikalischen Größe ab.

Die Messergebnisse dieser Versuchsreihe ergaben folgende Aussagen:

1. Die Größenkonstanz ist abhängig von den dargebotenen Tiefeninformationen.
2. Bei Binokularsehen sind die eingestellten Größen größer als beim Monokularsehen und lagen in der Nähe der perfekten Größenkonstanz.
3. Bei monokularer Darbietung mit künstlicher Pupille waren die eingestellten Größen am niedrigsten und lagen in der Nähe des reinen Schwinkelsehens.

Holway und Boring konnten somit zeigen, dass die Größenkonstanz sehr stark von den verfügbaren Entfernungsinformationen abhängig ist. Wie aber die Abhängigkeiten der Größenkonstanz von der wahrgenommenen Entfernung sind, wurde in ihrer Arbeit nicht berücksichtigt.

Andere Forschergruppen untersuchten die Größenkonstanz im Zusammenhang mit der wahrgenommenen Größe und wahrgenommenen Entfernung. Die wichtigsten Vertreter dieser Fragestellung waren zuerst Ittelson und Ames [17].

W. Ittelson und A. Ames, Jr. untersuchten in ihrer Arbeit die Abhängigkeiten der subjektiv wahrgenommenen Entfernung von der Akkommodation und Konvergenz. Sie stellten folgende Fragestellung auf:

1. In wie weit verändert der Wechsel der Akkommodations- und Konvergenzzustände die subjektiv wahrgenommene Entfernung?
2. In wie weit verändert der Wechsel oder die Änderung der physikalischen Entfernung die Akkommodations- und Konvergenzzustände?
3. In wie weit verändert die Änderung der subjektiv wahrgenommenen Entfernung die Akkommodations- und Konvergenzzustände?

Die Akkommodations- und Konvergenzzustände wurden unter 3 verschiedenen Bedingungen bei Variation der subjektiven Entfernung gemessen. Die Bedingungen lauten:

- a. Monokular bei einem physikalischen Abstand von 32inch (= 81,28cm).
- b. Monokular bei einem physikalischen Abstand von 16inch (= 40,64cm).
- c. Binokular bei einem physikalischen Abstand von 16inch (= 40,64cm).

Ihre Messergebnisse ergaben, dass die subjektiv wahrgenommene Entfernung reziprok zur objektiven Größe variiert.

Die Akkommodations- und Konvergenzzustände variierten in Richtung der subjektiven Entfernung.

An dieser Studie nahmen 5 Personen teil. Die Versuchsbedingungen fanden nur im Bereich 16-32inch (physikalische Entfernung) und im Bereich 16-64inch (subjektiv wahrgenommene Entfernung) statt.

In einer späteren Untersuchung versuchte F. Kilpatrick und W. Ittelson [18] die so genannte *Size-Distance Invariance Hypothesis* experimentell zu verifizieren. Diese Hypothese besagt, dass der Sehwinkel oder die Netzhautabbildung einer gegebenen Größe ein eindeutiges Verhältnis von subjektiv wahrgenommener Größe und subjektiv wahrgenommener Entfernung bestimmt.

Mit Hilfe der euklidischen Geometrie kann man dann eine einfache Bestimmungsgleichung aufstellen. Wenn S die objektive Größe und D die objektive Entfernung eines Objektes im physikalischen Raum ist, gilt in einer einfachen Näherung:

$\tan \alpha = S/D$  und mit der Kleinwinkelnäherung:

Schwinkel  $\alpha = S/D$  und damit:

Schwinkel  $\alpha = \text{wahrgenommene Größe} / \text{objektive Entfernung}$

und daraus kann man dann folgendes ableiten:

Schwinkel  $\alpha = K \cdot \text{wahrgenommene Größe} / \text{wahrgenommene Entfernung}$ .

Die wahrgenommene Größe wird als wG und die wahrgenommene Entfernung als wE bezeichnet.

K ist eine individuelle Konstante, welche die Tatsache berücksichtigt, dass die objektiven Größen S und D, individuell verschieden interpretiert werden. Somit ergibt sich:

Schwinkel  $\alpha = K \cdot wG/wE$

Unter der Voraussetzung dass diese einfache Näherung gültig ist, ergeben sich folgende Konsequenzen:

- a. Wenn  $\alpha = \text{konstant} \Rightarrow wG$  und  $wE$  variieren proportional.
- b. Sind  $\alpha$  und  $wE$  gegeben  $\Rightarrow wG$  ist eindeutig bestimmt.
- c. Sind  $\alpha$  und  $wG$  gegeben  $\Rightarrow wE$  ist eindeutig bestimmt.
- d.  $wG$  ist gegeben  $\Rightarrow \alpha$  und  $wE$  variieren reziprok.
- e.  $wE$  ist gegeben  $\Rightarrow \alpha$  und  $wG$  variieren proportional.

Diese Hypothese wurde häufig als qualitative Erklärung für Wahrnehmungskonstanzleistungen innerhalb der Gestalttheorie herangezogen. Dies soll aber nicht weiter verfolgt werden. Man erkennt hier aber die Existenz von 2 Prozessen die sich reziprok verhalten. Wahrgenommene Größe und wahrgenommene Entfernung! Kilpatrick und Ittelson gingen folgende Fragestellung nach: Beschreibt die *Size-Distance Invariance Hypothesis* beobachtbare Beziehungen zwischen wahrgenommener Größe, wahrgenommener Entfernung und Sehwinkel  $\alpha$ ? In ihrer Arbeit wurden 3 Fälle untersucht:

1. Fall: Konstanter Sehwinkel  $\alpha$

Variieren wahrgenommene Größe und wahrgenommene Entfernung proportional?

2. Fall: Konstante wahrgenommene Entfernung  $wE$

Variiert die wahrgenommene Größe und Sehwinkel  $\alpha$  proportional?

3. Fall: Konstante wahrgenommene Größe  $wG$

Variiert die wahrgenommene Entfernung reziprok zum Sehwinkel  $\alpha$ ?

Die Autoren kommen zu dem Ergebnis: Für einen gegebenen Sehwinkel  $\alpha$  ergibt sich ein konstantes Verhältnis von wahrgenommener Größe und wahrgenommener Entfernung. Das Emmert'sche Gesetz (siehe Abschnitt 2.6) kann dadurch erklärt werden. Für eine Beschreibung der Beziehung wahrgenommener Größe und wahrgenommene Entfernung eignet sich die *Size-Distance Invariance Hypothesis* nicht, da sie nur ein paar wenige Fälle beschreibt. Kilpatrick und Ittelson führen dies auf die starke Vereinfachung der Ableitung zurück. Die Versuche fanden alle unter binokularen Bedingungen statt.

W. Ittelson, A. Ames, Jr. und F. Kilpatrick kamen in ihren Arbeiten zu dem Ergebnis, dass die Netzhautbildgröße nicht nur die visuelle Wahrnehmungsgröße sondern auch die Entfernungswahrnehmung beeinflusst. Dies umso mehr, wenn die Größe des physikalischen Objektes bekannt ist und keine anderen Tiefeninformationen verfügbar sind.

H. Leibowitz untersuchte in seiner Arbeit die Abhängigkeiten der wahrgenommenen Größe von der Akkommodation und Konvergenz unter Berücksichtigung der Größenkonstanz [19]. Er setzte voraus, dass die wahrgenommene Größe bis zu einer Entfernung von ca. 30m nahezu phänomenal gleich groß bleibt. Dies begründete er mit den Ergebnissen von Holway und Boring.

Die Versuchsreihe fand in 5 verschiedenen Entfernungen statt. In seiner Versuchsreihe nahmen 7 Probanden teil, bei denen mittels sphärischer Gläser die Akkommodation bewusst stimuliert und relaxiert wurden.

In den physikalischen Entfernungen 10, 25, 50, 100 und 400cm wurde jeweils ein gleichseitiges Dreieck dargeboten. Sie waren derart berechnet, dass sie in allen objektiven Entfernungen einem Winkel von  $1^\circ$  entsprachen.

Die Probanden hatten die Aufgabe, ihren Größeneindruck auf ein Vergleichsdreieck, welches sich in 200cm befand, zu übertragen. Dies geschah mit der Intention, phänomenal gleich groß. Um die Akkommodation zu variieren, wurden sphärische Gläser mit folgenden dioptrischen Stärken vorgesetzt: +/- 3,00dpt, +/- 2,00dpt, +/- 1,00dpt, +/- 0,50dpt, +/- 0,25dpt und plan. Die 11 verschiedenen Akkommodationszustände stellten die Ausgangsbasis für die Einstellungen in den 5 verschiedenen Einstellentfernungen dar.

Der durch die objektive Prüfentfernung bedingte Akkommodationsaufwand verstärkte sich jeweils um die induzierten Beträge, vermittelt durch die sphärischen Gläser. Dieser induzierte

Akkommodationsaufwand erzeugt wiederum eine Verringerung der Einstellbewegung beider Blicklinien. Diese Abstandsverringerng berechnet er theoretisch und berücksichtigt dies durch prismatische Gläser.

Die von den Probanden eingestellten subjektiven Größen in 200cm wurden dann mit den objektiven verglichen.

Bei Durchsicht der Messergebnisse ist besonders die Spalte mit plan, also ohne sphärische Gläser interessant. Hier sind die Werte subjektiv und objektiv bis auf die Entfernung 400cm nahezu gleich. Das bedeutet in seiner Konsequenz, dass keine Größenkompensation, also die Größenkonstanzleistung überhaupt nicht einsetzte.

In den Spalten -3,00, -2,00dpt und bei den Entfernungen 50 und 100cm sind die Unterschiede zwischen der subjektiv eingestellten und der objektiven Größe am höchsten. Hier entspricht jeweils der subjektive Wert gerade dem halben Betrag von der objektiven Größe. In den Spalten mit den positiven sphärischen Gläsern sind alle eingestellten Größen höher als die objektiven Werte. Sie nehmen stetig bei Zunahme der dioptrischen Wirkung zu. H. Leibowitz interpretiert seine Messergebnisse als Bestätigung des reziproken Verhaltens, zwischen wahrgenommener Größe und wahrgenommener Entfernung.

Er geht in seiner Arbeit nicht darauf ein, ob die Bezugsentfernung von 200cm diese Ergebnisse mit produziert haben könnte. Bei Anwendung der prismatischen Gläser werden nur theoretisch berechnete Kompensationsbeträge berücksichtigt. Sie beziehen sich aber nur auf die fusionellen Vergenzanteile.

Dass aber die manipulierte Akkommodation einen naturgemäßen Vergenzanteil, die akkommodative Vergenz, erzeugt, bleibt völlig unberücksichtigt. Man hätte dies mit der Messung des AC/A-Quotienten überprüfen können. Der AC/A-Quotient ist ein Maß, wie groß der akkommodative Vergenzanteil in Abhängigkeit der provozierten Akkommodation ist.

Der Aspekt der Empirie in der wahrgenommenen Entfernung wurde nicht untersucht. Seine experimentellen Untersuchungen verifizierten aber dennoch die angenommenen Abhängigkeiten.

Die Experimente wurden allerdings nur binokular durchgeführt. Die Variation der Konvergenzwinkel wurde mit prismatischen Gläsern und die Variation der Akkommodation durch Konkav – und Konvexgläsern provoziert. Auf mögliche Fehlerquellen, bedingt durch die bewusste Manipulation des visuellen Systems, geht Leibowitz nicht ein. Er berücksichtigt nicht die Tatsache, dass latente Heterophorien die Wirkung der prismatischen Gläser verändert und die Messergebnisse dadurch verfälscht.

Fischer und Löwenbach [20] untersuchten hingegen primär die wahrgenommene Entfernung und sekundär die visuelle Wahrnehmungsgröße. In ihrer Arbeit „Untersuchungen über die Sehferne und Sehtiefe“ versuchten sie experimentell die Zusammenhänge zwischen wahrgenommener Entfernung und Stereopsis (Raumtiefe) aufzudecken. Ihre Messungen basierten auf folgenden Ansatz:

1. Wie verhält sich die resultierende Raumtiefe, wenn bei konstantem Konvergenzwinkel die Querdisparation variiert wurde?
2. Wie verhält sich die resultierende Raumtiefe, wenn bei konstanter Querdisparation der Konvergenzwinkel variiert wurde?

Die Messergebnisse ergaben folgende Interpretation:

1. Die subjektiv wahrgenommene Entfernung ist nur bei Binokularsehen eindeutig bestimmt. Sie wächst hyperbolisch bei abnehmendem Konvergenzwinkel.

2. Die Stereopsis oder Raamtiefe ist durch die Querdisparation bedingt, aber auch eine Funktion der wahrgenommenen Entfernung.
3. Bei konstantem Gesichtswinkel wächst die visuelle Wahrnehmungsgröße mit der subjektiv wahrgenommenen Entfernung geradlinig proportional. Dies bezieht sich auf die ersten 5 Meter. Sie ist in der doppelten Entfernung doppelt so groß, in der dreifachen Entfernung dreimal so groß.
4. Die subjektiv wahrgenommene Entfernung ist bei Binokularsehen nicht von der Akkommodation abhängig.

Die Kritik bezüglich ihrer Interpretationen beziehen sich auf Punkt 3 und 4. Die Aussage bei Punkt 3 leiten Fischer und Löwenbach in ihrer Arbeit nur theoretisch aus Nachbildversuchen ab. Diese unterliegen aber dem Emmertschen Gesetz. Dieses besagt: Die Größe der Nachbilder sind direkt proportional der wahrgenommenen Entfernung. Ein Erklärungsversuch zu Punkt 3 findet in ihrer Arbeit nicht statt. Der Rückschluss in Punkt 4 wurde experimentell wie folgt abgeleitet: Die Akkommodation wurde bei konstantem Konvergenzwinkel variiert. Dies geschah mittels Konkav- und Konvexgläser. Effektiv wurde aber in Abhängigkeit der relativen Akkommodation gemessen und simultan die wahrgenommene Entfernung erfragt. Unter relativer Akkommodation versteht man das dazugehörige Intervall von verschiedenen Akkommodationszuständen bei einem konstantem Konvergenzwinkel. Ob diese Messsituation in sich fehlerfrei war, wurde nicht überprüft. An dieser Studie nahmen 4 Personen teil.

Eine andere Fragestellung, bezüglich der wahrgenommenen Entfernung, versuchte die Tiefeninformation in Abhängigkeit von Konvergenz und Akkommodation zu untersuchen. Einer der wichtigsten Vertreter dieser Richtung ist N. Günther [21]. Er knüpfte an die Arbeiten von v. Sterneck an und entwickelte eine so genannte Wahrnehmungsfunktion. Diese Funktion berücksichtigt die Konvergenz, Akkommodation und die perspektivische Entfernung. Der Wert dieser Funktion besteht darin, dass die durch Anwendung von Ferngläsern hervorgerufene Änderung der subjektiven Wahrnehmungsgröße, Form und Entfernung der wahrgenommenen Objekte beschreibt. Allerdings ist die Definition der perspektivischen Entfernung verwirrend. N. Günther versteht darunter die Anwendung der Erfahrung von Absolutgrößen eines Marktstückes. Die Abbildungsgröße zur wirklichen Größe ergibt einen Maßstab für die Entfernung des wahrgenommenen Objektes.

Ein weiterer Vertreter dieser Richtung ist Foley [22]. In seiner Arbeit „Binocular Distance Perception“ untersucht J. Foley Abhängigkeiten in der binokularen Entfernungswahrnehmung. Er setzt sich mit der bis dahin gängigen Meinung auseinander, dass die Entfernungswahrnehmung und der relative Abstand der Objekte untereinander vom Konvergenzwinkel und der Disparation der Retinabilder abhängig sind. Diese Ansicht ist aus seiner Sicht fehlerhaft und er begründet es unter anderem mit der bekannten Tatsache, dass wir sehr nahe gelegene Objekte in ihrer Entfernung zu uns im Abstand überschätzen und dass wir weit entfernte Objekte ebenso in ihrem Abstand zu uns unterschätzen. Des Weiteren führt er an, dass eine konstante Disparation der Netzhautbilder weder eine konstante Stereopsis noch ein konstantes Entfernungsverhältnis verschiedener Objekte untereinander bedingt. Sie ist bekanntlich entfernungsabhängig. Der physikalische Abstand aber bedingt den Konvergenzwinkel und die Disparation.

Auf Grund dieser Ableitung entwickelt er ein Modell, in welchem die klassischen Parameter Konvergenzwinkel und Disparation durch die von ihm eingeführten beiden Parameter

„effektiver Konvergenzwinkel“ und „effektive Disparation“ ersetzt werden. In diesen beiden neu eingeführten Parametern fließt nicht mehr die physikalische Entfernung ein.

Foley ersetzt die physikalische Entfernung durch die wahrgenommene Entfernung. In seine Arbeit geht er der Frage nach: in welcher Entfernung erscheinen uns die Objekte und warum erscheinen sie uns in eben dieser wahrgenommenen Entfernung? Wie entsteht oder welches Signal bedingt überhaupt diese Entfernungswahrnehmung?

Um diese Fragestellung zu untersuchen, unterscheidet er zuerst drei verschiedene Fragestellungen:

1. Ist die wahrgenommene Raumentiefe oder Stereopsis von den verschiedenen Konvergenzwinkeln oder nur von der Disparation ihrer Netzhautbilder abhängig?
2. Ist die wahrgenommene relative Entfernung einzelner Objekte im physikalischen Raum untereinander und im Bezug zum Beobachter vom Konvergenzwinkel oder nur von der Disparation ihrer Netzhautbilder abhängig?
3. Ist die wahrgenommene Entfernung eines Objektes im physikalischen Raum, in Bezug zum Beobachter (egozentrischer Entfernung) vom Konvergenzwinkel abhängig?

In seiner Arbeit versucht Foley seine Untersuchungsergebnisse mit seinem Modell zu erklären. In seinen Gleichungen fließen die oben neu eingeführten Variablen ein. Sein Augenmerk für die Überprüfung ihrer Richtigkeit ist hierbei der Horopter.

Er kann mit seinem Modell und hier konkret mit der eingeführten Variabel, „effektiver Konvergenzwinkel“, die bekannte Hering-Hillebrand'sche Horopterabweichung formal beschreiben.

Unter der Horopterabweichung versteht man den Unterschied zwischen theoretisch abgeleiteten und messtechnisch ermittelten Horopter. In der Literatur bezeichnet man den ersteren als geometrischen und letzteren als empirischen Horopter.

In seiner Arbeit geht er in der Hauptsache nur auf den 2. Punkt seiner aufgestellten Fragen ein. Er kommt zu dem Schluss dass durch die gute Beschreibung seines Modells die 2. Frage bejaht werden muss. Der Konvergenzwinkel stellt einen beeinflussenden Faktor dar.

Die 1. Frage beantwortete Foley direkt im Anschluss nach seiner Aufstellung ebenfalls mit ja. Dass der Konvergenzwinkel eine beeinflussende Größe darstellt, leitet er aus Gründen ab, die aus seiner Sicht evident sind. Die 3. Frage wird ebenfalls bejaht, da dies sich aus der Antwort zu Frage 2 ergibt.

Im Anschluss seiner Analysen geht er darauf ein, wie letztendlich die Vermittlung der Entfernungswahrnehmung aussehen könnte. Er geht davon aus, dass dies durch eine Informationsquelle geschieht, welche zusätzlich zur Retina existiert. Dass die Netzhautabbildung ein auslösendes Moment zur jeweiligen Vergenzeinstellung vermittelt, ist physiologisch begründet. Damit ein direkt angeblicktes Objekt nicht doppelt und mit maximaler Sehschärfe gesehen wird, ist es naturgemäß das Bestreben des visuellen Systems, die Retinabilder in beiden Augen in die Fovea Centralis zu bringen. Dies geschieht durch eine entsprechende Vergenzeinstellung. Der sich dadurch ergebene Konvergenzzustand ist hier also durch die Retina bedingt. Foley geht davon aus, dass dies nicht das einzige vermittelnde Moment darstellt und dass es ein weiteres, außerhalb der Retina existierendes Moment gibt, das in Relation zur Vergenzeinstellung beider Augen steht. Allerdings geht er nicht über den Rahmen von Spekulation und Vermutungen hinaus.

Eine andere Richtung über die Zusammenhänge zwischen wahrgenommener Größe und Entfernung untersuchte A. Higashiyama [23]. In seinem Experiment ging er der Frage nach, wie sich ein konstruierter Wahrnehmungskonflikt zwischen subjektiver Größe und Entfernung auswirkt. Hierfür erzeugte er eine Beobachtungssituation, die wie folgt aussah:

60 Probanden mussten 3 unterschiedlich große quadratische Karten (1cm, 3cm, 5cm), welche in einem Abstand von 106cm vor ihnen angeboten wurden, der wahrgenommenen Größe entsprechend beurteilen. Dies drückten die Probanden dann in Millimeter, Zentimeter oder Meter aus, welches dann vom Versuchsleiter verbal erfragt wurde. Da die Karten sich alle im gleichen Abstand befanden, war der Entfernungshinweis, vermittelt durch die Akkommodation und Konvergenz ausgeschlossen. Lediglich der Gesichtswinkel wurde verändert und diente als Hinweis für die wahrgenommene Größe. Da die Änderung des Gesichtswinkels auch einen Hinweis für die wahrgenommene Entfernung darstellt, konnte dadurch der Wahrnehmungskonflikt zwischen subjektiver Größe und Entfernung provoziert werden. Im direkten Anschluss mussten die Probanden angeben, in welcher subjektiven Entfernung die verschiedenen Karten wahrgenommen wurden.

Ziel dieser Untersuchungsreihe war es, heraus zu finden, in wie weit das Netzhautbild bei Variation seiner Größe die wahrgenommene Entfernung und Größe beeinflusst. A. Higashiyama unterscheidet hier zwischen primärer und sekundärer Wahrnehmung. Die wahrgenommene Größe, vermittelt durch den Gesichtswinkel nennt er primär. Die wahrgenommene Entfernung, vermittelt durch die Änderung des Gesichtswinkels, nennt er sekundär.

In wie weit die beiden Anteile gewichtet sind, erfolgt über drei verschiedene Umgebungsbedingungen:

1. Binokular bei kompletter Abdunklung des Raumes.
2. Monokular mit künstlicher Pupille bei schwacher Umgebungsbeleuchtung.
3. Binokular bei maximaler Umgebungsbeleuchtung.

Er kommt zu dem Schluss, dass seine Ergebnisse sich mit denen von Ittelson (1960), Gogel und Sturm (1972) decken [23]. Diese kann man in wenigen Punkten zusammenfassen:

Die Gewichtung der primären Wahrnehmung, also die Beeinflussung der wahrgenommenen Größe, ist bei maximaler Darbietung der Entfernungshinweise am höchsten. Die Gewichtung der sekundären Wahrnehmung, also die Beeinflussung der wahrgenommenen Entfernung, nimmt umso mehr zu, desto minimaler die Entfernungskriterien werden. Primäre und sekundäre Wahrnehmung schließen sich nicht aus, sondern laufen simultan ab.

Eine andere Untersuchungsrichtung knüpfte an die experimentellen Grundlagen Luneburgs an. A. Gilinsky [24] versuchte, ausgehend von Luneburgs Gleichungen, eine mathematische Beschreibung von wahrgenommener Größe und wahrgenommener Entfernung zu formulieren.

In ihrer Arbeit „Perceived size and distance in visual space“ leitet A. Gilinsky quantitative Gleichungen für die Beschreibung der wahrgenommenen Größe und wahrgenommenen Entfernung ab. Dies geschieht unter der Voraussetzung, dass die Grundgleichung von Luneburg bezüglich der Metrik des Sehraums gültig ist. Diese beiden quantitativen Gleichungen sollen in einer wechselseitigen Beziehung zueinander stehen. Ihre Formulierungen sollen aus drei verschiedenen Standpunkten heraus zu den jeweils gleichen Bestimmungsgleichungen führen. Ihre beiden Formulierungen leitet sie wie folgt ab:

1. Konsequente Ableitung der mathematischen Formulierungen aus der Luneburg'schen Basisgleichung betreffend der Metrik des Sehraums.
2. Ableitung aus den Prinzipien der Perspektive (= empirische Entfernungskriterien)

3. Ableitung der beiden Formulierungen aus einer Art Komposition der Gesetze für die Größenkonstanz und dem Gesetz des reinen Schwinkelsehens (nur das Netzhautbild ist die einzige Informationsquelle).

Die beiden Formulierungen lauteten:

1.  $wE = (D \cdot A) / (A + D)$  hier ist:  $wE$  = wahrgenommene Entfernung  
 $D$  = objektive Entfernung  
 $A$  = variabler Parameter, der abhängig von den vorliegenden Entfernungskriterien ist.
2.  $wG = (S \cdot B) / (A + D)$ ; mit  $B = A + \delta$   
hier ist:  $wG$  = wahrgenommene Größe  
 $S$  = objektive Größe (Referenzgröße)  
 $B$  = Definition von wie in Gleichung 1, mit einem Korrektionsterm  $\delta$ .

Diese beiden Formulierungen leitet sie aus drei unterschiedlichen Ausgangssituationen ab.

G. Frey [25] zeigt aber in seiner Abhandlung Fehler auf, so dass die beiden Gleichungen sehr fragwürdig oder eigentlich falsch sind. Sie lassen sich nicht aus der Basisgleichung von Luneburg ableiten. Denn ihre Annahmen welche sie aufstellte setzten voraus, dass die Metrik Luneburgs eine euklidische ist. Dies ist bekanntlich eben nicht der Fall. Luneburg geht von einer hyperbolischen Metrik des Sehraums aus. Die Gleichungen resultieren lediglich aus geschickten Substitutionen und Grenzwertbildungen. Auch kann Frey zeigen, dass die Ableitungen aus Punkt 2 und 3 fragwürdig sind.

Bei eigener Überprüfung ihrer mathematischen Ableitung, bezüglich Punkt 1 ist es verwunderlich, dass A. Gilinsky davon ausgeht, diese als phänomenologische Bestimmungsgleichungen zu sehen.

In zahlreichen Versuchen untersuchte Kienle [1] einige Eigenschaften aus der euklidischen Geometrie, hier besonders die des Parallelenaxioms. Um das Parallelenaxiom zu überprüfen, benutzte er ein Experiment aus der Geodäsie.

Drei in einer Ebene liegende Geraden eines Strahlenbüschels werden von einer vierten Geraden außerhalb des Schnittpunktes geschnitten. Verdoppelt man nun den Abstand vom Kreuzungspunkt zum Schnittpunkt, dann liegen die neuen Punkte wieder auf einer Geraden. Dies setzt aber die Gültigkeit des Parallelenaxioms voraus (es entstehen jeweils ähnliche Dreiecke) (vgl. Abb. 5).

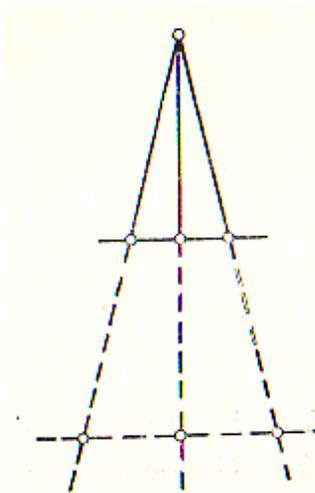


Abb. 5: Verdoppelung des Punkteabstandes vom Schnittpunkt führt zu zwei Paaren ähnlicher Dreiecke.

Versuchspersonen mussten auf drei Schnüren (= Geradenbüschel) Kugeln als Punkte verschieben. Zwei Kugeln (schwarz) waren fest vorgegeben. Eine dritte Kugel musste von der Versuchsperson so eingestellt werden, dass eine Mittellinie entstehen konnte. Jetzt mussten die Strecken jeweils verdoppelt werden. Lag das so eingestellte Punktetrippl nicht auf einer Geraden, so ist dies mit einer euklidischen Geometrie nicht vereinbar (vgl. Abb.6).



Abb.6: Versuchspersonen mussten die Verdoppelung der Strecken selbst einstellen.  
Es entstehen keine geraden Basisflächen der Dreiecke.

Aus seinen Versuchsergebnissen folgert Kienle, dass für den Sehraum das hyperbolische und nicht das euklidische Parallelenaxiom gilt.

Des Weiteren sind die Untersuchungen von Indow und Watanabe [26] zu erwähnen. In zahlreichen Experimenten versuchten sie Luneburgs Theorie zu verifizieren. T. Indow und T. Watanabe untersuchten experimentell die Luneburg-Theorie in der Horopterebene (frontoparallele Ebene). Sie gingen der Fragestellung nach, ob der Unterraum des visuellen Sehraums in der Horopterebene, euklidisch, elliptisch oder hyperbolisch ist. Ihre Experimente erfolgten bei absoluter Dunkelheit und wurden an Parallel- und Distanzalleen umgesetzt. Effektiv wurde das Parallelenaxiom überprüft.

Diese Konfigurationen entsprechen in etwa den Blumenfeld-Alleen.

Ihre Ergebnisse ergaben messtechnisch kein merkliches Auseinanderfallen zwischen den Einstellungen der Parallel- und Distanzalleen in der Horopterebene. An der Studie nahmen 6 Personen teil.

In einer anderen Studie untersuchten T. Indow und T. Watanabe die Metrik des visuellen Sehraums unter anderen Versuchsbedingungen. Die theoretischen Voraussetzungen entsprachen denen ihrer ersten Studie. Die experimentelle Umsetzung geschah wie folgt: Bewegbare Punkte wurden 1. bei Dunkelheit und 2. bei Heller Umgebung angeboten. Probanden konstruierten Parallel- und Distanzalleen. Beide Konfigurationen waren immer verschieden. Bei abgedunkelter Versuchsbedingung waren die Unterschiede größer als bei heller Umgebung.

T. Indow und T. Watanabe versuchen nicht wirklich ihre Ergebnisse zu erklären. Sie sehen ihre Ergebnisse in der Natur des visuellen Sehraumes begründet. Der ist ihrer Meinung nach nicht euklidisch, sondern besitzt eine hyperbolische Struktur. An der Studie nahmen insgesamt 8 Personen teil. Eigentlich kommen sie in ihren Arbeiten nicht über den Ansatz von Luneburg hinaus.

Wagner [27] zeigte in seinen Untersuchungen, dass die hyperbolische Geometrie des Sehraumes kaum von einer euklidischen Geometrie abweicht, wenn die Experimente unter freiem Himmel vollzogen werden.

Ein anderer Richtungszweig versuchte die optischen Objekte nach trigonometrischen Funktionen zu entwickeln. In Anlehnung zur Nachrichtentechnik bediente man sich hier des mathematischen Instrumentes, der Fouriertransformation. Die optische Abbildung wurde mittels einer optischen Übertragungsfunktion dargestellt. Man versuchte durch Zerlegung der Musterreize in seine Fourier-Komponenten einen neuen Ansatz zu entwickeln, mit der man dann vorhersagen kann, welche Muster man erkennt oder nicht. Primär richteten sich die Fragestellungen unter dem Aspekt: Wie lokalisiert und identifiziert das visuelle System örtliche Strukturen wie z.B. Linien, Balken, Kanten usw. Diesen Fragen gingen beispielsweise Caelli und Dodwell [28], Watt und Morgan [29] und Perzonius [30] nach.

Dieser sehr interessante Ansatz, Eigenschaften des visuellen Systems mittels der Fouriertransformation zu analysieren, beinhaltet eine Schwachstelle. Bei Anwendung des Fourier-Theorems auf die Mustererkennung wird vorausgesetzt, dass das visuelle System hinsichtlich der Kontrastübertragung ein lineares System ist. Das ist aber nach dem Weberschen – und Fechnerschen Gesetz nicht zu erwarten (siehe Kap.2.7). Weder die Stärke der Sinneserregung noch die Empfindungsintensitäten wachsen proportional mit der Reizgröße. Darum kann Erregung von Musterreizen nicht exakt als Summe der Erregungen ihrer Fourier-Komponenten aufgefasst werden. Da das Hauptaugenmerk in dieser Richtung nicht die subjektive Größen- und Entfernungswahrnehmung ist, soll dies auch nicht weiter verfolgt werden.

Bei Durchsicht der wissenschaftlichen Arbeiten kann man folgendes festhalten:

- Die wahrgenommene Größe wird eindeutig nicht nur von der Größe des Netzhautbildes bestimmt. Es ist sogar unter Laborbedingungen äußerst schwer, diese visuelle Situation zu erzeugen. Denn wäre die visuelle Wahrnehmungsgröße nur vom Sehwinkel (Netzhautbild) abhängig, würden sich folgende Konsequenzen ergeben:

1. Eine Strecke hat nur dann die doppelte visuelle Wahrnehmungsgröße gegenüber einer anderen, wenn der dazugehörige Gesichtswinkel die doppelte Größe hat.
2. Ferner folgt daraus, dass die visuelle Wahrnehmungsgröße eines Objektes mit Halbierung der Entfernung auf das Doppelte anwachsen müsste bei Verdoppelung der Entfernung dagegen auf die Hälfte schrumpfen müsste.
3. Des Weiteren müsste dann die visuelle Wahrnehmungsgröße, um als gleich groß in verschiedenen Entfernungen wahrgenommen zu werden, einer Zentralprojektion entsprechen, da hier der Gesichtswinkel konstant wäre.

Unter diesen Aspekten, könnte man mit Hilfe der Gesetze der geometrischen Optik die visuelle Wahrnehmungsgröße eindeutig bestimmen und berechnen. Auch kann man die oben gestellten Annahmen mit der Alltagserfahrung nicht in Einklang bringen. Die visuelle Wahrnehmungsgröße ist also nicht direkt proportional zum Sehwinkel. Die Proportionalität wird aber bei Ausschaltung der Abstandsinformationen erreicht. Dies liegt aber nur dann vor, wenn die Objekte gleich weit entfernt sind oder der Entfernungsunterschied, wie bei den Gestirnen, keine Rolle spielt.

- Die Entfernungskriterien, die dem visuellen System zur Verfügung stehen, beeinflussen also direkt die subjektive Größenwahrnehmung (Holway und Boring), (Leibowitz). Die

experimentellen Untersuchungen, welche zu diesem Ergebnis führen, hatten immer ein Augenmerk auf die Größenkonstanzleistung des visuellen Systems. Die sich daraus ergebenden Ableitungen und Konsequenzen drücken sich formal sehr gut im *Emmert'schen Gesetz* oder in der *Size-Distance-Invariance-Hypothesis (SDIH)* aus. Das „Sehwinkelgesetz“ ist aus oben geschildertem Argument eher eine theoretische Betrachtung, da sie nur bei völliger Ausschaltung der Entfernungskriterien gültig ist. Da dies im Alltag nicht vorkommt, ist es eher als eine untere Grenze in der subjektiven Größenwahrnehmung zu betrachten. Dies konnten Holway und Boring in ihren Untersuchungen sehr gut darstellen.

- Die experimentellen Untersuchungen über die wahrgenommene Entfernung wurden meist in Abhängigkeit von den Entfernungskriterien betrachtet.

Diese Untersuchungen ergaben aber kein erklärendes Konzept, wieso weit entfernte Objekte, wie z.B. Berge, in ihrer Entfernung zum Beobachter unterschätzt und Objekte, die sich sehr nah vor dem Beobachter befinden überschätzt werden (Foley), (Fischer und Loewenbach), (Günther).

Die experimentellen Untersuchungen über die wahrgenommene Entfernung in Kombination mit der wahrgenommenen Größe dienten dazu, die Größenkonstanz in ihren Eigenschaften besser zu verstehen (Ittelson und Ames), (Kilpatrick und Ittelson). Aus den bisher gewonnenen Kenntnissen kann man jedenfalls festhalten, dass die subjektive Wahrnehmungsgröße zwischen zwei Grenzen liegt. Die obere Grenze stellt die Größenkonstanz dar und die untere das Sehwinkelgesetz (Holway und Boring).

- Jedenfalls existieren noch keine Theorien, in der die beiden simultan ablaufenden Prozesse „wahrgenommene Größe“ und „wahrgenommene Entfernung“ vorkommen und die visuellen Phänomene alle beschreibt (Gilinsky, Frey). Es handelt sich immer um Teilbereiche ihrer Beschreibung. Diese werden zwar sehr gut erklärt, aber scheitern dann an anderen existierenden visuellen Phänomenen. Dass dies so ist, soll an folgenden zwei Phänomenen dargestellt werden.

### 1. Beispiel:

Wenn der Mond am Horizont steht, sieht er größer aus, als wenn er sich am Zenith befindet. Dabei hat er in beiden Situationen die gleiche physikalische Größe. Es soll hier nicht auf das Mondphänomen und seinen zahlreichen Erklärungsmodellen eingegangen werden. Hier ist nur der Erklärungsversuch von Interesse, der bezüglich dieser Arbeit eine Rolle spielt.

Würde man die Mondtäuschung mit dem Prinzip der Größenkonstanz erklären, müsste man wie folgt argumentieren: der Mond erscheint am Horizont deshalb größer, weil er weiter entfernt wahrgenommen wird und mit der *SDIH* bei konstantem Sehwinkel die wahrgenommene Größe proportional wächst. Bei diesem Erklärungsmodell taucht der Widerspruch auf, dass für viele Beobachter, der Mond am Horizont näher wahrgenommen wird als am Zenith.

Es gibt zwar von Rock und Kaufmann [31] den Versuch diesen Widerspruch aufzulösen, dies geschieht aber nur durch Einführung einer zusätzlichen Variablen, welche die wahrgenommene Entfernung modifiziert.

Rock und Kaufmann argumentieren in etwa so: „Weil wir aber Größenunterschiede als Hinweis auf die Entfernung interpretieren und wissen, dass sich Gegenstände mit wachsendem Abstand scheinbar verkleinern, könnte sich hinter der angeblich wahrgenommenen Entfernung auch ein Erfahrungsurteil verbergen. Da der Mond am Horizont größer wahrgenommen wird, schließen wir vielleicht nur, dass er näher sein muss.“ [31].

Eigentlich ist hier die Entfernungsvariabel in der *SDIH* nur einfach undefiniert worden. Das Mondphänomen kann nicht durch die *SDIH* erklärt werden, es sei denn, man führt neue Definitionen über die Entfernung ein.

Ein weiteres Beispiel für einen ähnlichen Widerspruch wie beim Mondphänomen ist folgender:

## 2. Beispiel:

Betrachtet man binokular ein Objekt im physikalischen Raum, so wird es bei monokularer Betrachtung (ein Auge wird hierbei zugekniffen und nicht mit der Hand abgedeckt) etwas kleiner und etwas weiter entfernt wahrgenommen [32]. Dies kann man allerdings nur dann beobachten, wenn das visuelle System keine Einschränkung in der physiologisch bedingten Raumwahrnehmung hat. Der Beobachter muss also über eine funktionierende Stereopsis verfügen. Der Autor hat dies in zahlreichen Versuchen mit seinen Schülern überprüft! Dies kann man in Eigenversuchen sehr schnell überprüfen. Auch kann man zuerst monokular ein Objekt betrachten, indem man ein Auge zukneift und anschließend binokular das Objekt anblickt. Bei mehrmaligen Versuchen, wird man dann eine Vergrößerung und ein etwas näher Heranrücken des Objektes wahrnehmen.

Auch hier kann das *SDIH-Modell* nicht dieses Phänomen erklären. Das Netzhautbild wird ja monokular nicht kleiner und der Sehwinkel bleibt konstant. Nach dem *SDIH-Modell* müsste die monokular wahrgenommene Größe aber wachsen, da die wahrgenommene Entfernung zunimmt. Auch hier ergibt sich wieder ein Widerspruch zwischen theoretischer Vorhersage des *SDIH-Modells* und der Beobachtung.

Die *SDIH* gilt als die quantitative Formulierung der Größenkonstanz. Sie widerspricht aber dem Mondphänomen und dem obigen Beispiel.

Als Fazit kann man hier sagen:

1. Die Größenkonstanz und das Mondphänomen sind empirisch gut gesichert.
2. Die *SDIH* gilt als quantitative Formulierung der Größenkonstanz. Sie steht aber im Widerspruch zu den beiden oben geschilderten Fällen.

- Die Annahme von Luneburg, dass die subjektive Wahrnehmungsgröße und die Größenkonstanz durch den Abbildungsvorgang aus einem euklidischen in einen nichteuklidischen Raum entstehen, ist zwar sehr einfallsreich, aber berücksichtigt nicht die physiologische Begebenheiten.

Er sieht als einzigen Entfernungshinweis den Konvergenzwinkel. Akkommodation, Netzhautbild und die empirischen Motive berücksichtigt er gar nicht. Dies widerspricht den sinnesphysiologischen Tatsachen.

Auch die Arbeiten seiner Schüler und spätere Versuche, seine Theorie zu untermauern, berücksichtigen dies nicht (Blank, Watanabe). Sie umgehen dies, in dem sie den Sehraum hinsichtlich seiner Struktur untersuchen. Dies kann man dadurch ableiten, dass die Arbeiten primär auf die Bestimmung der Gauss'schen Krümmungskonstante  $K$  ausgelegt sind. Dabei stellt sich überhaupt die Frage, ob man im subjektiven visuellen Wahrnehmungsraum das Parallelenaxiom überprüfen kann. Die Parallelität zweier Geraden ist ein Begriff aus der Geometrie und macht vielleicht im Sehraum gar keinen Sinn.

Lediglich die Untersuchungen von Kienle bezüglich des Parallelenaxioms unterstützen die Hypothese eines nichteuklidischen Sehraums. Allerdings blieben seine Untersuchungen ohne Konsequenzen. Auch bestätigt die neuere Arbeit von Wagner [27] die Theorie von Luneburg nicht.

## 1.2 Zielrichtung und Abgrenzung der aktuellen Arbeit

Es soll hier ein Modell entwickelt werden, welches in der Lage ist, die obigen visuellen Phänomene qualitativ zu erklären. Diese visuellen Phänomene sind:

Primär:

1. Beeinflussung der wahrgenommenen Größe durch Entfernungskriterien.
2. Größenkonstanzleistung des visuellen Systems.

Wobei im Fall der Größenkonstanz der Bereich betrachtet wird, den man „orthostereoskopischen Bereich“ nennt (ca. 30–100 cm bei kleinen Gegenständen (= Ellenbogenlänge)) [1]. In ihm gilt nahezu die perfekte Größenkonstanz! D.h., hier ist die wahrgenommene Größe unabhängig vom Gesichtswinkel und nur eine lineare Funktion des Abstandes.

Sekundär:

3. Unter- und Überbestimmung der wahrgenommenen Entfernung.

Nahe gelegene Objekte werden in ihrer Entfernung zu uns im Abstand überschätzt, weit entfernte Objekte werden in ihrem Abstand zu uns, unterschätzt [1], [7], [11], [22].

Annahme 1:

Es existiert eine Abstandsinformationsdichte (*AID*), die bei einem gegebenen Sehraum die subjektive Wahrnehmungsgröße beeinflusst.

Unter *AID* soll folgendes verstanden werden: Die Menge aller Entfernungskriterien und Hinweise, die ein Subjekt neuronal verwerten kann, um auf einen Abstand bei einem gegebenen Sehraum schließen zu können. Diese befinden sich sowohl im physikalischen Außenraum, als auch im Subjekt selbst.

Die Verwertbarkeit dieser Entfernungshinweise erfolgt über folgende Komponenten:

1. Physiologische Komponenten: Akkommodation, Konvergenz, Querdispersion und Netzhautbild.
2. Empirische Komponenten: alle Hinweise die einem Einäugigen zur Verfügung stehen. Sie bedingen das Erfassen einer Entfernung und ermöglichen es ihm, eine Raumgliederung zu abstrahieren.

Die *AID* beeinflusst die wahrgenommene Größe eines physikalischen Objektes wie folgt:

Bei einem gegebenem Sehraum wird die wahrgenommene Größe, bei hoher Abstandsinformationsdichte relativ zu einer niedrigen, nach oben verrechnet. Das bedeutet,

sie wird dann größer wahrgenommen. Bei einem niedrigen *AID-Wert* ergeben sich dann umgekehrte Verhältnisse.

Dass diese Annahme berechtigt ist, ergibt sich aus der Tatsache, dass binokular betrachtete Objekte größer wahrgenommen werden, als monokular (wie schon oben erwähnt, setzt dies eine funktionierende Stereopsis voraus!). Die simultan veränderte Entfernungswahrnehmung wird hier noch nicht berücksichtigt, da sie sich in der Argumentation nicht auswirkt.

Formal soll dies wie folgt ausgedrückt werden:

1.  $AID \uparrow$  (Dichte erhöht sich)  $\Rightarrow wG \uparrow$  ( wird größer)
2.  $AID \downarrow$  (Dichte verringert sich)  $\Rightarrow wG \downarrow$  (wird kleiner)

Hier ist  $wG$  die wahrgenommene Größe.

### Annahme 2:

Dass die wahrgenommene Größe und Entfernung sich entgegengesetzt verhält, ist durch zahlreiche Untersuchungen empirisch gut gesichert. Durch die Einführung der „*AID*“ ist ein gegebener Sehraum vorausgesetzt. Das reziproke Verhalten der beiden Parameter muss sich natürlich in einer qualitativen Formulierung widerspiegeln.

In einem physikalischen Raum kann man in einer gegebenen Beobachtungssituation eine konstantes Verhältnis (Objektgröße/Objektentfernung) bilden. Ebenso kann man auch ein konstantes Produkt bilden (Objektgröße  $\cdot$  Objektentfernung).

Mit diesem konstanten Produkt, gebildet im physikalischen Raum und dem reziproken Verhalten der wahrgenommenen Größe und Entfernung im Sehraum, wird folgendes aufgestellt.

Es existiert in einem gegebenen Sehraum folgende qualitative Relation zwischen dem physikalischen Raum und dem Sehraum:

$$(1) S \cdot D \sim wG \cdot wE$$

hier ist:  $S$  = objektive Größe eines Objektes

$D$  = objektive Entfernung des Objektes

$wE$  = wahrgenommene Entfernung des Objektes

Mit dieser qualitativen Relation ergeben sich für einen konstanten Gesichtswinkel  $\alpha$  (statische Bedingung) und der in Annahme 1 eingeführten „*AID*“ folgende Konsequenzen:

$$1. \text{ Fall: } AID \uparrow \Rightarrow wG \uparrow$$

$$\Rightarrow S \cdot D \sim wG \uparrow \cdot wE \downarrow$$

$$2. \text{ Fall: } AID \downarrow \Rightarrow wG \downarrow$$

$$\Rightarrow S \cdot D \sim wG \downarrow \cdot wE \uparrow$$

Mit den beiden aufgestellten Annahmen lassen sich jetzt die beiden oben vorgestellten Beispiele qualitativ erklären:

### - Mondphänomen:

Dass der Mond am Horizont größer und näher zum Beobachter erscheint, kann jetzt durch die oben aufgestellte qualitative Relation (1) gut erklärt werden. Am Horizont hat die *AID* einen höheren Wert als am Zenit. Die Entfernungskriterien sind am Horizont zahlreicher als am Zenit. Deshalb wird die wahrgenommene Größe nach oben verschoben.

Da der Mond am Horizont und am Zenit den gleichen Gesichtswinkel ( $30^\circ$ ) besitzt ist, bleibt  $S \cdot D = \text{konstant}$ . Daraus ergibt sich dann  $S \cdot D \sim wG \uparrow \cdot wE \downarrow$ . Die Konsequenz ist dann folglich, dass der Mond näher wahrgenommen wird, als am Zenit.

Am Zenit gilt:  $S \cdot D \sim wG \downarrow \cdot wE \uparrow$ . Der Mond wird dort kleiner und weiter entfernt wahrgenommen.

### - Variation der Größen- und Entfernungswahrnehmung bei mono- und binokularem Sehen:

Betrachtet man binokular ein Objekt im physikalischen Raum, so wird es bei monokularer Betrachtung etwas kleiner und etwas weiter entfernt wahrgenommen. Dies kann mit der aufgestellten Relation (1) ebenfalls gut erklärt werden. Die *AID* ist bei binokularem Sehen höher als beim monokularen Sehen, da im zweiten Fall der Konvergenzgrad als Entfernungskriterium wegfällt.

Da auch hier gilt:  $S \cdot D = \text{konstant}$ , ergibt sich dann:  $S \cdot D \sim wG \downarrow \cdot wE \uparrow$ . Das kleiner werden der wahrgenommenen Größe hat dann die Vergrößerung der wahrgenommenen Entfernung zur Konsequenz.

Als nächstes soll gezeigt werden, wie mit diesem Modell die Größenkonstanz qualitativ erklärt werden kann. Im Fall der Größenkonstanz ist der Ausgangspunkt kein statischer mehr, sondern unterliegt dynamischen Bedingungen, so dass die oben aufgestellte Relation (1) umgeformt wird. Es gilt dann:

$$(2) S / wG \sim wE / D$$

### - Die Größenkonstanz:

Die Größenkonstanz setzt bekanntlich dann ein, wenn Objekte sich zum Beobachter hin- oder vom Beobachter wegbewegen. In beiden Fällen variiert jeweils der Gesichtswinkel  $\alpha$ . Nähert sich ein Objekt, so wird die wahrgenommene Größe nach unten abgewertet, entfernt es sich, so wird die wahrgenommene Größe nach oben aufgewertet.

1. Fall:  $D \downarrow$  und  $S \uparrow$

$$S \uparrow / wG \downarrow \sim wE \uparrow / D \downarrow$$

Durch die Verringerung der physikalischen Entfernung wird die wahrgenommene Größe des Objektes verkleinert. Dies deckt sich mit der Tatsache, dass die Vergrößerung des Netzhautbildes und damit  $\alpha$ , durch die Größenkonstanz nach unten verrechnet wird. Damit die qualitative Relation formal gleich bleibt, muss sich simultan eine Vergrößerung der wahrgenommenen Entfernung ergeben. Das bedeutet folgendes: Die Größenkonstanzleistung

erzeugt in diesem Formalismus eine zusätzliche Überbestimmung der wahrgenommenen Entfernung.

2. Fall:  $D \uparrow$  und  $S \downarrow$

$$S \downarrow / wG \uparrow \sim wE \downarrow / D \uparrow$$

Durch die Vergrößerung der physikalischen Entfernung wird die wahrgenommene Größe des Objektes vergrößert. Auch dies deckt sich mit der Tatsache, dass die Verringerung des Netzhautbildes und damit  $\alpha$ , durch die Größenkonstanz nach oben verrechnet wird. Damit die qualitative Relation formal gleich bleibt, muss sich hier simultan eine Verkleinerung der wahrgenommenen Entfernung ergeben, Das bedeutet folgendes: Die Größenkonstanzleistung erzeugt in diesem Formalismus eine zusätzliche Unterbestimmung der wahrgenommenen Entfernung.

Das auslösende Moment in beiden Fällen ist die Veränderung des physikalischen Abstandes, welches eine Variation der Netzhautbildgröße erzeugt. Prüfstein, ob die (2) Relation die Größenkonstanz tatsächlich qualitativ richtig beschreibt, ist die sich simultan einstellende Variation der wahrgenommenen Entfernung.

Bestätigt sich die aus dem Formalismus für die Größenkonstanz ergebene Variation der wahrgenommenen Entfernung, so könnte man mit diesem Modell die Unbestimmtheit der wahrgenommenen Entfernung qualitativ verstehen.

### **- Unbestimmtheit in der Entfernungswahrnehmung:**

Die Unbestimmtheit der wahrgenommenen Entfernung mit dem eingeführten Modell zu erklären ist etwas schwieriger, da es sich hierbei um ein fehlerhafte Wahrnehmung der Objektentfernung handelt und der Gesichtswinkel  $\alpha$  dabei konstant ist.

Wenn man aber die Größenkonstanzleistung, die in dieser Beobachtungssituation auch mit einfließt berücksichtigt, kann mittels Relation (2) und statischer Beobachtungssituation folgendes aufgestellt werden:

1. Fall:  $wE \uparrow$  und  $wG \downarrow$

Da die Überschätzung der Entfernung im Nahbereich vorliegt, muss dort die wahrgenommene Größe nach unten verrechnet werden, da sich das durch die Größenkonstanz zwangsläufig ergibt.

$$S / wG \downarrow \sim wE \uparrow / D$$

Damit die Relation gleich bleibt, erzeugt die Größenkonstanz im Nahbereich eine Vergrößerung der wahrgenommenen Entfernung.

2. Fall:  $wE \downarrow$  und  $wG \uparrow$

Da die Unterschätzung der Entfernung im Fernbereich stattfindet, muss dort die wahrgenommene Größe nach oben verrechnet werden.

Daraus ergibt sich dann:

$$S/wG \uparrow \sim wE \downarrow / D$$

Damit die Relation auch hier gleich bleibt, erzeugt die Größenkonstanz im Fernbereich eine Verringerung der wahrgenommenen Entfernung.

Der gerade beschriebene Vorgang könnte als analog zur Größenkonstanz gesehen werden. Der Unterschied zur Größenkonstanz liegt im konstanten physikalischen Abstand und in der konstanten Objektgröße.

Der Faktor, welcher hier das auslösende Moment für die Über- und Unterbestimmung der Entfernung darstellt, kann noch nicht richtig formuliert werden. Es wird aber vermutet, dass es sich hierbei um eine Überlagerung aus den Konsequenzen der Größenkonstanz, wie in Annahme 2 geschildert, und den Konstituenten, welche die *AID* bedingen, handelt.

### 1.3 Intention und Erläuterung der Versuchsreihen

Dass die Annahmen 1 und 2 berechtigt sind, soll experimentell verifiziert werden. Aus den aufgestellten Annahmen ergeben sich folgende vier Arbeitshypothesen für die visuelle Erfassung der Wahrnehmungsgröße und seine simultane Entfernungswahrnehmung.

1. Die subjektive visuelle Wahrnehmungsgröße ist von der *AID* wie folgt abhängig: Das visuelle System bewertet subjektiv die Wahrnehmungsgröße bei maximaler *AID* nach oben und relativ dazu, bei minimaler *AID* nach unten.
2. Die *AID* wird durch folgende Parameter bedingt:
  - a. die Akkommodation
  - b. der Konvergenzgrad
  - c. die Querdisparation
  - d. die Empirie
  - e. das Netzhautbild
3. Im orthostereoskopischen Bereich (ca. 30–100 cm bei kleinen Gegenständen) ist die subjektive Wahrnehmungsgröße, ausgelöst durch die Größenkonstanzleistung des visuellen Systems, maximal unabhängig vom Sehwinkel. Des Weiteren genügt die Größenkonstanz qualitativ dem aufgestellten Formalismus aus Annahme 2.
4. Die Unbestimmtheit in der visuellen Wahrnehmungsentfernung genügt qualitativ dem aufgestellten Formalismus aus Annahme 2.

Es soll in dieser Arbeit experimentell untersucht werden, in wieweit die *AID* die visuelle Wahrnehmungsgröße beeinflusst und verändert. Bestätigen die Messdaten aus den Untersuchungsreihen quantitativ die aufgestellten Relationen (1) und (2).

Das 2. Ziel dieser Arbeit soll die Ableitung einer Fitting-Funktion sein, mittels derer eine Computersimulation, die dem 1. Punkt der aufgestellten Arbeitshypothesen Rechnung trägt, und diese visualisiert.

Die oben aufgestellten Arbeitshypothesen bezüglich des visuellen Systems sollen experimentell in zwei unabhängigen Versuchsreihen, die jeweils in acht verschiedenen Messreihen untergliedert sind, verifiziert werden.

In der Versuchsreihe I soll eine Zentralprojektion (konstanter Gesichtswinkel) mit subjektiven Größeneinstellungen verglichen werden. Hierfür wurde ein Experiment entwickelt, bei dem die Probanden die Aufgabe hatten, in einer Entfernung von 485 cm eine Referenzgröße von 45,6 cm, auf die unterschiedlichen Entfernungen 30,5, 90, 185, 285, 385 und 589 cm, mit der Instruktion „gleichgroß“ einzustellen.

Die subjektiven Größeneinstellungen werden durch Variation der zugelassenen Abstandsinformationen von minimal bis maximal gemessen und der Zentralprojektion gegenüber gestellt.

In der Versuchsreihe II wird die Abstandsunterschiedsschwelle unter gleichen Versuchsbedingungen wie in der Versuchsreihe I gemessen. Auch hier werden die Abstandsinformationen von minimal bis maximal sukzessive zugelassen.

Wenn sich die aufgestellten Arbeitshypothesen bestätigen sollen, müsste sich in der Versuchsreihe I folgendes ergeben:

1. In den einzelnen Messreihen ergibt sich ein Anstieg der eingestellten Größe, umso mehr Abstandsinformationen zugelassen werden. Die Abweichungen zwischen der objektiv- und der subjektiv eingestellten Größe wird umso mehr zunehmen, desto größer die *AID* wird.
2. In allen Messreihen sind die monokularen Größeneinstellungen bei sonst gleichen Abstandsinformationen gegenüber der binokularen Größeneinstellung geringer, da im letzteren Fall jeweils die *AID* größer ist.
3. Im orthostereoskopischen Bereich sollte in allen Messreihen die subjektive Größeneinstellung die größte Differenz gegenüber der Zentralprojektion aufweisen, da in diesem Bereich die maximale Unabhängigkeit der visuellen Wahrnehmungsgröße vom Gesichtswinkel vorliegt.

Für die Versuchsreihe II sollte sich ergeben:

1. Die Abstandsunterschiedsschwelle ist bei minimaler *AID* am größten, d.h. der Fehler in der Einschätzung des Objektortes am größten.
2. Die Abstandsunterschiedsschwelle ist bei maximaler *AID* am geringsten, d.h. der Fehler in der Einschätzung des Objektortes am kleinsten.

Die 2. Versuchsreihe wurde zusätzlich als unterstützende Argumentation für die aufgestellte Arbeitshypothese entwickelt. Sie hat dadurch einen sekundären Charakter. Die Messdaten beider Versuchsreihen sollen korreliert werden und somit die Relationen (1) und (2) aus den aufgestellten Annahmen bestätigen.

## **2. Grundlagen und Methodiken bezüglich des subjektiven visuellen Wahrnehmungsraumes**

In der Psychophysik spielt die Vorstellung von einem naturgegebenen Wahrnehmungsraum eine große Rolle. Die Vorstellung sagt, dass bei allen räumlichen Wahrnehmungen, außer den Reizen der Außenwelt, noch interne Vorgaben für die räumliche Verarbeitung wirksam sind. Diese internen Vorgaben sollen erklären, warum man z.B. den „schiefen Ames Raum“ rechtwinklig sieht und wie es zur Größen- und Formkonstanz und überhaupt zu der Räumlichkeit aller Wahrnehmungen kommt.

### **2.1 Die nativistische und die empiristische Anschauung**

Setzt man sich mit der geschichtlichen Entwicklung der Theorie des Sehens auseinander, so stößt man auf Ansichten über das Wesen der Gesichtswahrnehmung, die meist durch die Art der Naturbetrachtung geprägt waren. In dieser Arbeit soll nur auf die Anschauung beginnend ab dem 19. Jahrhundert eingegangen werden. In der räumlichen visuellen Wahrnehmung trat eine klare Scheidung zweier Anschauungen ein, die für uns von größerem Interesse ist. Diese beiden Anschauungen bezeichnet man als die nativistische und empiristische Theorie.

#### **- Die nativistische Theorie**

Diese Anschauung geht davon aus, dass das Sehorgan auf einen Reiz primär mit einem Ort und einer Farbe reagiert. Der verursachende Reiz bedingt dies automatisch. Es findet aber keine geistige Leistung statt, die den ursprünglich ortslosen Empfindungen einen scheinbaren Ort verschafft [33]. Zurückführend auf J. Müller (1826) wurden folgende Sätze formuliert:

1. die Netzhaut empfindet sich selbst räumlich ausgedehnt und verlegt jeden Reiz im Sinne der Richtungsstrahlen in den äußeren Sehraum.
2. identische Punkte beider Netzhäute werden im Sensorium durch einen einzigen Punkt repräsentiert.

Neben dem Netzhautbild dienen auch die Augenbewegungen, wenn auch nur als sekundäres Hilfsmittel, zur Raumauffassung. Durch den Wechsel des Fixationspunktes werden verschiedene Raumbereiche sukzessiv aufgefasst. Durch die Synergie der binokularen Bewegungen wird ein Entstehen von störenden Doppelbildern vermieden.

Die Ansichten von J. Müller scheiterten jedoch an den Erscheinungen des Binokularsehens. Denn sie konnten nicht erklären, warum Gegenstände einfach gesehen werden, obwohl diese sich auf nicht-identischen Netzhautstellen abbilden. Desweiteren kann sie auch nicht die Stereopsis erklären.

Die Lehre von J. Müller wurde durch E. Brücke (1841) und P.L. Panum (1858) weiterentwickelt. Sie stellten verschiedene Hilfshypothesen auf, um die Defizite der Müllerschen Theorie zu beseitigen. Es soll hier die Hilfshypothese von Panum genauer betrachtet werden, da sie in der Gegenwart noch präsent ist. Panum nahm an, dass es eine angeborene Hilfseinrichtung gebe, die auch die Verschmelzung nicht-identischer Netzhautstellen und die Tiefenwahrnehmung vermitteln könne. Er führte den Panumschen Empfindungskreis ein. Streng genommen handelt es sich hierbei um ein elliptisches Areal, dessen längere Achse horizontal liegt. Dieser sollte jedem Punkt der einen Netzhaut, einen korrespondierenden Empfindungskreis der anderen Netzhaut zuordnen.

Mit identischen Netzhautstellen müsse, mit korrespondierenden Netzhautstellen könne einfach gesehen werden. Die Tiefenwahrnehmung ist von der Parallaxe der verschmelzenden nicht-identischen Netzhautstellen abhängig. Dies nannte Panum die Synergie der binokularen Parallaxe. Er stellte noch ein paar weitere Hypothesen auf, die aber unberücksichtigt bleiben können. Die Synergielehre von Panum wurde dann von E. Hering (1865), dem wohl bekanntesten Repräsentanten der nativistischen Theorie, zum Abschluss gebracht [34].

Nach Hering soll jeder Netzhauteneindruck drei verschiedene Arten von Raumempfindungen mit sich führen: das sind Höhen-, Breiten- und das Tiefengefühl.

Die beiden ersten bilden zusammen das Richtungsgefühl für den Ort im Sehfeld. Sie sind für identische Netzhautstellen von gleicher Größe. Das Tiefengefühl dagegen, hat für je zwei identische Netzhautstellen gleiche Werte, aber von entgegengesetzter Größe, so dass für ihn der Tiefenwert null resultiert. Alle Bildpunkte, die den Tiefenwert null besitzen, erscheinen in der gleichen Ebene, die Hering Kernfläche des Sehraumes nennt [34].

Dagegen haben die Tiefengefühle der temporalen Netzhauthälften positive Werte, d.h. ihre Bildpunkte erscheinen hinter der Kernfläche. Die Tiefengefühle der nasalen Netzhauthälften besitzen negative Tiefenwerte, so dass sie uns vor der Kernfläche erscheinen.

Nur die Eindrücke der korrespondierenden Netzhautstellen führen zum einfachen Seheindruck. Wo sonst noch eine Verschmelzung stattfindet, wird sie aus psychologischen Ursachen abgeleitet [6].

Herings Theorie der Raumwahrnehmung kann überwiegend auf physiologische Vorgänge zurückgeführt werden.

Jedoch ist sie nicht in der Lage, eine Kardinalfrage zu beantworten: Wie bestimmt sich die scheinbare Lage eines Objektes und worauf beruht der absolute Entfernungseindruck?

Bei Beantwortung dieser Fragen muss die nativistische Theorie auf psychologische Erklärungsversuche zurückgreifen. Man nennt sie auch „zentrale Vorgänge“.

Es existiert in jedem eine ursprüngliche Empfindung der räumlichen Ausdehnung unseres Körpers, und unsere Aufmerksamkeit und unser Wille kann beliebig im Raume hin und her wandern, ohne den Bezug zum Körper zu verlieren. Ein solches Hin und Herwandern bedingt eine Bewegung des Fixationspunktes, welche eine Verschiebung des Netzhautbildes auf der Retina erzeugt und somit die Orientierung verbessert. Dabei wirken angeborene Mechanismen, wie der reflektorische Zwang, Doppelbilder von Objekten durch entsprechende Akkommodations- und Konvergenzänderungen in die Netzhautgrube zu bringen und einfach zu sehen. Als weiterer psychologischer Erklärungsversuch wird die Erfahrung herangezogen. Diese soll gegenwärtige Eindrücke mit vergangenen beurteilen und so eine genauere Orientierung im Raume vermitteln, besonders bei der Tiefenlokalisierung.

Wie man sich die Zusammenwirkung der einzelnen, an der Raumwahrnehmung beteiligten Komponenten zu denken hat, und was man unter Erfahrung verstehen soll, wird nicht weiter ausgeführt [35].

## - Die empiristische Theorie

Für die empiristische Theorie ist Helmholtz der Hauptrepräsentant, so wie Hering eben dies für die nativistische ist. Wesentliches Merkmal der empiristischen Theorien der Gesichtsvorstellungen ist die Zuhilfenahme der Tastempfindungen bei der Orientierung. Die empiristische Auffassung geht davon aus, dass die Gesichtsempfindungen ursprünglich unlokalisiert sind und die Orte erst infolge der Erfahrung an die Qualitäten assoziiert oder irgendwie produziert werden. Wenn man annimmt, dass die Raumvorstellung irgendwoher

gegeben ist, so stellt sich aber die Frage, wie eine Assoziation an die Qualitäten des Gesichtssinnes zustande kommt.

Warum wird an der Qualität „a“, die einer bestimmten Stelle der Netzhaut angehört, der Ort „a“ assoziiert? Des Weiteren ist es merkwürdig, dass wenn der Ort keine Funktion der Netzhaut ist, die Orte, welche näher benachbarten Netzhautstellen entsprechen, einander ähnlicher sind als solche, die weniger benachbarten Stellen entsprechen. Auch bilden die phänomenalen Orte ein Kontinuum, das eindeutig dem Kontinuum der Netzhautstellen zuzuordnen ist. [33]

Eine allgemeine Schwierigkeit die sich hier abzeichnet, ist das Zustandekommen der Raumauffassung.

Zur Behebung eben dieser entwickelte Lotze die Theorie der Lokalzeichen, die Helmholtz, mit ein paar Modifikationen, in seinen Anschauungen miteinbaute.

Lotze's Lokalzeichen ist bewusster psychischer Inhalt, welche eine Bewegungs- oder eine Spannungsempfindung ist. Diese Empfindung wird durch die Augenbewegung hervorgerufen, die dazu dient, einen peripheren Reiz auf die Fovea wirken zu lassen. Die Lokalzeichen für die einzelnen Netzhautpunkte müssen verschieden sein, weil die Bewegung oder die Bewegungstendenz für jeden Netzhautpunkt eindeutig durch Richtung und Größe charakterisiert ist.

Auch Helmholtz hat sich der Lokalzeichen bei seiner empiristischen Theorie bedient. Jedoch lässt er die qualitative Natur ganz dahingestellt. An Stelle der Lotze'schen Bewegungsempfindungen tritt bei Helmholtz der bewusste Impuls zur Bewegung.

In der Ordnung dieser Lokalzeichen herrscht eine ebensolche Gesetzmäßigkeit, wie man sie für die Wirklichkeit voraussetzt. Diese Lokalzeichen sind es, die zunächst die räumliche Ordnung der Objektpunkte vermitteln. Durch Erfahrung und Einübung, wesentlich begründet auf das Innervationsgefühl der Augenmuskelnerven, entsteht die richtige Raumauffassung [36].

Die Raumauffassung ist bei Helmholtz ein Urteil über die tatsächlichen Raumverhältnisse.

Das Vorhandensein einer primären Raumempfindung war für ihn aus folgenden Gründen unmöglich: die Raumanschauung zeigt im Vergleich zu den Netzhautbildern zu große Inkongruenzen, so dass ein kausaler Zusammenhang eben dieser sehr unwahrscheinlich ist. Als Beispiel nennt er das Aufrechtsehen des umgekehrten Netzhautbildes oder das Einfachsehen trotz doppelter retinaler Abbildung. Diese lassen sich zwar durch Einführung von Hilfhypothesen erklären, aber nicht die Tatsache der Tiefendimension.

Denn die Tiefendimension kann nicht durch einen reinen angeborenen Mechanismus erklärt werden. Die empirischen Lokalisationsmotive modifizieren, ja korrigieren sogar ständig diesen Mechanismus. Diese Korrektur beruht auf Erfahrung und kann daher nicht Empfindung sein, meint Helmholtz.

Die hier kurz skizzierte empiristische Auffassung der Gesichtswahrnehmung kann weder bei Lotze noch bei Helmholtz erklären, was eigentlich ihre Intention ist:

Wenn man Muskel- bzw. Impulsgefühle und die dazugehörigen Lokalzeichen räumlich auslegt, so muss von vornherein eine Raumauffassung vorliegen, und somit erklärt diese Theorie nicht ihre Entstehung. Würde man aber annehmen, dass die Raumanschauung durch unräumliche Momente frisch entsteht, so wäre der Empirismus nur eine andere Art von Nativismus.

Die nativistische Theorie ihrerseits gerät in einen unhaltbaren Widerspruch mit sich selbst, indem sie auf der einen Seite der Erfahrung unzulässige Zugeständnisse macht und auf der anderen die physiologische Basis, auf die sie sich stellt, verlässt, um mit Hilfe der Aufmerksamkeit und dem Willen erklärend zu sein [5]

Wundt, ein Schüler Helmholtz, macht in seiner „Theorie der komplexen Lokalzeichen“ den Versuch, einen Kompromiss zwischen der nativistischen- und der empiristischen Theorie zu schlagen. Für ihn ist die Entstehung der Wahrnehmung ein psychologischer Vorgang, der der eigentlichen Erfahrung vorausgeht, ohne dabei in den Empfindungen oder deren physischen Bedingungen enthalten zu sein.

## - Die Theorie der komplexen Lokalzeichen

Diese Theorie betrachtet es als ihre Aufgabe, die empirischen Motive der räumlichen Ordnung in ihre Empfindungselemente zu zerlegen und über die gesetzmäßigen Verbindungen Voraussetzungen zu machen, die durch die tatsächlichen nachweisbaren Funktionsverhältnisse des Sehorgans gefordert werden würden.

Die Gesichtswahrnehmungen sind hiernach nun das Produkt zweier Funktionseinrichtungen. Das wären zum Einen das Netzhautbild und zum Anderen das Bewegungsbild. „Demnach setzen wir einerseits qualitative Unterschiede der Netzhautempfindungen, die vom Ort des Eindrucks abhängen, und andererseits intensive Gradabstufungen der die Bewegungen und Stellungen des Auges begleitenden Spannungsempfindungen voraus, die beide infolge der Reflexbeziehungen aller Netzhauterregungen zum Netzhautzentrum in gesetzmäßiger Verbindung stehen.“

Wundt legte sein Augenmerk, analog den Empiristen, auf die der Akkommodation und der Konvergenz begleitenden Muskelempfindungen. Allerdings sind die dazugehörigen Experimente, welche die Akkommodation betrafen, zweifelhaft.

In einem Hauptpunkte stimmt Wundt sowohl mit den Nativisten, als auch mit den Empiristen überein: die Funktionen des Auges dienen zur „Abmessung“ der Dimensionen des Sehfeldes und dem sukzessiven Erfassen des fertig und starr vorhandenen dreidimensionalen Raumes [5]

Nach Wundt kann jedes Auge in zwei Hauptrichtungen gedreht werden. Das sind die Hebung, Senkung und die Außen- und Innenwendung. Zwischen ihnen existieren alle möglichen Übergänge, denen man jeweils einen bestimmten Komplex von Druckempfindungen in der Orbita und von Lokalzeichen in der Netzhaut zuordnen kann. Diese bilden dann ein qualitatives Lokalzeichensystem, bestehend aus zwei Dimensionen. Diese Dimensionen sind ungleichartig, weil sich nach jeder Richtung die Lokalzeichen wie die Druckempfindungen in abweichender Weise ändern.

Auch Wundt versucht physiologische Erklärungsmomente in seine Theorie mit einzubauen: aus der Lagebeziehung der Netzhautpunkte zur Fovea centralis werden bestimmte Raumwerte deduziert.

Die Theorie der komplexen Lokalzeichen lässt es völlig dahingestellt, ob die Seele selbst räumlich ausgedehnt oder unräumlich ist. Sie lässt auch offen, ob die räumliche Ordnung einer angeborenen Kausalfunktion unterliegt oder nicht.

Was allen drei zuletzt skizzierten Theorien gemeinsam ist, ist ihre Voraussetzung eines objektiven, unveränderlichen, nicht wegdenkbarer Raumes. In dieser Hinsicht übernehmen sie die Kant'sche Anschauung des Raumes. Nach Kant ist ein qualitätsloser leerer Raum a priori vorgegeben.

## 2.2 Räumliche Anordnungen der wahrgenommenen Objekte

Alltäglich können wir uns davon überzeugen, dass wir Gegenstände unserer Umgebung durchaus nicht immer in der Form und in der räumlichen Anordnung sehen, die ihnen tatsächlich objektiv zukommt. Zum Beispiel scheinen Bahngleise in weiter Ferne zu konvergieren oder ragen ferne Bergriesen über nahe Vorberge nur unwesentlich hinaus.

Den Unterschied zwischen objektiven- und wahrgenommenen Objekten kann man auch bei der Betrachtung von entoptischen Bildern beobachten. Hier liegt das Objekt im Auge, das wahrgenommene Objekt dagegen außerhalb. Bei den Nachbilderscheinungen ist ein wahrgenommenes Objekt vorhanden, aber kein ihm entsprechendes Objekt, sondern nur die von ihm ausgelöste Nacherregung.

Diese und andere Tatsachen veranlassten Hering, den objektiven Raum vom subjektiven Sehraum zu unterscheiden. Das begründet er damit, dass die räumliche Anordnung der Gesichtsempfindungen mit denen des objektiven Raumes nicht identisch ist. In seinem Buch der Raumsinn, zeigt Hering eindrucksvolle Beispiele, die seine Annahme untermauern; siehe auch die Darstellung in [37].

### - Monokulare relative Lokalisation

Die wahrgenommenen Objekte nennt Hering die „Sehdinge“. Die Gesamtheit aller gleichzeitig wahrgenommenen Sehdinge bildet den subjektiven Sehraum oder das Sehfeld. Ihm entspricht im objektiven Raum das Gesichtsfeld. Das ist der Teil im Raum, der für uns bei einer gegebenen Augenstellung gleichzeitig sichtbar ist.

Man bezeichnet die scheinbare Lage der Sehdinge, in der auch die scheinbare Form und die Größenverhältnisse derselben mit inbegriffen sind, als die „relative Lokalisation“.

Wird nun ein Objekt auf der Netzhaut abgebildet, so ist die auftretende Raumempfindung schon ohne weiteres mit einem Orts- oder Raumwert verbunden. Das ist eine Tatsache, die nicht weiter erklärt werden kann. Die Orts- oder Raumwerte nennt man nach Lotze (1852) Lokalzeichen. Andere Bezeichnungen hierfür sind Richtungs- oder Raumwerte [38].

In schematischen Zeichnungen wird der Ort der retinalen Bildpunkte durch Richtungslinien dargestellt, die vom Objekt zum Knotenpunkt zielen und von dort weiter zum Netzhautbildort. Diejenige Richtungslinie, die auf die Foveola trifft, heißt Gesichtslinie.

Ihr subjektives Gegenstück: Hauptsehrichtung. Alle auf andere Netzhautstellen treffenden Richtungslinien entsprechen Nebensehrichtungen.

Im theoretischen Idealfall entsprechen die Richtungslinien den subjektiven Sehrichtungen. In psychophysikalischen Experimenten zeigt sich jedoch eine Asymmetrie in der Anordnung der Richtungswerte der Netzhaut. Ein Beispiel hierfür ist der Kundtsche Streckenteilungsversuch, bei dem der retinonasale sowie der retinal obere Anteil einer Linie in der Regel um  $1/6$  größer gewählt wurde [39]. Beim Versuch eine subjektive Vertikale lotrecht einzustellen, ist sie bei den meisten Menschen gegen den objektiven Lotmeridian verkippt und zwar mit dem oberen Ende temporal [36], [40].

Ein subjektiver Kreis wird in der Regel wie folgt eingestellt: der Radius wird nach außen (retinonasal) am größten, nach unten etwas kleiner, nach oben und nach innen noch kleiner eingestellt [41].

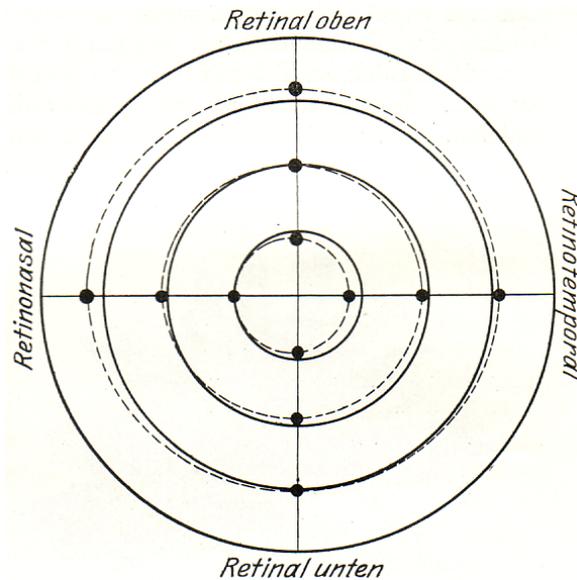


Abb.7: Schema der Streckendiskrepanzen im rechten Auge. Ansicht von hinten.  
Ein weiteres Beispiel für die Asymmetrie in der Anordnung der Richtungswerte der Netzhaut ist der Horopter.

### - Monokulare absolute Lokalisation

Neben der relativen Lokalisation, also der subjektiv empfundenen Anordnung der Objekte im subjektiven Sehraum, hat unser visuelles System eine subjektiv klare Vorstellung von vertikal und horizontal. Dies entspricht der Fähigkeit zur absoluten Lokalisation. Dies bezieht sich ausschließlich auf die Orientierung im subjektiven Sehraum.

Für diese Orientierung im subjektiven Sehraum führt man ein rechtwinkliges, räumliches Koordinatensystem ein. Deren Ebenen, die subjektive Medianebene (trennt die vor uns liegende Objekte in rechts und links), der subjektive Augenhorizont (trennt die vor uns liegende Objekte in oben und unten) und die Frontalebene (trennt die Objekte in vor und hinter uns liegend) im Kopf liegen und uns ein Bezugssystem liefern.

Die Lokalisation mit der Medianebene, des Augenhorizontes und der Frontalebene unseres Kopfes, sowie die Lagebestimmung der Sehdinge in Bezug auf diese Ebenen ermöglicht nun die „absolute Lokalisation“ [38].

Diese eingeführten Begriffe und Regeln für den visuellen Wahrnehmungsraum gelten sowohl für die monokulare als auch für die binokulare Sehweise.

### - Binokulare Sehrichtungsgemeinschaft

Dies ist deshalb möglich, weil die zunächst getrennt aufgenommenen visuellen Informationen auf Netzhautstellen mit gleichem Lokalzeichen abgebildet werden und dann zu einem gemeinsamen Sammelbild sensorisch fusioniert werden.

Allerdings muss erwähnt werden, dass bei binokularer Betrachtung eines Punktes, die binokulare Hauptsehrichtung nicht dem Kreuzungspunkt der beiden monokularen Hauptsehrichtungen entspricht.

Die binokulare Hauptsehrichtung ist ein Repräsentant der beiden monokularen Hauptsehrichtungen.

Bei symmetrischer Konvergenz ist sie geradeaus nach vorne gerichtet und scheint zwischen den beiden Einzelaugen zu liegen.

Dass die beiden monokularen Hauptsehrichtungen beim beidäugigen Sehen eine identische Sehrichtungsgemeinschaft bilden, hat Hering mit einem Fensterversuch nachgewiesen [6]. Die Bilder aller Objekte, die in den Gesichtslinien des rechten und des linken Auges liegen, werden in derselben Richtung, nämlich in der binokularen Richtung wahrgenommen, obwohl sie räumlich weit auseinander liegen.

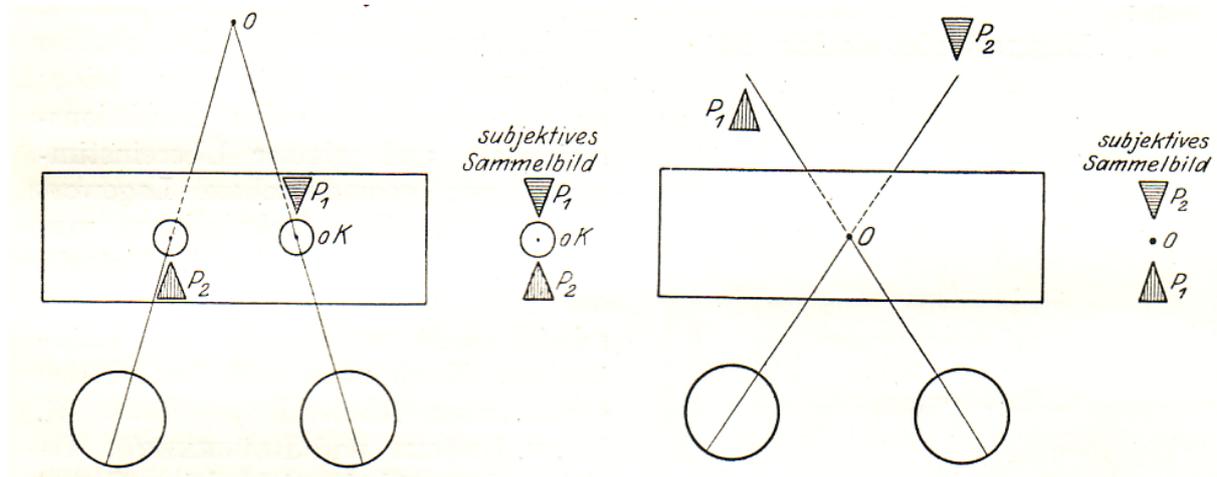


Abb.8: Fensterversuch zum Beweis der binokularen Sehrichtungsgemeinschaft.

Ein direkter Vergleich der absoluten Größen der Sehdinge mit der wahrgenommenen Größe ist nicht möglich. Man kann nur Größenverhältnisse der Sehdinge und ihre gegenseitige Lage mit den Größenverhältnissen und den gegenseitigen Lagen der ihnen entsprechenden äußeren Objekte vergleichen.

## 2.3 Über die visuell vermittelte Richtungs- und Lagebestimmung

Der reizaufnehmende Apparat des Augenhintergrundes, die Retina, ist bei der Informationsaufnahme dem einstrahlenden Licht zugewandt. Die Eigenschaften der Objekt- oder Körperwelt werden dem optischen System durch die Reflexion- und Brechungsgesetze der physikalischen Körpergrenzen und Körperoberflächen in der Umgebung vermittelt.

Bei der projektiven Abbildung der Objektwelt auf die Retina übernehmen die Diskontinuitäten in der Energieintensität oder den Wellenlängen des einstrahlenden Lichtes eine besondere Rolle. Körpergrenzen werden mittels eines steilen Energiedichtegefälles abgebildet.

Die Oberflächeneigenschaften der Körper werden durch die Änderungen der Schwingungszahl der elektromagnetischen Wellen vermittelt.

Dies ist dadurch bedingt, dass an den Grenzlinien der Körper die Reflexion des einstrahlenden Lichtes sich ändert oder die Absorption bestimmter Wellenlängen die spektrale Zusammensetzung dieser Strahlung verändert.

Diese so entstehenden Inhomogenitäten führen zu Potenziallinien der Energieverteilung auf der Retina. Diese Potenziallinien der Energieverteilung nennt man Reizmusterbildung. Von eben dieser Reizmusterbildung erfolgt eine Erregungsübertragung in das Zentralnervensystem.

In dieser Reizmusterbildung müssen auch die Informationen über den Abstand und die Richtung der Objekte im Raum liegen [42].

### 2.3.1 Parameter die der Raumlage der abgebildeten Objekte dienen

Die Richtung eines Objektes oder dessen Begrenzungslinien sind von dessen Einfallswinkel abhängig. Diese Information wird durch die optische Abbildung auf dem Augenhintergrund vermittelt. Durch eine koordinierte Leistung der sechs Augenmuskeln stellen sich die beiden Bulbi und damit die Blicklinien auf den zu betrachteten Punkt in der Umgebung ein. Diesen Punkt nennt man Fixationspunkt und die beiden Blicklinien, die zu ihm konvergieren, bilden den Winkel  $\gamma$ .

Dieser Konvergenzwinkel  $\gamma$  hängt vom Abstand des betrachteten Objektes ab. Die Konvergenz der beiden Augenachsen ist somit die potenzielle Informationsquelle über die Abstandsbestimmung angeblickter Objekte.

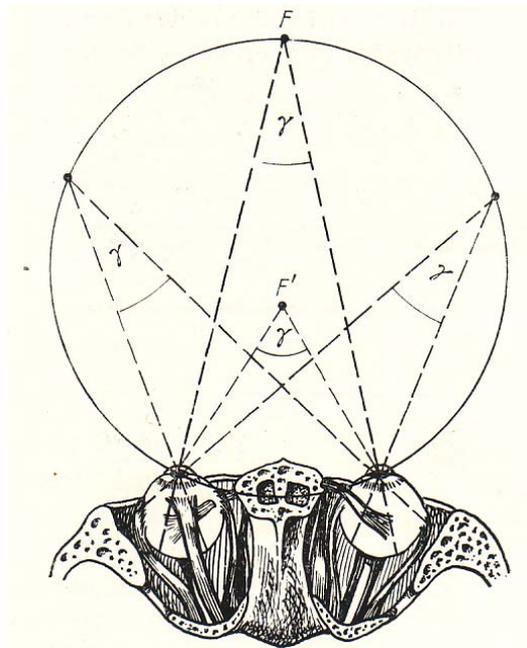


Abb.9: Konvergenzwinkel  $\gamma$  der Blicklinien.

In Abhängigkeit von der Entfernung des angeblickten Objektes verändert sich auch die Linsenkrümmung. Dies ist die sogenannte Akkommodation. Die Augenlinsen sind durch einen Kranz von zirkulären und radialen Muskelfasern aufgehängt.

Beim Blick in die Nähe kontrahieren die zirkulären Muskelfasern und die Linsenkrümmung nähert sich einer Kugelform. Das Abflachen der Linsenkrümmung beim Blick in die Ferne erfolgt meist passiv durch nachlassende Kontraktion der zirkulären Fasern. Eine Kontraktion der Radiärfasern kann ein weiteres Abflachen der Linse bewirken.

Die Brechkraftregulation des Linsensystems bewirkt eine fortwährende scharfe Abbildung des angeblickten Objektes auf die Netzhaut. Somit ist der vom Ziliarmuskel regulierte Akkommodationszustand potenzielle Informationsquelle über die Entfernung eines angeblickten Objektes.



F ist der Fixationspunkt der auf korrespondierenden Netzhautstellen abgebildet wird. Die Strecke AB soll einen Gegenstand, der sich von links vorn nach rechts hinten erstreckt, darstellen. Die Projektion auf die Ebene E soll die unterschiedliche projektive Bilderstreckung andeuten ( $A'_L B'_L < A'_R B'_R$ ). Diese sich daraus ergebene Ortsparallaxe bedingt, dass die Objektprojektion seitlich verschieden erstreckt ist. Diese Differenz nennt man Querdissipation. Der Disparationsgrad ist proportional dem Abstandsunterschied von Ortspunkten des angeblickten Objektes in der Umgebung. Die Querdissipation ist also potenzielle Informationsquelle über die Abstandsunterschiede tiefererstrecker Objekte in der Umgebung.

Zusammenfassend ergibt sich, dass die Konvergenz und die Akkommodation für die Abstandbestimmung und die Querdissipation für die Abstandsverhältnisse relativ zum Fixationspunkt dienen [37], [38], [32].

Für die Orientierung und Entfernungsbestimmung spielen natürlich auch die empirischen Motive eine Rolle. Diese stehen z.B. einem Einäugigen zur Verfügung. Dem beidäugig Sehenden verbessert sie zusätzlich die Raumwahrnehmung. Auf diese soll im nächsten Abschnitt eingegangen werden.

### **2.3.2 Empirische Faktoren die der Raumlage der abgebildeten Objekte dienen**

Die dritte Raumdimension, die der Tiefe, erkennen wir optisch sowohl beim monokularen, als auch beim binokularen Sehen. Die Mittel zum Erkennen der Tiefe beim Sehen mit nur einem Auge sind ausschließlich empirischer Art. Sie geben uns über relativ grobe Tiefenunterschiede Aufschluss. Man unterscheidet hierbei zwischen statischen und dynamischen Größen.

Statische Größen:

Subjektive Größe der Objekte, bei Kenntnis ihrer wahren Größe.

Gegenseitige Verdeckung der Objekte.

Perspektive.

Luftperspektive.

Licht-Schatten-Verteilung

Dynamische Größen:

Gegenseitige Bewegung der Objekte

Scheinbewegung der Objekte

Akkommodation

#### **1. Subjektive Größe der Objekte, bei Kenntnis ihrer wahren Größe**

Ist die absolute Größe eines Objektes bekannt, so kann die Sehgröße (=subjektive Größe) zur Entfernungsbeurteilung herangezogen werden. Je weiter sich ein Gegenstand vom Beobachter entfernt, desto kleiner wird seine subjektive Größe. Daraus ergibt sich zusätzlich die Information: Objekt ist in größerer Entfernung als vorher.

## 2. Die Perspektive

Die Perspektive entsteht bei der Projektion der dreidimensionalen Umwelt auf die Netzhaut oder einer zweidimensionalen Fläche. Der hier eingeführte Begriff der Perspektive soll sich aber nicht nur auf die bekannte Tatsache, dass parallele Linien wie Straßenränder scheinbar zu einem fernen Punkt zusammenlaufen, beschränken. Sie erzeugt auch scheinbare Größenänderungen. Bei gleichen Gegenständen nimmt die Größe bei scheinbarer Tiefe ab. Dies ist dadurch begründet, dass der Sehwinkel umgekehrt proportional der Entfernung ist.

Die perspektivische Verkürzung ergibt sich zusätzlich bei der Konvergenz paralleler Linien. Wie man bei den Eisenbahnschienen unschwer erkennt, nehmen die Abstände der beiden Schwellen mit der Ferne ab.

Wie stark die Perspektive die Raumwahrnehmung beeinflusst, soll folgendes Beispiel demonstrieren. In Bild 12 wurden die perspektivischen Verkürzungen fortgelassen.

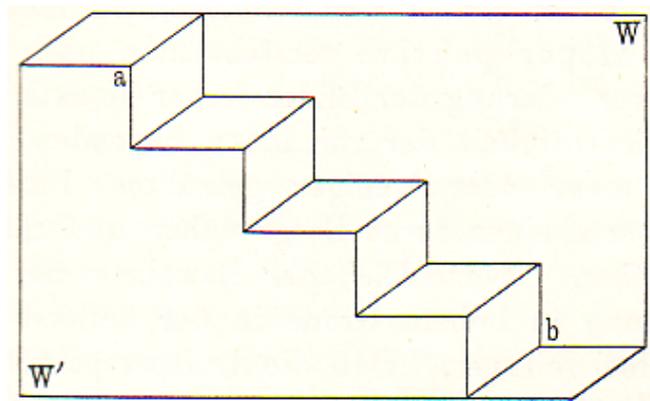


Abb.12: Schrödersche Figur.

In Bild 12 kann die Ecke a ebenso gut wie die Ecke b als vorne liegend gedeutet werden, da in der Zeichnung die Tiefendeutung nicht eindeutig ist. Man kann die Zeichnung als Treppe oder auch als überhängendes Mauerstück interpretieren. Diese Umdeutungen bei fehlender perspektivischer Verkürzung nennt man auch Inversionen. In der Abb. handelt es sich nicht um eine geometrisch-optischen Täuschung, da beide Interpretationen gleichberechtigt sind [44].

## 3. Gegenseitige Verdeckung der Objekte

Gegenstände die teilweise von davor stehenden Gegenständen verdeckt sind, liegen weiter entfernt zum Beobachter als der ihn verdeckende.

Derartige Überschneidungen können natürlich nur eine Tiefe vermitteln, die der Ausdehnung des verdeckenden Gegenstandes entspricht.

Trotz dieser Einschränkung erhält man wichtige Hinweise über die Raumtiefe.

## 4. Die Licht-Schatten-Verteilung

Tiefenwahrnehmung beruht oft auf Schatten. Ob sie nun auf Bildern dargestellt sind oder im alltäglichen Leben vorkommen, spielt keine Rolle.

Ist der Ort der Lichtquelle bekannt, so geht aus der Schattenverteilung die Tiefengliederung hervor, wie etwa in der Landschaft, wenn ein Baum einen Schatten auf ein Haus wirft.

Vertiefungen und Erhebungen erzeugen beide in der Regel auf einer Seite einen Schatten, da das Licht meistens aus einer bestimmten Richtung einfällt. Bei einem Hügel entsteht der Schatten auf der Seite, die dem Licht abgewandt ist. In einer Mulde liegt der Schatten jedoch auf der lichtzugewandten Seite.

Wenn also der Ort der Lichtquelle oder die allgemeinen Beleuchtungsverhältnisse bekannt sind, kann man im Prinzip daraus schließen, ob es sich um eine Erhebung oder eine Vertiefung handelt [37], [32].

## 5. Luftperspektive

Die Luftperspektive hat nichts mit der geometrischen Perspektive zu tun. Hierbei handelt es sich um die mehr oder weniger vollkommene Durchsichtigkeit der Luft. Staub und Wasserdampfgehalt der Luft bewirken, dass ferne Gegenstände, trübe und in unscharfen Umrissen erscheinen. Durch die Lichtabsorption in der Atmosphäre erscheinen Gegenstände sogar bläulich. Wobei letzterer Aspekt für diese Arbeit irrelevant ist [32].

## 6. Die Bewegungsparallaxe

Die Bewegungen eines Beobachters können als Informationsquelle über die räumliche Tiefe zweier Objekte, die sich in unterschiedlichen Entfernungen befinden, dienen.

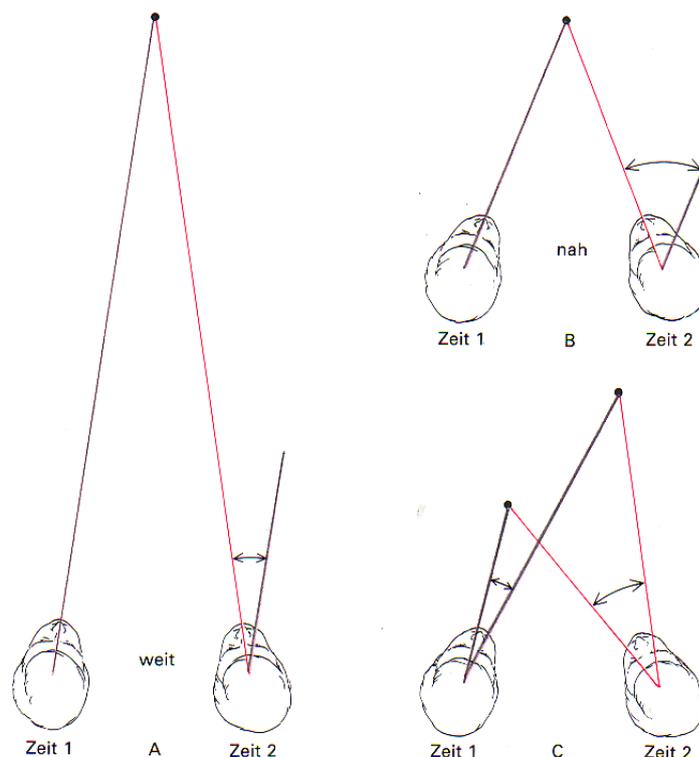


Abb.13: Schematische Darstellung der Bewegungsparallaxe als Hinweis auf Entfernung und Tiefe.

Die Blickrichtung ändert sich durch die Bewegung des Beobachters bei sehr fernen Objekten (A) nur wenig, aber bei nahen (B) sehr merklich. Bei zwei Objekten in verschiedenem Abstand (C) induziert die unterschiedliche Veränderung des Blickwinkels den Eindruck, als ob sich beide Objekte relativ zueinander bewegen.

Dies ist dadurch bedingt, dass beide Netzhautbilder zu unterschiedlichen Bewegungsgeschwindigkeiten in den Augen führen. Abb.14 soll dies verdeutlichen.

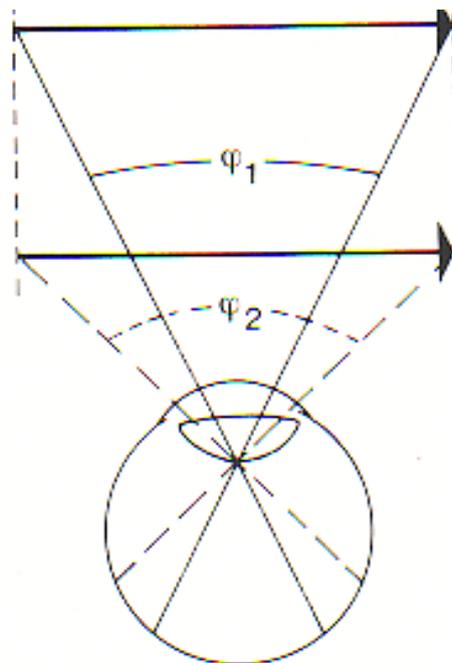


Abb.14: Bewegungsgeschwindigkeiten im Auge sind entfernungsabhängig.

Man kann sich obige Abbildung auch an folgendem Bsp. verdeutlichen: Blickt man aus einem fahrenden Zug, so scheinen die Gegenstände am Horizont still zu stehen, während diejenigen in der Nähe sich schnell vorbei bewegen.

Ob es sich hierbei um Eigenbewegungen des Beobachters oder Bewegungen des Gegenstandes handelt, spielt keine Rolle. Es kann auch eine Überlagerung beider Situationen vorliegen. Jedenfalls führen sie alle zu einer räumliche Tiefe [45].

Wie hierbei das visuelle System Eigenbewegungen von Scheinbewegungen unterscheidet, soll nachfolgend erläutert werden.

#### Problemstellung:

Bewegen sich Objekte in der Außenwelt, so bewegen sich auch die Bilder dieser Objekte über die Netzhaut eines ruhenden Auges. Dadurch hat der Beobachter den Eindruck einer Bewegung dieser Objekte. Blickt nun das Auge aber auf ruhende Objekte in der Außenwelt, so bewegen sich auch ihre Bilder relativ zur Netzhaut des Beobachters. Die Wahrnehmung registriert aber in diesem Fall das sich die Objekte nicht bewegen.

Wie ist nun diese jeweils entgegengesetzte Aussage des Gehirns zu erklären?

Eine einleuchtende und einfache Modellvorstellung wurde von v. Holst und Mittelstaed [12] vorgeschlagen. Sie erklärt die Erscheinungen und kann spezielle Ergebnisse von Versuchen interpretieren.

Das Funktionsschema nennt sich Reafferenzprinzip.

## - Das Reafferenzprinzip

Laufen von höheren Zentren des Gehirns Kommandoimpulse zu den äußeren Augenmuskeln, so wird durch diese der Augapfel bewegt. Diese absteigenden Impulse nennt man efferente Impulse oder Efferenz (= die Efferenz ist ein neuronales Signal, dass zu einer motorischen Erregung führt). Dabei wird die Efferenz nicht nur zu dem Erfolgsorgan (Muskel) geleitet, sondern es wird eine Kopie, die Efferenzkopie (EK), zu einem Vergleichszentrum geführt.

Die Afferenz, das sind die aufsteigenden Impulse von der Retina zum Cortex und speziell das Sehzentrum, gibt nun ihrerseits eine Kopie der Retinabildimpulse (= Reafferenz (RA)) zu eben diesem Vergleichszentrum. In dem Vergleichszentrum werden die beiden Impulsmuster miteinander verglichen.

Entspricht nun die Bewegung der Bilder auf der Netzhaut der Muskelleistung, die zu ihrer Verschiebung notwendig war, so ist im Vergleichszentrum  $RA = -EK$  (Vorzeichen von EK ist willkürlich und dient der Interpretation). Diese Gleichheit der beiden nervösen Anteile ergibt im Gehirn den Eindruck der Ruhe.

Sind die beiden Anteile unterschiedlich, so entsteht ein Überschuß, die Exafferenz. Sie führt zu der Wahrnehmung: Bewegung,

Die Exafferenz kann wieder in die absteigenden Bahnen eingegeben werden. Damit wird eine Kontrolle der Muskelbewegung in Analogie eines Regelschaltkreises durchgeführt [43], [12].

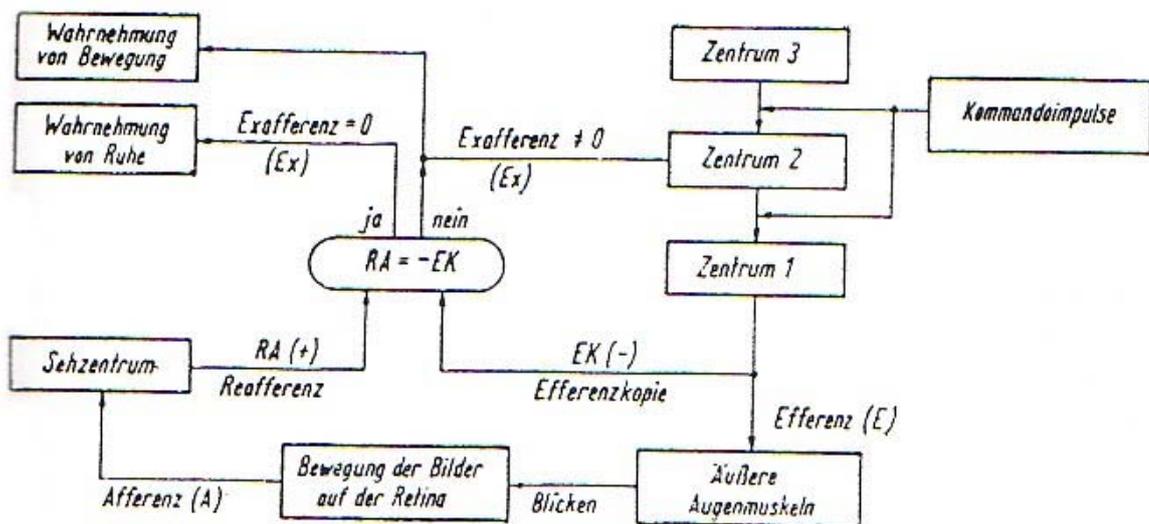


Abb.15: Schematische Darstellung des Reafferenzprinzips.

Fallbeispiele:

- a. Ein ruhendes Objekt wird fixiert. Der Augenmuskel soll mechanisch oder chemisch ausgeschaltet sein. Dann fehlt die Reafferenz und die Efferenzkopie wird alleine wirksam

(die Efferenzkopie entsteht allein schon durch den Versuch des Probanden das Objekt zu fixieren).

Man sieht eine Bewegung der Außenwelt, ohne das eine Bewegung der Objekte vorhanden ist.

- b. Beobachtet ein ruhendes Auge ein bewegtes Objekt, so fehlt die Efferenz-kopie und auch hier wird ein bewegtes Objekt registriert.
- c. Wird ein Auge mechanisch von außen bewegt, wird auch hier durch das Fehlen der Efferenz eine Scheinbewegung des ruhenden Objektes provoziert.

Eigenversuch: Die Wirkung der Efferenzkopie

Man fixiert mit einem Auge eine Lichtquelle (z.B. Ophthalmoskop), bis sich ein deutliches Nachbild entwickelt hat. Dann beobachtet man das Nachbild bei geschlossenem Auge oder an einer Wand, während man die Augen bewegt.

Ergebnis:

Man nimmt eine Bewegung des Nachbildes wahr, welche in Richtung der Augenbewegung wandert. Die Bewegungswahrnehmung wird durch die Efferenzkopie verursacht. Eine Bildverschiebung auf der Netzhaut tritt nicht auf, da die Ursache des Netzhautbildes an eine bestimmte Stelle der Netzhaut gebunden ist und bei Augenbewegungen mitgeführt wird. In diesem Fall fehlt deshalb die Reafferenz.

Das Reafferenzprinzip liefert eine Erklärung für viele Beobachtungen, in denen zwischen selbst- und fremdverursachter Bewegungen unterschieden werden muss. Wo und wie es im Gehirn realisiert ist, ist noch nicht klar.

## 7. Akkommodation

Wie schon in Abschnitt 2.3.1 erwähnt, dient die Akkommodation als Parameter für die Lagebestimmung eines Objektes. Sie ist aber auch für den Einäugigen ein Hilfsmittel für die Entfernungsbestimmung eines Gegenstandes. Dies liegt an den unterschiedlichen Akkommodationszuständen die das visuelle System einnimmt, wenn ein Gegenstand in verschiedenen Entfernungen zum Beobachter positioniert ist. Dieses Hilfsmittel für die Entfernungswahrnehmung ist aber nicht besonders gut. Sie spielt nur im Nahbereich eine Rolle.

### 2.3.3 Das Netzhautbild als Abstandsinformationsquelle

Das Netzhautbild soll in diesem Abschnitt nur unter dem Aspekt als Abstandsinformationsquelle behandelt werden.

Die optische Abbildung im Auge wird als das retinale oder Netzhautbild bezeichnet. Diese Bezeichnung zielt auf den physikalischen Aspekt der visuellen Wahrnehmung. Das Netzhautbild ist gegenüber dem Objekt invertiert, konkret um  $180^\circ$  gedreht.

Da sich die Netzhautbildgröße eines Objektes bei unterschiedlichen Abständen zum Beobachter jeweils ändert, kann dies als potenzielle Informationsquelle über die Entfernung eines angeblickten Objektes betrachtet werden.

Die Änderung des Netzhautbilddurchmessers verhält sich hierbei umgekehrt proportional zum Abstand.

Eine Punktlichtquelle, ein Stern oder eine weit entfernte Laterne sieht umso dunkler aus, je weiter sie entfernt ist. Dies ist dadurch bedingt, dass die Strahlungsenergie sich kugelförmig ausbreitet und deshalb auf eine Fläche verteilt mit dem Abstand  $a$  wächst. Die Strahlungsleistung  $P$ , die sich effektiv im Bildpunkt konzentriert, verhält sich:

$$P = 1/a^2.$$

Die Helligkeit größerer Flächen ändert sich dagegen mit dem Abstand nicht. Das liegt daran, dass die Fläche  $F$  sich auch proportional zum Abstand verhält.

$$\text{Es gilt: } F = 1/a^2.$$

Die Strahlungsleistung  $P$  und die Flächengröße  $F$  hängen somit in gleicher Weise vom Abstand ab, so dass bei wechselndem Abstand das Verhältnis  $P/F$  gleich bleibt. Dies wird auch als Helligkeitskonstanz ausgedehnter Objekte, unabhängig von der Entfernung bezeichnet [32], [45].

Als Fazit kann man sagen:

1. Punktlichtquellen ändern sich in ihrer Helligkeit, wenn der Abstand variiert wird.  
Die Netzhautbildgröße erfährt zusätzlich eine Größenänderung.
2. Ausgedehnte Objekte liefern über die Größenvariation des Netzhautbildes, bei Abstandsänderung, eine Information.

## 2.4 Visuelle Auswertungen der korrespondierenden Netzhautstellen

### - Der Horopter

Der Horopter ist der Komplex sämtlicher Punkte des Außenraumes, die bei einer gegebenen Konvergenzstellung der Augen, einfach gesehen werden. Die Frage die sich damit stellt, lautet folgendermaßen: Wo liegen diese Objektpunkte im Außenraum?

Johannes Müller (1826) und Vieth (1818) legten durch die Knotenpunkte der beiden Augen und durch den Fixationspunkt einen Kreis und glaubten, dass alle Punkte dieses Kreises einfach gesehen werden.

Geometrisch gesehen stellt dieser Kreis einen sogenannten Peripher-Winkelkreis dar, bei dem der Konvergenzwinkel  $\gamma$  konstant bleibt. Dieser Kreis wurde später als geometrischer Horopter oder auch als Vieth-Müller-Kreis bezeichnet.

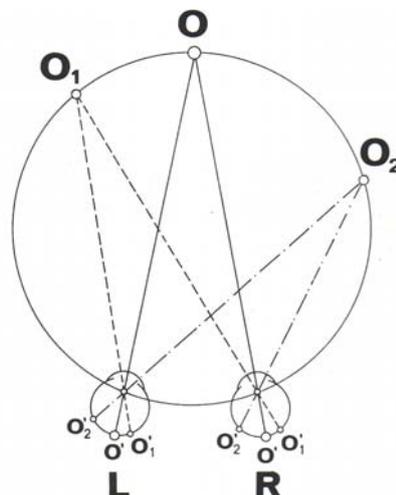


Abb.16: Geometrischer Horopter.

Der Definition, als geometrischer Ort von korrespondend abgebildeten Außenpunkten, genügt auch eine vertikale Linie (Prevost, 1843), die durch den Fixierpunkt verläuft. Hierbei müssen aber die Längsschnitte der Netzhäute eine Lotrechte Haltung einnehmen.

Mit den bisher getroffenen Voraussetzungen, besteht der Horopter streng genommen nur aus dem Vieth-Müller-Kreis und dem Prevostschen Lot. Nach Helmholtz (1867) nennt man dieses Konstrukt Punkthoropter und nach Hering (1864) Totalhoropter. Außerhalb dieser, werden Objektpunkte in horizontaler oder vertikaler Abweichung von korrespondierenden Netzhautarealen abgebildet. Ist der Fixierpunkt in unendlicher Ferne, so wird der Horopter zu einer in der Ferne gelegene frontparallelen Fläche.

Die in der Literatur meist angegebene Horopterfläche, ist der nach Hering benannte Längshoropter. Man konstruiert den Längshoropter, indem man sich durch den Knotenpunkt und jeden einzelnen Längsschnitt der Netzhaut, der die Empfindung vertikal vermittelt, eine Längsschnittebene für beide Augen gelegt, vorstellt. Korrespondierende Längsschnitte treffen sich dann in einer vertikalen Linie, deren Gesamtheit den Ausschnitt eines Zylindermantels ergibt.

Der geometrische Horopter ist nur von theoretischem Interesse, da er sehr vereinfacht abgeleitet wurde. Untersucht man jedoch die Lage der korrespondend auf der Retina abgebildeten Punkte im subjektiven Sehraum durch ein psychophysisches Experiment, so ergibt sich der „empirische Horopter“ (Hering, 1863).

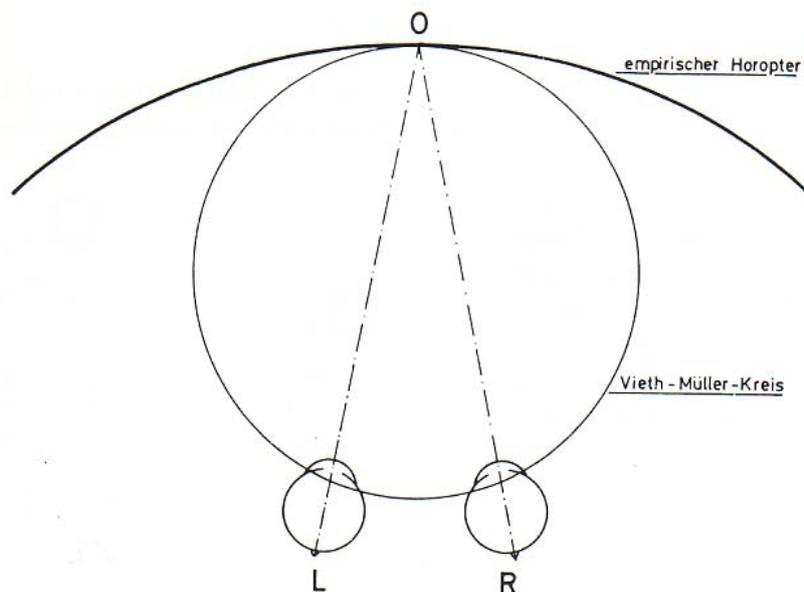


Abb.17.: Empirischer Horopter.

Man sieht, dass der empirische Horopter eine wesentlich geringere Krümmung als der geometrische Horopter besitzt.

Die Ursache dieser nach Hering (1865) und Hillebrand (1889) genannten Horopterabweichung kann auf die Inkongruenz der Netzhäute, zurückgeführt werden.

Für denselben seitlichen Richtungswert haben korrespondierende Netzhautorte retino-nasal eine größere Distanz zur Fovea, als retino-temporal.

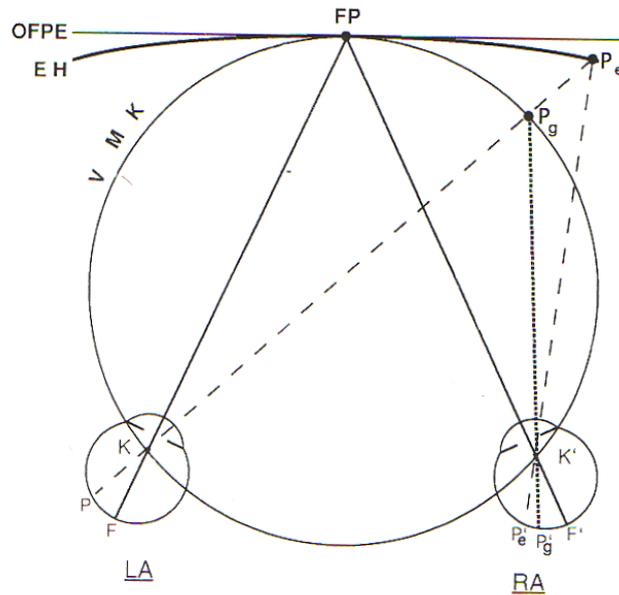


Abb.18: Ursache für die geringere Krümmung des empirischen Horopters.

Die Richtungslinien des vom empirischen Horopter ausgehenden Punktes  $P_e$  und die Richtungslinien von  $P_g$  auf dem geometrischen Horopter sind gestrichelt gezeichnet. Die durchgezogenen Richtungslinien stellen die Gesichtslinien dar.

Man sieht, dass der empirische Horopter eine wesentlich geringere Krümmung als der geometrische Horopter besitzt. Die geringere Krümmung des empirischen Horopters entsteht durch die physiologische naso-temporale Asymmetrie der retinalen Richtungswerte in Bezug auf ihre Distanz zur Foveola: Eine temporale Netzhautstelle hat eine geringere Distanz zur Foveola als die mit ihr korrespondierende Stelle der nasalen Netzhaut am anderen Auge.

Objekte, die auf dem empirischen Horopter liegen, werden vom Beobachter in einer frontoparallelen Ebene empfunden, da sie sich ohne Querdisparation auf der Netzhaut abbilden.

Die Krümmung des empirischen Horopters wird durch die Fixationsentfernung bestimmt. In großen Fixationsdistanzen, nimmt der Horopter eine gegen den Beobachter konvexe Krümmung an [46], [47].

Mit dem empirischen Horopter hat man zwei Qualitäten des Raumsinnes ermittelt:

1. Jeder einzelne Objektpunkt wird vom rechten und linken Auge in derselben Richtung relativ zur Hauptsehrichtung empfunden.
2. Die Gesamtheit der Punkte, die sich korrespondend abbilden, erscheint dem Beobachter in derselben Entfernung wie der binokulare Fixierpunkt.

## 2.5 Visuelle Auswertungen der disparaten Netzhautstellen

Wo wird ein Objekt gesehen, das sich außerhalb des Horopters befindet? Ein solches Objekt wird auf Netzhautstellen abgebildet, die nicht gleichzeitig Stellen gleicher Sehrichtung sind. Deshalb müssten die Objekte, allgemein, doppelt wahrgenommen werden; es wird sich aber zeigen, dass in einem engen Bereich außerhalb des Horopters, trotz nicht exakt

korrespondierender Abbildung, einfach gesehen wird. Punkte, die nicht miteinander korrespondieren, nennt man disparat.

In folgender Abb. soll erläutert werden, welche Empfindungen entstehen, wenn die beiden Bilder eines Objektes querdisparat abgebildet werden.

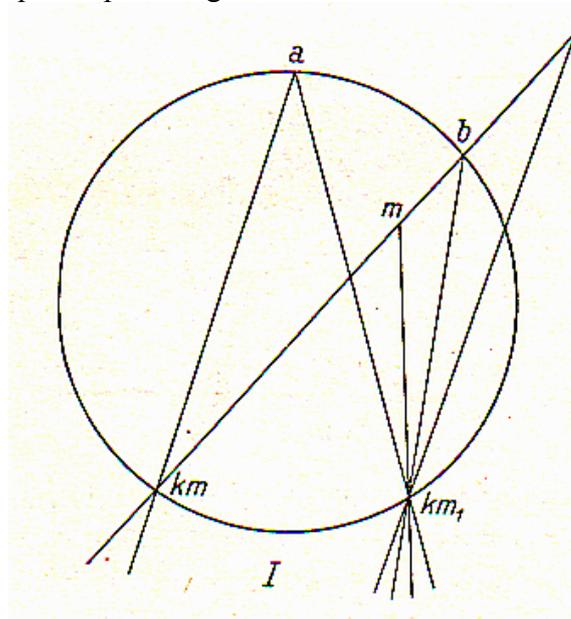


Abb.19: Schematische Darstellung, anhand derer die Empfindungen untersucht werden sollen, wenn man den Punkt b in Richtung m und danach in Richtung r verschiebt.

Bei Fixation von Punkt a, schiebe man den Punkt b in Richtung m. Jetzt liegen die Bildpunkte von b nicht mehr auf korrespondierenden Netzhautstellen und es entstehen gekreuzt-liegende Doppelbilder (=heteronyme Bilder), welche relativ zum Fixationspunkt a, rechts liegen.

Verschiebt man den Punkt b jetzt in Richtung r, so entstehen ungekreuzt-liegende Doppelbilder (=homonyme Bilder), die relativ zum Fixationspunkt a, auch rechts liegen.

Nun ist folgender Sachverhalt sehr wichtig: Wenn der Punkt b aus dem Horopter, in Richtung m und r, herauswandert, so zerfällt er nicht gleich in Doppelbilder. Das bedeutet, dass eine gewisse Disparationschwelle überschritten werden muß, ehe ein Zerfall in Doppelbilder stattfindet.

Der Bereich innerhalb dessen noch kein Zerfall stattfindet, nennt man Panumbereich.

Aber wo sieht man dann den Punkt b, wenn er sich außerhalb des Horopters befindet und noch nicht in Doppelbilder zerfallen ist?

Im Fall der heteronymen Bilder, wird die Empfindung „näher“ als der fixierte Punkt a erzeugt. Im zweiten Fall der homonymen Bilder entsteht die Empfindung „ferner“ als der fixierte Punkt a. Das bedeutet, dass die querdisparat abgebildete Abbildung eines Objektes, zu einer Tiefenwahrnehmung führt.

Die querdisparative Tiefenwahrnehmung besteht auch bei Doppelbildern, allerdings ohne dabei exakt lokalisieren zu können.

## Die stereoskopische Parallaxe

Im vorherigen Abschnitt wurde gezeigt, wie aus der Art der Querdisparation beider Reizmuster, auf Objekt vor oder hinter einem anderen Objekt, geschlossen werden kann. Damit ist aber ihre gegenseitige Entfernung nicht erfasst. Hierfür muss die Differenz der Querdisparationen herangezogen werden. Da man die Querdisparation nicht direkt messen

kann, wird eine Größe eingeführt, welche mit der Querdisparation in einem geometrischen Zusammenhang steht. Mit ihr kann man Rückschlüsse auf ihr Verhalten ziehen. Diese nennt man die stereoskopische Parallaxe oder stereoskopische Differenz.

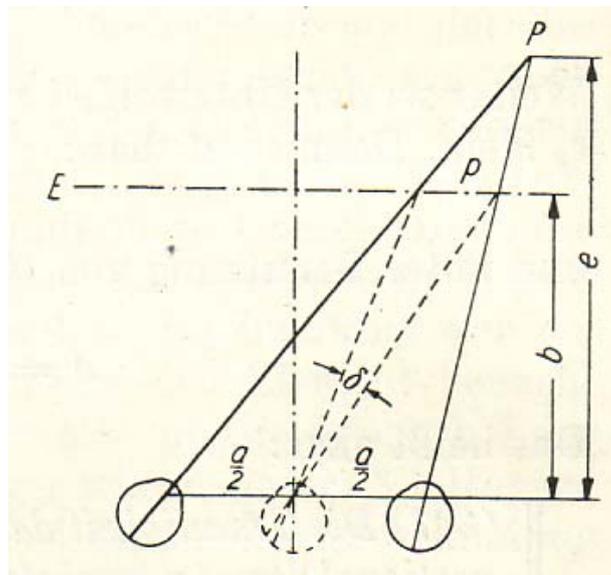


Abb.20: Entstehung der stereoskopischen Parallaxe.

P ist ein beliebiger beidäugig betrachteter Objektpunkt. Sein senkrechter Abstand zur Verbindungslinie beider Augen ist e. Der Abstand der beiden Pupillenmitten ist a. Die beiden Gesichtslinien schneiden aus einer im Abstand b sich befindlichen gedachten Ebene E die Strecke p heraus. Durch das imaginäre Zyklopaenge werden die beiden Schnittpunkte mittels der gestrichelten Gesichtslinien querdisparat abgebildet. Der Winkel  $\delta$  bestimmt die Querdisparation.

Es ergibt sich die Beziehung:  $p/a = (e - b)/e \Leftrightarrow p = a - (a \cdot b)/e$ .

Betrachtet man zwei verschieden entfernte Objektpunkte  $P_1$  und  $P_2$ , so schneiden diese aus der Ebene E die beiden Strecken  $p_1$  und  $p_2$  heraus. Diese Differenz  $\Delta$  ist die gesuchte stereoskopische Parallaxe.

Es gilt:

$$\Delta = p_1 - p_2 = a \cdot b \cdot (1/e_1 - 1/e_2), \text{ mit } e_2 = e_1 + de \text{ kann folgenden Ausdruck ableiten: } \Delta = (a \cdot b \cdot de)/e^2.$$

Das bedeutet:

Die Genauigkeit der binokularen relativen Tiefenwahrnehmung verhält sich proportional zu dem Augenabstand des Beobachters und dem Tiefenunterschied zwischen den beiden zu vergleichenden Raumpunkten. Sie verhält sich umgekehrt proportional mit dem Quadrat der mittleren Entfernung der beiden Raumpunkte.

Die stereoskopische Parallaxe darf einen Mindestwert nicht unterschreiten, wenn räumliches Sehen noch bestehen soll. Der im Winkelmaß bestimmte untere Grenzwert der stereoskopischen Parallaxe liegt im Allgemeinen bei ungefähr 5 bis 10" [32].

## 2.6. Die Größenkonstanzeleistung

Als Größenkonstanzeleistung bezeichnet man das Phänomen, dass die wahrgenommenen Größen der Objekte unserer unmittelbaren Umgebung weitgehend unabhängig sind von der Entfernung, aus der wir sie betrachten. Innerhalb gewisser Grenzen behält ein Objekt phänomenal seine Größe und Form, auch wenn es sich zum Beobachter hin oder fort bewegt.

Den Bereich des optischen Sehens, in dem die Größe und Form exakt wahrgenommen werden, bezeichnet man als „orthostereoskopischen Bereich“ [1], [13].

Er liegt für kleine Gegenstände im Bereich zwischen 50 bis 100cm. Unter klein soll „Pfenniggröße“ bis „Unterarmlänge“ gemeint sein [1]. Für größere Gegenstände ist dieser Bereich weitaus umfangreicher und erst ab einer bestimmten Entfernung, die von Fall zu Fall variiert, wird die Größe ungenügend wahrgenommen.

Obige Erläuterungen sind allerdings nicht mit der Tatsache vereinbar, dass die Größe des Objektbildes auf der Retina eine unmittelbare Funktion des Sehwinkels und damit der Entfernung zum Beobachter ist. Unsere Größenwahrnehmung muss über einen Mechanismus verfügen, der diese Abhängigkeit kompensiert.

Ein Erklärungsversuch geht davon aus, dass das visuelle Wahrnehmungssystem den Sehwinkel mit der Entfernung verrechnet. Wie sich Größe und Sehwinkel verrechnen lassen, zeigt Abb.21.

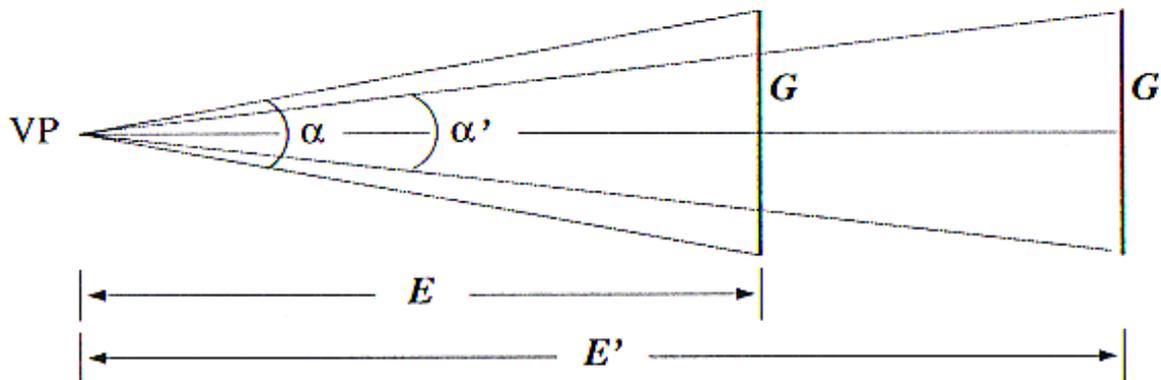


Abb.21: Physikalischer Zusammenhang zwischen Sehwinkel  $\alpha$ , Größe  $G$  und der Entfernung  $E$ .

Derselbe Gegenstand erscheint bei wechselnden Abständen unter verschiedenen Seh winkeln. Trotzdem kann man seine Größe als konstant wahrnehmen, wenn man die Entfernung in Rechnung stellt.

Angenommen die beiden Quadrate aus Abb.20 hätten eine Seitenlänge von 36cm und werden aus den Entfernungen drei und neun Metern betrachtet, dann wäre der Sehwinkel  $\alpha$  dreimal so groß wie der Sehwinkel  $\alpha'$ . Das Quadrat würde unter dem Winkel  $\alpha$  dreimal größer als unter dem Winkel  $\alpha'$  erscheinen. Da das nicht der Fall ist, kann der Sehwinkel nicht das alleinige Kriterium für die Größenwahrnehmung sein.

Für die Größenwahrnehmung gilt:

Wahrgenommene Größe = wahrgenommen Entfernung  $\cdot$  Sehwinkel

Wie das Wahrnehmungssystem auf die Entfernung schließt, wird weiter unten erklärt.

Um die Zusammenhänge zwischen Größe, Entfernung und ihre sensorische Korrelation zu untersuchen, eignen sich Nachbilder. Emmert (1881) entdeckte den Zusammenhang zwischen der phänomenalen Größe eines Nachbildes und der Entfernung der Projektionsfläche, auf der das Nachbild gesehen wird. Daraus formulierte er dann das Emmertsche Gesetz: Die Größe der Nachbilder sind direkt proportional der wahrgenommenen Entfernung.

Das Emmertsche Gesetz lässt sich sehr schnell überprüfen:

Man erzeugt bei einer Versuchsperson ein Nachbild, indem man die Person mit einer Lichtquelle blendet (z.B. mit einem Ophthalmoskop). Man weist den Probanden an, auf unterschiedliche Entfernungen zu sehen. Das Nachbild verändert dann, der jeweiligen Entfernung entsprechend, seine Größe. Würde man das Nachbild auf dem Handrücken betrachten und anschließend auf einer 2 Meter entfernten Wand, so wäre das Nachbild im letzteren Fall deutlich größer. Dieser Mechanismus funktioniert auch dann, wenn man sich bei geschlossenen Augen nur die unterschiedlichen Abstände vorstellt.

Unter dem Aspekt der Größenkonstanz würde bei obigen Versuch das visuelle Wahrnehmungssystem bei großem Abstand, mit einem kleinen und bei geringem, mit einem großen Netzhautbild rechnen.

Die Konstanzleistung korrigiert die wahrgenommene Größe im ersten Fall nach oben und im zweiten nach unten[45].

Die Größenkonstanz gilt nicht uneingeschränkt, sowohl in der Nähe als auch in der Ferne hat sie ihre Grenzen.

Grenzen der Größenkonstanz im Nahbereich:

Betrachtet man seine Hand bei gestrecktem Arm und bewegt sie dann langsam bis dicht vor das Gesicht, so kann man eine scheinbare Größenzunahme beobachten. Wiederholt man den Versuch monokular, so ist die scheinbare Größenzunahme noch größer als binokular und damit die Konstanzleistung noch unvollständiger.

Noch deutlicher wird diese scheinbare Größenzunahme, wenn man bei einäugiger Betrachtung, zusätzlich eine Lochblende vorhält.

Aus den obigen Beobachtungen kann man schließen, dass die Abstandsinformationen etwas mit der Konvergenz und der Akkommodation zu tun haben muss.

Der Konvergenzwinkel wächst bei Annäherung der Hand und ebenso verändert sich der Akkommodationszustand des Auges.

Die Größenkonstanzleistung bei monokularer Betrachtung der Hand wird schlechter, weil der eingestellte Konvergenzwinkel als Maß für den Abstand fehlt. Die Lochblende macht wegen der verbesserten Schärfentiefe die Akkommodation weitgehend überflüssig, so dass aus dem eingestellten Akkommodationszustand keine Entfernungsinformation hergeleitet werden kann [45]. G. Katona hat in „Experimente über die Größenkonstanz“ den Zusammenhang zwischen der Wirksamkeit der Größenkonstanzleistung und Abstandsinformation erwähnt aber nicht experimentell verifiziert [48].

In den bisherigen Betrachtungen spielte nur die unmittelbare Entfernung bisher eine Rolle. Wie sieht es mit der Größenkonstanzleistung bei großen Entfernungen aus?

Beim Blick von einem Turm nach unten, ist die Größenkonstanzleistung unvollständig. Häuser und Menschen sehen dann so klein wie Spielsachen aus.

Ebenso wird beim Betrachten einer Landschaft die Erklärung der Größenkonstanzleistung schwieriger als im Nahbereich. Denn die Akkommodation und die Konvergenz liefern bei großen Distanzen keine Abstandsinformationen, da ihre Änderungen dort nicht merklich sind.

Überlegungen von Brunswicks führten zu Versuchen von Holoday, in denen gezeigt wurde, dass die sogenannten empirischen Tiefenkriterien die Größenkonstanzleistungen ebenfalls beeinflussen. Unter empirischen Tiefenkriterien, sollen die einem Einäugigen zur Verfügung stehenden Mittel zur Rauminterpretation verstanden werden. Sie wurden im Abschnitt 2.3.2 vorgestellt.

Zu den empirischen Tiefenkriterien gehören:

1. die Abschwächung der Schärfe abgebildeter Grenzlinien mit zunehmender Entfernung (Luftdichtewirkung)
2. die Überdeckung der ferneren durch nähere Objekte
3. die Konvergenz paralleler Linien zum Horizont hin
4. die Licht-Schatten-Verteilung
5. die relativen Winkelgeschwindigkeiten der projektiv abgebildeten Grenzlinien bei aktiver oder passiver Eigenbewegung des Wahrnehmenden (Man kann das in einem fahrenden Zug beobachten: der weit entfernte Waldrand, bewegt sich gegenüber nahe gelegenen Häuser, relativ langsam!)

Folgende Abbildung soll zeigen, wie die Konvergenz paralleler Linien zum Horizont hin, eine scheinbare Tiefe erzeugt. Hier wird deutlich, wie hier die optische Täuschung durch die Überlagerung von Größenkonstanzleistung und empirischen Tiefenkriterium entsteht. Die Netzhautbilder beider Personen sind gleichgroß aber durch die Tiefenwirkung der konvergierenden Linien, scheint die hintere Person größer als die vordere.

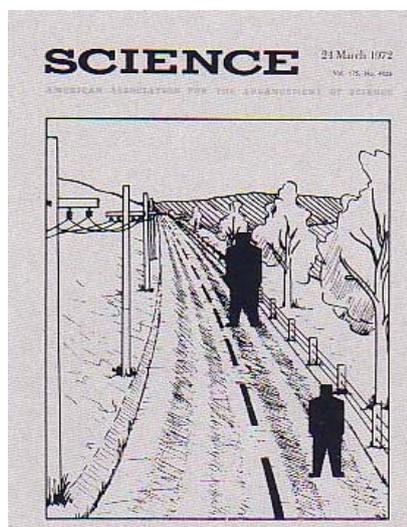


Abb.22: Beide abgebildete Figuren sind objektiv gleichgroß. Die hintere erscheint jedoch größer, da ihre Umgebung den Eindruck erweckt, sie sei weiter entfernt.

Man erkennt, dass selbst die scheinbare Tiefe der perspektivischen Zeichnung genügt, um eine Figur je nach Position größer oder kleiner erscheinen zu lassen.

Um das Ausmaß der Größenkonstanzleistung des visuellen Systems genauer zu betrachten, soll mit den Messdaten der 1. Versuchsreihe und dem jetzt neu eingeführten Brunswik-Verhältnis, die Konstanzleistung quantifiziert werden [49].

Für das Brunswik-Verhältnis gilt:

$$\text{Konstanzgrad} = (100 \cdot (s-p)) / (w-p);$$

s = Abstand des vorderen Stangenpaares (einzustellende Wahrnehmungsgröße [cm])

w = Abstand des hinteren Stangenpaares (Referenzgröße [cm])

p = Abstand des hinteren Stangenpaares, in die Ebene des vorderen projiziert (berechnete Größe [cm])

Werte in der Nähe von 100% bedeuten eine hohe Größenkonstanzleistung. Die visuelle Wahrnehmungsgröße resultiert in diesem Zustand am geringsten von der Information, vermittelt durch das Netzhautbild (=Gesichtswinkel).

Liegen die Werte hingegen bei 0%, so wurde die subjektive Größenwahrnehmung auf Grund der Information, vermittelt durch den Gesichtswinkel bestimmt. Aus diesem Verhältnis lässt sich also gut ablesen, in welcher Distanz vor dem Beobachter die Größenkonstanzleistung am optimalsten wirkt [49].

## 2.7 Psychophysikalische Grundlagen (Schwellenwerte)

Da in dieser Arbeit psychophysikalische Zusammenhänge untersucht und analysiert werden, soll in diesem Abschnitt auf grundlegende Begriffe, sowie die Methodiken der Messungen erläutert werden.

Die Psychophysik untersucht die gesetzmäßigen Beziehungen zwischen den objektiven physikalischen Reizparametern (Intensität, Position, Frequenz bzw. Wellenlänge u.a.) und den durch sie hervorgerufenen psychologischen Empfindungen und Wahrnehmungen (Empfindungsstärke, Lage, Farbe u.a.).

Nach Galanter [50] hat es die Psychophysik grundsätzlich mit 4 Arten von Problemen zu tun:

1. dem Entdeckungsproblem, das mit der Frage charakterisiert werden kann: Ist dort ein Reiz oder nicht? Bei dieser Frage ist Reiz die energetische Veränderung auf der Rezeptoroberfläche;
2. dem Erkennungsproblem, das lautet: Was für ein Reiz ist das? Hier geht es um den informatorischen Aspekt des Reizes;
3. dem Unterscheidungsproblem mit der Frage: Ist dieser Reiz von jenem verschieden?
4. dem Skalierungsproblem, das lautet: Wieviel von dem Merkmal x ist bei diesem Reiz vorhanden?

Die psychophysikalische Untersuchung besteht also darin, dass die Empfindungen die unsere Sinnesorgane vermitteln, vom Menschen direkt beurteilt werden. Damit mit dieser subjektiven Methode allgemeingültige und quantitative Aussagen gewonnen werden können, muss man Fragestellungen formulieren, die ein Sinnesorgan möglichst genau und reproduzierbar beantworten kann.

Weber hat sich bereits 1834 intensiv mit dem Unterscheidungsproblem befasst, während Fechner, aufbauend auf den Ergebnissen Webers, vor allem an dem Skalierungsproblem interessiert war.

Wie kann man nun eine quantitative Beziehung zwischen Reiz und visueller Wahrnehmung herstellen?

## **- Quantitative Beziehungen zwischen physikalischen Reiz und Wahrnehmung**

### **2.7.1 Gleichheitskriterium u. Schwellenkriterium**

Das formale Gleichheitskriterium kann man auf Reize, Erregungen und Empfindungen anwenden ohne dabei weitergehende Aussagen über das zugrundeliegende System machen zu müssen.

Beim Gleichheitskriterium werden zwei Empfindungen abgeglichen. Ein typisches Experiment für ein Abgleichverfahren wäre z.B.:

Auf einer Seite eines Reizfeldes wird eine Farbe F dargeboten, die mit Hilfe eines Farbmischers auf der anderen Seite nachgemischt werden soll.

Man gewinnt damit die Information über die Reize, bei denen Gleichheit der Empfindungen eintritt und damit Messwerte, die eine psychologische Interpretation zulassen. Damit erhält man schließlich auch die beiden Erregungsvorgänge, die wie die Empfindungen untereinander gleich sind.

Ein Grenzfall des Gleichheitskriteriums ist das Schwellenkriterium, das in der Psychophysik eine große Rolle spielt.

Man bestimmt die kleinste Reizänderung  $\Delta I$ , welche die kleinste wahrnehmbare Änderung  $\Delta E$  verursacht. Man postuliert eine Grenze, unterhalb derer ein Reiz zu schwach ist, um eine Empfindung auszulösen. Wird jedoch dieser kritische Wert überschritten, kommt es stets zu einer Wahrnehmung. Diese Grenze ist die Reizschwelle. Den Kehrwert der Reizschwelle (Größe des Schwellenreizes) bezeichnet man als Empfindlichkeit.

### **2.7.2 Das Webersche Gesetz**

Auf Ernst Heinrich Weber (1795-1878) geht die Erkenntnis zurück, dass die kleinste noch wahrnehmbare Abweichung  $\Delta I$  jeweils ein bestimmter Bruchteil des gerade wirkenden Reizes ist.

Das Webersche Gesetz für die Unterschiedsschwelle lautet:

$$(1) \quad \Delta I / I = c$$

$c$  = Konstante

$I$  = messbare Eigenschaft des Reizes

$\Delta I$  = Unterschiedsschwelle, bei welcher gerade die kleinste wahrnehmbare Empfindungsunterschied  $\Delta E$  auftritt.

Dieses Gesetz basiert auf grundlegende Arbeiten am Tastsinn. Die Versuchspersonen hielten ein Gewicht in der Hand, welches durch einen bestimmten Betrag vergrößert (oder verkleinert) wurde, bis die Versuchsperson ein Unterschied bemerkte. Die Differenz zwischen den beiden Gewichten bildete die Unterschiedsschwelle, die naturgemäß von der Größe des ursprünglichen Gewichtes abhängig ist.

Durch diese Eigenversuche konnte Weber aber auch zeigen, dass die von ihm aufgestellte Beziehung einen eingeschränkten Gültigkeitsbereich besitzt [3, Band1].

Die Gültigkeitsgrenzen des Weberschen Gesetzes bemerkt man, wenn man bei großer Helligkeit eine Sonnenbrille aufsetzt. Danach sieht man Strukturen in den Wolken, die vorher unsichtbar waren.

Durch die Sonnenschutzgläser werden aber  $\Delta I$  und  $I$  um den gleichen Faktor herabgesetzt und von daher bleibt das Verhältnis  $\Delta I / I$  konstant. Aber dennoch erfolgt eine Verbesserung der Unterscheidungsleistung. Daraus folgt, dass bei sehr großen Reizen die Unterscheidungsschwelle größer und die Unterschiedsempfindlichkeit niedriger (schlechter) ist.

Dasselbe gilt auch für sehr kleine Reize. Setzt man in einem dunklen Raum eine Sonnenbrille auf, kann man Helligkeitsunterschiede genauso wenig gut erkennen.

In Abb. 23 erkennt man, dass die Webersche Beziehung nur im mittleren Teil der Kurve gilt. Nur dort sind  $\Delta I$  und  $I$  proportional.

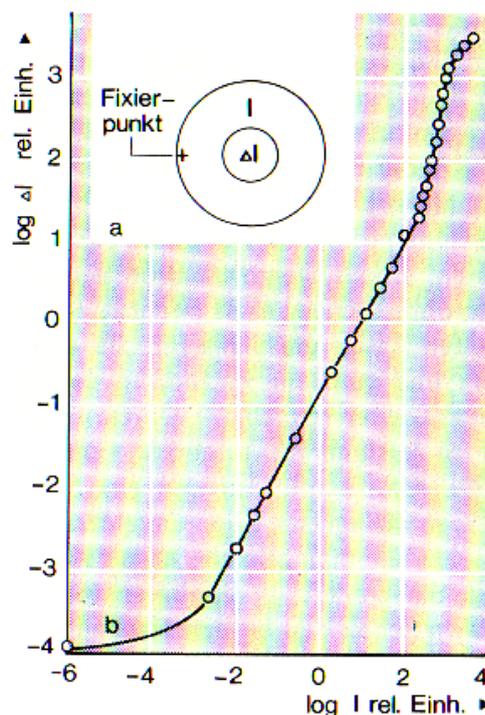


Abb.23: Geltungsbereich des Weberschen Gesetzes.

Die Messdaten der Abb.23 zeigen die Grenzen der Gültigkeit des Weberschen Gesetzes quantitativ. Mit einem Projektor wurde ein kreisrunder Lichtfleck an die Wand projiziert und darauf ein zweiter, kleinerer, der periodisch an und abgeschaltet wurde. Die Leuchtdichte  $I$  des größeren Flecks wurde vorgegeben und die Versuchsperson VP konnte die Leuchtdichte  $\Delta I$  des kleineren Flecks so einstellen, dass sie das periodische Aufleuchten gerade noch sehen konnte.  $I$  ist auf der Abzisse und die Unterscheidungsschwelle  $\Delta I$  auf der Ordinate, beides logarithmisch aufgetragen [45].

## Das Fechnersches Gesetz

Ein wichtiger Aspekt in der Wahrnehmung ist die Intensität der Wahrnehmung. Wie hängt die Intensität mit der Reizgröße zusammen?

Messen kann man nur die Reizgröße. Die Empfindungsintensität ist keine physikalische Größe und damit nicht objektiv messbar.

Die Erfahrung zeigt, dass bei vielen Empfindungsqualitäten die Intensität nicht beliebig groß wird. Das entspricht dem physikalischen Verhalten von Sinnes- und Nervenzellen bei wachsender Reizgröße: Die Erregungsgröße wächst nicht proportional mit dem Reiz, sie strebt einem oberen Sättigungswert zu.

Fechner machte den Vorschlag, den Zusammenhang zwischen der Reizgröße  $I$  und der Empfindungsintensität  $E$  mit einer Logarithmusfunktion zu beschreiben.

$$(2) \quad E = k \cdot \log I + c, \text{ hierbei sind } k, c \text{ reellwertige Konstanten.}$$

Diese Funktion bezeichnete Fechner als *Massformel*. Die *Massformel* beruht auf dem Weberschen Gesetz, sowie einer zusätzlichen Annahme über die „eben noch merklichen Unterschiede“.

Im Folgenden soll gezeigt werden, wie sich der logarithmische Zusammenhang zwischen der Reizgröße  $I$  und der Empfindungsintensität  $E$  ergibt.

Zwei Reize sollen einen so geringen Unterschied besitzen, oder was dasselbe ist, der Zuwachs zum einen Reiz soll so klein sein, so dass man für  $\Delta I/I$  dann  $dI/I$  schreiben kann.  $dI/I$  soll der relative Reizzuwachs sein. Für die Empfindung, die ja vom Reiz  $I$  abhängt, soll sich bei kleiner Reizänderung  $dI$ , eine kleine Empfindungsänderung  $dE$  ergeben.

Nach dem Weberschen Gesetz bleibt  $dE$  konstant, wenn  $dI/I$  konstant bleibt. Solange  $dE$  und  $dI$  sehr klein sind, verhalten sie sich bei Änderungen proportional. Das drückt Fechner in seiner sogenannten „Fundamentalformel“ aus [3, Band 2, S.10].

$$(3) \quad dE = k \cdot (dI/I)$$

Hier ist  $k$  eine Konstante, die abhängig von der zu wählenden Maßeinheit für  $E$  und  $I$  ist.

Fechner sieht in dieser Gleichung 2 Grundprinzipien realisiert. Erstens das empirische Phänomen des Weberschen Gesetzes und zweitens das „mathematische Hilfsprinzip“ [3, Band 2, S.6], welches darauf beruht, dass beliebige (differenzierbare) Funktionen lokal durch eine Gerade approximiert werden können, deren Steigung gerade den Differentialquotienten angibt.

Die logarithmische psychophysische Funktion (2) erhält man dann durch Integration der Gleichung (3) [3, Band 2, S.33].

Fechner zeigte, dass die Gleichung (2) nicht nur mit der Integrationsmethode, sondern auch als Lösung einer Funktionalgleichung dargestellt werden kann [3, Band 2, S.34]. Als Beweis zitiert Fechner die Originalarbeiten von Cauchy.

Einige weitere gebräuchliche Funktionen sind:

$$(4) \quad E = E_{\max} \cdot (I / (I+I_0))$$

$$(5) \quad E = k \cdot I^\beta \quad k, \beta = \text{Konstanten, wobei } k \text{ abhängig von der zu wählenden Maßeinheit für } E \text{ und } I \text{ ist.}$$

Die Beziehung (5) wird als Potenz- oder Stevens'sches Gesetz bezeichnet.

Die Funktionen (1), (2), (4) und (5) bezeichnet man als psychometrische Funktionen.

Mit welcher psychophysikalischen Funktion die Messdaten der 2. Versuchsreihe ausgewertet werden soll, kann bis zu diesem Zeitpunkt nicht gesagt werden.

## 2.8 Physiologische Grundlagen

Da das Hauptaugenmerk dieser Arbeit auf der Psychophysik liegt, wird in diesem Abschnitt nur das Notwendige erläutert, das zum Verständnis der psychophysikalischen Experimente und ihrer Interpretation erforderlich ist. Psychophysik und Physiologie, hier besonders die Neurophysiologie sind in gewisser Weise komplementär zueinander. Die Physiologie versucht die Strukturen der Sinnesorgane und hierbei auch speziell die Strukturen der neuronalen Verschaltungen zu erklären. Sie ist aber nicht in der Lage, Aussagen über den Zusammenhang zwischen Nervensignalen und den dadurch ausgelösten Empfindungen zu machen.

Die Psychophysik hingegen untersucht den Zusammenhang zwischen physikalischen Reiz und der dadurch verursachten Sinnesempfindung. Die detaillierte Struktur der hierbei ausgelösten Signalverarbeitung bleibt unklar. Man kann dies auch mit einem „schwarzen Kasten“ vergleichen in den man nicht hineinsehen kann.

### - Der physikalisch-optische Apparat des Auges

Das Auge erzeugt ein optisches Bild der physikalischen Außenwelt, genau genommen einen Ausschnitt der Außenwelt. Die Komponenten welche diesen Vorgang vermitteln, sind die Hornhaut (Cornea) und die Kristalllinse, in Verbindung mit den hierbei beteiligten optischen Medien: Kammerwasser und Glaskörper.

Die Hornhaut hat dabei den größten Anteil der optischen Brechkraft (ca. 43,05 dpt), welches für die Erzeugung eines scharfen Netzhautbildes auf der Netzhaut (Retina) erforderlich ist.

Die Hornhaut hat in ihrem optisch wirksamen Bereich eine nahezu sphärische Begrenzungsfläche. Im Normalfall hat die Cornea einen etwas geringeren Krümmungsradius im vertikalen Meridian als im horizontalen Meridian. Dies wird als physiologischer Hornhaut-Astigmatismus bezeichnet. Dieser wird aber meist durch einen entsprechenden Astigmatismus der Kristalllinse, welcher um 90° zum Hornhaut-Astigmatismus orientiert ist, kompensiert.

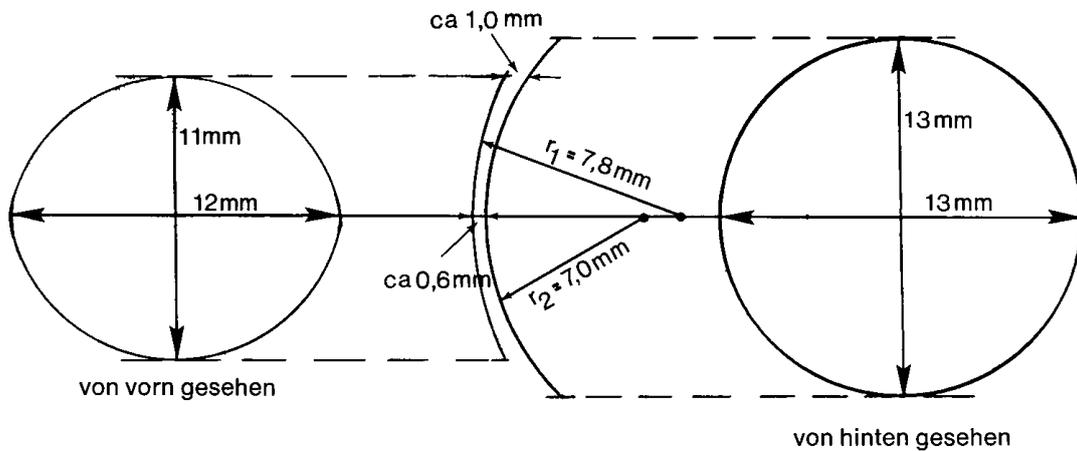


Abb.24: Durchschnittliche Maße der Hornhaut.

In Bild 24 sind  $r_1$  der Krümmungsradius der Hornhautvorderfläche und  $r_2$  der Krümmungsradius der Hornhaurückfläche.

Zwischen der Cornea und der Kristalllinse befindet sich das Kammerwasser, das die vordere- und hintere Augenkammer ausfüllt. Sie besitzt die Brechzahl 1,336. Der Raum der vorderen Augenkammer besitzt eine Tiefe von ca. 3 - 3,5 mm. Derjenige der hinteren Augenkammer hat eine Tiefe von ca. 0,5mm.

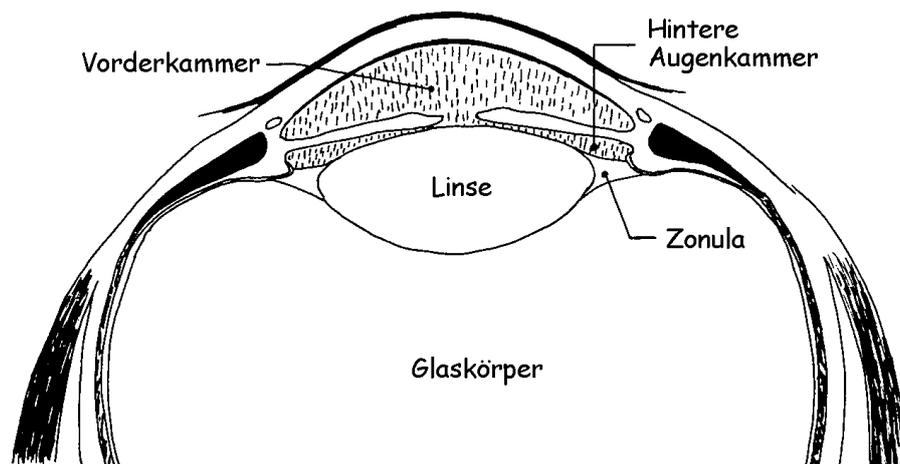


Abb.25: Schematische Darstellung der Innenräume des Auges.

Die Linse ist das Instrument für die Akkommodation des Auges. Hierunter versteht man das Vermögen, optische Objekte die sich in verschiedenen Entfernungen zum Beobachter befinden, scharf auf die Netzhaut abzubilden. Die Kristalllinse ist eine bikonvexe Linse, deren Form durch die am äußersten Rand der Linse, die sog. Zonula-Fasern, geändert werden kann.

Im Folgenden sollen ein paar Kenndaten, welche die Linse betreffen, aufgeführt werden:

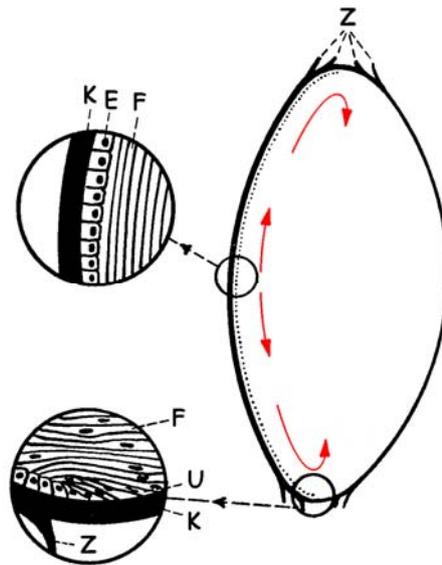


Abb.26: Querschnitt einer Linse. E ist das Linsenepithel, F die Linsenfaser, K die Linsenkapsel, U die Übergangsstelle und Z ist die Ansatzstelle der Zonulafasern.

**Kenndaten:**

$r_3 = 10\text{mm}$  (Krümmungsradius der Linsenvorderfläche)  
 $r_4 = -6\text{mm}$  (Krümmungsradius der Linsenrückfläche),

Werte beziehen sich auf Fernakkommodation, wobei hier für die Brechzahl  $n = 1,386$  gilt.  
 $r_3 = -r_4 = 5,33\text{mm}$ , Werte beziehen sich auf maximale Nahakkommodation, wobei hier  $n = 1,406$  (innere Akkommodation) gilt.

Wie man unschwer erkennt, ist die Akkommodation nichts anderes, als die Veränderung der Krümmungsradien der Linse. Die Akkommodationsleistung nimmt mit dem Alter ab. Im Alter von 20 Jahren ist der Krümmungsradius noch so groß, dass ein Objekt in einer Entfernung von ca. 10 cm noch scharf abgebildet werden kann. Mit 60 Jahren hingegen, in etwa noch 80 cm.

Der Raum zwischen Linse und Netzhaut wird vom Glaskörper ausgefüllt. Dies ist eine gallertartige Substanz, die beim Sehvorgang keine aktive Rolle spielt, sondern nur durch seine Brechzahl von 1,336 zur optischen Abbildung im Auge beiträgt.

Ein wichtiger Bestandteil des Sehens ist die Regenbogenhaut (oder Iris), da sie die Größe der Pupille regelt. Sie fungiert als Blende und beeinflusst dadurch die Abbildungsqualität der optischen Abbildung.

Die Iris besteht aus zwei Muskeln, den radiären Muskelfasern, welche die Pupille erweitern und einem ringförmigen Schließmuskel der die Pupille verkleinert. Die radiären Muskelfasern werden vom Sympathikus und der ringförmige Schließmuskel vom Parasympathikus innerviert. Hierbei bilden Parasympathikus und Sympathikus die Hauptbestandteile des vegetativen Nervensystems. Dieses System und die von ihnen angesteuerten Endorgane sind der

unmittelbaren bewussten Kontrolle entzogen. Das bedeutet, dass die Größe der Pupille unbewusst durch ein Gleichgewicht der Erregungszustände von Parasympathikus und Sympathikus eingestellt wird [51].

Die Netzhaut (Retina) ist natürlich der relevanteste Teil des Auges. Auf ihr wird das optische Bild der Außenwelt projiziert. Sie enthält Photorezeptoren, die das absorbierte Licht in elektrische Signale transformiert und erste Schritte der neuronalen Verarbeitung der empfangenen Information durchführt.

Man kann auch anders formuliert sagen: morphologisch gesehen, handelt es sich bei der Retina um einen vorgestülpten Teil des Gehirns. Sie ist in mehreren Schichten gegliedert. Folgende Abbildung soll dies verdeutlichen:

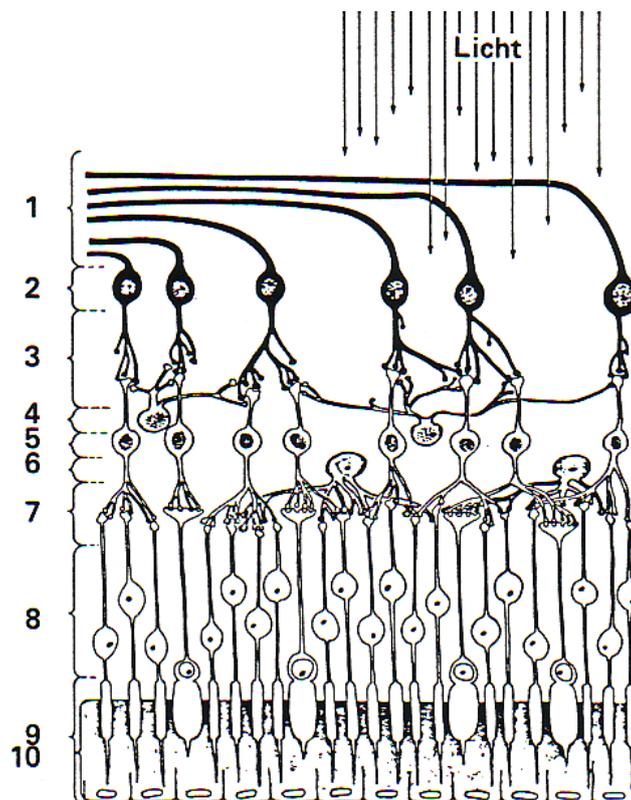


Abb.27: Die Netzhaut besteht aus mehreren Schichten: Rezeptoren, bipolaren- und Ganglienzellen und weitere verbindende Strukturen. 1 Nervus opticus, 2 Ganglienzellen, 3 innere Synapsen, 4 amakrine Zellen, 5 bipolare Zellen, 6 horizontale Zellen, 7 äußere Synapsenschicht, 8 Zellkerne, 9 Rezeptoren: Zapfen und Stäbchen, 10 Pigmentschicht.

Wie man erkennt, dringt das Licht von oben herein und muss dabei mehrere retinale Schichten durchdringen, bevor es von den Photorezeptoren absorbiert wird. In der Abbildung kann man drei verschiedene Schichten, mit zwei dazwischenliegenden Synapsenschichten, unterscheiden.

Die äußerste Schicht, die am weitesten vom einfallenden Licht entfernt ist, enthält die Photorezeptoren. Diese leiten die Erregung an die bipolaren Zellen der nächsten Schicht weiter. Die dritte Schicht wird durch die Ganglienzellen gebildet, deren Axone in den Nervus opticus einmünden.

Zwischen diesen drei Neuronenschichten liegen jeweils Synapsenschichten, bei denen sich außer einer vertikalen Erregungsleitung auch eine horizontale Erregungsübertragung findet. Die sogenannten Horizontalzellen in der äußeren Synapsenschicht, sowie die amakrinen Zellen in der inneren Synapsenschicht, stellen Querverbindungen zwischen den bipolaren und den Ganglienzellen einer neuronalen Schicht her. Durch die horizontalen Verbindungen, ist die Interaktion benachbarter Zellen, der Retina möglich. An der Austrittsstelle des Nervus opticus sind keine Rezeptoren, so dass Lichtquanten, die auf dieser Stelle treffen, keinen Reiz auslösen. Man nennt diese Stelle auch „blinder Fleck“.

Wie oben schon bereits erwähnt, absorbieren die Photorezeptoren des visuellen Systems, die einfallende Lichtenergie. Genau betrachtet, wandeln die Photorezeptoren, die Lichtenergie in elektrophysiologische Signale um. Man kann hier zwei Arten von Rezeptoren unterscheiden:

1. Zapfen
2. Stäbchen.

Zapfen und Stäbchen unterscheiden sich nicht nur in ihrem Aussehen, sondern auch in ihrer Lichtempfindlichkeit. Die Stäbchen vermitteln das Sehen bei Dunkelheit, das sogenannte skotopische Sehen. Dagegen sind die Zapfen für das Sehen bei Tageslicht und das Farbsehen verantwortlich. Dies nennt man photopisches Sehen. Da das Auge den Prozess der Dunkeladaptation nicht plötzlich vollzieht, existieren mehrere Übergangszustände zwischen dem photopischen- und dem skotopischen Sehen. Das Sehen in diesem Bereich nennt man mesopisches Sehen.

Durch die jeweils verschiedenen Rezeptorarten, die beim photopischen und beim skotopischen Sehen zum Einsatz kommen, kann eine gute Orientierung bei Dämmerung, als auch bei größter Helligkeit, garantiert werden.

Beispiel: Weißes Papier wird sowohl im Mondlicht als auch bei hellem Sonnenlicht wahrgenommen. Im ersten Fall sind nur die Stäbchen verantwortlich, im zweiten Fall sind die Zapfen für das Sehen verantwortlich.

Mit obigem Beispiel könnte man vermuten, dass die Stäbchen eine höhere Lichtempfindlichkeit, als die Zapfen besitzen. Dies ist auch der Fall, jedoch muss auch der Umstand betrachtet werden, dass die Stäbchen bei der weiteren Signalverarbeitung, zu sogenannten „rezeptiven Feldern“ zusammengeschaltet sind.

Allerdings wird der so erworbene Vorteil der höheren Lichtempfindlichkeit, gegen den Verlust an optischen Auflösungsvermögen erkaufte.

Da eine Ganglienzelle mit mehreren nachgelagerten Rezeptoren verschaltet ist, nennt man Konvergenzgrad. Das bedeutet, umso größer der Konvergenzgrad eines rezeptiven Feldes ist, desto geringer das dazugehörige Auflösungsvermögen. Beide Augen zusammen haben ca. 250 Millionen Rezeptorzellen, deren Erregung über 1,6 Millionen Neuronen weiter ins Gehirn geleitet wird [45], [52]. Abbildung 28 zeigt schematisch die Verteilung der Stäbchen und Zapfen.

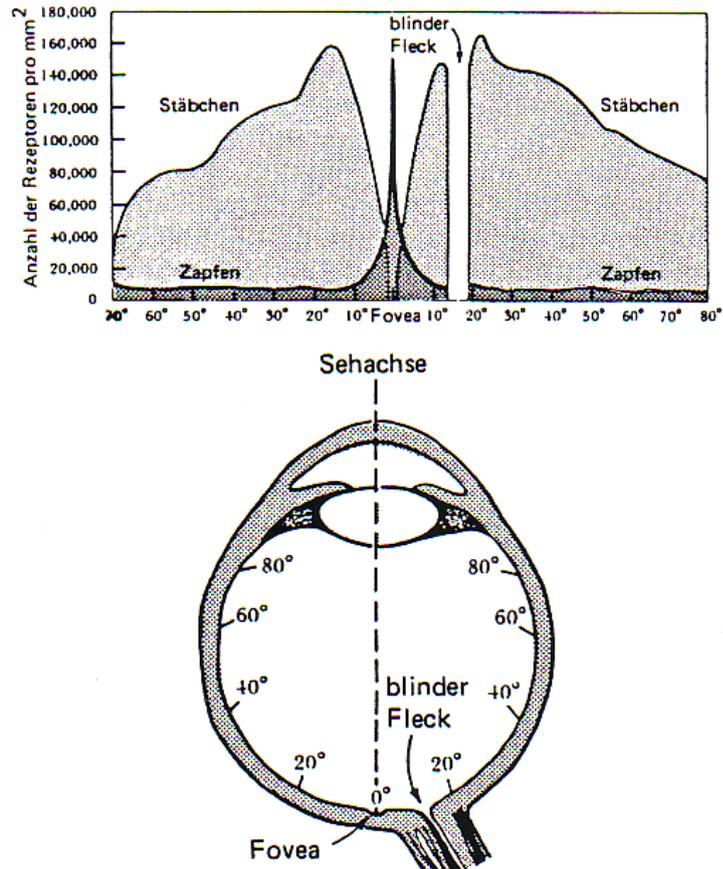


Abb.28: Verteilung von Zapfen und Stäbchen

Das Auge ist im optischen Sinne kein gutes zentriertes System, da seine optische Achse (=Symmetrieachse des abbildenden Systems, auf der die Brennpunkte und Krümmungsmittelpunkte liegen) nicht die Fovea centralis durchstößt. Die optische Achse schneidet die Fixierlinie unter einem Winkel von ca. 5°.

### 3. Experimentelle Untersuchung

Zur Durchführung der experimentellen Untersuchung wurde ein Versuchsaufbau verwendet, der vom Autor in Zusammenarbeit mit der mechanischen Werkstatt des Institutes für Berufsbildung in Karlsruhe entwickelt und realisiert wurde. Die elektronischen Komponenten des Versuchsaufbaus wurden vom Autor selbst realisiert.

#### 3.1 Versuchsaufbau und Ablauf zur Durchführung der Experimente I, II

Die Spezifikation für den technischen Aufbau der Versuchsreihe I orientiert sich an der Versuchssituation, in welcher der Proband in einem hellen Raum, Stangenpaare mittels einer elektronischen Steuerung so einzustellen hat, dass die entstandene Konfiguration dem Kriterium genüge: die eingestellten Größen der Stangenpaare entsprechen subjektiv der vorgegebenen Referenzgröße, welche sich in einem Abstand von 485cm gegenüber dem Probanden befand.

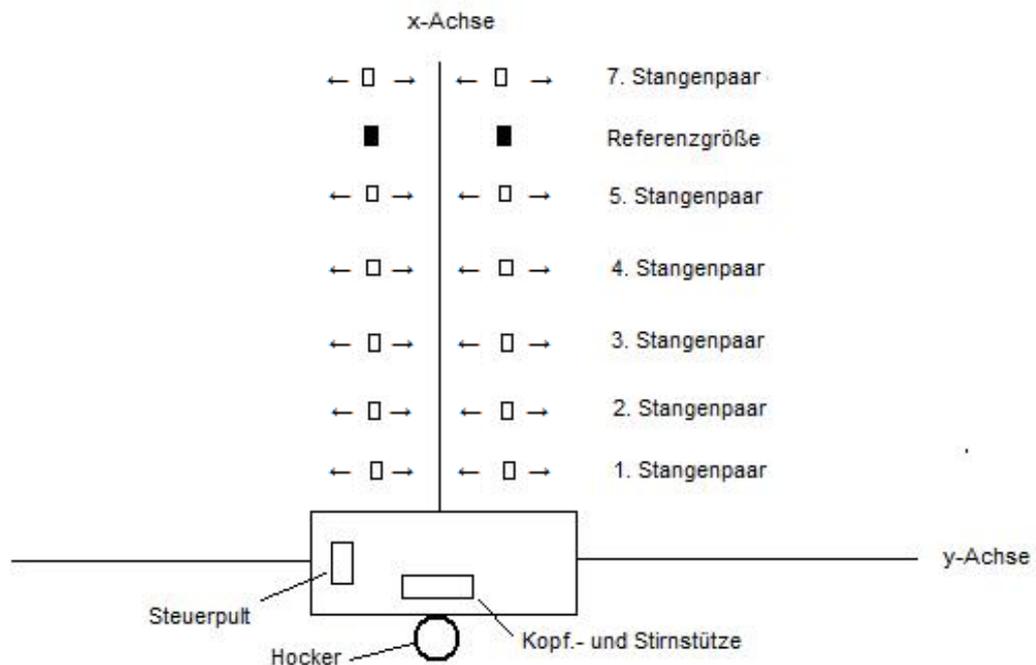


Abb.29: Messvorrichtung zur Bestimmung der subjektiven Wahrnehmungsgröße.

Die Abstände der Stangenpaare zum Probanden lauten in den folgenden Positionen:  
Position 7 (= 5890mm), Position 6 (= 4850mm), Position 5 (= 3850mm),  
Position 4 (= 2850mm), Position 3 (= 1850mm), Position 2 (= 940mm) und Position 1 (= 305mm)

Die erste Einstellung entsprach der Übertragung des 6. Stangenpaares (Referenzgröße) auf das 7. Stangenpaar. Die weiteren Einstellungen entsprachen 6→5; 5→4; 4→3; 3→2; 2→1. Der Proband musste nachdem die eingestellte Konfiguration hergestellt war, subjektiv überprüfen, ob die einzelnen Einstellungen gegenüber der 2. Position (orthostereoskopischer Bereich), der Aufgabenstellung „gleichgroß“, genühten.

Dies ergab gegebenenfalls Korrekturen in der Einstellung der einzelnen Stangenpaare.

Der Zeitaufwand für die Herstellung einer Konfiguration betrug im Durchschnitt 20 Minuten, da das Gewinde für die Verschiebung der Stangen äußerst fein war und die Probanden sich Zeit lassen sollten.

Hierbei mussten folgende Randbedingungen für den Versuchsablauf erfüllt werden.

- Die Beleuchtung im Raum darf zu keinem Schattenwurf führen.
- Der Versuchsraum muss gleichmäßig beleuchtet sein.
- Die Bedienung der elektronischen Steuerung muss ohne direkte Betrachtung bedienbar sein.
- Der Versuchsraum muss variabel in der Darbietung der Abstandskriterien sein.
- Der Probandentisch und die dazugehörige Kopfstütze muss individuell einstellbar sein.

Mittels der oben aufgestellten Anforderungen für den Versuchsaufbau, ergab sich für die Versuchsreihe I nachfolgende Umsetzung.

Die Abmessungen der einzelnen technischen Komponenten werden im Folgenden beschrieben.

## **Versuchsreihe I:**

### **- Einstellung der subjektiven visuellen Wahrnehmungsgröße**

Alle 8 Messreihen der 1. Versuchsreihe fanden in einem Raum statt, der gleichmäßig ausgeleuchtet war. Die Messstrecke betrug 6000mm, wobei der Abstand Kopfstütze-hinteres Stangenpaar 5940mm entsprach.

Die zum Einstellen verwendeten Stangen hatten eine Länge von 1150mm bei einem Durchmesser von 6mm. Die Stangenaufhängung war aus Holz angefertigt. Die Stangen wurden mittels eines Motors, der elektronisch ansteuerbar ist, angetrieben. Die folgenden Abbildungen sollen eben beschriebenes verdeutlichen.



Abb.30: Frontansicht der 1. Messreihe (Vorderansicht).



Abb.31: Stangenaufhängung;



Abb.32: Stangenaufhängung; Rückansicht.    Abb.33: Motor.

Im vorderen Teil der Messstrecke ist der Platz für die Versuchsperson aufgebaut, mit einem höhenverstellbaren Tisch der zusätzlich eine verstellbare Stirn- und Kinnstütze besitzt. Das elektrische Steuergerät ist auf der linken Seite des Tisches angebracht. Zusätzlich ist an der Stirnstütze eine Verdeckung, welche als Sichtschutz für den oberen Bereich der Stangenaufhängung fungierte, befestigt. Die Versuchsperson konnte nur den unteren Bereich der Stangenpaare wahrnehmen.

Die Bemessungen für den Hubtisch sind wie folgt: Breite: 510mm; Höhe: 750mm; Länge: 410mm. Für die Kopf/Stirnstütze: Höhe:450mm; bis zum Kinn: 260mm, bis Augenhöhe gemittelt: 400mm. Folgende Abbildungen zeigen eben gesagtes.



Abb.34: Probantentisch.

Abb.35: Kopfstütze; Vorderansicht.

Der rote Streifen in Abb.30 wurde effektiv für die 8 Messreihen der 1. Versuchsreihe entfernt. Erklärungen hierfür erfolgt im Abschnitt Versuchsablauf.

In den ersten 2 Messreihen selbst, wurden die Falten der Vorhangtücher so geglättet, dass diese keine Entfernungskriterien darstellten. Das vorderste Stangenpaar musste vom Proband selbst eingestellt werden. Es wurde jeweils darauf geachtet, dass sich hierbei die Versuchsvoraussetzungen nicht änderten.

## Versuchsreihe II:

### - Unterschiedsschwelle in der Abstandseinschätzung

Der technische Aufbau der Versuchsreihe II orientiert sich ebenfalls an der Versuchssituation, bei welchem der Proband folgende Aufgabe umzusetzen hatte: Eine vorgegebene Stange diente als Referenzabstand. Der Proband wurde angewiesen darauf zu achten, ob sich eine rechts neben der Referenzstange dargebotene, durch Abstandsänderung sich in einer anderen Entfernung zum Beobachter befindet. Die Abstandsänderung der dargebotenen Stange, wurde durch langsames Verschieben eben dieser Stange, mittels einer Fixierstange erreicht.

Die Unterschiedsschwelle in der Abstandeinschätzung wurde zum Probanden hin und vom Probanden weg gemessen. Es wurde nach jeder Einstellung die gesamte Verschiebungsstrecke vom Prüfer gemessen und notiert.

Der Zeitaufwand für eine gesamte Messreihe (binokular+monokular) betrug im Durchschnitt 30 Minuten. Hierbei mussten folgende Randbedingungen für den Versuchsablauf erfüllt werden.

- Die Beleuchtung im Raum darf zu keinem Schattenwurf führen.
- Der Versuchsraum muss gleichmäßig beleuchtet sein.
- Der Versuchsraum muss variabel in der Darbietung der Abstandskriterien sein.
- Der Probandentisch und die dazugehörige Kopfstütze muss individuell einstellbar sein.
- Gute Kommunikation Prüfer und Proband.
- Die Bewegung der Stange darf keine Abstandskriterien induzieren.
- Der Prüfer darf für den Probanden in den ersten 2 Messreihen nicht sichtbar sein.

Mittels der oben aufgestellten Anforderungen für den Versuchsaufbau, ergab sich für die Versuchsreihe II nachfolgende Umsetzung.

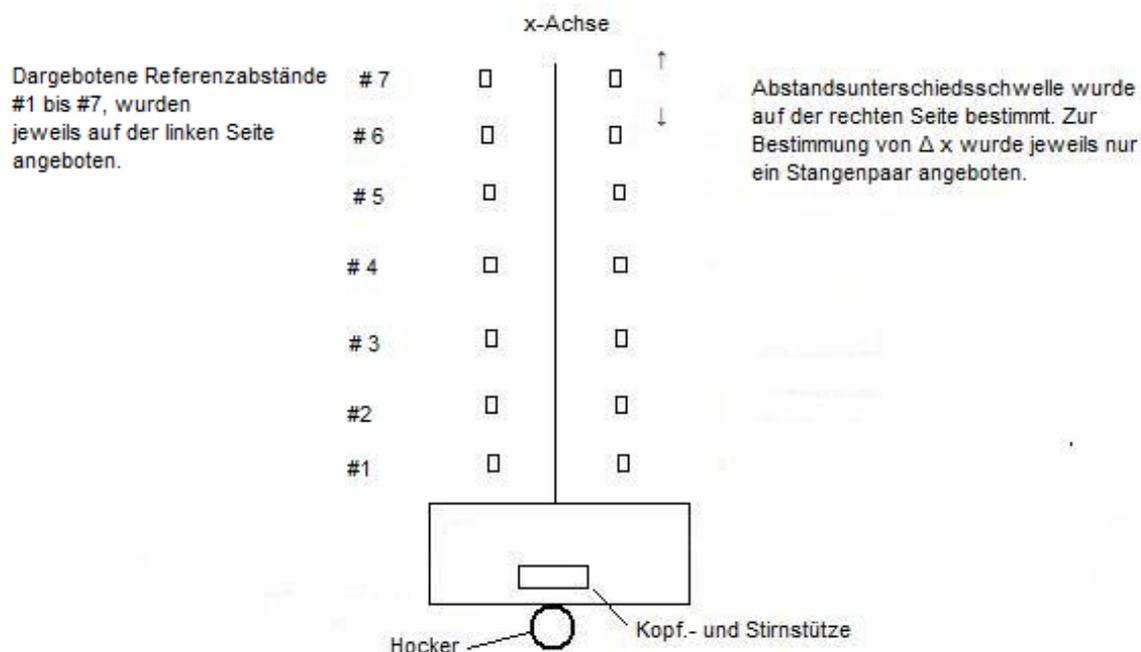


Abb.36: Messvorrichtung zur Bestimmung der Abstandsunterschiedsschwelle.

Die Abmessungen der einzelnen technischen Komponenten werden im Folgenden wieder beschrieben.

Alle 8 Messreihen der Versuchsreihe II fanden unter gleichen Versuchsbedingungen statt, wie die Versuchsreihe I. Auch hier war der Raum gleichmäßig ausgeleuchtet. Die Messstrecke betrug wieder 6000mm, wobei der Abstand Kopfstütze-hintere Referenzstange 5940mm entsprach. Bei allen Messungen entsprach die Entfernung der Referenzstange den Abständen der Stangenpaare der Versuchsreihe I.

Der Abstand zwischen der Referenzstange und der dargebotenen Stange, entsprach jeweils den Mittelwerten der subjektiven visuellen Wahrnehmungsgrößen, die in den 7 Positionen der Versuchsreihe I eingestellt wurden. Die Probanden wurden angewiesen, bewusst auf das obere Ende der Stangen zu sehen.

Dadurch wurde die Bewegung der rechten Stange, welche sich eventuell in einer Falte im Tuch widerspiegeln würde, vermieden. Zusätzlich konnte der Proband den Prüfer nicht direkt sehen. Dies wurde nach jeder Messung durch Befragung der Versuchsperson sichergestellt.

Damit die Blickrichtungen der Probanden, in den jeweiligen Abständen immer die selbige war, wurde die Länge der Referenz- und der dargebotenen Stange, in den einzelnen Messpositionen angepasst.

Dies ergab dann die folgenden unterschiedlichen Längen der Stangen. Ausgehend von der Position 6 (=4850mm) und der Referenzstange (=240mm) ergab sich:

- Position 7 (= 5890mm) ergab eine Länge von 206 mm
- Position 6 (= 4850mm) ergab eine Länge von 240mm
- Position 5 (= 3850mm) ergab eine Länge von 273mm
- Position 4 (= 2850mm) ergab eine Länge von 306mm
- Position 3 (= 1850mm) ergab eine Länge von 339mm
- Position 2 (= 940mm) ergab eine Länge von 368mm
- Position 1 (= 305mm) ergab eine Länge von 399mm.

Jede Messung wurde einzeln umgesetzt, so dass immer nur ein Stangenpaar auf dem Tisch sichtbar war.

Die zum Einstellen verwendeten Stangen hatten jeweils einen Durchmesser von 6mm.

Für die ersten Messreihen wurden allerdings Stangen eingesetzt, die eine Länge von 1150mm hatten. Dadurch konnte der durch die Schlitzblende sehende Proband, den oberen Bereich der Stangen nicht sehen. Der Proband konnte durch die Schlitzblende nur durchgezogene Stangen (Referenz- und dargebotene Stange) wahrnehmen.

Dies ergab eine analoge Versuchssituation zu den ersten 2 Messreihen der 1. Versuchsreihe.

Die Vergleichsstangen wurden mittels einer Fixierstange, welche eine Länge von 550mm hat, langsam bewegt.

Die Bemessungen für den Messtisch sind wie folgt: Breite: 600mm; Höhe: 750mm; Länge: 5900mm.

Die folgenden Abbildungen sollen dies wieder verdeutlichen.



Abb.37: Messtisch der 2. Messreihe.



Abb.38: Messtisch mit Stangenpaar.



Abb.39: Stangenpaar mit Fixierstange.



Abb.40: Frontalansicht der 2. Messreihe.

Die Bemessungen für den Hubtisch sind analog der Versuchsreihe I.



Abb.341: Probandentisch.



Abb.42: Fixierstange.

### **3.1.1 Zusammensetzungen der Versuchsteilnehmer:**

Bei den Versuchspersonen handelte es sich überwiegend um Meisterschüler der Fachschule für Augenoptik und Optometrie, sowie Bekannte und Verwandte des Autors.

In den beiden Versuchsreihen nahmen insgesamt 104 Personen teil. Hierbei handelte es sich um 55 weibliche- und 49 männliche Probanden. In der Versuchsreihe I nahmen 58 (35w, 23m) Personen und in der Versuchsreihe II nahmen 46 (20w, 26m) Personen teil. Die Anzahl der Probanden in den jeweiligen Messreihen betrug:

Versuchsreihe I: 20 Personen je Messreihe

Versuchsreihe II: 17 Personen je Messreihe

Die visuellen Voraussetzungen, welche an die Teilnehmer gestellt wurden, war eine gute Raumwahrnehmung.

Hatte die Versuchsperson eine Fehlsichtigkeit, so wurde diese mit einer Messbrille und Korrektionsgläser korrigiert. Zur Überprüfung der Raumwahrnehmung, refraktionierte der Autor die Personen im Vorfeld. Dies geschah in den Räumlichkeiten des Institutes für Berufsbildung in Karlsruhe. Die verwendete Refraktionseinheit war der Pola-Test von der Firma Zeiss, mit derer die Stereopsis der einzelnen Probanden überprüft wurde.

### **3.1.2 Erläuterungen und Ablauf der 2 Versuchsreihen:**

#### **Versuchsreihe I:**

Mittels des oben dargestellten Versuchsaufbaus, soll in den ersten 4 Messreihen (diese wurden noch mal zwischen monokular und binokular unterteilt!) eine Zentralprojektion (konstanter Winkel) mit subjektiven Größeneinstellungen verglichen werden. Dabei variierten die dargebotenen Entfernungskriterien für die Probanden. Von der ersten bis zur 4. Messreihe wurde die Güte der Abstandsinformationen jeweils erhöht.

Durch den so gewählten Versuchsablauf, konnte die am Anfang aufgestellte Arbeitshypothese des visuellen Systems, dass die Abstandsinformation und deren qualitative Güte unmittelbar die subjektive visuelle Wahrnehmungsgröße beeinflusst, überprüft werden.

Die jeweiligen Größeneinstellungen der einzelnen Messreihen wurden gemessen und in Winkelminuten umgerechnet. Durch die Gegenüberstellung der Zentralprojektion (konst. Gesichtswinkel) und der eingestellten subjektiven visuellen Wahrnehmungsgröße, wurde ein direkter Vergleich messtechnisch realisiert.

Die visuelle Wahrnehmungsgröße konnte nicht in Abhängigkeit von der bitemporalen- und binasalen Querdisparation (=Stereopsis) gemessen werden. Dies war dadurch begründet, dass alle Probanden über extreme Doppelbilder klagten, wenn das einzustellende Stangenpaar sich der Versuchsperson näherte. Die Abbildungsorte der disparaten Netzhautbilder war dann zu weit aus der Fovea Centralis und führte damit zu einer Diplopie. Die Querdisparation liegt aber dennoch in der Versuchsreihe I, mit der Konvergenz überlagert als Informationsquelle für die Entfernung vor.

Hauptaugenmerk in der Versuchsreihe I war es, wie sich die Einstellungen der subjektiven Wahrnehmungsgröße, bei sukzessiver Zugabe der differenzierten Entfernungskriterien, entwickeln und ändern.

Dazu wurden in der 1. Messreihe alle nur möglichen Entfernungskriterien entfernt. Der Vorhang reduzierte die empirischen Kriterien und im monokularen Abschnitt dieser Messreihe, wurde die Konvergenz durch ein Abdeckglas ausgesetzt. Zusätzlich mussten aber die Probanden das abgedeckte Auge zukneifen. Dies geschah im Hinblick auf die „binokulare Sehrichtungsgemeinschaft“ nach Hering. Das Heringsche Gesetz besagt, dass sich beide Sehlinien im angeblickten Objekt schneiden, ob es abgedeckt ist oder nicht. Mit dem Zukneifen eines Auges wurde dieses Gesetz außer Kraft gesetzt. Diese Voraussetzung wurde immer in allen monokularen Messreihen eingehalten.

Durch die Schlitzblende wurde die Akkommodation stark vermindert. Das psychische Gefühl der Nähe ließ sich nicht ausschalten.

Die Erhöhung der Tiefenschärfe reduziert den Stimulus, welcher zur Akkommodation führt [2]. Zerstreungskreise (Unschärfebilder) hingegen führen zu einem Stimulus der die Akkommodation provoziert.

Um die Akkommodation weiter zu vermindern, wurde der Blick zum unteren Stangenende verboten. Die gesamte Akkommodation kann natürlich nicht ausgeschlossen werden, da das psychologische Gefühl der Nähe immer vorliegt. Dies führt z.B. auch zu dem bekannten Phänomen der Instrumentenmyopie. Die Kinn- und Stirnstütze diente als Zwangshaltung, um die Bewegungsparallaxe als mögliche Informationsquelle zu verhindern.

In der 1. Messreihe waren als Entfernungskriterien folgende visuelle Komponenten zugelassen:

#### **1. Messreihe / monokular:**

1. Netzhautbild (= Gesichtswinkel)
2. das psychische Gefühl der Nähe.

#### **1. Messreihe / binokular:**

1. Netzhautbild
2. das psychische Gefühl der Nähe
3. Konvergenz (inkl. überlagerte Querdisparation).

Besonders interessant sind in dieser 1. Messreihe die Wahrnehmungsgrößen der monokularen Einstellungen.

In der 2. Messreihe wurde die Schlitzblende entfernt und der untere Stangenabschnitt durfte mitbetrachtet werden. Die Vorhänge wurden noch nicht entfernt. Die Entfernungskriterien in dieser Messreihe wurden um die konsequente Akkommodation erhöht. Die Empirie wurde noch komplett außen vor gelassen. Die Kinn- und Stirnstütze diente auch hier als Zwangshaltung, um die Bewegungsparallaxe als mögliche Informationsquelle zu verhindern. In der monokularen Messreihe fehlte wieder die Konvergenz.

In der 2. Messreihe waren als Entfernungskriterien folgende visuelle Komponenten zugelassen:

#### **2. Messreihe / monokular:**

1. Netzhautbild (= Gesichtswinkel)
2. Akkommodation.

## **2. Messreihe / binokular:**

1. Netzhautbild
2. Akkommodation
3. Konvergenz (inkl. überlagerte Querdisparation).

In der 3. Messreihe wurden die Vorhänge entfernt. Die empirischen Entfernungskriterien kamen als zusätzliche Informationsquelle dazu. Die Kinn- und Stirnstütze diente auch hier noch als Zwangshaltung, um die Bewegungsparallaxe als mögliche Informationsquelle zu verhindern. In der monokularen Messreihe fehlte naturgemäß wieder die Konvergenz.

In der 3. Messreihe waren als Entfernungskriterien folgende visuelle Komponenten zugelassen:

## **3. Messreihe / monokular:**

1. Netzhautbild
2. Akkommodation
3. Empirie ohne Bewegungsparallaxe.

## **3. Messreihe / binokular:**

1. Netzhautbild
2. Akkommodation
3. Konvergenz (inkl. überlagerte Querdisparation)
4. Empirie ohne Bewegungsparallaxe.

In der 4. Messreihe waren allen Entfernungskriterien zugelassen. Die Kopfstütze wurde entfernt und die Probanden waren aufgefordert, Kopfbewegungen bewusst als Informationsquelle mit ein zu beziehen. In der monokularen Messreihe fehlte natürlich die Konvergenz beider Augen.

In der 4. Messreihe waren als Entfernungskriterien folgende visuelle Komponenten zugelassen:

## **4. Messreihe / monokular:**

1. Netzhautbild
2. Akkommodation
3. Empirie und Bewegungsparallaxe.

## **4. Messreihe / binokular:**

1. Netzhautbild
2. Akkommodation
3. Konvergenz (inkl. überlagerte Querdisparation)
4. Empirie mit Bewegungsparallaxe.

Ein weiterer Hinweis, dass Eingangs gestellten Annahmen begründet und richtig sind, wäre die Betrachtung des orthostereoskopischen Bereichs. Innerhalb dieses Bereiches, gilt die

absolute Unabhängigkeit der subjektiven visuellen Wahrnehmungsgröße vom Sehwinkel. Sie wird in der Literatur mit ca. 30 cm bis 100cm angegeben.  
Sie wird über die Auswertung der einzelnen eingestellten Stangenpaare berücksichtigt.

## **Versuchsreihe II:**

Damit eine Korrelation der Versuchsreihe I mit Versuchsreihe II Sinn macht, wurden die Versuchsvoraussetzungen, wie schon erwähnt, gleich gestaltet.

Damit eine Abhängigkeit der Unterschiedsschwelle von der Abstandsinformation und eine Korrelation mit Versuchsreihe I möglich sind, wurden die gleichen Entfernungskriterien wie in Versuchsreihe I sukzessive zugelassen. Damit die Umgebungsverhältnisse der 1. Messreihe analog derer in Versuchsreihe I war, wurde auch hier wieder ein Vorhang angebracht und mit der Schlitzblende gearbeitet.

Damit die Versuchspersonen wieder nur die Stangen durch die Schlitze wahrnahmen, wurden die langen Stangen verwendet. Hiermit war sichergestellt, dass die Stangenenden nicht sichtbar waren und so kein Stimulus zur Akkommodation proviziert wurde. Die Kinn- und Stirnstütze diente auch in dieser Versuchsreihe als Zwangshaltung, um die Bewegungsparallaxe als mögliche Informationsquelle zu verhindern. In der monokularen Messreihe fehlte natürlich die Konvergenz beider Augen.

Somit ergab sich eine analoge Versuchssituation wie in Versuchsreihe I.

In der 1. Messreihe waren als Entfernungskriterien folgende visuelle Komponenten zugelassen:

### **1. Messreihe / monokular:**

1. Netzhautbild (= Gesichtswinkel)
2. das psychische Gefühl der Nähe.

### **1. Messreihe / binokular:**

1. Netzhautbild
2. das psychische Gefühl der Nähe
3. Konvergenz (inkl. überlagerte Querdisparation).

In der 2. Messreihe wurde die Schlitzblende entfernt. Die Akkommodation kam als weitere Informationsquelle für die Entfernung hinzu. Die Kinn- und Stirnstütze diente auch hier als Zwangshaltung, um die Bewegungsparallaxe als mögliche Informationsquelle zu verhindern. In der monokularen Messreihe fehlte natürlich wieder die Konvergenz beider Augen. Die Vorhänge waren auch noch angebracht.

In der 2. Messreihe waren als Entfernungskriterien folgende visuelle Komponenten zugelassen:

### **2. Messreihe / monokular:**

1. Netzhautbild (= Gesichtswinkel)
2. Akkommodation.

## **2. Messreihe / binokular:**

1. Netzhautbild
2. Akkommodation
2. Konvergenz (inkl. überlagerte Querdisparation).

In der 3. Messreihe wurden die Vorhänge entfernt. Jetzt kamen als Informationsquellen die empirischen Motive hinzu.

Die Kinn- und Stirnstütze diente jedoch auch hier noch als Zwangshaltung, um die Bewegungsparallaxe als mögliche Informationsquelle zu verhindern. In der monokularen Messreihe fehlte natürlich wieder die Konvergenz beider Augen.

In der 3. Messreihe waren als Entfernungskriterien folgende visuelle Komponenten zugelassen:

## **3. Messreihe / monokular:**

1. Netzhautbild
2. Akkommodation
3. Empirie ohne Bewegungsparallaxe.

## **3. Messreihe / binokular:**

1. Netzhautbild
2. Akkommodation
3. Konvergenz (inkl. überlagerte Querdisparation)
4. Empirie ohne Bewegungsparallaxe.

In der 4. Messreihe waren schließlich wieder aller möglichen Entfernungskriterien zugelassen. Die Kopfstütze wurde entfernt und die Probanden waren aufgefordert, Kopfbewegungen bewusst als Informationsquelle mit ein zu beziehen. In der monokularen Messreihe fehlte natürlich die Konvergenz beider Augen.

In der 4. Messreihe waren als Entfernungskriterien folgende visuelle Komponenten zugelassen:

## **4. Messreihe / monokular:**

1. Netzhautbild
2. Akkommodation
3. Empirie und Bewegungsparallaxe.

## **4. Messreihe / binokular:**

1. Netzhautbild
2. Akkommodation
3. Konvergenz (inkl. überlagerte Querdisparation)
4. Empirie mit Bewegungsparallaxe.

Korreliert man beide Versuchsreihen miteinander, so müsste sich diese Schlussfolgerung ableiten lassen:

Die *AID* über ein physikalisches Objekt beeinflusst unmittelbar die visuelle Größenwahrnehmung und die Abstandsunterschiedsschwelle. Umso mehr Abstandskennnisse über einen Objektort vorliegen, desto weniger berücksichtigt das visuelle System die Information des Gesichtswinkels bei der visuellen Größenwahrnehmung. Bei minimaler Abstandskennntnis wird das visuelle System, bei der visuellen Größenwahrnehmung, den Gesichtswinkel verstärkt berücksichtigen.

## **3.2 Graphische Darstellungen der Messergebnisse**

Die beiden Versuchsreihen wurden mit dem Programm „Origin Pro“ graphisch ausgewertet. Dieses Programm eignet sich ideal Rohdaten graphisch zu visualisieren und zu analysieren. Mit Origin Pro hat man ein Werkzeug in der Hand, welches dem Anwender ermöglicht, eigene Funktionen selbst zu definieren und dem Rohdatensatz anzupassen.

### **3.2.1 1.Versuchsreihe**

Nach Kienle [1] soll sich die „scheinbare Größe“, bei Vergrößerung der Entfernung zum Beobachter, wie eine Hyperbelfunktion verhalten. In dieser Arbeit wurde für die Anpassung der Rohdaten eine Funktion genutzt, die eine exponentiellen Abnahme der subjektiven Wahrnehmungsgröße beschreibt soll.

Die entwickelte Funktion soll den Einfluss der Abstandsinformation und die des Netzhautbildes wiedergeben. Da die Abstandsinformation vermittelt durch die Querdissparation, nicht isoliert in dieser Arbeit messbar war, wurde sie aber als überlagerten Einfluss des Konvergenzgrades betrachtet. Daraus ergibt sich eine Funktion die aus 3 Termen und einer Anfangsbedingung zusammengesetzt ist. Konkret handelt sich hierbei um eine abnehmende Exponentialfunktion 3. Ordnung.

Da es sich um eine phänomenale Funktion handelt, kann nicht definiert werden welcher der 3 Terme die Parameter Akkommodation, Konvergenzgrad und Empirie darstellt. Man kann aber die Anfangsbedingung  $y_0$  dem Netzhautbild zuordnen. Dies wird in der Auswertung der Messdaten gezeigt.

Abb. 43 zeigt die graphische Darstellung einer Zentralprojektion (konst. Gesichtswinkel).

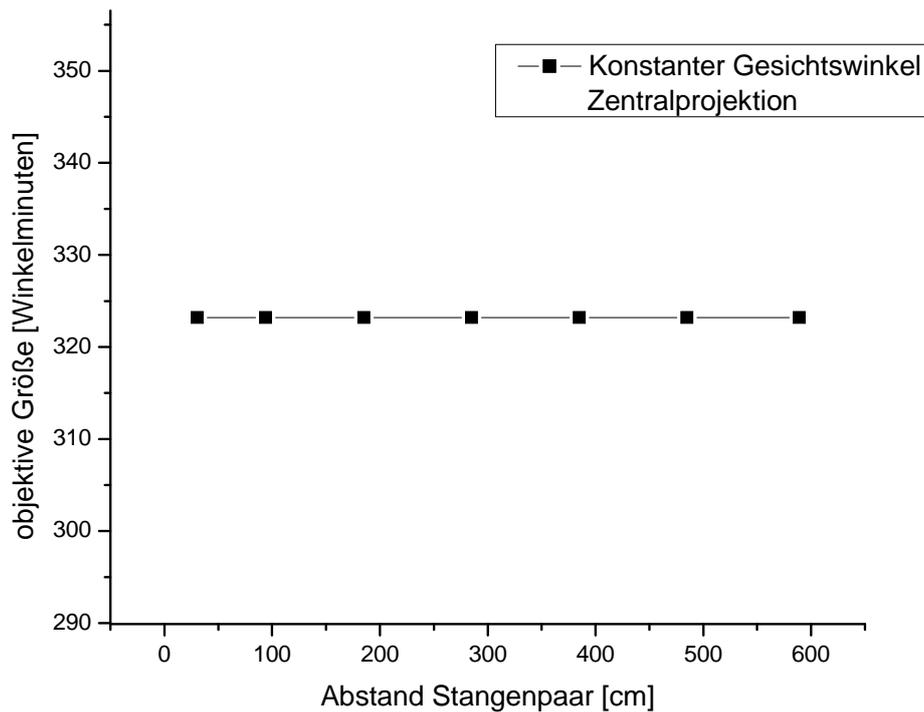


Abb.43: Graphische Auftragung der subjektiven Wahrnehmungsgröße, wenn der Gesichtswinkel konstant ist (=Zentralprojektion).

In dieser graphischen Auftragung erkennt man den konstanten Winkel, der sich bei einer Zentralprojektion ergeben würde. Diese graphische Darstellung soll mit den 4 Messreihen, welche in monokular und binokular unterteilt sind, gegenüber gestellt werden.

Die einzelnen Graphen resultieren immer erst aus der monokularen und dann aus der binokularen Einstellung.

Im Anschluss dieser beiden Graphen werden dann die abstandsabhängigen Abweichungen, der subjektiven Wahrnehmungsgrößen von der objektiven Größe, graphisch dargestellt. Hierfür wurden die Mittelwerte der Messdaten genutzt.

## 1. Messreihe

### - Monokulare Einstellung

dargebotene Abstandsinformationen:

- Netzhautbild,
- Psychologisches Gefühl der Nähe

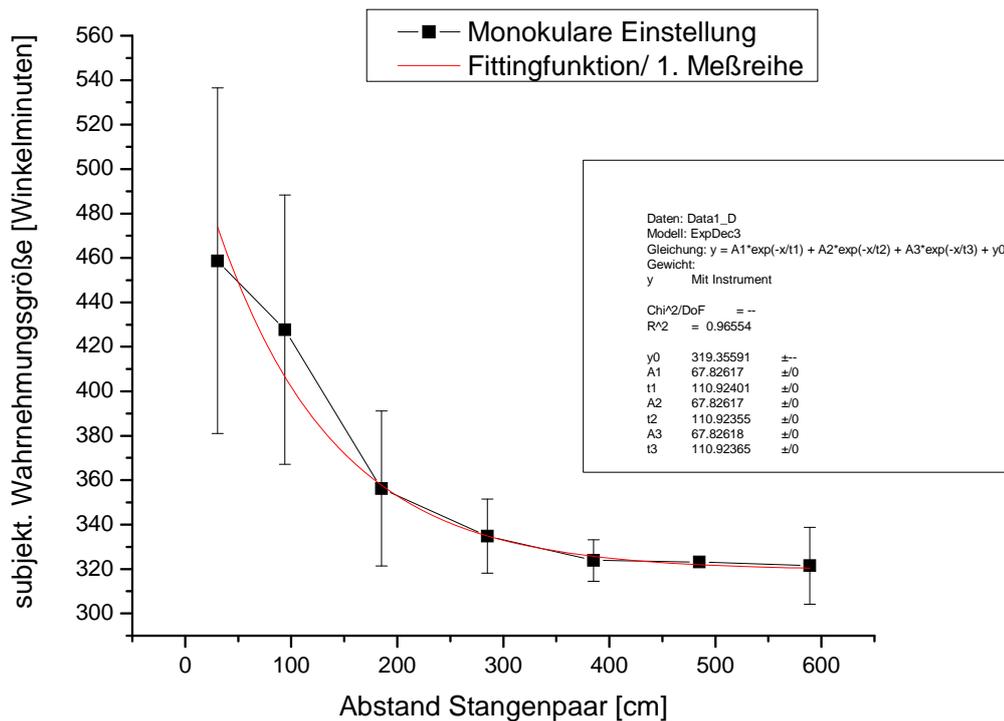


Abb.44: Graphische Auftragung der monokularen Einstellungen.

Die Abweichung, der subjektiven, monokularen Einstellungen, gegenüber der Zentralprojektion ist hier bereits schon merklich.

Die monokularen Einstellungen lassen sich gut mit einer abnehmenden Exponentialfunktion 3. Ordnung approximieren.

Die Fitting-Funktion lautet:  $y = A_1 \exp(-x/t_1) + A_2 \exp(-x/t_2) + A_3 \exp(-x/t_3) + y_0$ . Die geringfügige Abweichung des 2. Stangenpaares (94 cm), lässt sich auf die Größenkonstanz zurückführen, welches in der Auswertung später konkret erläutert wird.

Die approximierte Exponentialfunktion hat für die Anfangsbedingung  $y_0$  den Wert:

$$y_0: 319,36'$$

Jeder der 3 Terme ist mit einem Koeffizienten  $A_i$  gewichtet. Die  $A_i$  `s sämtlicher Messreihen werden gesondert betrachtet. Sie lauten für die monokulare Einstellung der 1. Messreihe:

$$A_1: 67,82' \quad A_2: 67,82' \quad A_3: 67,82'$$

Für die Gewichte  $t_i$  im Nenner des Exponenten, gilt selbiges wie für die  $A_i$  `s sämtlicher Messreihen. Sie lauten für die monokulare Einstellung der 1. Messreihe:

$$t_1: 110,92 \quad t_2: 110,92 \quad t_3: 110,92$$

Die Gewichte  $t_i$  haben die Dimension einer Länge. Die Variable  $x$  besitzt ebenfalls die Dimension einer Länge.

## - Binokulare Einstellung

dargebotene Abstandsinformationen:

- Netzhautbild,
- Psychologisches Gefühl der Nähe,
- Konvergenz beider Augen.

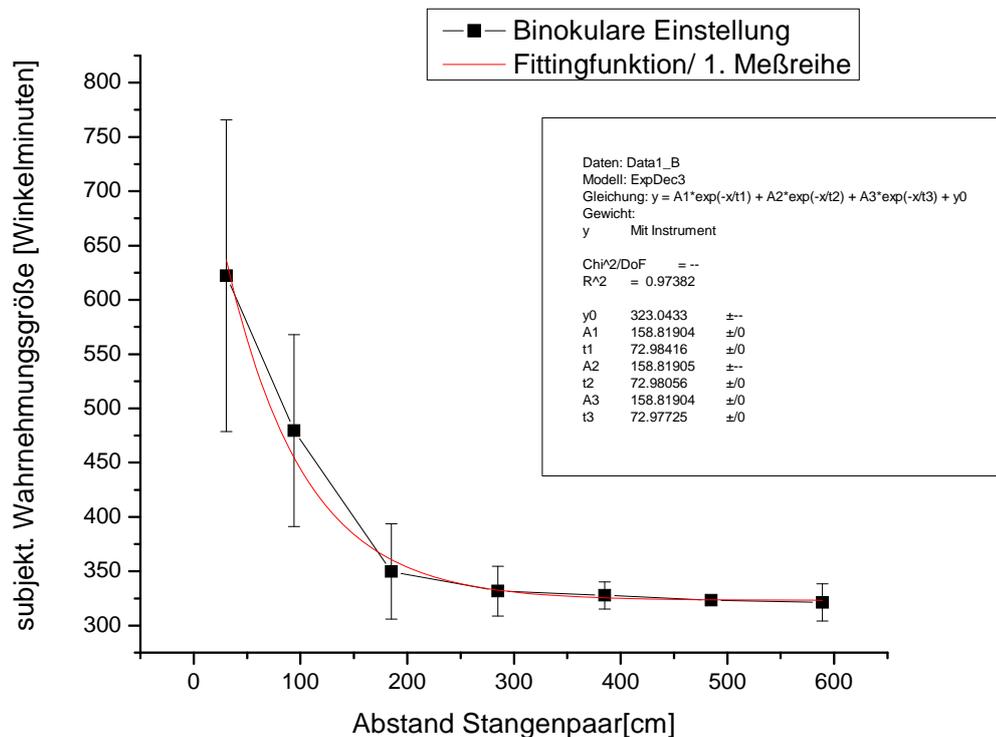


Abb.45: Graphische Auftragung der binokularen Einstellung.

Bei der binokularen Einstellung ist die Anpassung der Fitting-Funktion etwas weicher als bei Abb. 44. Die Erklärung erfolgt in der späteren Auswertung der Messdaten.

Die approximierte Exponentialfunktion 3. Ordnung lautet:

$$y = A_1 \exp(-x/t_1) + A_2 \exp(-x/t_2) + A_3 \exp(-x/t_3) + y_0$$

Sie hat für  $y_0$  den Wert: 323,04'

Die  $A_i$ 's lauten für die binokulare Einstellung der 1. Messreihe:

$$A_1: 158,82' \quad A_2: 158,82' \quad A_3: 158,82'$$

Die Gewichte  $t_i$  im Nenner des Exponenten lauten für die binnokulare Einstellung der 1. Messreihe:

$$t_1: 72,98 \quad t_2: 72,98 \quad t_3: 72,98$$

Die beiden nächsten graphischen Auftragungen, zeigen die Abweichung zwischen objektiver/ subjektiver Einstellung.

## - Abweichung zwischen objektiver/subjektiver Einstellung

**Monokular:**

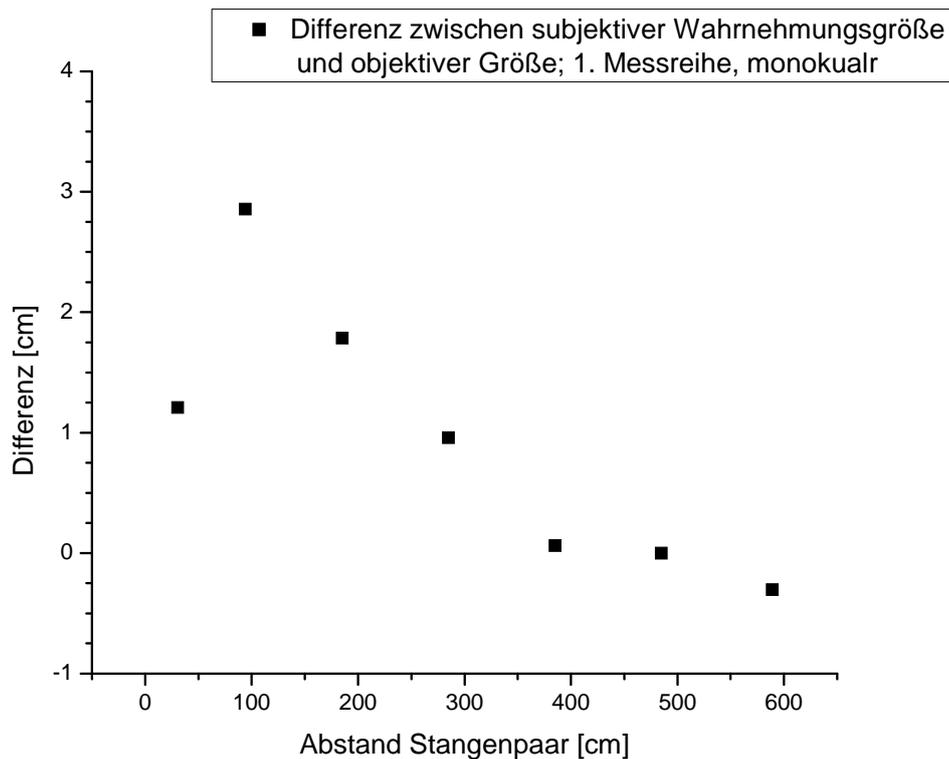


Abb.46: Graphische Darstellung der Abweichung subjektiv-objektiv.

Beim 2. Stangenpaar (=94cm), ist innerhalb dieser Messreihe, die maximalste Abweichung gegenüber einem konstanten Gesichtswinkel (=Zentralprojektion) abzulesen. Das lässt sich sehr gut mit dem orthostereoskopischen Bereich erklären. Innerhalb dieses Gebietes, existiert die maximalste Unabhängigkeit der subjektiven Wahrnehmungsgröße, gegenüber dem Gesichtswinkel.

Das 2. Stangenpaar sollte, wenn die am Anfang aufgestellte Arbeitshypothese sich bestätigt, in allen 4 Messreihen sowohl bei den monokularen, als auch bei den binokularen Einstellungen die größte Abweichung aufzeigen.

Für die ersten Betrachtungen, reichen erst mal die Differenzen des 1. und 2. Stangenpaares aus.

Sie lauten:

1. Stangenpaar (30,5cm): 1,21cm Abweichung bei einer objektiven Größe von: 2,86cm.
2. Stangenpaar (94cm): 2,855cm Abweichung bei einer objektiven Größe von: 8,84cm.

## Binokular:

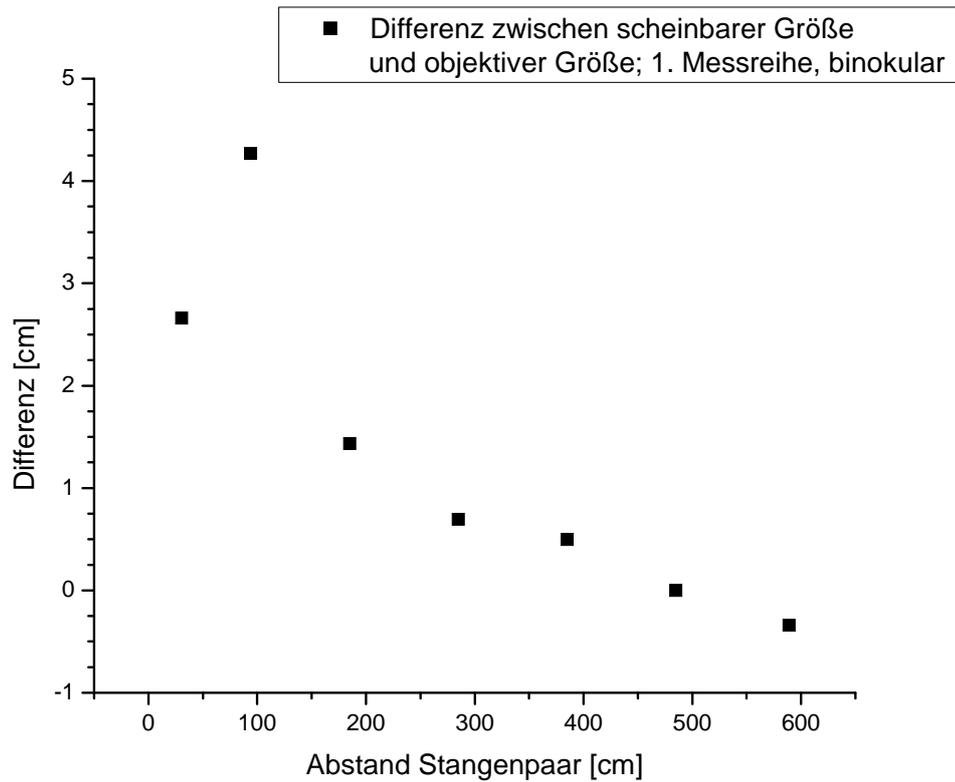


Abb.47: Graphische Darstellung der Abweichung subjektiv-objektiv.

Beim 2. Stangenpaar ist auch innerhalb dieser Messreihe, die maximalste Abweichung gegenüber einem konstanten Gesichtswinkel (=Zentralprojektion) abzulesen.

Die Differenzen des 1. und 2. Stangenpaares lauten:

1. Stangenpaar (30,5cm): 2,66cm Abweichung bei einer objektiven Größe von: 2,86cm.
2. Stangenpaar (94cm): 4,27cm Abweichung bei einer objektiven Größe von: 8,84cm.

## 2. Messreihe

### - Monokulare Einstellung

dargebotene Abstandsinformationen:

- Netzhautbild,
- Akkommodation.

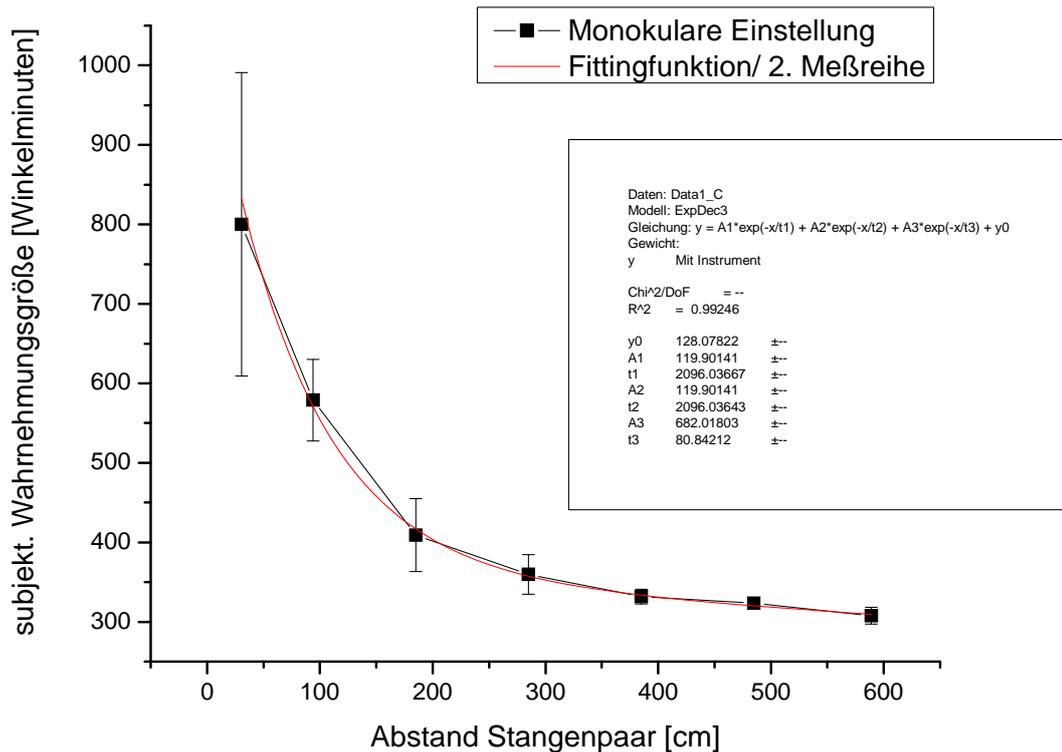


Abb.48: Graphische Auftragung der monokularen Einstellung.

Die approximierte Exponentialfunktion 3. Ordnung lautet wieder:

$$y = A_1 \exp(-x/t_1) + A_2 \exp(-x/t_2) + A_3 \exp(-x/t_3) + y_0$$

Sie hat für  $y_0$  den Wert: 128,08'

Die  $A_i$ 's lauten für die monokulare Einstellung der 2. Messreihe:

$$A_1: 119,9' \quad A_2: 119,9' \quad A_3: 682,02'$$

Die Gewichte  $t_i$  im Nenner des Exponenten, lauten für die monokulare Einstellung der 2. Messreihe:

$$t_1: 2096,04 \quad t_2: 2096,04 \quad t_3: 80,84$$

## - Binokulare Einstellung

dargebotene Abstandsinformationen:

- Netzhautbild,
- Akkommodation,
- Konvergenz beider Augen

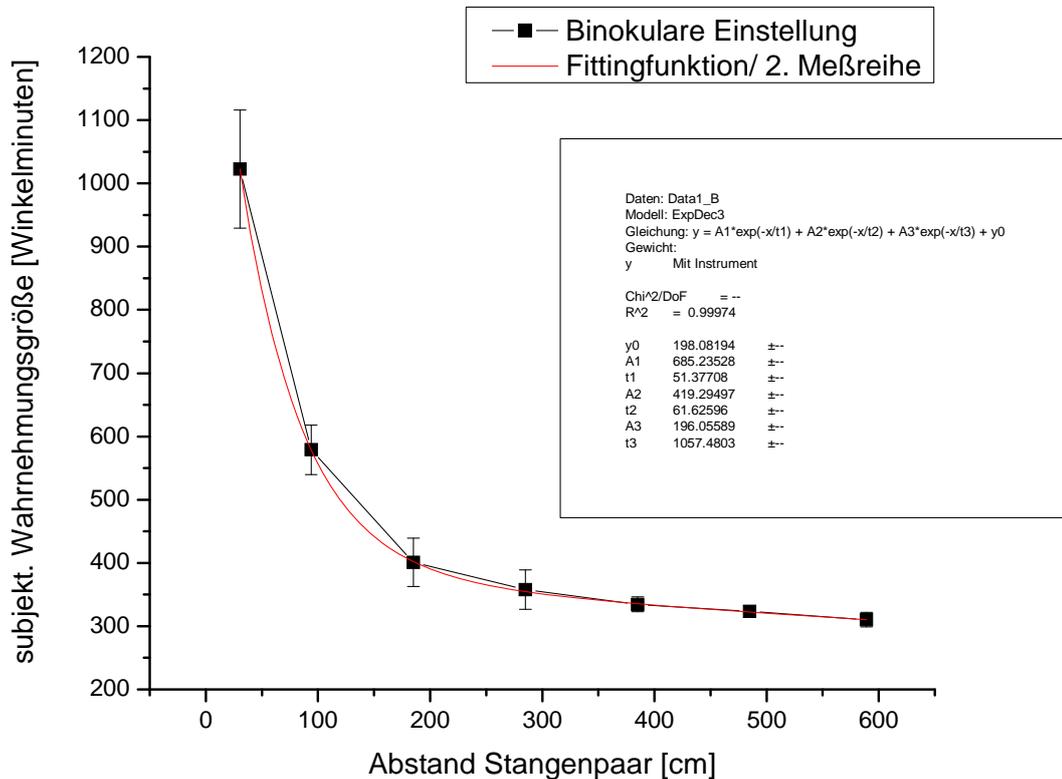


Abb.49: Graphische Auftragung der binokularen Einstellung.

Die approximierte Exponentialfunktion lautet:

$$y = A_1 \exp(-x/t_1) + A_2 \exp(-x/t_2) + A_3 \exp(-x/t_3) + y_0$$

Sie hat für  $y_0$  den Wert: 198,08'

Die  $A_i$ 's lauten für die binokulare Einstellung der 2. Messreihe:

$$A_1: 685,24' \quad A_2: 419,29' \quad A_3: 196,06'$$

Die Gewichte  $t_i$  im Nenner des Exponenten, lauten für die binokulare Einstellung der 2. Messreihe:

$$t_1: 51,38 \quad t_2: 61,63 \quad t_3: 1057,48$$

In beiden graphischen Darstellungen kann man jeweils eine Vergrößerung der subjektiven Wahrnehmungsgrößen gegenüber der 1. Messreihe gut ablesen. Dieser Unterschied kann nur durch die veränderte Darbietung der verwertbaren Abstandsinformationen begründet sein.

Die monokularen Einstellungen sind in den ersten 2 Messreihen immer kleiner als die der binokularen Konfigurationen.

## - Abweichung zwischen objektiver/subjektiver Einstellung

### Monokular:

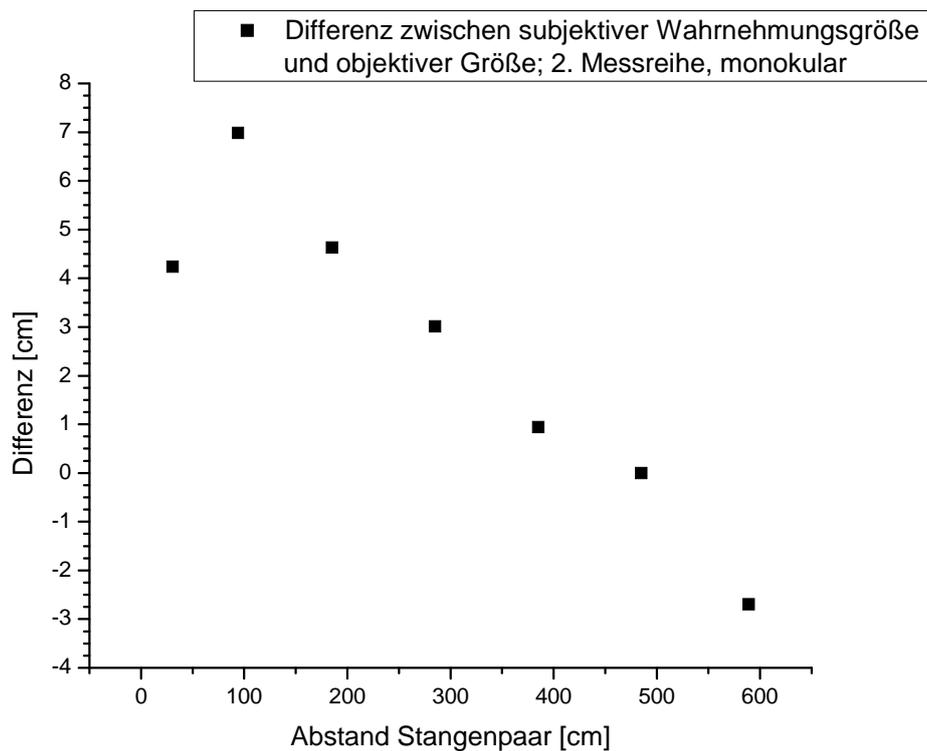


Abb.50: Graphische Darstellung der Abweichung subjektiv-objektiv.

Beim 2. Stangenpaar ist auch innerhalb dieser Messreihe wieder die maximalste Abweichung gegenüber einem konstanten Gesichtswinkel (= Zentralprojektion) abzulesen.

Die Differenzen des 1. und 2. Stangenpaares lauten:

1. Stangenpaar (30,5cm): 4,24cm Abweichung bei einer objektiven Größe von: 2,86cm.
2. Stangenpaar (94cm): 6,99cm Abweichung bei einer objektiven Größe von: 8,84cm.

Die Differenzen nehmen deutlich gegenüber der 1. Messreihe zu. Dies geschieht natürlich analog dem gleichen Verhalten wie beider Wahrnehmungsgröße.

## Binokular:

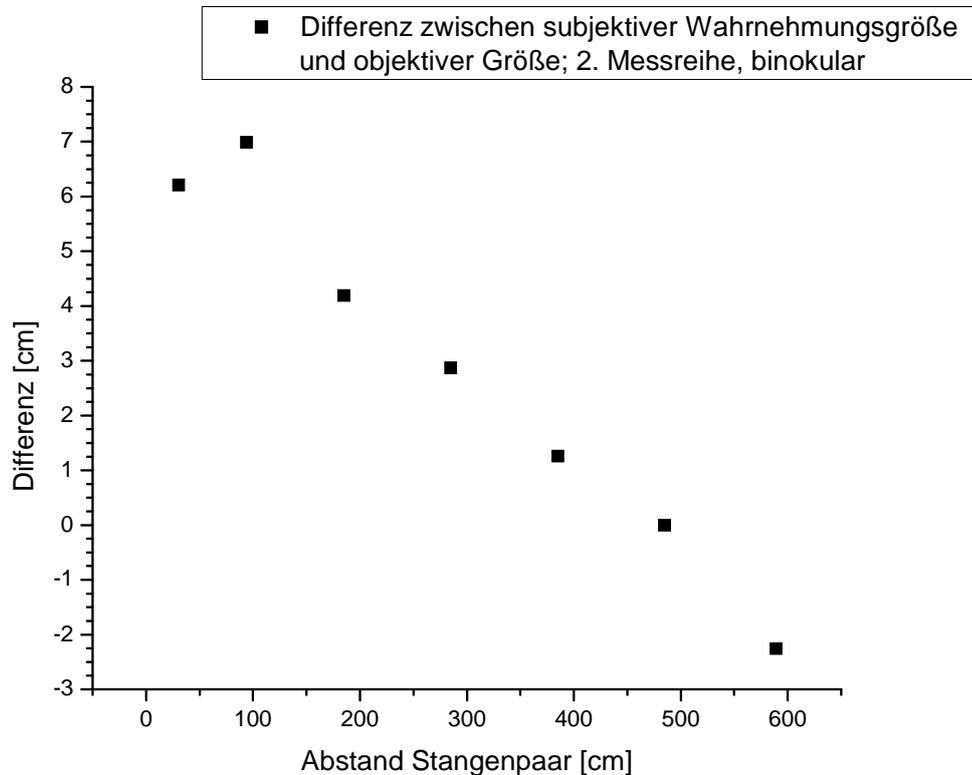


Abb.51: Graphische Darstellung der Abweichung subjektiv-objektiv.

Beim 2. Stangenpaar ist auch innerhalb dieser Messreihe, die maximalste Abweichung gegenüber einem konstanten Gesichtswinkel (= Zentralprojektion) abzulesen.

Die Differenzen des 1. und 2. Stangenpaares lauten:

1. Stangenpaar (30,5cm): 6,12cm Abweichung bei einer objektiven Größe von: 2,86cm.
2. Stangenpaar (94cm): 6,99cm Abweichung bei einer objektiven Größe von: 8,84cm.

In der binokularen Messreihe vollzieht sich das gleiche Verhalten wie es schon in der monokularen Messreihe beschrieben wurde.

Der Unterschied in den Differenzen subjektiv-objektiv, vergrößerte sich mit Zunahme der dargebotenen Abstandsinformationen.

### 3. Messreihe

#### - Monokulare Einstellung

dargebotene Abstandsinformationen:

- Netzhautbild,
- Akkommodation,
- Empirische Kriterien (ohne Bewegungsparallaxe)

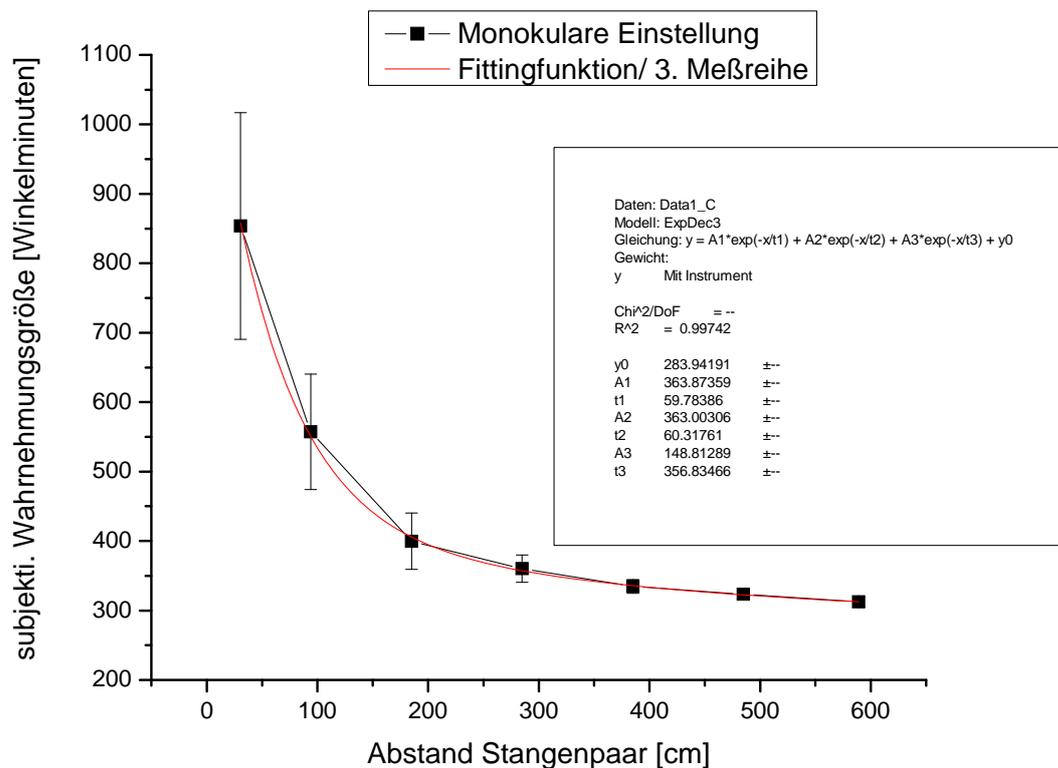


Abb.52.: Graphische Auftragung der binokularen Einstellung.

Die approximierte Exponentialfunktion 3. Ordnung lautet:

$$y = A_1 \exp(-x/t_1) + A_2 \exp(-x/t_2) + A_3 \exp(-x/t_3) + y_0$$

Sie hat für  $y_0$  den Wert: 283,94'

Die  $A_i$ 's lauten für die monokulare Einstellung der 3. Messreihe:

$$A_1: 363,87' \quad A_2: 363,00' \quad A_3: 148,81'$$

Die Gewichte  $t_i$  im Nenner des Exponenten, lauten für die monokulare Einstellung der 3. Messreihe:

$$t_1: 59,78 \quad t_2: 60,32 \quad t_3: 356,83$$

## - Binokulare Einstellung

dargebotene Abstandsinformationen:

- Netzhautbild,
- Akkommodation,
- Konvergenz beider Augen,
- Empirische Kriterien (ohne Bewegungsparallaxe)

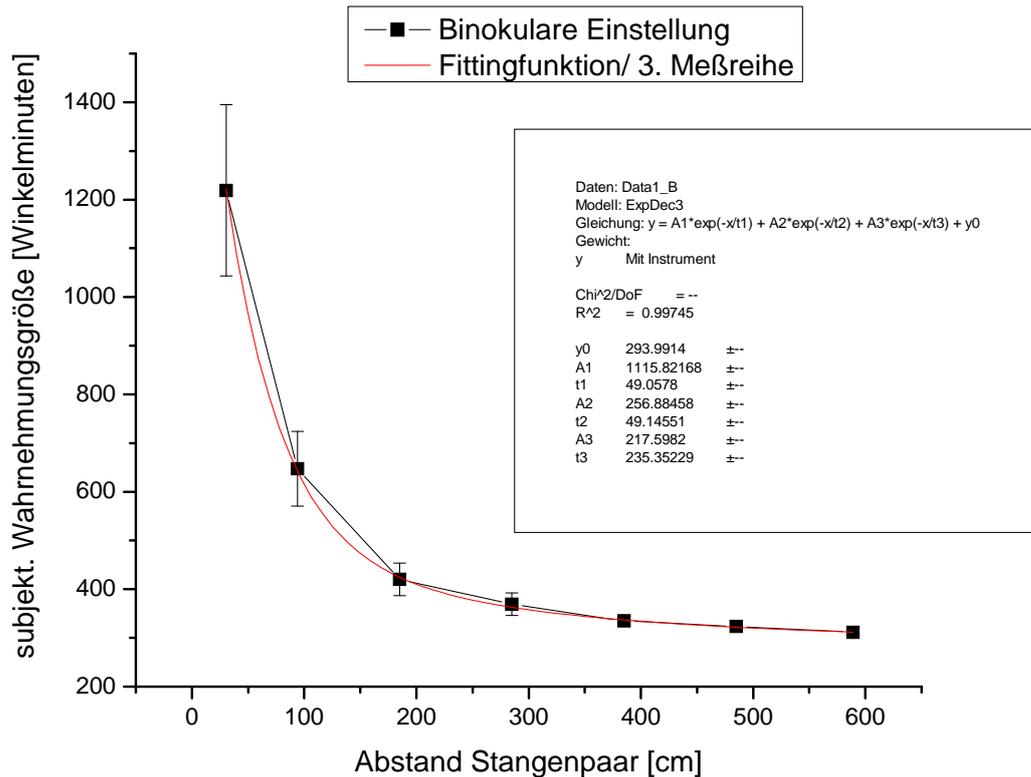


Abb.53: Graphische Auftragung der binokularen Einstellung.

Die approximierte Exponentialfunktion 3. Ordnung lautet auch hier wieder:

$$y = A_1 \exp(-x/t_1) + A_2 \exp(-x/t_2) + A_3 \exp(-x/t_3) + y_0$$

Sie hat für  $y_0$  den Wert: 293,99'

Die  $A_i$ 's lauten für die binokulare Einstellung der 3. Messreihe:

$$A_1: 1115,82' \quad A_2: 256,88' \quad A_3: 217,6'$$

Die Gewichte  $t_i$  im Nenner des Exponenten, lauten für die binokulare Einstellung der 3. Messreihe:

$$t_1: 49,06 \quad t_2: 49,15 \quad t_3: 235,35$$

Die subjektive Wahrnehmungsgröße vergrößert sich wieder in beiden Messreihen. Die Wahrnehmungsgröße ist in der binokularen Messreihe wieder größer als die der monokularen Messreihe.

## - Abweichung zwischen objektiver/subjektiver Einstellung

### Monokular:

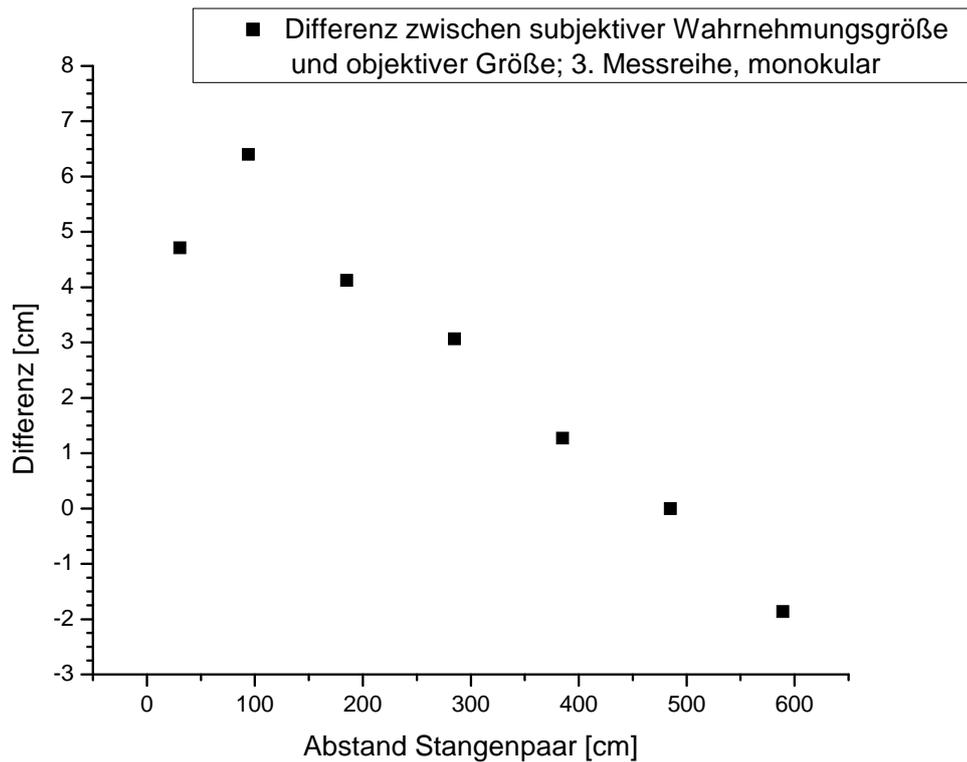


Abb.54: Graphische Darstellung der Abweichung subjektiv-objektiv.

Beim 2. Stangenpaar ist auch innerhalb dieser Messreihe, die maximalste Abweichung gegenüber einem konstanten Gesichtswinkel (= Zentralprojektion) abzulesen.

Die Differenzen des 1. und 2. Stangenpaares lauten:

1. Stangenpaar (30,5cm): 4,71cm Abweichung bei einer objektiven Größe von: 2,86cm.
2. Stangenpaar (94cm): 6,4cm Abweichung bei einer objektiven Größe von: 8,84cm.

## Binokular:

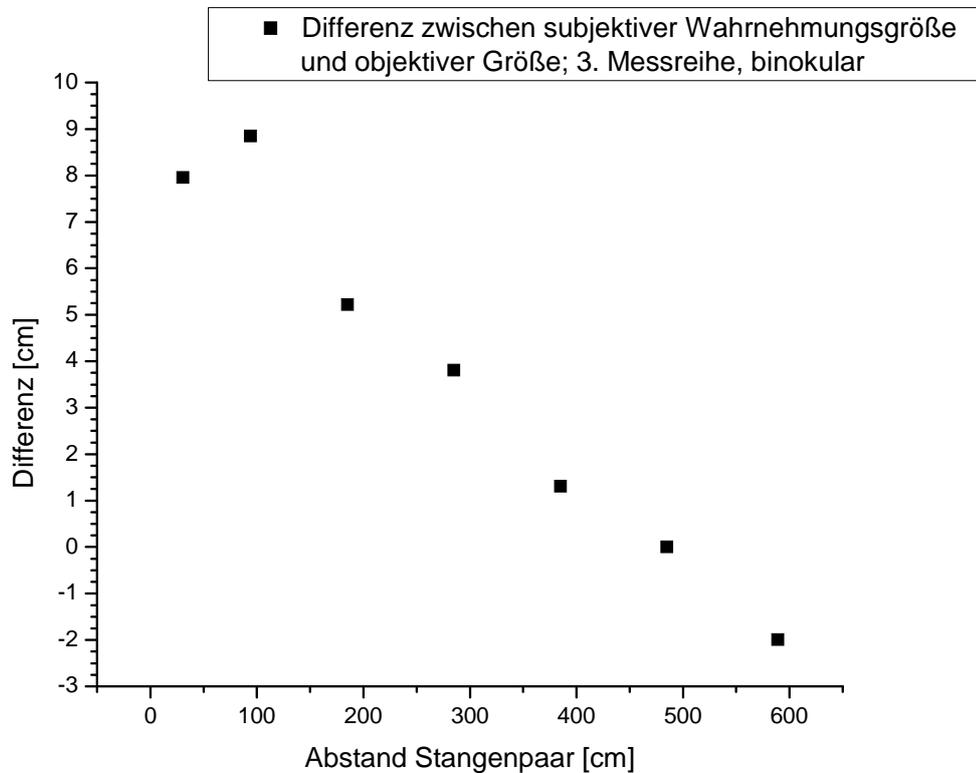


Abb.55: Graphische Darstellung der Abweichung subjektiv-objektiv.

Beim 2. Stangenpaar ist auch innerhalb dieser Messreihe, die maximalste Abweichung gegenüber einem konstanten Gesichtswinkel (= Zentralprojektion) abzulesen.

Die Differenzen des 1. und 2. Stangenpaares lauten:

1. Stangenpaar (30,5cm): 7,96cm Abweichung bei einer objektiven Größe von: 2,86cm.
2. Stangenpaar (94cm): 8,85cm Abweichung bei einer objektiven Größe von: 8,84cm.

In der 3. Messreihe haben sich die Differenzen gegenüber der 2. Messreihe wieder vergrößert. Der einzige Unterschied zwischen der 2. und 3. Messreihe liegt nur in der veränderten Darbietung der Abstandsinformationen. Die Differenz der binokularen Einstellung ist auch hier wieder größer als die der monokularen Einstellung.

## 4. Messreihe

### - Monokulare Einstellung

dargebotene Abstandsinformationen:

- Netzhautbild,
- Akkommodation,
- Empirische Kriterien (mit Bewegungsparallaxe)

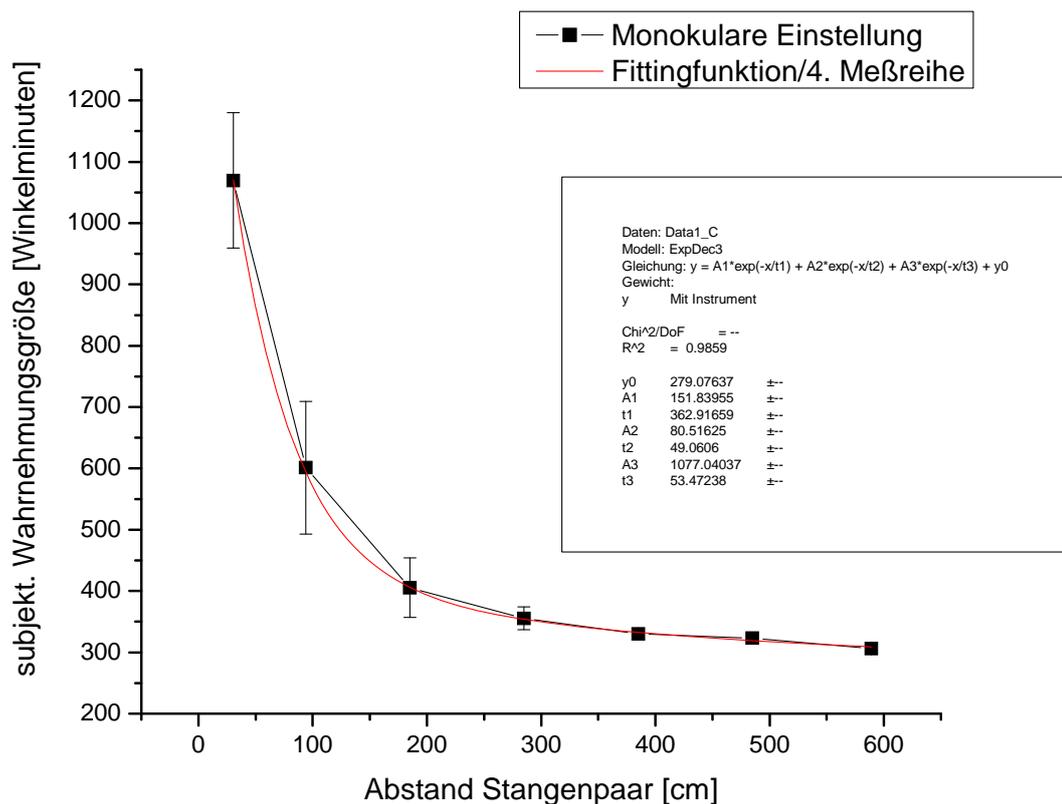


Abb.56: Graphische Auftragung der monokularen Einstellung.

Die approximierte Exponentialfunktion 3. Ordnung lautet:

$$y = A_1 \exp(-x/t_1) + A_2 \exp(-x/t_2) + A_3 \exp(-x/t_3) + y_0$$

Sie hat für  $y_0$  den Wert: 279,08'

Die  $A_i$  's lauten für die monokulare Einstellung der 4. Messreihe:

$$A_1: 151,84' \quad A_2: 80,52' \quad A_3: 1077,04'$$

Die Gewichte  $t_i$  im Nenner des Exponenten, lauten für die monokulare Einstellung der 4. Messreihe:

$$t_1: 382,92 \quad t_2: 49,06 \quad t_3: 53,47$$

## - Binokulare Einstellung

dargebotene Abstandsinformationen:

- Netzhautbild,
- Akkommodation,
- Konvergenz beider Augen,
- Empirische Kriterien (mit Bewegungsparallaxe)

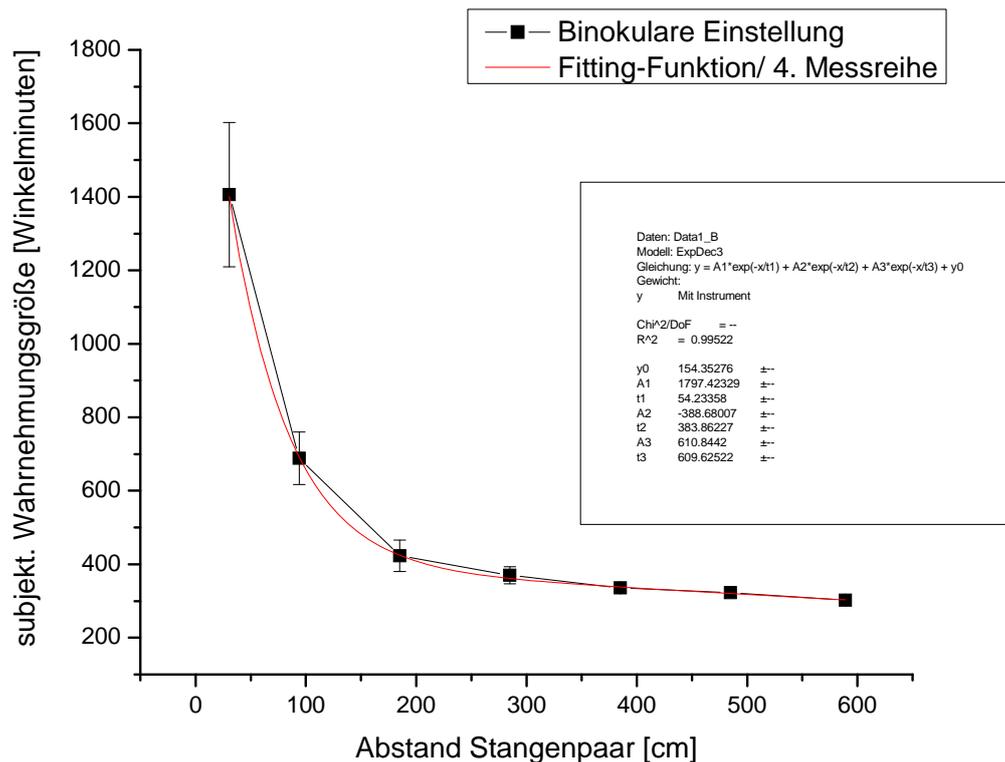


Abb.57: Graphische Auftragung der binokularen Einstellung.

Die approximierte Exponentialfunktion 3. Ordnung lautet:

$$y = A_1 \exp(-x/t_1) + A_2 \exp(-x/t_2) + A_3 \exp(-x/t_3) + y_0$$

Sie hat für  $y_0$  den Wert: 154,35'

Die  $A_i$  's lauten für die binokulare Einstellung der 4. Messreihe:

$$A_1: 1797,42' \quad A_2: -388,68' \quad A_3: 610,84'$$

Die Gewichte  $t_i$  im Nenner des Exponenten, lauten für die binokulare Einstellung der 4. Messreihe:

$$t_1: 54,23 \quad t_2: 383,86 \quad t_3: 609,63$$

Die subjektiven Wahrnehmungsgrößen sind in der 4. Messreihe am Größten. In dieser Messreihe waren die maximalsten Abstandsinformationen dargeboten. Auch ist hier wieder

die Wahrnehmungsgröße der binokularen Messreihe größer als die der monokularen. Die subjektive Wahrnehmungsgröße ist von der Abstandsinformation direkt abhängig. Dies soll hier aber nicht weiter diskutiert werden.

## - Abweichung zwischen objektiver/subjektiver Einstellung

### Monokular:

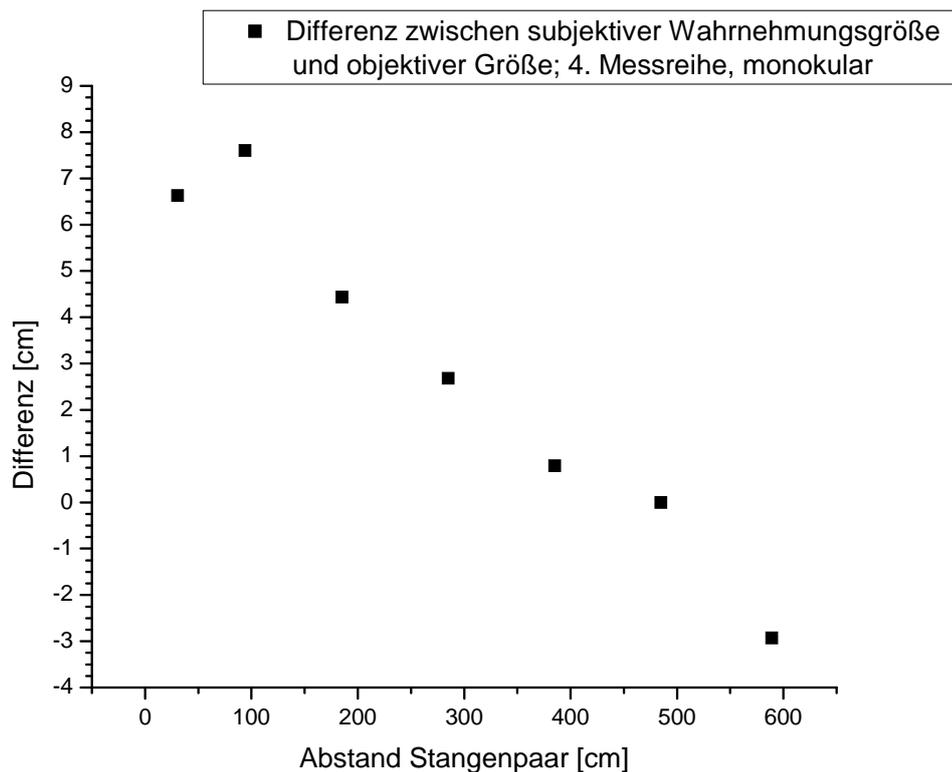


Abb.58: Graphische Darstellung der Abweichung subjektiv-objektiv.

Beim 2. Stangenpaar ist auch innerhalb dieser Messreihe, die maximalste Abweichung gegenüber einem konstanten Gesichtswinkel (= Zentralprojektion) abzulesen.

Die Differenzen des 1. und 2. Stangenpaares lauten:

1. Stangenpaar (30,5cm): 6,63cm Abweichung bei einer objektiven Größe von: 2,86cm.
2. Stangenpaar (94cm): 7,6cm Abweichung bei einer objektiven Größe von: 8,84cm

## Binokular:

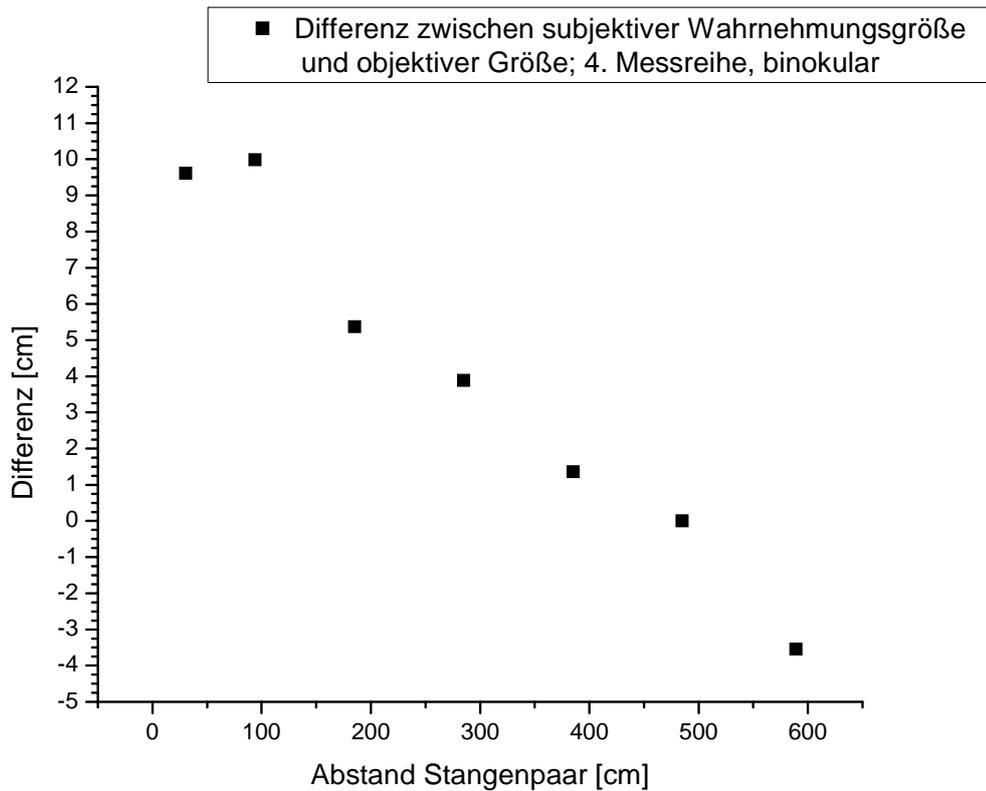


Abb.59: Graphische Darstellung der Abweichung subjektiv-objektiv.

Beim 2. Stangenpaar ist auch innerhalb dieser Messreihe, die maximalste Abweichung gegenüber einem konstanten Gesichtswinkel (= Zentralprojektion) abzulesen.

Die Differenzen des 1. und 2. Stangenpaares lauten:

1. Stangenpaar (30,5cm): 9,6cm Abweichung bei einer objektiven Größe von: 2,86cm.
2. Stangenpaar (94cm): 9,98cm Abweichung bei einer objektiven Größe von: 8,84cm

Die aufgetragenen Differenzen der 4. Messreihe, stellen die größten Abweichungen der gesamten 1. Versuchsreihe dar. Dies gilt für beide Messreihen. Dies verhält sich natürlich analog zur Entwicklung der subjektiven Wahrnehmungsgröße.

### 3.2.1.1 Gegenüberstellungen der graphischen Auftragungen aus der Versuchsreihe I

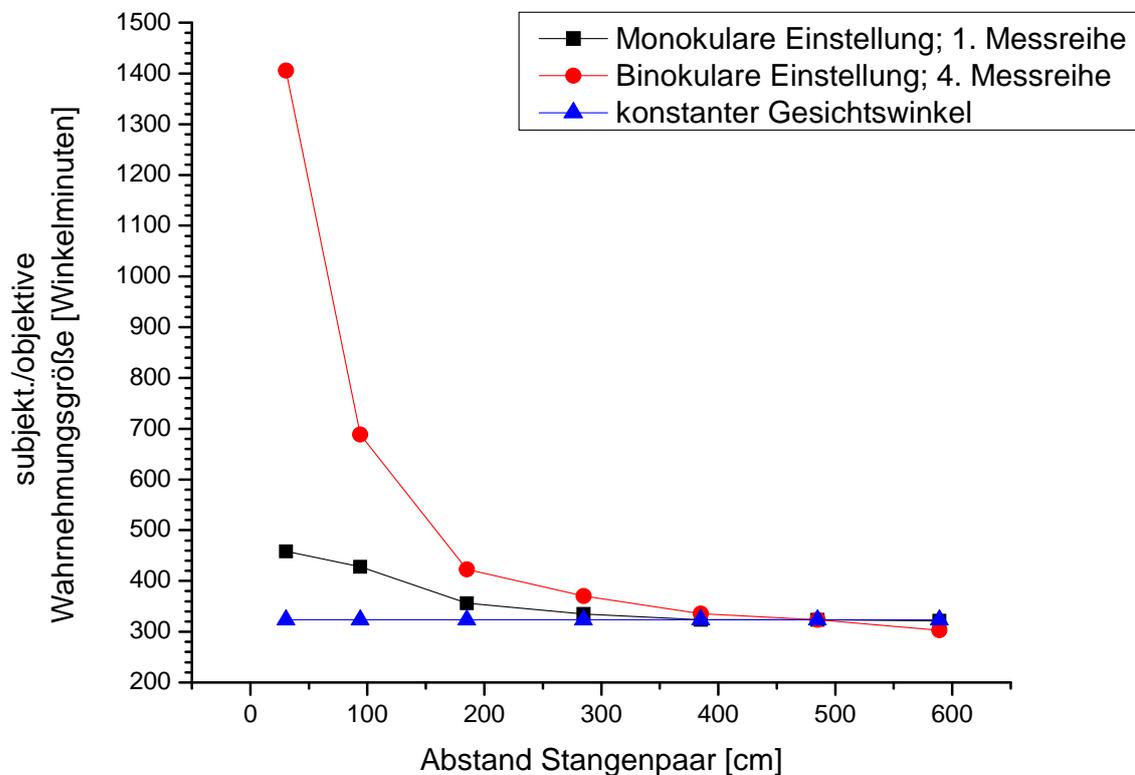


Abb. 60: Vergleich zweier Einstellungen mit der Zentralprojektion.

Der Unterschied der subjektiven Wahrnehmungsgröße ist nur durch die unterschiedliche Darbietung der verwertbaren Abstandsinformationen gegeben. Diese Tatsache bedingt einen Unterschied der eingestellten Größe, von maximal 3x in nächster Nähe (30,5cm). Gegenüber der objektiven Größe beträgt der maximale Unterschied 4x in nächster Nähe.

### 3.2.1.2 Graphische Darstellung der Differenz objektive/subjektive Einstellung bei konstantem Abstand und Variation der Abstandsinformation

Die folgenden Graphen, zeigen die Zunahme der Differenzen objektiv/subjektiv, innerhalb einer konstanten Prüferentfernung durch das sukzessive Ansteigen der Abstandsinformationen. Umso mehr Abstandsinformationen vorliegen, desto größer werden auch die Abweichungen der subjektiv eingestellten Größe, gegenüber der objektiven Größe. In dieser Darstellung wurden auch wieder die jeweiligen Mittelwerte herangezogen.

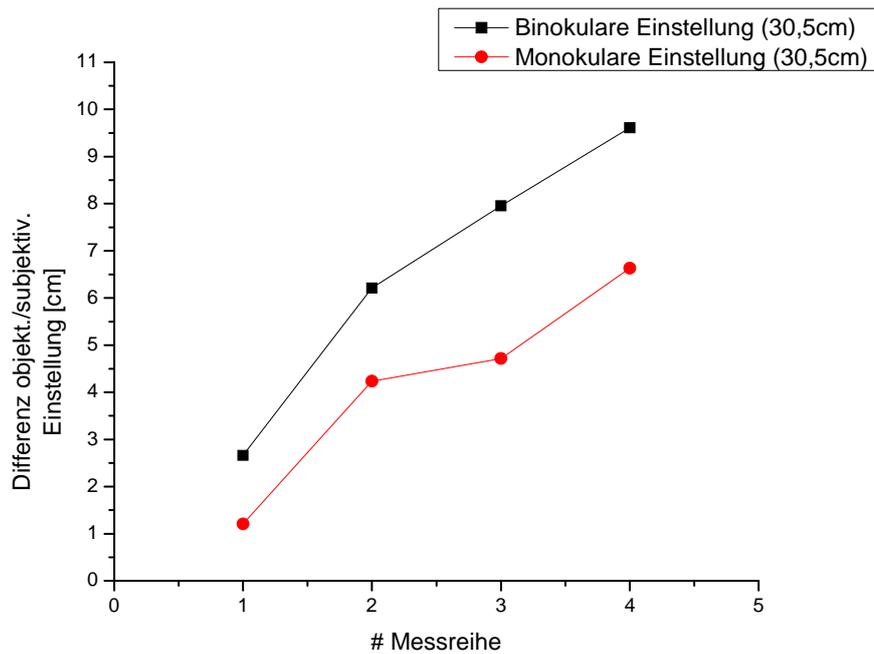


Abb.61: Graphische Darstellung der Abweichung bei einem Abstand von 30,5 cm.

Das erste Stangenpaar (30,5cm), erfährt eine umso größere Abweichung, desto mehr Abstandskriterien zugelassen werden. Der Anstieg ist bei der monokularen und binokularen Versuchsreihe sehr ähnlich. Die maximale Differenz ergibt sich, wie zu erwarten war, in der 4. Messreihe und hier innerhalb der binokularen Versuchsreihe.

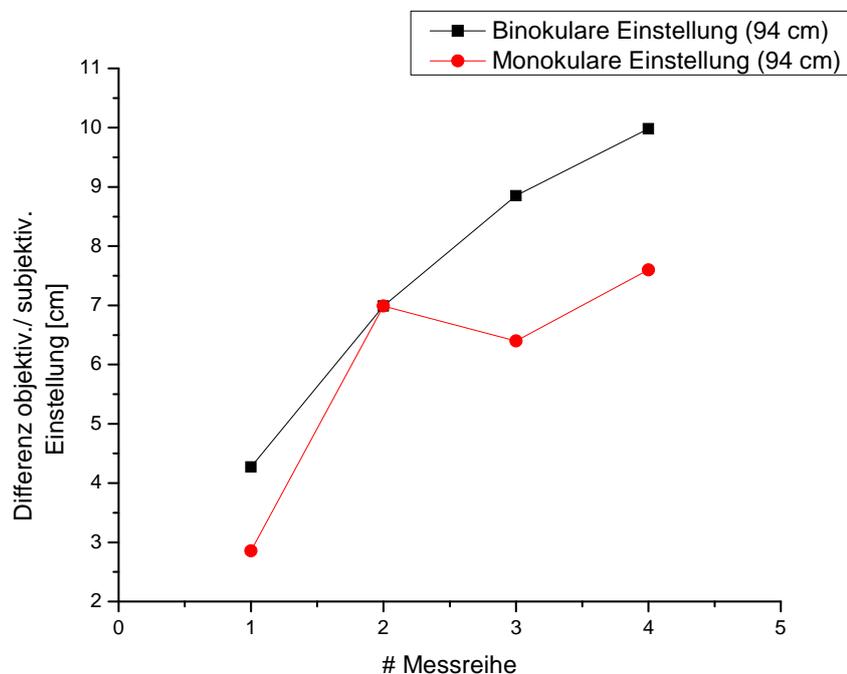


Abb.62: Graphische Darstellung der Abweichung bei einem Anstand von 94 cm.

Die Differenzen, in der binokularen Versuchsreihe, werden auch hier umso größer, desto mehr Entfernungskriterien zugelassen werden. Der Anstieg ist nahezu linear. Bei der

monokularen Versuchsreihe stellt sich ab der 2. Messreihe ein Sättigungsbereich ein, so dass die Differenzen nahezu konstant anzusehen sind.

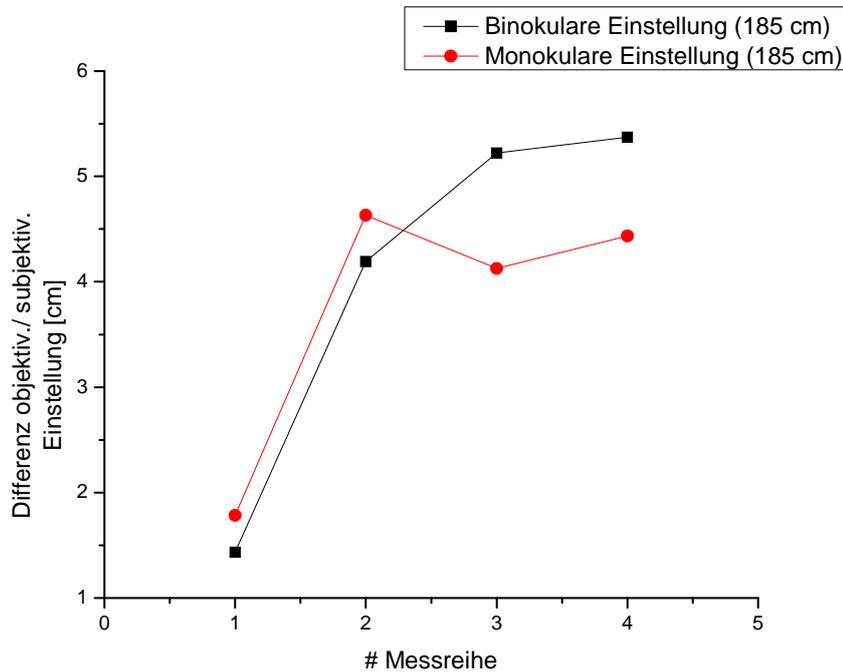


Abb.63: Graphische Darstellung der Abweichung bei einem Anstand von 185 cm.

Auch hier nimmt die Differenz erst rasant zu. Ab der 2. Messreihe ergibt die zusätzliche Darbietung von Entfernungskriterien, keine merklichen Abweichungen mehr. Zusätzlich stellt sich in der binokularen Versuchsreihe, auch ein Sättigungswert ein.

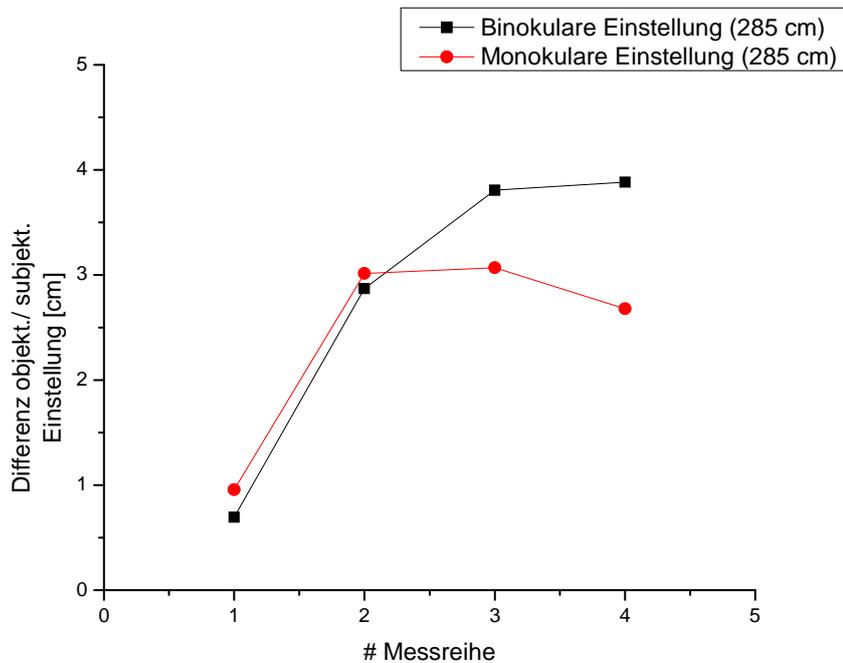


Abb.64: Graphische Darstellung der Abweichung bei einem Anstand von 285 cm.

Qualitativ ergibt diese Auftragung, eine Interpretation wie beim Abstand 185cm. Allerdings kann man hier erkennen, dass die Abweichungen für sich genommen, etwas geringer, als in der vorherigen Abb. sind.

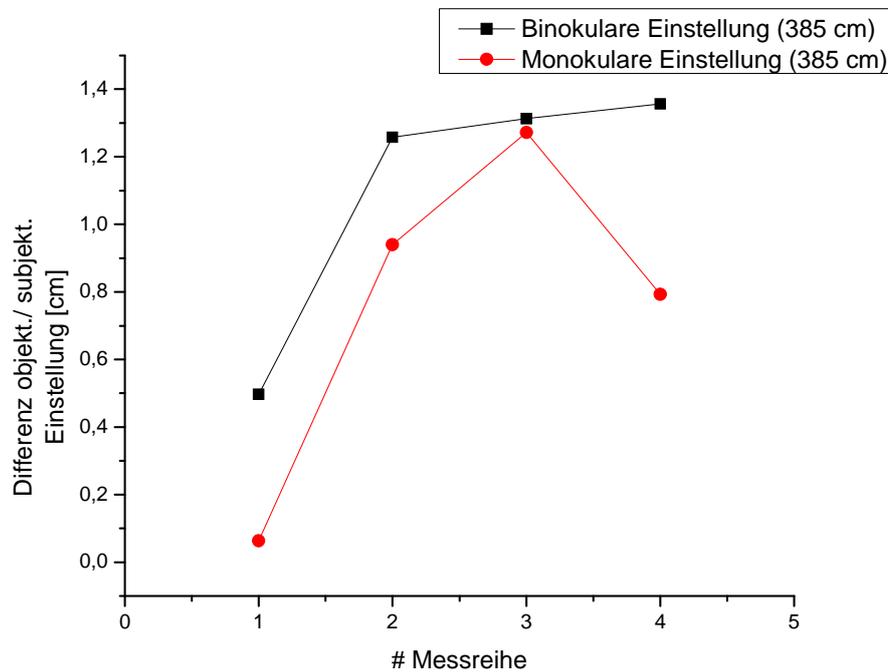


Abb.65: Graphische Darstellung der Abweichung bei einem Anstand von 385 cm.

Qualitativ ergibt diese Auftragung, eine Interpretation wie beim Abstand 285cm. Man kann hier gut ablesen, dass die Abweichungen für sich genommen, noch mehr abnehmen. Das bedeutet, umso weiter die Entfernung des einzustellenden Stangenpaares ist, desto geringer werden wiederum die Differenzen objektiv/subjektive Einstellung.

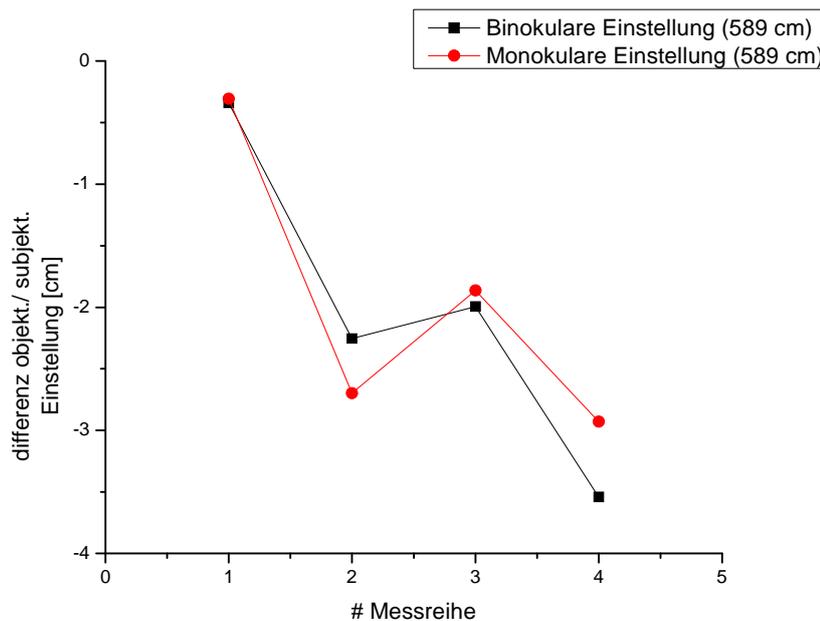


Abb.66: Graphische Darstellung der Abweichung bei einem Anstand von 589 cm.

Hier tritt das erste Mal eine Umkehrung auf. Der Anstieg ist von der 1. Messreihe zur 2. Messreihe abfallend. In der 1. Messreihe ist die Differenz nahezu null, was vermuten lässt, dass es sich hier mehr oder weniger um reines Schwindelsehen (lineare Näherung) handelt. Bei Diskussion der Messdaten wird hierauf nochmals eingegangen.

### 3.2.2 Versuchsreihe II

#### - Unterschiedsschwelle in der Abstandseinschätzung

Für die graphische Auswertung der Versuchsreihe II wurden die erhaltenen Messwerte und die dazugehörigen Abstände mit dem 10er Log modifiziert. Dies ergab jeweils Kurvenverläufe ohne Sättigungsbereiche. Dies ermöglichte eine lineare Anpassung der Messdaten. Der Anstieg der linearen Fitfunktion, in Abhängigkeit von den zugelassenen Abstandsinformationen, wird später erläutert.

#### 1. Messreihe

##### - Monokulare Einstellung

dargebotene Abstandsinformationen:

- Netzhautbild,
- Psychologisches Gefühl der Nähe

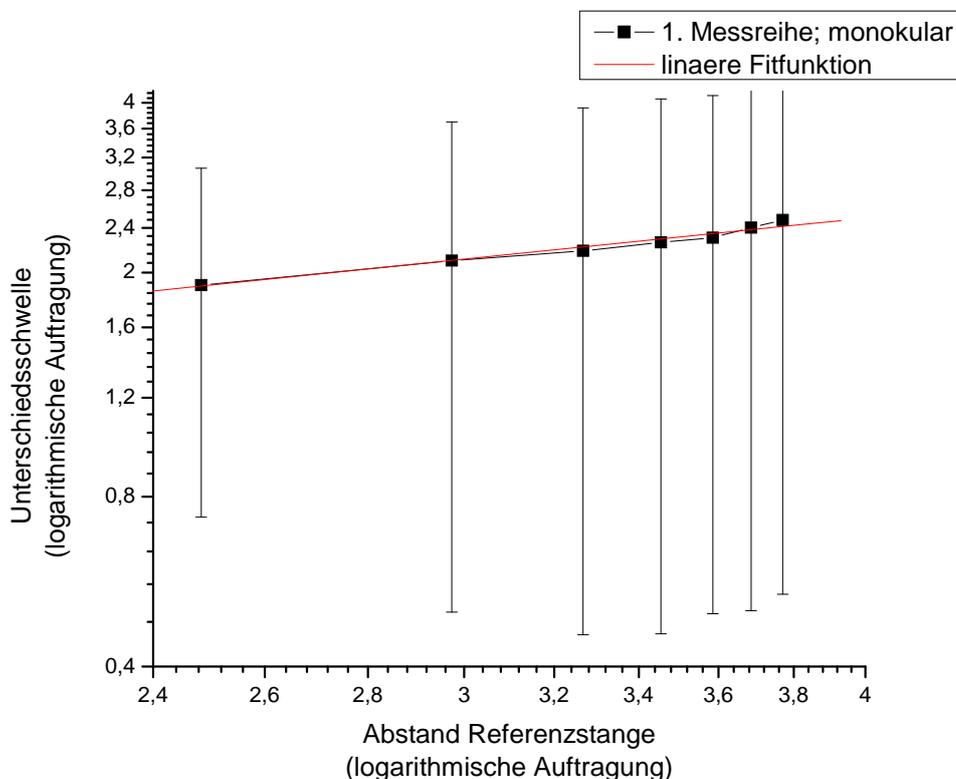


Abb. 67: Graphische Darstellung der monokularen Einstellungen.

Für die lineare Fitfunktion  $y = A + B \cdot x$  ergeben sich folgende Werte:

Parameter  $A = 0,04669$

$B = 0,58286$

### - Binokulare Einstellung

dargebotene Abstandsinformationen:

- Netzhautbild,
- Psychologisches Gefühl der Nähe,
- Konvergenz beider Augen.

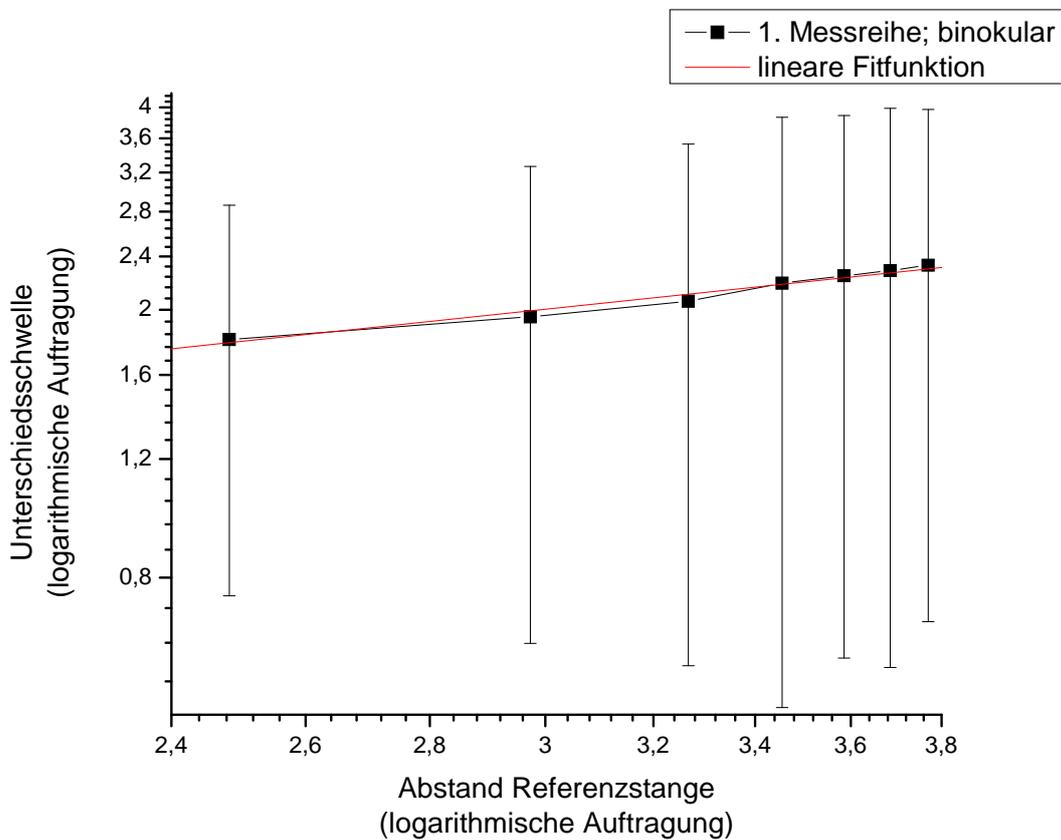


Abb.68: Graphische Darstellung der binokularen Einstellungen.

Für die lineare Fitfunktion  $y = A + B \cdot x$  ergeben sich folgende Werte:

Parameter  $A = 0,01278$

$B = 0,60582$

## 2. Messreihe

### - Monokulare Einstellung

dargebotene Abstandsinformationen:

- Netzhautbild,
- Akkommodation.

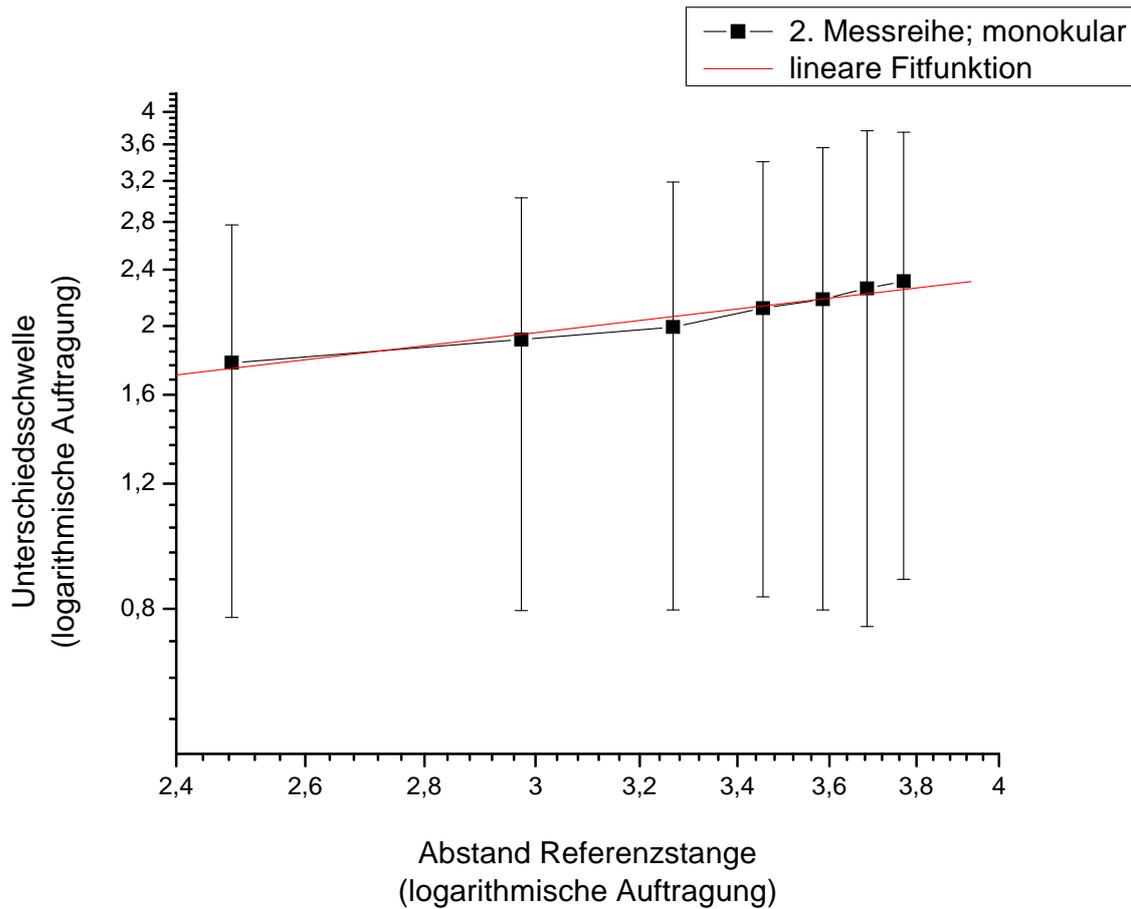


Abb.69: Graphische Darstellung der monokularen Einstellungen.

Für die lineare Fitfunktion  $y = A + B \cdot x$  ergeben sich folgende Werte:

$$\begin{aligned} \text{Parameter } A &= -8,7522 \text{ E} - 4 \\ B &= 0,61264 \end{aligned}$$

## - Binokulare Einstellung

dargebotene Abstandsinformationen:

- Netzhautbild,
- Akkommodation,
- Konvergenz beider Augen

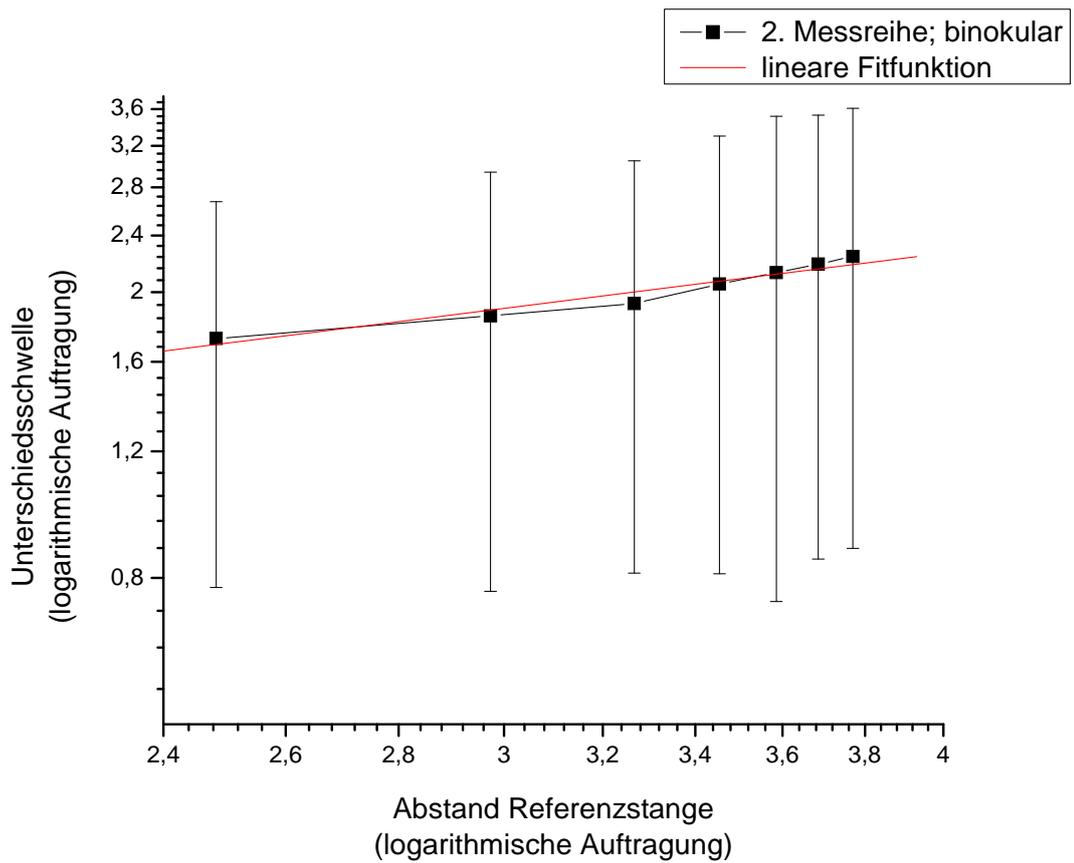


Abb.70: Graphische Darstellung der binokularen Einstellungen.

Für die lineare Fitfunktion  $y = A + B \cdot x$  ergeben sich folgende Werte:

Parameter A = - 0,01527

B = 0,61588

### 3. Messreihe

#### - Monokulare Einstellung

dargebotene Abstandsdimensionen:

- Netzhautbild,
- Akkommodation,
- Empirische Kriterien (ohne Bewegungsparallaxe)

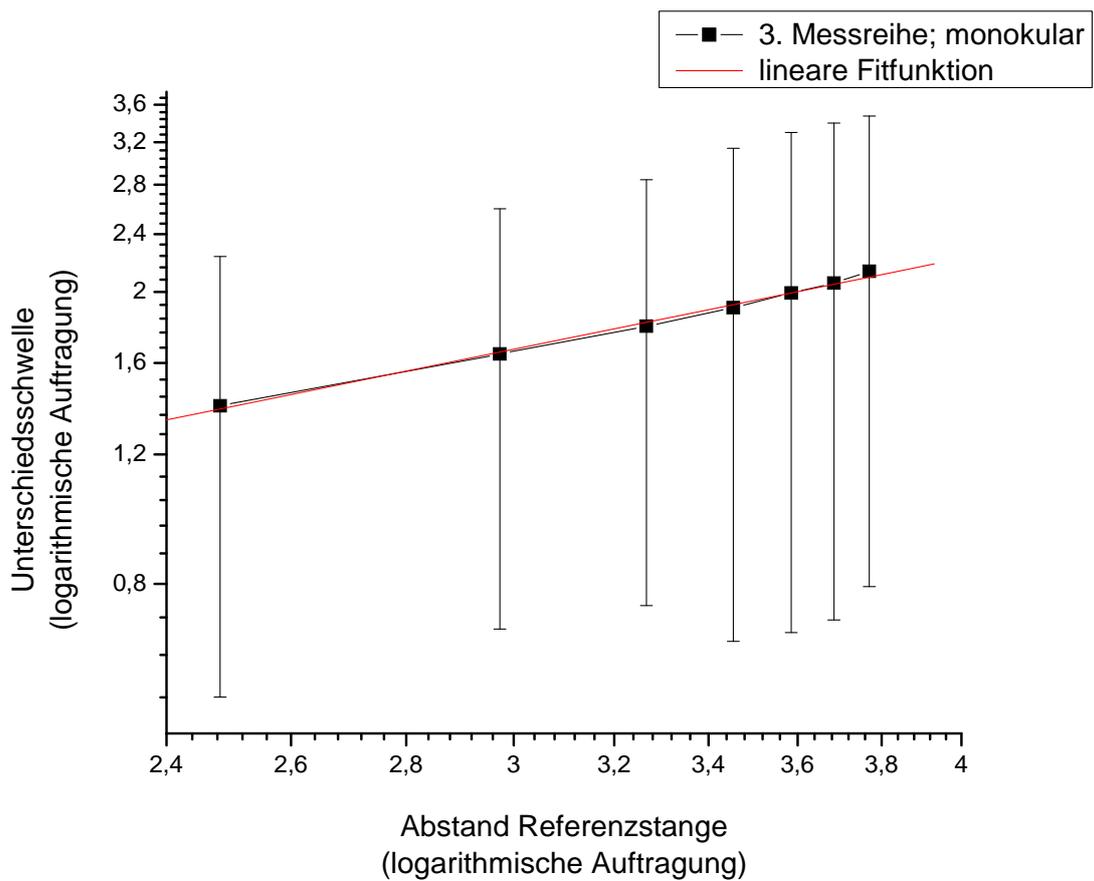


Abb.71: Graphische Darstellung der monokularen Einstellungen.

Für die lineare Fitfunktion  $y = A + B \cdot x$  ergeben sich folgende Werte:

Parameter A = - 0,25121

B = 0,9936

## - Binokulare Einstellung

dargebotene Abstandsinformationen:

- Netzhautbild,
- Akkommodation,
- Konvergenz beider Augen,
- Empirische Kriterien (ohne Bewegungsparallaxe)

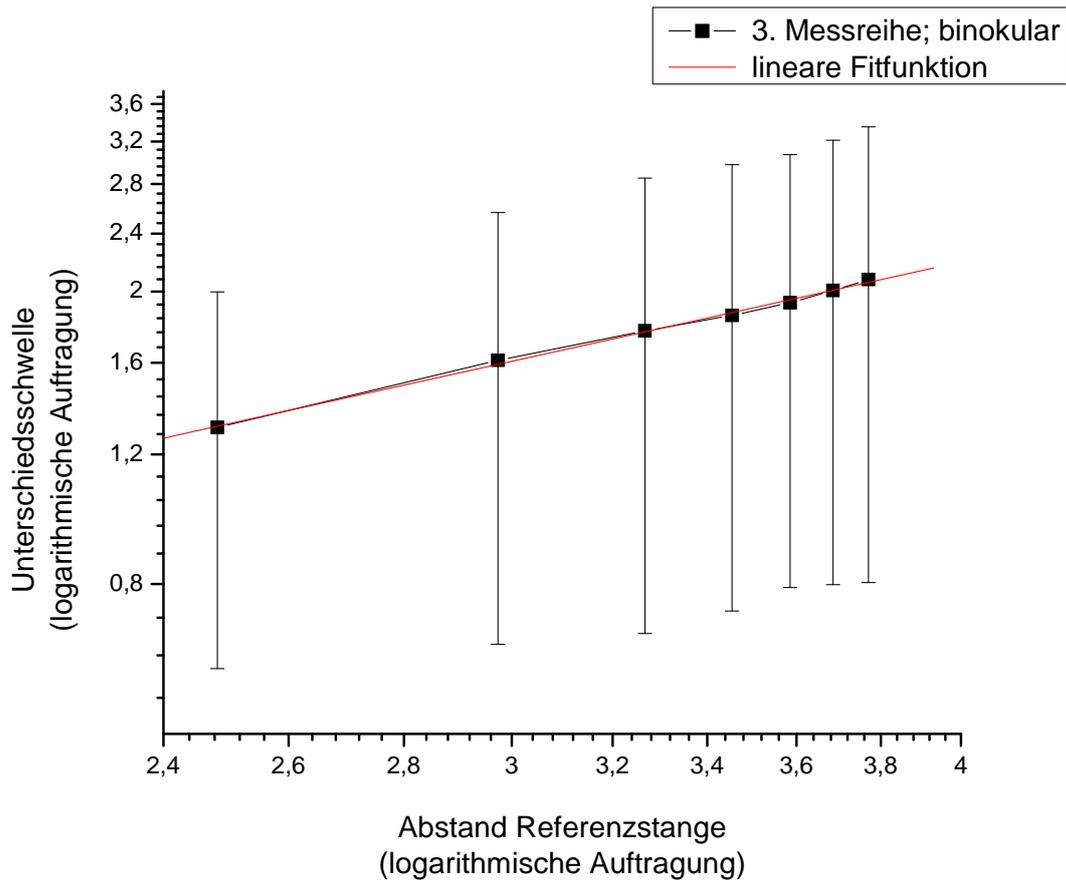


Abb.72: Graphische Auftragung der monokularen Einstellungen.

Für die lineare Fitfunktion  $y = A + B \cdot x$  ergeben sich folgende Werte:

Parameter A = - 0,30961

B = 1,08113

## 4. Messreihe

### - Monokulare Einstellung

dargebotene Abstandsinformationen:

- Netzhautbild,
- Akkommodation,
- Empirische Kriterien (mit Bewegungsparallaxe)

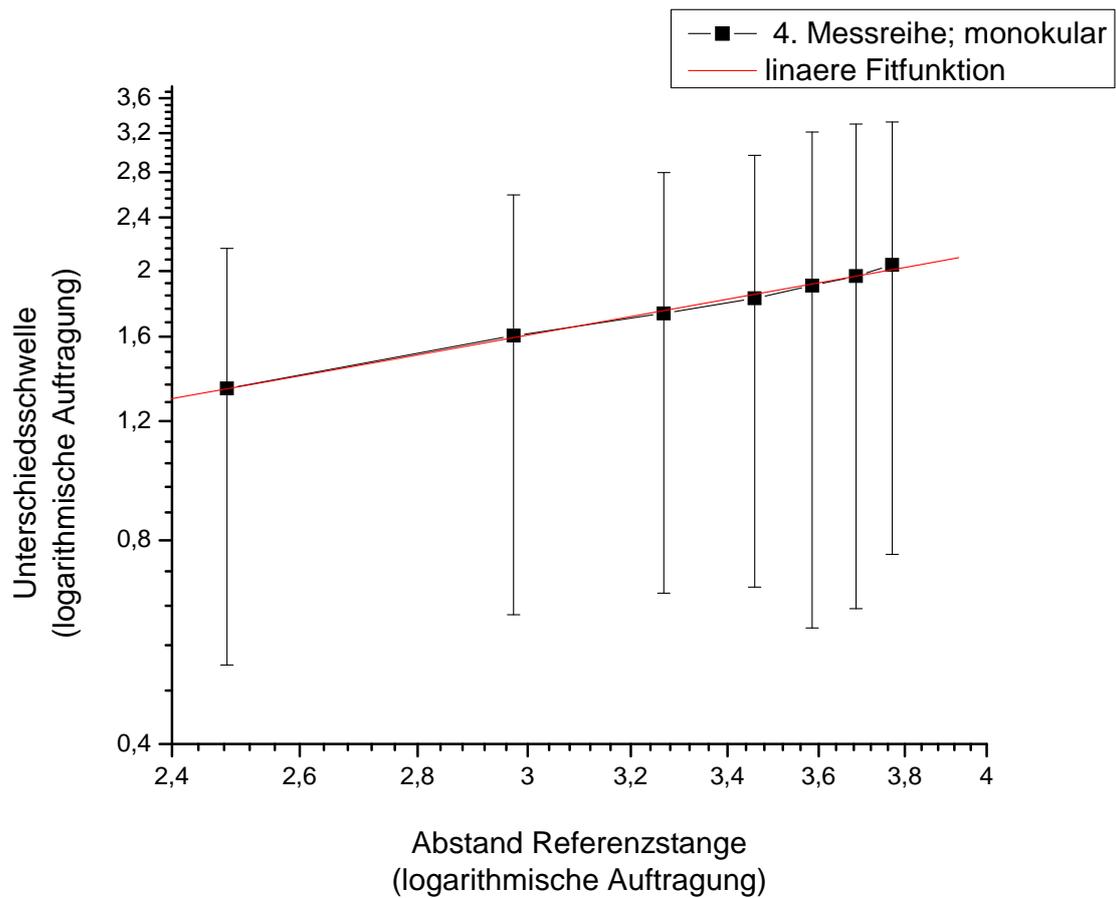


Abb.73: Graphische Auftragung der monokularen Einstellungen.

Für die lineare Fitfunktion  $y = A + B \cdot x$  ergeben sich folgende Werte:

Parameter A = - 0,25719

B = 0,97194

## - Binokulare Einstellung

dargebotene Abstandsinformationen:

- Netzhautbild,
- Akkommodation,
- Konvergenz beider Augen,
- Empirische Kriterien (mit Bewegungsparallaxe)

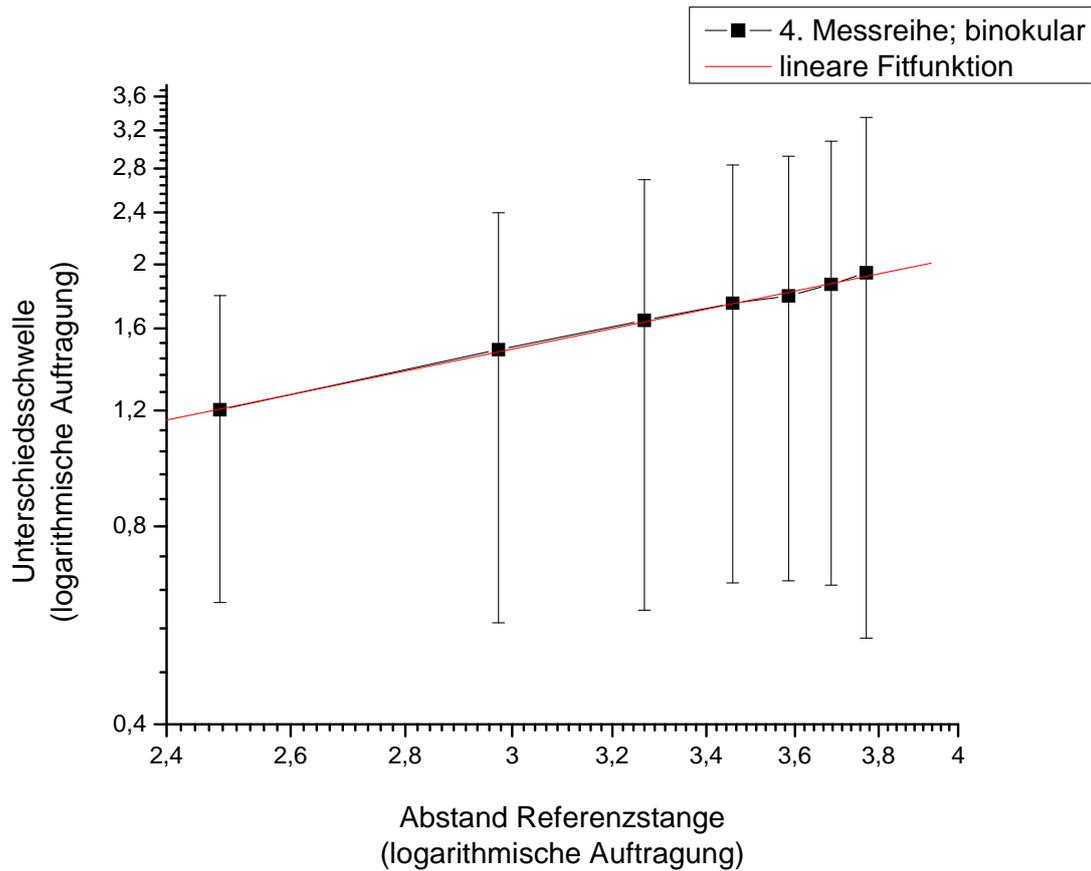


Abb.74: Graphische Darstellung der binokularen Einstellungen.

Für die lineare Fitfunktion  $y = A + B \cdot x$  ergeben sich folgende Werte:

Parameter  $A = - 0,35908$

$B = 1,11455$

In der folgenden Abbildung wird die Unterschiedsschwelle der 1. Messreihe (monokular) und der 4. Messreihe (binokular) verglichen.

Der Vergleich ist deshalb interessant, weil hier die zugelassenen Abstandsinformationen am Weitesten auseinander liegen. Der rote Kurvenverlauf entspricht dem minimalen und der schwarze Kurvenverlauf dem maximalen Abstandsinformationsgrad.

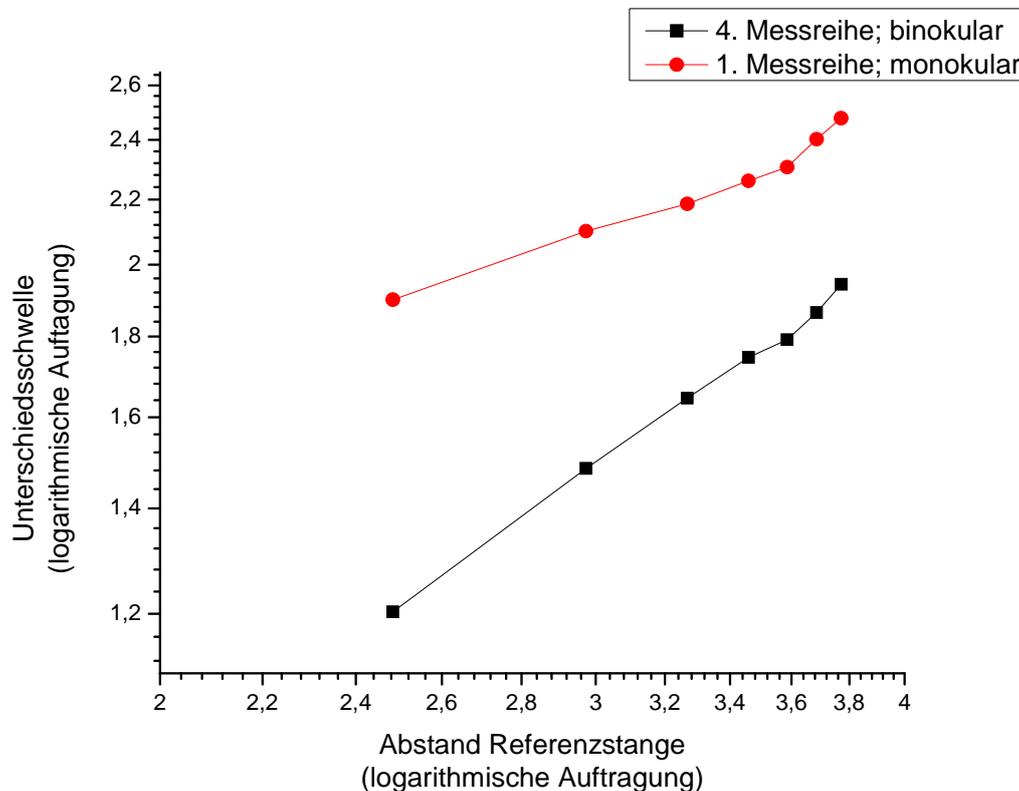


Abb.75: Gegenüberstellung: 1. Messreihe (monokular, rot) und der 2. Messreihe (binokular, schwarz).

Vergleicht man die schwarzen Messpunkte mit den roten, so erkennt man einen deutlich steileren Kurvenanstieg der schwarzen Auftragung gegenüber der roten.

Für den Anstieg B der linearen Fitfunktion ergibt sich:

- rote Messpunkte: 0,58286
- schwarze Messpunkte: 1,11455

Der Unterschied der beiden Steigungen B entspricht in etwa dem Faktor 1,91. Vergleicht man die Steigungen aller Messreihen untereinander, so ergibt sich in der binokularen Einstellung immer ein steilerer Anstieg als in der monokularen. Im Falle der binokularen Auftragung ergibt sich ein progressiver Anstieg der Steigung B der linearen Fitfunktion.

In der monokularen Einstellung ist der Anstieg der Steigung B dagegen flach. Dort sind die Werte der Steigung B in der 3. und 4. Messreihe umgekehrt. In der nachfolgenden Tabelle 1 sind alle Werte eingetragen.

**Tabelle1:**

# Messreihe	Monokular/ Anstieg B	Binokular/ Anstieg B
1	0,58286	0,60582
2	0,61264	0,61588
3	0,9936	1,08113
4	0,97194	1,11455

### 3.3 Auswertung und Aufbereitung der Messdaten

#### 3.3.1 Auswertungen der Versuchsreihe I:

Dass die Abstandsinformationsdichte (*AID*) und deren qualitative Güte unmittelbar die subjektive visuelle Wahrnehmungsgröße beeinflussen, konnte in den 8 Messreihe im Bereich 30,5cm bis 385cm gut gezeigt werden. In der Entfernung 589cm waren die eingestellten Größen gleich oder minimal geringer

Bei sukzessiver Darbietung der Entfernungskriterien, welches einer Erhöhung der *AID* entspricht, wurden die Abweichungen zwischen der eingestellten subjektiven Wahrnehmungsgröße und der objektiven Größe, immer größer. Auch waren im Bereich 30,5 bis 385cm die binokularen Einstellungen immer größer als die der monokularen, welches durch die unterschiedliche *AID* auch zu erwarten war.

Im orthostereoskopischen Bereich waren in einer Entfernung von 90cm und in allen 8 Messreihen (binokular und monokular) die größten Abweichungen zwischen der objektiven und subjektiven Größe zu erkennen. Im Bereich 30,5cm lagen sie in allen 8 Messreihe etwas unterhalb von denen in 90cm.

Das unterstützt die Annahme, dass in diesem Abstandsbereich die Größenkonstanzleistung die maximale Unabhängigkeit, gegenüber dem reinen Gesichtswinkel (= Netzhautbild) einnimmt.

Dies wird aber im Abschnitt „Diskussion der Messwerte“ genauer erläutert. In diesem Abschnitt werden die Messdaten nur analysiert und aufbereitet.

Damit man ein besseres Verständnis über die Abhängigkeiten der visuellen Wahrnehmungsgröße von der *AID* bekommt, soll die Fitting-Funktion und ihre Komponenten zuerst analysiert werden. Es handelt sich zwar hierbei um eine phänomenologische Funktion, aber dennoch lassen sich ein paar wenige Aussagen, bezüglich der Einflussnahme der *AID* in die visuelle Wahrnehmungsgröße, schließen. Man kann aber schon von Beginn an sagen, dass die Anfangsbedingung  $y_0$ , für den Informationsinhalt, vermittelt durch das Netzhautbild, steht. Denn die 3 anderen Terme streben asymptotisch gegen  $y_0$ . Die Anfangsbedingung  $y_0$  stellt aus diesem Grund auch in den ersten 2 Messreihen (niedrigste *AID*) den größten Anteil der Funktionswerte dar. Wobei hier dennoch zwischen monokularer- und binokularer Betrachtung unterschieden werden muss.

Wenn man alle äußeren Einflüsse, die einen Hinweis über den Abstand eines Objektes liefern, beseitigt, dann wäre die einzige Größe auf die das visuelle System zurück greifen kann, das Netzhautbild. In unserem betrachteten Fall eben die Anfangsbedingung  $y_0$ .

Die Exponentialfunktion 3. Ordnung soll mit ihren 3 Termen die Tatsache wiedergeben, dass 3 Parameter des Abstandes in den Versuchsreihen berücksichtigt wurden. Ein Term steht für die Akkommodation. Wenn ein Objekt sich in verschiedenen Entfernungen zum Beobachter befindet, ergeben die verschiedenen Akkommodationszustände des visuellen Systems, Hinweise darüber ab, ob es sich nah oder fern zum Beobachter befindet. Diese Abstandsinformation beeinflusst die subjektive Wahrnehmungsgröße.

Bei Variation des Konvergenzgrades (ergibt sich, wenn ein Objekt unterschiedliche Abstände zum Beobachter einnimmt), geschieht selbiges wie bei den verschiedenen Einstellungen der Akkommodation.

Wobei im Fall der Konvergenz beider Augen, noch zusätzlich die Abstandsinformationen, vermittelt durch die Querdisparation, mit hinein fließt. Beide überlagerten Abstandsinformationen fließen in den 2. Term der Exponentialfunktion. Als letzter Term, der für die Vermittlung der Abstandsinformation steht, ist die der Empirie.

### 3.3.1.1 Betrachtungen der Koeffizienten $A_i$ :

Mit der Fitting-Funktion  $y = A_1 \exp(-x/t_1) + A_2 \exp(-x/t_2) + A_3 \exp(-x/t_3) + y_0$  lassen sich alle 8 graphischen Auftragungen sehr gut approximieren. Die folgende Analyse der  $A_i$ 's, wird zu der berechtigten Annahme führen, dass diese 3 Terme Parameter des Abstandes sind.

Man kann aber die einzelnen Parameter nicht mit konkreten Termen verknüpfen. Nur die Anfangsbedingung lässt diesen Schritt zu.

Wenn die 3 Terme Parameter des Abstandes sind, so müssten die  $A_i$ 's die dazugehörigen Gewichten sein. Sie sollten sich dann bei unterschiedlich zugelassenen Abstandsinformationen entsprechend ändern, da dies eine Erhöhung oder Erniedrigung der tatsächlichen *AID* entspricht. Dies wirkt sich dann entsprechend in der resultierenden visuellen Wahrnehmungsgröße aus.

Da man aber nicht weiß, welcher Parameter für welchen Term steht, soll für eine Analyse die Gesamtsumme der  $A_i$ 's als Anhaltspunkt dienen, welches sich dann qualitativ auf die *AID* übertragen lässt.

Die  $A_i$ 's bekommen folgende Bedeutung:

Sie sind die Koeffizienten der einzelnen Terme und dadurch ein qualitatives Maß, wie groß der Anteil, der Komponenten Akkommodation, Konvergenz und Empirie, bei der Vermittlung der Abstandsinformationen ist.

Da man wie oben schon erwähnt den Gewichtskoeffizienten keinen Parameter zuordnen kann, soll nur auf Auffälligkeiten in ihrer Wertigkeit eingegangen werden und die Gesamtsumme als Kriterium betrachtet werden.

Betrachtung der Situation:  $A_1 = A_2 = A_3$  (= gleiche Gewichtung)

Liegen zusätzlich die beiden Fälle innerhalb einer Messreihe vor:

1. sämtliche  $A_i$ 's sind innerhalb der Messreihe konstant
2. sie haben das niedrigste Gewicht innerhalb der 1. Versuchsreihe (binokular oder monokular),

so kann man folgendes einführen:

Da es sich hier um die niedrigsten und jeweils gleichen Gewichte handelt, befindet sich das visuelle System in einem Zustand, bei welchem es in minimalistischer Weise nur auf Abstandsinformationen zugreifen und verwerten kann. Die *AID* hat den absolut niedrigsten Wert.

Aufbauend auf diese Interpretation, kann die Entwicklung der Gewichte in Abhängigkeit der neu hinzu kommenden Abstandsinformationen, als zusätzliches Analysemittel für das Verhalten der tatsächlichen *AID* verwendet werden.

Dass obige Einführung sinnvoll war, bestätigt sich durch die Messdaten:

1. Messreihe: Bino:  $A_i = 158,82$  mit  $i = 1,2,3$   
Mono:  $A_i = 67,82$  mit  $i = 1,2,3$ .

Diese Gewichte sind jeweils das unterste Maß und dabei für alle Terme gleich.

Da die Gesamtsumme  $\Sigma A_i$  (hierbei gilt für  $i = 1, 2, 3$ ) einer Messreihe (monokular oder binokular) die aktuell vorliegenden und neuronal verwertbaren Abstandsinformationen des visuellen Systems widerspiegeln soll, muss sie deshalb von der jeweiligen Messreihe und den dargebotenen Abstandskriterien abhängig sein.

Die Gesamtsummen sollten dann beginnend von Messreihe 1 (monokular oder binokular) bis 4 (monokular oder binokular) stetig wachsen, da die tatsächliche *AID* zunimmt. Zusätzlich müssen die monokularen Summen innerhalb einer betrachteten Messreihe kleiner als die der binokularen sein. Bildet man die Summen der Koeffizienten innerhalb einer Messreihe so erhält man:

$\Sigma A_i$  (hierbei gilt für  $i = 1, 2, 3$ ):

1. Messreihe: Bino: 476,46  
Mono: 203,46  
2. Messreihe: Bino: 1300,59  
Mono: 921,82  
3. Messreihe: Bino: 1589,48  
Mono: 875,68  
4. Messreihe: Bino: 2019,58  
Mono: 1309,40

Man kann gut ablesen, dass sich die obige Einführung, mit den gewonnenen Messdaten vereinbaren lässt. Alle monokularen Summen sind jeweils kleiner als die der binokularen. Des Weiteren erfolgt ein jeweiliges Anwachsen beginnend von der Messreihe 1 bis Messreihe 4. Die Gesamtsumme der 2 und 3. Messreihe (monokular) kann als Einbettung zwischen der 1. und 4. Messreihe verstanden werden.

Vergleicht man die Summen der Messreihe 1 und die der Messreihe 4, so ergeben sich folgende relative Verhältnisse:

1. (4. Messreihe monokular / 1. Messreihe monokular) =  $(1309,40 / 203,46) \approx 6,436$   
2. (4. Messreihe binokular / 1. Messreihe binokular) =  $(2019,58 / 476,46) \approx 4,239$

3. (4. Messreihe binokular/1. Messreihe monokular) =  $(2019,58/203,46) \approx 9,926$

Interessant ist hier das 3. Verhältnis ( $\approx 9,926$ ), da hier der Unterschied in den zugelassenen Abstandsinformationen maximal sind, also maximale- und minimale *AID* vorliegt.

Fazit:

- Die Gesamtsumme  $A_i$  wird umso größer, desto mehr die von außen zugelassenen Abstandsinformationen (Messreihe 1-4, monokular+binokular) verwertet werden können, was einer stetigen Zunahme der tatsächlichen *AID* entspricht.

- Umso größer die Summe einer Messreihe ist, desto größer sollte dann auch die visuelle Wahrnehmungsgröße sein.

Dies wird durch die Messdaten bestätigt. Die Abweichungen zwischen den binokularen Einstellungen aus der 4. Messreihe, sind gegenüber der monokularen Einstellung aus der 1. Messreihe, am größten.

Der Mittelwert in der 1. Messreihe bei einer Entfernung von 30,5cm (monokular) beträgt im Längenmaß: 4,07cm. Die Einstellung in der 4. Messreihe bei einer Entfernung von 30,5cm (binokular) dagegen: 12,47cm.

Setzt man beide Größen ins Verhältnis, so ergibt sich ein Unterschiedsfaktor von 3,06.

Um diesen Faktor ist die subjektive Wahrnehmungsgröße - bei maximaler *AID* - gegenüber der subjektiven Wahrnehmungsgröße - bei minimaler *AID* - größer.

Dies zeigte sich ja auch schon in den relativen Verhältnissen der Gewichte, wo es den Wert 9,926 ergab.

- Da es sich oben um den Vergleich zwischen maximaler- und minimaler *AID* handelt, soll als nächstes die Summenverhältnisse zwischen den einzelnen Messreihen gebildet werden.

Relative Verhältnisbildung der Gewichtssummen:

- Monokular: (4. Messreihe/1. Messreihe) =  $(1309,40/203,46) \approx 6,436$   
(4. Messreihe/2. Messreihe) =  $(1309,40/921,82) \approx 1,42$   
(4. Messreihe/3. Messreihe) =  $(1309,40/875,68) \approx 1,495$

(3. Messreihe/1. Messreihe) =  $(875,68/203,46) \approx 4,304$   
(3. Messreihe/2. Messreihe) =  $(875,68/921,82) \approx 0,95$

(2. Messreihe/1. Messreihe) =  $(921,82/203,46) \approx 4,531$

- Binokular: (4. Messreihe/1. Messreihe) =  $(2019,58/476,46) \approx 4,239$   
(4. Messreihe/2. Messreihe) =  $(2019,58/1300,59) \approx 1,593$   
(4. Messreihe/3. Messreihe) =  $(2019,58/1589,48) \approx 1,271$

(3. Messreihe/1. Messreihe) =  $(1589,48/476,46) \approx 3,336$   
(3. Messreihe/2. Messreihe) =  $(1589,48/1300,59) \approx 1,222$

(2. Messreihe/1. Messreihe) =  $(1300,59/476,46) \approx 2,73$

Auch hier bestätigt sich die oben gemachte Aussage über den Einfluss der *AID* auf die visuelle Wahrnehmungsgröße. Umso größer die *AID* wird, desto größer auch die visuelle Wahrnehmungsgröße.

Bis auf die Ausnahme (3. Messreihe/2. Messreihe)  $\approx 0,95$ .

Das qualitative Gleichsetzen der Gesamtsumme  $A_i$  als *AID* ist von daher nicht verkehrt und eignet sich als gutes Analysehilfsmittel.

- Der Einfluss der *AID* kann jetzt auch mit den jeweiligen Abweichungen (objektive/subjektive Einstellung) in Verbindung gebracht werden. Umso größer die *AID*, desto größer auch die Abweichung der subjektiven Einstellung gegenüber der Zentralprojektion (konstanter Gesichtswinkel).

Interessant ist hier die Abweichung des 1. Stangenpaares. Objektiv, also bei konstantem Winkel, ergibt sich eine Größe von 2,86cm im Längenmaß. Umso größer die *AID* wurde, desto größer auch die Abweichung von eben diesem Werte. Dieses Verhalten zeigte sich auch bei den Stangenpaaren 2, 3, 4, 5. Wobei das 2. Stangenpaar in allen 8 Messreihen die maximalste Abweichungen einnahm.

Allerdings fielen die Abweichungen umso geringer aus, desto größer der Abstand der einzustellenden Stangenpaare wurde. Die *AID* ist bei weit entfernten Stangenpaaren etwas niedriger als bei näheren, da dort die Abstandsinformation vermittelt durch die Akkommodation und Konvergenz etwas eingeschränkter ist.

Beim 7. Stangenpaar entsprachen die monokularen und binokularen Einstellungen in etwa dem objektiven Wert.

Man kann hieraus folgendes ableiten:

Die visuelle Wahrnehmungsgröße ist umso unabhängiger vom Netzhautbild, desto größer die *AID* ist.

### **3.3.1.2 Betrachtung der Koeffizienten $t_i$ :**

Die Koeffizienten  $t_i$  beeinflussen direkt den Exponenten der Exponentialfunktion, da ihr Gewicht im Nenner des Exponenten steht. Daraus ergibt sich, dass sich die Variation der Variabel  $x$ , die sich im Zähler befindet, sich auf eben dieses Gewicht bezieht.

Die Variabel  $x$  soll die Dimension einer Länge haben, so dass man den Exponenten  $(-x/t_i)$  als ein Maß für den Gültigkeitsbereich, innerhalb dessen eine Abstandsinformation noch neuronal verwertet werden kann, interpretieren kann.

Damit ist folgendes gemeint:

Es ist bekannt, dass der Wirkungsbereich der Akkommodation nicht sehr groß ist. Das würde unter Berücksichtigung obiger Interpretation bedeuten, dass sich mit zunehmender Entfernung der Einfluss dieser visuellen Komponente, in der Erfassung des Abstandes gegen null geht.

Das sollte sich natürlich in den Messungen widerspiegeln. Da es sich hier aber um eine phänomenologische Funktion handelt, erübrigt sich jede Vertiefung. Deshalb soll nur das allgemeine Verhalten der Exponentialfunktion betrachtet werden.

Um den Einfluss der  $t_i$ 's besser zu verstehen, werden zuerst allgemeine Eigenschaften im Funktionsverlauf, einer Exponentialfunktion, betrachtet. Wobei hier nur der negative Exponent von Interesse ist.

Die nächsten beiden Abbildungen sollen einen qualitativen Aspekt darstellen, wie 2 unterschiedliche negative Exponenten den Verlauf grafisch beeinflussen. Der Definitionsbereich ist jeweils das Intervall  $(-8; 8)$ .

Abb.76 entspricht der Funktion  $\exp(-x/3)$  und Abb.77 der Funktion  $\exp(-x/12)$ .

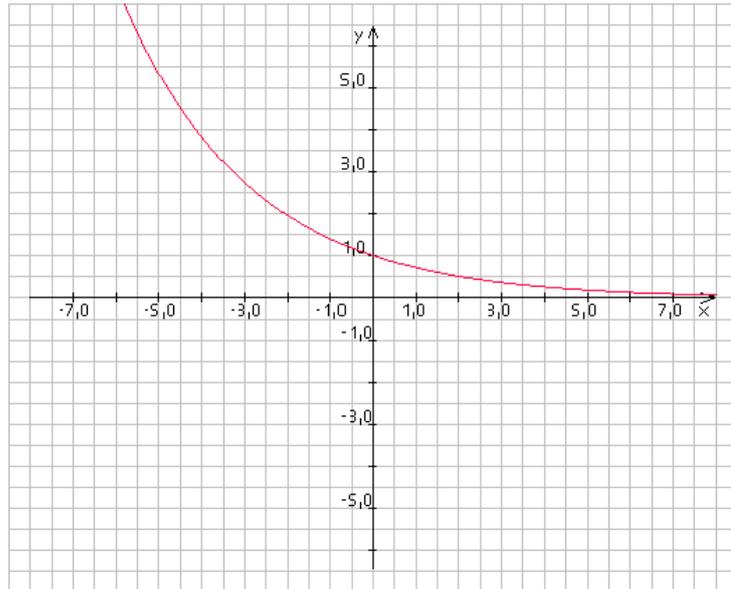


Abb.76: Graphische Darstellung der Funktion  $\exp(-x/3)$ .



Abb.77: Graphische Darstellung der Funktion  $\exp(-x/12)$ .

Man kann aus den Abbildungen folgendes ablesen: umso größer das Gewicht  $t$ , desto größer die Einflussweitreichweite des jeweiligen Parameters.

Für die  $t_i$ 's ergaben sich folgende Werte:

### 1. Messreihe:

- Binokulare Einstellung:  $t_1 = 72,98$ ;  $t_2 = 72,98$ ;  $t_3 = 72,98$

- Monokulare Einstellung:  $t_1 = 110,92$ ;  $t_2 = 110,92$ ;  $t_3 = 110,92$

In der 1. Messreihe sind sämtliche  $t_i$ 's auch gleich gewichtet. Das bedeutet, dass die Einflussweitreichweite bei der noch eine Abstandsinformation durch das visuelle System

verwertet werden kann, für alle Parameter gleich ist. Konkret sind das der Konvergenzgrad (überlagert mit der Querdisparation), die Akkommodation und die Empirie.

## 2. Messreihe:

- Binokulare Einstellung:  $t_1= 51,38$ ;  $t_2= 61,63$ ;  $t_3= 1057,48$
- Monokulare Einstellung:  $t_1= 2096,04$ ;  $t_2= 2096,04$ ;  $t_3= 80,84$

Gegenüber der 1. Messreihe kamen zusätzliche Abstandsinformationen, die das visuelle System verwerten kann, dazu. Die „AID“ wurde erhöht. Dadurch vergrößerten sich die Gewichte zum Teil um ein Vielfaches.

Bei Verkleinerung des Quotienten vergrößert sich der Wirkungsbereich, innerhalb dessen noch eine Abstandsinformation neuronal verwertet werden kann. Anschaulich zeigen das die obigen Abbildungen.

## 3. Messreihe:

- Binokulare Einstellung:  $t_1= 49,06$ ;  $t_2= 49,15$ ;  $t_3= 235,35$
- Monokulare Einstellung:  $t_1= 59,78$ ;  $t_2= 60,32$ ;  $t_3= 356,8$

Die Veränderung der Gewichte innerhalb der 3. Messreihe deutet auf eine Veränderung der Wirkungsbereiche und der Einflussweitreichere der Parameter hin. Die einzelnen Parameter können speziellen Termen der Fitting-Funktion nicht gegenübergestellt werden. Von daher kann auch der Wirkungsbereich der einzelnen Parameter, innerhalb dessen eine Abstandsinformation verwertet werden kann, nicht konkret analysiert werden. Aber kann dennoch daraus ableiten, dass die „AID“ sich weiter erhöht.

## 4. Messreihe:

- Binokulare Einstellung:  $t_1= 54,23$ ;  $t_2= 383,86$ ;  $t_3= 609,63$
- Monokulare Einstellung:  $t_1= 382,92$ ;  $t_2= 49,06$ ;  $t_3= 53,47$

Die Aspekte der 3. Messreihe gelten auch für die 4. Messreihe. Es soll nur die Veränderung der Gewichte zwischen der 1. Messreihe und der darauf folgenden Messreihen betrachtet werden.

Fazit:

Man kann aus der Entwicklung der Gewichte ablesen, dass die sukzessive Darbietung der Abstandskriterien, kontinuierliche Erhöhung der AID, den Einflussbereich der Abstandsparameter verändern und zum Teil wesentlich vergrößern. Konkretere Analysen sind aber nicht möglich und fallen in das Gebiet der Spekulationen.

### 3.3.1.3 Berechnungen der Brunswik - Verhältnisse

Es soll mit der Brunswik-Formel überprüft werden, ob die Messdaten der 1. Versuchsreihe, die aufgestellten Annahmen bestätigen. Interessant ist hierbei der orthostereoskopische Bereich, der zwischen ca. 30–100cm bei kleinen Gegenständen liegt. Der Abstand 94cm hat sich durch die Messdaten als diejenige Entfernung ergeben, in welchem alle Größeneinstellungen die merklich maximalen waren. In der binokularen Messreihe, als auch

in der monokularen Messreihe. Aus diesem Grunde wurde das Brunswik-Verhältnis auf eben diesen Abstand gebildet.

Für das Brunswik-Verhältnis gilt:

$$\text{Konstanzgrad} = (100 \cdot (s-p)) / (w-p);$$

s = Abstand des vorderen Stangenpaares (einzustellende Wahrnehmungsgröße [cm])

w = Abstand des hinteren Stangenpaares (Referenzgröße [cm])

p = Abstand des hinteren Stangenpaares, in die Ebene des vorderen projiziert (berechnete Größe [cm])

### - Die Größenkonstanz in Bezug auf den orthostereoskopischen Bereich

Die Werte aus der Versuchsreihe I sind in nachfolgende Tabellen dargestellt. In dieser und in allen weiteren Tabellen wurden jeweils die Mittelwerte verwendet.

**Tabelle 2:** Größenkonstanzgrad für die Entfernung 94cm/185cm

# Messreihe	Binokular	Monokular
1	38,29%	20,64%
2	45,76%	42,77%
3	55,74%	40,63%
4	64,76%	49,79%

**Tabelle 3:** Größenkonstanzgrad für die Entfernungen 94cm/285cm

# Messreihe	Binokular	Monokular
1	21,92%	13,62%
2	30,36%	29,97%
3	37,01%	26,89%
4	42,29%	33,96%

**Tabelle 4:** Größenkonstanzgrad für die Entfernungen 94cm/385cm

# Messreihe	Binokular	Monokular
1	14,95%	10,34%
2	23,58%	24,05%
3	30,07%	21,48%
4	33,98%	26,46%

**Tabelle 5:** Größenkonstanzgrad für die Entfernungen 94cm/589cm

# Messreihe	Binokular	Monokular
1	9,34%	6,26%
2	16,44%	16,74%
3	20,43%	14,88%
4	24,20%	18,28%

### - Die Größenkonstanz bei einer Entfernung von 485cm/589cm

Als nächstes wird das Brunswik-Verhältnis zwischen der größten Entfernung und der Bezugsentfernung gebildet.

Die Werte aus Versuchsreihe I sind in der Tabelle 6 dargestellt.

**Tabelle 6:** Größenkonstanzgrad für die Entfernungen 485cm/589cm

# Messreihe	Binokular	Monokular
1	2,46%	2,19%
2	19,46%	23,6%
3	17,06%	15,85%
4	31,58%	25,76%

Werte in der Nähe von 100%, bedeuten eine hohe Größenkonstanzleistung. Liegen die Werte hingegen bei 0%, so wurde die subjektive Größenwahrnehmung aufgrund des Schwinkels oder auf Grundlage des Netzhautbildes bestimmt.

In den Tabellen 2-6 ist bei der binokularen und monokularen Einstellung jeweils ein Anstieg des Größenkonstanzgrades, mit zunehmender Darbietung der Abstandsinformation, abzulesen. Das ist mit der Annahme vereinbar, dass der Größenkonstanzgrad des visuellen Systems umso höher ist, wenn die *AID* zunimmt.

In der Tabelle 6 bestätigt sich auch die Annahme, dass außerhalb des orthostereoskopischen Bereichs die Größenkonstanzleistung abnimmt. Bei minimaler *AID* liegen die Werte in der Nähe von 0%. Die subjektive Wahrnehmungsgröße wird zum größten Teil durch die Information des Schwinkels beeinflusst.

Um obige Darstellungen zur Größenkonstanzleistung zu untermauern, werden folgende Quotienten gebildet:

### - Subjekt. Wahrnehmungsgröße/objektive Größe

Hierfür werden die subjektiven Einstellungen, welche sich in einer Entfernung von 94cm ergaben, in Winkelminuten herangezogen. Sie werden mit dem konstanten Winkel der objektiven Größe verrechnet. Die tatsächlichen subjektiven Einstellungen im orthostereoskopischen Bereich sollen mit der objektiven Größe verglichen werden. Da es sich bei der objektiven Größe um einen konstanten Winkel handelt, müsste der Quotient bei maximaler *AID* am größten sein.

Die Berechnung erfolgte mittels der Fitting-Funktion:

$$y = A_1 \exp(-x/t_1) + A_2 \exp(-x/t_2) + A_3 \exp(-x/t_3) + y_0 \text{ in } 94\text{cm.}$$

#### 1. Messreihe:

$$\text{Binokular : } y/323' = 454,45'/323' = 1,41$$

$$\text{Monokular: } y/323' = 406,54/323' = 1,26$$

## 2. Messreihe:

Binokular :  $y/323' = 578,67'/323' = 1,79$

Monokular:  $y/323' = 570,57/323' = 1,76$

## 3. Messreihe:

Binokular :  $y/323' = 642,12'/323' = 1,99$

Monokular:  $y/323' = 550,21/323' = 1,70$

## 4. Messreihe:

Binokular :  $y/323' = 691,23'/323' = 2,14$

Monokular:  $y/323' = 595,39/323' = 1,84$

Fazit:

Man kann gut das kontinuierliche Anwachsen der Quotienten, mit Vergrößerung der Abstandsinformationsdichte, ablesen. Es bestätigt zusätzlich die aufgestellte Annahme, dass die eingestellten Größen im orthostereoskopischen Bereich, die größte Abweichung vom konstanten Gesichtswinkel (=Zentralprojektion) einnehmen.

Die binokularen Einstellungen ergeben jeweils Quotienten, welche immer größer als die Quotienten der monokularen Einstellungen sind. Dies deutet darauf hin, dass die Größenkonstanzleistung bei einer hohen Abstandsinformationsdichte eine höhere Güte aufweist, als bei einer niedrigen Abstandsinformationsdichte. Da die Einstellungen im Bereich 30,5cm nahe bei denen bei 94cm lagen, wurde auf deren Berechnung verzichtet, da sie das selbige Fazit ergeben würden. Sie stellen den unteren Bereich des orthostereoskopischen Bereichs dar.

Die Einstellungen ab 185cm liegen bei der Referenzgröße von 45,6 cm, deutlich außerhalb des orthostereoskopischen Bereichs, was sich auch in den Messdaten widerspiegelt.

### 3.3.1.4 Simulation einer bewegten Kugel mittels der Fitting-Funktion

In diesem Abschnitt wird die Fitting-Funktion, welche die Messdaten der Versuchsreihe I approximiert, in einen Algorithmus eingebettet, der die Bewegung einer Kugel simulieren soll. Dieser simulierte Bewegungsablauf soll mit einer linearen Darstellung verglichen werden. Dies soll zusätzlich die anfangs aufgestellten Arbeitshypothesen bestätigen.

Auf dem konventionellen Computerspielmekmarkt werden die Bewegungsabläufe nahezu linear dargestellt, welches dem Beobachter einen etwas unnatürlichen Seheindruck vermittelt. Dies ist in den ersten 100cm Raumtiefe besonders merklich, da dieser Modus die Größenkonstanzleistung des visuellen Systems nicht berücksichtigt. Daraus ergibt sich im orthostereoskopischen Bereich eine unnatürlich schnell anwachsende Objektgröße, da sie vom visuellen System nicht nach unten verrechnet wird. Da es sich bei der Fitting-Funktion um eine phänomenologische Funktion handelt, berücksichtigt sie den orthostereoskopischen Bereich.

Die Simulation der Kugel wurde mit der Programmierart C++ realisiert. Die Entwicklungsumgebung wurde durch Microsoft Visual Studio Express umgesetzt.

Als Schnittstelle für die graphische Ausgabe wurde Microsoft DirectX verwendet. Die Umgebung, in welcher der Bewegungsablauf der Kugel stattfindet, wird linear projiziert. Die Kugel ist orthogonal projiziert und wird hierbei um die Kugelmittle skaliert.

In der ersten Abbildungsreihe werden Schnappschüsse vorgestellt, welche die Kugel bei maximaler Annäherung zum Beobachter zeigt. Die zweite Abbildungsreihe zeigt dagegen die maximalste Entfernung zum Beobachter.

Der Startpunkt für die Berechnung der Kugel beginnt bei 485cm Rauntiefe. Sie kann bis 600cm Rauntiefe rollen und sich bis zum Bildschirm nähern. Der Ausgangskugeldurchmesser beträgt 50cm. Der Kamerawinkel beträgt jeweils 60°. Der Durchmesser der Kugel wird in den ersten 3 Darstellungen jeweils mit der Fitting-Funktion berechnet.

Die aus den speziellen Messreihen (= unterschiedliche Abstandsinformationen) resultierenden Gewichtskoeffizienten dienen dann zur Programmierung der jeweiligen Sequenz. Die Sequenzen zeigen die verschiedenen subjektiven Größenänderungen einer Kugel bei Abstandsänderung. Es soll verglichen werden, wie das visuelle System die Kugelgröße nach oben verrechnet, je mehr Abstandsinformationen dem visuellen System vorliegen.

Die 4. Darstellung wird in beiden Fällen mit einer linearen Funktion programmiert. Die Größenänderung der Kugel soll erst für sich allein beurteilt werden. Im Anschluss soll die lineare Darstellung der Fitting-Funktion gegenüber gestellt werden.

### - **Größenvergleich der Kugel bei maximaler Annäherung zum Beobachter**

#### **Dargebotene Abstandsinformationen:**

- Netzhautbild,
- Psychologisches Gefühl der Nähe

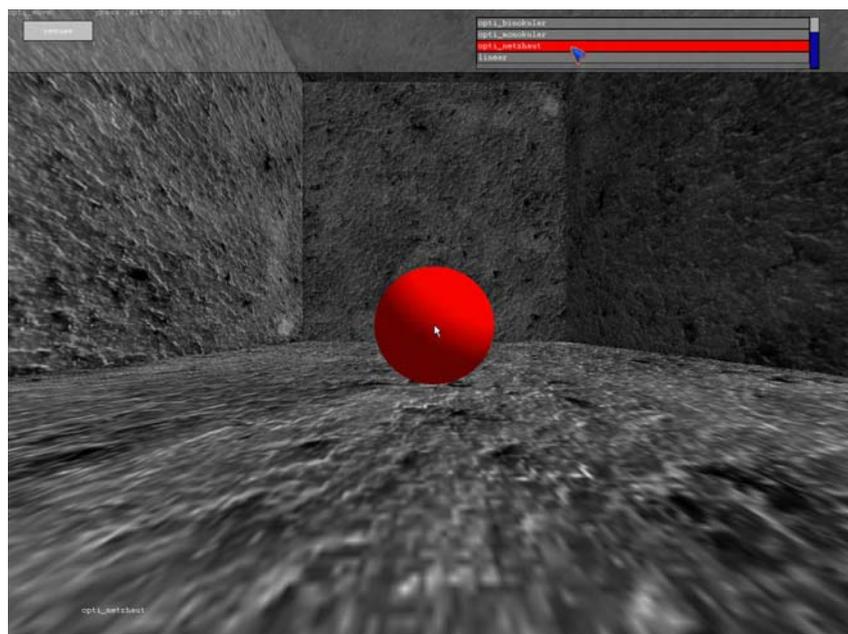


Abb.78: 1. Messreihe, monokular.

In dieser Sequenz hatte  $y = A_1 \exp(-x/t_1) + A_2 \exp(-x/t_2) + A_3 \exp(-x/t_3) + y_0$

folgende Gewichte:

$y_0 : 319,36'$

die  $A_i$  `s lauten:

$A_1: 67,82' \quad A_2: 67,82' \quad A_3: 67,82'$

die  $t_i$  `s lauten:

$t_1: 110,92 \quad t_2: 110,92 \quad t_3: 110,92$

Die Kugel befindet sich in nächster Nähe zum Beobachter. Würde man die Kugel noch näher heranzoomen, so würde sie sich im nächsten Moment umkehren und in den Raum hinein bewegen. Die sich hier ergebene Größe der Kugel entspricht der visuellen Größenwahrnehmung bei minimalster Abstandsinformationsdichte. Die Entwicklung der visuellen Größenwahrnehmung in Abhängigkeit von der jeweils vorliegenden Abstandsinformationsdichte soll in diesem Abschnitt das Hauptaugenmerk sein.

#### Dargebotene Abstandsinformationen:

- Netzhautbild,
- Akkommodation,
- Empirische Kriterien (mit Bewegungsparallaxe)

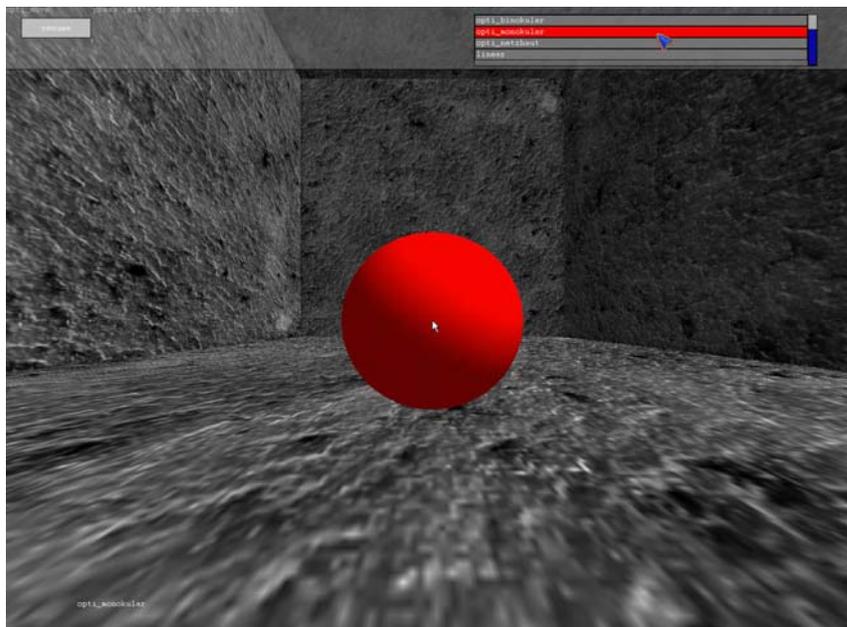


Abb.79: 4. Messreihe, monokular.

Für  $y = A_1 \exp(-x/t_1) + A_2 \exp(-x/t_2) + A_3 \exp(-x/t_3) + y_0$  wurden folgende Gewichte verwendet:

$y_0 : 279,08'$

die  $A_i$  `s lauten:

$A_1: 151,84'$   $A_2: 80,52'$   $A_3: 1077,04'$

die  $t_i$  `s lauten:

$t_1: 382,92$   $t_2: 49,06$   $t_3: 53,47$

Die Kugel hat in Abb.79 exakt den gleichen Abstand zum Beobachter wie in Abb.78. Durch veränderte visuelle Größenwahrnehmung, bedingt durch die Vergrößerung der Abstandsinformationsdichte, könnte man den Eindruck gewinnen, dass die Distanz zum Beobachter nicht dieselbe ist. Dies untermauert qualitativ die aufgestellte Relation 1.

Man kann aber sehr deutlich den Unterschied in der Kugelgröße wahrnehmen. Dies ist dadurch bedingt, weil die Abstandsinformationsdichte der 4. Messreihe (monokular) deutlich größer als die der 1. Messreihe (monokular) ist. Dieser Unterschied spiegelt sich in der visuellen Größenwahrnehmung wieder.

#### **Dargebotene Abstandsinformationen:**

- Netzhautbild,
- Akkommodation,
- Konvergenz beider Augen,
- Empirische Kriterien (mit Bewegungsparallaxe)

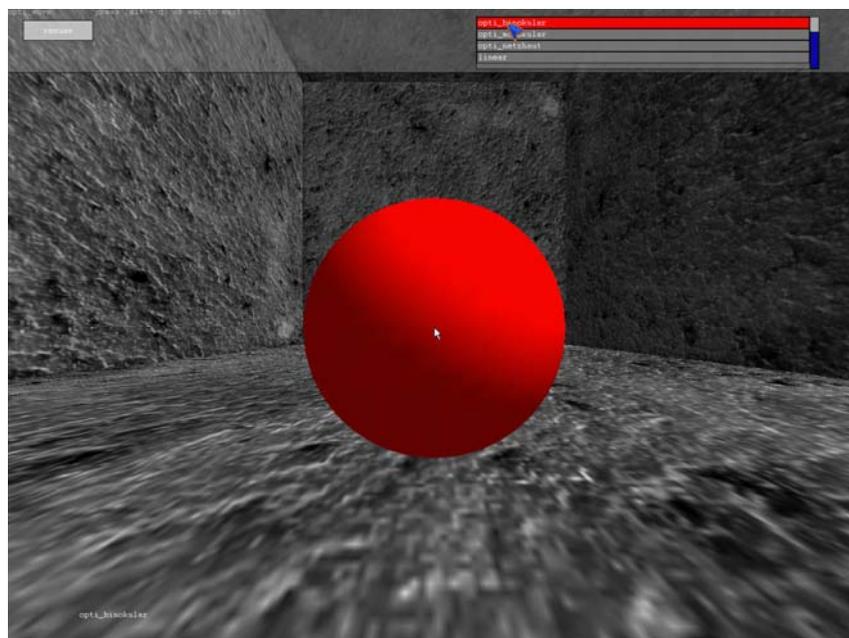


Abb.80: Binokulare Wahrnehmung, 4. Messreihe.

Für  $y = A_1 \exp(-x/t_1) + A_2 \exp(-x/t_2) + A_3 \exp(-x/t_3) + y_0$  wurden folgende Gewichte verwendet:

$y_0 : 154,35'$

die  $A_i$  `s lauten:

$A_1: 1797,42'$   $A_2: -388,68'$   $A_3: 610,84'$

die  $t_i$ 's lauten:

$t_1: 54,23$   $t_2: 383,86$   $t_3: 609,63$

Die Randbedingungen sind wieder die gleichen wie zuvor. Die Effekte, bedingt durch eine nochmalige Erhöhung der Abstandsinformationsdichte, sind wieder analog den vorherigen. Die visuelle Größenwahrnehmung hat sich wieder verändert:

Sie ist etwas angestiegen. Die Sequenzen der letzten 3 Abbildungen bestätigen deutlich die Annahme, dass die Wahrnehmungsgröße durch das visuelle System bei Vergrößerung der verwertbaren Abstandsinformationen nach oben verrechnet wird und sich simultan eine invers wahrgenommene Entfernung einstellt.

Als Fazit der letzten 3 Sequenzen ergibt sich folgendes für die Kugelgröße:

**Kugelgröße in Abb.78 < Kugelgröße in Abb.79 < Kugelgröße in Abb.80**

Die Abstandsinformationsdichte verhält sich dabei wie folgt:

**Abstandsinfo in Abb.78 < Abstandsinfo in Abb.79 < Abstandsinfo in Abb.80**

In der letzten Sequenz wird die Größenentwicklung der Kugel, unter dem Aspekt der Winkelabhängigkeit, simuliert.

### **Lineare Darstellung:**

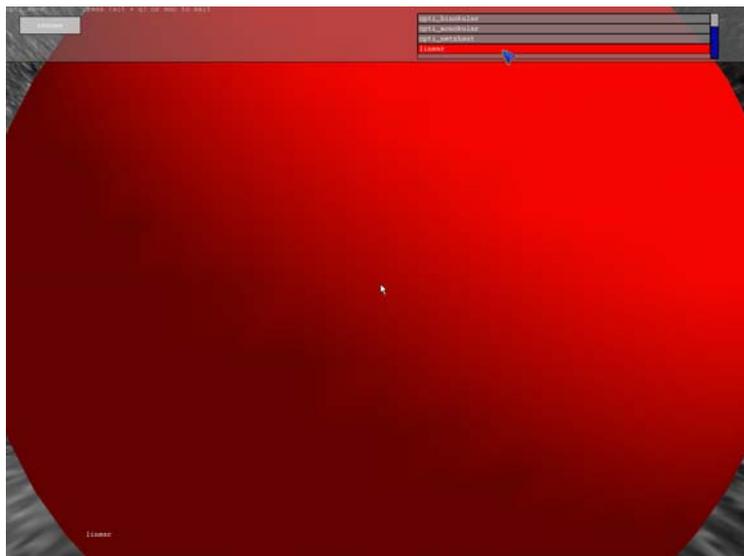


Abb.81: Lineare Darstellung (theoretisch).

In der linearen Darstellung wurden dieselben Anfangsbedingungen wie in den vorherigen Abbildungen verwendet.

Sehr auffällig in dieser Darstellung ist die extreme Größenzunahme. Sie ist dadurch bedingt, dass bei der linearen Darstellung die Information des Abstandes nicht berücksichtigt wird. Diese Simulation würde deshalb einem visuellen System entsprechen, bei welchem die subjektive Wahrnehmungsgröße nur über den Gesichtswinkel abgeleitet wird. Dies unterstreicht die Alltagserfahrung, dass die Gesetze der geometrischen Optik für die Bestimmung der visuellen Wahrnehmungsgröße nicht alleine zur Anwendung kommen.

Dass diese Abbildung nicht mit der Realität zu vereinen ist, hängt mit der Größenkonstanzleistung des visuellen Systems zusammen. Das visuelle System verrechnet die subjektive Wahrnehmungsgröße derart, dass man eine Verkleinerung der Wahrnehmungsgröße gegenüber der linearen Größe erreicht, wenn sie sich dem Beobachter sehr dicht nähert.

Dies zeigt deutlich die Fähigkeit des visuellen Systems, Wahrnehmungsgrößen neuronal zu verändern. Die Veränderung der Wahrnehmungsgröße ist wiederum abhängig von der vorliegenden Abstandsinformationsdichte des betrachteten Systems. Dabei spielt es auch eine Rolle, wie seine einzelnen visuellen Komponenten in der Lage sind, diese Abstandsinformationen neuronal und psychisch zu verwerten.

### - **Größenvergleich der Kugel bei maximaler Entfernung zum Beobachter**

#### **Dargebotene Abstandsinformationen:**

- Netzhautbild,
- Psychologisches Gefühl der Nähe

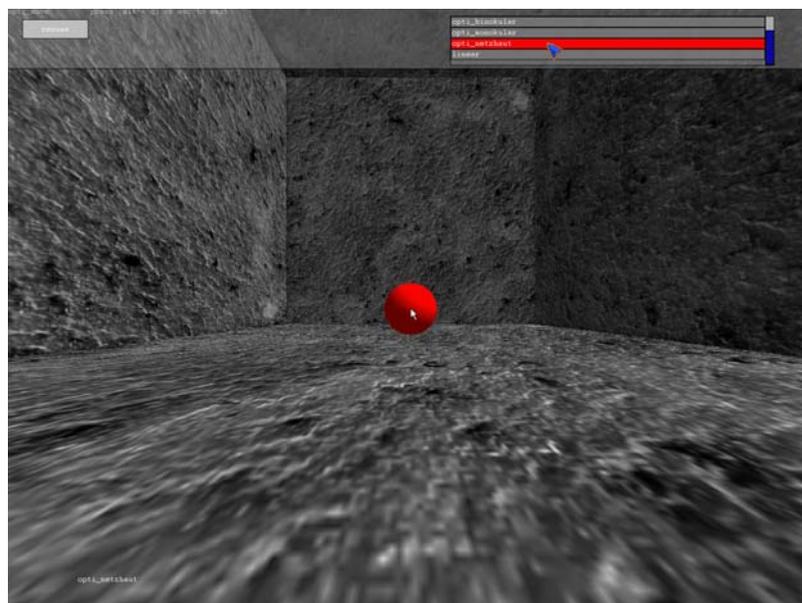


Abb.82: Monokular, 1. Messreihe.

In dieser Sequenz hatte  $y = A_1 \exp(-x/t_1) + A_2 \exp(-x/t_2) + A_3 \exp(-x/t_3) + y_0$

die Gewichte:

$y_0 : 319,36'$

die  $A_i$  `s lauten:

$A_1: 67,82'$   $A_2 : 67,82'$   $A_3 : 67,82'$

die  $t_i$  `s lauten:

$t_1: 110,92$   $t_2: 110,92$   $t_3: 110,92$

In dieser Momentaufnahme befindet sich die Kugel in weitester Entfernung zum Beobachter. Sie entspricht einer Raumtiefe von 6m. Diese und die kommenden Abbildungen sollen wieder in ihrer Größenentwicklung untereinander verglichen werden.

### Dargebotene Abstandsinformationen:

- Netzhautbild,
- Akkommodation,
- Empirische Kriterien (mit Bewegungsparallaxe)

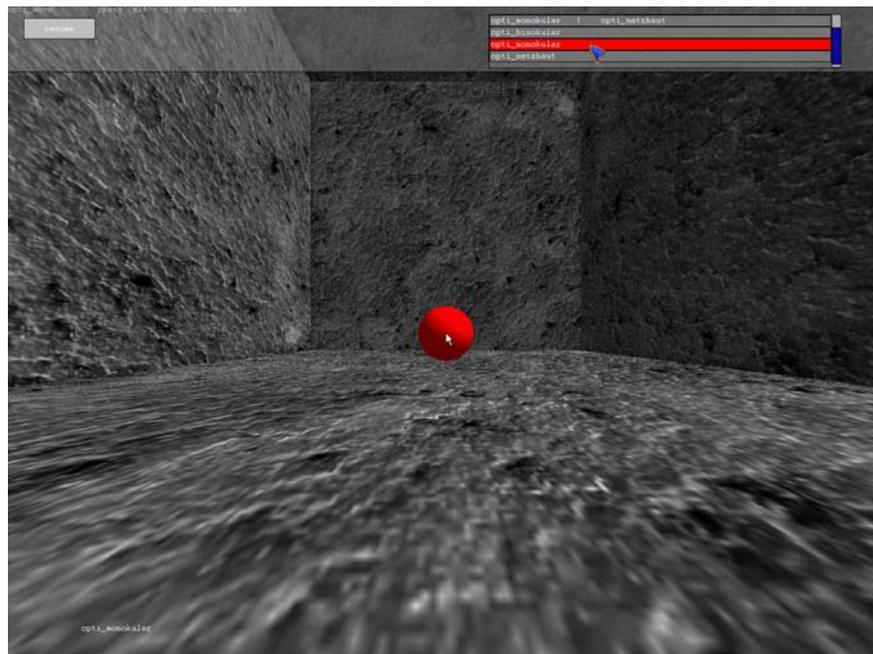


Abb.83: Monokular, 4. Messreihe.

Für  $y = A_1 \exp(-x/t_1) + A_2 \exp(-x/t_2) + A_3 \exp(-x/t_3) + y_0$  wurden folgende Gewichte verwendet:

$y_0 : 279,08'$

die  $A_i$  `s lauten:

$A_1: 151,84'$   $A_2 : 80,52'$   $A_3 : 1077,04'$

die  $t_i$  `s lauten:

$t_1: 382,92$   $t_2: 49,06$   $t_3: 53,47$

Obwohl in dieser Sequenz die Abstandsinformationsdichte gegenüber der vorherigen deutlich erhöht wurde, ergibt sich kein merklicher Unterschied.

### Dargebotene Abstandsinformationen:

- Netzhautbild,
- Akkommodation,
- Konvergenz beider Augen,
- Empirische Kriterien (mit Bewegungsparallaxe)

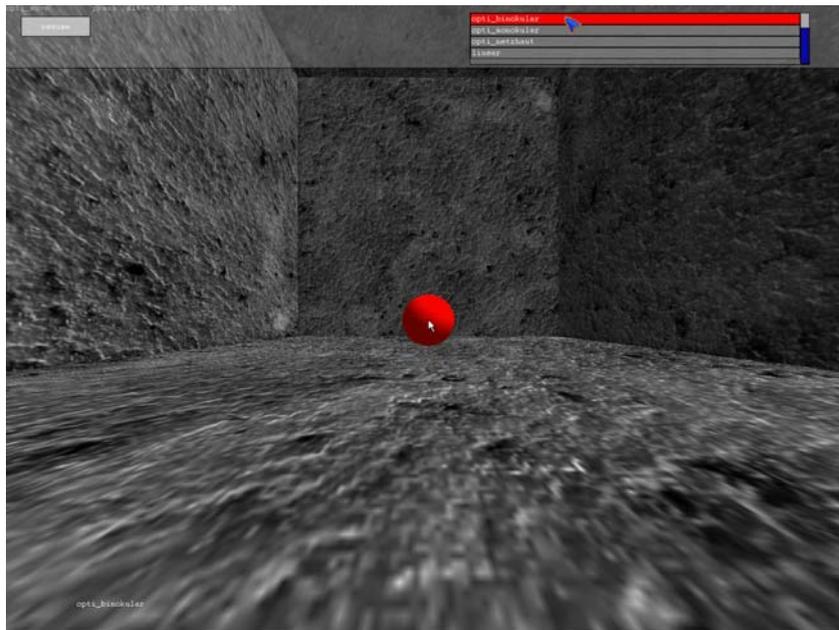


Abb.84: Binokulare Wahrnehmung, 4. Messreihe.

Für  $y = A_1 \exp(-x/t_1) + A_2 \exp(-x/t_2) + A_3 \exp(-x/t_3) + y_0$  wurden folgende Gewichte verwendet:

$y_0 : 154,35'$

die  $A_i$  `s lauten:

$A_1: 1797,42'$   $A_2: -388,68'$   $A_3: 610,84'$

die  $t_i$  `s lauten:

$t_1: 54,23$   $t_2: 383,86$   $t_3: 609,63$

Auch hier gilt dasselbe, was schon zur Abb.79 gesagt wurde. Es ergeben sich keine merklichen Unterschiede in der Wahrnehmungsgröße, obwohl auch hier die Abstandsinformationsdichte vergrößert wurde. Der Konvergenzgrad kam als zusätzliche Abstandsinformationsquelle hinzu.

## Lineare Darstellung:

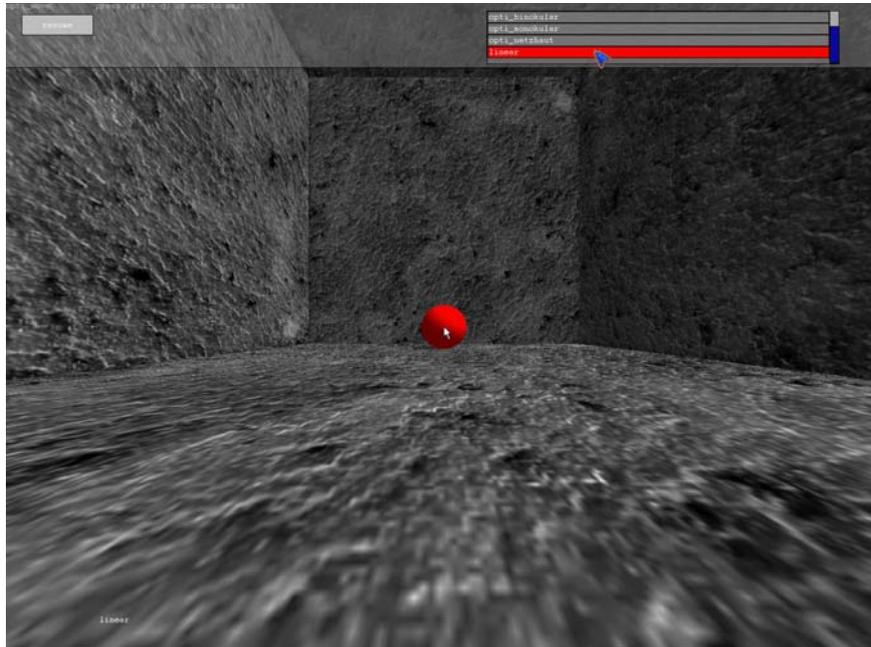


Abb.85: Lineare Darstellung (theoretisch).

In der linearen Darstellung wurden die gleichen Anfangsbedingungen wie in den vorherigen Abbildungen verwendet. Die Simulation zeigt deutlich, dass die jeweiligen Wahrnehmungsgrößen ab einer Entfernung von 6m in die lineare Größe übergehen.

Die Standbilder der Kugeln zeigen folgendes Verhalten des visuellen Systems:

1. Umso mehr Abstandsinformationen dem visuellen System vorliegen, desto größer wird die Objektgröße subjektiv wahrgenommen. Dies zeigen die Abbildungen bei minimalster Entfernung ganz deutlich. Die Entfernungen zum Beobachter sind immer die gleichen, aber durch die unterschiedlichen Größen scheinen sie sich in unterschiedlichen Entfernungen zu befinden. Dies untermauert die aufgestellte Relation 1 aus Annahme 2.
2. Die lineare Darstellung ergibt in unmittelbarer Nähe eine unnatürliche Größe. Sie entspricht in keinem Fall der visuellen Wahrnehmung.
3. Die Größenkonstanzleistung verrechnet die objektive Größe nach unten, wenn Objekte sich dem Beobachter nähern.

Über den nächsten Punkt kann man nur spekulieren, da hierfür Untersuchungen in größeren Entfernungen nötig wären.

4. Ab einer Entfernung von 6m geht die subjektive Wahrnehmungsgröße in die lineare Näherung über.

Im Anschluss werden Untersuchungen über die Unterschiedsschwelle betrachtet. Dort sollen die Abhängigkeiten der 3 Parameter bei differenziert dargebotenen Abstandsinformationen

analog den Messreihen 1-4, untersucht werden. Inwieweit bedingen der Konvergenzgrad, die Akkommodation und die Empirie die Abstandsunterschiedsschwelle? Wenn die Abhängigkeiten gleichartig sind, wäre das eine im Umkehrschluss zusätzliche Bestätigung der aufgestellten Annahmen. Sie haben aber nur einen sekundären Charakter, wie es schon im Abschnitt 1.3 formuliert wurde.

### **3.3.2 Auswertung Versuchsreihe II**

#### **1. Messreihe:**

##### **- Monokulare Einstellung**

Für die lineare Fitfunktion  $y = A + B \cdot x$  ergeben sich folgende Werte:

$$\begin{aligned} \text{Parameter } A &= 0,04669 \\ B &= 0,58286 \end{aligned}$$

##### **- Binokulare Einstellung**

Für die lineare Fitfunktion  $y = A + B \cdot x$  ergeben sich folgende Werte:

$$\begin{aligned} \text{Parameter } A &= 0,01278 \\ B &= 0,60582 \end{aligned}$$

#### **2. Messreihe:**

##### **- Monokulare Einstellung**

Für die lineare Fitfunktion  $y = A + B \cdot x$  ergeben sich folgende Werte:

$$\begin{aligned} \text{Parameter } A &= -8,7522 \text{ E} - 4 \\ B &= 0,61264 \end{aligned}$$

##### **- Binokulare Einstellung**

Für die lineare Fitfunktion  $y = A + B \cdot x$  ergeben sich folgende Werte:

$$\begin{aligned} \text{Parameter } A &= -0,01527 \\ B &= 0,61588 \end{aligned}$$

#### **3. Messreihe:**

##### **- Monokulare Einstellung**

Für die lineare Fitfunktion  $y = A + B \cdot x$  ergeben sich folgende Werte:

$$\begin{aligned} \text{Parameter } A &= -0,25121 \\ B &= 0,9936 \end{aligned}$$

##### **- Binokulare Einstellung**

Für die lineare Fitfunktion  $y = A + B \cdot x$  ergeben sich folgende Werte:

$$\begin{aligned} \text{Parameter } A &= -0,30961 \\ B &= 1,08113 \end{aligned}$$

#### 4. Messreihe:

##### - Monokulare Einstellung

Für die lineare Fitfunktion  $y = A + B \cdot x$  ergeben sich folgende Werte:

$$\begin{aligned} \text{Parameter } A &= -0,25719 \\ B &= 0,97194 \end{aligned}$$

##### - Binokulare Einstellung

Für die lineare Fitfunktion  $y = A + B \cdot x$  ergeben sich folgende Werte:

$$\begin{aligned} \text{Parameter } A &= -0,35908 \\ B &= 1,11455 \end{aligned}$$

Man sieht ganz deutlich die Zunahme in den Steigungen der linearen Fitting-Funktion, wenn die *AID* zunimmt. Setzt man die Steigungen *B* der Extrema (1. Messreihe, monokular; 4. Messreihe, Binokular) ins Verhältnis, so ergibt sich ein Unterschied von ca. 1,91.

Tabelle 7 zeigt die einzelnen Werte von *B* in Abhängigkeit der Messreihe.

**Tabelle 7:**

# Messreihe	Monokular/Anstieg B	Binokular/Anstieg B
1	0,58286	0,60582
2	0,61264	0,61588
3	0,9936	1,08113
4	0,97194	1,11455

### Interpretation der Steigung B:

Die Steigung *B* ändert sich in Abhängigkeit der jeweils neu hinzukommenden Abstandsinformationen, also wenn die *AID* erhöht wird. Es ist daher naheliegend, diesen Fakt genauer zu betrachten.

Allgemein gesehen endet ein logarithmischer Funktionsverlauf in einen Sättigungsbereich. Dies wurde im Abschnitt Schwellenwerte und dort konkret am „Webersches Gesetz“ gezeigt. Dies war auch der Anlass, das Fechner Gesetz einzuführen. Die experimentellen Daten der Versuchsreihe II befinden sich allerdings nicht in einem Sättigungsbereich, sondern im linearen Abschnitt.

Man kann aus der Steigung B folgendes ableiten:

Umso größer der Anstieg der Fitting-Funktion, desto weiter entfernt oder höher ist das Plateau des Sättigungsbereiches.

Unter dem Sättigungsbereich soll folgendes verstanden werden: Befindet man sich in einem Sättigungsbereich, so erzeugt eine dargebotene Reizänderung eine kaum merkliche Empfindungsänderung.

Im Experiment würde das folgende Situation bedeuten. Die Abstandsänderung der dargebotenen Stange wäre derart, dass dies im Vergleich zum Abstand der Referenzstange überhaupt nicht bemerkt werden würde. Da dies innerhalb der Versuchsreihe 2 nicht vorkam, ist es auch nicht verwunderlich, dass sich in den graphischen Auftragungen keine Sättigungsbereiche ergaben.

Auffallend ist hier, dass bei Zunahme der Abstandsinformationsdichte der Anstieg der Fitting-Funktion merklich zunimmt.

Das kann dann wie folgt interpretiert werden:

Wird die Abstandsinformationsdichte größer, vergrößert sich auch der Abstand zum Plateau des Sättigungsbereiches und eine dargebotene Reizänderung erzeugt noch eine merkliche Empfindungsänderung.

Die Abstands-Unterschiedsschwelle ist abhängig von den dargebotenen Abstandsinformationen. Ist die Abstandsinformationsdichte gering, resultiert daraus eine große Abstands-Unterschiedsschwelle. Daraus ergibt sich durch Kehrwertbildung der Abstands-Unterschiedsschwelle eine geringe Empfindlichkeit.

Bei einer großen Abstandsinformationsdichte ergibt sich dagegen eine kleine Abstands-Unterschiedsschwelle und damit eine große Empfindlichkeit, Abstandsänderungen zu visualisieren.

Als Fazit kann gesagt werden:

Umso größer die Steigung B der linearen Fitting-Funktion, desto besser das Vermögen des visuellen Systems, Abstandsänderungen zu visualisieren. Dieses Vermögen ist wiederum abhängig von der Darbietung der Abstandskriterien, also von tatsächlichen *AID*.

### **3.3.3 Fehlerbetrachtungen der Versuchsreihen I, II**

In beiden Versuchsreihen wurde bei der Fehlerabschätzung folgendes vorausgesetzt:

In beiden Experimentierreihen fließen die gemessenen Größen nicht in eine Funktion ein. Von daher erübrigt sich die Betrachtung einer Fehlerfortpflanzung.

Als Bestwert wurde jeweils der arithmetische Mittelwert der Einzelmessungen genutzt. Diese Mittelwerte wurden, mit allen innerhalb einer Messreihe erhaltenen verrechnet und die Standardabweichung gebildet. Da die Fehler der Einzelmessungen sehr ähnlich oder gleich waren, wurde darauf verzichtet, die Standardabweichungen der Einzelmessungen in die Mittelwertbildung mitzuberechnen.

Werden ein Mittelwert und seine Standardabweichung, die aus  $m$  Einzelmessungen mit  $m$  dazugehörigen Standardabweichungen besteht, gebildet, so spricht man von einem

„gewichteten Mittelwert mit Standardabweichung“. Darauf wurde hier aus obigen Gründen verzichtet.

**- Für die Fehlerrechnung der Versuchsreihe I haben sich folgende Werte ergeben:**

**Tabelle 8: Standardabweichung in %**

Messreihe	30,5 cm	94 cm	185 cm	285 cm	385 cm	589 cm
1. Monokular	16,95%	14,18%	9,78%	4,98%	2,89%	5,39%
Binokular	23,0%	18,4%	12,5%	6,9%	3,8%	5,35%
2. Monokular	23,89%	8,87%	11,20%	6,96%	2,71%	3,41%
Binokular	9,16%	6,74%	9,49%	8,71%	3,55%	3,70%
3. Monokular	19,13%	14,90%	10,12%	5,40%	2,99%	2,28%
Binokular	14,39%	11,85%	8,01%	6,20%	3,04%	2,13%
4. Monokular	10,33%	17,96%	11,93%	5,27%	1,65%	2,01%
Binokular	13,94%	10,39%	10,06%	6,25%	2,35%	1,74%

Für die Fehlerberechnung wurden jeweils die Mittelwerte aus 3 Einzeleinstellungen gebildet. Diese so gewonnenen Mittelwerte wurden mit den gesamten Mittelwerten innerhalb einer gesamten Messreihe (20 Versuchspersonen pro Messreihe) verrechnet und daraus die Standardabweichung abgeleitet.

In der Versuchsreihe I nehmen die Fehler mit zunehmender Entfernung der Stangenpaare ab. Dies geschieht bei den monokularen als auch bei den binokularen Einstellungen.

Der Fehler fällt umso geringer aus, desto größer die *AID* wird. Betrachtet man hier wieder die Extrema, so ergeben sich im Vergleich zwischen der 1. und 4. Messreihe folgende Fehlerentwicklungen:

**Tabelle 9: Gegenüberstellung der Standardabweichungen zwischen der 1. und 4. Messreihe in %**

Messreihe	30,5 cm	94 cm	185 cm	285 cm	385 cm	589 cm
1. Monokular	16,95%	14,18%	9,78%	4,98%	2,89%	5,39%
Binokular	23,0%	18,4%	12,5%	6,9%	3,8%	5,35%
4. Monokular	10,33%	17,96%	11,93%	5,27%	1,65%	2,01%
Binokular	13,94%	10,39%	10,06%	6,25%	2,35%	1,74%

Vergleicht man die Fehlerentwicklungen in Abhängigkeit zur Messreihe, so erkennt man qualitativ ähnliche Verläufe. Der Fehler ist bei geringer *AID* größer als bei hoher *AID*.

In der binokularen Einstellung ergibt sich fast eine Verdoppelung der Fehler. In der Entfernung von 589cm sogar mehr als das Zweifache.

Bei der monokularen Einstellung sind diese Unterschiede zwar tendenziell vorhanden, aber nicht so groß wie in der binokularen Einstellung.

Auf den ersten Blick könnte man vermuten, dass es sich hier um sehr große Fehler handelt. Bei psychophysikalischen Messungen sind die Standardabweichungen deshalb so groß, weil hier als Messgröße der Mensch mit seiner Subjektivität integriert ist.

**- Für die Fehlerrechnung der 2. Versuchsreihe haben sich folgende Werte ergeben:**

**Tabelle 10: Standardabweichung in %**

Messreihe	30,5 cm	94 cm	185 cm	285 cm	385 cm	485 cm	589cm
1. Monokular	18,37%	31,66%	35,04%	34,9%	31,87%	31,41%	29,01%
Binokular	17,74%	23,01%	25,66%	30,75%	24,70%	25,86%	20,54%
2. Monokular	16,67%	16,02%	15,95%	14,75%	15,97%	17,57%	13,18%
Binokular	16,78%	17,12%	15,41%	15,48%	18,12%	14,12%	13,19%
3. Monokular	27,49%	20,23%	17,89%	21,48%	20,58%	19,32%	16,11%
Binokular	24,36%	21,39%	20,67%	18,42%	16,19%	13,01%	15,71%
4. Monokular	29,98%	23,93%	21,44%	20,78%	25,47%	23,21%	17,25%
Binokular	24,4%	26,85%	25,33%	22,07%	21,84%	22,33%	28,76%

Hier nehmen die Standardabweichungen gegenüber der 1. Versuchsreihe zu. Das liegt an den verschiedenen Intentionen der beiden Versuchsreihen. In der 2. Versuchsreihe wurden Unterschiedsschwellenwerte gemessen. Da jedes Individuum einen subjektiven Abstands-Unterschiedsschwellenwert besitzt, sind die Standardabweichungen der Tabelle 10 nicht verwunderlich. Sie unterscheiden sich in ihrer Entwicklung gegenüber der Versuchsreihe 1. Dort existiert eine Relation zwischen der Abstandsinformationsdichte und den sich ergebenden Standardabweichungen. Diese Relation kann in der 2. Versuchsreihe nicht aufgestellt werden. Dass die Standardabweichungen sämtlich zweistellig sind, hängt mit dem Wesen einer Schwellenwertmessung zusammen. Man misst eine subjektive Vermögenleistung, die naturgemäß größeren Schwankungen unterliegt, als wenn man eine technische Messung umsetzt.

### 3.4 Diskussionen der Messdaten

In diesem Abschnitt sollen die aufbereiteten experimentellen Messdaten der 2 Versuchsreihen die vier aufgestellten Arbeitshypothesen verifizieren. Die vier aufgestellten Arbeitshypothesen werden einzeln abgehandelt.

1. Die subjektive visuelle Wahrnehmungsgröße ist von der *AID* wie folgt abhängig: Das visuelle System bewertet subjektiv die Wahrnehmungsgröße bei maximaler *AID* nach oben und relativ dazu, bei minimaler *AID* nach unten.
2. Die *AID* wird durch folgende Parameter bedingt:
  - a. die Akkommodation
  - b. der Konvergenzgrad

- c. die Querdisparation
- d. die Empirie
- e. das Netzhautbild

3. Im orthostereoskopischen Bereich (ca. 30–100 cm bei kleinen Gegenständen) ist die subjektive Wahrnehmungsgröße, ausgelöst durch die Größenkonstanzleistung des visuellen Systems, maximal unabhängig vom Sehwinkel. Des Weiteren genügt die Größenkonstanz qualitativ dem aufgestellten Formalismus aus Annahme 2.
4. Die Unbestimmtheit in der visuellen Wahrnehmungsentfernung genügt qualitativ dem aufgestellten Formalismus aus Annahme 2.

### - Beweise der aufgestellten Arbeitshypothese

Ausgangspunkt für die Aufstellung der Arbeitshypothese war die erste Annahme, dass die *AID* die wahrgenommene Größe eines physikalischen Objektes wie folgt beeinflusst:

Bei einem gegebenen Sehraum wird die wahrgenommene Größe bei hoher Abstandsinformationsdichte relativ zu einer niedrigen nach oben verrechnet. Das bedeutet, sie wird dann größer wahrgenommen. Bei einem niedrigen *AID* - Wert ergeben sich dann umgekehrte Verhältnisse. Aus diesem Ansatz und der empirischen Tatsache, dass die wahrgenommene Größe und Entfernung sich entgegengesetzt verhalten, führte zu einer qualitativen Formulierung.

Unter der Voraussetzung einer gegebenen Beobachtungssituation (konstanter Gesichtswinkel  $\alpha$ ) lässt sich folgendes Produkt (Objektgröße · Objektentfernung) bilden.

$$(1) S \cdot D \sim wG \cdot wE$$

hier ist: S = objektive Größe eines Objektes

D = objektive Entfernung des Objektes

wE = wahrgenommene Entfernung des Objektes

wG = wahrgenommene Größe des Objektes

Mit diesem konstanten Produkt, gebildet im physikalischen Raum, und dem reziproken Verhalten der wahrgenommenen Größe und Entfernung im Sehraum ergab sich eine qualitative Relation zwischen dem physikalischen Raum und dem Sehraum.

$$1. \text{ Fall: } AID \uparrow \Rightarrow wG \uparrow$$

$$\Rightarrow S \cdot D = wG \uparrow \cdot wE \downarrow$$

$$2. \text{ Fall: } AID \downarrow \Rightarrow wG \downarrow$$

$$\Rightarrow S \cdot D \sim wG \downarrow \cdot wE \uparrow$$

#### zu Punkt 1:

Die aufgestellte Abhängigkeit zwischen *AID* und visueller Wahrnehmungsgröße wird durch die Versuchsreihe I experimentell gut bestätigt. Dort zeigt sich in jeder einzelnen Messreihe

eine stetige Größenzunahme der eingestellten Stangenpaare, wenn Abstandskriterien zusätzlich hinzukommen und dadurch die *AID* erhöhten.

Quantitativ wirkt sich die Abweichung zwischen der subjektiven und der objektiven Größe in den ersten 285cm am stärksten aus.

Ab dem 5. Stangenpaar (Entfernung von 385cm) spielen die beiden visuellen Komponenten Akkommodation und Konvergenz in der Vermittlung einer Abstandsinformation eher eine untergeordnete Rolle. Dadurch erniedrigen sich die *AID* und die visuelle Wahrnehmungsgröße entsprechend analog. Die *AID* ist also auch entfernungsabhängig, bedingt durch physiologische Begebenheiten.

Der Unterschied zwischen der eingestellten und der objektiven Größe beträgt im Nahbereich bis maximal Faktor 4. Tabelle 11 soll die einzelnen Größen (in Winkelminuten) bei minimaler und bei maximaler Abstandsinformationsdichte gegenüberstellen.

**Tabelle 11:**

	1. Stangenpaar	2. Stangenpaar	3. Stangenpaar	4. Stangenpaar
objektiv	323,22'	323,22'	323,22'	323,22'
Minimale <i>AID</i>	458,74'	427,7'	356,26'	334,81'
Maximale <i>AID</i>	1405,9'	688,34'	422,94'	370,09'

Die Abweichungen zwischen objektiv- und subjektiv eingestellter Größe, wird umso größer, desto mehr Abstandskriterien zugelassen werden und dadurch sich eine Erhöhung der *AID* ergibt.

Man kann also eindeutig einen kausalen Zusammenhang zwischen der Abstandsinformationsdichte und der resultierenden subjektiven Wahrnehmungsgröße aufstellen. Im nächsten Schritt wird gezeigt, dass sich die beiden Fallsituationen durch die im Versuch erhalten Messdaten qualitativ bestätigen:

1. Fall:  $AID \uparrow \Rightarrow wG \uparrow$

$\Rightarrow S \cdot D \sim wG \uparrow \cdot wE \downarrow$

2. Fall:  $AID \downarrow \Rightarrow wG \downarrow$

$\Rightarrow S \cdot D \sim wG \downarrow \cdot wE \uparrow$

Die folgende Umformung soll eine Möglichkeit ergeben, Einstellungen am gleichen Stangenpaar bezüglich der wahrgenommenen Entfernung zu vergleichen. Da es sich um eine konstante Relation handelt, gilt dann:

$$wE \sim (S \cdot D) / wG$$

Hierbei handelt es sich nicht um eine quantitative Bestimmung der Größe  $wE$ , sondern nur um eine qualitative Betrachtung eben dieser Größe. Die 4. Messreihe unter binokularen Bedingungen entspricht der maximalen *AID* und die 1. Messreihe monokular der minimalen *AID*.

**Tabelle 12:**

	1.Stangp.	2.Stangp.	3.Stangp.	4.Stangp.	5.Stangp.	7.Stangp.
Physik. Entfernung	30,5cm	94cm	185cm	285cm	385cm	589cm
wE bei max. „AID“	7,0cm	45,6cm	141,3cm	248,9cm	371,1cm	629,2cm
wE bei min. „AID“	21,6cm	71,1cm	167,8cm	275,2cm	384,3cm	592,3cm

Die Werte aus der Tabelle 12 sollen nur die Tendenz widerspiegeln, dass die beiden oben dargestellten Fallsituationen sich als Konsequenz ergeben, wenn man ein Objekt direkt unter verschiedenen *AID* Werten vergleichen würde. Dies ergibt sich aber beim freien Sehen nicht und deshalb kann man dies auch nicht beobachten. Man kann aber eine künstliche Situation erzeugen, indem man ein Objekt binokular und anschließend monokular (durch Zukneifen eines Auges) betrachtet.

Man darf diesen Eigenversuch nicht mit einem abgedeckten Auge, sondern nur mit einem zugekniffenden Auge umsetzen. Beim Abdecken des Auges, z.B. durch die Handfläche, ist dieser Effekt nicht so deutlich zu erkennen. Dies ist durch die „binokulare Sehrichtungsgemeinschaft“ nach Hering begründet. Das Heringsche Gesetz besagt, dass sich beide Sehlinien im angeblickten Objekt schneiden, ob es abgedeckt ist oder nicht. Dies erzeugt naturgemäß den Konvergenzgrad. Eben diesen will man ja im Eigenversuch bei der monokularen Betrachtung ausschalten.

Mit dem Zukneifen eines Auges wird dieses Gesetz außer Kraft gesetzt.

Bei genauer Beobachtungsgabe und wenn man dies ein paar Mal wiederholt kann man dann die beiden Fallsituationen gut wahrnehmen. Binokular scheint das Objekt etwas größer und näher herangerückt gegenüber der monokularen Betrachtung zu sein. Allerdings setzt dies eine funktionierende Stereopsis voraus. Nur dann kann man die *AID* variieren und diesen Effekt wahrnehmen.

### **zu Punkt 2:**

Um diesen Punkt experimentell zu verifizieren, werden die Messdaten der Versuchsreihe II mit berücksichtigt.

Dass die *AID* eine entfernungsabhängige Größe ist, kann man aus Punkt 1 gut ablesen. Dies begründet sich dort durch die physiologischen Begebenheiten der Akkommodation und Konvergenz. Daraus ergibt sich dann deren Einflussnahme in die *AID*. Dies wurde aber schon durch zahlreiche Untersuchungen belegt, wie in der Durchsicht der wissenschaftlichen Arbeiten aufgeführt wurde.

Hier soll zusätzlich und unterstützend die Abstandsunterschiedsschwelle betrachtet werden, da sie auch von den Parametern, welche die *AID* bedingen, abhängig ist und selbst aber auch die *AID* beeinflusst. Das heißt also: Wenn Parameter des Abstandes die Abstandsunterschiedsschwelle beeinflussen und eben diese Schwelle die *AID* beeinflusst, so folgt daraus, dass eben diese Parameter definitiv die *AID* bedingen.

Das bedeutet, dass die Abstandsunterschiedsschwelle ambivalenten Charakter besitzt. Dieser Umstand muss etwas genauer erläutert werden.

Auf der einen Seite handelt es sich um eine Vermögenleistung des visuellen Systems, welches abhängig ist von den vorliegenden Abstandsinformationen, die ihrerseits die *AID* konstituieren. Auf der anderen Seite bedingt sie aber auch die „AID“ durch ihre Güte und

Qualität, beeinflusst also umgekehrt auch die *AID*. In der Versuchsreihe 2 wurde auf die Vermögensleistung des visuellen Systems eingegangen und deren Abhängigkeit von der *AID* betrachtet und untersucht. Hier soll nur erörtert werden, wie die Abstandsunterschiedsschwelle von den Parametern des Abstandes abhängig ist, welche auch die *AID* bedingen.

Den beeinflussenden Charakter, welche die Abstandsunterschiedsschwelle auf die *AID* ausübt, soll hier nicht untersucht, aber kurz erwähnt werden:

Eine minimale Abstandsunterschiedsschwelle erzeugt eine große *AID* und damit die Konsequenzen aus Punkt 1.

Vergrößert sich aber die Abstandsunterschiedsschwelle, so erniedrigt sich die *AID* und erzeugt wieder die Konsequenzen aus Punkt 1. Diese beiden Erläuterungen werden in Punkt 4 betrachtet.

Um den Abstand eines physikalischen Objektes zu erfassen, hat ein Beobachter 3 verschiedene Anhaltspunkte:

1. physiologische Anhaltspunkt

- die Akkommodation
- der Konvergenzgrad
- die Querdisparation

2. psychologischer Anhaltspunkt

- die Empirie

3. physikalischer Anhaltspunkt

- das Netzhautbild

Durch die Messdaten der Versuchsreihe II konnte eindeutig gezeigt werden, dass die Abstandsunterschiedsschwelle umso geringer ausfällt, desto mehr Abstandskriterien hinzukamen, also die *AID* erhöht wurde. Eine geringere Schwelle bedeutet eine hohe Güte.

Die Querdisparation konnte auch hier nicht als Abstandsinformationsquelle isoliert eingeführt werden. Sie floss aber als Einflussnehmende Größe in den Konvergenzgrad mit hinein. Das Netzhautbild ist mit dem psychologischen Gefühl der Nähe überlagert.

Der Zusammenhang zwischen unterschiedlich verwertbaren Abstandsinformationen und die dadurch bedingten unterschiedlichen Abstandsunterschiedsschwellen des visuellen Systems bestätigen zusätzlich die Annahme, dass die eingeführten Parameter des Abstandes tatsächlich als solche zu betrachten sind. Sie konstituieren die *AID* und beeinflussen aber auch die Abstandsunterschiedsschwelle. Die wiederum beeinflusst die *AID*, wie oben schon geschildert. Wären also diese Parameter keine Konstituenten der *AID*, so müssten dann die Unterschiedsschwellen der Versuchsreihe II in etwa gleich sein, da die Abstandsunterschiedsschwelle ambivalent ist.

Da aber die Änderung der Randbedingungen sich auf die verwertbaren Abstandsinformationen bezogen und damit die *AID* jeweils geändert wurde, ist die aufgestellte Annahme über die Parameter des Abstandes berechtigt und zusätzlich untermauert.

In Abschnitt 3.2.1.2 wurde graphisch die Differenz zwischen objektiver/subjektiver Einstellung bei konstantem Abstand und Variation der *AID* dargestellt. Die Differenzen stiegen umso größer an, je mehr Abstandsinformationen vorlagen und desto geringer der Prüfabstand war. Das bestätigt noch einmal die Entfernungsabhängigkeit der *AID* und die sie bedingenden Parameter.

### zu Punkt 3:

Um den Punkt 3 experimentell zu verifizieren, wurden die aufbereiteten Messdaten der Versuchsreihe I herangezogen (3.3.1.3). Das Stangenpaar in der Entfernung von 94cm zeigte in allen 8 Messreihen (monoular und binokular) die maximalsten Abweichungen gegenüber der Zentralprojektion. In einer Entfernung von 30,5cm ergaben sich in allen 8 Messreihen (monokular und binokular) die zweitgrößten Einstellungen.

Die graphischen Darstellungen in (3.2.1) und (3.2.1.2) untermauern obige Aussage zusätzlich. Nach Kienle ist für Objektgrößen, entsprechend einer Ellenbogenlänge, der orthostereoskopische Bereich zwischen 30 bis 100cm. Da die Abweichungen zwischen den subjektiven - und objektiven Einstellungen in einer Entfernung von 94cm am größten waren, wurden auch nur diese bei der Bildung der Brunswik-Verhältnisse berücksichtigt. Die untere Grenze entspricht 30cm und die sich dort ergebenden Einstellungen waren etwas kleiner als die bei 94cm, aber immer merklich größer als die bei 185, 285, 385 und 589cm. Für unsere Betrachtung reicht aber die Bildung des Brunswik-Verhältnisses in der Entfernung von 94cm aus, da sie sich qualitativ auf die Entfernung von 30,5cm übertragen läßt und somit für den ganzen orthostereoskopischen Bereich gilt.

Die Bildung der Brunswik-Verhältnisse (Maß für die Größenkonstanzleistung) und ihre Darstellung in Prozent zeigen für den orthostereoskopischen Bereich sehr hohe Werte. Bei maximaler *AID* wird ein Wert von 64,76% erreicht. Das bedeutet, dass die dort eingestellte visuelle Wahrnehmungsgröße die größte Unabhängigkeit von der Information, vermittelt durch das Netzhautbild, aufweist. Mit Abnahme der *AID* verringert sich dieser Wert.

Außerhalb des orthostereoskopischen Bereiches verringert sich der Größenkonstanzgrad merklich. Er strebt bei einer betrachteten Entfernung von 485cm/589cm und bei minimalster *AID*, dem Wert 2,19% zu. Dies bedeutet wiederum, dass die dortige subjektive Einstellung die geringste Unabhängigkeit von der Information, vermittelt durch das Netzhautbild, aufweist.

Auch kann man das Verhältnis der subjektiven Wahrnehmungsgröße zu seiner objektiven Größe bilden, um zu einer analogen Aussage zu kommen. Denn in der Entfernung 94cm und bei maximaler *AID* nimmt dieses Verhältnis den größten Wert ein. Das ist gleichwertig mit der Aussage: die subjektive Wahrnehmungsgröße hat im orthostereoskopischen Bereich die größte Differenz zur Zentralprojektion (= konstanter Gesichtswinkel).

Die aufgestellte Annahme, dass im orthostereoskopischen Bereich die maximalste Unabhängigkeit der visuellen Wahrnehmungsgröße vom Gesichtswinkel vorliegt, wird durch die Messdaten gut bestätigt. Das Brunswik-Verhältnis bestätigt dies auch, sollte aber dennoch als qualitative Tendenz betrachtet werden.

Als nächstes wird überprüft, ob die Größenkonstanzleistung mit folgendem Modell qualitativ erklärt werden kann.

$$S \cdot D \sim wG \cdot wE$$

Da die Größenkonstanz sich bei Entfernungsvariationen ergibt, wird die Relation (1) zu folgendem Ausdruck umgeformt:

$$(2) S / wG \sim wE / D$$

1. Fall:  $D \downarrow$  und  $S \uparrow$

$$S \uparrow / wG \downarrow \sim wE \uparrow / D \downarrow$$

Durch die Verringerung der physikalischen Entfernung vergrößert sich das Netzhautbildes und damit  $\alpha$ .

Die Größenkonstanz verrechnet die Wahrnehmungsgröße nach unten und erzeugt simultan eine Vergrößerung der wahrgenommenen Entfernung. Ob dies nur die Konsequenz eines Formalismus darstellt oder ob es sich qualitativ durch die Messdaten bestätigen wird, soll im Folgenden untersucht werden.

Angenommen die Referenzgröße von 45,6cm in einer Entfernung von 485cm, würde man in einer Entfernung von 94cm platzieren. Für  $\alpha$  würde sich dann objektiv in 485cm = 5,384° und in 94cm = 27,26° ergeben. Tatsächlich ergibt sich aber in der 4. Messreihe (binokular) der Wert 94cm = 11,47°.

Setzt man diese Größen in Relation (2) ein, so ergibt sich:

$wE = (27,26^\circ / 11,47^\circ) \cdot 94\text{cm} = 223,4\text{cm}$ . Die wahrgenommene Entfernung müsste sich auf diesen Wert simultan vergrößern, damit die obige Relation erfüllt bleibt.

Im Fall einer Vergrößerung der physikalischen Entfernung müsste die wahrgenommene Größe des Objektes vergrößert werden, da die Verringerung des Netzhautbildes und damit  $\alpha$ , durch die Größenkonstanz nach oben verrechnet wird. Hier müsste sich dann simultan eine Verkleinerung der wahrgenommenen Entfernung ergeben.

2. Fall:  $D \uparrow$  und  $S \downarrow$

$$S \downarrow / wG \uparrow \sim wE \downarrow / D \uparrow$$

Angenommen die Referenzgröße von 45,6cm in einer Entfernung von 485cm, würde man in einer Entfernung von 589cm platzieren. Für  $\alpha$  würde sich dann objektiv in 485cm = 5,384° und in 589cm = 4,43° ergeben. Tatsächlich ergibt sich aber in der 4. Messreihe (binokular) der Wert 589cm = 5,04°.

Hier würde sich dann mit Relation (2) ein  $wE = (4,43^\circ / 5,04^\circ) \cdot 589\text{cm} = 517,71\text{cm}$  ergeben. Die wahrgenommene Entfernung müsste sich auf diesen Wert simultan verkleinern, damit die obige Relation erfüllt bleibt.

#### zu Punkt 4:

Bevor überprüft wird, ob man die Unbestimmtheit der wahrgenommenen Entfernung mit dem Formalismus aus der Annahme 2 qualitativ beschreiben und erklären kann, soll vorher ein anderer Aspekt betrachtet werden.

In der Versuchsreihe II wurden Abstandsunterschiedsschwellen unter verschiedenen dargebotenen Abstandsinformationen gemessen. Diese Vermögensleistung ist deshalb wichtig für das visuelle System, damit es die gegenseitigen Lagebeziehungen der physikalischen Objekte untereinander auflösen kann und im Bezug zum Beobachter selbst visualisieren kann. Diese gegenseitige Lage kann sich auch auf ein betrachtetes Objekt und ein zusätzliches Objekt vor dem Beobachter beziehen. Dieser Aspekt entspricht einer realistischen Beobachtungssituation und fließt dann mit in die wahrgenommene Entfernung ein.

Auch ergibt diese Vermögensleistung in ihrer Güte folgende Konsequenzen:

Umso größer die Abstandsunterschiedsschwelle des visuellen Systems ist, desto geringer ist die *AID*, und der Fehler in der Einschätzung des Objektortes wird größer. Hat das visuelle System eine geringe Abstandsunterschiedsschwelle, erhöht sich die *AID* und umso geringer ist dann auch der Fehler in der Einschätzung des Objektortes. Hierbei handelt es sich natürlich um eine individuelle Schwelle. Aber durch die Beeinflussung der *AID* durch eben diese Schwelle, ergeben sich theoretisch auch beeinflussende Momente in der wahrgenommenen Größe. Dieser Aspekt wird aber nicht betrachtet.

Die Unbestimmtheit der wahrgenommenen Entfernung setzt einen konstanten Gesichtswinkel  $\alpha$  voraus. Mit der Größenkonstanzleistung, die im freien Sehen immer enthalten ist soll Relation (2) auf ihre quantitative Erklärungsmöglichkeit hin untersucht werden.

1. Fall:  $wG \downarrow$  und  $wE \uparrow$

Da die Überschätzung der Entfernung im Nahbereich vorliegt, muss dort die wahrgenommene Größe nach unten verrechnet werden, da sich das durch die Größenkonstanz zwangsläufig ergibt.

$$S / wG \downarrow \sim wE \uparrow / D$$

Damit die Relation gleich bleibt, erzeugt die Größenkonstanz im Nahbereich eine Vergrößerung der wahrgenommenen Entfernung.

2. Fall:  $wG \uparrow$  und  $wE \downarrow$

Da die Unterschätzung der Entfernung im Fernbereich stattfindet, muss dort die wahrgenommene Größe nach oben verrechnet werden. Daraus ergibt sich dann:

$$S/wG \uparrow \sim wE \downarrow / D$$

Damit die Relation auch hier gleich bleibt, erzeugt die Größenkonstanz im Fernbereich eine Verringerung der wahrgenommenen Entfernung.

Bei Betrachtung der ermittelten Ergebnisse zu Punkt 3, welche unmittelbar in die Anwendbarkeit von Punkt 4 einfließt, kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Relation (2) quantitative Bestimmungen der wahrgenommenen Entfernung und die Unbestimmtheit in der wahrgenommenen Entfernung zulässt.

Sie kann höchstens qualitativ das Verhalten widerspiegeln, dass die wahrgenommene Größe und die wahrgenommene Entfernung zwei simultan ablaufende Prozesse sind, die sich hierbei reziprok verhalten und die beschriebenen Konsequenzen nach sich zieht.

Über die Gründe, warum eine quantitative Bestimmung eher unwahrscheinlich ist, kann zum einen in der Unvergleichbarkeit des physikalischen und des visuellen Wahrnehmungsraums begründet sein. Diese Ansicht vertrat auch E. Hering. Wenn also Sehraum und physikalischer Raum inkommensurabel sind, dann besteht nicht die Möglichkeit des Messens mit gleichem Maß, da ja die optischen Empfindungen in ihren räumlichen Anordnungen ein psychisches Phänomen sind und mit der physikalischen Umwelt nicht vergleichbar sind.

Das würde aber auch die Konsequenz nach sich ziehen, dass Punkt 1 in seiner Beweisführung fragwürdig ist, da dort die Relation (1) in  $wE \sim (S \cdot D) / wG$  umgeformt wurde. Auch dort lag eine Relation zwischen physikalischem Raum und Sehraum vor.

Da aber die in Annahme 1 sich auf die *AID* beziehenden Aussagen experimentell bewiesen wurden, kann folgender Versuch unternommen werden, Relation (1) und ihre daraus folgenden Konsequenzen noch zu verifizieren. Die Relation (1) kann man komplett auf den Sehraum übertragen, ohne dabei den physikalischen Raum zu tangieren. Dass dies notwendig und möglich ist, hängt mit folgendem Sachverhalt zusammen.

Man kann in einem gegebenen Sehraum Größenverhältnisse unter den wahrgenommenen Objekten und deren gegenseitige Lage entsprechend vergleichen. Man kann sie auch mit den Größenverhältnissen und den gegenseitigen Lagen der ihnen entsprechenden physikalischen Objekte vergleichen.

Beispiel 1 soll den neuen Ansatz untermauern.

Betrachtet man binokular ein Objekt im physikalischen Raum, so wird es bei monokularer Betrachtung etwas kleiner und etwas weiter entfernt wahrgenommen.

Daraus ergibt sich folgender neuer Ansatz für die Relation (1). Es gilt:

$$(1') \quad wG' \cdot wE' \sim wG'' \cdot wE'' = \text{Konstant}$$

Hier ist:

$wG'$  = wahrgenommene Größe des Objektes bei binokularer Betrachtung

$wE'$  = wahrgenommene Entfernung des Objektes bei binokularer Betrachtung

$wG''$  = wahrgenommene Größe des Objektes bei monokularer Betrachtung

$wE''$  = wahrgenommene Entfernung des Objektes bei monokularer Betrachtung

Beide Beobachtungssituationen erfolgen im selben Sehraum. Der einzige Unterschied besteht in der „*AID*“, da bei monokularer Betrachtung der Konvergenzgrad fehlt. Die Netzhautbilder sind immer noch dieselben. Allerdings, wie schon paar Mal erwähnt, setzt diese Beobachtungssituation eine funktionierende Stereopsis voraus. Überträgt man die Relation (1') auf die in Punkt 1 dargestellten Fallsituationen, so ergeben sich analog wieder dieselben qualitativen Situationen:

$$1. \text{ Fall: } AID \uparrow \Rightarrow wG' \uparrow$$

$$\Rightarrow wG' \uparrow \cdot wE' \downarrow = \text{Konstant}$$

$$2. \text{ Fall: } AID \downarrow \Rightarrow wG' \downarrow$$

$$\Rightarrow wG'' \downarrow \cdot wE'' \uparrow = \text{konstant}$$

Hier ergibt die qualitative Relation wieder folgende Interpretation: Bei Erhöhung der *AID* vergrößert sich die wahrgenommene Größe und erzeugt simultan eine scheinbare Verkleinerung der Entfernung (binokulare Betrachtung). Bei Reduzierung der *AID* verkleinert sich die wahrgenommene Größe und erzeugt simultan eine scheinbare Vergrößerung der Entfernung (monokulare Betrachtung).

## Beispiel 2: Mondphänomen

Das Mondphänomen kann analog wieder mit diesem Formalismus qualitativ erklärt werden. Seine physikalische Größe und Entfernung in unserer Betrachtungsweise ist am Horizont und am Zenit der gleiche. Es gilt auch hier:

$$wG' \cdot wE' \sim wG'' \cdot wE'' = \text{Konstant}$$

Die *AID* ist, wenn der Mond am Horizont steht, größer als am Zenit, da am Horizont die Entfernungskriterien zahlreicher sind als am Zenit.

Analog zu Beispiel 1 ergeben sich wieder beide Fallsituationen die wieder ausschließlich von der *AID* abhängig sind:

$$1. \text{ Fall: } AID \uparrow \Rightarrow wG' \uparrow$$

$$\Rightarrow wG' \uparrow \cdot wE' \downarrow = \text{Konstant}$$

$$2. \text{ Fall: } AID \downarrow \Rightarrow wG' \downarrow$$

$$\Rightarrow wG'' \downarrow \cdot wE'' \uparrow = \text{konstant}$$

Im ersten Fall wird der Mond größer wahrgenommen, da dort die *AID* höher ist. Die Konsequenz daraus ist die scheinbare Verkleinerung der wahrgenommenen Entfernung. Im zweiten Fall erzeugt die Erniedrigung der *AID* einen kleiner wahrgenommenen Mond und simultan eine scheinbare Vergrößerung der wahrgenommenen Größe.

Mit der neu eingeführten Relation (1')  $wG' \cdot wE' \sim wG'' \cdot wE'' = \text{konstant}$ , kann man also analog diese Phänomene qualitativ beschreiben. Daraus ergibt sich die Berechtigung der Annahme 1 und dem ersten Teil der Annahme 2. Der zweite Teil aus Annahme 2 wurde aus Relation (1) abgeleitet. Ob dies aus Relation (1') möglich ist, soll als nächstes geprüft werden. Mit  $wG' \cdot wE' \sim wG'' \cdot wE'' = \text{konstant}$  würde sich folgender Ausdruck ergeben:

$$(2') wG' / wG'' \sim wE'' / wE'$$

Die Relation (2') eignet sich jedoch nicht als Formalismus zur Beschreibung der Größenkonstanz, da Relation (1') einen konstanten Sehraum voraussetzt oder zumindest ein konstantes vergleichbares Produkt  $S \cdot D$  im Außenraum. Die Voraussetzung für Relation (1') lautete ja wie folgt:

Man kann in einem gegebenen Sehraum Größenverhältnisse unter den wahrgenommenen Objekten und deren gegenseitige Lage entsprechend vergleichen. Man kann sie auch mit den Größenverhältnissen und den gegenseitigen Lagen der ihnen entsprechenden physikalischen Objekte vergleichen.

Da die Größenkonstanz aus einem dynamischen Prozess heraus resultiert, kann man sie nicht mit Relation (2') beschreiben.

Als letztes soll überprüft werden, ob sich die Unbestimmtheit der wahrgenommenen Entfernung mit der obigen Voraussetzung und dem sich daraus ableitenden Formalismus erklären lässt. Die Unbestimmtheit der wahrgenommenen Entfernung ergibt sich aus einer statischen (konstanten) Situation. Beim Beobachten von weit entfernten Objekten (z.B. im Gebirge), zeigt sich das Unterschätzen von Entfernungen. Ein Abstand wird als geringer gegenüber seinem tatsächlichen physikalischen Abstand wahrgenommen. Im Nahbereich kehren sich die Verhältnisse um. Nach Voraussetzung kann man wahrgenommene Größenverhältnisse und ihre gegenseitige Lage mit den Größenverhältnissen und den

gegenseitigen Lagen ihrer entsprechenden physikalischen Objekte vergleichen. Daraus ergibt sich dann:

$$(3) \ wG \cdot wE \sim S \cdot D = \text{konstant}$$

Formal sieht Relation (3) aus wie Relation (1). Es soll aber aus Gründen der Übersicht als Relation (3) bezeichnet werden.

Mit der Größenkonstanzleistung, die im freien Sehen immer enthalten ist, soll Relation (3) auf ihre quantitative Erklärungsmöglichkeit hin untersucht werden.

1. Fall:  $wE > D$

Da die Überschätzung der Entfernung im Nahbereich vorliegt, muss dort die wahrgenommene Größe nach unten verrechnet werden, da sich das durch die Größenkonstanz zwangsläufig ergibt. Bei Punkt 3 wurde gezeigt, dass sich der Winkelwert der eingestellten Größe in 94cm gegenüber dem objektiven Wert merklich unterscheidet. Es ergab sich dort  $S > wG$ . Qualitativ bedeutet dies: Damit Relation (3) konstant bleibt, erzeugt die Verringerung der wahrgenommenen Größe gegenüber der objektiven Größe eine Vergrößerung der wahrgenommenen Entfernung gegenüber der objektiven Entfernung.

Es gilt:  $S > wG \Rightarrow wE > D$ .

2. Fall:  $wE < D$

Da die Unterschätzung der Entfernung im Fernbereich stattfindet, muss dort die wahrgenommene Größe nach oben verrechnet werden. Bei Punkt 3 wurde dargestellt, dass sich der Winkelwert ab einer Entfernung von 589cm gegenüber dem objektiven Wert vergrößert. Es ergab sich dort  $S < wG$ . Qualitativ bedeutet dies: Damit Relation (3) konstant bleibt, erzeugt die Vergrößerung der wahrgenommenen Größe gegenüber der objektiven Größe eine Verringerung der wahrgenommenen Entfernung gegenüber der objektiven Entfernung.

Es gilt:  $S < wG \Rightarrow wE < D$

Die Relation (3) genügt einer qualitativen Beschreibung der Unbestimmtheit in der wahrgenommenen Entfernung.

## 4. Zusammenfassung und Ausblick

Als Fazit kann man folgendes zusammenfassend sagen:

Die aufgestellte Arbeitshypothese wurde durch die beiden Versuchsreihen verifiziert, denn die Ergebnisse ergaben folgendes:

- In den Messreihen der Versuchsreihe I ist jeweils ein Anstieg der eingestellten Größe, je mehr Abstandsinformationen zugelassen wurden, zu verzeichnen. Das bedeutet, der Anstieg wurde umso größer, desto größer die *AID* wurde. Auch waren in allen Messreihen die monokularen Größeneinstellungen, bei sonst konstanter *AID*, gegenüber der binokularen Größeneinstellung geringer. Bei Verringerung der Einstellentfernung wurden die Abweichungen zwischen den subjektiven und den objektiven Größen ebenfalls größer. Das heißt also, die subjektive visuelle Wahrnehmungsgröße ist von der *AID* wie folgt abhängig: Das visuelle System bewertet subjektiv die Wahrnehmungsgröße bei maximaler *AID* nach oben und relativ dazu, bei minimaler *AID* nach unten.

- Dass die aufgestellten Parameter die *AID* bedingen, konnte durch die 1. Messreihe gezeigt werden, da der jeweilige Anstieg der eingestellten Größe, nur durch die Variation eines Parameters erfolgte.

Die Querdisparation konnte aber hier nicht als Parameter der die *AID* bedingt isoliert untersucht werden. Bei den meisten Probanden ergaben sich sehr schnell Doppelbilder und erzeugten bei ihnen ein Unbehagen. Aber dennoch floss dieser Parameter als einflussnehmende Größe in den Konvergenzgrad mit ein. Das Netzhautbild konnte nur kombiniert mit dem psychologischen Gefühl der Nähe isoliert betrachtet werden. Damit die Voraussetzungen in beiden Versuchen gleich waren, wurde in der Versuchsreihe II unter gleichen Versuchsbedingungen wie in der Versuchsreihe I gemessen. Auch hier wurden die Abstandsinformationen von minimal bis maximal sukzessive zugelassen.

Durch die Messdaten der Versuchsreihe II konnte eindeutig gezeigt werden, dass die Abstandsunterschiedsschwelle umso geringer ausfällt, desto mehr Abstandskriterien hinzukamen, also die *AID* erhöht wurde. Analog kehren sich die Verhältnisse um, wenn die *AID* erniedrigt wird.

Durch diesen kausalen Zusammenhang zwischen der Abstandsunterschiedsschwelle des visuellen Systems und der Güte der *AID* bestätigt sich zusätzlich die Annahme, dass die eingeführten Parameter des Abstandes tatsächlich als solche zu betrachten sind und die *AID* konstituieren. Denn wären sie keine Konstituenten der *AID*, so müssten die Unterschiedsschwellen der Versuchsreihe II in etwa gleich sein.

Da aber die Änderung der Randbedingungen sich auf die verwertbaren Abstandsinformationen bezogen und somit die *AID* jeweils geändert wurde, ist die aufgestellte Annahme über die Parameter, welche die *AID* bedingen, berechtigt.

- Dass im orthostereoskopischen Bereich die subjektiven Größeneinstellungen gegenüber der Zentralprojektion am weitesten auseinander liegen, bestätigte sich durch alle Messreihen der Versuchsreihe I. In diesem Bereich existiert die maximale Unabhängigkeit der visuellen Wahrnehmungsgröße vom Gesichtswinkel.

In diesem Bereich liegt eine sehr hohe Güte in der Größenkonstanzleistung des visuellen Systems vor.

Dass die Größenkonstanz qualitativ dem aufgestellten Formalismus aus Annahme 2 genügt und die aufgestellte qualitative Relation sie beschreibt, konnte nicht gezeigt werden. Das begründet sich durch das Zustandekommen der Größenkonstanz. Sie resultiert bekanntlich aus

einer Entfernungsänderung. Je nach dem, ob sich ein Objekt dem Beobachter nähert oder entfernt, setzt diese Bildgrößenkompensation ein. Von daher unterliegt sie einem dynamischen Prozess und kann dadurch mit Relation (2') nicht beschrieben werden.

- Mit der Relation 2' kann man qualitativ die Unbestimmtheit in der visuellen Wahrnehmungsentfernung beschreiben und qualitativ erklären. Der Aspekt der Abstandsunterschiedsschwelle ist etwas verwirrend. Auf der einen Seite handelt es sich um eine Vermögensleistung des visuellen Systems, welches abhängig ist von den vorliegenden Abstandsinformationen, die ihrerseits die *AID* bedingen. Auf der anderen Seite bedingt die Abstandsunterschiedsschwelle die *AID* durch ihre Güte und Qualität, beeinflusst also umgekehrt auch die *AID*.

In der Versuchsreihe 2 wurde auf die Vermögensleistung des visuellen Systems und deren Abhängigkeit von den Parametern eingegangen, die auch die *AID* bedingen. Dies diente dazu, zusätzlich zu zeigen, dass es sich bei diesen Parametern um Parameter handelt, welche die *AID* bedingen. Die Argumentationskette lautete wie folgt: Die Abstandsunterschiedsschwelle beeinflusst die *AID*.

Die betrachteten Parameter beeinflussten die Abstandsunterschiedsschwelle, dass experimentell verifiziert wurde. Daraus folgte dann, dass eben diese Parameter auch die *AID* bedingen. Diese Argumentation diente nur als zusätzliches Hilfsmittel.

Bei Punkt 4 sollte die Abstandsunterschiedsschwelle und ihr Einfluss auf die Unbestimmtheit hin betrachtet werden. Dies hat aber nur sekundäre Relevanz, da hier die Anwendung der Relation 2' im Vordergrund stand.

- Ob die Fitting-Funktion, welche die Messdaten der Versuchsreihe I approximiert, sich als Algorithmus für die Darstellung einer Bewegungssimulation eignet, kann noch nicht gesagt werden. Es müssen noch Untersuchungen umgesetzt werden, welche die Diagonalebewegung beschreiben. In der stirnfrontalen Vor- und Zurückbewegung ist der simulierte Bewegungsablauf mit der Fitting-Funktion gegenüber der linearen Darstellung realistischer. Dies ist in der ersten 100cm Raumtiefe besonders merklich, da die Fitting-Funktion die Größenkonstanzleistung des visuellen Systems berücksichtigt.

Die auf dem konventionellen Computerspielmarkt eingesetzten Algorithmen für die Darstellung von Vor- und Zurückbewegungen sind dagegen nahezu linear, welches dem Beobachter einen etwas unnatürlichen Seheindruck vermittelt.

Die Fitting-Funktion könnte auch für die Simulation von Zeichentrickfilmen verwendet werden. Auch dort wird die Größenkonstanzleistung des visuellen Systems nicht berücksichtigt.

Aber gerade diese Konstanzleistung gestaltet die Größenvariation der wahrgenommenen Objekte bei Entfernungsänderungen. Dies ist besonders im orthostereoskopischen Bereich merklich.

## **Anhang**

### **Begriffsverzeichnis mit kurzer Erklärung**

#### **Adaptation**

DIN 5340-5

Vorgang der Anpassung des visuellen Systems an veränderten Sehbedingungen, bezüglich ihrer Leuchtdichten.

#### **Akkommodation**

DIN 5340-11

Vorgang der Brechwertänderung eines Auges durch das Akkommodationssystem zur Einstellung auf eine bestimmte Objektentfernung.

#### **Akkommodation, psychische**

Synonym: Akkommodation, proximale

Durch nahe reale Objekte aufgrund des Bewusstseins der Nähe ausgelöste Nahakkommodation.

#### **AC/A Quotient**

Dimension Länge

Einheit Zentimeter

Diejenige Summe aus akkommodativer und psychischer Vergenz, die mit der Änderung der Objektentfernung um eine Dioptrie gekoppelt ist.

#### **Ames-Raum**

Trapezförmiger Raum mit unterschiedlicher Höhe gegenüberliegender Wände, bei dem Fenster und Einrichtungsgegenstände so schief gestaltet sind, dass der Raum insbesondere bei monokularem Blick ohne Bewegungsparallaxe normal rechtwinklig erscheint. Gewöhnliche Gegenstände in diesem Raum erscheinen verzerrt, und eine sich in dem Raum bewegend Person scheint ihre Größe zu ändern.

#### **Binokularsehen**

DIN 5340-50

Oberbegriff für alle Arten von Simultansehen beider Augen.

#### **Brechungsgesetz**

Synonym: Snelliussches Gesetz

Gesetz zur rechnerischen Ermittlung des Verlaufs eines an der Grenzfläche zweier Medien gebrochenen Lichtstrahls. Das Produkt aus der Brechzahl  $n$  im ersten Medium und dem Sinus des Einfallswinkels  $\varepsilon$  ist gleich dem Produkt aus der Brechzahl  $n'$  im zweiten Medium und dem Sinus des Brechungswinkels  $\varepsilon'$ :

$$n \cdot \sin \varepsilon = n' \cdot \sin \varepsilon'$$

#### **Brechzahl**

Formelzeichen  $n(\lambda)$

DIN 1335-25; DIN 1349 Blatt 1 - 1.8

Synonym: Brechungsindex

Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c_0$  (bzw. Wellenlänge  $\lambda_0$ ) von Licht bestimmter Frequenz im Vakuum zur Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c_n$  (bzw. Wellenlänge  $\lambda_n$ ) von Licht

derselben Frequenz in dem betreffenden optischen Medium:  $n = c_0/c_n = \lambda_0/\lambda_n$ . Die Brechzahl des Vakuums ist für jede Wellenlänge gleich 1.

### **Dioptrie**

Einheitenzeichen dpt

DIN 1301 Teil 1- 4.1

Außerhalb des SI-Systems verwendete Einheit des Brechwertes. Umrechnung in die zugehörige SI-Einheit:  $1\text{dpt} = 1\text{m}^{-1}$ . Beschreibt die Wirkung von Brillengläsern.

### **Diplopie**

DIN 5340-79

Wahrnehmung von Doppelbildern.

### **Emmertches Gesetz**

Emmert (1881) hatte entdeckt, dass die phänomenale Größe eines Nachbildes, direkt proportional ist der Entfernung des Beobachters zur Projektionsfläche, auf der das Nachbild gesehen wird.

### **Fusion**

DIN 5340-174

Gesamtheit aller motorischen und sensorischen Vorgänge, die zur Verschmelzung der Bildeindrücke beider Augen führe.

### **Heterophorie**

DIN 5340-209

Abweichung der Vergenzstellung von der Orthostellung bei vorübergehender Aufhebung der Fusion. Im freien Sehen kommt es, durch motorische und sensorische Kompensation, zu einer Verschmelzung der Bildeindrücke. In der ophthalmologischen Literatur wird dies auch als latentes Schielen bezeichnet.

### **Horopter**

Geometrischer Ort im physikalischen Raum der bei gegebener Konvergenzstellung binokular einfach gesehen wird. Hierbei wird in beiden Augen die gleiche Richtungsempfindung ausgelöst.

### **Konvergenz**

Fixierlinien beider Augen bewegen sich nach innen.

### **Monokularsehen**

Sehen mit nur einem Auge.

### **Netzhautstellen, disparate**

DIN 5340-296

Netzhautstellen in beiden Augen, die im Binokularsehen für nicht fusionierbare Bilder ungleiche monokulare Richtungswerte besitzen.

### **Netzhautstellen, korrespondierende**

DIN 5340-297

Netzhautstellen in beiden Augen, die im Binokularsehen sowohl für fusionierbare als auch für nicht fusionierbare gleiche monokulare Richtungswerte besitzen.

**Netzhautstellen, querdisparate**

DIN 5340-298

Netzhautstellen in beiden Augen, die beim Binokularsehen, für nicht fusionierbare Bilder ungleiche horizontale monokulare Richtungswerte besitzen.

**Orthostellung**

DIN 5340-309

Vergenzstellung, bei der sich die Fixierlinien beider Augen im angeblickten Objektpunkt schneiden und die Vertikalmeridiane beider Augen zueinander parallel sind. Die Orthostellung ist die ideale Arbeitsstellung.

**Prismendioptrie**

Einheitszeichen alt pdpt

Gleichbedeutend mit cm durch Meter. Beschreibt die Wirkung von Prismengläsern. Ein Prisma hat die Stärke von 1pdpt, wenn es auf 1m Abstand eine Ablenkung von 1cm hervorruft.

**Prismengläser**

Brillengläser die zur Korrektur von Heterophorien verordnet werden.

**Querdisparation**

DIN 5340-328

Horizontalkomponente der Disparation bei aufrechter Kopfhaltung. Die Querdisparation liegt parallel zum horizontalen Netzhautmeridian, führt zur Stereopsis.

**Querdisparation, nasale**

Querdisparation bei der Abbildung eines hinter dem Horopter liegenden Objektpunkt.

**Querdisparation, temporale**

Querdisparation bei der Abbildung eines vor dem Horopter liegenden Objektpunkt.

**Refraktionsbestimmung**

Andere Bezeichnung für Augenglasbestimmung.

**Richtungswert**

DIN 5340-346

In den Außenraum projizierte Richtungsempfindung einer Netzhautstelle, bezogen auf die Netzhautstelle mit dem Richtungswert geradeaus. Der Richtungswert geradeaus bezieht sich auf die Netzhautgrubenmitte.

**Richtungswert, binokularer**

DIN 5340-347

Auf die Richtung der Fixierlinien des Zyklopauges bezogene Richtungsempfindung für einen Objektpunkt im Binokularsehen. Das Zyklopaug ist ein hypothetisches Mittelaug, das die Funktion des Augenpaares übernimmt.

**Richtungswert, monokularer**

DIN 5340-348

Auf die Hauptsehrichtung bezogene Sehrichtung.

**Sehrichtungsgemeinschaft, binokulare**

Im Binokularsehen vorhandene Eigenschaft der gemeinsamen Auswertung der monokularen Richtungswerte.

**Sphärisches Brillenglas**

DIN EN ISO 13666-8.2.4

Brillenglas mit zwei sphärischen Flächen oder einer sphärischen Fläche und einer ebenen Fläche. Wird für die Korrektur von Myopien und Hyperopien verwendet.

**Stereopsis**

DIN 5340-394

Räumliches Sehen ausschließlich aufgrund querdissparater Abbildung von Objektpunkten.

**Vergenz**

Gegensinnige, gleich große Bewegung der Fixierlinien und/oder der Vertikalmeridiane beider Augen. Man unterscheidet zwischen Konvergenz und Divergenz.

**Vergenz, akkomodative**

DIN 5340-436

Horizontalvergenz, ausgelöst durch Akkomodationseinstellung.

**Vergenz, fusionelle**

DIN 5340-437

Motorischer Anteil der Horizontalvergenz.

**Wahrnehmungskonstanz**

Phänomen, bei dem bestimmte Eigenschaften von Objekten auch dann weitgehend unverändert wahrgenommen werden, wenn sich die zugehörigen visuellen Reize ändern. Zu unterscheiden sind Bewegungskonstanz, Farbkonstanz, Formkonstanz, Größenkonstanz, Helligkeitskonstanz, Orientierungskonstanz und Ortskonstanz.

## Literaturverzeichnis

- [1] Kienle, Gerhard. (1968) Die optischen Wahrnehmungsstörungen und die nichteuklidische Struktur des Sehraumes. Stuttgart, Thieme Verlag.
- [2] Hillebrand, Franz (1902) Theorie der scheinbaren Größe bei binokularem Sehen. Wien, Aus der Kaiserlich-Königlichen Hof- und Staatsdruckerei.
- [3] Fechner, G.T. (1860) Elemente der Psychophysik. Band 1,2. Nachdruck der Ausgabe Leipzig, Bonset, E.J.
- [4] Holaday, E. B. (1933) Die Größenkonstanz der Sehdinge bei Variation der Objekte und ihre Einwirkungsweise auf den Wahrnehmenden. Arch. Ges. Psychol. 88, 487
- [5] W. Wundt, (1902) Grundzüge der Physiologische Psychologie, Band 2, 5. Auflage. Leipzig, Verlag von W. Engelmann.
- [6] Hering, (1942) Spatial sense and movements of the eye. Baltimore, Waverly Press.
- [7] Sterneck, R. v. ( 1907) Der Sehraum auf Grund der Erfahrung. Leipzig, Verlag von J. A. Barth.
- [8] Schubotz, F. (1911) Beiträge zur Kenntnis des Sehraums. Arch. Ges. Psychol. 20, 101.
- [9] Poppelreuter, W. (1910) Über die Bedeutung der scheinbaren Größe. Z. Psychol. 54, 311. (1911) Beiträge zur Raumpychologie. Z. Psychol. 58, 200.
- [10] Blumenfeld, W. (1913) Untersuchungen über die scheinbare Größe im Sehraum. Z. Psychol. 65, 241.
- [11] Sterneck,R. v. (1908) Die Referenzflächentheorie der scheinbaren Größe der Gestirne. Z. Psychol. 46, 1.
- [12] Holst, E.v., Mittelstädt H. (1950) Das Reafferenzprinzip. Naturwissenschaften 37, 446.
- [13] Linschotten, J. (1956) Strukturanalyse der binokularen Tiefenwahrnehmung. Groningen, J.B. Wolters.
- [14] Luneburg, R. (1947) Mathematical Analysis of Binocular Vision. Princeton, Princeton University Press.
- [15] Blank, A., Boeder, P., Hardy, L. H., Rand,G., Rittler, M.C. (1953) The geometry of binocular space perception. New York, Knapp Memorial Laboratories, Institut of Ophthalmology, Colombia University College of Physicians and Surgeons.
- [16] Holway,A.H., Boring, E.G. (1941) Determinants of apparent visual size with distance variant. American Journal of Psychology, 54, 21.
- [17] Ittelson, W. H., Ames, A., Jr. (1950) Accomodation, convergence and their relation to apparent distance. Journal of Psychology, 30, 43.
- [18] Kilpatrick,F.P. Ittelson, W.H. (1953) The size-distance invariance hypothesis. Psychological Review, 60, 223.
- [19] Leibowitz, H., Moore, D. ( 1966) Role of changes in accomodation and convergence in the perception of size. Journal of the Optical Society of America, 56, 1120.
- [20] Fischer, M.H., Loewenbach (1945) Untersuchungen über Sehferne und Sehtiefe. Pflügers Arch. Ges. Physiol. 235, 609.
- [21] Günther, N. (1955) Die Struktur des Sehraumes. Stuttgart, Wissenschaftl. Verlagsgesellschaft. (1969) Die visuelle Raumwahrnehmung. Wissenschaftl. Verlagsgesellschaft.
- [22] Foley, J. M. (1980) Binocular distance perception. Psychological Review, 87, 411.
- [23] Higashiyama, A. (1977) Perceived size and distance as a perceptual conflict between two processing modes. Perception and Psychophys. 22, 206.

- [24] Gilinsky, A. S. (1951) Perceived size and distance in visual space. *Psychological Review*, 58, 460.
- [25] Frey, G.A. (1952) Gilinsky's equations for perceived size and distance. *Psychological Review*, 59, 244.
- [26] Indow, T., Watanabe, T (1984a) Parallel- and distance-alleys with moving points in the horizontal plane. *Perception and Psychophys.* 35, 144. (1984b) Parallel- and distance-alleys on horopter plane in the dark. *Perception*, 13, 165.
- [27] Wagner, M (1985) The metric of visual space. *Perception and Psychophys.* 38, 483.
- [28] Caelli, Dodwell (1984) Orientation-position coding and invariance characteristics of pattern discrimination. *Perception and Psychophys.* 36, 159.
- [29] Watt, R.J., Morgan, M.J. (1985) A theory of the primitive spatial code in human vision. *Vision Res.* 25, 1661.
- [30] Perzenius, E. (1989) Über den Zusammenhang von Form- und Farbverarbeitung im visuellen System des Menschen. Dissertation, Universität München 1982. München, Kyrill u. Method.
- [31] Rock, I. (1998) *Wahrnehmung: vom visuellen Reiz zum Sehen und Erkennen.* Heidelberg-Berlin, Spektrum Akademischer Verlag.
- [32] Schober, H. (1958) *Das Sehen, Band 2.* Leipzig, VEB Fachbuchverlag.
- [33] Franziska Hillebrand (1929) *Lehre von den Gesichtsempfindungen (auf Grund hinterlassener Aufzeichnungen von Franz Hillebrand).* Verlag von J. Springer, Wien.
- [34] Mach, E (1922) *Die Analyse der Empfindungen.* Jena, Fischer Verlag.
- [35] H. Schole (1928) Beiträge zur Psychologie der Raumwahrnehmung und räumlichen Vorstellung, *Z. Psychol.* 107, 314.
- [36] H. v. Helmholtz (1925) *Helmholtz's Treatise on Physiological Optics; translated from the third German Edition.* New York, Dover Publications.
- [37] Trendelenburg, W. (1943) *Der Gesichtssinn.* Berlin, Springer.
- [38] Hofmann, F.B. (1920) *Die Lehre vom Raumsinn des Auges. 1. Teil.* Berlin, Springer.
- [39] Kundt, A. (1863) Untersuchungen über Augenmaß und optischen Täuschungen. *Poggendorffs Ann*, CXX 118, zit. n. V. Herzau (1995).
- [40] Nakayama, K. & Tyler, C.W. & Appellmann, J. (1977) A new angel on the vertical horopter. *Invest. Ophthalmol.* 82, zit. n. V. Herzau (1995).
- [41] Tschermak-Seysenegg, Armin (1947) *Einführung in die physiologische Optik.* Wien, Springer Verlag
- [42] Klix, Friedhart. (1971) *Information und Verhalten.* Berlin. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften.
- [43] Ueberschaar, G. (1976) *Optologie, Grundzüge der Lehre vom Sehen.* VEB – Fachbuchverlag.
- [44] Nagel, W. (1905) *Physiologie der Sinne. Band 3.* Braunschweig, Vieweg Verlag.
- [45] Campenhausen, C.v. (1993) *Die Sinne des Menschen.* Stuttgart, Thieme
- [46] Herzau, V. (1995) *Sensorik des Binokularsehen.* Aus Kaufmann, H.: *Strabismus*, 2. Auflage. Stuttgart, Enke.
- [47] Hillebrand, Franz. (1893) Die Stabilität der Raumwerte auf der Netzhaut. *Z. Psychol.* 5, 1.
- [48] Katona, G. (1925) Experimente über die Größenkonstanz. *Z. Psychol.* 97, 215.
- [49] Pudritzki, G. (1956) Größenkonstanz und Alter. *Z. Psychol.* 159, 85.
- [50] Galanter, E. (1962) *Contemporary psychophysics.* In: *New directions in psychology 1.* New York, Holt, Rinehart u. Winston.
- [51] Röhler, R. (1995) *Sehen und Erkennen.* Berlin, Springer.

[52] TM-Wahr3. Trainingsmaterial Visuelle Wahrnehmung. Institut für Psychologie der Universität Erlangen-Nürnberg.

## **Bildquellenverzeichnis**

- [Abb.1] Campenhausen, C.v. (1993) Die Sinne des Menschen. Stuttgart, Thieme G.
- [Abb.2] Kienle, Gerhard. (1968) Die optischen Wahrnehmungsstörungen und die nichteuklidische Struktur des Sehraumes. Stuttgart, Thieme Verlag.
- [Abb.3] Kienle, Gerhard. (1968) Die optischen Wahrnehmungsstörungen und die nichteuklidische Struktur des Sehraumes. Stuttgart, Thieme Verlag.
- [Abb.4] Blank, A., Boeder, P., Hardy, L. H., Rand, G., Rittler, M.C. (1953) The geometry of binocular space perception. New York, Knapp Memorial Laboratories, Institut of Ophthalmology, Colombia University College of Physicians and Surgeons.
- [Abb.5] Kienle, Gerhard. (1968) Die optischen Wahrnehmungsstörungen und die nichteuklidische Struktur des Sehraumes. Stuttgart, Thieme Verlag.
- [Abb.6] Kienle, Gerhard. (1968) Die optischen Wahrnehmungsstörungen und die nichteuklidische Struktur des Sehraumes. Stuttgart, Thieme Verlag.
- [Abb.7] Tschermak-Seysenegg, Armin (1947) Einführung in die physiologische Optik. Wien, Springer Verlag
- [Abb.8] Wondratschek, Oliver.
- [Abb.9] Klix, Friedhart. (1971) Information und Verhalten. Berlin. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften.
- [Abb.10] Klix, Friedhart. (1971) Information und Verhalten. Berlin. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften.
- [Abb.11] Klix, Friedhart. (1971) Information und Verhalten. Berlin. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften.
- [Abb.12] Nagel, W. (1905) Physiologie der Sinne. Band 3. Braunschweig, Vieweg Verlag.
- [Abb.13] Rock, I. (1998) Wahrnehmung. Heidelberg, Spektrum.
- [Abb.14] Campenhausen, C.v. (1993) Die Sinne des Menschen. Stuttgart, Thieme G.
- [Abb.15] Ueberschaar, G. (1976) Optologie, Grundzüge der Lehre vom Sehen. VEB – Fachbuchverlag.
- [Abb.16] Wondratschek, Oliver.
- [Abb.17] Herzau, V. (1995) Sensorik des Binokularsehen. Aus Kaufmann, H.: Strabismus, 2. Auflage. Stuttgart, Enke.
- [Abb.18] Herzau, V. (1995) Sensorik des Binokularsehen. Aus Kaufmann, H.: Strabismus, 2. Auflage. Stuttgart, Enke.
- [Abb.19] Wondratschek, Oliver.
- [Abb.20] Schober, H. (1958) Das Sehen, Band 2. Leipzig, VEB Fachbuchverlag.
- [Abb.21] Wondratschek, Oliver.
- [Abb.22] Schober, H. & Rentschler, J. (1972) Das Bild als Schein der Wirklichkeit. München, Moos.
- [Abb.23] Campenhausen, C.v. (1993) Die Sinne des Menschen. Stuttgart, Thieme G.
- [Abb.24] Wondratschek, Oliver.
- [Abb.25] Trotter, J. (1985) Das Auge. Trimbach, Optik-Verlag.
- [Abb.26] Trotter, J. (1985) Das Auge. Trimbach, Optik-Verlag.
- [Abb.27] TM-Wahr1. Trainingsmaterial Visuelle Wahrnehmung. Institut für Psychologie der Universität Erlangen-Nürnberg.

[Abb.28] TM-Wahr1. Trainingsmaterial Visuelle Wahrnehmung. Institut für Psychologie der Universität Erlangen-Nürnberg.

[Abb.29] Wondratschek, Oliver.

[Abb.30] Wondratschek, Oliver.

[Abb.31] Wondratschek, Oliver.

[Abb.32] Wondratschek, Oliver.

[Abb.33] Wondratschek, Oliver.

[Abb.34] Wondratschek, Oliver.

[Abb.35] Wondratschek, Oliver.

[Abb.36] Wondratschek, Oliver.

[Abb.37] Wondratschek, Oliver.

[Abb.38] Wondratschek, Oliver.

[Abb.39] Wondratschek, Oliver.

[Abb.40] Wondratschek, Oliver.

[Abb.41] Wondratschek, Oliver.

[Abb.42] Wondratschek, Oliver.

[Abb.43] bis [Abb.75] graphische Auswertung mit Programm „Origin Pro“

[Abb.76] Wondratschek, Oliver.

[Abb.77] Wondratschek, Oliver.

[Abb.78] bis [Abb.85] Standbilder der Computersimulationen.

# Lebenslauf

## Angaben zur Person

Name: Wondratschek, Oliver  
geboren: 27.01.1967 in Minden  
Familienstand: ledig  
Nationalität: deutsch  
Konfession: keine

## Schulbildung

08.74-07.78 Grundschole Neuhengstett  
08.78-07-85 Realschule Calw  
- Abschluss: Mittlere Reife-

## Beruflicher Werdegang I

08.85-10.86 Ausbildung und Abbruch der Lehre zum Konditorgesellen bei der Fa. Sehne, Ehningen  
11.86-09.87 Auslandsaufenthalt in Indien und Indonesien  
11.87-07.89 Zivildienst, Rettungsdienst (Rotes Kreuz)  
08.89-07.92 Ausbildung zum Augentoptikergesellen bei der Fa. Optik Fux, Calw  
08.92-07.94 Augentoptikergeselle bei der Fa. Optik Work Rent  
08.94-06.96 Ausbildung zum staatl. gepr. Augentoptiker und Augentoptikermeister an der Fachschule für Augentoptik, Jena

## Studium

10.96-05.01 Mit Ausnahmegernehmigung Studium der Physik, Universität Göttingen Studienschwerpunkte:  
Atom-Kernphysik, Astrophysik, Festkörperphysik  
Nebenfach: Chemie  
Thema der Diplomarbeit (II. Physikalisches Institut):

„Aufbau einer Ionendepositionsanlage und Anwendung zur Synthese von Borcarbid“

-Abschluß: Diplom-Physiker- Gesamtnot: „gut“-

07.05-11.09

Externer Doktorand am Institut für Angewandte Physik der Universität Frankfurt

Thema der Doktorarbeit: „ Der Zusammenhang zwischen Wahrnehmungsgröße und Abstandsinformation“

-Abschluß: Dr.phil.nat.- Gesamtnote: „gut“-

## **Beruflicher Werdegang II**

01.2002-heute

Freiberufliche Tätigkeit als Dozent bei der Fa. Institut für Berufsbildung GmbH, Karlsruhe

Mitglied im Meisterprüfungsausschuß für das Augenoptiker-Handwerk, Kassel

Schriftstellerische Tätigkeit für den DOZ-Verlag, Optische Fachveröffentlichung GmbH, Heidelberg.

### **Publikationen:**

1. O. Wondratschek, Ronning, Büttner, Hohsäß:

„*Charakterisierung von ionenstrahldeponierten Borcarbid-filmen für die Beschichtung von AFM-Spitzen*“. DPG 2001

2. „*Einführung in die Psychophysik der Gesichtswahrnehmung*“. DOZ-Verlag, 2/2003, 38; 3/2003, 52; 4/2003, 42; 5/2003, 38.

3. „*Parameter die den dreidimensionalen subjektiven Wahrnehmungsraum bedingen*“. DOZ-Verlag,7/2004, 28.

4. *Kurzer Abriss über die Geschichte der Theorie des Sehens*“. DOZ-Verlag, 2/2005, 46; 3/2005, 40.

5. „*Untersuchungen über die Geometrie des Sehraums*“. DOZ-Verlag, 5/2006, 42.

6. „ *Funktionaloptometrie und Visualtraining*“ DOZ-Verlag, 103 Seiten, 2006.

## **Besondere Kenntnisse, Tätigkeiten**

DV-Kenntnisse (MS-Office, OriginLab, SIMION (Simulation-Ionenoptics))