

Versuch S: Psychophysik des Sehens beim Menschen

Betreuer: Gaese (M 444), Sistermann (M 406)

Raum: M 406, M 433

1. Versuchsziel

Am Beispiel der Nonius-Sehschärfe und der stereoskopischen Tiefenwahrnehmung soll in zwei Experimenten die Konstantreizmethode zur Bestimmung von Reizschwellen veranschaulicht werden. Im Skript wird dazu nur die Theorie erklärt.

Grundlegende Kenntnisse über den Aufbau und die Funktion des Auges sollte man sich vorher aneignen. Diese werden in der Vorlesung Tierphysiologie abgehandelt und in Lehrbüchern der Physiologie näher erklärt. Die folgenden Seitenangaben gelten für das Buch von Schmidt/Thews, das in der Lehrbuchsammlung verfügbar ist: *Schmidt, Thews, "Physiologie des Menschen" 27. Auflage 1997, Springer-Verlag (Berlin, Heidelberg)*. Die entsprechenden Kapitel des Buches können auch beim Betreuer kopiert werden.

Folgende Stichworte sind bei der Vorbereitung wichtig: Aufbau des Auges, Dioptrischer Apparat (S. 283f), Einstellung der Sehschärfe (Akkommodation) (S. 285f), Aufbau der Netzhaut (S. 288f), Aufbau der Sehzellrezeptoren (S. 289f), Typen von Sehzellrezeptoren, Bestimmung der Sehschärfe (S. 300f), Tiefensehen (S. 302f). Einführend in die Psychophysik sind die Kap. 11.5 (Sensorische Schwellen, S. 207ff) und 11.6 (Psychophysische Beziehungen, S. 210ff). Wichtige Stichworte: Psychophysik, Schwelle, Weber-Gesetz, Konstantreizmethode, psychometrische Funktion.

2. Theorie

2.1 Geometrie von Sehwinkel und Netzhautbild

Die Größe der Abbildung eines Gegenstandes auf unsere Netzhaut (s. Abb. 1) läßt sich durch zwei Parameter beschreiben. Die Ausdehnung des Netzhautbildes B und der **Sehwinkel** α enthalten dieselbe Information. Beide Größen lassen sich bei bekannten Augenmaßen - im wesentlichen b , der Abstand des Knotenpunktes K von der Netzhaut - ineinander umrechnen, und man kann sie berechnen, wenn man die Größe des Gegenstands G und seinen Abstand g zum Knotenpunkt K der Netzhaut kennt:

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{\frac{G}{2}}{g} \quad \alpha = 2 \arctan \frac{\frac{G}{2}}{g},$$

$$B = 2b \tan \frac{\alpha}{2}.$$

(b liegt bei Normalsichtigen im Mittel bei 18mm.)

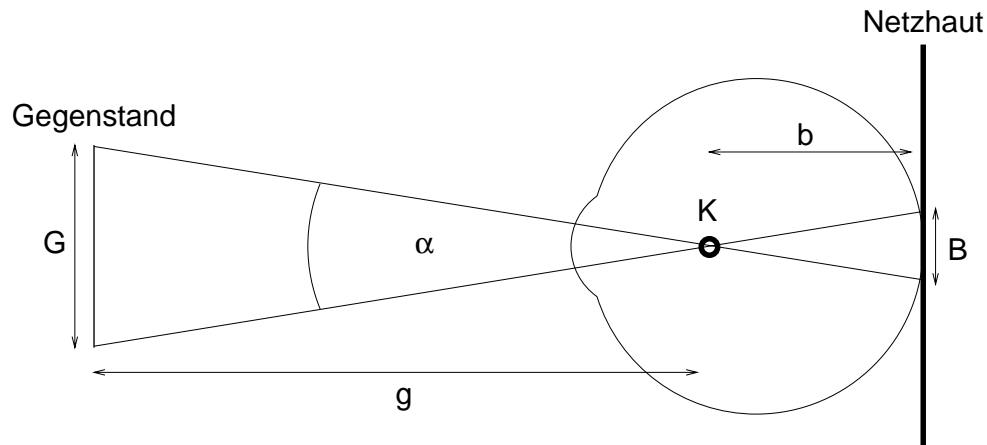


Abbildung 1: Sehwinkel und Größe des Netzhautbild. Die Netzhaut ist zur Veranschaulichung ausgerollt. Sie stellt die Bildebene dar, ebenso wie der Film in einer Kamera.

2.2 Sehschärfe

Das Auflösungsvermögen eines jeden optischen Apparates ist begrenzt. Wird der Abstand zweier Gegenstände zu klein, können sie nicht mehr getrennt abgebildet werden. Die Abbilder gehen fließend ineinander über; Information geht verloren.

Beim Auge sind die begrenzenden Faktoren die Schärfe des Netzhautbildes, eingeschränkt durch Abbildungsfehler wie Aberration, und vor allem die Dichte der Photorezeptoren. In der Fovea beträgt der Abstand zwischen zwei Zapfen etwa $2\ \mu\text{m}$ ($2.0 \cdot 10^{-6}\text{m}$), was einem Sehwinkel von 0.4 Winkelminuten ($0.4/60$ Grad) entspricht.

Mit **Sehschärfe** oder auch **Visus V** bezeichnet man den Kehrwert des kleinsten Winkels α unter dem man zwei Objekte noch als getrennt wahrnimmt (s. Abb. 1):

$$V = \alpha^{-1} [\text{Winkelminuten}^{-1}].$$

Es gibt die unterschiedlichsten Methoden zur Bestimmung der Sehschärfe. Tafeln mit Buchstaben unterschiedlicher Größe, die beim Augenarzt verwendet werden, oder Landolt-Ringe, mit denen die Fahrtauglichkeit vor der Führerscheinprüfung getestet wird, werden den meisten bekannt sein. Von der Art der Sehaufgabe und weiteren Parametern wie Helligkeits- und Farbkontrast oder Position im Sehfeld hängt der tatsächlich gemessene Visus V ab. α liegt bei Jugendlichen jedoch im Bereich von 0.8-1.5 Winkelminuten.

Fragen:

Wie hängt die Sehschärfe von der Position im Sehfeld ab?

Wie viele Photorezeptoren braucht man, um zwei Objekte getrennt wahrnehmen zu können?

2.3 Tiefenwahrnehmung aufgrund von Disparitäten

Wir verfügen über zwei Augen, die sich an unterschiedlichen Positionen befinden - lateral gegeneinander versetzt sind. Eine Folge der Versetzung sind Unterschiede zwischen den Netzhautbildern. Dennoch nehmen wir keine Doppelbilder wahr. Unser Gehirn verfügt über Mechanismen, die dies verhindern.

Darüber hinaus erzeugen die Unterschiede der Netzhautbilder, **Disparitäten** genannt, jedoch einen Tiefeneindruck, eine Vorstellung von der dreidimensionalen Struktur unserer

Umgebung. MagicEye Stereogramme funktionieren nach diesem Prinzip. Die Tiefenwahrnehmung auf der Grundlage von Disparitäten bezeichnet man mit Stereosehen.

Information über die relative Tiefe eines Objektes ist durch die Position der beiden Abbilder auf den Netzhäuten in den zweidimensionalen Bildern enthalten (s. Abb. 2). Der **Fixationspunkt** F wird in beiden Augen auf die Fovea abgebildet. Alle Paare von Punkten, die in beiden Augen, dieselbe relative Position zur Fovea haben, bezeichnet man als **korrespondierende Punkte**. Sie sind in beiden Augen in dieselbe Richtung und um denselben Betrag von der Fovea verschoben. Auf korrespondierende Punkte werden alle jene Objekte abgebildet, die sich auf dem **Horofter** (Abb. 2 A) befinden. Definiert wird der Horopter durch eine gekrümmte Fläche im Raum, die durch den Fixationspunkt geht. Punkte auf dem Horopter nehmen wir als gleich entfernt wie den Fixationspunkt wahr.

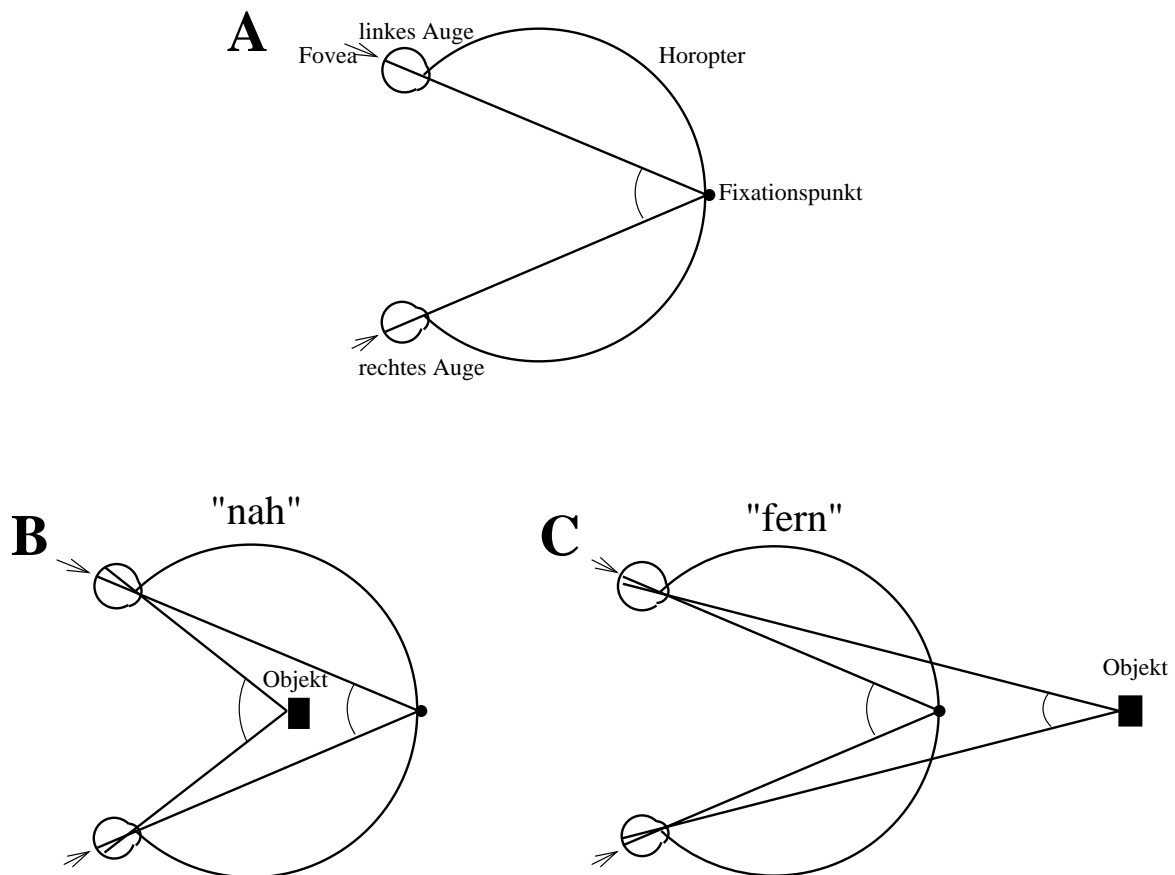


Abbildung 2: Alle Punkte, die auf dem Horopter liegen, werden auf korrespondierenden Netzhautstellen abgebildet (A). Relative Tiefe bezogen auf den Fixationspunkt ist durch Disparitäten in den Netzhautbildern kodiert. In der Nahsituation wandern die Bilder des Objektes auseinander (B), in der Fernsituation wandern sie aufeinander zu (C).

Ein Punkt, der nicht auf dem Horopter liegt, wird nicht auf korrespondierende Netzhautstellen abgebildet. Befindet sich ein Objekt innerhalb des Horopters, also näher am Beobachter, so wandern seine Abbildungen auseinander, ist es außerhalb des Horopters, also weiter entfernt, so wandern die Bilder aufeinander zu. Je weiter ein Objekt vom Horopter entfernt ist, um so größer sind die Disparitäten. Betrag und Vorzeichen der Disparität eines Objektes geben also seine relative Position zum Horopter an. Auf diese Weise ist Tiefeninformation in den beiden zweidimensionalen Netzhautbildern enthalten.

Bereits 1838 hat Wheatstone mit einem Stereoskop nachweisen können, daß Disparitäten einen Tiefeindruck beim Menschen auslösen. Inzwischen weiß man durch Untersuchungen, die Julesz in den 60er Jahren mit Rauschmusterstereogrammen (ähnlich MagicEye, s. Abb. 5) unternahm, daß Disparitäten allein eine Tiefenwahrnehmung

hervorrufen, auch ohne die Mitwirkung anderer Tiefenreize wie Perspektive, Akkomodation oder Schraffurgradienten.

Fragen:

Erzeugen Disparitäten bei nur einem geöffneten Auge einen Tiefeneindruck?

2.4 Psychophysik

Die Psychophysik beschäftigt sich mit dem Zusammenhang von physikalischen Reizparametern und den durch sie hervorgerufenen Empfindungen. Neben der Untersuchung von Sinnestäuschungen werden Zusammenhänge zwischen Reiz- und Empfindungsstärken experimentell untersucht. Da die Quantifizierung von Empfindungen Probleme bereitet, sind die Hauptgegenstände psychophysischer Untersuchungen Schwellenphänomene. Dabei geht es entweder um die Unterscheidung überschwelliger Reize, man spricht von Unterschiedsschwellen, oder um die Feststellung von sogenannten Absolutschwellen, auch Reizschwellen genannt.

2.5 Reizschwelle

Unter einer Reizschwelle (Absolutschwelle) versteht man die minimale Reizintensität, die eine Empfindung auslöst. Reizschwellen findet man in allen Sinnessystemen. Ein Beispiel ist die Hörschwelle, der minimale Schalldruckpegel bei konstanten Parametern wie Frequenzzusammensetzung, der einen Höreindruck hervorruft (s. Versuch H).

2.6 Konstantreizmethode

Bei der Konstantreizmethode werden einem Probanden in zufälliger (randomisierter) Reihenfolge Reize unterschiedlicher Stärken präsentiert. Die Stärke aller dargebotenen Reize soll dabei im Bereich der Schwelle liegen. Einige sollen über- und einige unterschwellig sein. Überschwellige Reize werden zu 100% wahrgenommen. Kleine unterschwellige Reize werden nie wahrgenommen. Dazwischen gibt es einen Übergangsbereich, in dem die Detektion von 0% auf 100% ansteigt. Die mit einem solchen Experiment bestimmte Absolutschwelle definiert man als die Reizstärke, die in 50% der Fälle zu einer Wahrnehmung führt.

Die sogenannte psychometrische Kurve gibt den Zusammenhang zwischen Reizstärke und dem Prozentsatz der wahrgenommenen Reize wieder - im allgemeinen der Prozentsatz der richtigen Antworten in einem Experiment. Psychometrische Kurven haben häufig einen sigmoiden Verlauf (s. Abb. 3). Man kann aus ihnen die Reizschwellen ablesen. In Abbildung 3 z.B. die Reizstärke 3.

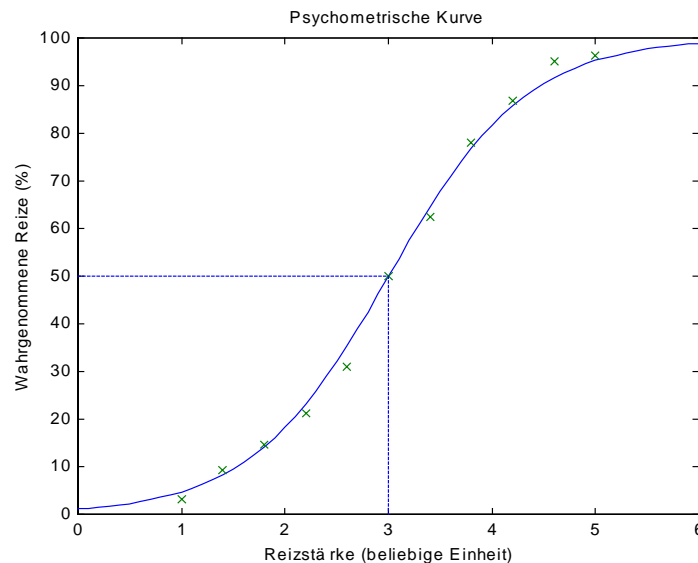


Abbildung 3: Psychometrische Kurve. Mit Kreuzen sind die tatsächlich gemessenen Werte in einem Experiment dargestellt, die Kurve ist an diese Werte angepaßt.

Die Konstantreizmethode ist sehr zeitaufwendig. Will man genaue Werte erhalten, muß man sehr viele Präsentationen durchführen - häufig einige hundert oder gar tausend.

Ein wichtiger Aspekt bei der Untersuchung von Absolutschwellen sind die Entscheidungskriterien des Beobachters. Sie haben ebenso wie der untersuchte physikalische Parameter einen Einfluß auf den Verlauf der psychometrischen Kurve. Auf diese Weise kann eine veränderte Instruktion eines Versuchsleiters die Messung einer Schwelle beeinflussen.

2.7 Nonius-Sehschärfe

Unter Nonius-Sehschärfe versteht man die Fähigkeit eines Beobachters, eine Versetzung in einer geraden Linie zu erkennen (Abb. 4a). Häufig ist die Linie unterbrochen und wird mit einer Versetzung fortgesetzt (Abb. 4b), oder sie wird nur durch Kreise definiert (Abb. 4c). Die der Nonius-Sehschärfe zugeordnete Reizschwelle, die Größe der Versetzung, variiert je nach Noniusvariante.

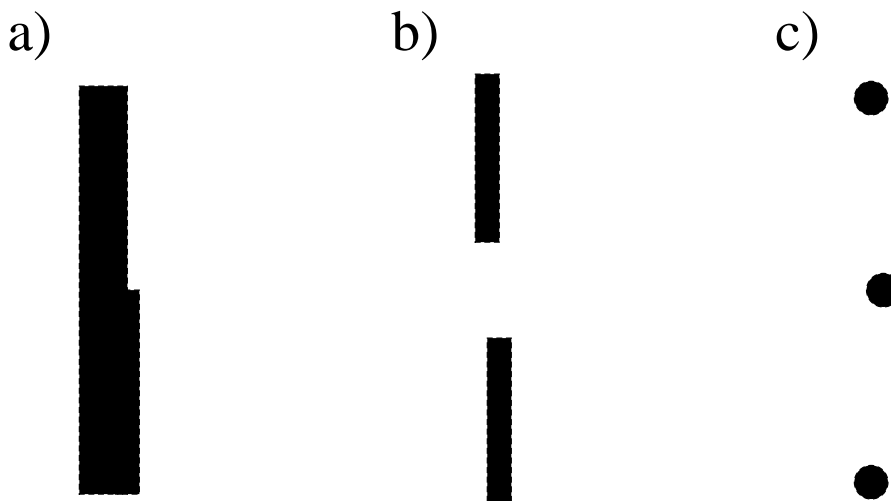


Abb.4 Drei Beispiele für Nonii. Die resultierenden Reizschwellen werden sich unterscheiden.

Interessant ist die Nonius-Sehschärfe, weil sie ein Hypergenauigkeitsphänomen ist. Bei optimalen Bedingungen kann man Versetzungen von 5 Winkelsekunden (5/60 Winkelminuten) erkennen. Da die Rezeptorabstände und ebenfalls Mikrosakkaden bereits viel größer sind, lassen sich derart niedrige Schwellen nur durch eine Nachverarbeitung visueller Informationen in der aufsteigenden Sehbahn erklären.

2.8 Disparitätsschwelle

Auch das Stereosehen ist ein Hypergenauigkeitsphänomen. Die Disparitätsschwelle, also die minimale Disparität, die eine Tiefenempfindung auslöst, liegt für geübte Beobachter bei optimalen Bedingungen bei nur 2 Winkelsekunden!

Man testet die Disparitätsschwelle mit virtuellen Tiefenreizen, die mit stereoskopischen Apparaturen erzeugt werden. Den beiden Augen werden weitgehend identische Bilder gezeigt, die sich nur durch kleine Verschiebungen, eben Disparitäten, unterscheiden (Abb. 5).

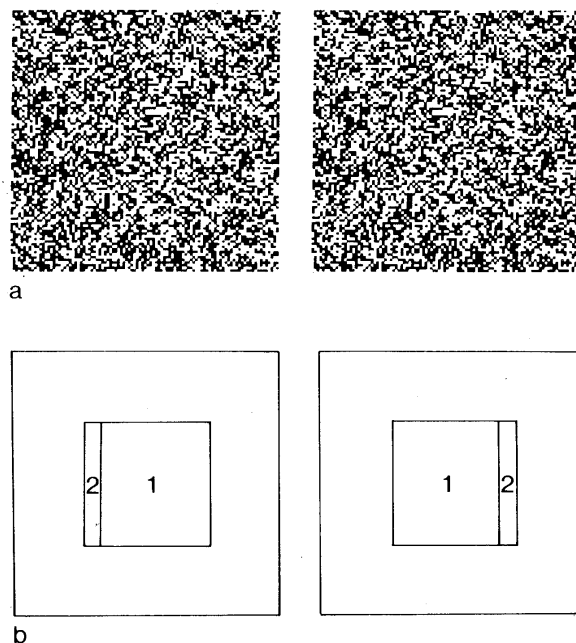


Abbildung 5: Künstlicher Tiefenreiz. Sogenannte Rauschmusterstereogramme enthalten außer Disparitäten keine weiteren Parameter, die Tiefe oder Formen kodieren (a). Bei monokularer, einäugiger, Betrachtung, erkennt man keine Form. Fusioniert man die beiden Bilder, erkennt man ein kleineres Quadrat im großen, das über dem Blatt schwebt. b) zeigt, wie Stereogramme konstruiert werden. Ein Teil eines Rauschmuster wird ausgeschnitten (1), verschoben und die Lücke (2) mit Punkten aufgefüllt.

3. Versuchsbeschreibung

Alle Experimente finden am Computer statt. Es existieren Stimulationsprogramme, die einen Reiz (Nonius oder Stereobild) auf dem Bildschirm darstellen und die Antwort des Probanden, einem der Versuchsteilnehmer, aufzeichnen. Der genaue Ablauf der Experimente wird in der Vorbesprechung erläutert.

4. Auswertung und Protokoll

Es sollen die Reizschwellen für Nonius-Sehschärfe und Stereosehen bestimmt werden. Neben der verständlichen Beschreibung der Versuchsaufbauten und des Ablaufs der Versuche, gehören alle erläuterten Rechnungen in das Protokoll. Probleme bei der

Versuchsdurchführung sind zu beschreiben und zu diskutieren. In der Diskussion soll der Versuchsaufbau kritisch bewertet werden. Ein wichtiger Punkt der Diskussion ist ein Vergleich mit Literaturwerten.

Das Protokoll muß selbsterklärend sein!

5. Literatur

Schmidt RF und Thews G (Hrsg.) Physiologie des Menschen, 26. Auflage (1995) Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York

Auge und Sehen allgemein: S. 282-295.

Psychophysik: S. 207-210.