

Priv.-Doz. Dr. Wolfgang Wesemann, HFA Köln,

Beiträge zur Physiologie des Stereosehens, zur Form des Horopters und zur Größe des Panumbereichs, Teil 1

Der folgende zweiteilige Beitrag berichtet über wichtige wissenschaftliche Untersuchungen zum räumlichen Sehen. Es wird gezeigt, wie sehr die Form des Horopters von der Position des Fixationspunktes abhängt. Außerdem wird beschrieben, wie stark der Durchmesser des Panumbereichs von der Art und Größe der Testzeichen beeinflusst wird. Bei Testfiguren mit scharfen Hell-Dunkel-Kanten ist der Durchmesser des foveolaren Panumbereichs deutlich kleiner als 1 Sehwinkelgrad.

¹Die Zahl in der eckigen Klammer weist auf die laufende Nummer des entsprechenden Begriffs in der 1998 neu erschienenen DIN 5340 „Begriffe der physiologischen Optik“ hin

1 Einleitung

In der deutschen augenoptischen Fachpresse werden oft relativ alte wissenschaftliche Arbeiten zitiert, wenn es um Eigenschaften des Stereosehens und speziell um die Ausdehnung des Panumbereichs geht (z.B. Volkmann, 1859; Lau, 1921; Sachsenweger, 1958). Dabei ist das Stereosehen auch ein wichtiger Forschungsgegenstand der letzten Jahrzehnte gewesen. Der folgende Artikel fasst einige dieser zumeist in englischer Sprache publizierten wissenschaftlichen Untersuchungen zum Stereosehen für die deutsche Leserschaft zusammen. Einige bekannte Begriffe und Grundlagen zum Stereosehen werden zu Beginn kurz wiederholt.

2 Das räumliche Sehen

2.1 Querdisparates und nicht querdisparates Raumsehen

Das *räumliche Sehen* [DIN 5340 - Nr. 364]¹ erlaubt dem Menschen die Abschätzung der räumlichen Anordnung verschiedener Objekte im dreidimensionalen Raum. Dabei nutzt das visuelle System sowohl monokular als auch binokular wahrnehmbare Objektmerkmale.

Beim monokularen, *nicht querdisparaten Raumsehen* [329]¹ werden unter anderem die folgenden Phänomene zur Abschätzung der räumlichen Tiefe und Richtung ausgenutzt: a) die geometrische Perspektive, b) die Bewegungsparallaxe, c) die teilweise Überdeckung von Objekten, d) die Konturenschärfe, e) atmosphärische Einflüsse (wie z.B. der Dunst, der ferne Objekte bläulicher und kontrastärmer erscheinen lässt), f) die Verteilung von Licht und Schatten sowie g) der „Vergleich“ zwischen der scheinbaren Größe und der aus der Erinnerung bekannten tatsächlichen Größe des betrachteten Objekts.

Neben diesen monokularen Hinweisen auf die räumliche Anordnung der Objekte verfügt das Sehsystem auch über die Fähigkeit zum *querdisparaten Raumsehen*, das auch mit den alternativen Benennungen *Stereopsis* und *Stereosehen* bezeichnet wird [394]. Bei dieser Art des räumlichen Sehens „vergleicht“ das visuelle System die Richtungswerte, unter denen die betrachteten Objekte dem rechten und linken Auge erscheinen.

2.2 Korrespondierende Netzhautstellen und Querdisparation

Korrespondierende Netzhautstellen [297] sind diejenigen Netzhautstellen in beiden Augen, die im Binokularsehen sowohl für fusionierbare als auch für nicht fusionierbare Bilder die gleichen monokularen Richtungswerte aufweisen. Die dazugehörigen Objektpunkte im Außenraum bilden den *Horopter*. Alle anderen Objekte werden mit einem Versatz abgebildet, den man als *Dis-*

paration [82] bezeichnet. Die Disparation lässt sich in eine horizontale Komponente, die *Querdisparation* [328], und in eine vertikale Komponente, die *Vertikaldisparation* [446], zerlegen. Die Querdisparation wird im Gehirn in die Empfindung einer „lebendigen“ Räumlichkeit umgesetzt. So scheint ein **bitemporal** abgebildetes Objekt (mit „**gekreuzter**“ Querdisparation) vor der Fixationsebene zu schweben. Dieser räumliche Bildeindruck entsteht selbst bei Abwesenheit monokular sichtbarer Objektkonturen – wie z.B. bei Random-Dot-Stereogrammen.

Nur die Objektpunkte, die auf dem Horopter liegen, werden auf korrespondierende Netzhautstellen abgebildet.

Nur wenig bekannt ist die Tatsache, dass auch eine der in 2.1 genannten Arten des monokularen Raumsehens zu einem „lebendigen“ räumlichen Bildeindruck führt, nämlich die *Bewegungsparallaxe* (Abb. 1). Während alle anderen Arten des monokularen Raumsehens die räumliche Tiefe aus Indizien, wie z.B. der scheinbaren Größe oder der Konturenschärfe, abschätzen, kann die Bewegungsparallaxe selbst bei einäugiger Betrachtung in eine *plastische, räumliche Empfindung* umgesetzt werden. Diese Empfindung gleicht derjenigen, die man bei der binokularen Betrachtung eines räumlichen Objekts hat. Dieser Spezialfall der räumlichen Wahrnehmung wurde besonders von Rogers und Graham (1979, 1982) untersucht.

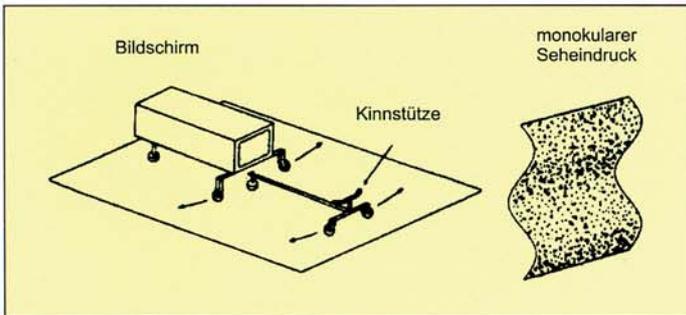


Abb. 1 Eine plastische, räumliche Tiefenwahrnehmung kann nicht nur binokular, sondern auch monokular über die Bewegungsparallaxe erzeugt werden. Rogers und Graham (1979) benutzten zur Erzeugung ihrer Testbilder eine bewegliche Kinnstütze, auf der der Proband seinen Kopf nach rechts und links schieben konnte. Synchron zu der Kopfbewegung wurden auf einem Oszilloskop Teile eines Zufallspunktmusters so bewegt, wie es bei einem räumlichen Muster aufgrund der Bewegungsparallaxe gewesen wäre. Während der Bewegung sieht der Beobachter auch bei monokularer Betrachtung eine räumlich aus dem Bildschirm hervortretende Fläche. Die subjektive Empfindung ist genauso wie beim querdisparaten Raumsehen

Nicht nur das querdisparate Raumsehen, sondern auch eine monokular sichtbare Bewegungsparallaxe erzeugt ein plastisches räumliches Bild.

Die Fähigkeit zur neuronalen Umsetzung der Querdisparation in eine subjektiv wahrnehmbare Räumlichkeit wird heute kortikalen Binokularneuronen zugeschrieben, die als kooperatives Netzwerk zusammenarbeiten (Marr und Poggio, 1979). Diese Neurone befinden sich zum Teil in der Area 18 der Großhirnrinde. Man

stellt sich vor, dass diese kooperativen Netzwerke ermitteln können, mit welcher Querdisparation die von beiden Augen betrachteten und gegeneinander versetzten Bildbestandteile am besten zusammenpassen (Abb. 2).

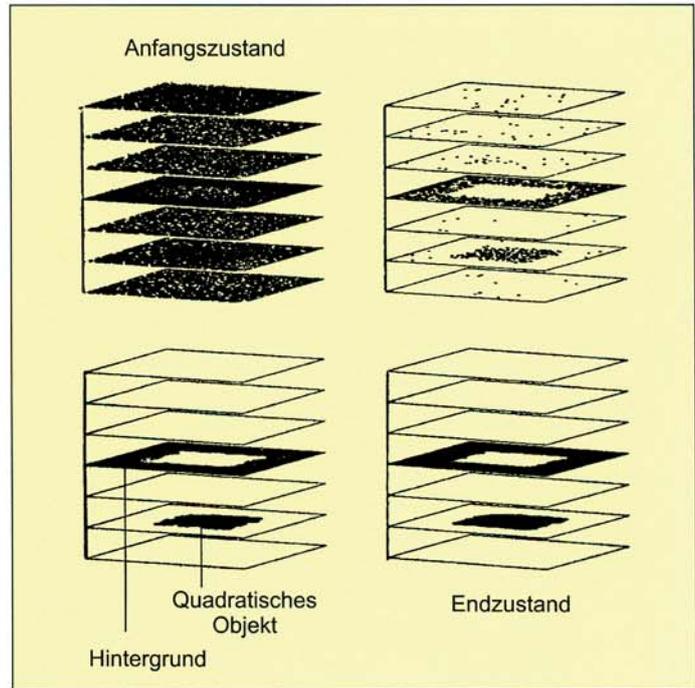


Abb. 2 Schematische Darstellung der Aktivität in einem kooperativen Neuronennetzwerk, das in der Lage ist, die räumliche Tiefe verschiedener Bildbestandteile richtig zuzuordnen. Jede Ebene stellt eine Neuronenschicht dar, die auf eine bestimmte Entfernung spezialisiert ist. Schwarze Punkte kennzeichnen eine hohe Neuronenaktivität. Am Anfang der Betrachtung des Objekts „feuern“ alle Neurone. Durch gegenseitige Beeinflussung der Zellen des neuronalen Netzwerks werden diejenigen Neurone gehemmt, die für andere Querdisparationen zuständig sind. Nach mehreren Wechselwirkungsschritten „feuern“ nur noch diejenigen Neurone, die zur richtigen räumlichen Tiefe gehören (nach Marr und Poggio, 1979)

2.3 Stereowahrnehmungsschwelle, Stereogrenzwinkel, Stereo-Tiefensehschärfe

Als *Stereowahrnehmungsschwelle* bezeichnet man die untere Grenze des querdisparaten Tiefensehens. Querdisparationen unterhalb der Schwelle erscheinen nicht räumlich, sondern flach (Abb. 3). Die Stereowahrnehmungsschwelle wird meist durch den *Stereogrenzwinkel* [393] bzw. durch dessen Kehrwert, die *Stereo-Tiefensehschärfe* [398], gekennzeichnet. Unter optimalen Bedingungen findet man für die Wahrnehmungsschwelle Stereogrenzwinkel von etwa zwei bis sechs Winkelsekunden (Howard, 1919; Woodburne, 1934; Tyler, 1973).

Ähnlich wie die Sehschärfe hängt auch die Stereo-Tiefensehschärfe von vielen Parametern wie z.B. der Art und Größe der Testzeichen, dem Kontrast, der Leuchtdichte, der Farbe, der Darbietungszeit und interokularen Kontrastunterschieden ab. So berichtet z.B. McKee (1983), dass die Stereo-Tiefensehschärfe umso besser ist, je länger die Testlinien sind. Eine Bildunschärfe oder eine Bildgrößendifferenz zwischen dem rechten und linken Auge verschlechtern die Stereo-Tiefensehschärfe hingegen deutlich

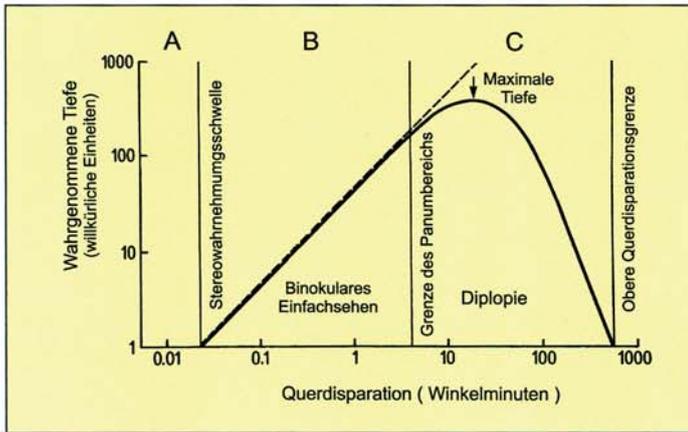


Abb. 3 Schematische Darstellung der querdysparaten Tiefenwahrnehmung. Das Stereosehen kann man in drei Bereiche (A, B, C) unterteilen. (A) Bei Querdysparationen unterhalb der Stereowahrnehmungsschwelle ist die räumliche Tiefe zu klein und für das visuelle System nicht erkennbar. Das Bild erscheint flach. (B) Oberhalb der Wahrnehmungsschwelle wird das räumliche Objekt „vor“ oder „hinter“ der Referenzebene (z.B. dem Horopter) lokalisiert. Die empfundene räumliche Tiefe (durchgezogene Linie) entspricht in etwa der tatsächlichen Tiefe (gestrichelte Linie). (C) Oberhalb der Grenze des Panumbereichs kann das Stereobild nicht mehr fusioniert werden. Es herrscht Diplopie. Dennoch ist eine räumliche Wahrnehmung und eine Einschätzung der tatsächlichen räumlichen Tiefe möglich. In diesen Bereich fällt die größte vom visuellen System wahrnehmbare Tiefe. Die empfundene räumliche Tiefe ist aber geringer als die tatsächliche Tiefe. Wenn die Querdysparation zu groß wird, bleibt nur noch ein vager Tiefeneindruck erhalten. Oberhalb der oberen Querdysparationsgrenze ist eine Einschätzung der räumlichen Tiefe nicht mehr möglich. (Die Zahlenwerte in der Abbildung gelten nicht für alle Testzeichenarten und dienen nur als Anhaltswerte.)

(Rassow und Wesemann, 1989, Abb. 5). Nach Levy und Glick (1974) leidet die Stereo-Tiefensehschärfe unter einer Bildunschärfe stärker als die Sehschärfe.

Von Bedeutung für die Sehtestung ist die Tatsache, dass sich die Stereo-Tiefensehschärfe bei manchen Personen mit zunehmender Übung verbessert (Lit und Vicars, 1966; Wittenberg et al., 1969). Dies ist ein Hindernis für exakte experimentelle Untersuchungen. Foley und Richards (1974) trainierten z.B. eine Person mit gestörtem Stereosehen. Nach diesem Training war die Stereoanomalie wesentlich kleiner. Auch Fendick und Westheimer (1983) fanden, dass die Stereo-Tiefensehschärfe für Testobjekte, die fünf Grad außerhalb der Fovea angeboten wurden, selbst nach 2 000 Darbietungen noch etwas besser wurde. Dieser Übungseffekt betrifft nicht nur Personen mit subnormalem Binokularsehen, sondern auch Personen ohne Binokularprobleme. Auch bei der Messung der Noniussehschärfe kennt man ähnliche Übungseffekte. Insgesamt scheint der Übungseffekt aber hauptsächlich parafoveolare und periphere Reize sowie kurze Darbietungszeiten zu betreffen.

In der Literatur wird berichtet, dass die Wahrnehmungsschwelle für gekreuzte Disparationen besser ist als für ungekreuzte (z.B. Woo und Sillanpaa, 1979: Schwelle gekreuzt: 5,6"; Schwelle ungekreuzt: 14,5"; Grabowski 1983). Schumer und Julesz (1984) fanden außerdem, dass das Stereo-Tiefenunterscheidungsvermögen bei Tests mit gekreuzter Disparation besser ist als mit unge-

kreuzter. Im Gegensatz dazu fand Larson (1990) mit dem Frisby- und dem TNO-Stereotest keine Unterschiede. Eine Übersichtsarbeit zu diesem Thema stammt von Mustillo (1985). Ganz sicher ist, dass die überschwellige räumliche Wahrnehmung vorn und hinten liegender Objekte nicht symmetrisch ist (Schor und Wood, 1983). Aufgrund der unklaren Befunde sollte diese Frage bei Personen, bei denen zuvor ein ausführlicher Binokularstatus erhoben wurde, erneut untersucht werden. Vielleicht findet sich ein Zusammenhang mit der Art der vorhandenen Phorie.

2.4 Das Raumsehen gehört zu den leistungsfähigsten Sehfunktionen

Das räumliche Sehen gehört neben der Noniussehschärfe und dem Bewegungssehen zu den leistungsfähigsten Formen der visuellen Wahrnehmung (Abb. 4).

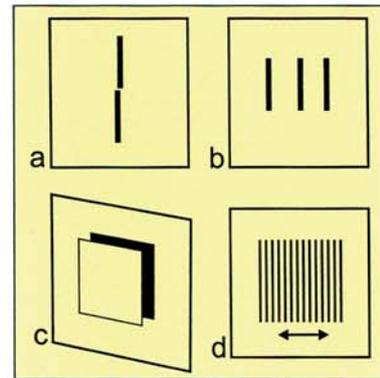


Abb. 4 Die leistungsfähigsten Sehfunktionen und typische Reizmuster: a) Noniussehschärfe Typ I: (Fragestellung: Ist der obere Strich nach rechts oder links versetzt?), b) Noniussehschärfe Typ II (Streckenteilungs-Test, Fragestellung: Ist der mittlere Strich nach rechts oder links verschoben?) c) Stereopsis (Fragestellung: Befindet sich das Quadrat vor dem Hintergrund?), d) Oszillatorische Bewegung (Ist eine Bewegung wahrnehmbar?)

ben?) c) Stereopsis (Fragestellung: Befindet sich das Quadrat vor dem Hintergrund?), d) Oszillatorische Bewegung (Ist eine Bewegung wahrnehmbar?)

Die leistungsfähigste Sehfunktion ist die Noniussehschärfe. Sie erlaubt dem Menschen z.B. kleinste seitliche Versetzungen von Punkten oder Linien zu erkennen. Die bislang höchste Sehleistung wurde in einem Versuch zur Streckenteilung erzielt und im Guinness Buch der Rekorde verewigt. Testperson war Dennis Levi von der School of Optometry in Houston (Klein und Levi, 1985). Er war in der Lage, die Versetzung einer Linie aus der Mittelposition um nur 0,85 Winkelsekunden zu erkennen². Rechnet man die 0,85 Winkelsekunden in Visuseinheiten um, so ergab sich bei diesen Versuchen ein „Streckenteilungsvisus“ von 60/0,85 = 70,6!

Die optimalen Werte für die Stereo-Tiefensehschärfe von ca. zwei bis sechs Winkelsekunden erhält man bei Versuchen mit dem schon seit langem bekannten Dreistäbchentest. Diese Werte entsprechen einem Stereovisus von 10 bis 30. Bei Stereotesten, die aus Zufallspunktmustern bestehen (Random-Dot-Stereogrammen), ist die Stereo-Tiefensehschärfe schlechter. Hier werden meist Stereogrenzwinkel von etwa 20 bis 40 Winkelsekunden gemessen (Tyler, 1974, 1983; Schumer und Ganz, 1979; Schumer und Julesz, 1984).

² Anmerkung: Im Guinness Buch der Rekorde steht dieser Rekord unter dem Stichwort „Augen, Die größte Sehschärfe“. Der Begleittext im Guinness Buch ist allerdings ziemlicher Unsinn. In Wahrheit handelte es sich bei den Versuchen um eine visuelle Streckenteilungsaufgabe (bisection task), bei der die Versuchsperson beurteilen musste, ob ein senkrechter Strich genau mittig zwischen zwei oder vier anderen Strichen stand

Die Wahrnehmung von Bewegungen ist ebenfalls sehr leistungsfähig. Abrupte Objektverschiebungen (Westheimer, 1978) sowie hin und her oszillierende Gittermuster (Wesemann und Norcia, 1992) können noch bei Bewegungsamplituden von etwas mehr als zehn Winkelsekunden eindeutig erkannt werden. Auch Relativbewegungen kann der Mensch sehr gut erkennen.

2.5 Verändert sich die Stereo-Tiefensehschärfe unter refraktiven und phorischen Belastungen?

Bis heute liegen relativ wenige zuverlässige Ergebnisse zu der Frage vor, ob und inwieweit Ametropien und phorische Belastungen zu einer Veränderung der Stereo-Tiefensehschärfe führen. Dies liegt zum einen daran, dass es außer dem klassischen Dreistäbchentest nur wenige Geräte gibt, bei denen die Querdisparation in kleinen Schritten bis hin zu unterschwelligen Werten verändert werden kann (wie z.B. bei Wesemann et al., 1987). Zum anderen sind genaue Messungen der Stereo-Tiefensehschärfe schwierig durchzuführen, da man sehr viele verschiedene Tests mit fein abgestuften Querdisparationen darbieten muss, um statistisch abgesicherte Ergebnisse zu erzielen. Mit den kommerziell erhältlichen Stereo-Tests sind exakte wissenschaftliche Untersuchungen zur Stereo-Tiefensehschärfe deshalb praktisch kaum möglich, da alle diese Tests zu wenig Testzeichen und

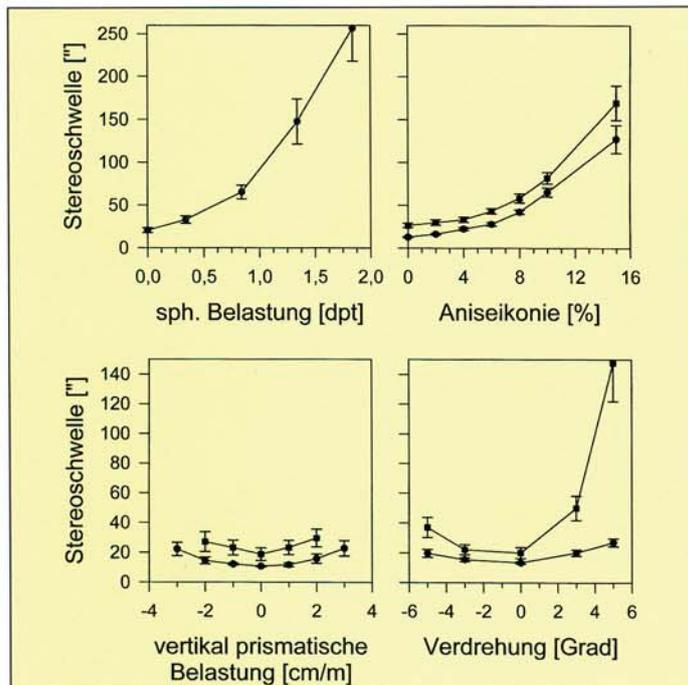


Abb. 5 Visuelle Belastungen verschlechtern das querdisparate Raumsehen unterschiedlich stark. Oben links: Belastung mit sphärischen Plusgläsern. Oben rechts: Einfluss einer künstlich erzeugten Aniseikonie. Unten links: Einfluss von Prismen mit Basis oben oder unten. Unten rechts: Auswirkungen einer Verdrehung der beiden Teilbilder gegeneinander. Man beachte, dass die y-Achsen in der oberen und der unteren Reihe unterschiedlich skaliert sind. Alle Versuchspersonen hatten eine monokulare Sehschärfe von $\geq 1,0$. In drei der vier Graphen wurden die Versuchspersonen in zwei Gruppen eingeteilt. Personen mit sehr guter Stereo-Tiefensehschwelle ohne Belastung: Kreise; Personen mit schlechterer Stereo-Tiefensehschwelle ohne Belastung: Quadrate. (nach Rassow und Wesemann, 1989)

räumliche Abstufungen enthalten. Diese Tests eignen sich eher für grobe, orientierende Untersuchungen oder zur praktischen Überprüfung der Tiefensehschärfe (Goersch, 1982).

Die in Abb. 5 dargestellten Ergebnisse zeigen die Auswirkung von visuellen Belastungen bei Versuchen mit Random-Dot-Mustern an 20 Personen mit normalem Binokularsehen (Rassow und Wesemann, 1989). In diesen Untersuchungen wurde das Netzhautbild auf mehrere Weisen kontrolliert verschlechtert. In Abb. 5a wurde sphärisch „plus“ vorgehalten. In Abb. 5b wurde die Netzhautbildgröße auf einem Auge künstlich vergrößert. In Abb. 5c wurden Prismen mit Basis unten oder oben vor ein Auge gehalten. In Abb. 5d wurden die beiden Teilbilder gegeneinander verdreht.

Während die Stereowahrnehmungsschwelle bei einer sphärischen Belastung und einer Bildgrößendifferenz deutlich anstieg, änderte sich der Stereogrenzwinkel bei vertikaler prismatischer Belastung nur sehr wenig. Bis zu der maximal möglichen vertikalen Belastung, die je nach Versuchsperson bei ca. zwei bis vier cm/m lag, blieb der Stereogrenzwinkel kleiner als 30 Winkelsekunden. Oberhalb der maximal möglichen phorischen Belastung zerbrach das binokulare Einfachsehen dann plötzlich in die Diplopie.

2.6 Ist das Stereosehen eine visuelle Nahfunktion?

Viele behaupten, das Stereosehen sei ausschließlich eine visuelle Nahfunktion. In der Ferne sei das querdisparate Raumsehen hingegen ohne Bedeutung. Dies ist nicht richtig. Wenn man z.B. durch ein Gerät wie den Reinerschen Stereoinverter (Reiner, 1995) blickt, so sieht man deutlich, dass sich die räumliche Tiefe weit entfernter Bäume und Häuser umkehrt. Allein aus der Tatsache, dass man durch den Inverter die umgekehrte Tiefe in der Ferne subjektiv empfinden kann, lässt sich folgern, dass das querdisparate Raumsehen auch in der Ferne aktiv am Sehvorgang mitwirkt.

2.7 Die Wahrnehmung von Random-Dot-Stereogrammen und von Linien-Stereogrammen erfolgt über verschiedene Mechanismen

Shimojo und Nakajima (1981) benutzten ein dem Reinerschen Stereoinverter ähnliches Gerät, das die räumliche Tiefe aller betrachteten Objekte ins Gegenteil verkehrte: „hinten“ und „vorn“ wurden durch einen optischen Trick vertauscht. Dieses Gerät trugen sie eine Woche. Nach kurzer Zeit hatte sich das visuelle System an die veränderten Verhältnisse gewöhnt. Danach wurden Linien-Stereogramme (Zeichnungen von realen Objekten) wieder normal, also mit der richtigen räumlichen Tiefe gesehen. Das bedeutet, dass im Gehirn eine neuronale Umschaltung stattgefunden hatte. Im Gegensatz dazu wurde die räumliche Tiefe von Random-Dot-Stereogrammen nicht wieder normal gesehen. Auch nach der gesamten Tragedauer blieb die räumliche Tiefe der Random-Dot-Stereogramme vertauscht. Daraus lässt sich ableiten, dass beim Erkennen von Linien-Stereogrammen und natürlichen Objekten kortikale Mechanismen beteiligt sind, die mit den Mechanismen, die Random-Dot-Stereogramme verarbeiten, nicht völlig identisch sind, denn sonst hätte die Gewöhnung an den Stereoinverter beide Testzeichenarten gleichartig betroffen. Dies unterstreicht, dass die Random-Dot-Stereopsis einen Sonderfall der Stereopsis darstellt und die Ergebnisse aus Random-Dot-Tests – aufgrund der völlig andersartigen Fusionsreize, vor al-

lem im zentralen Gesichtsfeld – nicht ohne Weiteres auf das natürliche Sehen zu übertragen sind.

2.8 Die obere Grenze des querdysparaten Tiefensehens

Wenn die Querdysparation eines Testobjektes kleiner ist als die Wahrnehmungsschwelle, so erscheint das Objekt zunächst flach. Bei einer Vergrößerung der Querdysparation überschreitet man – wie in Abb. 3 schematisch dargestellt – zuerst die Stereowahrnehmungsschwelle. Oberhalb der Stereowahrnehmungsschwelle wird das Objekt räumlich gesehen. Bei weiterer Vergrößerung der Querdysparation hebt es sich immer weiter vom Hintergrund ab. Schließlich wird eine Querdysparation erreicht, bei der eine sensorische Fusion nicht mehr möglich ist und Diplopie auftritt.

Ein Erkennen von räumlicher Tiefe ist auch in Diplopie außerhalb des Panumbereichs möglich.

Erstaunlicherweise ist ein Tiefensehen trotz der Diplopie möglich. Trotz der Doppelbilder kann man eindeutig angeben, ob sich das Objekt vor oder hinter der Referenzebene befindet. In diesen Bereich des Tiefensehens mit Diplopie fällt auch die Querdysparation, bei der das Stereoobjekt die größte Tiefenempfindung (Stereotiefe) hervorruft.

Bei einer weiteren Vergrößerung der Querdysparation erreicht man schließlich einen Grenzwert, oberhalb dessen das querdysparat Tiefensehen vollständig zerfällt. Nach den klassischen Arbeiten von Ogle (1952) findet man für die verschiedenen Bereiche folgende qualitativ und quantitativ verschiedenen Grenzwerte:

Seheindruck	Obere Querdysparationsgrenze nach Ogle (1952)	
	in der Fovea	6° exzentrisch
I) Tiefensehen mit Fusion (Radius des Panumbereichs)	± 5'	
II) Tiefensehen mit Doppelbildern	± 10'	70'
III) Vager Tiefeneindruck mit Doppelbildern	± 15'	140'

Die beiden ersten Arten des querdysparaten Tiefensehens (I und II) wurden von Ogle übergreifend als „patent stereopsis“ bezeichnet, weil in diesem Bereich die empfundene Tiefe weitgehend mit der tatsächlichen Tiefe übereinstimmt, während er (III) mit „qualitative Stereopsis“ bezeichnete.

Nach neueren Untersuchungen ist die obere Disparationsgrenze, bis zu der man (in Diplopie) sehen kann, ob der Sehreiz räumlich „näher“ oder „weiter entfernt“ liegt als der Fixationspunkt, im Vergleich zur Größe des Panumbereichs sehr viel weiter gesteckt. Westheimer und Tanzman (1956) fanden mit einer Methode, bei der die Reize nur kurz dargeboten wurden, um Vergenzbewegungen zu verhindern, eine obere Querdysparationsgrenze von etwa 7°. Mit einer ähnlichen Methode ergab sich bei Blakemore (1970) eine obere Grenze für die qualitative Stereopsis

von 4° bis 7° für ungekreuzte und von 9° bis 12° für gekreuzte Disparationen. Dengler und Kommerell (1993) fanden Grenzwerte von 6° bis 18°.

3 Der Horopter

Mit dem Wort Horopter bezeichnete Helmholtz „die Lage derjenigen Punkte des äußeren Raumes ... , welche sich auf korrespondierende Stellen beider Netzhäute abbilden und deshalb einfach gesehen werden“ (v.Helmholtz, 1866; 1910, S. 347). Nach der DIN 5340 - 218 ist der empirische Horopter „die Gesamtheit aller Punkte im Außenraum, die bei binokularer Fixation eines gegebenen Objektpunktes auf korrespondierende Netzhautstellen abgebildet werden.“

In der Literatur gibt es erhebliche Differenzen bezüglich der Angaben zur Form des Horopters. Dies liegt unter anderem daran, dass es viele verschiedene Wege gibt, den Horopter zu definieren. Man kann zum Beispiel die Punkte mit der Gesamtdysparation Null oder die Punkte mit der Querdysparation Null für die Festlegung des Horopters zugrunde legen. Nach der DIN-Festlegung ist der Horopter die Gesamtheit aller Punkte, die keine Quer- und keine Vertikaldysparation aufweisen³. Diese Menge aller Punkte nenne ich zur deutlicheren Kennzeichnung manchmal „Punkthoropter“ oder kurz einfach Horopter.

3.1 Die Form des geometrischen Horopters beim Blick des Augenpaars in verschiedene Richtungen

Der Horopter, der sich aus theoretischen Überlegungen auf der Basis der geometrischen Optik ergibt, heißt *geometrischer Horopter* [219]. Die Form dieses Horopters ist dem fachkundigen Leser als *Vieth-Müller-Kreis* bekannt (siehe Abb. 6 und [459]).

Der Vieth-Müller-Kreis verläuft horizontal durch den Fixationspunkt und die Mitten der Eintrittspupillen beider Augen. Alle Punkte auf dem Kreis werden auf korrespondierende Netzhaut-

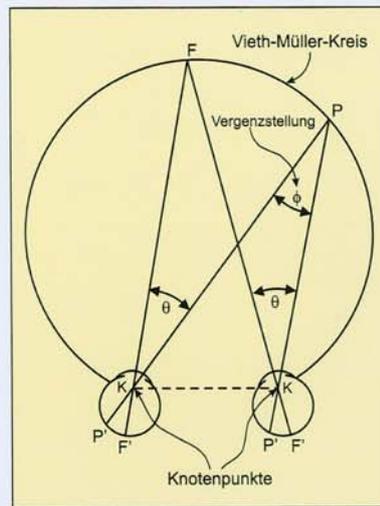


Abb. 6 Der in der Horizontalebene liegende Vieth-Müller-Kreis ist der geometrische Ort aller Punkte, die auf korrespondierende Netzhautstellen abgebildet werden. Dies gilt aber nur bei a) horizontalen Blicklinien oder b) symmetrischer Konvergenz

³ Man beachte, dass in den Experimenten zur Form des Horopters z.B. von Ogle und anderen überwiegend senkrechte Stangen verwendet worden sind, die der Benutzer verschieben musste. Mit diesen Stangen kann nur der Linienhoropter oder der Tiefenhoropter, nicht aber der Horopter nach der DIN-Festlegung bestimmt werden, da durch die Verwendung der Stangen die Vertikaldysparation unsichtbar wird

stellen abgebildet⁴. Der Vieth-Müller-Kreis beschreibt also einen Horizontalschnitt durch den geometrischen Horopter.

Es ist interessant, sich mit der Frage zu beschäftigen, wie der Horopter oberhalb und unterhalb des Vieth-Müller-Kreises weitergeht. Man darf den Horopter nämlich nicht einfach nach oben und unten zu einer Fläche (z.B. Röhre oder Kugelschale) fortsetzen. Die oberhalb und unterhalb des Vieth-Müller-Kreises liegenden Punkte fallen nämlich nicht auf korrespondierende Netzhautstellen, da in diesen Raumrichtungen stets eine Vertikaldisparation zwischen den beiden Augen besteht (Abb. 7a). Nur die Punkte, die genau auf der Mittellinie liegen („Vertikaler Horopter“ in Abb. 7b) werden auf korrespondierende Netzhautstellen abgebildet.

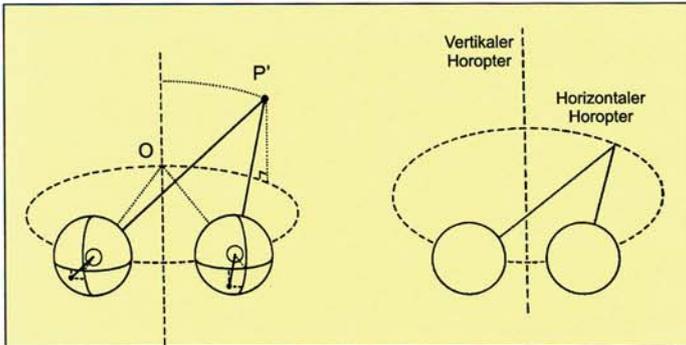


Abb. 7 Schematische Darstellung des geometrischen Horopters. Links: Wenn beide Augen den Punkt O fixieren, wird der Punkt P' nicht auf korrespondierende Netzhautstellen abgebildet, da stets eine Vertikaldisparation auftritt. Rechts: Wenn das Augenpaar auf irgendeinen Punkt auf dem Horopter blickt, werden auch alle anderen Punkte auf dem horizontalen und vertikalen Horopter auf korrespondierende Netzhautstellen abgebildet.

Bei asymmetrischer Konvergenz auf einen Punkt auf dem Vieth-Müller-Kreis behält der geometrische Horopter die gleiche Form wie bei der symmetrischen Konvergenz (Abb. 7b). Alle Punkte auf dem Vieth-Müller-Kreis und alle Punkte auf der Mittellinie fallen auf korrespondierende Netzhautstellen. Das heißt, dass der vertikale Horopter auch beim Seitwärtsblick nicht mit dem Fixationspunkt mitwandert!

Beim Seitwärtsblick in der Horizontalebene bewegt sich der vertikale Horopter nicht mit dem Fixationspunkt, sondern er bleibt in der Mittelsenkrechten.

Eine weitere Besonderheit ergibt sich, wenn die Blickrichtung nicht horizontal ist. Betrachten wir zunächst den Fall des Aufblicks mit symmetrischer Konvergenz.

Wenn der Fixationspunkt auf der vertikalen Horopterlinie vom Punkt P zum Punkt P' aufwärts wandert (Abb. 8a), wandert der Vieth-Müller-Kreis nicht mit. Rechts und links des neuen Fixierpunktes P' gibt es keine korrespondierenden Netzhautstellen, sondern die korrespondierenden Punkte bleiben in der Horizontalebene auf dem Vieth-Müller-Kreis liegen und werden nun weit unterhalb der Fovea in der Peripherie lokalisiert.

⁴ Das gilt natürlich nur für die Punkte auf dem Kreis, die man auch betrachten kann

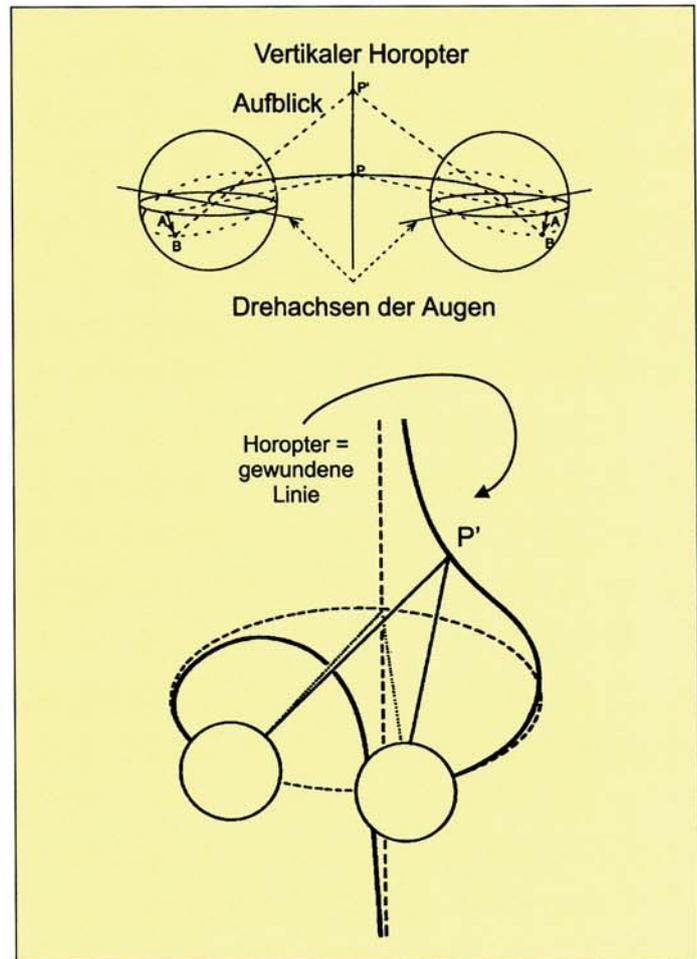


Abb. 8 Oben: Geometrischer Horopter bei symmetrischer Konvergenz im Aufblick: Wenn das Augenpaar vom Punkt P zum Punkt P' aufblickt, bleiben die korrespondierenden Punkte auf dem Vieth-Müller-Kreis in der Horizontalebene liegen und wandern nicht mit. Rechts und links des Fixierpunktes P' gibt es keine Objektpunkte, die auf korrespondierende Netzhautstellen abgebildet werden. Unten: Bei Betrachtung eines rechts oberhalb der Primärposition liegenden Punktes werden nicht mehr die Punkte auf dem „normalen“ Horopter (gestrichelte Linien), sondern ausschließlich die Punkte auf den gewundenen durchgezogenen Linien auf korrespondierende Netzhautstellen abgebildet. (nach Tyler, 1983)

Beim Aufblick in symmetrischer Konvergenz bleibt der horizontale Horopter (Vieth-Müller Kreis) waagrecht und wandert nicht mit dem Fixationspunkt mit.

Noch seltsamer wird die Form des geometrischen Horopters, wenn das Augenpaar nicht symmetrisch konvergiert. Dann beschreibt der Vieth-Müller-Kreis nämlich nicht mehr die Form des geometrischen Horopters. Der Horopter besteht in diesem Fall – wie bereits durch Helmholtz (1866) berechnet und in neuerer Zeit von Tyler (1983) detailliert beschrieben – aus zwei gewundenen Schraubenlinien, von denen die eine genau durch den Fixationspunkt verläuft (Abb. 8b). Diese Schraubenlinien liegen auf der Oberfläche eines gedachten Zylinders über dem Vieth-Müller-Kreis. In diesem Fall gibt es rechts und links vom Fixierpunkt P' ebenfalls keine korrespondierenden Netzhautstellen. Man beach-

te, dass die Form und Krümmung der Schraubenlinien für jeden Fixationspunkt anders sind.

Wenn die Augen nach schräg oben oder unten blicken, besteht der Horopter aus zwei Schraubenlinien. Die Form der Schraubenlinien ist für jeden Fixationspunkt anders.

3.2 Der empirische Horopter / Die Hering-Hillebrandsche Deviation und die Verkippung des vertikalen Horopters

Der tatsächliche Horopter ist der *empirische Horopter* [218]. Er weicht in der Horizontalebene bei symmetrischer Konvergenz ein wenig vom Vieth-Müller-Kreis ab. Diese experimentell messbare Abweichung wird Hering-Hillebrandsche Deviation genannt.

Aber nicht nur in der Horizontalebene, sondern auch in der Vertikalen weicht der empirische Horopter vom geometrischen Horopter ab.

Die Abweichung des vertikalen Horopters von der Mittelsenkrechten macht sich als Verkippung nach hinten bemerkbar. Diese Verkippung des vertikalen Horopters gegen die Senkrechte ist außerordentlich groß und wird wahrscheinlich in erster Linie durch eine Scherung der Richtungswerte in den beiden Augen hervorgerufen⁵ und nicht durch eine Verdrehung der Vertikalmeridiane. Die Beschreibungen von Helmholtz zur Verkippung des vertikalen Horopters wurden in den letzten Jahren von mehreren neueren Untersuchungen bestätigt (Nakayama et al., 1977; Nakayama, 1977; Siderov et al., 1999). Bei diesen Untersuchungen zeigte sich, dass der vertikale Horopter tatsächlich nach hinten geneigt ist (Abb. 9). Die Stärke der Neigung hängt vom Abstand des Fixationspunktes vom Augenpaar ab. Es hat den Anschein, dass der vertikale Horopter immer in etwa durch den Fixationspunkt und

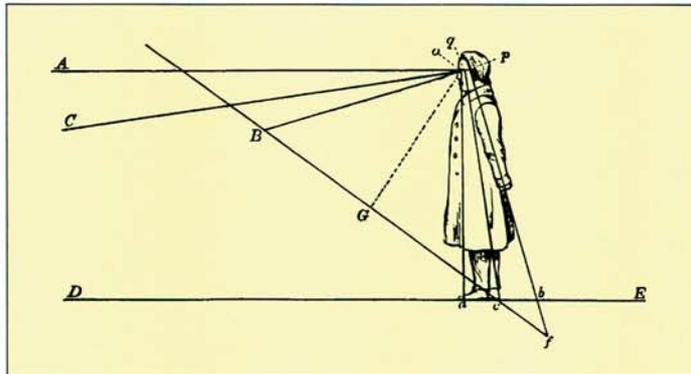


Abb. 9 Originalzeichnung von Helmholtz zur Verkippung des vertikalen Horopters. Nach seinen Angaben, die mittlerweile von neueren Untersuchungen bestätigt wurden, ist der tatsächliche vertikale Horopter nicht senkrecht, sondern so geneigt, dass er in etwa durch den angeblickten Objektpunkt (im Bild Punkt B) und die Füße des stehenden Betrachters verläuft.

⁵ Schon Volkmann (1959) und auch v. Helmholtz (1866) beschrieben, dass die vertikalen Meridiane um ca. 1° in jedem Auge nach außen gedreht sind. Diese Verkippung findet man erstaunlicherweise nur im vertikalen und nicht im horizontalen Meridian. Dies weist auf eine Scherung hin. Eine echte Exzyklovergenz, d.h. eine gegenseitige Verrollung der beiden Augäpfel um die Fixierlinie, bei der sich die Vertikalmeridiane beider Augen oben voneinander entfernen, würde die Verkippung des Horopters noch zusätzlich vergrößern

die Füße des stehenden Betrachters verläuft. Die Verkippung wird noch stärker, wenn die Augen konvergieren oder in den Abblick gehen, denn in beiden Fällen kommt zu der Verkippung der subjektiv Vertikalen noch eine reale Exzyklovergenz [121] bis zu etwa 3° hinzu. Beide Effekte addieren sich⁵.

Der physiologische Sinn dieser Verkippung ist bis heute nicht genau bekannt. Mit der Verkippung des Horopters kann man aber z.B. erklären, warum bei Messungen mit verdrehten Bildern (Rassow und Wesemann, Abb. 5d) der Anstieg des Stereogrenzwinkels unsymmetrisch zum Nullpunkt erfolgte. Auch für das Lesen eines Buches ist die Verkippung des vertikalen Horopters sinnvoll.

Der vertikale Horopter ist nach hinten gekippt. Er verläuft näherungsweise durch den Fixationspunkt und die Füße des stehenden Menschen.

Die Verkippung des empirischen vertikalen Horopters könnte bislang noch nicht bekannte Auswirkungen auf die Wahrnehmung von Stereotesten haben, die Bildelemente oberhalb und unterhalb des Fixierpunktes aufweisen, wie z.B. der Stereo-Dreiecktest oder der Valenztest der MKH (Mess- und Korrektionsmethode nach Haase). Da der vertikale Horopter nach hinten gekippt ist, ist das obere Dreieck näher am Horopter, wenn die Dreiecke „hinten“ lokalisiert werden, und das untere Dreieck näher am Horopter, wenn die Dreiecke „vorn“ gesehen werden. Ohne neuronale Kompensationsmechanismen müssten die Dreiecke deshalb unterschiedlich schnell an die Grenzen des Panumberreichs stoßen. Auch die Frage, ob diese Asymmetrie der beiden Darbietungsarten einen Einfluss auf die Spontanverzögerung hat, ist nicht geklärt.

(Wird im nächsten Heft fortgesetzt.)

Literaturhinweise (Teil I)

- [1] Blakemore, C. (1970): The range and scope of binocular depth discrimination in man. *Physiol.*, 211, 599-622.
- [2] Braddick, O.J. (1979): Binocular single vision and perceptual processing. *Proceedings of the Royal Society, London*, B 204, 503-512.
- [3] Crone, R.A. und Leuridan, O.M.A. (1973): Tolerance for aniseikonia. I. Diplopia thresholds in the vertical and horizontal meridians of the visual field. *Graefe's Arch. Klin. Exp. Ophthalmol.*, 188, 1-16.
- [4] Dengler, B. und Kommerell, G. (1993): Stereoscopic cooperation between the fovea of one eye and the periphery of the other eye at large disparities. *Graefe's Arch. Klin. Exp. Ophthalmol.*, 231, 199-206.
- [5] DIN 5340, (Neue Ausgabe von 1998): Begriffe der physiologischen Optik, Beuth Verlag, Berlin,
- [6] Diner, D.B. und Fender, D.H. (1987): Dependence of Panum's fusional area on local retinal stimulation. *J. Opt. Soc. Am. A Vol. 5*, 1163-1169.
- [7] Fender, D. und Julesz, B. (1967): Extension of Panum's fusional area in binocularly stabilized vision. *J. Opt. Soc. Am.* 57, 819-830.
- [8] Fendick, M. und Westheimer, G. (1983): Effects of practice and the separation of test targets on foveal and peripheral stereoacuity. *Vision Res.*, 23, 145-150.
- [9] Foley, J.M. und Richards, W. (1974): Improvement in stereoanomaly with practice. *Am. J. Optom. Physiol. Opt.*, 51, 935-938.
- [10] Gerling J. et al. (1998): Fixationsdisparation am Pola – Zeigertest: nicht repräsentativ für die Augenstellung unter natürlichen Sehbedingungen. *Klein. Monatsbl. Augenheilk.* 212, 226-233.
- [11] Goersch, H. (1980): Grundlagen der Stereopsis, NOJ, 22(11), 17-23.
- [12] Goersch, H. (1982): Stereopsis unter phorischer Belastung, DOZ Nr.9, 8-18
- [13] Grabowska, A. (1983): Lateral differences in the detection of stereoscopic depth. *Neuropsychologia*. 21, 249-257.
- [14] Haase, H.-J. (1995): Zur Fixationsdisparation. Verlag Optische Fachveröffentlichung GmbH, Heidelberg.
- [15] Hampton, D.R. und Kertesz, A.E. (1983): The extent of Panum's area and the human cortical magnification factor. *Perception*, 12, 161-165.
- [16] v. Helmholtz, H. (1866, 1910): Handbuch der physiologischen Optik. Voss, Hamburg. 1. Auflage 1866, 3. Auflage 1910.
- [17] Howard, H. J. (1919): A test for the judgment of distance. *Am. J. Psychol.* 2, 656-675.

- [18] Howard, I.P. und Rogers, B.J. (1995): *Binokular Vision and Stereopsis*, Oxford Univ. Press.
- [19] Hyson et al. (1983): Eye movements and neural remapping during fusion of misaligned random-dot stereograms. *Journal of the Optical Society of America*, 73, 1665-1673.
- [20] Klein, S.A. und Levi, D.M. (1985): Hyperacuity thresholds of 1 sec: theoretical predictions and empirical validation. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2, 1170-1190.
- [21] Krüger, R. (1997): Untersuchungen im Stereotest des Polatest-Sehprüfgerätes. *NOJ* 10/1997, 6-18.
- [22] Larson, W.L. (1990): An investigation of the difference in stereoacuity between crossed and uncrossed disparities using Frisby and TNO tests. *Optom. Vision Sci.*, 67, 157-161.
- [23] Lau, E. (1922): *Neue Untersuchungen über das Tiefen- und Ebenensehen*. Zeitschr. f. Sinnesphysiologie, 53. Band S. 1-35. Verlag Johann Ambrosius Barth, Leipzig.
- [24] Levy, N.S. und Glick, E.B. (1974): Stereoscopic perception and Snellen visual acuity. *Am. J. Ophthalmol.*, 78, 722-724.
- [25] Lie, I. (1996): Die Organisation der Panum-Bereiche nach der Größe und das Zusammenspiel von sensorischen und motorischen Komponenten des Binokularsehens. *NOJ* 2/, 12-14.
- [26] Lit, A. und Vicars, W.M. (1966): The effect of practice on the speed and accuracy of equidistance-settings. *Am. J. Psychol.*, 72, 464-469.
- [27] Marr, D. und Poggio, T. (1979): A computational theory of human stereo vision. *Proc. R. Soc. Lond., (Biol)*, 204, 301-328.
- [28] McKee, S.P. (1983): The spatial requirements for fine stereoacuity. *Vision Res.*, 23, 191-198.
- [29] Mitchell, D.E. (1966): Retinal disparity and diplopia. *Vision Res.*, 6, 441-451.
- [30] Mustillo, P. (1985): Binocular mechanisms mediating crossed and uncrossed stereopsis. *Psychological Bulletin*, 97, 187-201.
- [31] Nakayama, K., Tyler, C.W., Appelman J. (1977): A new angle on the vertical horopter. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci. (Suppl)*, 16:82.
- [32] Nakayama, K. (1977): Geometrical and physiological aspects of depth perception. In: Benton S., (Ed.), *Image processing. Proc. Soc. Photo-Opt. Instr. Eng.* 120, 1-8.
- [33] Ogle, K.N. (1950): *Researches in binocular vision*. WB Saunders, Philadelphia.
- [34] Ogle, K.N. (1952a): Disparity limits of stereopsis. *Arch. Ophthalmol.*, 48, 50-60.
- [35] Ogle, K.N. (1952b): On the limits of stereoscopic vision. *J. Exp. Psychol.*, 44, 253-59.
- [36] Ogle, K.N. und Prangen, A. de H. (1953): Observations on vertical divergences and hyperphorias. *AMA Archives Ophthalmol.*, 49, 313-334.
- [37] Palmer, D.A. (1961): Measurement of the horizontal extent of Panum's area by a method of constant stimuli. *Optical Acta*, 8, 151-159.
- [38] Panum, P.L. (1858): *Physiologische Untersuchungen über das Sehen mit zwei Augen*. Schweser'sche Buchhandlung, Kiel.
- [39] Piper, H.F. (1999): Peter Ludvig Panums sinnesphysiol. Arbeiten aus seinen Kieler Jahren 1853-1864. *Klin. Monatsbl. Augenheilkd.* 215: 73-77.
- [40] Rassow, B. und Wesemann, W. (1989): Untersuchungen zu Fusion und Stereosehen bei Belastungen des binokularen Systems. *Optometrie* 2, 3-11.
- [41] Reiner, J. (1995): Inverse Stereoskopie. *Klin. Mtsbl. Augenheilkunde*, 206, 49-51.
- [42] Richards, W. (1971): Anomalous stereoscopic depth perception. *J. Opt. Soc. Am.* 61, 410-414.
- [43] Rogers, B.J. und Graham, M. (1979): Motion parallax as an independent cue for depth perception. *Perception* 8, 125-134.
- [44] Rogers, B.J. und Graham, M. (1982): Similarities between motion parallax and stereopsis in human depth perception. *Vision Res.*, 22, 261-270.
- [45] Sachsenweger, R. (1958): *Experimentelle und klinische Untersuchungen des stereoskopischen Raumes*. Nova Acta Leopoldina, Band 20, Nummer 136, Johann Ambrosius Barth Verlag, Leipzig.
- [46] Schober, H. (1958): *Das Sehen*. Fachbuchverlag Leipzig, 2. Auflage.
- [47] Schor, C. M. und Tyler, C. W. (1981): Spatio-temporal properties of Panum's fusional area. *Vision Res.* 21, 683-692.
- [48] Schor, C.M., Wood, I. und Ogawa J. (1984): Binocular sensory fusion is limited by spatial resolution. *Vision Res.*, 24, 661-665.
- [49] Schor, C.M. und Wood, I. (1983): Disparity Range for Local Stereopsis as a function of luminance spatial Frequency. *Vision Res.*, 12, 1649-1654.
- [50] Schor, C.M., Heckmann, T. und Tyler, C. W. (1989): Binocular fusion limits are independent of contrast, luminance gradient and component phases. *Vision Res.*, 29, 821-835.
- [51] Schor, C.M., Ciuffreda K.J., (Hrsg.) (1983): *Vergence eye movements: Basic and clinical aspects*. Butterworths.
- [52] Schumer, R.A. und Ganz, L. (1979): Independent stereoscopic channels for different extents of spatial pooling. *Vision Research*, 19, 1303-1314.
- [53] Schumer, R.A. und Julesz, B. (1984): Binocular disparity modulation sensitivity to disparities offset from the plane of fixation. *Vision Res.*, 24, 533-542.
- [54] Shimojo, S. und Nakajima, Y. (1981): Adaptation to the reversal of binocular depth cues: effects of wearing left-right reversing spectacles on stereoscopic depth perception, *Perception*, 10, 391-402.
- [55] Siderov, J., Harwerth, R.S. und Bedell, H.E. (1999): Stereopsis, cyclovergence and the backwards tilt of the vertical horopter. *Vision Res.*, 39, 1347-57.
- [56] Stollenwerk, G. (1999): Möglichkeiten und Grenzen bei der Anwendung des neuen reduzierten Valenztestes. *NOJ*, 9/99, 26-30.
- [57] Tyler, C.W. (1973): Stereoscopic vision: cortical limitations a disparity scaling effect. *Science*, 181, 276-278.
- [58] Tyler, C.W. (1974): Depth perception in disparity gratings. *Nature*, 251, 140-142.
- [59] Tyler, C.W. (1983): Sensory Processing of Binocular Disparity. In: Schor, C., Ciuffreda, K. (Hrsg.) *Vergence Eye Movements: Basic and clinical Aspects*. Butterworths, 199 – 287.

Anschrift des Autors:

**Priv.-Doz. Dr. Wolfgang Wesemann, Höhere Fachschule
für Augenoptik, Bayenthalgürtel 6–8, 50968 Köln**

Priv.-Doz. Dr. Wolfgang Wesemann, HFA Köln

Beiträge zur Physiologie des Stereosehens, zur Form des Horopters und zur Größe des Panumbereichs, Teil 2

Nachdem im ersten Teil dieser Arbeit (DOZ 4/2000, Seite 22 ff.) Grundlagen zum Stereosehen und die Form des Horopters angesprochen wurden, geht es im zweiten Teil im Wesentlichen um wichtige Erkenntnisse zur Form und Größe des Panumbereichs.

4 Der Panumbereich

Nach DIN 5340 - 311 bezeichnet der *Panumbereich* die unmittelbare Umgebung jeder korrespondierenden Netzhautstelle in einem Auge, in der trotz disparater Abbildung sensorische Fusion möglich ist. Das Wort *Panumraum* [312] bezeichnet die dazugehörige Menge aller Objektpunkte im Außenraum. Er ist somit derjenige Teil des Außenraums, der trotz disparater Abbildung binokular einfach gesehen wird.

Schon Peter Ludvig Panum, der 1858 als Professor in Kiel als einer der Ersten systematische Untersuchungen zum Stereosehen durchführte (Piper, 1999), war bekannt, dass der Bereich des stereoskopischen Einfachsehens (der Panumbereich) meist nicht kreisrund, sondern eher elliptisch ist (Panum, 1858; Ogle und Prangen, 1953).

Nach Ogle (1950, 1952) beträgt der Radius des foveolaren Panumareals ca. ± 5 Winkelminuten. Außerhalb der Fovea wächst die Größe des Panumbereichs in etwa proportional zum Abstand von der Fovea an. Die Ergebnisse über die Ausdehnung des Panumbereichs außerhalb der Fovea sind aber recht uneinheitlich

(siehe Übersichtsarbeit von Mitchell, 1966). Bei einem sehr kleinen Testpunkt ($1,5'$), der nur für kurze Zeit (10 ms) dargeboten wurde, vergrößerte sich z.B. der Panumbereich von 10 Winkelminuten in der Fovea auf 30 Winkelminuten bei 6° Exzentrizität (Palmer, 1961). Crone und Leurindan (1973) fanden, dass die Querdisparation, bei der Diplopie einsetzt, proportional zur Exzentrizität größer wird und etwa 7% des Winkelabstandes von der Fovea beträgt. Auch Hampton und Kertesz (1983) fanden einen linearen Anstieg der Größe des Panumbereichs mit zunehmenden Abstand von der Fovea (Steigung = $0,13^\circ$ pro Grad Exzentrizität). Bei ihren Messungen ergab sich also ein horizontaler Radius von etwa 6,5% des jeweiligen Exzentrizitätswinkels.

Seit den klassischen Arbeiten von Ogle herrscht im Umkehrschluss manchmal die irriige Vorstellung, dass der Durchmesser des Panumbereichs an jeder Netzhautstelle eine bestimmte, konstante Größe hat. Diese Vorstellung ist aber im Lichte neuerer Arbeiten (z.B. Tyler, 1973, 1974; Schor und Tyler, 1981, 1984) nicht mehr haltbar. Heute ist klar, dass die Ausdehnung des Panumbereichs *an allen Stellen der Netzhaut variabel* ist und nicht nur von der retinalen Exzentrizität, sondern auch von der Größe, der Form, der Kantenschärfe und dem Strukturgehalt der Reizmuster abhängt. Zusätzlich haben auch andere Faktoren, wie die jeweils verwendeten Messmethoden, die Dauer der Darbietung, die subjektiven Kriterien für das binokulare Einfachsehen und die Anwesenheit benachbarter Reize einen wesentlichen Einfluss auf die Größe.

Die Auffassung, der Panumbereich habe an einem vorgegebenen Netzhautort eine bestimmte, konstante Größe, ist falsch.

An dieser Stelle möchte ich darauf hinweisen, dass ein Beobachter, der in einem Experiment zur Bestimmung der Grenzen des Panumbereichs mitwirkt, eine prinzipiell andere Sehaufgabe lösen muss als bei der Bestimmung des Stereogrenzwinkels. Bei der Messung des *Stereogrenzwinkels* unterschreitet das räumliche Objekt die Wahrnehmungsschwelle genau dann, wenn die Räumlichkeit *an keiner Stelle* des Objekts mehr erkennbar ist. Bei der Messung des *Panumbereichs* überschreitet das räumliche Objekt die Grenzen des Panumbereichs genau dann, wenn erste Anzeichen der Diplopie *an irgendeiner Stelle* des Objekts sichtbar werden.

4.1 Einfluss von benachbarten Objekten auf die Größe des Panumbereichs

Querdisparat angebotene Punkte werden weniger leicht fusioniert, wenn sich andere Objekte in ihrer Nähe befinden, denn jeder Punkt in der Nähe des Horopters erzeugt eine Zone der Hemmung um sich herum (Abb. 10).

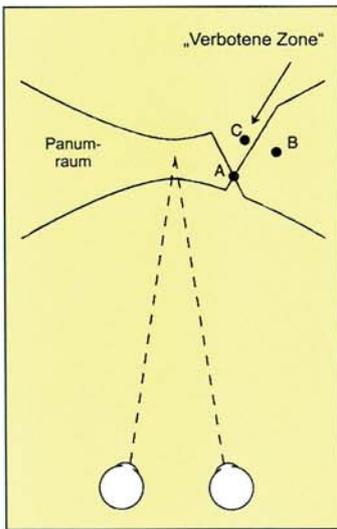


Abb. 10 Das Phänomen der „verbotenen Zone“: Wenn der Punkt A einfach gesehen wird, so verhindert dieser Punkt, dass andere Punkte, die in seiner unmittelbaren Nachbarschaft liegen, (in diesem Fall: Punkt C) binokular einfach gesehen werden, obwohl diese Punkte eigentlich noch innerhalb des Panumraumes liegen. Der Punkt B ist zu weit vom Punkt A entfernt und nicht betroffen

Diese Zone der Hemmung bewirkt, dass andere Punkte, die eigentlich noch innerhalb des Panumbereichs liegen und normalerweise einfach gesehen werden müssten (Punkt C in Abb. 10), nicht mehr fusioniert werden können. Dieses Phänomen wird mit anschaulichen Beispielen bei Howard und Rogers (1995) ausführlich erläutert. Über ähnliche Ergebnisse berichtete auch Krüger (1997). Er beschrieb, dass die Häufigkeit der Wahrnehmung von Diplopie stark zunahm, wenn die Dreiecke eines modifizierten Stereo-Dreiecktests näher an den Fixierpunkt heranrückten. Dieser Effekt ist vielen Anwendern der MKH (Mess- und Korrektionsmethode nach Haase) auch vom Valenztest bekannt. Bei diesem Test verlaufen Striche, die vom zentralen Fixierpunkt ausgehen, bis zu den Dreiecken. Wenn man den zentralen Fixierpunkt genau fixiert und dann die außerhalb der Foveola liegenden Dreiecke ohne Blickbewegungen (sozusagen mit dem geistigen Auge) inspiziert, spalten sich die Dreiecke durch die Anwesenheit der zentralen Striche häufiger auf als beim Stereo-Dreiecktest. Bei diesem Test ist die Größe der Dreiecke dem Valenztest ähnlich; die Dreiecke weisen allerdings als zusätzlichen Unterschied auch einen etwas größeren vertikalen Abstand voneinander auf (siehe dazu auch Stollenwerk, 1999).

4.2 Wie groß ist der Panumbereich?

In der deutschen Literatur zum Binokularsehen gab und gibt es immer wieder Kontroversen über die tatsächliche Größe des Panumbereichs. Befürworter eines kleinen Panumbereichs zitieren gern die oben angegebenen klassischen Werte von Ogle (1950, 1952). Befürworter eines sehr großen Panumbereichs zitieren u.a. gern die Arbeit von Fender und Julesz (1967), da in dieser Arbeit extrem große Werte angegeben wurden. Diese Werte sind allerdings viel größer als diejenigen, die in den neueren Arbeiten gefunden wurden. Den Inhalt der Arbeit von Fender und Julesz möchte ich im Folgenden zunächst kurz zusammenfassen.

4.3 Die Versuche von Fender und Julesz

Die Arbeit von Fender und Julesz (1967) wird manchmal als ein Beweis dafür herangezogen, dass sich die Panumbereiche auf extrem große Durchmesser aufweiten können. Diese Auslegung der Ergebnisse dieser Arbeit ist aber nicht unumstritten. Die Autoren sind später selbst zum Teil von ihrer ursprünglichen Inter-

pretation abgerückt. Fender und Julesz (1967) führten zwei verschiedene Versuche mit *stabilisierten Netzhautbildern* durch.

1. Im ersten Versuch wurden Linien mit einer Breite von 13 Winkelminuten verwendet, deren Querdissipation innerhalb eines sechs Grad großen stabilisierten Bildfeldes mit zwei Winkelminuten pro Sekunde vergrößert wurde. Diese Linien blieben bis zu einer ungekreuzten Querdissipation von ca. 65' fusionierbar. Diese Werte für die Ausdehnung des Panumbereichs sind wesentlich größer als die, die von anderen Autoren gefunden wurden. So fanden Schor und Tyler (siehe unten) für Balken mit einer Breite von 13 Winkelminuten und normaler Präsentation eine Diplopienschwelle von ca. 15 Winkelminuten, also einen um etwa viermal kleineren Wert.

Die ursprünglich gefundenen Werte fielen auch bei einer Nachuntersuchung durch einen der beiden Autoren (Diner und Fender, 1987) wesentlich kleiner aus (ca. 15' bis 20' statt 65'). Im Unterschied zu der ursprünglichen Untersuchung von Fender und Julesz, bei der das gesamte sechs Grad große, helle Testbild stabilisiert worden war, war in der Wiederholungsuntersuchung von Diner und Fender nur eine schwarze Testlinie, nicht aber der Hintergrund stabilisiert worden. Howard und Rogers (1995) vermuten deshalb, dass der Panumbereich in der Untersuchung von Fender und Julesz nur deshalb so ungewöhnlich groß ausfiel, weil sich die Querdissipation über das gesamte 6° große Objekt erstreckte.

In einer anderen Arbeit von Diner und Fender (1988), die mit exakt der gleichen Apparatur wie in Fender und Julesz (1967) durchgeführt worden war, stellte sich zudem heraus, dass eine weitere Ursache für die angebliche Vergrößerung des Panumbereichs in einer Verschiebung *beider* Grenzen des Panumbereichs in die *gleiche Richtung* bestehen könnte, denn Diner und Fender konnten zeigen, dass durch die *Tiefenbewegung* ihrer Reizmuster das gesamte fusionierbare Gebiet „mitgerissen“ wurde. Der Durchmesser des Panumbereichs wurde bei dieser Verschiebung der fusionierbaren Zone aber nicht ungewöhnlich groß. Wörtlich schrieben Diner und Fender in ihrer Schlußfolgerung: „Die wesentliche Komponente für die Modifikation des Fusionsbereichs ... ist eine Verschiebung des Fusionsbereichs über die Retina, ...“.

2. Im zweiten Versuch von 1967 wurden 3,4° große Random-Dot-Muster verwendet, die aus 100 x 100 Punkten bestanden. Im Zentrum dieser Zufallspunktmuster trat eine Testfigur um einen konstanten Betrag räumlich hervor. In diesen Versuchen wurden die beiden Muster anschließend als Ganzes querdissipat gegeneinander verschoben. Die Versuchspersonen hatten die Aufgabe, darauf zu achten, bis zu welcher Querdissipation sie die zentrale Testfigur noch räumlich hervortreten sehen konnte. Eine Person sah die netzhautstabilisierten Stereogramme bis zu einer außergewöhnlich großen Querdissipation von 2°. Mit noch größeren Random-Dot-Mustern (9,8°) und einer anderen Methode konnten Hyson et al. (1983) sogar Disparationen bis zu 3° verkraften. Nach Meinung von Rogers und Howard (1995) und Tyler (1991) dürfen diese Werte aber nicht als eine Erweiterung des Panumbereichs gewertet werden, da es in diesen Versuchen in erster Linie auf die Wahrnehmung der *konstanten* Tiefe in den als Ganzes verschobenen Random-Dot-Mustern ankam. Die räumliche Tiefe zwischen dem zentralen Reiz und dem Umfeld des Random-Dot-Musters wurde bei den Versuchen nämlich die ganze Zeit lang konstant gehalten und nicht vergrößert! Vergrößert wurde nur die Querdissipation zwischen den beiden gesamten Random-Dot-Mustern. Aus heutiger Sicht kann man davon ausgehen,

dass für die räumliche Wahrnehmung hauptsächlich die relativ kleine Querdissipation der zentralen Stereofigur maßgeblich war und nicht die große Querdissipation der beiden Random-Dot-Muster zueinander.

Insgesamt gesehen kann man deshalb sagen, dass die Experimente von Fender und Julesz und auch andere ähnliche Versuche viel zu große Werte für den Panumbereich erbracht haben, die auf das normale Sehen von Stereotesten, wie sie z.B. bei der MKH verwendet werden, nicht übertragen werden dürfen.

4.4 Die Versuche von Schor und anderen zur Größe des Panumbereichs

Im Gegensatz zu der oben beschriebenen Arbeit von Fender und Julesz sind die Ergebnisse der Untersuchungen von Schor und Tyler, auf die hier genauer eingegangen wird, nicht von anderen kritisiert worden. Schor, Tyler und Mitarbeiter führten eine ganze Serie von Untersuchungen durch. Die Ergebnisse erlauben eine Vielzahl von Rückschlüssen auf die Veränderungen des Panumbereichs unter verschiedenen Sehbedingungen.

4.4.1 Horizontale und Vertikale Ausdehnung des Panumbereichs für dünne Linien

In einer Arbeit von 1981 versuchten Schor und Tyler, die Größe des Panumbereichs für dünne Linien unter verschiedenen Versuchsbedingungen zu messen.

Experiment 1: Größe des Panumbereichs für gerade Linien

In ihrem ersten Experiment verwendeten sie die in Abb. 11 dargestellten Testmuster. In einem Abstand von jeweils 0,5 Grad vom Fixierkreuz befanden sich zwei senkrechte dünne Linien, die eine Ausdehnung von 1,5 x 90 Winkelminuten hatten. Die Testmuster für das rechte und linke Auge wurden auf zwei Monitoren angezeigt und über ein Spiegelsystem aus 1,50 m betrachtet.

Die Liniendicke wurde mit 1,5 Winkelminuten absichtlich sehr

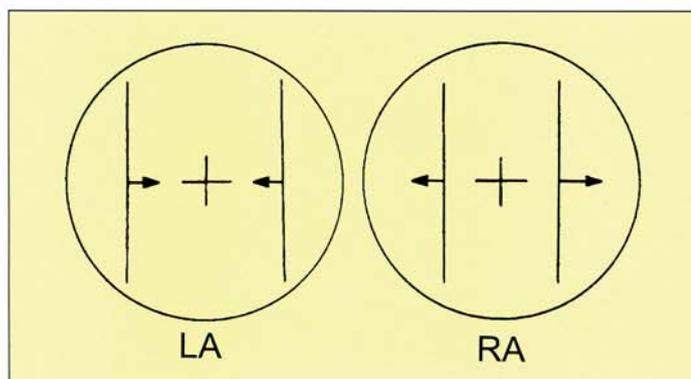


Abb. 11 Testmuster von Experiment 1: Die dünnen Testlinien werden vor dem linken und rechten Auge in entgegengesetzte Richtungen verschoben. Dadurch tritt bei binokularer Betrachtung eine Linie aus dem Bildschirm hervor und die andere zurück

dünn gewählt, damit die beim Überschreiten der Grenzen des Panumbereichs auftretende Diplopie sofort sichtbar wird. Durch eine elektronische Steuerung konnte der Abstand der Linien vom Fixierkreuz verändert werden. Die Verschiebung der Linien erfolgte für das rechte und linke Auge in entgegengesetzte Richtun-

gen. Dadurch entstand eine Querdissipation. Bei den Versuchen wurden gekreuzte und ungekreuzte Querdissipationen stets gleichzeitig dargeboten, d.h. eine Linie trat hinter die Ebene des Bildschirms zurück, während die andere Linie sich vor die Ebene des Bildschirms erhob. Durch diese Vorgehensweise sollte die Gefahr, dass Vergenzbewegungen des Auges die Messergebnisse verfälschen, vermindert werden⁶.

Während der Versuche wurde die Querdissipation der Linien periodisch mit einer zeitlichen Periode von 0,2 bis 10 Sekunden verändert. Dadurch entstand eine sinusförmige Tiefenbewegung der beiden Linien in entgegengesetzte Richtungen. Die Beobachter wurden instruiert, das Kreuz in der Mitte des Bildschirms die ganze Zeit zu fixieren und die Amplitude der Tiefenbewegung so lange zu vergrößern, bis sich die Linien verdoppelten. Wenn anstelle der Tiefenbewegung eine Rechts-Links-Bewegung der Linien gesehen wurde, wurde der Versuch abgebrochen, da diese Art der Bewegung ein Anzeichen für die Suppression eines Auges war. Der horizontale Durchmesser des Panumbereichs ergab sich bei diesem Versuch aus dem maximalen Winkelunterschied zwischen den gekreuzten und ungekreuzten Querdissipationen, die noch zum binokularen Einfachsehen führten.

Mit einer ähnlichen Vorgehensweise wurde auch die vertikale Ausdehnung des Panumbereichs gemessen. Bei diesen Versuchen lagen die zwei Linien horizontal, befanden sich jeweils 0,5 Grad ober- und unterhalb der Foveola und wurden von diesem Punkt aus nach oben und unten bewegt, so dass eine vertikale Dissipation entstand. Sieben normalsichtige Versuchspersonen und ein stereoblinder Beobachter mit einer intermittierenden Esotropie nahmen an den Versuchen teil.

Ergebnisse von Experiment 1

In Abb.12 sind die Ergebnisse dieses Versuchs für die sieben Personen dargestellt. Die verschiedenen Kurven sind in der Grafik jeweils um einen konstanten Betrag nach oben verschoben, so dass die einzelnen Kurvenverläufe besser erkennbar sind. Der Standardfehler der verschiedenen Messwerte war stets kleiner als fünf Prozent. Das bedeutet, dass die Breite der Fehlerbalken kleiner war als der Durchmesser der in Abb. 12 eingezeichneten Kreise. Aus der Abbildung ergibt sich, dass der Panumbereich seine größte Ausdehnung hatte, wenn die Querdissipation sehr langsam verändert wurde. Bis zu einer zeitlichen Frequenz von 0,25 Hz, dies entspricht einer Periode der Tiefenbewegung von 4 s, betrug der horizontale Durchmesser des Panumbereichs ca. 15 bis 20 Winkelminuten. Bei schnelleren Tiefenbewegungen verkleinerte sich der Durchmesser des Panumbereichs bis auf etwa drei Winkelminuten. Man beachte, dass Schor und Tyler hier den Durchmesser des Panumbereichs angeben und nicht, wie meist bei Ogle, den Radius verwenden.

Bei Tests mit dünnen Linien 0,5° rechts und links der Foveola beträgt der horizontale Durchmesser des Panumbereichs etwa 15 bis 20 Winkelminuten.

⁶ Eine Vergenzbewegung, bei der der Fixierpunkt verlassen wird und beispielsweise die vor dem Bildschirm lokalisierte Linie fixiert wird, bewirkt, dass sich die Querdissipation der hinter dem Bildschirm gelegenen Linie entsprechend vergrößert. Bei den Versuchen von Schor macht sich eine solche Vergenzbewegung dadurch bemerkbar, dass die hintere Linie plötzlich doppelt gesehen wird

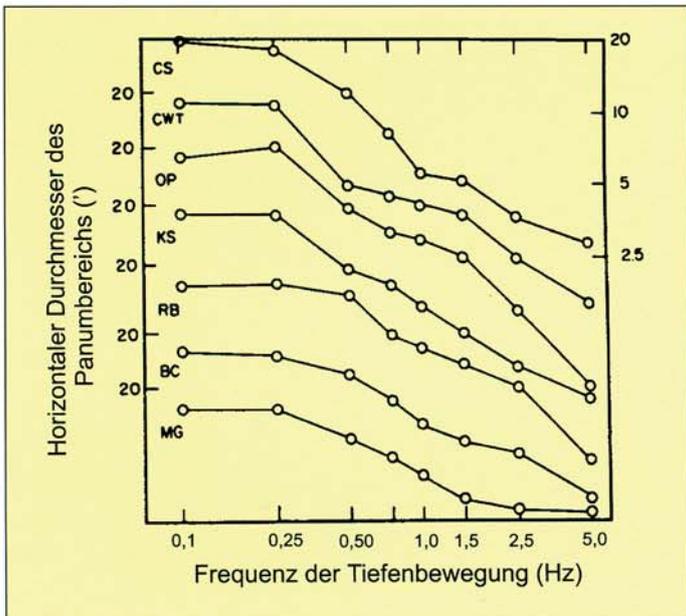


Abb. 12 Horizontaler Durchmesser des Panubereichs für dünne Linien $0,5^\circ$ rechts und links der Foveola. Die Linien vollführten eine Tiefenbewegung, deren Frequenz von 0,1 bis 5 Zyklen pro Sekunde variiert wurde. Für die oberste Kurve ist der y-Achsenmaßstab rechts oben eingezeichnet. Alle anderen Kurven sind der Deutlichkeit halber um einen konstanten Betrag nach unten versetzt

Die vertikale Ausdehnung des Panubereichs war insgesamt kleiner und veränderte sich nicht so stark. Bei einer langsamen zeitlichen Veränderung der vertikalen Disparation ergaben sich Durchmesser zwischen fünf und acht Winkelminuten.

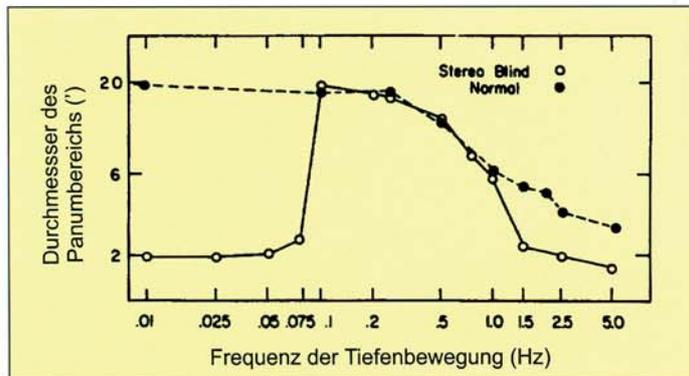


Abb. 13 Durchmesser der Panubereichs bei einem stereoblinden Patienten (durchgezogene Linie). Zum Vergleich ist der Verlauf bei einer Person mit normalem Binokularsehen (gestrichelt) eingetragen. Bei statischen oder langsam bewegten Linien war der Panubereich des stereoblinden Patienten sehr klein ($2'$). Bei schnelleren Tiefenbewegungen ($> 0,1$ Hz) stieg die Größe des Panubereichs trotz der fehlenden Tiefenwahrnehmung auf normale Werte ($20'$) an

Außerordentlich interessant waren die Ergebnisse dieser Messungen bei einer Versuchsperson mit intermittierender Esotropie (Abb. 13). Diese Person war stereoblind und deshalb nicht in der Lage, die haploskopisch dargebotenen Linien räumlich wahrzunehmen. Wenig überraschend war die horizontale Ausdehnung des Panubereichs für unbewegte und sich sehr langsam bewe-

gende räumliche Linien sehr klein. Schon bei kleinen Querdisparationen von $\geq \pm 2$ Winkelminuten trat spontan Suppression eines Auges auf. Bei *schnelleren* räumlichen Tiefenbewegungen ($> 0,75$ Hz) konnte der Prüfling die Linien jedoch genauso gut fusionieren wie ein Augengesunder. Der Durchmesser des Panubereichs stieg bei einer Bewegungsfrequenz von 1 Hz plötzlich von 2 auf 20 Winkelminuten an und verringerte sich bei einer weiteren Erhöhung der Bewegungsfrequenz in gleichem Maße wie bei normalen Betrachtern. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Fusion querdisparat verschobener Objekte und das binokulare Einfachsehen nicht grundsätzlich mit räumlichen Sehen verbunden ist. Ähnliche Ergebnisse waren bereits von Richards (1971) gefunden worden.

Experiment 2: Größe des Panubereichs für räumliche Wellenlinien

Das nächste Experiment wurde mit dem in Abb. 14 dargestellten Reiz durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurden die Linien nicht als Ganzes querdisparat versetzt, sondern die Versetzung erfolgte in Form einer Sinuswelle. Für den Betrachter ergab sich dadurch ein Seheindruck, als ob die Linie wellenförmig aus dem Monitor heraustrat und wieder in ihm verschwand. Während man beim Experiment 1 nur die Querdisparation und die Geschwindigkeit der Tiefenbewegung verändern konnte, hatte man

New

Lesehilfe für Text und Bild

MAXLUPE COLOR

REINECKER
REHA-TECHNIK

64665 Alsbach-Hähnlein
Sandwiesenstr. 19

Informationen unter: Tel.: 0 62 57-93 11 23
Fax: 0 62 57-93 11 33

Elektronische Leselupen, Bildschirmlesegeräte, Vorlesesysteme für Blinde, Arbeitsplatzausstattungen für Sehbehinderte und Blinde

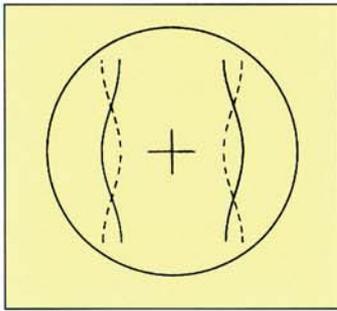


Abb. 14 Testmuster von Experiment 2: Räumliche Wellenlinien $0,5^\circ$ rechts und links der Fovea

beim Versuch 2 zusätzlich die Möglichkeit, die Periode (= $1/\text{Ortsfrequenz}$) der Wellenlinie zu verändern.

Bei diesem Versuch wurden die Prüflinge angewiesen, darauf zu achten, ob sich diejenigen Teile der Welle, die am weitesten aus dem Monitor heraustreten und in ihn hinein verschwanden, verdoppelten oder nicht. Die Ergebnisse dieser Messungen lassen sich zusammenfassend wie in Abb. 15 darstellen.

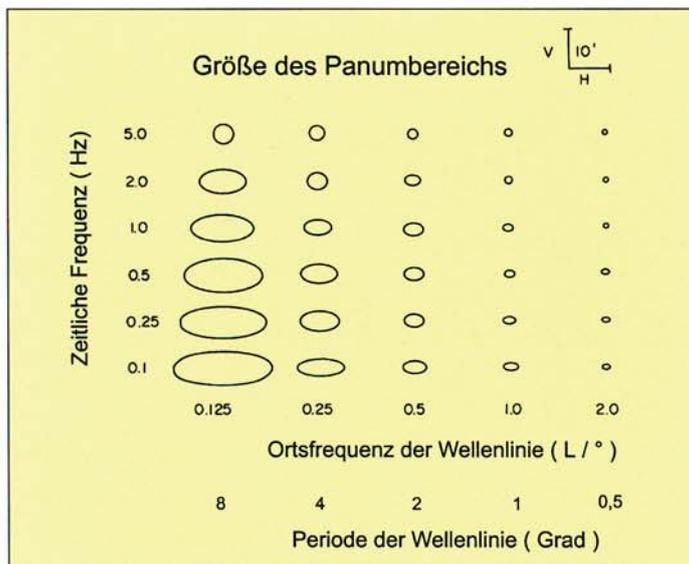


Abb. 15 Wenn die scheinbare Tiefe der Wellenlinien sich langsam verändert, ist die Größe des Panumbereichs maximal. Die Form des Panumbereichs ist elliptisch, die Größe ca. 25×10 Winkelminuten. Wenn die Wellenlinien sich schnell verändern, ist die Größe des Panumbereichs minimal. Die Form des Panumbereichs ist dann rund, die Größe ca. 3×3 Winkelminuten

In dieser Abbildung sind zwei x-Achsen, nämlich die Ortsfrequenz und die Periode der Wellenlinie, aufgetragen. Die y-Achse bezeichnet die zeitliche Frequenz der Veränderung der Disparation. Die Ellipsen und Kreise kennzeichnen die jeweilige Größe des Panumbereichs. Als Maßstab ist rechts oben zusätzlich eine Legende eingetragen.

Deutlich sieht man, dass die Ausdehnung des Panumbereichs bei langsamen zeitlichen und örtlichen Veränderungen der Querdisparation am größten ist. In diesen Fällen hat der Panumbereich die Form einer Ellipse. Hier beträgt der horizontale Durchmesser etwa 25 Minuten und der vertikale Durchmesser etwas weniger als 10 Winkelminuten. Mit zunehmender Ortsfrequenz und Zeitfrequenz schrumpft der Panumbereich und verliert gleichzeitig seine ellipsenförmige Gestalt. Bei hohen zeitlichen und örtlichen Frequenzen ist der Panumbereich näherungsweise kreisförmig.

Der foveolare Panumbereich hat bei Tests mit dünnen räumlichen Linien eine elliptische Gestalt mit einer maximalen Ausdehnung von etwa 25×10 Winkelminuten.

4.4.2 Größe des Panumbereichs für Reizmuster unterschiedlicher Balkenbreite und Kantenschärfe

Aus der Praxis ist bekannt, dass man größere Objekte über einen größeren Bereich von Querdisparationen fusionieren kann als kleinere. Die Fähigkeit zum binokularen Einfachsehen und zum Raumsehen hängt außerdem von der Kantenschärfe ab. Auch dies ist unmittelbar einleuchtend, wenn man daran denkt, dass unscharf abgebildete, verwaschene Sehobjekte über einen größeren Bereich querdisparat verschoben werden können, bevor man die Verschiebung subjektiv bemerkt, als scharf abgebildete Objekte, die einen abrupten Hell-Dunkel-Übergang aufweisen⁷.

In ihrer Untersuchung von 1984 benutzten Schor et al. deshalb – anstelle der in den Experimenten 1 und 2 erwähnten dünnen Linien – Testfiguren mit unterschiedlicher Dicke und Konturschärfe. Ihr erstes Testobjekt war ein weißer, scharfkantig begrenzter, vertikaler Balken, dessen horizontale Breite B von $2,7$ bis 350 Winkelminuten variiert werden konnte. Die vertikale Ausdehnung des Balkens betrug 8 Grad. Als zweites Testobjekt verwendeten sie einen verwaschenen, hellen Balken auf grauem Umfeld, der von zwei unscharfen dunklen Balken flankiert wurde (siehe Abb. 16 und Fußnote⁸). Diese spezielle Art der Helligkeitsverteilung wird in der Wissenschaft auch als „Sombbrero“-Funktion („mexican-hat“-function) bezeichnet. Das zweite Testobjekt hatte also keine scharfen Hell-Dunkel-Kanten, sondern eine sanft verlaufende Helligkeitsverteilung, deren Leuchtdichtemittelwert mit der Leuchtdichte des grauen Hintergrundes ($L = 15 \text{ cd/m}^2$) übereinstimmte.

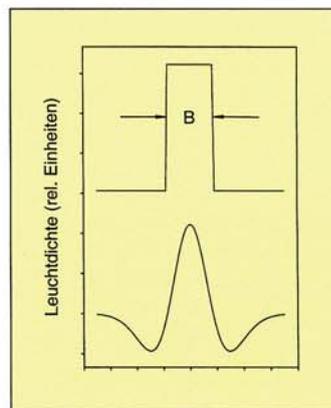


Abb. 16 Helligkeitsprofil der Testbalken. Oben: Heller Balken der Breite B auf dunklem Grund. Unten: Helle verwaschene Linie, die von zwei dunklen verwaschenen Linien flankiert wurde. Der Leuchtdichtemittelwert der Linien gleich dem des grauen Hintergrundes. Zur mathematischen Darstellung des Helligkeitsverlaufs siehe Fußnote 8

Während der Versuche wurde zentral ein $1,5$ Winkelminuten großer Fixierpunkt dargeboten, an den zur Kontrolle von Vergenzbewegungen zusätzlich von oben und unten zwei dünne,

⁷ Große Objekte mit verwaschenen Helligkeitsübergängen enthalten hauptsächlich niedrigen Ortsfrequenzen. Feine Objekte oder Objekte mit scharfkantigen, abrupten Hell-Dunkel-Übergängen enthalten zusätzliche feine Strukturen, d.h. hohe Ortsfrequenzen. Dies ergibt sich aus einer Fourieranalyse der Testmuster

⁸ Das Helligkeitsprofil ließ sich durch die Differenz von 2 Gaußfunktionen beschreiben. Die entsprechende Formel lautet:

$$\text{DOG}(x) = 3\exp(-x^2/\sigma^2) - 2\exp(-x^2/2,25\sigma^2)$$

haploskopisch dargebotene, 0,25 Grad lange, vertikale Noniuslinien grenzten. Diese Linien erschienen genau dann gegeneinander verschoben, wenn der Beobachter den Fixierpunkt nicht mit beiden Augen fixierte, sondern in eine andere Entfernung blickte.

Zur Erzeugung einer räumlichen Tiefe wurden die haploskopisch dargebotenen Balken in entgegengesetzte Richtungen verschoben. Zur Bestimmung der Größe des Panumbereichs wurde die Querdisparation so lange erhöht, bis die Versuchsperson sah, dass sich der im Raum lokalisierte Balken an irgendeiner Stelle in zwei Balken aufzuspalten begann.

Die Beobachter durften die Testfiguren beliebig lang betrachten. Nach jeder Grenzwertbestimmung wurde die Querdisparation wieder so lange verkleinert, bis die Balken erneut fusioniert wurden. Wenn die Noniusstriche nicht mehr übereinander erschienen, wurde der Versuch abgebrochen und wiederholt.

Selbst bei den 350 Minuten breiten Balken – dies entspricht 5,8 Sehwinkelgrad – war der horizontale Durchmesser des Panumbereichs immer noch deutlich kleiner als ein Grad. Dies ist bemerkenswert, da sich bei dieser Balkenbreite die äußeren Begrenzungen des Balkens bereits 2,8 Grad außerhalb der Foveola befanden. (Bei einer anderen Versuchsperson, deren Ergebnisse ebenfalls bei Schor et al. (1984) abgedruckt sind, war die horizontale Ausdehnung des Panumbereichs mit den 350 Minuten breiten scharfkantigen Balken sogar noch kleiner, nämlich nur ca. 20 Winkelminuten.)

Der Panumbereich hat an keiner Netzhautstelle eine bestimmte konstante Größe, sondern er verändert sich mit der Breite der Testobjekte.

Auch bei sehr breiten Sehobjekten mit scharfkantigen Hell-Dunkel-Übergängen ist der Durchmesser des Panumbereichs stets deutlich kleiner als 1 Grad.

Ganz andere Ergebnisse erhielten Schor et al. mit dem Balken mit sanft verlaufendem Helligkeitsprofil (gepunktete Linien in Abb. 17). Bei schmalen unscharfen Balken mit einer Breite von 2,7 bis 11 Winkelminuten stimmte der horizontale Durchmesser des Panumbereichs zunächst sehr gut mit dem Durchmesser überein, der mit den scharfkantigen Balken gefunden worden war. Bei einer größeren Balkenbreite wurde der Panumbereich für unscharfe Balken aber extrem groß. Bei einer Balkenbreite von 350 Winkelminuten ergab sich ein Panumbereichsdurchmesser von 400 Winkelminuten (= $3,3^\circ$). Erst bei noch größeren Querdisparationen trat Diplopie auf.

Außerordentlich interessant ist auch der Verlauf des vertikalen Panumbereichs (Kreise in Abb. 17). Auch die vertikale Ausdehnung mit dem unscharfen Helligkeitsprofil ist bei schmalen Balken zunächst genau so groß wie mit den scharfkantigen Balken. Bei breiteren unscharfen Balken steigt der vertikale Durchmesser des Panumbereichs aber ebenfalls sehr stark an. Er wird schließlich bei einer Balkenbreite von mehr als 22 Winkelminuten fast genauso groß wie die horizontale Ausdehnung. Das bedeutet nichts anderes, als dass der bei schmalen Balken zunächst *ellipsenförmige* Panumbereich mit einem Durchmesser von ca. 22×5 Winkelminuten bei sehr breiten Balken in einen *kreisförmigen* Panumbereich mit einem riesengroßen Durchmesser von bis zu 400 Winkelminuten übergeht. Dies gilt aber nur für unscharfe Balken, denn bei scharfkantigen breiten Balken blieb der Panumbereich elliptisch mit einer max. Ausdehnung von ca. $40' \times 16'$.

Bei Sehobjekten mit sanften unscharfen Hell-Dunkel-Übergängen kann die Querdisparation bis über 3° gesteigert werden, bevor Diplopie auftritt.

In Abb. 17 ist zusätzlich noch die obere Grenze für das Raumsehen mit Diplopie (gestrichelte Linie; Bereich der vagen Tiefenwahrnehmung nach Ogle) eingezeichnet. Zur Messung dieser oberen Querdisparationsschwelle wurde die Querdisparation so lange vergrößert, bis die subjektiv sichtbare räumliche Tiefe vollständig verschwand und das (doppelt gesehene) Testmuster wieder in die Ebene des Fixierpunktes zurückfiel. Die auf diese Weise

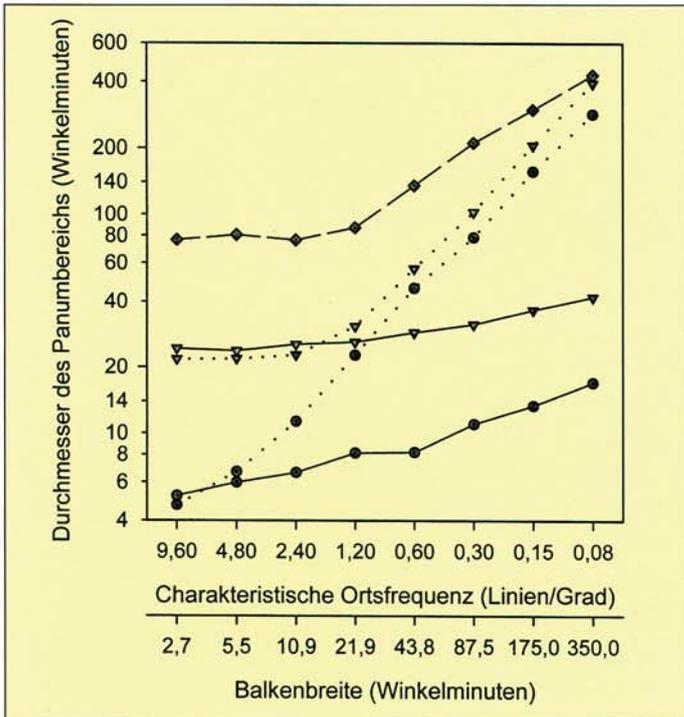


Abb. 17 Durchmesser des Panumbereichs für scharfkantige und unscharfe Balken. Der horizontale Durchmesser wird von den Dreiecken angezeigt. Die Kreise geben den vertikalen Durchmesser an. Gepunktete Linien: Radius des Panumbereichs bei unscharfen Balken. Durchgezogene Linien: Durchmesser des Panumbereichs bei scharfkantigen Balken. Die auf der Spitze stehenden Quadrate kennzeichnen die obere Querdisparationsgrenze, bis zu der (in Diplopie) erkannt wird, ob der Balken vorn oder hinten liegt

Abb. 17 zeigt ein zusammengefasstes Ergebnis dieser aufwendigen Untersuchungen. Aufgetragen ist der horizontale Durchmesser (Dreiecke) und der vertikale Durchmesser (Kreise) des Panumbereichs in Winkelminuten. Wenn man zunächst das Ergebnis für Balken mit einer scharfkantigen Begrenzung betrachtet (durchgezogene Linien), so sieht man, dass sich der horizontale Durchmesser des Panumbereichs von ca. 24 Winkelminuten (bei einer Balkenbreite von 2,7 Sehwinkelminuten) auf ca. 40 Winkelminuten (bei einer Balkenbreite von 350 Sehwinkelminuten) vergrößerte. Gleichzeitig stieg die vertikale Ausdehnung des Panumbereichs von 5 Winkelminuten auf ca. 16 Winkelminuten an.

gemessene Querdissparation übertraf die Grenzen des Panumbereichs beträchtlich! Bei schmalen Balken war die Empfindung der räumlichen Tiefe noch bis zu einer Querdissparation möglich, die etwa viermal größer war, als die Grenze des Panumbereichs. Hier zeigt sich noch einmal, dass räumliche Tiefe selbst dann noch wahrgenommen werden kann, wenn das Sehobjekt längst nicht mehr einfach gesehen wird. Dies weist – wie bereits oben erwähnt – darauf hin, dass unterschiedliche kortikale Mechanismen für die „Verarbeitung von räumlicher Tiefe“ und für das „binokulare Einfachsehen“ zuständig sind. Braddick (1979) vermutet in diesem Zusammenhang, dass die kortikale Tiefenwahrnehmung hauptsächlich auf die in den Testobjekten enthaltenen niedrigen Ortsfrequenzen zugreift, während die im Sehobjekt enthaltenen scharfen Kanten (hohe Ortsfrequenzen) für die Wahrnehmung der Diplopie verantwortlich sind.

In einer Arbeit von 1989, auf die hier nicht mehr im Detail eingegangen werden soll, gingen Schor et al. schließlich der Frage nach, welche der im Bild enthaltenen Ortsfrequenzkomponenten für die Ausdehnung des Panumbereichs verantwortlich sind. Bei Objekten, die aus verschiedenen Ortsfrequenzen zusammengesetzt sind, richtete sich die Größe des Panumbereichs entscheidend nach der im Objekt enthaltenen höchsten Ortsfrequenz.

5 Zusammenfassung und Diskussion

In diesem Artikel habe ich versucht, einige wissenschaftliche Ergebnisse zum Stereosehen zusammenzufassen und anhand von Bildern zu veranschaulichen.

Insgesamt gesehen wurden folgende Ergebnisse gefunden:

1. Sowohl der Horopter als auch der Panumbereich haben keine feste Form und Größe.

2. Die Form des Horopters wird bei aufrechter Kopfhaltung im wesentlichen von einem Faktor beeinflusst, nämlich der Lage des Fixationspunktes im Raum.

3. Die Größe und Form des Panumbereichs hängt von vielen Faktoren ab, z.B. vom Netzhautort, von der Art, der Größe, der Kantenschärfe und der Ortsfrequenzzusammensetzung der Sehobjekte. Auch zeitliche Aspekte, wie z.B. die Geschwindigkeit einer Tiefenbewegung, spielen eine wichtige Rolle. Die Ergebnisse von Schor et al. bestätigen somit die von Lie (1996) geäußerte Vermutung, dass „an jeder Stelle auf der Retina konzentrische überlappende Panumbereiche verschiedener Größe zu finden sein“ sollten. Diese unterschiedlich großen Panumbereiche werden je nach Sehreiz und Sehanforderung aktiviert.

4. *Durchmesser des Panumbereichs für statische dünne Linien:*

In den Untersuchungen von Schor und Tyler (1981) ergaben sich für den Durchmesser des Panumbereichs Zahlenwerte, die etwas größer als die klassischen Werte sind. Nach Ogle beträgt der Durchmesser des foveolaren Panumbereichs etwa 10 Winkelminuten. In der Übersichtsarbeit von Mitchell (1966) ergab sich als Mittelwert über alle Studien ein Durchmesser von 14 Winkelminuten. Nach Schor und Tyler (1981) variierte der Durchmesser des foveolaren Panumbereichs bei sieben Personen von ca. 15 bis 20 Winkelminuten.

5. *Durchmesser des Panumbereichs für breite scharfkantige Balken:*

Bei sehr breiten Balken (Schor et al., 1984) verbreitert sich der foveolare Panumbereich. Der maximale Durchmesser beträgt etwa 40 Winkelminuten.

6. *Durchmesser des Panumbereichs für unscharfe Linien:*

Bei völlig unscharfen Testzeichen, die für die augenoptische Sehtestung nicht von Bedeutung sind, steigt der Durchmesser des Panumbereichs mit zunehmender Balkenbreite sehr stark an (Schor et al., 1984). Bei sehr breiten Balken mit sanft verlaufendem Helligkeitsprofil kann die Querdissparation unter speziellen Versuchsbedingungen bis auf 3° gesteigert werden, bevor ein Versatz der monokularen Teilbilder sichtbar wird.

7. *Form des Panumareals:*

Bei statischen oder sich langsam bewegenden Testobjekten mit scharfen Hell-Dunkel Kanten ist der Panumbereich elliptisch. Wird die Geschwindigkeit der Tiefenbewegung oder die Ortsfrequenz der Reizmuster erhöht, so wird der Panumbereich insgesamt kleiner und zugleich immer kreisförmiger. Bei dünnen, statischen Linien ist die Ellipse etwa 25' x 10' groß. Bei sehr breiten Balken vergrößert sie sich auf etwa 40' x 16'.

Schor et al. (1984) bestimmten quantitativ, wie stark der Durchmesser des Panumbereichs von der Breite des Testobjekts abhängt. Qualitative Ergebnisse teilte Krüger (1997) mit. Er schrieb, daß die „Tendenz zur Diplopie mit abnehmender Größe der Stereo-Objekte zunimmt“. Legt man die von Schor gefundenen Werte zugrunde, so kann man einen Wert für den Durchmesser des Panumbereichs abschätzen, der für den Stereo-Dreiecktest der MKH zutrifft. Wenn man davon ausgeht, dass das Stereodreieck des Polatest classic eine Seitenlänge von ca. 37 mm aufweist, so ergibt sich aus einer Beobachtungsdistanz von 5,5 m eine Dreieckbreite von 23 Sehwinkelminuten. Wenn man weiterhin davon ausgeht, dass die breiteste Stelle eines Objekts für die Ausdehnung des Panumbereichs maßgeblich ist, da die schmaleren Stellen durch die räumliche Tiefe der breiten Objektbestandteile „mitgenommen“ werden, so kann man mit dem Wert von 23 Sehwinkelminuten für die Balkenbreite in die Abb. 17 gehen und den dazugehörigen Durchmesser des Panumbereichs ablesen. Es ergibt sich ein Durchmesser von ca. 26 Winkelminuten. Der dazu gehörende Radius von 13 Winkelminuten stimmt mit dem Stereowinkel des Stereo-Dreiecktests (= 12,5 Winkelminuten aus 5,5 m bei einer Stereoparallaxe von 20 mm) gut überein. Dies bedeutet, dass sich die räumliche Tiefe der Dreiecke in etwa an den Grenzen des normalen Panumbereichs befinden. Dazu passt auch die Beobachtung von Stollenwerk (1999), dass bei einigen Personen am Stereo-Dreiecktest mit 20 mm Basisbreite Diplopie auftritt.

Erstaunlich ist die Tatsache, dass die räumliche Tiefe auch dann richtig erkannt werden kann, wenn die Querdissparation wesentlich größer ist als das Panumareal. Man kann daraus zumindest folgern, dass unterschiedliche kortikale Mechanismen für das „Erkennen der räumlicher Tiefe“ und die „sensorische Fusion“ zuständig sind.

In den Versuchen von Schor und Tyler war die Leuchtdichte relativ niedrig ($L_v = 15 \text{ cd/m}^2$). Deshalb sind die Ergebnisse nicht direkt auf die Testfiguren des Polatests übertragbar. Heute stehen moderne Computermonitore und TFT-Displays zur Verfügung, mit denen ähnliche, computergesteuerte quantitative Untersuchungen auch bei wesentlich höheren Leuchtdichten durchgeführt werden könnten. Wie sehr sich dabei die Ergebnisse für die Grenzen der Panumbereiche verändern, sollte ein Thema für zukünftige wissenschaftliche Untersuchungen sein.

Eine mögliche Ursache für die Abnahme der Größe des Panumbereichs bei hohen Ortsfrequenzen (Abb. 17) könnte die Tatsache sein, dass die räumliche Wahrnehmung eines Objekts durch be-

nachbarte Objekte, die sich in einer anderen räumlichen Tiefe befinden, gestört wird (siehe Kapitel 2.13 „verbotene Zone“). Bei Objekten, in denen sich die räumliche Tiefe schnell verändert, stören sich die verschiedenen Bildbestandteile somit gegenseitig und können schon bei relativ kleinen Querdisparationen ein binokulares Einfachsehen verhindern.

Das Phänomen der verbotenen Zone sollte auch im Zusammenhang mit dem Stereo-Valenztest der MKH bedacht werden. Bei diesem Test reichen Messskalenstriche, die in der unmittelbaren Umgebung des zentralen Punktes angebracht sind, bis an die Spitzen der räumlich hervorstehenden Dreiecke heran. Fixiert man den zentralen Punkt, so bildet die Ebene, in der der zentrale Punkt und die Skalenstriche liegen, eine hemmende Zone, die dazu führen kann, dass sich die Spitzen der Dreiecke aufspalten und Diplopie auftritt. Bedenkt man diesen Sachverhalt, so erscheint ein Bericht von H.-J. Haase (1995, S.80-81, Tab. 2) fragwürdig, in dem beschrieben wird, dass sich die Hälfte seiner Versuchspersonen dem Stereo-Valenztest bis auf weniger als 1,50 m nähern konnten, ohne dass Diplopie auftrat. 5 von 23 Personen sollen sogar in der Lage gewesen sein, alle Bestandteile des Stereo-Valenztests aus 0,75 m bzw. 0,5 m gleichzeitig einfach zu sehen. Aus den Messwerten dieser fünf Personen errechnete Haase Panumbereichsradien von 1,5° und 2,29°. Bei einer experimentellen Überprüfung dieser Beobachtungen von Haase fanden wir zunächst ebenfalls einige Personen, die angaben, die Dreiecke des Valenztests auch aus sehr kurzer Distanz einfach sehen zu können. Wenn wir diese Personen aber baten, sich genau auf den zentralen Punkt zu konzentrieren und dann – sozusagen mit dem „geistigen Auge“ – zu beurteilen, ob das obere oder das untere Dreieck einfach oder doppelt erschien, so erhielten wir von allen Personen die Antwort, dass ein binokulares Einfachsehen aus so kurzer Distanz nicht möglich ist. Aus seinen Ergebnissen schloss Haase, der Durchmesser des zentralen Panumbereichs für Testfiguren mit scharfen Kanten sei mindestens 1 Grad groß. Diese

⁹Auch die Tatsache, dass die „Radien der Panumbereiche“ von 23 augengesunden Studierenden, die Haase in seiner Tab. 2 abgedruckt hat, von 14 Winkelminuten bis 2,29 Grad – also um den Faktor 10 – variieren, zeigt, dass diese Ergebnisse nicht zuverlässig sein können, denn sonst hätten sich die Werte für die Größe des Panumbereichs bei den augengesunden Normalpersonen wohl nicht so stark voneinander unterschieden

Schlussfolgerung erscheint mir sehr problematisch. Hier sind erneute wissenschaftliche Untersuchungen unter exakt kontrollierten Bedingungen notwendig.⁹

Bei zukünftigen Untersuchungen sollte unbedingt darauf geachtet werden, dass die Fixation genau kontrolliert wird, da sonst nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Versuchspersonen den Fixierpunkt während des Tests (evtl. unabsichtlich) „verlassen“ und die Ergebnisse verfälscht werden. Diese Kontrolle könnte einerseits subjektiv durch binokular dargebotene Noniusstriche geschehen, von denen der eine Strich dem linken und der andere Strich dem rechten Auge des Prüflings dargeboten wird. Bei einer Änderung der Vergenz des Augenpaars während der Betrachtung des Tests, versetzen sich diese Striche subjektiv gegeneinander. Technisch wesentlich aufwendiger, aber ebenso machbar, ist eine Kontrolle der Fixation durch objektive Augenbewegungsmessungen, wie sie z.B. von Gerling et al. (1998) eingesetzt wurden.

Danksagung: Herrn Prof. W. Haase, Herrn Prof. G. Kommerell und Herrn Georg Stollenwerk danke ich für die kritische Durchsicht des Manuskripts und viele hilfreiche Anregungen.

Literaturhinweise

- [60] Tyler, C.W. (1991 b): Cyclopean vision. In: Vision and visual dysfunction. Band 9, Regan D. (Hrsg.), Macmillan, 38-71.
- [61] Volkman, A.W. (1859): Die Stereoskopischen Erscheinungen in ihrer Beziehung zu der Lehre von den identischen Netzhautpunkten. Albrecht Von Graefes Arch. Klin. Exp. Ophthalmol. 2:1-100.
- [62] Wesemann, W., Klingenberg, H. und Rassow, B. (1987): Electrophysiological assessment of the human depth-perception threshold. Graefes Arch. Clin. Exp. Ophthalmol., 225, 429-436.
- [63] Wesemann, W. und Norcia, A.M., (1992): Contrast dependence of the oscillatory motion threshold across the visual field. J. Opt. Soc. Am., 9, 1663-1971.
- [64] Westheimer, G. (1978): Spatial phase sensitivity for sinusoidal grating targets. Vision Res., 18, 1073-1074.
- [65] Westheimer, G. und Tanzman, I. J. (1956): Qualitative depth localization with diplopic images. J. Opt. Soc. Am., 46, 116-117.
- [66] Wittenberg et al. (1969): Effect of training on stereoscopic acuity. Am. J. Optom., 46, 645-653.
- [67] Woo, G.C.S. und Sillanpaa, V. (1979): Absolute stereoscopic thresholds as measured by crossed and uncrossed disparities. Am. J. Optom. Physiol. Opt., 56, 350-355.
- [68] Woodburne, L.S. (1934): The effect of a constant visual angle upon the binocular discrimination of depth differences. Am. J. Psychol. 46, 273-286, 1934.

Anschrift des Autors:

Priv.-Doz. Dr. Wolfgang Wesemann, Höhere Fachschule für Augenoptik, Bayenthalgürtel 6–8, 50968 Köln