Wolfgang Wesemann

Physiologie des Stereosehens, Form des Horopters und Größe des Panumbereichs

Kurzzusammenfassung

Der folgende Artikel fasst wissenschaftliche Untersuchungen zum räumlichen Sehen zusammen. Er zeigt, wie sehr die Form des Horopters von der Position des Fixationspunktes abhängt und wie stark der Durchmesser des Panumbereichs von der Art und Größe der Testzeichen beeinflusst wird. So hat der Horopter z. B. bei Fixation auf einen schräg oberhalb oder unterhalb der Primärposition gelegenen Punkt die Form einer Schraubenlinie. Der horizontale Durchmesser des foveolaren Panumbereichs ist bei Testfiguren mit scharfen Hell-Dunkel-Kanten stets kleiner als 1 Sehwinkelgrad.

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 wiederholt.

2. Grundbegriffe des räumlichen Sehens

2.1. Querdisparates und nicht querdisparates Raumsehen

Das *räumliche Sehen* [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] werden unter anderem die folgenden Phänomene zur Abschätzung der räumlichen Tiefe und Richtung ausgenutzt:

1) die geometrische Perspektive (gerade Konturen laufen scheinbar auf Fluchtpunkte zu),
2) die Bewegungsparallaxe (nahe Objekte, die sich quer zur Blickrichtung bewegen, legen bei gleicher Geschwindigkeit einen größeren Sehwinkel pro Sekunde zurück als ferne),
3) die Überdeckung von Objekten (nahe Objekte können ferne ganz oder teilweise verdecken),
4) die Konturenschärfe (ferne Objekte erscheinen verwaschener),
5) atmosphärische Einflüsse (ferne Objekte erscheinen bläulicher und kontrastärmer),
6) die Verteilung von Licht und Schatten (steigert die plastische Wirkung),
7) Texturgradienten (die Struktur/Körnigkeit eines Kiesweges wird in der Ferne immer feiner), sowie
8) das Verhältnis zwischen der scheinbaren Größe und der aus der Erinnerung bekannten tatsächlichen Größe eines betrachteten Objekts.

Neben diesen monokularen Hinweisen auf die räumliche Anordnung der Objekte verfügt das Sehsystem 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 dazugehörenden Objektpunkte im Außenraum bilden den *Horopter* (Abb. 1).

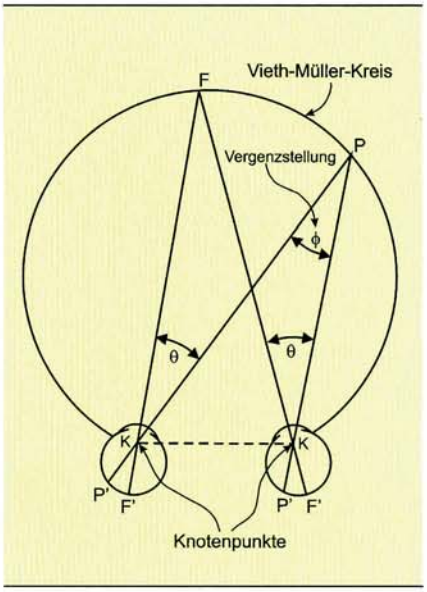

Abb. 1: Korrespondierende Netzhautstellen und Horopter: Wenn beide Augen den in der Horizontalebene liegenden Punkt F fixieren, ist der Vieth-Müller-Kreis der geometrisch-optisch ermittelte Ort aller Punkte, die auf korrespondierende Netzhautstellen abgebildet werden. Er verläuft durch den Fixationspunkt und die Knotenpunkte beider Augen.

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

Alle Objekte, die nicht auf dem Horopter liegen, werden mit einem Versatz abgebildet, den man als *Disparation* [82] bezeichnet (Abb. 2). Die Disparation lässt sich in eine

[1] Alle Zahlen in eckigen Klammern weisen auf die laufende Nummer des kursiv gedruckten Fachbegriffs in der 1998 neu erschienenen DIN 5340 „Begriffe der physiologischen Optik" hin. Weitere Begriffsdefinitionen findet man bei Goersch (1995).

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 (engl. „crossed disparity") vor der Fixationsebene zu schweben (siehe Abb. 2). Im Gegensatz dazu wird ein binasal abgebildetes Objekt mit „ungekreuzter" Querdisparation (engl. „uncrossed disparity") hinter der Fixationsebene lokalisiert. Dieser räumliche Bildeindruck entsteht selbst bei Abwesenheit monokular sichtbarer Objektkonturen – wie z. B. bei Random-Dot-Stereogrammen.

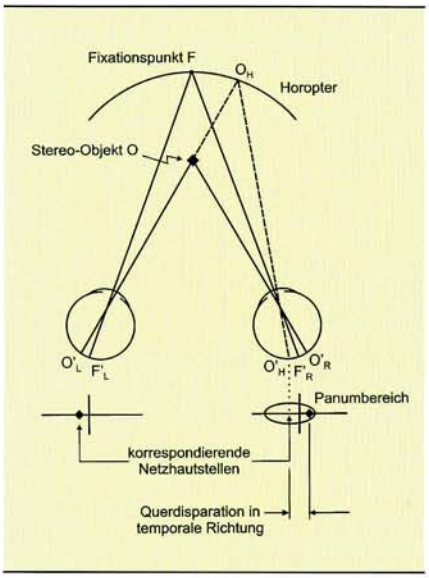

Abb. 2: Disparate Abbildung und Panumbereich: Beide Augen fixieren Punkt F. Das im Vordergrund befindliche Stereo-Objekt O wird bitemporal abgebildet. Es scheint räumlich vor Punkt F zu schweben. Wenn man die Gerade O'_L-O bis zum Horopter verlängert (gestrichelte Linie) erhält man den Punkt O_H. Über O_H kann man die Netzhautstelle im rechten Auge O'_H konstruieren, die mit dem Bildpunkt O'_L im linken Auge korrespondiert. Der Panumbereich bezeichnet eine (meist elliptisch geformte) Umgebung von O'_H, in der alle Bildpunkte liegen, die mit O'_L fusioniert werden können. In dieser (in den Proportionen stark übertriebenen) Skizze wird der Bildpunkt O'_R mit einer temporalen Querdisparation gerade noch innerhalb des Panumbereichs abgebildet und deshalb binokular einfach gesehen.

Nur wenig bekannt ist die Tatsache, dass auch eine der oben genannten Arten des monokularen Raumsehens zu einem „lebendigen" räumlichen Bildeindruck führt, nämlich die *Bewegungsparallaxe* (Abb. 3). Während alle anderen Arten des monokularen Raumsehens die räumliche

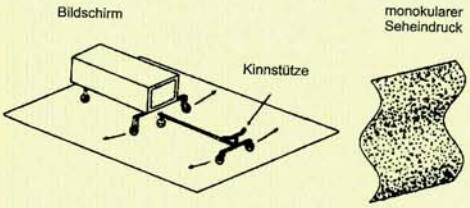

Abb. 3: Eine plastische, räumliche Tiefenwahrnehmung kann nicht nur binokular sondern auch monokular über die Bewegungsparallaxe erzeugt werden. Rogers und Graham (1979) benutzten zur Erzeugung ihrer Testbilder eine bewegliche Kinnstütze, auf der der Proband seinen Kopf nach rechts und links schieben 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.

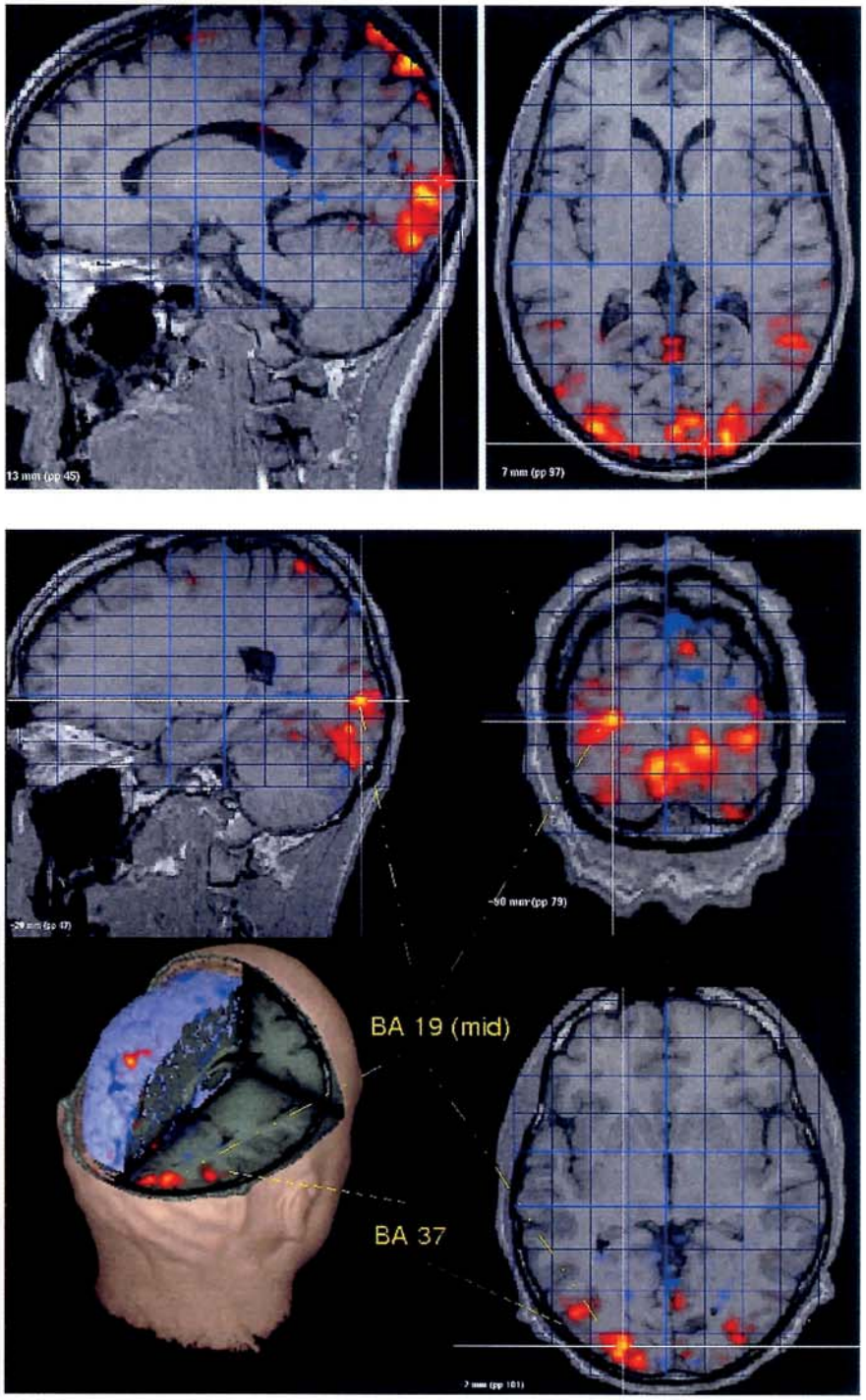

Abb. 4: Neuronale Aktivierung von Area 18 (oben), Area 19 und 37 (unten) durch binokulare Reize, gemessen mit dem Verfahren der funktionellen Kernspintomographie (mit freundlicher Genehmigung aus Greenlee und Rutschmann (2000)).

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.

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 den Arealen 18, 19 und 37 der Großhirnrinde (siehe Abb. 4).

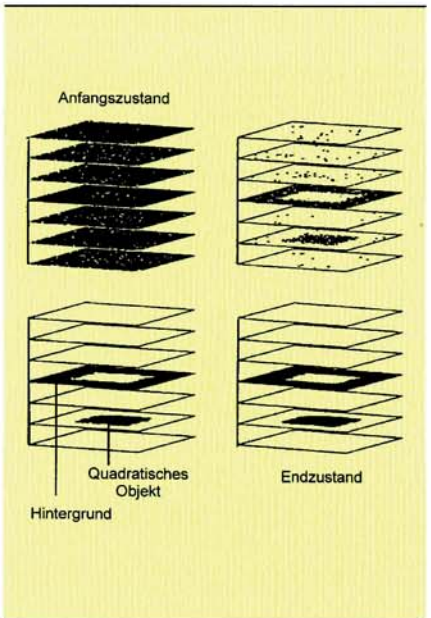

Abb. 5: Schematische Darstellung der Aktivität in einem kooperativen Neuronennetzwerk, das in der Lage ist, die räumliche Tiefe verschiedener Bildbestandteile richtig zuzuordnen. Jede Ebene stellt eine Neuronenschicht dar, die auf eine bestimmte Entfernung spezialisiert ist. Schwarze Punkte kennzeichnen 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 räumliche Tiefe gehören. (nach Marr und Poggio, 1979).

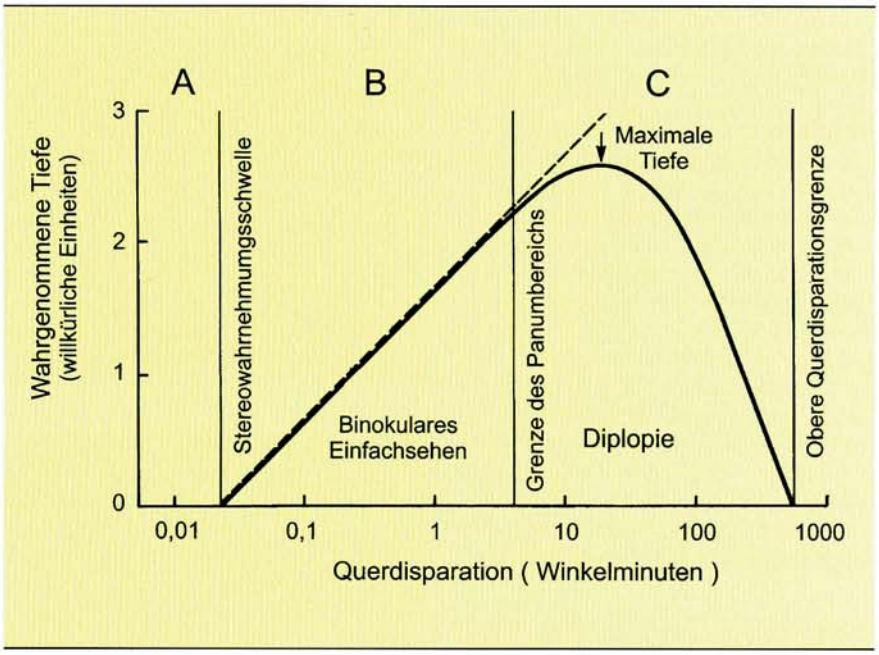

Abb. 6: Schematische Darstellung der querdisparaten Tiefenwahrnehmung. Das Stereosehen kann man in drei Bereiche (A, B, C) unterteilen. (A) Bei Querdisparationen unterhalb der Stereowahrnehmungsschwelle ist die räumliche Tiefe zu klein und für das visuelle System nicht erkennbar. Das Bild erscheint flach. (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 Querdisparation zu groß wird, bleibt nur noch ein vager Tiefeneindruck erhalten. Oberhalb der oberen Querdisparationsgrenze ist eine Einschätzung der räumlichen Tiefe nicht mehr möglich. (Die Zahlenwerte in der Abbildung dienen nur als Anhaltswerte.)

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 (siehe Korn, 1982 und Abb. 5).

2.3. Stereowahrnehmungsschwelle, Stereogrenzwinkel, Stereo-Tiefensehschärfe

Als *Stereowahrnehmungsschwelle* bezeichnet man die untere Grenze des *querdisparaten Raumsehens* [394]. Querdisparationen unterhalb dieser Schwelle können nicht räumlich wahrgenommen werden (Abb. 6). 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 Parameter 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 um so besser ist, je länger die Testlinien sind. Eine Bildunschärfe oder eine Bildgrößendifferenz zwischen dem rechten und linken Auge verschlechtern die Stereo-Tiefensehschärfe hingegen deutlich (Rassow und Wesemann, 1989). 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 5 Grad außerhalb der Fovea angeboten wurden, selbst nach 2000 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 ungekreuzter. 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. Die Grenze des Panumbereichs und obere Grenze des querdisparaten Tiefensehens

Wenn die Querdisparation eines Testobjektes kleiner ist als die Wahrnehmungsschwelle, so erscheint das Objekt zunächst flach. Bei einer Vergrößerung der Querdisparation überschreitet man – wie in Abb. 6 schematisch dargestellt – zuerst die Stereowahrnehmungsschwelle. Oberhalb der Stereowahrnehmungsschwelle wird das Objekt räumlich gesehen. Bei weiterer Vergrößerung der Querdisparation hebt es sich immer weiter vom Hintergrund ab. Schließlich wird eine Querdisparation erreicht, bei der eine sensorische Fusion nicht mehr möglich ist und Diplopie auftritt. Hier liegt die Grenze des Panumbereichs.

Erstaunlicherweise ist ein Tiefensehen auch bei noch größeren Querdisparationen 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 die Querdisparation, bei der das Stereoobjekt die größte Tiefenempfindung (Stereotiefe) hervorruft. Erst bei einer weiteren Vergrößerung der Querdisparation erreicht man schließlich einen Grenzwert, oberhalb dessen das querdisparate Tiefensehen vollständig zerfällt.

Die eindeutige Beurteilung, ob sich ein Objekt vor oder hinter dem Fixationspunkt befindet, ist auch außerhalb der Grenzen des Panumbereichs in Diplopie möglich.

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, sehr viel größer als die Größe des Panumbereichs. Westheimer und Tanzman (1956) fanden mit einer Methode, bei der die Reize nur kurz dargeboten wurden, um Vergenzbewegungen zu verhindern, eine obere Querdisparationsgrenze 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 sogar Grenzwerte von 6 bis 18°.

2.5. Das Raumsehen gehört zu den leistungsfähigsten Sehfunktionen

Das *Stereosehen* [394] gehört neben der Noniussehschärfe und dem Bewegungssehen zu den leistungsfähigsten Formen der visuellen Wahrnehmung (Abb. 7).

Die leistungsfähigste Sehfunktion ist die Noniussehschärfe. Sie erlaubt dem Menschen 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 Prof. Dennis Levi, von der School of Optometry in Houston (Klein und Levi, 1985). Er war in der Lage, die Versetzung einer

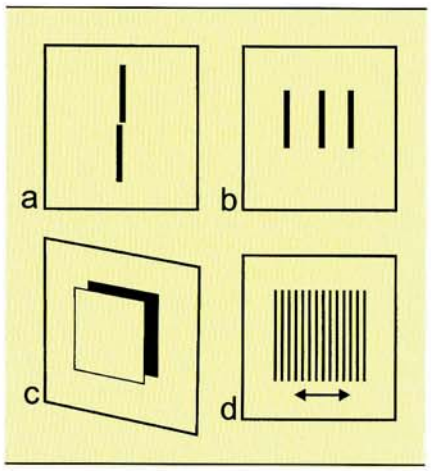

Abb. 7: Die leistungsfähigsten Sehfunktionen und typische Reizmuster: a) Noniussehschärfe Typ I: (Fragestellung: Ist der obere Strich nach rechts oder links versetzt?), b) Noniussehschärfe Typ II (Streckenteilungs-Test, Fragestellung: Ist der mittlere Strich nach rechts oder links verschoben?) c) Stereopsis (Fragestellung: Befindet sich das Quadrat vor dem Hintergrund?), d) Oszillatorische Bewegung (Ist eine Bewegung wahrnehmbar?)

Linie aus der Mittelposition um nur 0,85" zu erkennen[2]. Rechnet man die 0,85" 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. 2–6 Winkelsekunden erhält man bei Versuchen mit dem schon seit langem bekannten Dreistäbchentest. Diese Werte entsprechen einem Stereovisus von 10–30. Bei Stereotesten, die aus Zufallspunktmustern bestehen (Random-Dot-Stereogrammen), ist die Stereo-Tiefensehschärfe schlechter. Hier werden meist Stereogrenzwinkel von etwa 20–40 Winkelsekunden gemessen (Tyler, 1974, 1983, Schumer und Ganz, 1979, Schumer und Julesz, 1984).

Die Wahrnehmung von Bewegungen ist ebenfalls sehr leistungsfähig. Abrupte Objektverschiebungen (Westheimer, 1978) sowie hin- und her oszillierende Gittermuster (Wesemann und Norcia, 1992) können

[2] Anmerkung: Im Guinness Buch der Rekorde steht dieser Rekord unter dem Stichwort „Augen, Die größte Sehschärfe". Der Begleittext im Guiness 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.

noch bei Bewegungsamplituden von etwas mehr als 10 Winkelsekunden eindeutig erkannt werden. Auch Relativbewegungen kann der Mensch sehr gut erkennen.

2.6. 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[3]. Zum anderen sind genaue Messungen der Stereo-Tiefensehschärfe schwierig durchzuführen, da man immer wieder neue, randomisiert ausgewählte 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 wenige Testzeichen und räumliche Abstufungen enthalten. Diese Tests eignen sich eher für grobe orientierende Untersuchungen oder zur praktischen Überprüfung der Tiefensehschärfe (Goersch, 1982).

Die in Abbildung 8 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. 8a wurde sphärisch „plus" vorgehalten. In Abb. 8b wurde die Netzhautbildgröße auf einem Auge künstlich vergrößert. In Abb. 8c wurden Prismen mit Basis unten oder oben vor ein Auge gehalten. In Abb. 8d wurden die beiden Teilbilder gegeneinander verdreht.

Während die Stereowahrnehmungsschwelle bei einer sphärischen Belastung und einer Bildgrößendifferenz deutlich anstieg, änderte sich der Stereogrenzwinkel bei vertikaler

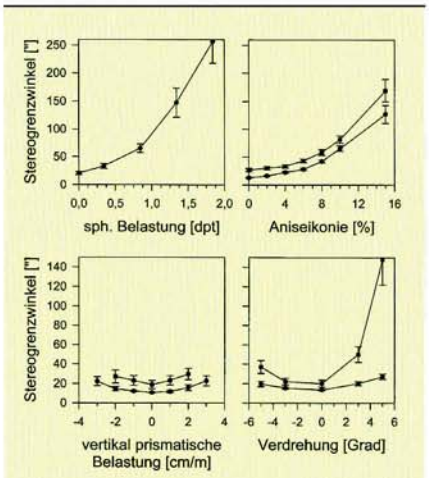

Abb. 8: Visuelle Belastungen verschlechtern das querdisparate Raumsehen unterschiedlich stark. 8a *(Oben links):* Belastung mit sphärischen Plusgläsern. *8b (Oben rechts):* Einfluss einer künstlich erzeugten Aniseikonie. 8c *(Unten links):* Einfluss von Prismen mit Basis oben oder unten. 8d *(Unten rechts):* 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 Untergruppen eingeteilt. Die Einteilung erfolgte nach der Stereoschwelle ohne Belastung. *Kreise:* Personen mit sehr guter Stereoschwelle ohne Belastung; *Quadrate:* Personen mit schlechterer Stereoschwelle ohne Belastung (nach Rassow und Wesemann, 1989).

prismatischer Belastung nur sehr wenig. Bis zu der maximal möglichen vertikalen Belastung, die je nach Versuchsperson bei ca. 2–4 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.

2.7. 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.

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

Shimojo und Nakajima (1981) benutzten ein dem Reiner'schen 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 allem im zentralen Gesichtsfeld – nicht ohne weiteres auf das natürliche Sehen zu übertragen sind.

3. Der Horopter

Mit dem Wort Horopter bezeichnete v. 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 Differenzen bezüglich der Angaben zur Form des

[3] Ein Gerät, bei dem die Querdisparation bis hin zu beliebig kleinen Werten verändert werden kann, wurde z. B. von Wesemann et al. (1987) vorgestellt.

Horopters. Dies liegt unter anderem daran, dass es verschiedene Wege gibt, den Horopter zu vermessen. Man kann zum Beispiel entweder die Punkte mit der *Quer*disparation Null oder die Punkte mit der *Gesamt*disparation Null für die Festlegung des Horopters zu Grunde legen. Im ersten Fall erhielte man einen *„Linienhoropter"*. Der zweite Fall entspricht der DIN-Festlegung. Die dort geforderte Menge aller Punkte, die keine Quer- und keine Vertikaldisparation aufweisen, müsste man zur deutlicheren Kennzeichnung eigentlich als *„Punkthoropter"* bezeichnen[4].

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

Der Punkthoropter, der sich aus theoretischen Überlegungen auf der Basis der geometrischen Optik ergibt, heißt *geometrischer Horopter* [219]. Die Form dieses Horopters ist als *Vieth-Müller-Kreis* bekannt (siehe Abb. 1 und [459]).

Der Vieth-Müller-Kreis verläuft horizontal durch den Fixationspunkt[5] und die Mitte der Eintrittspupillen beider Augen. Alle Punkte auf dem Kreis werden auf korrespondierende Netzhautstellen abgebildet. 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. 9 oben). Nur die Punkte, die genau auf der Mittellinie liegen („Vertikaler Horopter" in Abb. 9 unten) werden auf korrespondierende Netzhautstellen abgebildet.

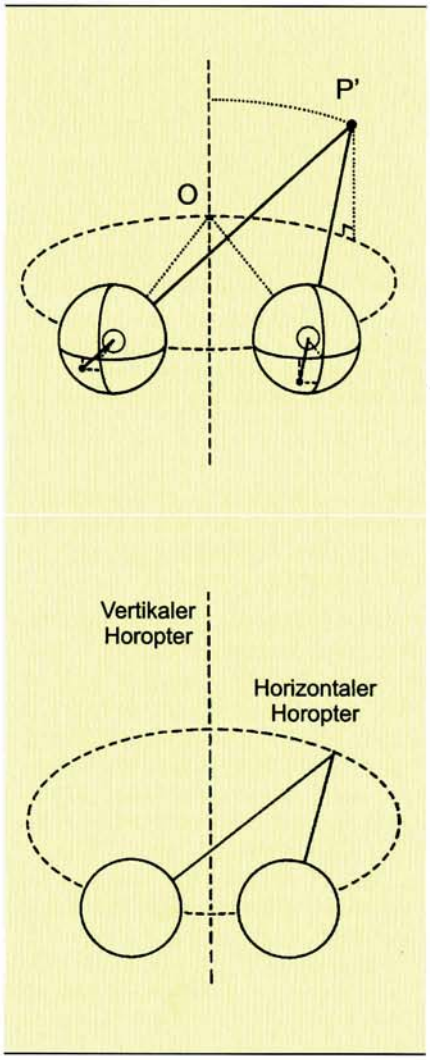

Abb. 9: Geometrischer Horopter: *Oben:* Wenn beide Augen den Punkt O fixieren, wird der Punkt P' nicht auf korrespondierende Netzhautstellen abgebildet, da eine Vertikaldisparation auftritt. *Unten:* Wenn das Augenpaar auf irgendeinen Punkt auf dem horizontalen Horopter blickt, werden auch alle anderen 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. 9 unten). Alle Punkte auf dem Vieth-Müller-Kreis und alle Punkte auf der Mittellinie fallen auf korrespondierende Netzhautstellen. Der vertikale Horopter wandert auch beim Seitwärtsblick nicht mit dem Fixationspunkt mit!

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.

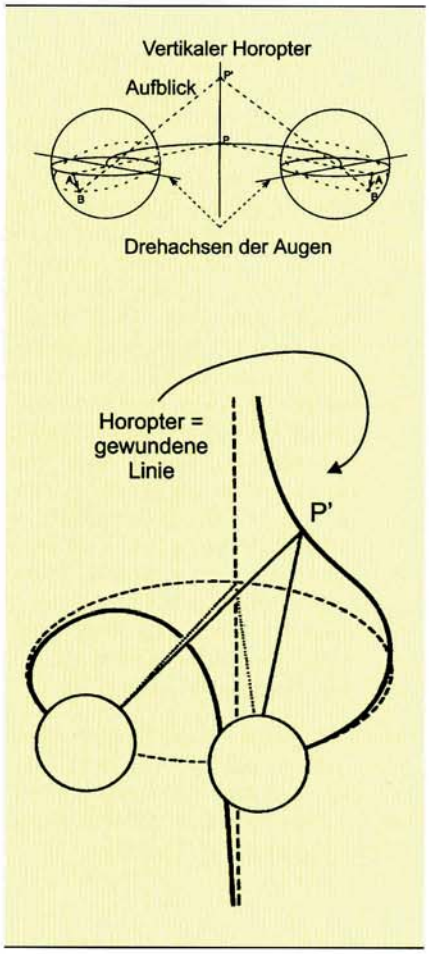

Abb. 10: *Oben:* Geometrischer Horopter bei symmetrischer Konvergenz im Aufblick: Wenn das Augenpaar vom Punkt P zum Punkt P' aufblickt, bleiben die korrespondierenden Punkte auf dem Vieth-Müller-Kreis in der Horizontalebene liegen und wandern nicht mit. Rechts und links des Fixierpunkts P' gibt es keine Objektpunkte, die auf korrespondierende Netzhautstellen abgebildet werden. *Unten:* Bei Fixation 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).

Wenn der Fixationspunkt auf der vertikalen Horopterlinie vom Punkt P zum Punkt P' aufwärts wandert (Abb. 10 oben), wandert der Vieth-Müller-Kreis nicht mit nach oben. Rechts

[4] Man beachte, dass in vielen Experimenten zur Form des Horopters (z. B. von Ogle, 1962) senkrechte Stangen, ähnlich wie beim Dreistäbchentest, verwendet wurden, die der Benutzer verschieben musste. Mit diesen Stangen kann nur der Linienhoropter oder der Tiefenhoropter, aber nicht der Horopter nach der DIN-Festlegung bestimmt werden, da durch die Verwendung der Stangen die Vertikaldisparation unsichtbar wird.

[5] Man unterscheidet: *Fixationspunkt* [158] = angeblickter Objektpunkt und *Fixierpunkt* [163] = anzublickender Objektpunkt (siehe auch Goersch, 1996).

und links des neuen Fixierpunktes P' gibt es keine korrespondierenden Netzhautstellen, sondern die korrespondierenden Punkte bleiben in der Horizontalebene auf dem Vieth-Müller-Kreis und liegen nun weit unterhalb der Fovea in der Peripherie.

Beim Aufblick in symmetrischer Konvergenz bleibt der horizontale Horopter (Vieth-Müller Kreis) waagerecht 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 überhaupt nicht mehr die Form des geometrischen Horopters. Der Horopter besteht in diesem Fall – wie bereits durch v. 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. 10 unten). 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 beachte, 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-Hillebrand'sche 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. Eine Ursache für diese Abweichung ist nach Herzau (1995, S. 125) die Inkongruenz der Netzhäute, wie sie sich z. B. im Kundtschen Streckenteilungsversuch zeigt.

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

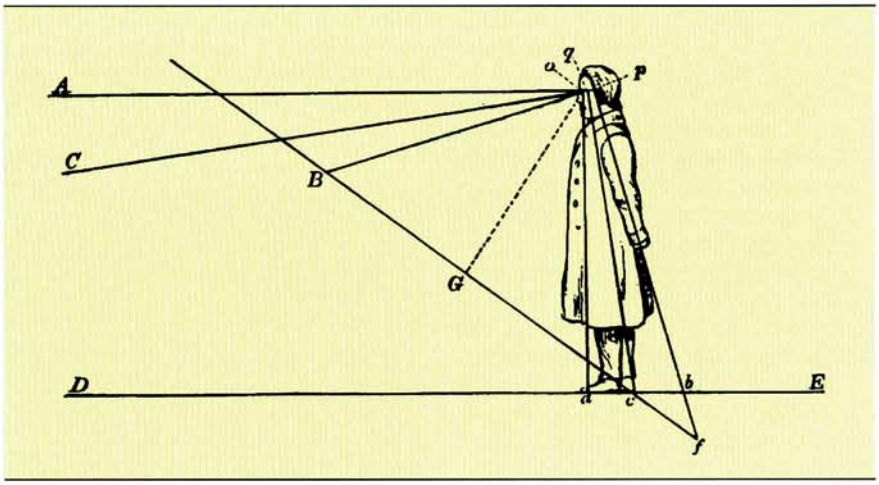

Abb. 11: Originalzeichnung von v. Helmholtz zur Verkippung des vertikalen Horopters. Nach seinen Angaben, die von neueren Untersuchungen bestätigt wurden, ist der tatsächliche vertikale Horopter nicht senkrecht, sondern in etwa so geneigt, dass er stets durch den angeblickten Objektpunkt (im Bild Punkt B) und die Füße des stehenden Betrachters verläuft.

Diese Abweichung des vertikalen Horopters von der Mittelsenkrechten macht sich als Verkippung nach hinten bemerkbar (Abb. 11).

Diese Verkippung des empirischen vertikalen Horopters aus der Senkrechten ist außerordentlich groß und wird wahrscheinlich in erster Linie durch eine Scherung der Richtungswerte in beiden Augen hervorgerufen[6] und nicht durch eine Verdrehung der Vertikalmeridiane. V. Helmholtz Beschreibung der Verkippung wurde in den letzten Jahren von mehreren neueren Untersuchungen bestätigt (Nakayama et al. 1977; Nakayama 1977; Siderov et al. 1999). Es zeigte sich, dass die Stärke der Neigung von der Entfernung des Fixationspunktes abhängt. Es hat den Anschein, als ob der vertikale Horopter immer in etwa durch den Fixationspunkt und die Füße des stehenden Betrachters verläuft. Die Verkippung wird stärker, wenn die Augen stark konvergieren oder in den Abblick gehen, denn in beiden Fällen kommt zu der Scherung der retinalen Richtungswerte noch eine reale *Exzyklovergenz* [121] bis zu etwa 3° hinzu. Beide Effekte addieren sich[6].

[6] 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 Meridian. Dies weist auf eine Scherung hin. Eine echte Exzyklovergenz, d. h. eine gegensinnige Verrollung der beiden Augäpfel um die Fixierlinie, bei der sich die Vertikalmeridiane beider Augen oben voneinander entfernen, vergrößert die Verkippung des Horopters noch zusätzlich.

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. 8d) der Anstieg des Stereogrenzwinkels unsymmetrisch zum Nullpunkt erfolgte. Auch für das Lesen eines Buches ist die Verkippung des vertikalen Horopters sinnvoll.

Der empirische 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 außerdem 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. Da der vertikale Horopter nach hinten verkippt 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 Panumbereichs stoßen. Auch die Frage, ob diese Asymmetrie der beiden Darbietungsarten einen Einfluss auf die Spontanverzögerung hat, ist nicht geklärt.

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 (siehe Abb. 2). Das Wort *Panumraum* [312] bezeichnet die dazugehörige Menge aller Objektpunkte im Außenraum. Der Panumraum ist somit derjenige Teil des Außenraums, der trotz disparater Abbildung binokular einfach gesehen wird. Die geometrischen Verhältnisse sind bereits in Abb. 1 anschaulich dargestellt. Der Däne Peter Ludvigh Panum (Abb. 12), der 1858 als Professor in Kiel als einer der ersten systematische Untersuchungen zum Stereosehen durchführte (Piper 1999), hatte damals geschrieben: „Doppelbildfrei ist nicht nur die Reizung identischer Punkte auf beiden Augen, sondern jeder Punkt im Gesichtsfeld eines Auges arbeitet mit einem gleichgerichteten Empfindungskreis des anderen zusammen."

Abb. 12: Peter Ludvigh Panum (geb. 1820 auf Borholm, gest. 1885 in Kopenhagen) lehrte von 1853 bis 1864 als Professor der Physiologie in Kiel.

Nach den klassischen Messungen von Ogle (1950, 1952) beträgt der Radius des foveolaren Panumbereichs 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 der Panumbereich von 10′ in der Fovea auf 30′ bei 6° Exzentrizität (Palmer, 1961). Crone und Leuridan (1973) fanden, dass die Querdisparation, bei der Diplopie einsetzt, proportional zur Exzentrizität ist und etwa 7 % des Winkelabstandes von der Fovea beträgt. Dies entspricht bei 6° Exzentrizität 6° x 0,07 = 25′. Auch Hampton und Kertesz (1983) fanden einen linearen Anstieg der Größe des Panumbereichs mit zunehmendem Abstand von der Fovea.

Seit den klassischen Arbeiten von Ogle herrscht im Umkehrschluss manchmal die irrige 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; Schor et al. 1984) nicht 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 des Reizmusters 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[7].

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

4.1. Einfluss von benachbarten Objekten auf die Größe des Panumbereichs

Querdisparat angebotene Punkte werden weniger leicht fusioniert, wenn sich andere Objekte mit einer anderen Tiefe in ihrer Nähe befinden, denn jeder Punkt in der Nähe des Horopters erzeugt eine Zone der Hemmung um sich herum (Abb. 13).

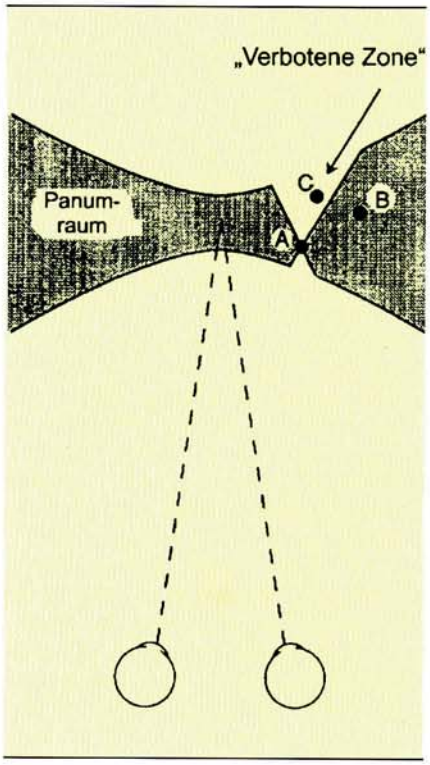

Abb. 13: Das Phänomen der „verbotenen Zone": Wenn der Punkt A einfach gesehen wird, so verhindert dieser Punkt, dass andere Punkte, die in seiner unmittelbaren Nachbarschaft liegen, (in diesem Fall: Punkt C) binokular einfach gesehen werden, obwohl diese eigentlich noch innerhalb des Panumraumes liegen. 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. 13), nicht mehr fusioniert werden können. Dieses Phänomen wird mit anschaulichen Beispielen bei Howard und Rogers (1995, S. 317–320) 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 Anwendern der MKH 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

[7] 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.

durch die Anwesenheit der zentralen Striche viel häufiger auf als beim Stereo-Dreiecktest. Bei diesem Test ist die Größe der Dreiecke dem Valenztest recht 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 z. B. gern die Arbeit von Fender und Julesz (1967), da in dieser Arbeit extrem große Werte gefunden 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 Interpretation abgerückt. Fender und Julesz (1967) führten zwei verschiedene Versuche mit *stabilisierten Netzhautbildern* durch.

Versuch 1: Im ersten Versuch wurden Linien mit einer Breite von 13 Winkelminuten verwendet, deren Querdisparation innerhalb des stabilisierten Bildfeldes mit 2 Winkelminuten pro Sekunde vergrößert wurde. Diese Linien blieben bis zu einer ungekreuzten Querdisparation 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 für Balken mit einer Breite von 13 Winkelminuten und normaler Präsentation eine Diplopieschwelle 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' - 20' statt 65'). Im Unterschied zu der ursprünglichen Untersuchung von Fender und Julesz, bei der ein 6 Grad großes, helles Testbild vor dunklem Hintergrund 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 Querdisparation bis zum Rand des 6° großen Umfeldes 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 Tiefen*bewegung* ihrer Reizmuster das gesamte fusionierbare Gebiet „mitgerissen" wird. 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, ...".

Versuch 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 räumlich hervor. In diesen Versuchen wurden die beiden Muster anschließend als Ganzes querdisparat gegeneinander verschoben. Die Versuchspersonen hatten die Aufgabe, darauf zu achten, bis zu welcher Querdisparation sie die zentrale Testfigur noch räumlich sehen konnte. Eine Person sah die netzhautstabilisierten Stereogramme bis zu einer außergewöhnlich großen Querdisparation 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 und nicht auf die Fusion. Die räumliche Tiefe zwischen dem zentralen Reiz und dem Umfeld des Random-Dot-Musters wurde bei den Versuchen die ganze Zeit lang konstant gehalten und nicht vergrößert! Vergrößert wurde nur die Querdisparation zwischen den beiden gesamten Random-Dot-Mustern. Aus heutiger Sicht kann man davon ausgehen, dass für die räumliche Wahrnehmung hauptsächlich die relativ kleine Querdisparation der zentralen Stereofigur maßgeblich war und nicht die große Querdisparation 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 im folgenden genauer eingegangen wird, nicht von anderen attackiert worden. Schor, Tyler und Mitarbeiter führten eine ganze Serie von Untersuchungen durch. Deren 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 diesem Experiment verwendeten sie zwei dünne Linien, die sich in einem Abstand von jeweils 0,5° vom Fixierkreuz befanden und eine Ausdehnung von 1,5' x 90' hatten. Die dünnen Testlinien wurden auf den Monitoren vor dem linken und rechten Auge in entgegengesetzte Richtungen verschoben. Die Liniendicke wurde mit 1,5' absichtlich sehr dünn gewählt, damit die beim Überschreiten der Grenzen des Panumbereichs auftretende Diplopie sofort sichtbar wird. Bei den Versuchen wurden binasale und bitemporale Querdisparationen stets gleichzeitig dargeboten, d. h., eine Linie trat hinter die Ebene des Bildschirms zurück, während die andere Linie aus der Ebene des Bildschirms heraustrat. Durch diese Vorgehensweise sollte die Gefahr, dass Vergenzbewegungen des Auges die Messergebnisse verfälschen, vermindert werden[8].

Während der Versuche wurde die Querdisparation der Linien periodisch mit einer zeitlichen Periode von 0,2 bis 10 Sekunden verändert. Dies entsprach einer zeitlichen Frequenz von 5 bis 0,1 Hz. Dadurch entstand eine sinusförmige Tiefenbewegung der beiden dünnen Linien in entgegengesetzte Richtungen. Die Beobachter wurden instruiert, das Fixierkreuz in der Mitte des Bildschirms die ganze Zeit zu betrachten und die Amplitude der Tiefenbewegung so lange zu vergrößern, bis sich die Linien bei ihrer extremsten Auslenkung 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 einer Linie war.

Ergebnisse von Experiment 1:

In Abb. 14 sind die Ergebnisse dieses Versuchs für 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. Aus der Abbildung ergibt sich, dass der Panumbereich seine größte Ausdehnung hat, wenn sich die Querdisparation überhaupt nicht oder sehr langsam verändert. Bis zu einer zeitlichen Frequenz von 0,25 Hz, dies entspricht einer zeitlichen Periode der Tiefenbewegung von 4 s, betrug der horizontale Durchmesser des Panumbereichs ca. 15 bis 20'. Bei schnelleren Tiefenbewegungen verkleinerte sich der Durchmesser des Panumbereichs auf etwa 3 bis 6'[9].

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

Die vertikale Ausdehnung des Panumbereichs war insgesamt kleiner und veränderte sich nicht so stark. Bei statischen Linien oder einer sehr langsamen zeitlichen Veränderung der vertikalen Disparation ergaben sich vertikale Durchmesser zwischen 5 und 8'. Bei schnelleren Tiefenbewegungen verringerte sich der vertikale Durchmesser auf Werte von 3 bis 6'.

Interessante Ergebnisse fanden Schor und Tyler bei einer Versuchsperson mit intermittierender Esotropie (Abb. 15). Diese Person war stereoblind und deshalb nicht in der Lage, die haploskopisch dargebotenen Linien räumlich wahrzunehmen. Wenig überraschend war die horizontale Ausdehnung des Panumbereichs für unbewegte und sich sehr langsam bewegende räumliche Linien sehr klein. Schon bei Querdisparationen von mehr als 2' trat spontan Suppression eines Auges auf. Bei *schnelleren* räumlichen Tiefenbewegungen (f > 0,75

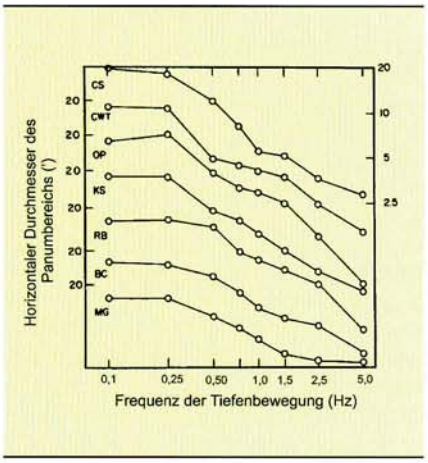

Abb. 14: Horizontaler Durchmesser des Panumbereichs für dünne Linien 0,5° rechts und links der Foveola. Die Linien vollführten eine Tiefenbewegung, deren Frequenz von 0,1 bis 5 Zyklen pro Sekunde variiert wurde. Für die oberste Kurve ist der y-Achsenmaßstab rechts oben eingezeichnet. Alle anderen Kurven sind der Deutlichkeit halber um einen konstanten Betrag nach unten versetzt.

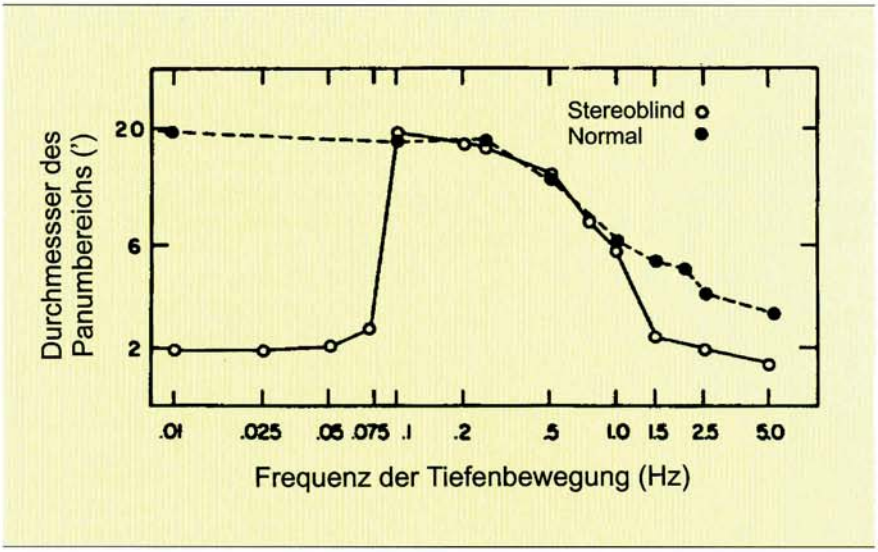

Abb. 15: Durchmesser des Panumbereichs bei einem stereoblinden Patienten (durchgezogene Linie). Zum Vergleich ist der Verlauf bei einer Person mit normalem Binokularsehen (gestrichelt) eingetragen. Bei statischen oder langsam bewegten Linien war der Panumbereich des stereoblinden Patienten sehr klein (2'). Bei schnelleren Tiefenbewegungen (f > 0,1 Hz) stieg die Größe des Panumbereichs trotz der fehlenden Tiefenwahrnehmung auf normale Werte (20') an .

[8] Eine Vergenzbewegung, bei der der Fixierpunkt verlassen wird und beispielsweise die vor dem Bildschirm lokalisierte Linie fixiert wird, bewirkt, dass sich die Querdisparation 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.

[9] Man beachte, dass ich in allen Abbildungen dieses Artikels stets den Durchmesser des Panumbereichs angebe und nicht wie Ogle den Radius.

Hz) konnte der Prüfling die Linien jedoch genauso gut fusionieren wie ein Augengesunder. Der Durchmesser des Panumbereichs stieg bei einer Bewegungsfrequenz von 1 Hz plötzlich von 2 auf 20' an und verringerte sich dann bei einer weiteren Erhöhung der Bewegungsfrequenz in gleichem Maße wie bei normalen Betrachtern. Bei diesen Querdisparationen konnte der Beobachter die beiden Teilbilder binokular einfach sehen; eine echte Tiefenwahrnehmung hatte er aber nicht. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Fusion querdisparat verschobener Objekte und das binokulare Einfachsehen nicht immer mit dem räumlichen Sehen verbunden sind. Ähnliche Ergebnisse waren bereits von Richards (1971) gefunden worden.

Experiment 2: Größe des Panumbereichs für räumliche Wellenlinien

Dieses Experiment wurde mit dem in Abb. 16 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 Linien wellenförmig aus dem Monitor heraustraten und wieder in ihm verschwanden. Bei diesem Versuch konnte nicht nur die zeitliche Frequenz, sondern auch die Periode (p = 1/Ortsfrequenz) der Wellenlinie verändert werden.

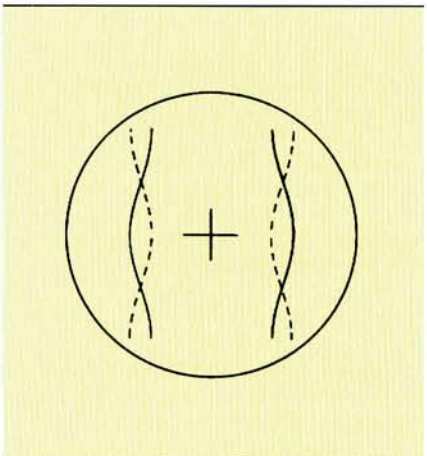

Abb. 16: Testmuster von Experiment 2: Räumliche Wellenlinien 0,5° rechts und links der Fovea.

Die Prüflinge sollten darauf achten, ob sich diejenigen Teile der Welle, die am weitesten aus dem Monitor heraus- und hinter ihn zurücktraten, verdoppelten oder nicht. Die Ergebnisse dieser Messungen lassen sich zusammenfassend wie in Abb. 17 darstellen.

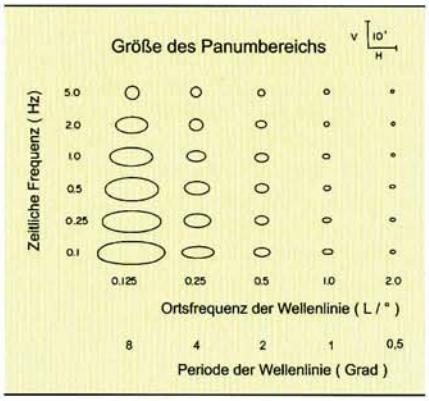

Abb. 17: Wenn die räumliche Tiefe der Wellenlinien sich langsam verändert, ist die Größe des Panumbereichs maximal. Die Form des Panumbereichs ist elliptisch, die Größe ca. 25' x 10'. Wenn die räumliche Tiefe in den Wellenlinien sich schnell ändert, ist die Größe des Panumbereichs minimal. Die Form des Panumbereichs ist dann rund, die Größe ca. 3' x 3'.

In Abb. 17 sind zwei x-Achsen, nämlich die Ortsfrequenz und die Periode der Wellenlinie, aufgetragen. Diese zwei Achsen beschreiben das gleiche. Sie sind verschiedene Weisen, nach denen man die Welligkeit der Linien beschreiben kann. Die y-Achse kennzeichnet die zeitliche Frequenz. Sie ist ein Maß für die Geschwindigkeit, mit der die Disparation verändert wurde. Die Ellipsen und Kreise veranschaulichen 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' und der vertikale Durchmesser etwas weniger als 10'. Diese elliptische Form war bereits Panum bekannt (Panum, 1858; Ogle und Prangen, 1953). 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 x 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 aufweisen[10].

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 Konturenschärfe. 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 2 unscharfen dunklen Balken flankiert wurde (siehe Abbildung 18 und Fußnote[11]). Diese spezielle Art der Helligkeitsverteilung wird in der Wissenschaft auch als „Sombrero"-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_U = 15 cd/m^2) übereinstimmte.

Während der Versuche wurde zentral ein 1,5 Winkelminuten großer Fixierpunkt dargeboten, an den zur Kontrolle von Vergenzbewegungen

[10] Große Objekte mit verwaschenen Helligkeitsübergängen enthalten hauptsächlich niedrigen Ortsfrequenzen. Feine Objekte oder Objekte mit scharfenkantigen, abrupten hell-dunkel Übergängen enthalten zusätzliche feine Strukturen, d. h. hohe Ortsfrequenzen. Dies ergibt sich aus einer Fourieranalyse der Testmuster.

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

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

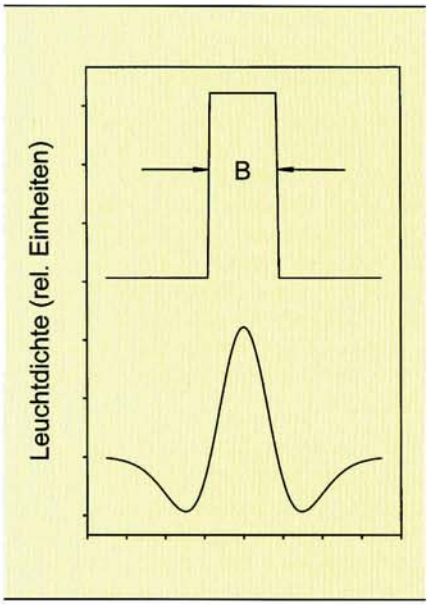

Abb. 18: Helligkeitsprofil der Testlinien. *Oben:* Heller Balken der Breite B auf dunklem Grund. *Unten:* Helle verwaschene Linie, die von zwei dunklen verwaschenen Linien flankiert wird.

zusätzlich von oben und unten 2 dünne, 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.

Abb. 19 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' (bei einer Balkenbreite von 2,7') auf ca. 40' (bei einer Balkenbreite von 350') vergrößerte. Gleichzeitig stieg die vertikale Ausdehnung des Panumbereichs von 5 auf ca. 16' an. Selbst bei den 350' breiten Balken - dies entspricht 5,8° – war der horizontale Durchmesser des Panumbereichs noch immer deutlich kleiner als 1°. Dies ist bemerkenswert, da sich bei dieser Balkenbreite die äußeren Begrenzungen des Balkens bereits 2,8° 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' breiten scharfkantigen Balken sogar noch kleiner, nämlich nur etwa 20'.

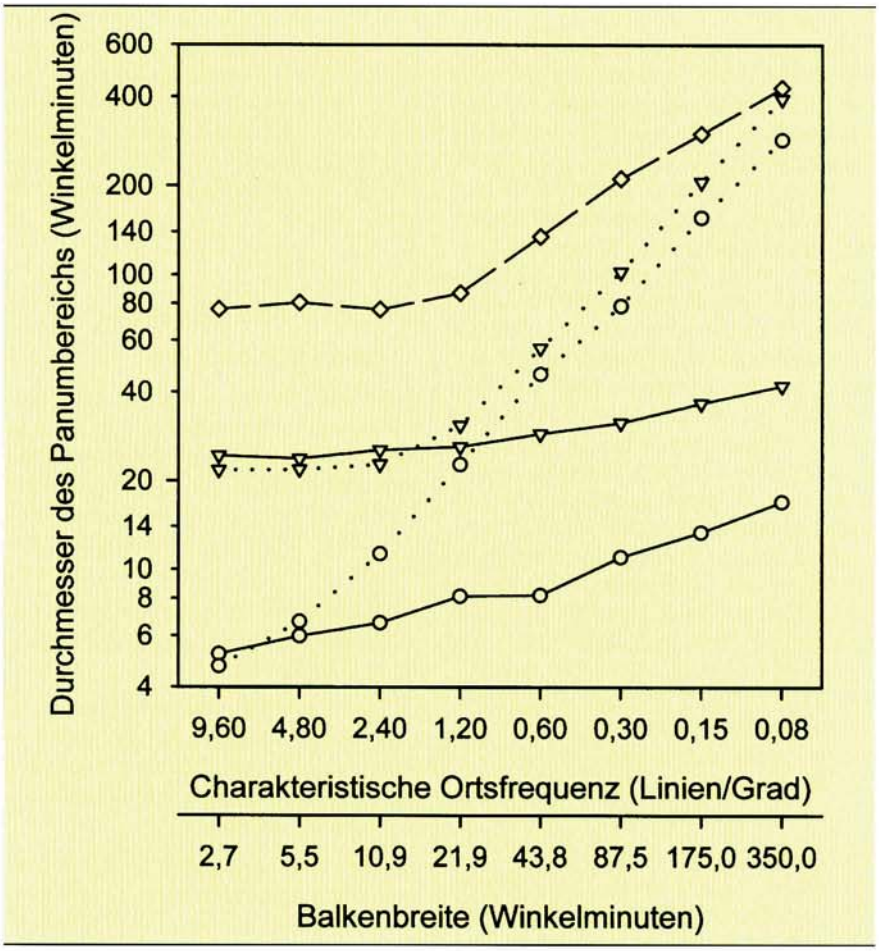

Abb. 19: Durchmesser des Panumbereichs für scharfkantige und unscharfe Balken. Der *horizontale* Durchmesser wird von den Dreiecken angezeigt. Die Kreise geben den *vertikalen* Durchmesser an. Gepunktete Linien: Durchmesser des Panumbereichs bei *unscharfen* Balken. Durchgezogene Linien: Durchmesser des Panumbereichs bei *scharfkantigen Balken.* Die auf der Spitze stehenden Quadrate kennzeichnen den Durchmesser der oberen Querdisparationsgrenze, bis zu der (in Diplopie) eine räumliche Tiefe erkannt wird. Weitere Erläuterungen siehe Text.

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 deutlich kleiner als 1 Grad.

Völlig andere Ergebnisse erhielten Schor et al. mit dem sanft verlaufenden Helligkeitsprofil (gepunktete Linien in Abb. 19). Bei schmalen unscharfen Balken mit einer Breite von 2,7 bis 11' stimmte der horizontale Durchmesser des Panumbereichs zunächst sehr gut mit dem Durchmesser überein, der mit den scharfkantigen Balken gefunden worden war. Bei größeren Balkenbreiten wurde der Panumbereich für unscharfe Balken aber extrem groß. Bei B = 350' ergab sich ein Panumbereichsdurchmesser von 400' (= 6,7°). Erst bei noch größeren Querdisparationen wurde Diplopie erkennbar.

Interessant ist auch der Verlauf des vertikalen Panumbereichs bei sanft verlaufenden Helligkeitsprofil (in Abb. 19: Kreise verbunden durch die gepunktete Linie). Die vertikale Ausdehnung war bei schmalen unscharfen Balken zunächst genau so groß wie bei den scharfkantigen Balken. Bei breiteren unscharfen Balken stieg der vertikale Durchmesser des Panumbereichs aber ebenfalls sehr stark an. Er wurde schließlich bei einer Balkenbreite von mehr als 22' genauso groß wie die horizontale Ausdehnung. Das bedeutet nichts anderes, als dass der bei *schmalen* Balken zunächst *ellipsenförmige* Panumbereich mit einer Ausdehnung von ca. 22' x 5' bei sehr *breiten* Balken in einen *kreisförmigen* Panumbereich mit einem riesengroßen Durchmesser von bis zu 400' übergeht. Dies gilt aber nur für unscharfe Balken, denn bei scharfkantigen breiten Balken blieb der Panumbereich stets elliptisch mit einer eher geringen maximalen Ausdehnung von ca. 40' x 16'.

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

In Abb. 19 ist zusätzlich noch die obere Grenze für das Raumsehen mit Diplopie (gestrichelte Linie) 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. Der auf diese Weise gemessene Bereich der Querdisparationen übertraf die Grenzen des Panumbereichs beträchtlich! Bei schmalen Balken war die Empfindung der räumlichen Tiefe noch bis zu einer Querdisparation möglich, die etwa viermal größer war als die Grenze des Panumbereichs. In Abb. 19 zeigt sich also 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 (grobe Objektstrukturen) zugreift, während die im Sehobjekt enthaltenen scharfen Kanten (hohen Ortsfrequenzen) für die Wahrnehmung der Diplopie verantwortlich sind.

5. Zusammenfassung und Diskussion

In diesem Artikel habe ich versucht, einige wissenschaftliche Ergebnisse zum Stereosehen zusammenzufassen und anhand von Bildern zu veranschaulichen. Unter anderem wurde über folgende Ergebnisse berichtet:

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) Der sich aus den geometrisch-optischen Überlegungen ergebende Horopter hat bei horizontalen Blicklinien die Form eines Kreises, der durch den Fixationspunkt und die Knotenpunkte der beiden Augen verläuft. Der empirische (reale) Horopter ist aufgrund der Hering-Hillebrand'schen Deviation etwas schwächer gekrümmt.

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

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

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

7) Die Größe des Panumbereichs hängt von vielen Faktoren ab, z. B. vom Netzhautort, von der Art, der Größe, der Kantenschärfe und der Ortsfrequenz-Zusammensetzung der Testobjekte. Auch zeitliche Aspekte, wie z. B. die Geschwindigkeit einer Tiefenbewegung, spielen eine wichtige Rolle.

8) An jeder Stelle der Retina gibt es viele verschiedene, überlappende Panumbereiche unterschiedlicher Größe, die je nach Sehreiz und Sehanforderung aktiviert werden.

9) Erstaunlich ist die Tatsache, dass die räumliche Tiefe oft auch dann qualitativ richtig (vorn oder hinten) erkannt werden kann, wenn die Querdisparation wesentlich größer ist als das Panumareal. Man kann daraus folgern, dass unterschiedliche kortikale Mechanismen für das „Erkennen der räumlicher Tiefe" und die „sensorische Fusion" zuständig sind.

10) *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'. In der Übersichtsarbeit von Mitchell (1966) ergab sich als Mittelwert über alle Studien ein Durchmesser von 14'. Nach Schor und Tyler (1981) variierte der horizontale Durchmesser des foveolaren Panumbereichs für dünne Linien von ca. 15 bis 20'.

11) *Durchmesser des Panumbereichs für sehr breite scharfkantige Balken:* Bei sehr breiten Balken (Schor et al. 1984) verbreitert sich der foveolare Panumbereich. Der maximale horizontale Durchmesser beträgt etwa 40'.

12) *Durchmesser des Panumbereichs für sehr breite unscharfe Linien:* Bei völlig unscharfen Testzeichen steigt der Durchmesser des Panumbereichs mit zunehmender Balkenbreite stark an (Schor et al. 1984). Bei extrem breiten Balken mit sanft verlaufendem Helligkeitsprofil kann die Querdisparation unter speziellen Versuchsbedingungen bis auf etwa 6° gesteigert werden, bevor ein Versatz zwischen den monokularen Teilbildern sichtbar wird.

13) *Form des Panumareals bei statischen und bewegten Stereotesten:* 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 Linien sind die Halbachsen der Ellipse etwa 25' x 10' groß. Bei sehr breiten Balken vergrößert sich die Ellipse 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 maßgeblich ist. 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 Abbildung 18 gehen und den dazugehörenden 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.

In den Versuchen von Schor und Tyler war die Leuchtdichte relativ niedrig ($L_u = 15$ 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. 19) könnte die Tatsache sein, dass die räumliche Wahrnehmung eines Objekts durch benachbarte Objekte, die sich in einer anderen räumlichen Tiefe befinden, gestört wird (siehe Kapitel 4.1 „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 könnte auch im Zusammenhang mit dem Stereo-Valenztest der MKH von Bedeutung sein. 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, Tabelle 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 5 Personen errechnete Haase Panumbereichsradien von 1,5° und 2,29° (Durchmesser 3° und 4,58°). 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 diesen und ähnlichen Ergebnissen schloss Haase, der Durchmesser des zentralen Panumbereichs für Testfiguren mit scharfen Kanten sei mindestens 1 Grad groß. Diese Schlussfolgerung erscheint mir problematisch. Hier sind erneute wissenschaftliche Untersuchungen unter exakt kontrollierten Bedingungen notwendig.[12]

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. Kommerell und Herrn Georg Stollenwerk danke ich für die kritische Durchsicht des Manuskripts und viele hilfreiche Anregungen.

Literaturverzeichnis

Blakemore, C. (1970) The range and scope of binocular depth discrimination in man. Physiol., 211, 599–622.

Braddick, O.J. (1979). Binocular single vision and perceptual processing. Proceedings of the Royal Society, London, B 204, 503–512.

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.

Dengler, B. und Kommerell, (1993) G. 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.

DIN 5340, (Neue Ausgabe von 1998) Begriffe der physiologischen Optik, Beuth Verlag, Berlin.

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.

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

Fender, D. und Julesz, B. (1967) Extension of Panum (s fusional area in binocularly stabilized vision. J. Opt. Soc. Am. 57, 819–830.

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.

Foley, J. M. und Richards, W. (1974) Improvement in stereoanomaly with practice. Am. J. Optom. Physiol. Opt., 51, 935–938.

Gerling J. et al. (1998) Fixationsdisparation am Pola-Zeigertest: nicht repräsentativ für die Augenstellung unter natürlichen Sehbedingungen. Klein. Monatsbl. Augenheilk. 212, 226–233.

Gerling J., de Paz H., Schroth V., Bach M., Kommerell G. (200) Ist die Feststellung einer Fixationsdisparation mit der Mess- und Korrektionsmethodik nach H.-J. Haase (MKH) verlässlich? Klin. Mtsbl. Augenheilkd. 216: 400–416.

Goersch, H. (1980) Grundlagen der Stereopsis, NOJ, 22(11). 17–23.

Goersch, H. (1982) Stereopsis unter phorischer Belastung, DOZ Nr. 9 , 8–18.

Grabowska, A. (1983) Lateral differences in the detection of stereoscopic depth. Neuropsychologia. 21, 249–257.

Greenlee M.W., Rutschmann R.M. (2000) fMRI responses to binocular disparity in random-dot patterns. Invest. Ophthalmol. & Vis. Scie. (ARVO-Suppl.) S735/3914.

Haase, H.-J. (1995) Zur Fixationsdisparation. Verlag Optische Fachveröffentlichung GmbH, Heidelberg.

Hampton, D. R. und Kertesz, A. E. (1983) The extent of Panum's area and the human cortical magnification factor. Perception, 12, 161–165.

V. Helmholtz, H. (1866, 1910) Handbuch der physiologischen Optik. Voss, Hamburg. 1. Auflage 1866, 3. Auflage 1910.

Herzau,V., (1995) Sensorik des Binokularsehens. In: Strabismus, H. Kaufmann (Hrsg.) Enke, 2. Aufl., 118–161.

Howard, H. J. (1919) A test for the judgment of distance. Am. J. Psychol. 2, 656–675.

Howard, I.P. und Rogers, B.J. (1995) Binokular Vision and Stereopsis, Oxford Univ. Press.

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.

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.

Krüger, R. (1997) Untersuchungen im Stereotest des Polatest-Sehprüfgerätes. NOJ 10/1997, 6–18.

Larson, W. L. (1990) An investigation of the difference in stereoacuity between crossed and uncrossed disparities using Frisby and TNO tests. Optom. Vision Scie., 67, 157–161.

Lau, E.(1922): Neue Untersuchungen über das Tiefen- und Ebenensehen. Zeitschr. f. Sinnesphysiologie, 53. Band S. 1–35. Verlag Johann Ambrosius Barth, Leipzig.

Levy, N. S. und Glick, E. B. (1974) Stereoscopic perception and Snellen visual acuity. Am. J. Ophthalmol., 78, 722–724.

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.

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.

Marr, D. und Poggio, T. (1979) A computational theory of human stereo vision. Proc. R. Soc. Lond., (Biol), 204, 301–328.

McKee, S. P. (1983) The spatial requirements for fine stereoacuity. Vision Res., 23, 191–198.

Mitchell, D. E. (1966) Retinal disparity and diplopia. Vision Res., 6, 441–451.

Mustillo, P. (1985) Binocular mechanisms mediating crossed and uncrossed stereopsis. Psychological Bulletin, 97, 187–201.

Nakayama, K., Tyler, C. W., Appelman J. (1977) A new angle on the vertical horopter. Invest. Ophthalmol. Vis. Scie. (Suppl), 16:82.

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.

Ogle, K.N. (1950) Researches in binocular vision. WB Saunders, Philadelphia.

Ogle, K. N. (1952a) Disparity limits of stereopsis. Arch. Ophtalmol., 48, 50–60.

Ogle, K. N. (1952b) On the limits of stereoscopic vision. J. Exp. Psychol., 44, 253–59.

Ogle, K. N. und Prangen, A. de H. (1953) Observations on vertical divergences and hyperphorias. AMA Archives Ophthalmol., 49, 313–334.

Palmer, D. A. (1961) Measurement of the horizontal extent of Panum's area by a method of constant stimuli. Optical Acta, 8, 151–159.

Panum, P. L. (1858) Physiologische Untersuchungen über das Sehen mit zwei Augen. Schwerssche Buchhandlung, Kiel.

Piper, H.F. (1999) Peter Ludvigh Panums sinnesphysiol. Arbeiten aus seinen Kieler Jahren 1853-1864. Klin. Monatsbl. Augenheilkd. 215: 73–77.

Rassow, B. und Wesemann, W. (1989) Untersuchungen zu Fusion und Stereosehen bei Belastungen des binokularen Systems. Optometrie 2, 3–11.

Reiner J. (1995) Inverse Stereoskopie. Klin. Mtsbl. Augenheilkunde, 206, 49–51.

Richards, W. (1971) Anomalous stereoscopic depth perception. J. Opt. Soc. Am. 61, 410–414.

Rogers, B. J. und Graham, M. (1979) Motion parallax as an independent cue for depth perception. Perception 8, 125–134.

Rogers, B. J. und Graham, M. (1982) Similarities between motion parallax and steropsis in human depth perception. Vision Res., 22, 261–270.

Sachsenweger, Rudolf (1958) Experimentelle und klinische Untersuchungen des stereoskopischen Raumes. Nova Acta Leopoldina, Band 20, Nummer 136, Johann Ambrosius Barth Verlag, Leipzig.

Schober, H. (1958) Das Sehen. Fachbuchverlag Leipzig, 2. Auflage.

Schor, C. M. und Tyler, C. W. (1981) Spatio-temporal properties of Panum(s fusional area. Vision Res. 21, 683–692 .

Schor, C. M., Wood, I. und Ogawa J. (1984) Binocular sensory fusion is limited by spatial resolution. Vision Res., 24, 661–665.

Schor, C. M. und Wood, I. (1983) Disparity Range for Local Stereopsis as a function of luminance spatial Frequency. Vision Res., 12, 1649–1654.

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.

Schor, C.M., Ciuffreda K.J., (Hrsg.) (1983) Vergence eye movements: Basic and clinical aspects. Butterworths.

Schumer, R.A. und Ganz, L. (1979) Independent stereoscopic channels for different extents of spatial pooling. Vision Research, 19, 1303–1314.

Schumer, R. A. und Julesz, B. (1984) Binocular disparity modulation sensitivity to disparities offset from the plane of fixation. Vision Res., 24, 533–542.

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.

Siderov, J., Harwerth, R. S. und Bedell, H. E. (1999) Stereopsis, cyclovergence and the bakwards tilt of the vertical horopter. Vision Res., 39, 1347–57.

Stollenwerk, Georg (1999) Möglichkeiten und Grenzen bei der Anwendung des neuen reduzierten Valenztestes. NOJ, 9/99, 26–30.

Tyler, C. W. (1973) Stereoscopic vision: cortical limitations a disparity scaling effect. Science, 181, 276–278.

Tyler, C.W. (1974) Depth perception in disparity gratings. Nature, 251, 140–142.

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.

Tyler, C. W. (1991 a) The horopter and binocular fusion. In: Vision and visual dysfunction. Band. 9, Regan D. (Hrsg.), Macmillian, 19–33.

Tyler, C. W. (1991 b) Cyclopean vision. In: Vision and visual dysfunction. Band 9, Regan D. (Hrsg.) Macmillian, 38–71.

Volkmann, 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.

Wesemann, W., Klingenberger, H. und Rassow, B. (1987) Electrophysiological assessment of the human depth-perception threshold. Graefe's Arch. Clin. Exp. Ophthalmol, 225, 429–436.

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.

Westheimer, G. (1978) Spatial phase sensitivity for sinusoidal grating targets. Vision Res., 18, 1073–1074.

Westheimer, G. und Tanzman, I. J. (1956) Qualitative depth localization with diplopic images. J. Opt. Soc. Am., 46, 116–117.

Wittenberg et al. (1969) Effect of training on stereoscopic acuity. Am. J. Optom., 46, 645–653.

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.

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.