Untersuchungen zu Fusion und Stereosehen bei Belastungen des binokularen Systems*

Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Rassow/Dr. rer. nat. Wolfgang Wesemann, Hamburg

1. Einleitung

Das Brillenglas wird im Gegensatz zu sonstigen optischen Instrumenten bei Blickbewegung in der Weise verwendet, daß das abbildende Lichtbündel außerhalb der optischen Achse durch den Randbereich des Glases verläuft. Damit treten bei Blickbewegungen unvermeidbar neben der erwünschten achsialen Wirkung zusätzliche unerwünschte optische Wirkungen auf, von denen die prismatische Ablenkung die bekannteste ist.

Die Reduzierung dieser störenden Wirkung durch die Einführung der punktuell abbildenden Brillengläser nach Tscherning und Wollaston war ein wichtiger Meilenstein auf dem Wege zur optimalen Sehhilfe.

Bei Gleitsichtgläsern wird das Ziel der optimalen Brillenglaskorrektur in allen Blickrichtungen im Interesse des höheren Zieles, den Presbyopen für alle Sehentfernungen mit einem Glas zu korrigieren, teilweise wieder aufgehoben. Denn obwohl die Brillenglasindustrie in den letzten Jahren beachtliche Erfolge bei der Verbesserung der optischen Eigenschaften von Gleitsichtgläsern erringen konnte, weisen diese Gläser prinzipbedingt stets astigmatische, prismatische und andere Fehlwirkungen in den Randbereichen der Übergangszone außerhalb eines schmalen Mittelkanals auf. Diese Nebenwirkungen äußern sich in Maßstabsveränderungen, in Bildverzerrungen und -verkippungen und Sehschärfereduktionen. Die Hersteller versuchen bei der Entwicklung neuer Gleitsichtgläser, diese unumgänglichen Fehler möglichst sanft ansteigen zu lassen und möglichst weit in die Außenbereiche der Gläser zu verlagern.

Es ist unbestritten, daß Gleitsichtgläser von einer immer größer werdenden Zahl Presbyoper beschwerdefrei getragen werden. Im Zusammenhang mit diesen Gläsern gibt es aber immer noch viele ungelöste Fragen, die die physiologischen Auswirkungen von Bildfehlern betreffen. So ist bis jetzt nicht eindeutig geklärt, wie stark die unerwünschten Nebenwirkungen die Fusion und das Binokularsehen beeinträchtigen und welche Fehler toleriert werden können. Eine wichtige Teilfrage, die besonders in jüngster Zeit diskutiert wurde, ist, ob das binokulare System auf gleiche optische Belastungen anders reagiert als auf unterschiedliche Belastungen.

Im folgenden soll über Untersuchungen an normalsichtigen Probanden berichtet werden, die zum Ziel hatten herauszufinden, welche Auswirkungen monokulare und binokulare Belastungen auf die Fusion und das Stereosehen haben.

2. Methode

2.1 Phoriemessungen

Die Fusion ist ein motorischer und sensorischer Vorgang, der zum Ziel hat, ein binokular fixiertes Objekt auf die Foveae der beiden Augen so abzubilden, daß im optischen Cortex die Verschmelzung zu einem Bild stattfinden kann. Durch eine optische Bildtrennung (Haploskopie), bei der den beiden Augen zwei unterschiedliche Sehobjekte angeboten werden, die jeweils nur für ein Auge sichtbar sind, kann die binokulare Verriegelung aufgetrennt werden. Je nach Menge und Lokalisation von gleichen Fusionsanteilen in den beiden Teilbildern kann diese Trennung aber ganz oder teilweise wieder aufgehoben werden, so daß auch für diese getrennten Bilder erneut eine Verschmelzung eintritt. Im Fall einer Heterophorie kommt es zu einer scheinbaren Versetzung im subjektiven Seheindruck, wenn die Teilbilder in gleicher Fixationsrichtung angeboten werden. Das Ausmaß dieser Versetzung ist ein Maß für die Heterophorie.

Während die Fähigkeit, zwei Teilbilder zu fusionieren, durch die Zahl der gemeinsamen Fusionsanreize gesteigert wird, kann sie durch verschiedene Maßnahmen wie Reduzierung des Bildkontrastes und der Bildschärfe, einseitige oder beidseitige Vorgabe von inadäquaten Korrektionsgläsern sowie Verzerrung der Teilbilder gestört werden.

Unsere Fragestellung in dem ersten Teil der hier vorgelegten Untersuchung lautete, ob die Beeinflussung der Fusionsverriegelung bei einer Belastung des Sehens durch sphärische, zylindrische und prismatische Fehlwirkungen in verschiedenen Blickrichtungen unterschiedlich ist, und ob diese Bela-

* Teile dieses Beitrages wurden bereits auf dem „Dreiländertreffen" der WVAO am 9./10. 10. 1988 in St. Gallen vorgetragen

stungen den Fusionsvorgang unterschiedlich beeinflussen, wenn sie einseitig oder beidseits gegeben werden. Im einzelnen wurden zusätzlich zur Fernrefraktion sphärische, kreuzzylindrische und prismatische Gläser (sph +1,0 dpt, sph +1,0 dpt ⊃ cyl −2,0 dpt A 135° und 2,0 pdpt) sowohl monokular als auch binokular vorgehalten. Als Maß der Störung der Fusion wird die Horizontalkomponente der durch die optische Belastung induzierten Phorie bestimmt.

Wir benutzten für die Messungen ein Polarisationshaploskop, dessen prinzipieller Aufbau in Abb. 1 gezeigt ist. Die Projektion der beiden Testfiguren erfolgte mit zwei Diaprojektoren, deren Licht durch Polarisationsfilter senkrecht zueinander polarisiert war. Die Versuchsperson blickte aus einem Abstand von 269 cm ebenfalls durch Polarisationsfilter, die wie die vor den Projektoren angebrachten orientiert waren. Die Helligkeit der Testfiguren betrug 50 cd/m^2. Der Stuhl, auf dem die Versuchsperson saß, war um 30 Grad nach rechts und links drehbar. Eine spezielle Schwenkvorrichtung der Filterhalterung gewährleistete, daß die Polarisationsfilter auch beim Seitwärtsblick senkrecht zur Blicklinie des Probanden standen. Für die Messungen unter 20 und 30 Grad Abblick konnte der gesamte Projektionstisch um einen entsprechenden Winkel verkippt werden. Verzerrungen wurden auf diese Weise vermieden.

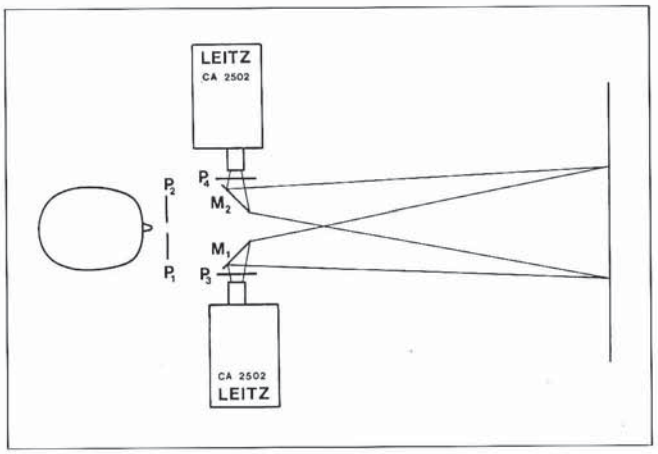

Abb. 1 Schematische Darstellung des Polarisationshaploskops. Zwei Diaprojektoren projizieren die Testfiguren über Umlenkspiegel auf eine metallisierte Leinwand. Die Polfilter P1 und P3 sowie die Polfilter P2 und P4 sind gleichsinnig polarisiert.

Als Testobjekte wurden die in Abb. 2 skizzierten drei Paare von Testmustern verwendet. Vom Beobachter aus gesehen hatte der innere Kreis einen Durchmesser von 2,36 Sehwinkelgrad. Die Gesamtgröße des äußeren Quadrats betrug 11,8 Grad. In unseren Versuchen wurden insgesamt acht verschiedene Muster mit ansteigendem Fusionsreiz geprüft. Es zeigte sich aber, daß sich mit den in Abb. 2 gewählten Fusionsmustern die wesentlichen Aussagen treffen lassen.

Die Versuchspersonen für diese Untersuchung waren entweder emmetrop oder hatten eine Hyperopie von weniger als 0,5 dpt. Alle Probanden wiesen eine intakte Fusion und Motilität auf. Keiner hatte eine nennenswerte Heterophorie.

2.2 Messung der Stereoschwelle

Ein zweiter, sehr sensibler Indikator für ein gestörtes Binokularsehen ist das querdisparate Tiefensehen. Diese Stereowahrnehmungsschwelle ist definiert als der kleinste Winkel-

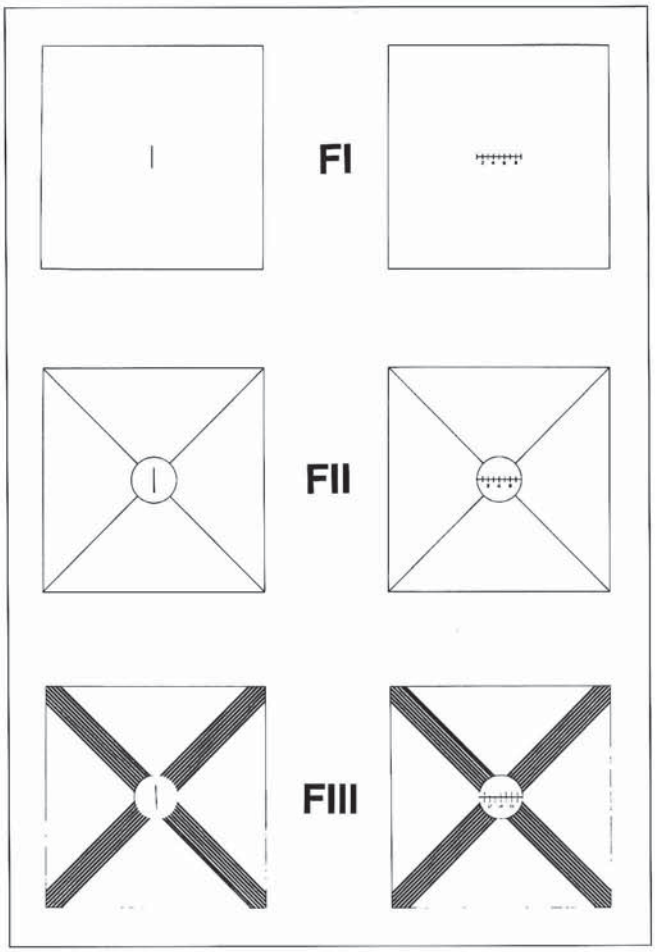

Abb. 2 Die Abbildung zeigt die von uns verwendeten Fusionsmuster. Allen drei Mustern gemeinsam ist ein quadratischer peripherer Rahmen. Das rechte Bild enthält eine Skala, deren Markierungen so gezeichnet sind, daß sie selbst bei der größten hier verwendeten Bildunschärfe lesbar sind. Das linke Teilbild erhält einen zentralen Strich. Die induzierte Phorie kann durch Ablesung der Position des Striches auf der Skala direkt bestimmt werden. Die Fusionsmuster F2 und F3 enthalten zusätzliche gemeinsame Fusionsanteile, die bis in den Fovea-Bereich hineinreichen.

unterschied (Querdisparation), unter dem durch zwei unterschiedlich weit entfernte Objekte noch ein subjektiver Tiefeneindruck ausgelöst wird. Die Stereoschwelle liegt bei Personen mit normaler Binokularfunktion zwischen ca. 10 und 30 Winkelsekunden und wird durch die oben beschriebenen optischen Belastungen deutlich erhöht.

Zur Messung der Stereoschwelle verwandten wir in den hier vorgelegten Untersuchungen Zufallspunktmuster (Random-Dot-Muster), die im zentralen Teil des Bildes den Eindruck erweckten, als trete ein horizontaler Balken aus der Ebene hervor.

Da in Vorversuchen festgestellt worden war, daß die Stereoschwelle von der Blickrichtung nur wenig abhängt, wurde die Beeinträchtigung des querdisparaten Tiefensehens durch optische Belastungen nur in der primären Blickposition gemessen.

Insgesamt wurden fünf verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Die ersten zwei Untersuchungen beschäftigen sich mit dem Einfluß von Bildunschärfe auf die Stereoschwelle.

- **Experiment 1:** Veränderung der Stereoschwelle bei sphärischer Belastung mit Plusgläsern.
- **Experiment 2:** Veränderung der Stereoschwelle bei Belastung mit Kreuzzylindergläsern +1,0 dpt ⊃ −2,0 dpt A 135°.

Bei diesen Experimenten wurde die Beeinträchtigung des Stereosehens bei monokularer und binokularer Belastung verglichen.
Weiterhin wurden drei Belastungsparameter überprüft, die die Bildschärfe nicht beeinträchtigen, die aber bei einer Differenz zwischen den optischen Wirkungen des rechten und des linken Brillenglases störend in Erscheinung treten können. Im einzelnen handelte es sich um:

- **Experiment 3:** Veränderung der Stereoschwelle bei künstlicher Aniseikonie.
- **Experiment 4:** Veränderung der Stereoschwelle bei einseitig vertikaler Prismenbelastung.
- **Experiment 5:** Veränderung der Stereoschwelle bei Objektverkippung.

In den Experimenten 1 und 2 verwandten wir die bereits bei den Fusionsexperimenten beschriebene polarisationshaploskopische Apparatur. Die projizierten Stereobildpaare waren Diapositive von computergenerierten Zufallspunktmustern, bei denen ein horizontaler Bereich in einem Teilbild seitlich versetzt war. Für die Messungen standen eine Serie verschiedener Diapositive mit Querdisparationen im Bereich von 6 bis 3000 Winkelsekunden zur Verfügung.
Ein Problem der Diapositive war die diskrete und in vielen Fällen, besonders im Bereich sehr kleiner und sehr großer Querdisparationen, zu grobe Abstufung der räumlichen Tiefe und die damit verbundene zu geringe Meßgenauigkeit. Deshalb wurde für die letzten drei Experimente eine neuartige elektronische Apparatur entwickelt, die eine wesentlich feinere Stufung der räumlichen Tiefe erlaubte.
Der elektronische Generator erzeugte ein Zufallspunktmuster, das entweder als Rot-Grün-Bild auf einem Farbfernsehgerät oder auf zwei haploskopisch angeordneten Schwarzweißfernsehgeräten angezeigt wurde. Ein horizontaler Balken in der Mitte des einen Fernsehbildes wurde mit Hilfe einer computergesteuerten digitalen Verzögerungsleitung (Data Delay Devices PDU-13256) querdisparat verschoben. Die scheinbare räumliche Tiefe des stereoskopischen Balkenmusters konnte in Stufen von 4 Bogensekunden verändert werden. Eine genauere Beschreibung der Stimuluselektronik findet sich bei Wesemann (1987).
Die Random-Dot-Muster in den Stereoexperimenten 3 und 4 wurden als Rot-Grün-Bilder auf einem Sony Triniton Farbmonitor angeboten. Die Versuchspersonen blickten während der Messungen durch entsprechende Rot-Grün-Filtergläser. Die Stereobilder des Experimentes 5 wurden auf zwei Schwarzweißfernsehgeräten erzeugt, die ein elektronisches Stereoskop bildeten. Ein justierbares Spiegelsystem diente zur Einstellung der notwendigen Vergenz. Eine schematische Darstellung dieser Apparatur ist in Abb. 3 zu sehen. Die Leuchtdichte des Random-Dot-Musters wurde durch die roten und grünen Betrachtungsfilter gemessen und auf jeweils 20 cd/m^2 eingestellt. Der Beobachtungsabstand betrug in den Experimenten 3 und 4 jeweils 150 cm. Aus dieser Distanz hatte das Random-Dot-Muster eine Ausdehnung von 8,9 · 6,8 Sehwinkelgrad. Die einzelnen Pixelelemente des Random-Dot-Musters hatten eine rechteckige Gestalt von 5,8 · 1,5 Bogenminuten. Die Balkenbreite des horizontalen Balkenmusters war während aller Experimente auf 0,76 Grad eingestellt. Die Beobachtungsdistanz bei Experiment 5 mußte auf 64 cm verkürzt werden, da die verwendeten Schwarzweißmonitore wesentlich kleiner waren als das Farbgerät. Aus dieser Beobachtungsdistanz hatte das Random-Dot-Muster eine Größe von 9,7 · 7,3 Sehwinkelgrad, die Pixelgröße betrug 6,2 · 1,6 Bogenminuten.

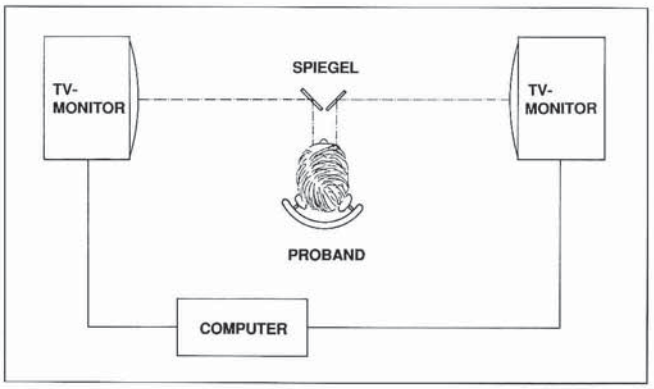

Abb. 3 Schematische Darstellung des Fernsehhaploskops zur Erzeugung der Zufallspunktmuster. Diese Anordnung wurde im Stereoexperiment 5 verwendet, bei der das linke Fernsehgerät gegen das rechte torsional verdreht wurde. In den Stereoexperimenten 3 und 4 wurden die zwei Teilbilder des Stereogramms auf dem roten und grünen Kanal eines Farbfernsehgerätes als Anaglyphenbild angezeigt.

Die Stereoschwelle wurde mit der randomisierten Stufenleitermethode nach Cornsweet (1962) gemessen. Die Versuchspersonen mußten nach jeder Darbietung einer räumlichen Tiefe angeben, ob sie den Balken im Random-Dot-Muster räumlich sehen konnten oder nicht. Je nach der gegebenen Antwort veränderte der Steuerungscomputer die räumliche Tiefe, bis die Stereoschwelle mit genügender Genauigkeit eingeschachtelt worden war.

3. Ergebnisse

3.1 Fusionsexperimente

Um die durch die optischen Belastungen induzierte phorische Abweichung in den neun geprüften Blickrichtungen anschaulich darzustellen, wird in den folgenden Abbildungen die in Abb. 4a gezeigte Rasterdarstellung gewählt.
Die in den Experimenten verwendeten sphärischen und kreuzzylindrischen Vorhaltegläser erzeugen nicht nur eine Bildunschärfe, sondern sie weisen außerhalb der Primärposition auch eine prismatische Nebenwirkung auf. Im Falle einer binokular gleichartigen Belastung ist auch die prismatische Komponente gleich und tritt nicht in Erscheinung. Bei einer einseitigen Belastung erhält man eine prismatische Differenz. Die Horizontalkomponente dieser Nebenwirkung ist für den Fall einer Belastung mit sph +1,0 dpt in Abb. 4b und für eine kreuzzylindrische Belastung mit sph +1,0 dpt ⊂ −2,0 dpt A 135° in Abb. 4c dargestellt. Beim Rechtsblick induziert das rechts vorgehaltene sphärische Glas eine Esophorie, beim Linksblick eine Exophorie. Bei einer links vorgehaltenen kreuzzylindrischen Belastung erwartet man in allen Abblickrichtungen eine Esophorie.
Die Ergebnisse der Fusionsexperimente sind in den Abb. 5 und 6 dargestellt. Sie zeigen die Größe des tatsächlich gemessenen Phoriewinkels für die neun verschiedenen Blickpositionen im Mittelwert über sechs Versuchspersonen. Übereinander stehen die Ergebnisse von monokularer und binokularer Belastung. Nebeneinander sind die Ergebnisse für die verschieden starken Fusionsanreize (siehe Abb. 2) aufgetragen.

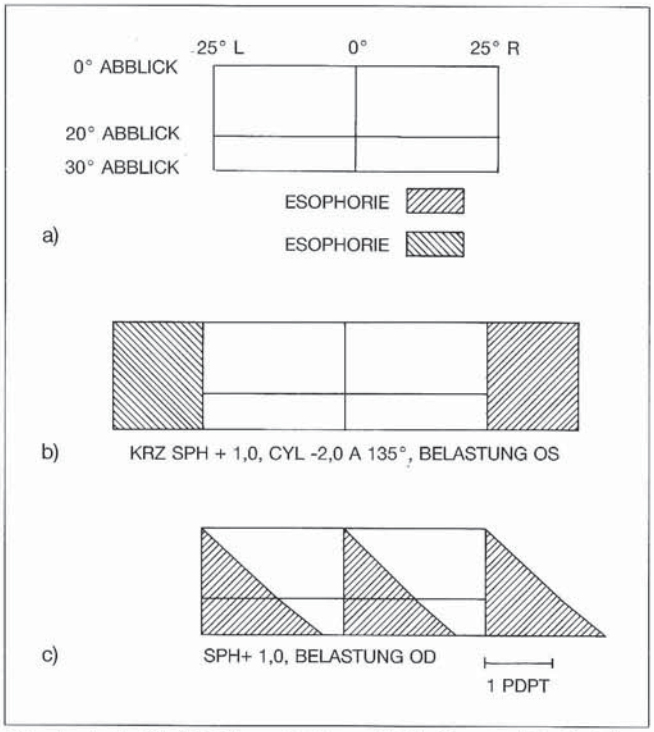

Abb. 4a, oben) Die Abbildung zeigt das graphische Raster, welches im folgenden zur vereinfachten Darstellung der verschiedenen Blickrichtungen gewählt wird. Die phorische Abweichung wird sehr stark vergrößert an der jeweiligen Blickposition eingetragen. Abb. 4b, Mitte und c, unten) Beim Blick durch Brillengläser treten außerhalb der optischen Achse unvermeidliche prismatische Nebenwirkungen auf. Sind die Brechkräfte der Brillengläser vor dem rechten und linken Auge unterschiedlich, so muß das Sehsystem bei Blickwendungen ständig unterschiedlich starke prismatische Nebenwirkungen kompensieren. Die zwei Abbildungen zeigen die Horizontalkomponente der prismatischen Nebenwirkungen, berechnet für die in Abb. 4a angegebenen neun verschiedenen Blickpositionen. Eine Belastung von sph +1,0 dpt vor dem rechten Auge induziert bei Blickwendungen nach rechts eine Esophorie und bei Blickwendungen nach links eine Exophorie (Abb. 4b). Eine kreuzzylindrische Belastung von sph +1,0 ⊂ −2,0 Achse 135° vor dem linken Auge induziert im Abblick stets eine Esophorie (Abb. 4c). Die Stärke der prismatischen Wirkung kann durch Vergleich mit der unten angegebenen Skala abgeleitet werden.

Bei monokularer Belastung mit sph +1,0 dpt und Fusionsmuster F1 (Abb. 5, oben) findet man im Mittel eine recht große phorische Abweichung, die an die Größe des nach Abb. 4a zu erwartenden Wertes heranreicht. Mit dem Fusionsmuster F2 verschwindet bei den hier untersuchten Probanden die prismatisch induzierte Exophorie beim Linksblick, während die Esophorie beim Rechtsblick sich zwar reduziert, aber immer noch deutlich vorhanden ist. Beim Fusionsmuster F3 ist praktisch keine Phorie mehr nachweisbar. Bei binokularer Belastung findet man trotz der Bildunschärfe keine wesentlichen Abweichungen.

Bei kreuzzylindrischer Belastung zeigt sich der Unterschied zwischen monokularer und binokularer Belastung besonders deutlich (Abb. 6). Mit dem Fusionsmuster F1 und optischer Belastung steigt die Esophorie, wie nach Abb. 4c zu erwarten, besonders beim 30°-Abblick stark an. Dabei ist sie bei seitlicher Blickrichtung deutlich größer als beim geraden Abblick. Mit dem Fusionsmuster F2 reduziert sich die Phorie ungefähr um die Hälfte gegenüber F1. Bei binokularer kreuzzylindrischer Belastung findet man hingegen bei allen Fusionsmustern keine nennenswerte Abweichung.

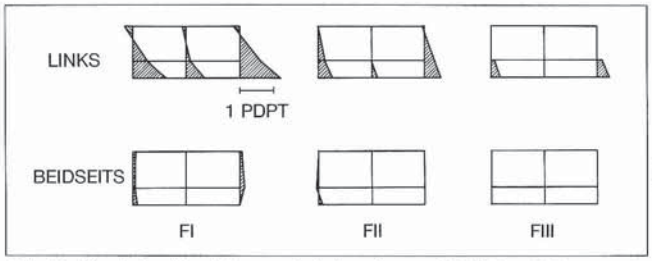

Abb. 6 Phorische Abweichungen bei einer kreuzzylindrischen Belastung mit sph +1,0 dpt ⊂ −2,0 dpt Achse 135°. Erfolgt die kreuzzylindrische Belastung einseitig vor dem linken Auge, so findet man beim Fusionsmuster F1, das die schwächsten Fusionsanreize aufweist, eine subjektive Esophorie, die in Größe und Richtung der in Abb. 4c dargestellten ähnelt. Bei Verwendung der Fusionsmuster F2 und F3 wird die prismatische Nebenwirkung trotz der erheblichen Bildverzerrung weitgehend kompensiert. Bei beidseitiger Belastung findet man bei allen Fusionsmustern praktisch keine nennenswerte phorische Abweichung (Mittelwerte von sechs Versuchspersonen).

Im dritten Versuch wurden rein prismatische Gläser (jeweils 2 pdpt Basis innen vor dem linken Auge) vorgehalten und die Phoriewinkel gemessen (Abb. 7). Bei dieser Untersuchung wurden nur bei horizontaler Blickrichtung und bei 20°-Abblick Daten erhoben. Es zeigte sich, daß auch hier, wie zu erwarten, der Phoriewinkel von der Stärke des Fusionsreizes abhängt. Die Abbildung zeigt aber darüber hinaus, mit welchen großen Unterschieden man bei verschiedenen normalsichtigen Versuchspersonen mit unauffälligem Binokularstatus rechnen muß. Die Versuchsperson 1 kompensiert die vorgehaltene Belastung nur beim Geradeausblick und Fusionsmuster F2 recht gut, zeigt aber ansonsten eine große phorische Abwei-

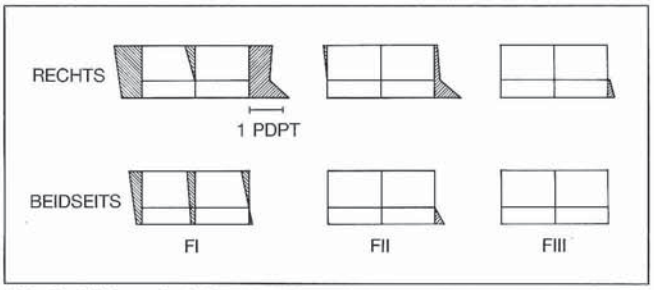

Abb. 5 Mittlere phorische Abweichung in den verschiedenen Blickpositionen bei einer Belastung mit sph +1,0 dpt. Die Meßwerte sind Mittelwerte von sechs Versuchspersonen. F1, F2 und F3 kennzeichnen die verschiedenen in Abb. 2 dargestellten Fusionsmuster. Beim Fusionsmuster F1, das nur sehr wenige Fusionsanreize aufweist, und monokularer Belastung tritt beim Seitwärtsblick eine subjektive Phorie auf, die im Mittelwert etwas kleiner ist als der in Abb. 4b dargestellte theoretische Erwartungswert. Verwendet man Fusionsmuster mit stärkeren Fusionsanreizen (F2, F3), so wird die durch das Brillenglas induzierte Phorie motorisch und sensorisch weitgehend kompensiert. Bei einer beidseitigen Belastung mit sph +1,0 dpt findet man in allen Blickrichtungen nur eine geringgradige Phorie.

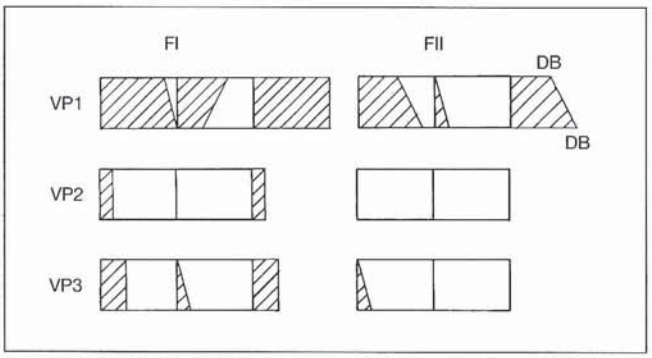

Abb. 7 Induzierte Phorie bei prismatischer Belastung (OS: 2 pdpt Basis innen), gemessen bei drei verschiedenen Versuchspersonen. Die Abbildung zeigt die große individuelle Schwankungsbreite, mit der normalsichtige Versuchspersonen auf eine prismatische Belastung reagieren. Während VP2 und VP3 eine prismatische Belastung selbst bei Fusionsmuster F1 weitgehend kompensieren, finden wir bei VP1 eine ausgeprägte Esophorie. Beim Fusionsmuster F2 treten im Rechtsblick sogar Doppelbilder (DB) auf. Bei diesen Messungen wurden keine Daten im 30°-Abblick erhoben.

chung, die beim Rechtsblick mit Doppelbildern (Diplopie) verbunden ist. Die zwei anderen Probanden hatten nur wenig Probleme, die durch das Prisma verschobenen Teilbilder zu fusionieren.

3.2 Stereoschwellenmessung

3.2.1 Experiment 1 und 2: Veränderung der Stereoschwelle bei Belastung mit sphärischen Plusgläsern und Kreuzzylindergläsern

Das Ergebnis dieser beiden Experimente zum Stereosehen bei unscharfer Abbildung zeigt die Abb. 8, in der die Veränderung der Stereoschwelle bei sphärischer Belastung (Abb. 8a) und kreuzzylindrischer Belastung (Abb. 8b) aufgetragen ist. Die Meßpunkte sind die Mittelwerte der Stereoschwellen aller Versuchspersonen, die senkrechten Striche geben die Standardabweichung des Mittelwertes an. Die Kurven zeigen einen starken

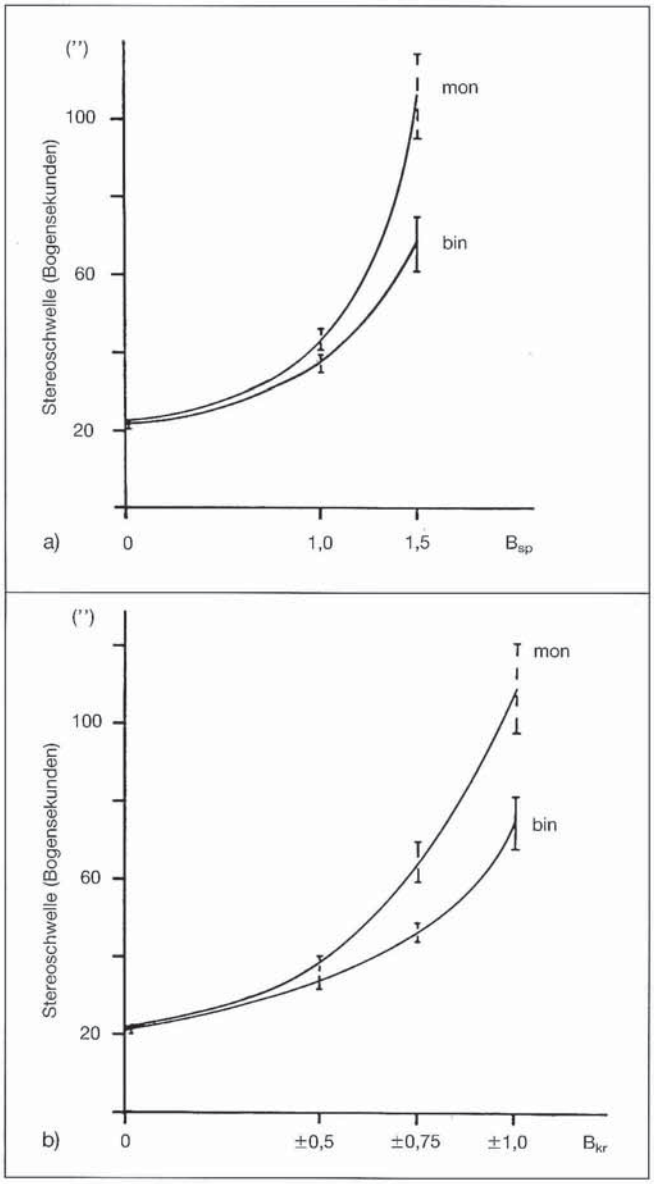

Abb. 8 Abhängigkeit der Stereoschwelle von der Stärke einer monokularen und binokularen, sphärischen Belastung (Abb. 8a) und einer kreuzzylindrischen Belastung (Abb. 8b). Die Zahlenwerte auf der x-Achse geben die Wirkung des Vorhalteglases an. Die Meßdaten zeigen den Mittelwert von 22 Versuchspersonen. Die Stereoschwelle verschlechtert sich zunehmend, wenn das belastete Brillenglas einseitig vorgehalten wird.

Anstieg der Stereoschwelle mit zunehmender Brechkraft des belastenden Brillenglases. Deutlich wird auch eine stärkere Erhöhung der Stereoschwelle bei monokularer Belastung. Auch bei diesen Messungen fanden wir, daß recht große interindividuelle Unterschiede auftreten können, jedoch ist die Reproduzierbarkeit bei den einzelnen Versuchspersonen hoch. Die Probanden wurden auch nach ihrer subjektiven Beurteilung des Seheindrucks bei den untersuchten Belastungen befragt. Die Gegenüberstellung von gemessener Stereoschwelle und subjektiver Beurteilung ergibt interessanterweise, daß die gemessene günstigere Bewertung der binokularen Belastung subjektiv nicht immer auch so empfunden wird.

3.2.2 Experiment 3: Veränderung der Stereoschwelle bei künstlicher Aniseikonie

Durch einseitig vorgeschaltete Aniseikoniegläser ohne optische Wirkung konnten Bildgrößendifferenzen zwischen 2 und 15% hergestellt werden. Die Ergebnisse des Einflusses dieser Aniseikoniegläser auf die Stereoschwelle zeigt die Abb. 9.
Bei den 20 Versuchspersonen fanden wir eine Stereowahrnehmungsschwelle ohne Belastung von im Mittel 20 Bogensekunden. Die individuellen Ergebnisse streuten zwischen 12 und 60 Bogensekunden. Auch nach dem Vorhalten der Aniseikoniegläser konnten die beiden Teilbilder leicht fusioniert und der räumliche Eindruck problemlos wahrgenommen werden.

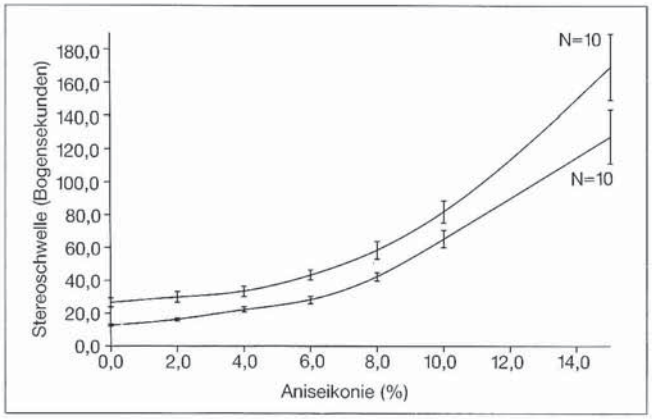

Abb. 9 Anstieg der Stereoschwelle bei einer Bildgrößendifferenz, die durch das einseitige Vorhalten eines Aniseikonieglases ohne optische Wirkung erzeugt wurde. Die Meßergebnisse sind die Mittelwerte von 20 Versuchspersonen. Bei jeder Versuchsperson wurde das Aniseikonieglas in einer ersten Meßserie dem rechten Auge und in einer zweiten Meßserie dem linken Auge vorgehalten. Die Meßwerte wurden anschließend gemittelt.

Obwohl alle Probanden eine Sehschärfe von über 1,0 aufwiesen, fanden wir deutliche Unterschiede in der Stereoschwelle ohne Belastung. Teilt man die Versuchspersonen in zwei Gruppen ein (Stereoschwelle ohne Belastung größer bzw. kleiner als 20''), so findet man bei beiden Gruppen ein sehr ähnliches Ansteigen der Stereoschwelle. In beiden Gruppen steigt die Stereoschwelle im Bereich von 0 bis 6% langsam an, gefolgt von einem steileren Anstieg zwischen 8 und 15%. Die eingetragenen Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung des Mittelwertes aus jeweils zehn Personen. Über den gesamten Meßbereich laufen beide Kurven nahezu parallel. Bei einer Aniseikonie von 6% ist die Stereoschwelle ungefähr um einen Faktor 2 erhöht. Bei einer Größendifferenz von 15% steigt die Stereoschwelle auf 127 Bogensekunden bzw. 169 Bogensekunden.

3.2.3 Experiment 4: Veränderung der Stereoschwelle bei vertikaler Prismenbelastung

Die Veränderung der Stereoschwelle unter vertikaler Prismenbelastung zeigt Abb. 10. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der ersten drei Experimente findet man mit vertikalen Prismen nur eine sehr geringe Verschlechterung der Stereoschwelle. Wie in der oberen Kurve der Abb. 10 dargestellt, erhöht sich die Stereoschwelle bei einer vertikalen Divergenz von 2 pdpt im Mittel von 18 Bogensekunden auf 28 Bogensekunden. Die beobachtete Schwellenerhöhung ist symmetrisch für Prismen mit Basis oben und Basis unten. Auch hier lassen sich die untersuchten Versuchspersonen wieder in zwei Gruppen mit unterschiedlicher optimaler Stereoschwelle einteilen. In beiden Gruppen verschlechtert sich die Schwelle aber in sehr ähnlicher Weise.

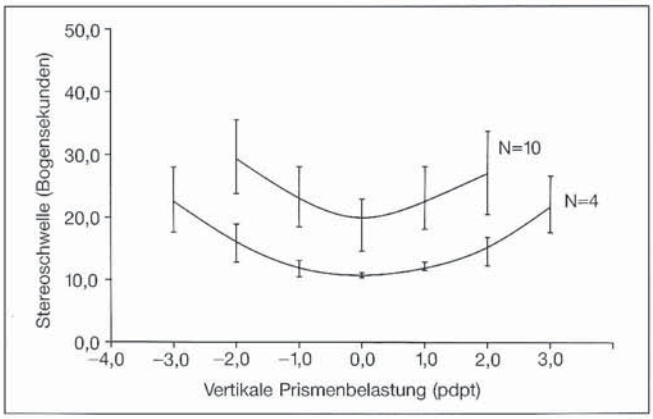

Abb. 10 Anstieg der Stereoschwelle bei einer vertikalen Prismenbelastung, gemessen bei zehn Versuchspersonen. Eine positive Prismenbelastung bezeichnet ein Prisma mit Basis unten vor dem linken Auge, da hierdurch eine künstliche positive Vertikaldivergenz hervorgerufen wird.

Ein Unterschied besteht zwischen diesen beiden Gruppen. Die Gruppe mit der schlechteren Ausgangsschwelle tolerierte nur eine Belastung bis zu ±2 Prismendioptrien und wich bei stärkeren Belastungen in die Diplopie aus. Die Gruppe mit der besseren Stereoschwelle tolerierte Vertikalprismen bis zu ±3 Prismendioptrien. Allerdings fanden wir ein deutliches Anwachsen der Zeit, die notwendig ist, um die volle Stereopsis zu erzielen. Unter normalen Beobachtungsbedingungen und mit Prismen von 1 pdpt hatten alle Versuchspersonen binokulares Einfachsehen und räumliches Sehen sofort nach dem Einschalten des Stereobildes. Wurden 2 pdpt vorgehalten, so dauerte es im Mittelwert ungefähr zwölf Sekunden, um die vertikale Divergenz zu fusionieren und zusätzliche sieben Sekunden, um die volle Stereopsis zu erhalten. Die vier Versuchspersonen, die in der Lage waren, 3 pdpt zu fusionieren, benötigten ungefähr 80 Sekunden, um binokulares Einfachsehen zu erhalten und weitere zehn Sekunden, um das räumliche Balkenmuster zu erkennen.

3.2.4 Experiment 5: Veränderung der Stereoschwelle bei Objektverkippung

Die Objektverkippungen wurden durch eine Drehung des linken Monitors um die optische Achse erzeugt. Nach der Notation von Kertesz und Jones (1970) bezeichnet eine positive torsionale Divergenz eine Drehung im Uhrzeigersinn vor dem linken Auge.

Die Ergebnisse der Belastung des binokularen Systems durch torsionale Verdrehungen sind in Abb. 11 dargestellt. Bis zu einer Verdrehung von zwei bis drei Grad ist nur ein relativ geringer Effekt zu bemerken; trotz der gegeneinander verdrehten Teilbilder ist die Stereoschwelle unverändert gut. Bei allen Messungen wurden negative torsionale Divergenzen scheinbar besser toleriert als positive Divergenzen. Der Diplopiepunkt lag im Mittelwert über alle Versuchspersonen bei −8,0 und +5,1 Grad. Eine ähnliche Asymmetrie wurde auch bezüglich

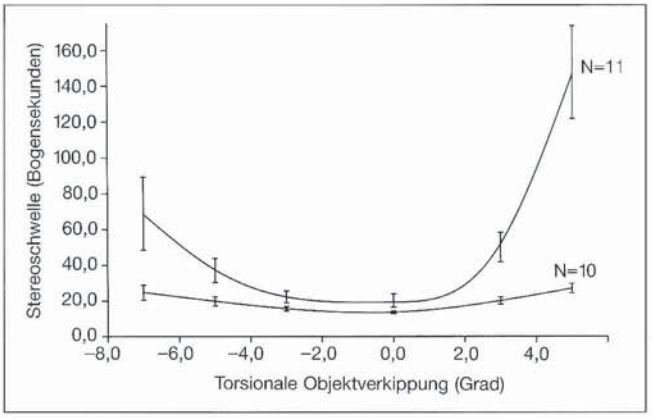

Abb. 11 Anstieg der Stereoschwelle bei torsionaler Objektverdrehung, gemessen bei 21 Versuchspersonen. Die Objektverdrehungen wurden durch eine Drehung des linken Fernsehmonitors um die optische Achse erzeugt. Eine positive torsionale Divergenz bezeichnet eine Drehung des linken Monitorbildes im Uhrzeigersinn (siehe Abb. 3).

der Stereoschwelle gefunden. Eine positive torsionale Divergenz ergab im Mittelwert eine größere Verschlechterung der Stereoschwelle als eine negative torsionale Divergenz der gleichen Größenordnung.
Bemerkenswert ist, daß sich die zwei in Abb. 11 aufgeführten Teilgruppen bei stärkeren Verkippungen ein vollkommen verschieden verhalten. Die Gruppe mit der besseren unbelasteten Stereoschwelle hatte bis hin zu Verdrehungen von vier bis sechs Grad eine fast unveränderte Stereoschwelle. Erst danach zerbrach das Binokularsehen plötzlich in die Diplopie. Die zweite Teilgruppe reagierte wesentlich empfindlicher. Oberhalb einer Objektverkippung von ca. drei Grad fanden wir eine beträchtliche Reduktion der Stereowahrnehmungsfähigkeit. Eine Bilddrehung vor dem linken Auge von sieben Grad gegen den Uhrzeigersinn erhöhte die Stereoschwelle bei dieser Gruppe um einen Faktor von 3,4, während eine Drehung um fünf Grad im Uhrzeigersinn die Stereoschwelle um einen Faktor von 7,4 erhöhte. Ähnlich wie schon im Experiment 4 war auch hier eine verlängerte Beobachtungszeit erforderlich, um das visuelle System an die torsionalen Divergenzen zu adaptieren.

4. Diskussion der Ergebnisse

Unsere Untersuchungsergebnisse demonstrieren, daß eine beschwerdefreie Fusion und optimales Stereosehen nur mit einer optimalen Brillenkorrektion möglich ist.

4.1 Fusion

Betrachtet man die phorische Abweichung (Abb. 5, 6 und 7), so findet man, daß bei unserem Fusionsmuster mit dem geringsten

Anreiz (F1) Ergebnisse gefunden werden, die der prismatischen Nebenwirkung (Abb. 4b, c) in Größe und Richtung in etwa entsprechen. Insbesondere sind auch keine dramatischen Abweichungen von dem theoretischen Wert außerhalb der Primärposition zu finden. Bei monokularer Belastung findet man also zwar einen Phoriewinkel, der aber im wesentlichen durch die prismatische Nebenwirkung der Vorhaltegläser verursacht wird. Bei binokularer Belastung ohne prismatische Nebenwirkung ist das binokulare System trotz der Bildunschärfe nach wie vor orthophor.

Bei Fusionsmustern, die einen stärkeren Fusionsanreiz ausüben (F2, F3), wurde die prismatische Nebenwirkung von fast allen Versuchspersonen auch bei monokularer Belastung nahezu vollständig kompensiert.

Erwähnt werden muß das Auftreten von Doppelbildern und asthenopischen Beschwerden. Mit dem konturenarmen Fusionsmuster (F1) sind die phorischen Abweichungen zwar größer als mit den Mustern mit stärkerem Fusionsanreiz (F2, F3). Bei letzteren kann das visuelle System aber wegen der bis in das Foveagebiet reichenden Fusionsanreize mit Diplopie oder Suppression reagieren. Bei ständiger Grenzlage der Fusion können asthenopische Beschwerden auftreten. Tatsächlich gaben mehrere Probanden, insbesondere bei den monokularen Belastungstests, Kopf- oder Augenschmerzen unterschiedlicher Stärke an. Diplopie wurde besonders häufig bei der kreuzzylindrischen Belastung im Seitwärtsabblick gefunden.

Insgesamt lassen sich folgende Aussagen treffen:

- 1. Bei binokular induzierter gleichartiger Bildunschärfe treten im Mittel auch außerhalb der Primärposition keine wesentlichen phorischen Abweichungen auf.
- 2a. Bei monokularer optischer Bildunschärfe werden bei Fusionsmustern mit sehr geringen Fusionsanreizen zwar phorische Abweichungen gemessen, die Stärke der auftretenden Phorien ist aber wesentlich durch die prismatischen Nebenwirkungen bestimmt.
- 2b. Die phorischen Abweichungen treten unter monokularer Belastung jedoch bei stärkeren Fusionsanreizen praktisch nicht mehr auf. Dafür findet man aber häufiger asthenopische Beschwerden und Diplopie.

4.2 Stereoschwelle

Bezüglich der Stereoschwelle ergab sich eindeutig ein im Mittel höherer Anstieg bei monokularer Bildunschärfe im Vergleich zur binokularen Belastung. Dabei wird aber erstaunlicherweise die monokulare Belastung manchmal subjektiv angenehmer empfunden.

Die Auswirkungen von Aniseikonie, vertikaler Prismenbelastung und Bildverkippung zeigen, daß derartige Fehler in Abbildungssystemen die Stereoschwelle nur relativ gering beeinflussen, solange diese Belastungen klein sind. Höhere Belastungen lassen die Schwelle stark ansteigen. Wir fanden bei unseren Probanden, daß das Ausmaß dieses Anstiegs von der individuellen Stereoschwelle abhängig sein kann, die man beim unbelasteten Sehen vorfindet.

4.2.1 Bildunschärfe

Ältere Untersuchungen, bei denen Experimente mit Linienmustern durchgeführt wurden, hatten zum Ergebnis, daß eine gleichmäßige Bildunschärfe auf beiden Teilbildern, solange sie nicht zu groß ist, nur eine sehr geringe Erhöhung der Stereoschwelle zur Folge hat (Ogle, 1962, p. 290). Ähnliche Ergebnisse fand auch Stigmar (1971), der schrieb, daß selbst eine beträchtliche Bildunschärfe ohne irgendeinen meßbaren Einfluß auf die Stereowahrnehmung ist. In seinen Experimenten blieb die Stereosehschärfe auf einem hohen und konstanten Niveau, selbst wenn die Halbwertsbreite der Testlinien durch die Bildunschärfe um einen Faktor 9 verbreitert wurde.

Entgegengesetzte Ergebnisse sind in der hier vorgelegten Studie erzielt worden. Bei einer retinalen Bildunschärfe finden wir mit Random-Dot-Mustern eine sehr starke Erhöhung der Stereoschwelle. Diese Diskrepanz läßt sich unserer Meinung nach auf die verwendeten Testfiguren zurückführen. Testmuster mit hohem Strukturgehalt, wie sie die Random-Dot-Muster darstellen, werden durch Bildunschärfe erheblich beeinträchtigt. Infolge der Bildverwaschung verschmieren die einzelnen Bildelemente auf der Netzhaut, so daß der Bildkontrast herabgesetzt wird. Bei Strichfiguren hingegen kann die Integrationsfähigkeit des visuellen Systems entlang vertikaler Linien den Schwerpunkt einer verwaschenen Linie und damit die Querdisparation exakt lokalisieren. Dies gilt im übrigen auch für die mit Strichmustern gemessene Noniussehschärfe, die durch eine Bildunschärfe ebenfalls nur wenig beeinträchtigt wird. Wir glauben aber, daß Random-Dot-Muster aufgrund ihres höheren Strukturgehaltes ein besseres Äquivalent für die natürlichen Sehdinge unserer Umwelt darstellen als einfache Strichzeichnungen.

Ähnliche Ergebnisse, wie die hier vorgelegten, wurden auch von Westheimer (1979) publiziert. Er fand, daß die Stereosehschärfe sehr stark von der retinalen Bildschärfe abhängt. In seinen Experimenten stieg die Stereoschwelle um einen Faktor 3 bei einer künstlichen Plusbelastung von 0,5 dpt.

4.2.2 Aniseikonie

Panum beschrieb schon 1858, daß ein querdisparates Tiefensehen auch dann noch möglich ist, wenn sich die korrespondierenden Details geringfügig in ihrer Form unterscheiden. Auch neuere Beobachtungen von Julesz (1971, Seite 43) zeigten, daß Stereosehen mit Random-Dot-Mustern, die einen Größenunterschied von 15% zwischen dem rechten und dem linken Auge aufweisen, möglich ist.

Außer diesen qualitativen Feststellungen gibt es unseres Wissens nach bisher keine Untersuchungen über die quantitativen Auswirkungen einer Aniseikonie auf die Stereoschwelle. Die hier vorgelegten Resultate belegen, daß bei allen hier getesteten Bildgrößendifferenzen (2% bis 15%) Stereopsis erzielt werden kann. Die Tiefenwahrnehmungsschwelle ist aber deutlich beeinträchtigt.

4.2.3 Vertikale Divergenzen

Beim normalen Gebrauch der Augen können nur sehr nahe gelegene Objekte oberhalb oder unterhalb der Ebene, die aus der Augenverbindungslinie und der primären Blickrichtung gebildet wird, eine natürliche vertikale Divergenz aufweisen. Künstliche vertikale Divergenzen können jedoch zum einen durch prismatische Nebenwirkungen und zum anderen bei Brillengläsern auftreten, die die Bildgröße im vertikalen Meridian in einem Auge stärker vergrößern als in dem anderen Auge (Ogle, 1951, 1952).

Ogle und Prangen (1953) berichteten, daß die größte vertikale Divergenz, die problemlos fusioniert werden kann, in einer Größenordnung von 2,5 bis 3 pdpt liegt. Bei diesen maximalen Divergenzen traten Fixationsdisparitäten von fünf bis sechs Bogenminuten auf. Es ist aber auch bekannt, daß die Augen vieler Personen in der Lage sind, sich an relativ große vertikale Divergenzen zu gewöhnen. So wurde gezeigt (Ogle et al., 1967, Ogle und Prangen, 1953), daß eine induzierte Hyperphorie von 2 pdpt in ungefähr sechs Minuten, nachdem Fusion erreicht wurde, vollständig kompensiert sein kann und die Fixationsdisparität wieder den gleichen Wert wie ohne prismatische Belastung annimmt. Wenn Prismen von 6 pdpt vorgehalten wurden, dauerte das Stadium der Diplopie ungefähr 2 bis 16 Minuten.

In einer Studie über den Einfluß einer vertikalen Fixationsdisparität auf die Stereopsis (Ogle, 1955, 1962) wurde eine Punktlichtquelle benutzt, die 0,5 Sehwinkelgrad oberhalb des Fixationspunktes angebracht war und der Versuchsperson 0,2 Sekunden lang gezeigt wurde. Eine Versuchsperson zeigte überhaupt keine Veränderung in der räumlichen Wahrnehmungsschwelle. Bei einer anderen stieg die Stereoschwelle um einen Faktor von 2,6 an, wenn die vertikale Fixationsdisparität von 0 auf 25 Bogenminuten gesteigert wurde. Cole und Boisvert (1974) untersuchten den Effekt einer horizontalen Fixationsdisparität auf die Stereosehschärfe. Bei ihren sieben Versuchspersonen stieg die Stereoschwelle bis auf einen Faktor 2 an. Die hier vorgelegten Ergebnisse mit Random-Dot-Mustern ordnen sich gut in die Ergebnisse der älteren Untersuchungen ein.

4.2.4 Torsionale Divergenzen

In ihrer Studie über zyklofusionale Augenbewegungen benutzten Ogle und Ellerbrock (1946) vertikale Linien, die um die Sehachse verdreht wurden. Sie vermuteten, daß die verdrehten Linien nur dann als vertikal empfunden werden, wenn zyklofusionale Augenbewegungen die induzierte Bilddrehung vollständig kompensieren. Nach ihrer Ansicht sollten gegeneinander verdrehte Linien in der Tiefe verkippt erscheinen, wenn die zyklofusionalen Augenbewegungen kleiner als die Bilddrehung sind. Ogle und Ellerbrock dachten, daß die zyklofusionale Antwort ausschließlich eine motorische Komponente hat, aber Kertesz und andere zeigten, daß sich auch die zyklofusionale Antwort aus einer motorischen und einer sensorischen Komponente zusammensetzt.

Hampton und Kertesz (1982) fanden die von Ogle und Ellerbrock vorhergesagte scheinbare Verkippung bei Verwendung von einfachen Linienmustern. Diese subjektive Verkippung verringerte sich aber bei Mustern mit zunehmender Stimuluskomplexität, bei denen die gesamte torsionale Divergenz nahezu ausschließlich durch den sensorischen zyklofusionalen Mechanismus kompensiert wurde.

Heßel und Herzau (1984) bestimmten das Ausmaß der Augenverrollung als Antwort auf Bilddrehungen mit Gittermustern von 40 Sehwinkelgrad Durchmesser, die um acht Grad gegeneinander verkippt waren. Ungefähr 20% der induzierten Verkippung wurden durch eine motorische Augenverrollung kompensiert. Eine Asymmetrie zwischen In- und Extorsion wurde nicht gefunden. Sullivan und Kertesz (1978, 1979) verwendeten segmentierte horizontale Linienmuster, die sich über einen Sehwinkelbereich von 50 Grad erstreckten. Diese Muster sind besonders wirksam bei der Erzeugung von Augenrollungen. Mit zunehmender Größe der Objektverdrehung nahm auch die Größe der Augenrollung zu. Die motorische Komponente hatte bei einer Bilddrehung von 5,75 Grad einen Anteil von ca. 53%. Nach einer torsionalen Verdrehung von zwei Grad wurden beide Netzhautbilder praktisch sofort fusioniert. Waren die beiden Testfiguren um 5,75 Grad gegeneinander verkippt, so steigerte sich die Zeit für eine motorische intorsionale Kompensationsbewegung auf acht bis zwölf Sekunden. Die entsprechend große extorsionale Augenrollung war ungefähr zehn bis zwölf Sekunden langsamer.

Anfänglich erwarteten wir einen symmetrischen Anstieg der Stereoschwelle bei Bilddrehungen im oder gegen den Uhrzeigersinn, aber die Ergebnisse in Abb. 11 zeigen ein asymmetrisches Verhalten. Eine mögliche Fehlerquelle könnte ein Eichfehler der Nullgrad-Position sein, aber dieser Fehler ist unwahrscheinlich. Es gibt auch eine andere Erklärungsmöglichkeit dafür, daß bei unseren Messungen das Stereosehen seine optimale Qualität bei einer Objektverdrehung um ca. 1,5 Grad aufweist, die auf Helmholtz zurückgeht. Diese Erklärung beruht auf der von Helmholtz schon 1866 beschriebenen und mittlerweile auch durch neuere Untersuchungen (Nakayama et al., 1977, Nakayama, 1977, Cogan, 1979) bestätigte Tatsache, daß der Horopter in vertikaler Richtung nicht senkrecht zur Fixierlinie steht, sondern stark nach hinten geneigt ist. Eine Verkippung der beiden Bildschirme gegeneinander ist einer scheinbaren Neigung äquivalent und könnte so das Random-Dot-Muster besser in das Zentrum des vertikalen Panumraums verlegen.

4.3 Gleitsichtgläser

Gehen wir auf das Problem der Optimierung von Gleitsichtgläsern zurück, so können die Ergebnisse wie folgt zusammengefaßt werden:

1. Das Binokularsehen wird durch jede optische Belastung – auch wenn diese nicht zu einer Bildunschärfe führt – beeinträchtigt.
2. Das Ausmaß der Verschlechterung des Binokularsehens ist für die verschiedenen Belastungen unterschiedlich, so daß sich in Zukunft möglicherweise eine Klassifizierung der verschiedenartigen Belastungen in schwerwiegende und nicht so bedeutsame Belastungen durchführen läßt.
3. Eine gleichsinnige Belastung beider Augen ist für die Qualität von Fusion und Stereosehen einer ungleichsinnigen Belastung in jedem Falle vorzuziehen. Für Gleitsichtgläser bedeutet dies, daß sie in den fehlerbehafteten Randbereichen auf beiden Augen etwa gleiche Fehler aufweisen sollten, sofern diese Beträge annehmen, die bereits zu Beeinträchtigungen der Binokularfunktion führen.

Anzumerken bleibt, daß das Zusammenspiel verschiedener Belastungsfaktoren in unseren Untersuchungen ebenso offen geblieben ist wie das dynamische Verhalten des Augenpaares bei Blickbewegungen, da alle unsere Messungen im statischen Zustand durchgeführt wurden. So wurde oben zum Beispiel davon berichtet, daß das Stereosehen bei Belastung erst nach einer gewissen Gewöhnungsphase wiederkehrt. Die Frage, welche Belastungen das binokulare System während schneller Blickbewegungen einerseits und schneller Änderungen der Bildfehler andererseits verkraften kann, bedarf noch weiterer umfangreicher Untersuchungen.

Danksagung

Wir danken der Orthoptistin Frau Gertraud Höcherl und der Augenoptikerin Frau Andrea Schütte für ihre Hilfe bei der Durchführung der zeitaufwendigen Messungen und den vielen Versuchspersonen für ihre Geduld und Mitarbeitsbereitschaft.

Literaturverzeichnis

Boman, D. K. and Kertesz, A. E.: „Effect of stimulus parameter on fusional and stereoscopic performance", Am. J. Optom. Physiol. Optics 1984; 62: 222–227.

Cogan, A. I.: „The relationship between the apparent vertical and the vertical horopter", Vision Res. 1979; 19: 655–665.

Cole, R. G. and Boisvert, R. P.: „Effect of Fixation Disparity on Stereo-Acuity", Am. J. Optom. Physiol. Optics 1974; 51: 206–213.

Cornsweet, T. N.: „The staircase-method in psychophysics", Am. J. Psychol. 1962; 75: 485–491.

Hampton, D. R. and Kertesz, A. E.: „Human response to cyclofusional Stimuli containing depth cues", Am. J. Optom. Physiol. Optics 1982; 59: 21–27.

Helmholtz, H. L.: „Handbuch der physiologischen Optik", Hamburg 1866.

Heßel, L. und Herzau, V.: „Erfolgt die fusionale Zyklovergenz nach dem Heringschen Gesetz?", Orthoptik und Pleoptik, BOD-Journal 1984; 11: 45–58.

Herzau, W.: „Aniseikonia", Klin. Monatsbl. Augenheilk. 1940; 105: 94–101.

Julesz, B.: „Foundations of cyclopian perception", Univ. of Chicago Press, Chicago 1971.

Nakayama, K.: „Geometrical and physiological aspects of depth perception". In: Image processing (Edited by Benton S.), pp. 1–8, Proc. Soc. Photo-Opt. Instr. Eng. 120 (1977).

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

Ogle, K. N. and Ellerbrock, V. J.: „Cyclofusional responses", Arch. Opthalmol. 1946; 36: 700–735.

Ogle, K. N.: „Distortion of the image by prisms", J. Opt. Soc. Am. 1951; 41: 1023–28.

Ogle, K. N.: „Distortion of the image induced by anisometropic corrections", A.M.A. Arch. Ophthal. 1952; 47: 121–31.

Ogle, K. N. and Prangen, A.: „Observations on vertical divergences and hyperphorias", Arch. Ophthalmol. 1953; 49: 313–334.

Ogle, K. N.: „Stereopsis and vertical disparity", Arch. Ophthalmol. 1955; 53: 495–504.

Ogle, K. N.: „Spatial Localization through binocular vision". In: The eye (Edited by Davson H.), pp. 271–324, Academic Press, Vol. 4 (1962).

Ogle, K. N., Martens, T. G. and Dyer, J. A.: „Ocular motor imbalance in binocular vision and fixation disparity", Philadelphia, Lea and Febinger (1967).

Panum, P. L.: „Untersuchungen über das Sehen mit zwei Augen", Schwering, Kiel (1858).

Stigmar, G.: „Blurred Visual Stimuli", Acta Ophthalmol. 1971; 49: 364–379.

Sullivan, M. J. and Kertesz, A. E.: „Binocular coordination of torsional eye movements in cyclofusional response", Vision Res. 1978; 18: 943–949.

Sullivan, M. J. and Kertesz, A. E.: „Pheripheral stimulation and human cyclofusional response", Invest. Ophthalmol. Vis. Sci. 1979; 18: 1287–1291.

Westheimer, G.: „The spatial sense of the eye", Invest. Ophthalmol. Vis. Sci. 1979; 18: 893–912.

Wesemann, W., Klingenberger, H. and Rassow, B.: „Electrophysiological assessment of the human depth-perception threshold", Graefe's Arch. Clin. Exp. Ophthalmol. 1987; 225: 429–436.