

## Über binokulare Prüfverfahren, das binokulare Sehen, seine nicht krankhaften Anomalien und ihren optischen Ausgleich

Mitteilungen aus der Forschungs- und Entwicklungsarbeit der Fachschule für Optik und Fototechnik, Berlin - Direktor Dr. W. Thiele

Von Hans-Joachim Haase

Fortsetzung aus Heft 10 1960

### Gegenmaßnahmen

Optisch kurzigieren kann man Zyklophorien ohnehin nicht, außer theoretisch mit schräg stehenden Geradesichtprismen, die jedoch praktisch untragbar sind. Bei lähmungsbedingten Stellungsfehlern mit Verrollungen hofft man auf eine Besserung durch Behandlung des zugrunde liegenden Leidens. Bleibt die Verrollung bestehen, so wäre vielleicht an orthoptische Übungen zur Stärkung des Drehstärkungsvermögens zu denken, jedenfalls bei nur leichten Lähmungen ohne wesentliche Höhenkomponente. Als äußerste Korrekturmaßnahme kämen operative Eingriffe an den schrägen Muskeln in Frage, die jedoch dem Vernehmen nach besonders schwierig sind und nur von sehr wenigen Augenchirurgen ausgeführt werden. Es scheint, als ob bisher wegen dieser Schwierigkeiten bei stark störenden Zyklophorien, wie sie besonders in Zusammenhang mit Trochlearislähmungen auftreten, in der Regel zur Dauerocclusion des gelähmten Auges gegriffen würde.

Die monokulare Dauerocclusion wird jedoch oft fast ebenso ungenügend ertragen wie die verrollten Doppelbilder oder die Zwangs-Kopfhaltung, mit der die Diplopie manchmal gemildert werden kann.

Es wäre deshalb sicher zu begrüßen, wenn weitere risikolose Wege zu wirklicher Hilfe erschlossen werden könnten. Nach den oben angeführten Beobachtungen des Verfassers an leider sehr wenigen konstitutionellen und geringgradigen Zyklophorien scheint es grundsätzlich möglich, Verrollungen durch sensorische Anpassung zu überwinden, wenn nur zentrales Binokularsehen besteht. Wohl in allen Lähmungs-Zyklophorienfällen ist aber das zentrale Binokularsehen aufgehoben, weil ja mit der Verrollung mindestens auch ein Höhenfehler in der Hauptblickrichtung einhergeht. Infolgedessen fehlt der Anreiz zum sensorischen Ausgleich der Zyklophorie. Es wäre deshalb vielleicht aussichtsreich, wenn man solche Fälle in Zukunft versuchsweise -- vor ihrer Verurteilung zur Dauerocclusion und vor der Gewöhnung an eine Zwangshaltung -- nur vertikal und horizontal so genau wie möglich für die Hauptblickrichtung korrigierte. Hierzu wären bei hochgradigen Stellungsfehlern grob korrigierende (approximative) Eingriffe nötig, die danach durch genaue prismatische Korrekturen zu ergänzen wären, während in leichteren Fällen schon prismatische Stellungskorrekturen allein das zentrale Binokularsehen herbeiführen könnten. Voraussetzung für einen Erfolg wäre dauerndes Tragen der Korrektur trotz der zunächst noch störenden Konturendiplopie. Auch die gestörte Motorik selbst könnte -- nebenher -- durch den ständigen Anreiz zum Binokularsehen nur günstig beeinflusst werden. Der Verfasser hat bisher nur zwei Fälle mit manifester Zyklophorie infolge Trochlearisparese in Händen gehabt, die sich leider für solche Versuche nicht eigneten. Bei einem von ihnen heilte die Lähmung schon wenige Wochen nach Verabfolgung der Korrektur aus, während der andere Klient aus verschiedenen Gründen nicht für die Durchführung des Versuches gewonnen werden konnte. Immerhin zeigte sich im ersten Falle, daß bis zur Ausheilung der Lähmung die prismatische Korrektur des Höhenfehlers, trotz zunächst verbleibender Konturendiplopie um 7 bis 8°, weit angenehmer empfunden wurde als der unkorrigierte Zustand und die versuchte monokulare Occlusion. Näheres berichtet der Verfasser in der Arbeit „Grenzfälle der Heterophorie-Korrektur“ in der „Optometrie“ Heft 6/1959.

Wir würden es begrüßen, wenn Kollegen, denen geeignete Klienten begegnen die behandelnden Augenärzte auf diese selbst im Fall des Mißerfolges risikolose Behandlungsmöglichkeit aufmerksam machen, ihnen gegebenenfalls bei der Korrekturermittlung behilflich waren und dafür sorgen, daß über die Erfahrungen berichtet wird. Der Verfasser wäre gern bereit, bei der Korrekturfestlegung beratend mitzuwirken.

### „Unechte“ oder optische Zyklophorien

#### Allgemeines

Zu gleichen binokularen Seheindrücken wie bei echter Zyklophorie kann es an dem Zyklophorietest aber auch kommen,

wenn nicht die Augen gegenseitig verrollt sind, sondern die Netzhautbilder. Da solche Verrollungen stets optisch verursacht sind, könnte man sie zur Unterscheidung von echten muskelbedingten Zyklophorien als optische Zyklophorien bezeichnen.

Zu optischer Zyklophorie führt die Brillenglaskorrektur von einseitigem Astigmatismus mit schräger Hauptschnittsloge und von beidseitigem Astigmatismus mit schräger und zusätzlich beiderseits unterschiedlicher Hauptschnittsloge. Sie ist -- abgesehen von nicht erkannten Heterophorien -- der Hauptgrund für die manchmal erheblichen Gewöhnungsbeschwerden nach solchen astigmatischen Erstkorrekturen und auch nach Abänderungen gewohnter Korrekturen.

Die astigmatische Korrektur mit Brillengläsern führt primär zu einer monokularen Verzerrung der Netzhautbilder. Daraus folgen, bei zueinander schrägen Achsen beider Gläser, binokulare Bildgrößendifferenzen zwischen den korrespondierenden Meridianen beider Augen. Diese wiederum bedingen die optische Zyklophorie, die mit dem Zyklophorietest gemessen werden kann, und am Ende ergibt sich aus alledem eine Ver-

lässigung der binokularen Raumwahrnehmung, welche dem Ficht-sichtigen die Gewöhnungsschwierigkeiten bereitet.

Wir wollen diese Kette von Zusammenhängen in der oben angegebenen Reihenfolge behandeln und uns am Schluß darüber klar zu werden versuchen, inwiefern uns der Zyklophorietest Anhaltspunkte für klare Maßnahmen bieten kann.

### Die monokulare Bildverzerrung

Astigmatismus kommt bekanntlich im wesentlichen durch Krümmungsdifferenzen in den Meridianen der Hornhaut oder der Linse oder beider gemeinsam zustande. Man muß zwar in manchen Fällen auch einen Netzhautastigmatismus für mitbeteiligt halten, der aus Abweichungen des hinteren Bulbusabschnittes von der rotations-symmetrischen Idealform resultieren könnte; seine Rolle gegenüber den anderen beiden Komponenten dürfte aber im allgemeinen unbedeutend sein.

Folglich ist die astigmatische Differenz nicht eine Achsen-, sondern eine Brechkraftsdifferenz zwischen zwei Meridianen des Auges. Wird sie durch ein Brillenglas mit entgegengesetzt unterschiedlichen Hauptschnittsbrechwerten ausgeglichen, so wird der Abbildungsmaßstab zwischen den beiden Korrektionshauptschnitten des Einzelauges ebenso unterschiedlich wie in allen Meridianen zwischen zwei sphärisch brechkraftstehsichtigen Augen entsprechend ungleicher Refraktion, die mit sphärischen Brillengläsern vollkorrigiert sind (s. Heft 2/1960).

Im korrigierten astigmatischen Auge wird also das Netzhautbild stets in Richtung des Brillenglas-Hauptschnittes mit dem stärker positiven oder schwächer negativen Brechwert den größten Abbildungsmaßstab haben, in dem anderen Hauptschnitt den kleinsten.

Wie groß die Maßstabsdifferenz ist, hängt von der astigmatischen Differenz, von der Schleifart des Korrektionsglases und von seinem Hornhautscheitelabstand „e“ ab: Bei unendlich dünnen Gläsern in  $e = 12$  mm ergibt sich rechnerisch eine Maßstabsdifferenz von etwa 1,3% für jede Dioptrie des Astigmatismus, wenn man die vordere Hauptebene des Auges am normalen Ort annimmt. H. H. Fick rechnete mit 1,2% unter der Annahme eines reinen Hornhautastigmatismus, durch den sich die Augenhauptebenen leicht zur Netzhaut hin verschieben. Mit inenentorischen Brillengläsern der üblichen Mittendicken würde man ungefähr die gleichen Werte erhalten, mit den meist üblichen außentorischen jedoch u. U. beträchtlich höhere. Sie

lassen sich hinreichend genau aus dem Diagramm in Abb. 28 (Heft 2/1960, S. 6) nach dem gleichen Verfahren entnehmen, das dort für die Ermittlung der dioptrischen Aniseikonie zwischen sphärisch-brechkraftsinnometropen Augen angegeben ist. Wir würden beispielsweise für eine außertorische Korrektur mit sph + 2,0 C cyl + 3,0 Achse 135° aus dem Diagramm ablesen die Abbildungsmaßstäbe  $I'$

für Hauptschnitt 135° / + 2,0  $\approx$  1,04  
 für Hauptschnitt 45° / + 5,0  $\approx$  1,1  
 Maßstabsverhältnis  $\approx \frac{1,1}{1,04} \approx 1,058$

Prozentuale Maßstabsdifferenz  $\approx 0,058 \cdot 100 \approx 5,8\%$

Um knapp 6% wäre also der Abbildungsmaßstab im 45°-Meridian dieses Auges größer als im 135°-Meridian. Legen wir die gleiche astigmatische Differenz von 3,0 dpt bei insgesamt höherer Übersichtlichkeit zugrunde, so wird die Maßstabsdifferenz noch größer. Bei einem Korrektionsglas mit sph + 9,0 C cyl + 3,0 zum Beispiel kämen wir auf einen Wert von etwa 8,3%.

Zu welchen monokularen Bildverzerrungen solche Verhältnisse führen, ist ohne weiteres vorstellbar. Es wird z. B. das Netzhautbild eines Kreises zu einer Ellipse, deren längere Hauptachse in Richtung des vergrößerten abbildenden Hauptschnittes liegt. Ein Quadrat wird zu einem Rechteck, wenn seine Seiten zu jeweils einem der Korrektionshauptschnitte parallel verlaufen; es wird zu einem Rhombus, wenn die Richtungen seiner Diagonalen mit den Hauptschnittsrichtungen übereinstimmen, und zu einem gewöhnlichen Parallelogramm, wenn die Hauptschnittsrichtungen weder mit den Richtungen der Quadratseiten noch mit denen der Diagonalen übereinstimmen.

Liegen die astigmatischen Differenzen und die Hauptschnittsrichtungen beidseitig gleich, so ergeben sich keine zusätzlichen binokularen Komplikationen. Der binokulare Eindruck ist nur ebenso verformt wie die monokularen Bilder, aber auch das allein kann manchmal recht erheblich stören. Die Umwandlung eines Quadrates in ein Rechteckbild zwar dürfte subjektiv kaum auffallen und stören, solange sich die Seitenlängen im Bilde nur um wenige Prozent unterscheiden. Angehörige von technischen Berufen, in denen es auf ein sicheres Augenmaß für rechte Winkel oder für Kreisdurchmesser ankommt, werden aber ungenügend stark irritiert, wenn ihnen alle Kreise durch die Korrektur zwar schärfer, aber leicht elliptisch verformt erscheinen, oder wenn ihnen -- analog zur Umformung eines Quadrates in ein Rhombus- oder Parallelogrammbild -- rechte Winkel je nach Lage des Sehobjektes etwas spitz- oder stumpfwinklig aussehen. Jeder erfahrene Brillenbestimmer weiß, wie sehr man sich deshalb vorzusehen hat mit der Erstverordnung oder Verstärkung selbst schwacher und beiderseits gleichgerichteter astigmatischer Korrekturen in Arbeitsbrillen für etwas ältere Schreiner, Schlosser, Mechaniker, Installateure und Angehörige ähnlicher Berufe. Auch Anhänger der ganz radikalen Vollkorrektionsrichtung in der Brillenbestimmung werden in solchen Fällen manchmal um gewisse Abstände nicht herumkommen, wenn sie ihren Klienten eine berufliche Behinderung über einige Wochen hinweg und sich selbst Ärger ersparen wollen.

### Die meridionale Aniseikonie

Liegen die Korrektionshauptschnitte in beiden Augen verschieden, so sind die Netzhautbilder in ungleichen Richtungen verzerrt. Infolgedessen differieren sie in den einzelnen korrespondierenden Meridianen in der Größe, und zwar in allen Meridianen um verschiedene Beiträge.

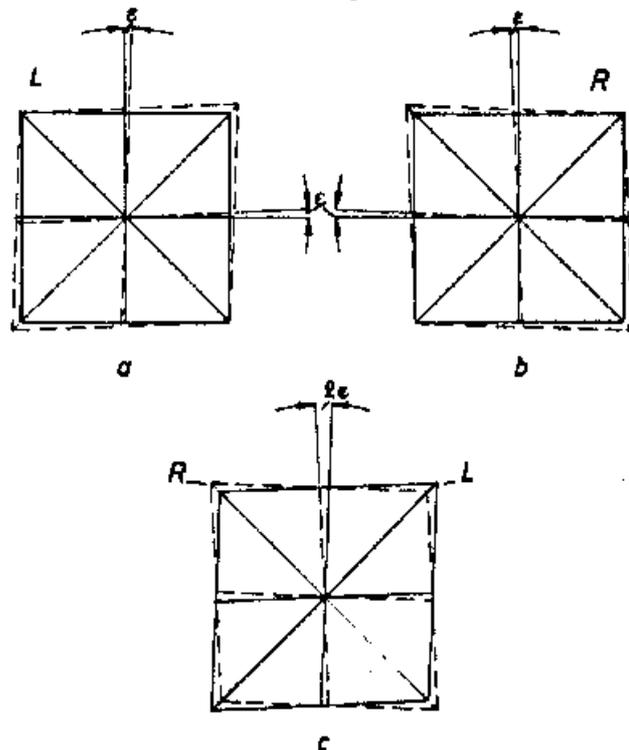


Abb. 33

Verzerrung eines Quadrates in brillenglaskorrigierten astigmatischen Augen bei zueinander dachförmiger Stellung der positiveren Korrektionshauptschnitte  
 a. unverzerrter und verzerrter Seheindruck des linken Auges,  
 b. unverzerrter und verzerrter Seheindruck des rechten Auges,  
 c. binokulare Überlagerung der verzerrten Seheindrücke.

Abb. 33 zeigt das an dem einfachsten und übersichtlichsten Fall, nämlich an der Verformung eines senkrecht stehenden Quadrates für ein astigmatisches Augenpaar, dessen positive Korrektionsachsen V-förmig/rechtwinklig zueinander liegen. In den beiden monokularen Darstellungen a und b ist jeweils dem unverzerrten Quadrat ein in einer Diagonale um reichlich 8% vergrößerter Seheindruck (gestrichelt) gegenübergestellt. Im vorigen Abschnitt wurde eine Maßstabsdifferenz von etwa 8,3% für eine Korrektur mit + 9,0 cyl + 3,0 angegeben. Die Abbildungen geben also ungefähr maßstablich die rein optisch bedingten Verhältnisse bei einer Korrektur mit  
 $R + 9,0 = \text{cyl} + 3,0 \text{ Achse } 135^\circ$   
 $L + 9,0 = \text{cyl} + 3,0 \text{ Achse } 45^\circ$  wieder.

Abb. 33c zeigt die binokulare Überlagerung nur der beiden verzerrten Bilder; zur besseren Unterscheidung wurde das des rechten Auges gestrichelt, das des linken Auges mit durchgehenden Strichen eingetragen. Es ist zu erkennen, daß es unter diesen Verhältnissen gleiche Bildgrößen für beide Augen nur in der Senkrechten und in der Waagerechten nach den in der Mitte angenommenen Fixierpunkt gibt; in allen Meridianen von diesen Richtungen an bis zu den Diagonalen hin ist eine zunehmende Aniseikonie festzustellen. Diese Art der Aniseikonie wird nach Gifford und Ogilvie in den anglo-sächsischen Ländern meridionale Aniseikonie genannt, zur Unterscheidung von den „overall“- oder „round“-Aniseikonien, also den runderum gleichgroßen „gewöhnlichen“ Aniseikonien, die in den Fortsetzungen dieser Arbeit in Heft 12/1959 und 2/1960 behandelt wurden.

Ebenso wie die Rundum-Aniseikonien können selbstverständlich auch meridionale Aniseikonien durch Bau- oder Funktionsunterschiede der Netzhäute bzw. der Sehbahnen verursacht oder mitbeeinflusst sein, so daß im Einzelfalle die tatsächlich vorhandenen und die auf Grund der Korrektur zu erwartende Aniseikonie sich mehr oder weniger unterscheiden können. Die Auswirkungen in den Seheindrücken sind auch hier natürlich von

der Gesamt-Aniseikonie abhängig. Schließlich gibt es sogar völlig unsymmetrische und unregelmäßige Aniseikonien auf Grund organischer Anomalien. Beispielsweise können Netzhautnarben nach Entzündungen oder nach chirurgischen Eingriffen am hinteren Bulbusabschnitt zu unregelmäßigen Verzerrungen der Netzhaut und folglich zu ebensolchen Verzerrungen der Seheindrücke trotz vielleicht völlig normaler Netzhautbilder führen. Solche zum Glück seltenen und kaum korrigierbaren Fehler sollen aber hier nicht genauer besprochen werden.

Man sollte annehmen, daß auch bei der meridionalen Aniseikonie die Bildgrößenunterschiede in den am stärksten betroffenen Meridianen zu einem Verschmelzungsweltstreit und unter Umständen zur direkten Wahrnehmung von Doppelkonturen führen können, wenn eine kritische Grenze überschritten wird. Beispiele dafür sind dem Verfasser aber bisher nicht bekanntgeworden. Die Regel scheinen weniger direkt wahrnehmbare Auswirkungen zu sein.

#### Die optische Zyklophorie

Alle schiefachsigen meridionalen Aniseikonien, gleichgültig, ob sie rein optisch verursacht oder funktionell-anatomisch mitbeeinflusst sind, führen, wie Abb. 33 nachweist, auch zu gesetzmäßigen gegenseitigen Verrollungen der Objektlinien in den Seheindrücken. In den Einzelbildern werden nur diejenigen Linien winkelnrichtig wiedergegeben, die mit der Richtung der Korrektionshauptschnitte verlaufen. Die monokulare Bildverrollung ist am größten offenbar für die im Winkel von  $45^\circ$  zu den Korrektionshauptschnitten verlaufenden Objektlinien; das sind in Abb. 33 a und b die senkrechten und waagerechten Linien der Quadrate. Die Bildlinien weichen um die kleinen Winkel  $\varphi$  von den Objektlinien ab, und zwar liegen diese Winkel immer zu den positiveren Korrektionshauptschnitten hin. Im binokularen Seheindruck der Abb. 33 c sind dementsprechend die zusammengehörigen Bildlinien um die Summe der monokularen Winkel  $\varphi$  gegeneinander verrollt, in unserem vereinfachten Beispiel mit beiderseits gleicher und schrägsymmetrischer Korrektion also um  $2\varphi$ .

Es dürfte einleuchten, daß mit dem Zyklophorietest ohne weiteres die Summe der Winkel  $\varphi$  in der senkrechten Allgemeinrichtung gemessen werden kann. Die Netzhautbilder eines einzelnen senkrechten Objektes werden nämlich genau so verrollt werden wie alle senkrechten Linien des zur Erklärung gewählten Quadrates, und ein solches senkrecht Objekt — monokular aufgeteilt — findet das Augenpaar auf dem Zyklophorietest; für das rechte Auge ist es der Zeiger, für das linke Auge sind es die beiden mittleren Skalenstriche. Unser Beispielfall müßte, wie aus Abb. 33 c hervorgeht, den Zeiger des Testes um den Winkel  $\varphi$  nach links gedreht wahrnehmen, die Skalenmilten um den gleichen Winkel nach rechts. Daraus würde sich für die vorliegende dachförmige optische Verrollung ein richtungsmäßig entgegengesetzter Gesamteindruck ergeben wie in Abb. 32 bei einer dachförmigen funktionellen Zyklophorie.

Wenn für diese Bildverrollung der Ausdruck „optische Zyklophorie“ gebraucht werden soll, so bleibt festzuhalten, daß hierbei das Augenpaar aber doch mit etwas anderen Erscheinungen fertig zu werden hat als bei echten Zyklophorien. Bei echten Zyklophorien sind alle Meridiane des Auges in gleicher Richtung und um gleiche Winkel gegenüber den Bildern verrollt; eine funktionelle Ausgleichsdrehung, die bevorzugt von den Bildern waagerechter Objektlinien angeregt werden könnte, würde die Verrollung in allen Meridianen verringern oder gar ganz beseitigen. Bei optischen Zyklophorien dagegen sind die Verrollungswinkel in der Senkrechten und Waagerechten zwar auch größengleich, aber richtungsverschieden. Abb. 33 c zeigt dies deutlich. Würde also bei optischer Zyklophorie durch Drehfusion die Bilderdeckung in der Waagerechten erzwungen, so würde dadurch der Verrollungswinkel in der Senkrechten verdoppelt werden. Diese Möglichkeit hat, wie später zu zeigen sein wird, vielleicht auch praktische Bedeutung.

#### Die Raumverfälschung

Greifen wir aus den verzerrten Bildern des Quadrates in Abb. 33 c die ehemaligen Mittelsenkrechten heraus, so ist zu erkennen, daß bei der angenommenen Fixation des Mittelpunktes nur der Mittelpunkt selbst auf korrespondierenden Netz-

hautstellen abgebildet werden kann. Das obere Ende dagegen erscheint dem rechten Auge nach links versetzt, dem linken Auge nach rechts. Gegenüber dem Lot durch den Fixierpunkt, das die miteinander korrespondierenden senkrechten Meridiane beider Netzhäute kennzeichnet, liegen also die Abbildungen des höchsten Objektpunktes in beiden Augen temporal, und bitemporal querdissparat werden auch alle Punkte bis herunter zum Fixierpunkt abgebildet. Infolgedessen wird die obere Hälfte der Linie nicht in der Fixierpunktebene, sondern räumlich zum Betrachter hin vorgeneigt wahrgenommen. Die untere Hälfte dagegen müßte räumlich vom Betrachter weg geneigt erscheinen, weil ihre Punkte bis ans a l querdissparat projiziert werden.

In gleicher Weise wie seine Mittellinie müßte auch das ganze Quadrat gegenüber der Fixierpunktebene räumlich gesehen werden, denn seine senkrechten Seiten werden ebenso querdissparat abgebildet. Ein aufmerksamer Beobachter würde dann aber nicht ein Quadrat vor sich zu haben meinen, sondern ein auf ihn zugeneigtes Trapez mit der längeren Parallellseite als Basis. In den Netzhautbildern eines wirklich — und nicht nur optisch — zum Betrachter hin geneigten Quadrates würde nämlich die obere Seite länger sein als die weiter entfernte untere, und hieraus zusammen mit der gleichzeitig registrierten Neigung bildet sich der Erfahrungsbegriff „geneigtes Quadrat“. Gleichlange obere und untere Begrenzungen haben dagegen erfahrungsgemäß die Bilder eines Trapezes, das mit seiner kürzeren oberen Parallellseite dem Betrachter um ein gewisses Stück näher ist als mit der längeren unteren. H. H. Fick beschrieb in einer sehr lesenswerten Arbeit in den Heften 8 und 9/1957 des „Augenoptiker“ die Zusammenhänge näher und wies darauf hin, daß diese binokulare Formtäuschung erfahrungsgemäß besonders im Nahbereich störe, indem z. B. Zeitungen, Bücher usw. nicht mehr rechteckig erschienen.

Im Fernbereich dagegen scheint im allgemeinen nicht die Formtäuschung, sondern die räumliche Verfälschung aufzufallen und zu stören. Vielleicht rührt das daher, daß im Nahbereich falsche Entfernungswahrnehmungen verhältnismäßig leicht berichtigt werden können, und zwar durch die ständige manuelle Kontrollmöglichkeit, die bei größeren Objektweiten fehlt. Zugleich ist aber eine falsche bzw. ungewöhnliche Raumwahrnehmung außerhalb des Bereiches der Hände für den Fehlsichtigen wohl meist riskanter als im Nahbereich, weil sie zu unangenehmen Fehlhandlungen beispielsweise im Straßenverkehr und in gefährlichen Berufen führen kann. Man denke in diesem Zusammenhang nur etwa an den Kranführer und an den Sägewerksarbeiter an einer Gattersäge.

Die scheinbare räumliche Neigung der Sehobjekte, je nach Achsenlage der astigmatischen Korrektionsgläser zum Betrachter hin oder von ihm weg, ist zwangsläufig umso stärker, je größer die optische Verrollung der senkrechten Objektlinien ist, die wir als optische Zyklophorie messen können. Es kommt nun für die Praxis darauf an, Anhaltspunkte dafür zu gewinnen, oberhalb welcher Werte die optischen Zyklophorien und die Faktoren, die sie verursachen, in der Raumwahrnehmung kritisch werden könnten. Zu diesem Zweck müssen wir versuchen, die bisher fast nur qualitativ veranschaulichten Zusammenhänge auch quantitativ zu klären.

Wir werden dabei zunächst rein geometrisch vorgehen; dem Ergebnis dieser geometrischen Überlegungen werden wir gewisse Erfahrungswerte entgegenstellen, und danach werden wir eventuelle Widersprüche zwischen beiden zu überbrücken versuchen, indem wir physiologische bzw. sensorische Gesichtspunkte mit heranziehen.

#### Die quantitativen Zusammenhänge, geometrisch

a) die monokulare Bildverzerrung und die optische Zyklophorie.

Das Verfahren zur Ermittlung der zu erwartenden Maßstabsdifferenz im korrigierten astigmatischen Auge wurde in einem früheren Abschnitt (s. Heft 10/1960 S. 8) bereits angegeben. Wir ermittelten auch schon für ein Glas  $\text{sph} + 2,0 \text{ D cyl} + 3,0$  eine Differenz von etwa 5,8%, für ein Glas  $\text{sph} + 9,0 \text{ D cyl} + 3,0$  etwa 8,3%. Hieraus kann der Verrollungswinkel  $\varphi$  für jeden von den Hauptschnittrichtungen abweichenden Objektmeridian errechnet werden. H. H. Fick leitete in seiner bereits erwähnten Arbeit dafür die Formel ab

$$\arcs = \frac{(k-1)}{2} \cdot \sin 2\varphi,$$

die man allerdings bei größeren zur erwartenden Winkeln für besser

$$(1) \operatorname{tg} \varepsilon = \frac{(k-1)}{2} \cdot \sin 2\varphi \text{ schreibt.}$$

Hierin ist „k“ der Vergrößerungsfaktor zwischen den Haupt-schnittsrichtungen,  $\varphi$  der Winkel zwischen der Achse des korrigierenden Zylinders und dem Objektmeridian, dessen Ver-rollung  $\varepsilon$  berechnet werden soll. Der Winkel  $\varepsilon$  — von Plick Verzerrungsparallaxe genannt — liegt stets von diesem Meridian zum positiveren Hauptschnitt des Korrektionsglases hin.

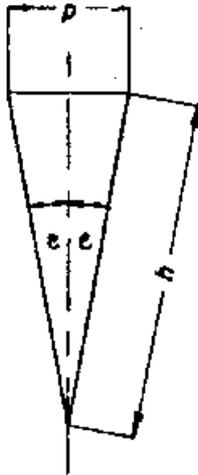


Abb. 34

Zusammenhang zwischen Bildverrollung und stereoskopischer Parallaxe (Erläuterung im Text).

Für die der Abb. 34 zugrunde gelegte Korrektion bds. sph + 9,0 = cyl + 3,0, Achse R 135°, L 45° wäre  $\varphi$  heiderseits mit 45° einzusetzen; die Maßstabsdifferenz wurde mit 8,3% ermittelt, und demnach ist der Vergrößerungsfaktor  $k = 1,083$ . Mit diesen Werten ergibt sich:

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{(1,083 - 1)}{2} \cdot \sin 90^\circ = 0,0415 = 0,0415$$

$$\varepsilon = 2^\circ 23'$$

Da dies die monokulare Verrollung ist, wäre die optische Zyklophorie gemäß Abb. 33c  $2\varepsilon = 4^\circ 46'$ .

b) die optische Zyklophorie und die stereoskopische Parallaxe

Stereoskopische Parallaxe oder stereoskopische Differenz nennt man seit Helmholtz die in die Fixierpunktebene projizierte Quersparation eines räumlich vor oder hinter dieser Ebene wahrgenommenen Punktes. Bei Seheindrücken wie in Abb. 33c wäre die Strecke zwischen beispielsweise den oberen Enden der ehemaligen Mittelsenkrechten die Quersparation dieser Endpunkte, wenn sie in den aufeinander gelegten Netzhautbildern gemessen wird. Projizieren wir dagegen die Netzhautbilder so verzerrt, wie sie sind, in die Fixierpunktebene zurück, so ist dort die entsprechend vergrößerte Projektionsstrecke die stereoskopische Parallaxe.

Zwischen dem halben Zyklophoriewinkel  $\varepsilon$ , der stereoskopischen Parallaxe  $p$  und der Größe  $h$  der zurückprojizierten Netzhaut-Bildlinien gemessen vom Fixierpunkt aus, besteht, wie Abb. 34 zeigt, die einfache Beziehung

$$\sin \varepsilon = \frac{p}{2 \cdot h} \quad \text{folglich wäre}$$

$$p = 2h \cdot \sin \varepsilon \quad (2)$$

Nehmen wir die Strecke  $h$  in der Projektion mit 100 cm an, so ergibt sich mit dem im vorigen Abschnitt errechneten Winkel  $\varepsilon = 2^\circ 23'$

$$p \approx 2 \cdot 100 \cdot 0,0416 = 8,32 \text{ cm}$$

c) Stereoskopische Parallaxe und Sehtiefe

Sehtiefe nennt man diejenige Strecke, um die ein quersparat abgebildetes Objekt vor oder hinter einem fixierten anderen Objekt liegend wahrgenommen werden müßte, wenn ideales räumliches Sehvermögen besteht.

Zur Erläuterung der dem Leser vermutlich an sich bekannten Zusammenhänge gibt Abb. 35 ein Augenpaar wieder, das ein punktförmiges Objekt  $O_1$  fixiert und gleichzeitig ein dreieckiges Objekt  $O_2$  abbildet, welches um die Strecke  $t$  räumlich vor  $O_1$  liegt.  $O_2$  wird infolgedessen in beiden Augen foveal abgebildet,

$O_2$  beiderseits um die Strecken  $\frac{q}{2}$  temporal verschoben. „ $q$ “ als die Summe der beiden Strecken  $\frac{q}{2}$  wäre die Quersparation.

Man kann allerdings die Quersparation auch auffassen und größenmäßig ausdrücken als Summe der beiden kleinen Winkel  $\frac{\delta}{2}$  zwischen den beiden Hauptfixierstrahlen und den Knotenpunktstrahlen  $O_1 K_R$  und  $O_1 K_L$ . Projizieren wir  $O_2$  mit Hilfe der Knotenpunktstrahlen in die Fixierpunktebene, so liegt dort zwischen den beiden Projektionspunkten  $O_2'R$  und  $O_2'L$  die stereoskopische Parallaxe  $p$ .

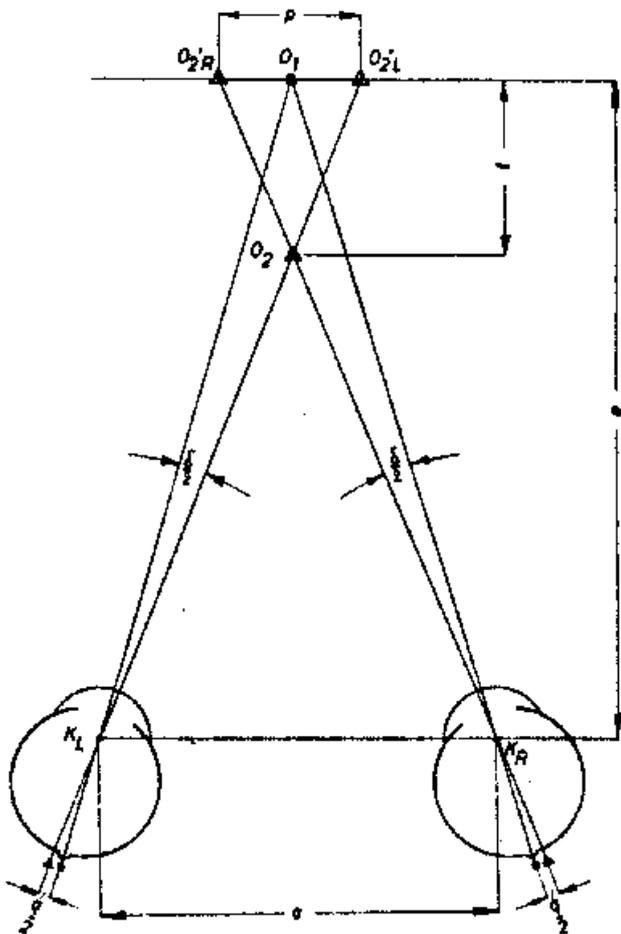


Abb. 35

Geometrische Zusammenhänge im räumlichen Sekund (Erläuterung im Text).

Zwischen  $p$ , der Sehtiefe  $t$ , dem Abstand  $a$  vom Augenpaar bzw. seiner Knotenpunktebene bis zum Fixierpunkt und schließlich dem Knotenpunktsabstand  $a$  des Augenpaares — der bei größeren Objektweiten ungefähr mit der PD gleichgesetzt werden kann — besteht die einfache Beziehung

$$\frac{t}{e} = \frac{p}{a} \quad (\text{Strahlensatz})$$

$$\text{folglich ist } t = \frac{p \cdot e}{a} \quad \text{oder } \frac{pe}{a}$$

$$e = \frac{pt}{a} = t \left( 1 + \frac{p}{a} \right) = \frac{pe}{a}$$

$$t = \frac{pe}{a \left( 1 + \frac{p}{a} \right)} = \frac{pe}{a + p}$$

$$t = \frac{pe}{a + p} \quad (3)$$

Diese Formel wird u. a. für die kartographische Auswertung von Stereobildpaaren benutzt. Bei binokularer Quersparation muß im Nenner  $a+p$  geschrieben werden. (Wird fortgesetzt)