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 11/1960

Im vorigen Abschnitt errechneten wir für die höchsten Punkte der um $2\varepsilon = 4°46'$ gegeneinander verrollten Abbildungen eine stereoskopische Parallaxe von 8,32 cm = p. Bei einer PD von 65 mm und einer Objektweite von 500 cm hätte der angenommene Fehlsichtige eine Sehtiefe zu erwarten von

$$t = \frac{8{,}32 \cdot 500}{6{,}5 + 8{,}32} = 280{,}75 \text{ cm}$$

Das bedeutet also, daß dieser Fehlsichtige ein Quadrat von 2 m Gesamthöhe, das in 5 m Entfernung frontparallel vor ihm steht, und dessen Mitte er beidäugig fixiert, nicht senkrecht, sondern mit der Oberkante um 280,75 cm vorverlagert sehen müßte. Das ist ein wohl unerwarteter großer Betrag. Bevor wir ihn kritisch betrachten, soll aber der räumliche Vorneigungswinkel errechnet werden, der sich daraus ergibt.

d. Sehtiefe und räumliche Vorneigung

Abb. 36 stellt die Strecken- und Winkelverhältnisse in einer zum Fehlsichtigen leicht seitlich-schrägen Ebene dar, die man sich, bei einer Höhe h zwischen den Punkten 0_1 und $0'_2$, in Abb. 35 durch den Punkt 0_1 und entweder durch die Punkte $0'_{2R}$ und K_R oder durch $0'_{2L}$ und K_L gelegt denken müßte. Bei großer Objektweite darf die Strecke e in Abb. 36 mit e in Abb. 35 gleichgesetzt werden.

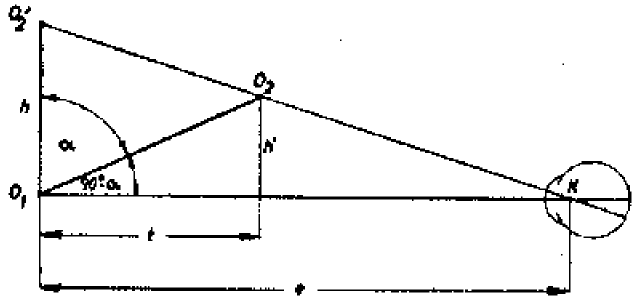

Abb. 36
Zusammenhang zwischen der Sehtiefe innerhalb eines Objektes und seiner räumlichen Vorneigung.

In Abb. 36 ist $\frac{h'}{h} = \frac{(e-t)}{e}$ (Strahlensatz);

folglich ist $h' = \frac{(e-t) \cdot h}{e}$ (4);

ferner ist $\operatorname{tg}(90° - \alpha) = \operatorname{ctg} \alpha = \frac{h'}{t}$ (5).

4 in 5 eingesetzt ergibt

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{(e-t) \cdot h}{et} = \frac{eh}{et} - \frac{th}{et} = \frac{h}{t} - \frac{h}{e}$$

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{h}{t} - \frac{h}{e} \qquad (6).$$

Das ergibt mit den bereits festliegenden Werten für unseren Fall (h = 100 cm, t = 280,75 cm, e = 500 cm)

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{100}{280{,}75} - \frac{100}{500} = 0{,}1566$$

$$\alpha = 81° 7'.$$

Um die auftretenden Zwischenwerte zu veranschaulichen, wurde für alle Stufen der Zusammenhänge einzeln gerechnet. Man kann jedoch auch, wenn nur der Verrollungswinkel 2ε ermittelt ist, von diesem Wert aus d i r e k t den Vorneigungswinkel α für jede Objektweite e bei bekannter Beobachter-PD a errechnen, denn es ergeben:

Formel 3 in 6 eingesetzt

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{h(a+p)}{ep} - \frac{h}{e} = \frac{h(a+p) - hp}{ep} = \frac{ha}{ep}$$

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{ha}{ep} \qquad (7).$$

Formel 2 in 7 eingesetzt führt zu

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{ha}{2\,eh \cdot \sin \varepsilon} = \frac{a}{2\,e \cdot \sin \varepsilon}$$

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{a}{2\,e \cdot \sin \varepsilon} \qquad (8).$$

Theoretisch — oder sagen wir lieber: geometrisch — müßten demnach unserem Fehlsichtigen mit der außentorischen Korrektion bds. + 9,0 () cyl + 3,0, Achse R 135°, L 45° alle senkrechten Objekte, die er aus einem Abstand von 5 m betrachtet, nicht senkrecht, sondern um reichlich 81° auf ihn zugeneigt erscheinen — also beinahe horizontal liegend. Weiter entfernte Objekte müßten noch stärker, nähere dagegen weniger stark geneigt gesehen werden. Das hat wohl praktisch noch kein Fehlsichtiger erlebt, jedenfalls nicht als Folge einer Brillenglaskorrektion.

Die angenommene Korrektion, mit der bisher gerechnet wurde, ist allerdings recht hochgradig. Es wurde aber in einem früheren Abschnitt für die schwächere außentorische Korrektion bds. + 2,0 () cyl + 3,0 ein monokulares Maßstabsverhältnis k = 1,058 ermittelt, und auch hieraus ergibt sich bei den Achsenlagen R 135°, L 45° mit Hilfe der Formeln 1 und 8 in e = 500 cm und mit a = 65 mm bereits ein Neigungswinkel $\alpha = 77°22'$ ($2\varepsilon = 3°20'$). Für eine noch schwächere Korrektion bds. + 3,0 () cyl + 1,0, Achse R 135°, L 45° bekommen wir aus dem Diagramm Abb. 28 k = 1,024, und mit den gleichen Werten für e und a wie bisher führt das zu einem Winkel $\alpha = 61°34'$ ($2\varepsilon = 1°22'$).

Erfahrungswerte

Schon bei der letzten, geradezu harmlos anmutenden Korrektion dürfte die räumliche Vorneigung um reichlich 60° gar nicht zu übersehen sein, ja, sie müßte sogar ganz ungemein stören, wenn sie in der geometrisch gegebenen Größe auch wirklich wahrnehmbar wäre. Sie wird durch eine optische Zyklophorie von nur 1°22' verursacht.

Dem Verfasser ist jedoch bisher nur von solchen — wenigen — Fehlsichtigen über Raumverfälschungen berichtet worden, bei denen die am Zyklophorietest gemessenen Verrollungen mehr als 5° betrugen.

H. H. Fick, der in einer Versuchsreihe die Einstellung eines neigbaren Stabes vor neutralem Hintergrund beobachten ließ, fand, daß bei Beobachtungsentfernungen unterhalb 3 m die festgestellten Neigungswinkel in Zusammenhang mit astigmatischen Korrektionen zwischen 63 % und 84 % der errechneten Winkelwerte lagen. Allerdings wurden den Rechnungen unendlich dünne Linsen ohne Eigenvergrößerung zugrunde gelegt, so daß die rechnerischen Werte zweifellos noch zu klein waren und die Differenzen zwischen den geometrisch gegebenen und den beobachteten Winkeln noch größer gewesen sein dürften. In Prüfentfernungen oberhalb 3 m erhielt H. H. Fick kaum noch auswertbare Angaben. Er erklärt das damit, daß der Neigungswinkel bei zunehmender Entfernung auf Werte ansteigt, die in einem zu großen Widerspruch zu den tatsächlichen Gegebenheiten stehen. Da aber andererseits die stereoskopische Wahrnehmung in größeren Entfernungen in ihrer Bedeutung für das Tiefenunterscheidungsvermögen von anderen Faktoren abgelöst werde, könne sie dann auch leichter zugunsten eines widerspruchslosen Raumeindruckes unterdrückt werden, meint H. H. Fick weiterhin.

Nun verliert fraglos die Stereopsis ihre Bedeutung für das Tiefenunterscheidungsvermögen noch längst nicht in Entfernungen eben oberhalb 3 m. Nach Messungen von B o u r d o n, D a v s o n und S c h o b e r (in Tabelle 76 zusammengefaßt in Schober, „Das Sehen", Bd. II) liegt die Tiefensehschärfe, also das Erkennungsvermögen für Entfernungsunterschiede zwischen zwei gleichzeitig gesehenen Objekten, bei Beobachtungsentfernungen von 1 m und 10 m noch etwas unterhalb der Werte, die mit Hilfe der Stereopsis allein zu erreichen wären; erst bei Messungen in 100 m liegt sie merklich höher. Das läßt darauf schließen, daß beim binokular Sehtüchtigen die Stereopsis erst in Entfernungen oberhalb 10 m durch andere Faktoren spürbar ergänzt wird (Luftperspektive, Bewegungsparallaxe usw.). Diese Annahme wird unterstützt durch die voneinander unabhängigen Feststellungen von B o u r d o n und v. K r i e s, nach denen die meisten Menschen für Entfernungen von rund 10 m auch die beste a b s o l u t e Tiefenwahrnehmung besitzen (s. Schober 4).

Auf jeden Fall bestehen aber sowohl nach den Beobachtungen von H. H. Fick als auch erst recht nach denen des Verfassers zwischen den geometrisch ableitbaren Werten und den durchschnittlich subjektiv wahrnehmbaren Neigungen ganz erhebliche Widersprüche.

Ein funktioneller Überbrückungsversuch

Es fragt sich nun, inwieweit auf Grund der funktionellen Eigenarten des Sehapparates und vielleicht schon nur der Netzhäute Neigungen — gleich, ob „echte" Neigungen im Objektraum oder „unechte" im Sehraum, die nur durch optische Verrollung der Seheindrücke erzeugt sind —, mit Hilfe der Stereopsis allein und ohne Vergleich mit anderen räumlichen Seheindrücken überhaupt erkannt werden können. Mit anderen Worten: es fragt sich, wie genau die absolute Neigungswahrnehmung funktionieren kann.

Um uns das anschaulich zu machen, wollen wir uns vorstellen, ein in jeder Hinsicht Sehtüchtiger betrachte binokular nicht eine senkrechte Linie, sondern zwei gerade noch wahrnehmbare kleine Punkte, die ihm unter dem soeben noch auflösbaren Abstand von einer Winkelminute senkrecht übereinander erscheinen, die aber nicht in der gleichen räumlichen Ebene liegen. Er soll den unteren dieser Punkte fixieren; dann befinden sich auch die monokularen Abbildungen des oberen Punktes noch in den fovealen Bereichen höchsten Auflösungsvermögens. Dort liegt die Noniensehschärfe, die auch den angularen Grenzwert der Tiefensehschärfe bestimmt, zwischen 5 und 10 Winkelsekunden. Der angulare Grenzwert der Tiefensehschärfe wäre als der kleinste Querdisparationswinkel δ (s. Abb. 35) aufzufassen, unter dem zwei Objektpunkte als räumlich hintereinander liegend erkannt werden können.

Wenn unser gedachter Beobachter unter größter Aufmerksamkeit den oberen der beiden Punkte als räumlich vor dem unteren Punkt liegend erkennen soll, müßte demnach dieser Punkt in seinen Augen um insgesamt mindestens 5'' bitemporal querdisparat gegenüber dem fixierten unteren Punkt abgebildet werden. Da wir weiter oben ständig mit Beobachtungsentfernungen von 5 m rechneten, soll diese Querdisparation auf eine Ebene in 5 m Abstand vor den Augen projiziert werden, in der auch der Fixierpunkt angebracht sein soll. Wir erhalten dann dort für die beiden oberen Punktbilder eine stereoskopische Parallaxe 2p = 0,121 mm (s. Abb. 35), während der Abstand h der oberen Punktbilder vom Fixierpunkt in dieser Projektionsentfernung 1,45 mm (≈ 1 Winkelminute) sein wird.*)

Mit Hilfe der Formel 3 ergibt sich daraus für einen Beobachter mit der PD a = 65 mm eine Sehtiefe von

$$t = \frac{pe}{a+p} = \frac{0{,}121 \cdot 5000}{65 + 0{,}121} = \frac{605}{65{,}121} = 9{,}29 \text{ mm}.$$

Um mindestens 9,29 mm müßte demnach bei allerhöchster Tiefensehschärfe und günstigsten Kontrastverhältnissen der obere Objektpunkt vor der zur Blickrichtung senkrechten Ebene durch den unteren Punkt liegen, um überhaupt als vor dieser Ebene liegend erkannt werden zu können. Denken wir uns die beiden so liegenden Punkte als Punkte einer Linie, so wird diese Linie mit der Senkrechten durch den unteren Punkt einen Winkel α einschließen, den wir mit Hilfe der Formel 6 errechnen können:

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{h}{t} - \frac{h}{e}.$$

Gegeben sind t = 9,29 mm, e = 5000 mm, a = 65 mm; wir erhalten also

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{1{,}45}{9{,}29} - \frac{1{,}45}{5000} = 0{,}1558,\ \alpha = 81°9'.$$

Das ist zufällig fast genau der gleiche Winkel, den wir weiter oben als Neigungswinkel mit der Korrektion bds. + 9,0 = cyl + 3,0 Achse R 135°, L 45° errechnet hatten, und somit brauchen wir den Verrollungswinkel 2ε, der dazugehört, nicht noch besonders zu berechnen; er ist hier wie dort 4°46', also knapp 5°. Demnach müßte theoretisch ein völlig isoliert stehendes linienförmiges Objekt um mindestens 81° vorgeneigt werden, ehe ein aufmerksamer Beobachter mit höchster Tiefensehschärfe von 5'' die Neigung auch nur andeutungsweise mit Hilfe der Stereopsis allein wahrnehmen kann.

Das klingt sagenhaft, und selbstverständlich erkennen wir in natürlicher Umgebung schon bei viel kleineren Neigungen, daß etwa ein längerer Pfahl zu uns hin schief und nicht senkrecht steht. Aber solche Objekte sehen wir fast nie völlig isoliert. Wir finden davor, dahinter oder daneben irgendwelche Bezugsobjekte, an denen wir uns räumlich orientieren können. Unter solchen Bedingungen aber beurteilen wir die Neigung des Pfahles nicht absolut, nur auf Grund der nach oben hin allmählich zunehmenden Querdisparationen zwischen den Netzhautbildpunkten des Objektes. Wir schätzen vielmehr nacheinander vergleichend oder relativ die räumliche Tiefe zwischen einzelnen binokular fixierten Punkten unseres Hauptobjektes und irgendwelchen benachbart abgebildeten Bezugsobjekten, und daraus baut sich, ebenso mosaikartig wie das flächenhafte Gesamtbild im monokularen Blickfeld, unser binokularer Raumeindruck auf. Selbst, wenn wir einen Pfahl auf einer Hügelkuppe vor strukturlosem Himmelshintergrund betrachten, liefert uns unwillkürlich und meistens unbewußt das umliegende Gelände und schließlich unser eigener Körper vergleichend auswertbare optische Hinweise. Außerdem aber kommen uns, ebenso unbewußt, gewisse monokular auswertbare Begleiterscheinungen der natürlichen Neigung zu Hilfe, insbesondere die Perspektive, die Licht- und Schattenverteilung am Objekt und die Bewegungsparallaxe.

Wenn der Neigungswinkel unterhalb der für fixierte Blickrichtung ermittelten stereoskopischen Schwelle von 81° liegt, und wenn alle monokular auswertbaren räumlichen Begleiterscheinungen völlig fehlen, könnte man die rein binokulare Neigungswahrnehmung allenfalls durch schnell abwechselnde Fixation des oberen und unteren Endes unseres Stabes unterstützen; dabei würde sich bei einem geneigten Stab jedesmal die Konvergenz der Augen ändern. Nach den bereits erwähnten Untersuchungen von Bourdon und v. Kries gibt es außer der sehr sicheren relativen auch eine absolute, wohl vom Muskelgefühl abhängige Tiefenwahrnehmung in Abhängigkeit vom Konvergenzwinkel, die am sichersten in Entfernungen um 10 m herum sein soll; sie kann aber im Vergleich zur relativen Stereopsis doch nur recht unsicher sein.

Für den Brillenträger aber, dessen astigmatische Brillenglaskorrektion eine unnatürliche räumliche Neigung im Sehraum erzeugt, ist die Situation durchaus „besonders" oder absolut. Erstens wird die verrollungsbedingte Neigung seiner Seheindrücke nicht durch solche Symptome unterstützt oder bestätigt, die an wirklich geneigten Objekten typisch sind und die deshalb aus der Erfahrung heraus unbewußt erwartet werden. Es fehlen beispielsweise die entsprechenden perspektivischen Veränderungen und die typischen Schattenbildungen. Zweitens aber — und das dürfte noch wesentlicher sein — wird nicht nur das angebliche Objekt verrollt abgebildet, sondern der gesamte Objektraum mit allen Bezugspunkten, an denen sich die relative Tiefenwahrnehmung orientieren könnte. Die räumlichen Beziehungen zwischen jedem angeblickten Objektpunkt und den anderen Raumpunkten bleiben also — im großen ganzen — auch im Sehraum „normal", und die Neigung des Sehraumes gegenüber dem Objektraum könnte nur durch absolute Auswertung der zwischen oben und unten verschiedenen stereoskopischen Parallaxe innerhalb der Einzelobjekte des Sehraumes erkannt werden. Die stereoskopische Parallaxe aber kann sich, jedenfalls nach unseren soeben entwickelten Gedankengängen, erst bei Neigungen ab etwa 80° in der Wahrnehmung durchsetzen. Nur im Nahgebiet unterhalb 3 m scheint es nach den Untersuchungen von H. H. Fick — aus bisher nicht recht erklärlichen Gründen — anders zu sein.

Es fragt sich, ob unsere Theorie überhaupt stimmt; wir müssen zugeben, daß der errechnete Grenzwinkel der optischen Zyklophorie von rund 5° und der dazugehörige Neigungswinkel von reichlich 80° uns selbst überraschten, obwohl sie durch die Beobachtungen unserer Versuchspersonen gestützt waren. Optische Zyklophorien unterhalb 5° hatten sich ausnahmslos als für die Raumwahrnehmung unkritisch erwiesen, wie wir feststellten.

*) Bekanntlich schließt ein Winkel von 1' auf 1 m Entfernung 0,29 mm ein; in 5 m Entfernung also 5 · 0,29 = 1,45 mm. 5'' auf 5 m wären demnach 1,45 : 12 = 0,121 mm.