

Verzeichnung des Auges und Lage des Knotenpunktes.

Von

Prof. A. JÄGER, Münster i. Westf.

Mit 1 Textabbildung.

Um Verzeichnungen des menschlichen Auges zu veranschaulichen, wird in der Regel die Darstellungsweise von v. HELMHOLTZ gewählt. Dabei werden 2 Dinge miteinander in Beziehung gesetzt: einmal ein unverzeichnetes Bild auf der Hohlkugel der Retina oder zumindest das, was dem aufnehmenden nervösen Apparat als solches erscheint, und zweitens ein verzeichnetes Bild auf einer zur Blicklinie senkrechten Ebene. Die Ebene ist dabei nur der leichteren Darstellbarkeit wegen gewählt worden, richtiger und klarer verständlich wäre eine hohle Halbkugel. Es wären dann auch keine Überlegungen zur Behebung des sog. Tangentenfehlers erforderlich. Wie aber die Hohlkugel im Dingraum für die zeichnerische Wiedergabe ein Nachteil ist, so ist sie für eine rechnerische oder graphische Behandlung ein Vorteil. Sie kann durch die Winkel erfaßt werden, unter denen ihre Teile vom Krümmungsmittelpunkt aus erscheinen. Geht man auch für die Retina von ihrem Krümmungsmittelpunkt aus, so braucht man nicht zu zeichnen, sondern ein Eintragen der Winkel genügt.

Die Verzeichnung durch die Winkel auszudrücken, hat gegenüber der bildlichen Darstellung noch einen anderen wesentlichen Vorteil: Die figürliche Darstellung kann jeweils nur einen Fall darstellen. Sollen mehrere Beziehungen dargestellt werden, so sind mehrere Einzelbilder nötig, wie sie auch v. TSCHERMAK gibt. Der fließende sprungfreie Übergang zwischen den einzelnen Figuren kann nicht aufgezeigt werden. Demgegenüber gibt die Winkelmessung den Vorteil der Möglichkeit einer graphischen Darstellung. Man kann den Mittelpunkt der Hohlkugel, die den Dingraum darstellen soll, sozusagen längs der optischen Achse des Systems wandern lassen. Die Umsetzung des Dingraums in die geometrisch-optische Umwertung des Auges kann man sich nun in einem Knotenpunkt zusammengefaßt denken. Damit sind die Verhältnisse für beliebig anzunehmende Lage des Knotenpunktes darstellbar.

Die Aufgabe, die Winkel am Knotenpunkt mit den Winkeln am Krümmungsmittelpunkt der Retina in Beziehung zu setzen, kann man sich weiter vereinfachen, wenn man nur feststellen will, ob eine periphere Schrumpfung oder Dehnung stattfindet und wie stark sie ist. Dies wird wohl am leichtesten in der Weise dargestellt, daß man sich um den

hinteren Augenpol 2 äquidistante Kreise im Abstand von 45° gelegt denkt, wobei also der äußere dem Bulbusäquator entspricht. Diese Kreise werden über den Knotenpunkt als Mittelpunkt des hohlkugelförmigen Dingraumes nach außen projiziert und an diesem wieder als Winkel erfaßt. Diese Winkel sind zueinander in Beziehung zu setzen.

Da man für Zwecke der zeichnerischen Darstellung das Auge als axialsymmetrisches Gebilde betrachten kann, genügt für die Darstellung die Hälfte eines Längsschnittes des Bulbus (Abb. 1, untere Hälfte). P_1 und P_2 seien die Durchstoßpunkte der beiden oben genannten Retinalkreise mit der Zeichenebene. Vom Krümmungsmittelpunkt des Auges Sk aus erscheinen sie unter einem Winkelabstand von $R/2$. Vom Knotenpunkt K des Auges als Bezugspunkt der Außenwelthalkugel aus erscheinen die gleichen Abstände unter den Winkeln α und β wobei α dem zentralen, β dem peripheren Abstand auf der Retina entsprechen soll. Ist β größer (kleiner) als α , so entspricht gleichen Abständen auf der Retina eine periphere Dehnung (Schrumpfung) in der Außenwelthalkugel. Diese Beziehung läßt sich natürlich auch umkehren: Nimmt man für die gleiche Lage von K die Größe der beiden Winkel bei K als gleich an, so ergibt dies auf der Retina eine periphere Schrumpfung (Dehnung).

Es sei nun in der oberen Hälfte der Abb. 1 das Winkelverhältnis β/α graphisch dargestellt. Die Lage des Knotenpunktes K ist dabei auf der zur Abszisse gemachten Augenachse nicht im Längenmaß bezeichnet, sondern in Graden des Winkels α , unter dem von ihm aus der Radius des zentralen 45° -Kreises der Retina $P P_1$ erscheint. Es ergibt sich

$$\begin{array}{ll} \text{aus Dreieck } K Sk P_2 & r:n = \text{tg } (\alpha + \beta) \\ \text{aus Dreieck } K Sk P_1 & r:n = \sin \alpha : \sin \gamma \end{array}$$

$$\text{unter Gleichsetzen der Glieder rechts } \text{tg } (\alpha + \beta) = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma}$$

$$\text{weiter } \gamma = 180^\circ - m - \frac{R}{2}$$

$$m = R + \alpha$$

$$\gamma = \frac{R}{2} - \alpha$$

und unter Einsetzen für γ

$$\text{tg } (\alpha + \beta) = \frac{\sin \alpha}{\sin \left(\frac{R}{2} - \alpha \right)}$$

woraus sich zu jedem α das β und das Verhältnis β/α leicht errechnen läßt. Wird als Ordinatenwert nicht das numerische Verhältnis β/α gewählt, sondern der $\log \beta/\alpha$, so kann die Abszisse den Ordinatenwert 0 erhalten. 0 sagt damit, daß keine Zerrung stattfindet. Positive Werte von $\log \beta/\alpha$ entsprechen einer peripheren Schrumpfung im Auge, negative einer peripheren Dehnung.

Wie die Darstellung zeigt, hat die Kurve 2 Schnittpunkte mit der Abszisse und ein Maximum. Die beiden Schnittpunkte entsprechen verzerrungsfreien Lagemöglichkeiten für den Knotenpunkt K . Die eine in SkI ist ohne weiteres klar: Ein Zusammenfallen von Knotenpunkt und Krümmungsmittelpunkt der Retina bedingt Verzerrungsfreiheit. Stellen für diesen Fall α und β Zentralwinkel gleicher Größe im Skleralkreis dar, so findet sich eine 2. Möglichkeit von Winkelgleichheit für die entsprechenden Peripheriewinkel, die allerdings dann nur von halber Größe sind. Dieser Lagepunkt ist als 2. Schnittpunkt der Kurve mit

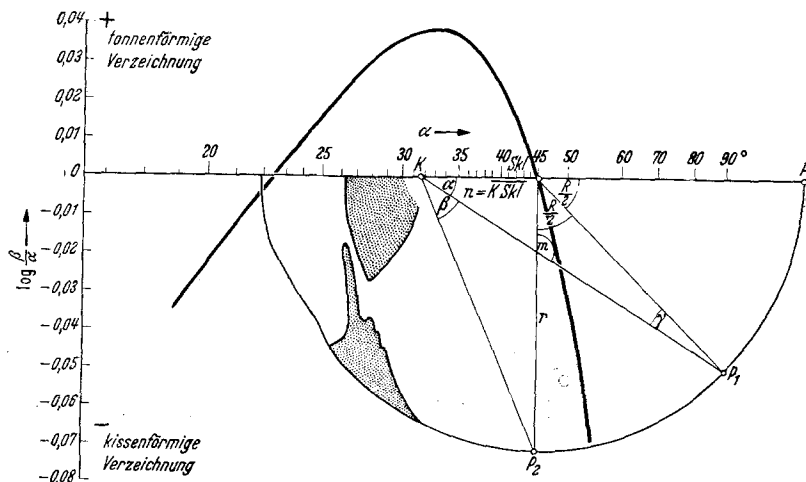


Abb. 1. Periphere Schrumpfung und Dehnung im somatischen Sehfeld als positive und negative Ordinatenwerte bei Annahme eines wandernden Knotenpunktes.

der Abszisse die 2. Möglichkeit einer verzerrungsfreien Abbildung im Auge. Zwischen diesen beiden 0-Punkten liegt der Bereich der peripheren Schrumpfung, links und rechts davon die Bereiche der peripheren Dehnung. Die erstere erreicht ein Maximum etwa entsprechend einem Werte von $\alpha = 32^\circ 40'$.

Es sei nun die Lage dieser Punkte verglichen mit einer schematischen Zeichnung des menschlichen Auges nach den Maßangaben von GULLSTRAND (Abb. 1, untere Hälfte). Ein Blick auf die Zeichnung zeigt, daß die beiden Fälle verzerrungsfreier Abbildung für das menschliche Auge auch nicht annähernd erfüllt sein können. Ganz im Gegenteil: Der Knotenpunkt des menschlichen Auges liegt mit dem Mittelwert von vorderem und hinterem Knotenpunkt etwa 0,55 mm vor dem hinteren Linsenpol und damit hart an der Stelle, an der ihm die größte periphere Schrumpfung anhaften muß. Man wird aber gut tun, darin keine Unzweckmäßigkeit zu sehen, wie denn überhaupt eine ganze Reihe der sog. optischen Fehler des menschlichen Auges ganz vorteilhafte Sonder-

zwecke zu erfüllen scheint. Vielleicht liegt darin ein Vorteil, mittels einer besonders starken peripheren Schrumpfung einen besonders großen Randteil der Außenwelt in eine brauchbare Darstellung zu bringen; erst dadurch wird eine Optik, die eine Weitwinkleistung von bis zu 90° von der Achse hat, völlig ausnutzbar¹. Wie diese Verzeichnung subjektiv verarbeitet wird, das heißt, wie der Krümmungsmittelpunkt durch ein Einteilungszentrum (im Sinne von v. TSCHERMAK) ersetzt wird, soll hier nicht weiter erörtert werden.

Aus der Lage des Knotenpunktes und der Verzeichnung muß sich aber auch durch die Reihe der Wirbeltiere ein Einteilungsprinzip für Augen ergeben. PÜTTER hat seinerzeit eine ältere, von Äußerlichkeiten ausgehende Einteilung etwa in abgeplattete, kugelförmige und verlängerte Augen abgelehnt und wollte an ihrer Stelle das Verhältnis der Achsenlänge des optischen Apparates zur Gesamtachsenlänge des Auges einführen. Für die eben aufgestellten 2 Sonderfälle verzerrungsfreier Abbildung dürfte etwa der eine des Zusammenfallens des Knotenpunktes mit dem Krümmungsmittelpunkt der Sklera erfüllt sein für eine Reihe flacher Fischeaugen, zumal wenn man noch bedenkt, daß die Aufhebung der Hornhautbrechkraft durch das umgebende Wasser bedingt, daß der Knotenpunkt nach hinten rückt. Für eine Erfüllung des anderen Sonderfalles, nämlich der Lage des Knotenpunktes im doppelten Krümmungshalbmesser vor dem hinteren Augenpol wird man aber kaum die sog. Teleskopaugen in Anspruch nehmen können; sie sind in der Regel nur zylindrische Ausschnitte aus kugeligen Augen und haben also zur Erfüllung dieser Bedingung einen zu wenig gekrümmten Augenhintergrund.

Literatur.

HELMHOLTZ, H. v.: Handbuch der physiologischen Optik, 3. Aufl., Bd. 3, S. 150/151. Hamburg u. Leipzig 1910. — PÜTTER, A.: Organologie des Auges. In GRAEFE-SÆMISCHS Handbuch der gesamten Augenheilkunde, 3. Aufl., Teil I, X. Kap., S. 348—373. Leipzig 1910. — TSCHERMAK-SEYSENEGG, A. v.: Optischer Raumsinn. In BETHE-BERGMANN'S Handbuch der normalen und pathologischen Physiologie, Bd. XII, S. 834—1000. Berlin 1931.

¹ Weitere Überlegungen finden sich bei L. GRAF, die Perspektive als Problem der physiologischen Optik. Inaug.-Diss. Münster 1949.