

# PHYSIOLOGIE DES GESICHTSSINNS

VON

PROF. A. FICK IN WÜRZBURG, PROF. W. KÜHNE IN HEIDELBERG

UND

PROF. E. HERING IN PRAG.





# ERSTER THEIL.

## DIOPTRIK. NEBENAPPARATE DES AUGES.

VON  
PROF. A. FICK IN WÜRZBURG.

---

### EINLEITUNG.

Vorbemerkung. Der Verfasser der nachfolgenden beiden Abschnitte ist in der glücklichen Lage, in historischen und literarischen Nachweisen sparsamer als mancher Andere sein zu dürfen. Da erst vor wenigen Jahren die klassische monographische Darstellung der physiologischen Optik von HELMHOLTZ erschienen ist, welche der Literatur und Geschichte dieser Wissenschaft die grösste Sorgfalt widmet, und da jeder, der diesen Theil der Physiologie eingehend studiren will, doch nicht umhin kann, dies Werk zu Rathe zu ziehen, so hat der Verfasser nach Vollständigkeit nur streben zu sollen geglaubt in Angabe der Literatur, welche nach HELMHOLTZ erschienen ist.

---

Aufgabe der physiologischen Optik ist die Erklärung der Thatsache des alltäglichen Lebens, dass uns ein Blick mit gesunden Augen in den Raum hinaus bis zu einem gewissen Grade genaue Kenntniss giebt von der Gestalt und Lage der vor uns gelegenen Körper, sofern von ihrer Oberfläche Lichtstrahlen ausgehen und dass wir zugleich gewisse Unterschiede der Beschaffenheit des von jenen Körpern ausgesandten Lichtes wahrnehmen.

Diese Erscheinung ist offenbar nur dadurch möglich, dass die von den Oberflächen der vor uns gelegenen Körper ausgehenden Lichtstrahlen im Auge, in welches sie eindringen, ein System von Empfindungen derart erregen, dass jedem Theilchen der Oberfläche jener Körper eine besondere im Bewusstsein unterscheidbare Empfindung entspricht und dass die Beschaffenheit der einzelnen Empfindungen in irgend einer Weise abhängt von der Beschaffenheit der sie verursachenden Lichtstrahlen. Hierzu ist vor Allem, wie man leicht sieht, erforderlich, dass die von einem einzelnen Punkte der Oberfläche der vor uns gelegenen Körper ausgesandten Lichtstrahlen, sofern sie überall ins Auge eindringen, daselbst nur ein Nervelement oder wenigstens nur eine eng begrenzte Gruppe von Nervelementen erregt, denn nur auf diese Weise kann jenes System

von unterscheidbaren Empfindungen entstehen, deren jede als Zeichen für einen bestimmten Punkt der vor uns liegenden Körperoberflächen dienen kann. Es ist also, wenn anders der Sehakt erklärlich sein soll, nothwendig erstens dass irgendwo im Auge eine mosaikartige Ausbreitung von Nervenenden zu finden ist, deren jede mit einem Anhangsgebilde versehen ist, in welchem auffallendes Licht eine Arbeit leistet, die als Reiz für das Nervenende dienen kann. Zweitens muss vor dieser Nervenausbreitung ein Apparat liegen, welcher für Lichtstrahlen durchlässig und so beschaffen ist, dass die von einem Punkte ausserhalb in dasselbe eindringenden Lichtstrahlen auf einen möglichst eng begrenzten Theil des Nervenmosaiks concentrirt werden. Wenn diese beiden Bedingungen erfüllt sind, so ist offenbar der Sehakt, wie wir ihn täglich wirklich vollziehen physiologisch erklärlich, denn es wird alsdann jeder Punkt der Oberfläche eines vor uns liegenden Körpers durch die von ihm ausgehenden Lichtstrahlen nur ein oder nur wenige Nervenelemente erregen und mithin eine von Anderen unterscheidbare Empfindung veranlassen.

Die Physiologie des Gesichtssinnes wird demnach vor Allem zu untersuchen haben, unter welchen Umständen die von allen möglichen Punkten des Raumes in ein System durchsichtiger Körper eindringenden Lichtstrahlen in diesem so geordnet werden, dass allemal die von einem Punkte ausserhalb ausgegangenen Strahlen wieder in einem Punkte einer innerhalb des Systemes gelegenen Fläche vereinigt werden. Den Inbegriff der Vereinigungspunkte aller der Strahlenbündel welche von den einzelnen Punkten der Oberfläche eines Gegenstands ausgegangen sind nennt man bekanntlich das optische „Bild“ des Gegenstandes. Man kann daher die soeben aufgeworfene Frage auch so aussprechen: unter welchen Umständen entsteht von den vor einem System durchsichtiger Körper gelegenen leuchtenden Punkten auf einer innerhalb des Systemes gelegenen Fläche ein „optisches Bild“?

Die Dioptrik lehrt dass ein sogenanntes centrirtes System sphärischer Trennungsflächen zwischen einer Reihe durchsichtiger Medien von jedem in einer zur Axe senkrechten Ebene ausgebreiteten Gegenstande unter gewissen Bedingungen ein optisches Bild erzeugt, das gleichfalls in einer zur Axe senkrechten Ebene liegt, und es lässt sich für ein bekanntes System dieser Art die Lage und Gestalt des Bildes nach sehr einfachen Regeln finden, wenn die Lage und Gestalt des Gegenstandes gegeben ist. Da wir später von diesen Lehren den ausgedehntesten Gebrauch werden zu machen haben, so sollen dieselben zunächst elementar entwickelt werden.

---



## ERSTES CAPITEL.

## Gang der Lichtstrahlen durch ein centrirtes System sphärischer Trennungsflächen.

## I. Brechung von Strahlenbündeln durch eine einzige sphärische Trennungsfläche.

Wir stellen uns zwei durchsichtige Stoffe etwa Luft und Glas vor, welche von einander getrennt sind durch einen Abschnitt einer um den Punkt  $C$  beschriebenen Kugeloberfläche. Auf sie lassen wir jetzt im ersten Medium einen ganz beliebigen Lichtstrahl fallen und legen durch seine Richtung und den Mittelpunkt der Kugel eine Ebene, welche die „Einfallsebene“ im Sinne der Optik sein wird. In ihr konstruiren wir die Zeichnung Fig. 1 auf welcher  $C$  der Mittelpunkt  $Px$  der Strahl  $x$  der Einfallspunkt und mithin  $Cx$  resp. ihre Ver-

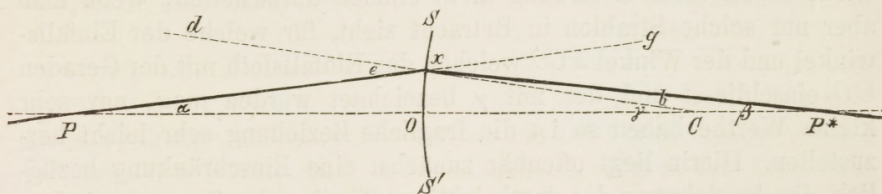


Fig. 1

längerung  $xa$  das Einfallslot, endlich  $SS'$  der Kreisbogen ist, in welchem der Kugelabschnitt die Ebene schneidet. Wir ziehen nun in der Ebene durch  $C$  und einen willkürlich gewählten Punkt  $O$  des Kreisbogens  $SS'$  eine gerade  $CO$  welche verlängert den Strahl im Punkte  $P$  schneiden mag. Am Punkte  $x$  angekommen wird der Strahl  $Px$  bekanntlich zum Theil reflektirt zum Theil dringt er in das zweite Medium ein. Der reflektirte Theil des Strahles hat hier für uns kein Interesse. Wir verfolgen bloss den Gang des ins zweite Medium eintretenden, des sogenannten gebrochenen Strahles. Dieser Gang ist bekanntlich nach dem ersten Grundgesetze der Brechung in einfach brechenden Medien jedenfalls in der Einfallsebene d. h. also im vorliegenden Falle in der Ebene der Zeichnung enthalten und er bildet mit dem einwärts gerichteten Theile des Einfallslotes  $xC$  einen Winkel  $b$ , dessen Sinus zum Sinus des Einfallswinkels  $d\alpha P$  oder  $e$  in einem für ein be-

stimmtes Paar brechender Medien konstantem Verhältniss steht und zwar ist dies Verhältniss

$$\frac{\sin e}{\sin b}$$

für den beispielsweise gewählten Uebergang des Lichtes aus Luft in Glas grösser als 1. Der gebrochene Strahl schliesst also mit dem nach innen gerichteten Theile des Einfallslotthes einen kleineren Winkel ein als die Verlängerung des einfallenden Strahles  $xg$ . Da die Richtung des gebrochenen Strahles wie gesagt sicher in der Ebene der Zeichnung als der Einfallsebene zu finden ist, so muss sie auch die darin befindliche Linie  $OC$  schneiden. Der Durchschnittspunkt kann übrigens ebensowohl auf dem physisch vorhandenen Strahle rechts von  $x$  liegen als auf der rückwärts nach links zu denkenden Verlängerung der Richtung des gebrochenen Strahles. Wir wollen beispielsweise annehmen der Schnittpunkt läge in  $P^*$  rechts von  $x$ , was in unserem Falle wohl möglich ist, da der Winkel  $b$  kleiner ist als der Scheitelwinkel von  $e$ . Es soll nun eine Beziehung zwischen den Strecken  $OP$  und  $OP^*$  gesucht werden. Wenn die Richtung des einfallenden Strahles gar keiner Beschränkung unterworfen wird, so ist diese Beziehung nicht einfach darzustellen, wenn man aber nur solche Strahlen in Betracht zieht, für welche der Einfallswinkel und der Winkel  $xCO$  welchen das Einfallslotth mit der Geraden  $CO$  einschliesst und der mit  $\gamma$  bezeichnet werden mag, nur sehr kleine Werthe haben so ist die fragliche Beziehung sehr leicht herzustellen. Hierin liegt offenbar zunächst eine Einschränkung bezüglich der Ausdehnung des durchsichtigen Theiles der Grenze zwischen den beiden Medien es muss nämlich derselbe ein Kugelabschnitt sein, der nur einen kleinen Bruchtheil der ganzen Kugeloberfläche ausmacht, denn sonst würde man für jeden beliebigen einfallenden Strahl die Linie  $CO$  durch einen Punkt  $O$  des Abschnittes so legen können, dass der Centriwinkel  $xCO$  gross wäre. Zweitens dürfen aber auch, selbst wenn der durchsichtige Kugelabschnitt noch so klein angenommen ist, keine sehr schräg einfallende Strahlen in Betracht gezogen werden.

Werden nun in der That für die Winkel  $e$  und  $\gamma$  nur sehr kleine Werthe zugelassen und ist mithin auch der Winkel  $b$  jedesfalls sehr klein, so kann man ohne erheblichen Fehler für die Sinus dieser Winkel die Winkel selbst in Rechnung bringen und wenn man das konstante Verhältniss

$$\frac{\sin e}{\sin b} = n \text{ setzt, ergibt sich } \frac{e}{b} = n \text{ oder } e = nb.$$



Es ist aber ferner bei der Kleinheit des Winkels  $xCO$  erlaubt den Bogen  $xO$  als eine auf  $OC$  senkrechte gerade Linie anzusehen. Es ist also wenn man den Winkel  $xPO$  mit  $\alpha$  und  $xP^*O$  mit  $\beta$  sowie den Radius der Kugel  $OC$  mit  $r$  bezeichnet sehr annähernd

$$tg\alpha = \frac{Ox}{OP}; tg\beta = \frac{Ox}{OP^*} \text{ und } tg\gamma = \frac{Ox}{OC} = \frac{Ox}{r}$$

und da bei kleinen Winkeln die trigonometrische Tangente, so wie der Sinus, dem Winkel selbst in Bogenmaass ausgedrückt gleich ist so hat man

$$\alpha = \frac{Ox}{OP}; \beta = \frac{Ox}{OP^*} \text{ und } \gamma = \frac{Ox}{OC}.$$

Nun ist als Aussenwinkel des Dreieckes  $PxC$  der Winkel  $e$  oder  $nb = \alpha + \gamma$  der Summe der beiden inneren gegenüberliegenden und aus demselben Grunde  $\gamma = b + \beta$  oder  $b = \gamma - \beta$ . Einsetzen dieses Werthes in erstere Gleichung ergiebt  $n(\gamma - \beta) = \alpha + \gamma$  oder  $(n - 1)\gamma = \alpha + n\beta$ . Setzt man hier für die Winkel ihre oben gefundenen Werthe so hat man

$$\frac{(n - 1) Ox}{OC} = \frac{Ox}{OP} + \frac{n \cdot Ox}{OP^*}$$

oder wenn man durch  $Ox$  beide Seiten der Gleichung dividirt

$$\frac{n - 1}{OC} = \frac{1}{OP} + \frac{n}{OP^*}, \text{ oder } OP^* = \frac{n}{\frac{n - 1}{OC} - \frac{1}{OP}}$$

Hieraus erhellt sofort dass die Entfernung  $OP^*$  unabhängig ist von der Lage des Punktes  $x$  wo der einfallende Strahl die brechende Fläche trifft und ausser vom Brechungsindex  $n$  und dem Radius  $OC$  nur abhängt von  $OP$ . D. h. mit anderen Worten, wenn man durch einen willkürlich gewählten Radius  $OC$  der brechenden Fläche eine Ebene legt und in dieser Ebene einen Strahl auf die Fläche fallen lässt, so besteht zwischen den in der Richtung jenes Radius gemessenen Entfernungen seines Schnittpunktes mit dem einfallenden und dem gebrochenen Strahle vom Punkte  $O$  nämlich  $OP$  und  $OP^*$  eine Beziehung, welche von dem Einfallspunkte unabhängig ist. Wenn also mehrere einfallende Strahlen die Richtung des Radius  $OC$  in demselben Punkte  $P$  schneiden so schneiden die entsprechenden gebrochenen Strahlen jene Richtung gleichfalls in demselben Punkte  $P^*$ . Dies gilt aber von den durch  $P$  gehenden Strahlen in jeder durch  $CO$  oder  $CP$  gelegten Ebene also von allen Strahlen, die überhaupt von  $P$  ausgehend auf die Fläche fallen können.

Dieser Hauptsatz der Dioptrik lässt sich sehr zweckmässig noch anders ausdrücken wenn man zuvor einige kurze Bezeichnungen ein-



führt. Ein System von Lichtstrahlen, deren Richtungen sich alle in einem Punkte schneiden, heisse ein „homocentrisches Strahlenbündel“ und der gemeinsame Schnittpunkt dieser Richtungen heisse das Centrum. Das Centrum soll für ein einfallendes homocentrisches Bündel als „reell“ bezeichnet werden, wenn es von der brechenden Fläche aus gerechnet auf der Seite liegt von woher die Strahlen kommen, denn in diesem Falle kann das Centrum des einfallenden Bündels ein wirklicher Ausgangspunkt von Lichtstrahlen sein. Liegt der Durchschnittpunkt der Richtungen der einfallenden Strahlen von der brechenden Fläche nach der Seite, wohin die Strahlen gehen, so werde es als „virtuell“ bezeichnet, da er in diesem Falle nur der Durchschnittpunkt der verlängerten Strahlenrichtungen ist, welchen die physischen Strahlen, da sie durch die Brechung abgelenkt werden, nie wirklich erreichen. Um den Ausdruck abzukürzen soll künftig immer die Seite, woher die Strahlen kommen, als „vorn“, die Seite, wohin sie gehen, als hinten bezeichnet werden. Handelt es sich um ein homocentrisches Bündel gebrochener Strahlen, so mnss man umgekehrt das Centrum als „reell“ bezeichnen, wenn es von der brechenden Fläche aus nach hinten liegt, denn in diesem Falle können die Strahlen sich im Centrum wirklich vereinigen. Als „virtuell“ ist das Centrum eines gebrochenen Strahlenbündels im Falle zu bezeichnen, wo er vor der Trennungsfläche liegt, denn es ist hier nur der geometrische Vereinigungspunkt der über die Einfallspunkte hinaus verlängerten Strahlenrichtungen, aus welchem sie nicht wirklich gekommen sind, da sie vor der Brechung andere Richtungen hatten.

Unter Anwendung dieser Bezeichnungen können wir den oben abgeleiteten Satz kurz dahin ausdrücken, ein auf den durchsichtigen Kugelabschnitt fallendes homocentrisches Strahlenbündel wird in ein homocentrisches gebrochenes verwandelt und es liegt das Centrum des letzteren auf einer durch das Centrum des einfallenden und den Mittelpunkt der Kugelfläche gezogenen Geraden in einer Entfernung  $OP^*$  von der Trennungsfläche, welche zur Entfernung des Centrums der einfallenden Strahlen von der Fläche ( $OP$ ) in einer einfachen Beziehung steht die durch die obige Gleichung

$$\frac{n-1}{OC} = \frac{1}{OP} + \frac{n}{OP^*}$$

dargestellt wird. Dieser Satz gilt jedoch nur unter der oben ausdrücklich gesetzten Bedingung, dass alle einfallende Strahlen mit ihren respectiven Einfallsloten nur kleine Winkel bilden und dass auch die Centriwinkel, welche die Einfallslothe mit der durch das

Centrum des einfallenden Bündels und den Mittelpunkt der Kugel gezogenen Geraden ( $CP$ ) bilden, nur klein sind. Man muss also, um dies noch einmal hervorzuheben, sich stets einen sehr kleinen Bruchtheil der gesammten Kugeloberfläche als brechende Fläche verwendet denken und man darf nur solche homocentrische einfallende Bündel in Betracht ziehen, deren Centra einerseits um ein ziemlich grosses Vielfaches der grössten Sehne  $SS^1$  des durchsichtigen Kugelabschnittes von demselben abstehen und andererseits nicht weit seitwärts liegen von der Richtung eines beliebigen, durch einen Punkt der durchsichtigen Oberfläche gezogenen Kugelradius.

Die Centra eines einfallenden und eines gebrochenen Strahlenbündels in ihrer durch den bewiesenen Satz festgestellten Correlation nennt man „Objektpunkt“ und „Bildpunkt“, auf welche Bezeichnungen auch die Bestimmungen reell und virtuell in ihrer oben erklärten Bedeutung Anwendung finden. Man kann also auch sagen: Durch Brechung an einer sphärischen Trennungsfläche zwischen zwei ungleichartigen durchsichtigen Mitteln entsteht immer unter Voraussetzung jener einschränkenden Bedingungen für jeden (reellen oder virtuellen) Objektpunkt ein (reeller oder virtueller) Bildpunkt. Objektpunkt und Bildpunkt liegen stets mit dem Kugelmittelpunkt auf einer Geraden. Diese Gerade sofern sie durch die Lage des Objektpunktes schon gegeben ist heisse die Centrallinie desselben.

Wir wollen künftig immer die in der Centrallinie gemessene Entfernung eines Objektpunktes von der brechenden Fläche durch  $p$  und die in derselben Linie gemessene Entfernung des Bildpunktes mit  $p^*$  bezeichnen. Sofern der Schnittpunkt der Centrallinie mit dem brechenden Kugelabschnitte für die Messung beider Grössenarten den Ausgangspunkt bildet und wir die Objektabstände nach vorn, die Bildabstände nach hinten positiv rechnen entspricht zufolge der obigen Verabredungen ein positiver Werth von  $p$  einem reellen Objektpunkt ein negativer einem virtuellen und ebenso entspricht einem positiven Werthe von  $p^*$  ein reeller Bildpunkt einem negativen ein virtueller. Diese Feststellungen schliessen noch die mit ein, dass der durch  $r$  zu bezeichnende Kugelradius als positive Grösse in die Formel eingesetzt werden muss wenn der Mittelpunkt auf der Seite des zweiten Mediums von der Trennungsfläche liegt, d. h. wenn diese dem ersten Medium ihre konvexe Seite zukehrt im andern Falle ist die Grösse  $r$  als negative einzuführen. Mit Anwendung dieser Bezeichnungen lautet die Grundgleichung

$$\frac{n-1}{r} = \frac{1}{p} + \frac{n}{p^*} \dots\dots\dots (1)$$



Da hiernach der Werth von  $p^*$  nur von  $p$  ausser von den Konstanten des Medienpaares abhängt, so entspricht einem System von Objektpunkten, die in gleicher Entfernung von dem brechenden Kugelabschnitte d. h. auf einer dazu konzentrischen Kugelschale liegen, ein System von Bildpunkten, welche gleichfalls sämmtlich gleiche Entfernung vom brechenden Kugelabschnitte haben also gleichfalls auf einer zu ihm konzentrischen Kugelschale liegen. Es liegen auch je zwei entsprechende Objekt- und Bildpunkte auf derselben Centrale oder anders ausgedrückt: Die sämmtlichen Verbindungslinien der Objektpunkte mit ihren entsprechenden Bildpunkten schneiden sich im Mittelpunkte der Kugel, von welcher die brechende Fläche ein Abschnitt ist. Ein System von Objektpunkten nennt man überhaupt ein „Objekt“ und das zugehörige System von Bildpunkten sein „Bild“. Liegt also ein Objekt auf einer zur brechenden Fläche konzentrischen Kugelschale so liegt auch sein Bild ganz auf einer eben solchen. Auch sieht man ohne Weiteres dass das Bild und Objekt einander geometrisch ähnlich sind und dass sie zueinander perspektivisch liegen bezüglich zum Mittelpunkt der Kugel. Unter perspektivischer Lage zueinander versteht man diejenige Lage zweier räumlicher Gebilde zu einander bei welcher die sämmtlichen Verbindungslinien zweier entsprechender Punkte der beiden Gebilde sich in einem und demselben Punkte schneiden. Selbstverständlich hat die Möglichkeit zwei räumliche Gebilde in perspektivische Lage zu einander zu bringen gewisse Eigenschaften der beiden Gebilde zur Voraussetzung. Beiläufig gesagt gilt der Satz dass Bild und Objekt zu einander perspektivisch liegen unabhängig von der Bedingung dass sie auf konzentrischen Kugelschalen liegen. Dagegen hat die geometrische Aehnlichkeit nur unter dieser Bedingung statt.

Gemäss den immer erfüllt zu denkenden einschränkenden Bedingungen kann der brechende Kugelabschnitt nach allen Seiten nur sehr kleine Centriwinkel umspannen und weicht also nur wenig von einem Stück einer ihn berührenden Ebene ab. Ebenso können aber auch die ein Objekt und das Bild enthaltenden Stücke konzentrischer Kugelschalen nur sehr kleine Abschnitte der ganzen Kugel sein und mithin ebenfalls annäherungsweise als Stücke von Ebenen betrachtet werden, welche der als eben betrachteten Trennungsfläche parallel sind. Gestatten wir uns diese Vereinfachung, so spricht sich unser Satz dahin aus, dass von einem Objekt, das in einem zur Trennungsfläche parallelen ebenen Flächenstück ausgebreitet ist, durch Brechung ein optisches Bild entsteht, das gleichfalls in einem zur Tren-

nungsfläche parallelen ebenen Flächenstücke ausgebreitet ist. Bild und Object sind geometrisch ähnliche ebene Punktsysteme und entsprechende lineare Abmessungen beider verhalten sich offenbar wegen der perspektivischen Beziehung zum Centrum der Kugel wie die Abstände der Objektebene und der Bildebene von diesem Centrum oder gemäss der oben eingeführten Bezeichnungsweise wie  $p + r$  zu  $p^* - r$ .

Betrachten wir jetzt den besonderen Fall wo ein Objektpunkt in unendlicher Ferne liegt, wo also das von ihm ausgesandte Strahlenbündel aus lauter parallelen Strahlen besteht, so können wir den Abstand des Bildpunktes leicht berechnen, wenn wir für  $p$  den Werth  $\infty$  in unsere Formel (1) einsetzen. Sie wird dadurch

$$\frac{n-1}{r} = \frac{1}{\infty} + \frac{n}{p^*},$$

woraus sich für  $p^*$  der besondere Werth

$$\frac{nr}{n-1}$$

berechnet den wir mit  $f^*$  bezeichnen und die „zweite Hauptbrennweite“ des Medienpaares nennen wollen. Denken wir in dieser bestimmten Entfernung

$$\frac{nr}{n-1}$$

oder  $f^*$  von der Trennungsfläche ein zu ihr paralleles ebenes Flächenstück, so muss in ihm jedes Bild eines unendlich entfernten Objectes was den sonstigen Bedingungen entspricht zu finden sein. Wir nennen diese Ebene die „zweite Hauptbrennebene“.

Fragen wir zweitens: Wie weit von der Fläche muss ein Objektpunkt abstehen, wenn ein von ihm ausgegangenes Strahlenbündel durch die Brechung in ein parallelstrahliges verwandelt werden soll, dessen Vereinigungspunkt also erst in unendlicher Ferne gefunden wird? Diese Aufgabe sucht einen Werth von  $p$  welchem ein unendlich grosser Werth von  $p^*$  entspricht. Man hat also nur in die Grundformel für  $p^*$  den Werth  $\infty$  einzusetzen und dann  $p$  zu berechnen. Es ergibt sich aber aus

$$\frac{n-1}{r} = \frac{1}{p} + \frac{n}{\infty} p = \frac{r}{n-1}.$$

Diesen Werth von  $p$  wollen wir die „erste Hauptbrennweite“ nennen und durch  $f$  bezeichnen. Legt man demnach in diese Entfernung  $f$  von der Trennungsfläche ein ihr paralleles ebenes Flächenstück so hat man den geometrischen Ort aller Objektpunkte, deren Bildpunkte in unendliche Entfernung fallen, diese Ebene hiesse die



erste Hauptbrennebene. Es ist für ein Medienpaar vor Allem charakteristisch ob seine Hauptbrennweiten positiv oder negativ sind. Das erstere ist offenbar der Fall wenn  $n > 1$  und  $r$  positiv ist oder wenn  $n < 1$  und zugleich  $r$  negativ ist, d. h. nach den obigen Festsetzungen stets dann, wenn die Trennungsfläche ihre konvexe Seite dem schwächer brechenden Medium zukehrt, mag man dies als erstes oder als zweites Medium nehmen. Im andern Falle sind  $f$  und  $f^*$  negativ. Im ersten Falle entsteht von einem unendlich fernen Objekte in der Entfernung  $f^*$  hinter der Trennungsfläche ein reelles Bild im zweiten Falle werden parallelstrahlige auffallende Bündel in divergirende verwandelt deren Richtungen sich nur geometrisch rückwärts verlängert in je einem Punkte schneiden in einer Entfernung  $f^*$  von der Trennungsfläche, welcher ein negativer Werth zukommt. Ein Mediensystem mit positiven Brennweiten heisst ein „kollektives“ eines mit negativen Brennweiten ein „dispansives“.

Durch Einführung der Grössen  $f$  und  $f^*$  kann man der Grundformel eine neue Gestalt geben, die im weiteren Verlaufe der Untersuchung zur Anwendung bequemer ist als die ursprüngliche. In der That haben wir gesehen dass

$$f = \frac{r}{n-1} \quad \text{oder} \quad \frac{1}{f} = \frac{n-1}{r}$$

ist und ferner dass

$$f^* = \frac{nr}{n-1} = nf, \quad \text{also} \quad n = \frac{f^*}{f}$$

ist wenn wir also in die Formel

$$\frac{n-1}{r} = \frac{1}{p} + \frac{n}{p^*} \quad \text{für} \quad \frac{n-1}{r}$$

und  $n$  ihre in  $f$  und  $f^*$  ausgedrückten Werthe einsetzen, so ergibt sich

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{f^*:f}{p^*} \quad \text{oder} \quad 1 = \frac{f}{p} + \frac{f^*}{p^*} \dots\dots\dots (2)$$

Kennt man also für ein durch einen Kugelabschnitt getrenntes Medienpaar die beiden Hauptbrennweiten, welche sich leicht empirisch ermitteln lassen, so kann man ohne das Brechungsverhältniss und den Radius in Rechnung zu ziehen für jeden Objektstand  $p$  den Bildabstand  $p^*$  berechnen.

Für ein kollektives System (wo  $f$  und  $f^*$  positive Werthe haben) ergibt die Formel, dass jedem reellen Objekte dessen Abstand  $p > f$  ist ein reelles Bild entspricht dessen Abstand  $p^* > f^*$  ist. Man kann ferner noch folgenden Satz aus der Formel leicht herauslesen: Wenn man einen reellen Objektpunkt mit konstanter Geschwindigkeit auf einer beliebigen Centrallinie aus sehr grosser Ferne gegen die



erste Brennebene heranrücken lässt so bewegt sich der Bildpunkt auf derselben Centrallinie von der zweiten Hauptbrennebene aus in der Richtung der Strahlen anfangs nur sehr langsam und dann immer schneller bis er zuletzt mit unendlich grosser Geschwindigkeit die unendliche Ferne erreicht, wenn der Objektpunkt in die erste Brennebene eintritt. Lässt man den reellen Objektpunkt über die erste Brennebene hinaus nach der Fläche wandern (wo dann  $p < f$  ist) so taucht der Bildpunkt aus der unendlichen Ferne in der Richtung von woher die Strahlen kommen nunmehr virtuell geworden wieder auf und eilt als solcher dem reellen Objektpunkte nach, den er gerade erreicht, wenn dieser in die Trennungsfläche selbst eintritt. Will man den Objektpunkt in derselben Richtung über die Trennungsfläche hinaus noch weiter wandern lassen, so hat man es nunmehr mit einem virtuellen Objektpunkte d. h. mit dem Centrum eines konvergent auffallenden Strahlenbündels zu thun ( $p$  ist negativ zu nehmen). Der Objektpunkt wird jetzt wieder reell ( $p^*$  positiv). Er bewegt sich anfangs noch mit grösserer dann aber abnehmender Geschwindigkeit vor dem immer virtuellen Objektpunkt her, von dem er im Centrum der Kugel eingeholt wird. Bei noch weiterem Vorrücken des virtuellen Objektpunktes geht der reelle Bildpunkt mit immer abnehmender Geschwindigkeit hinter ihm her und trifft gerade wieder in der zweiten Brennebene ein, wenn der virtuelle Objektpunkt in unendliche Ferne hinausgerückt ist, was ja in der That so viel heisst, als dass wir wieder wie zuerst ein parallelstrahlig einfallendes Bündel haben. Es giebt also auf jeder Centrallinie eines Medienpaares zwei Punkte wo Objektpunkt und Bildpunkt zusammenfallen nämlich das Centrum und der Schnittpunkt der Centrale mit der Trennungsfläche.

## II. Brechung von Strahlenbündeln durch mehrere Trennungsflächen.<sup>1</sup>

Wir wollen uns nun ein System von beliebig vielen brechenden Medien vorstellen. Jedes folgende sei vom vorhergehenden getrennt durch einen Kugelabschnitt, welcher nur einen sehr kleinen Bruchtheil der gesammten Kugeloberfläche ausmacht. Die sämmtlichen Centra dieser Kugeloberflächen sollen auf einer geraden Linie liegen, welche die Axe des Systems heissen mag. Endlich setzen wir noch fest, dass die wirklich durchsichtigen Theile der Kugelabschnitte in

<sup>1</sup> Die Darstellung dieses ganzen Paragraphen hält sich an den Gedankengang, der zuerst von C. NEUMANN entwickelt ist, in einer Abhandlung über „Die Haupt- und Brennpunkte eines Linsensystemes“. Leipzig 1866.

ihren Mitten oder „Scheiteln“ von der Axe durchsetzt werden, so dass jeder Kugelabschnitt nahezu gelten kann als ein Stück einer zur Axe senkrechten Ebene. Ein solches System haben wir schon in der Einleitung als ein „centrirtes“ System sphärischer Trennungsflächen zwischen einer Reihe von brechenden Medien bezeichnet.

Stellen wir uns nun im ersten Medium ein einfallendes d. h. auf die erste Trennungsfläche zugehendes homocentrisches Strahlenbündel vor dessen Centrum in einigem Abstände von der ersten Fläche und nicht weit seitwärts von der Axe liegt, so entspricht dasselbe den Bedingungen, welche zur Anwendung der soeben entwickelten Gesetze auf die erste Brechung die es erleiden wird genügen. Nehmen wir also ein ganzes System solcher Strahlenbündel an, deren Centra alle in einer zur Axe senkrechten Ebene liegen, so wird durch die erste Brechung ein System von Strahlenbündeln entstehen deren Centra ebenfalls in einer zur Axe senkrechten Ebene liegen. Kurz ausgedrückt wird die erste Brechung von einem ebenen zur Axe senkrechten Objekte ein (reelles oder virtuelles) Bild erzeugen. Auch werden Objekt und Bild zueinander perspektivisch sein bezüglich zu einem in der Axe gelegenen Punkte nämlich zum Centrum der ersten Fläche. Dies Bild d. h. das System der Centra der im zweiten Medium sich fortpflanzenden Strahlenbündel kann man aber offenbar auffassen als (reelles oder virtuelles) Objekt für die zweite Brechung, welche die Strahlen beim Uebergange aus dem zweiten ins dritte Medium erleiden. Da das für den neuen Standpunkt als Objekt zu behandelnde Bild unter den gemachten Voraussetzungen auch den Bedingungen entsprechen muss, welche die Anwendung der obigen Regeln auf die zweite Brechung gestatten so wird durch die zweite Brechung abermals ein Bild entstehen, dessen Punkte in einer zur Axe senkrechten Ebene liegen und das perspektivisch zum Objekte also zum ersten Bilde ist bezüglich zu einem ebenfalls in der Axe gelegenen Punkte nämlich zum Centrum der zweiten Fläche. Es gilt nun folgender Satz der so leicht einzusehen ist, dass der Beweis nicht ausgeführt zu werden braucht: wenn von drei Punktsystemen *A, B, C* welche in drei einander parallelen Ebenen liegen das erste und das dritte zum zweiten perspektivisch sind bezüglich zu zwei Punkten, welche beide in ein und derselben zu den drei Ebenen senkrechten Geraden liegen dann ist auch das zweite zum ersten perspektivisch gelegen bezüglich auf einen in derselben Geraden gelegenen Punkt. Es ist also das durch die zweite Brechung erzeugte Bild zum ursprünglichen Objekte perspektivisch gelegen bezüglich auf einen in der Axe befindlichen Punkt. Durch weitere Anwen-



dung desselben Satzes auf die folgenden Brechungen kommen wir zu dem Schlusse: das Ergebniss der sämtlichen aufeinanderfolgenden Brechungen so viele ihrer auch stattfinden mögen, ist ein Bild dessen Punkte in einer zur Axe senkrechten Ebene liegen und welches perspektivisch liegt zum ursprünglichen Objekte und da auch dies in einer zur Axe senkrechten Ebene liegt sind das letzte Bild und das ursprüngliche Objekt auch geometrisch ähnlich. Schon nach diesem Resultate kann man den Begriff der Hauptbrennebenen auf das System beliebig vieler brechenden Medien übertragen. Man kann nämlich als zweite Hauptbrennebene diejenige zur Axe senkrechte Ebene definiren, welche das Bild eines unendlich fernen Objektes enthält und als erste Hauptbrennebene diejenige, in welcher das Objekt liegen muss, wenn das schliessliche Bild in unendlicher Entfernung liegen soll. Die Schnittpunkte dieser beiden Ebenen mit der Axe sollen die Hauptbrennpunkte heissen und durch  $F^*$  und  $F$  bezeichnet werden. Wir schliessen den Fall wo  $F$  und  $F^*$  in unendlicher Ferne liegen, von den folgenden Betrachtungen aus. Wir können auch sogleich noch den Satz aussprechen, dass das Bild jedes in der Axe gelegenen Objektpunktes ebenfalls in der Axe liegen muss, denn der mit der Axe zusammenfallende Strahl eines solchen einfallenden Bündels geht ohne Aenderung der Richtung durch das ganze System da er auf alle Flächen senkrecht trifft, einer der gebrochenen Strahlen fällt also mit der Axe zusammen und auf ihr muss der Bildpunkt liegen, da er ja auf jedem der gebrochenen Strahlen liegt.

Es soll jetzt bewiesen werden, dass in dem System, mag es sonst beschaffen sein wie es wolle, wenn es nur den vorhin ausgesprochenen Bedingungen genügt, zwei zur Axe senkrechte Ebenen existiren deren erster als Objektebene, die zweite als Bildebene so entspricht, dass zu einem in der ersten beliebig angenommenen Objektpunkte ein Bildpunkt gehört, der in der zweiten Ebene und mit dem Objektpunkt auf derselben zur Axe parallelen Geraden liegt, dass die beiden Punkte sich in derselben durch die Axe gelegten Ebene finden müssen versteht sich von selbst, weil es von jedem als Objekt und Bild zusammengehörigen Paare von Punkten wegen der allgemeinen perspektivischen Beziehung gilt.

Zum Zwecke des Beweises der Existenz zweier solcher Ebenen stellen wir uns vor es sei  $AA_1$  (Fig. 2) die Axe des Systemes und die Kreisbogen  $S_1 S_1$ ,  $S_2 S_2$ ,  $S_3 S_3$  seien die Schnitte der brechenden Flächen mit der Ebene der Zeichnung, deren Zahl natürlich auch grösser als 3 gedacht werden darf. Das erste Medium haben wir uns also links von  $S_1 S_1$  zu denken das letzte (hier das 4.)

rechts von  $S_3 S_3$ . Die Punkte  $F$  und  $F^*$  seien der erste und zweite Brennpunkt des Systemes. Wir denken uns nun einen einfallenden Strahl  $Px$  parallel zur Axe. Diesem muss als gebrochener im letzten Medium ein Strahl entsprechen, dessen Richtung nothwendig durch den Brennpunkt  $F^*$  geht, da der Strahl  $Px$  betrachtet werden kann

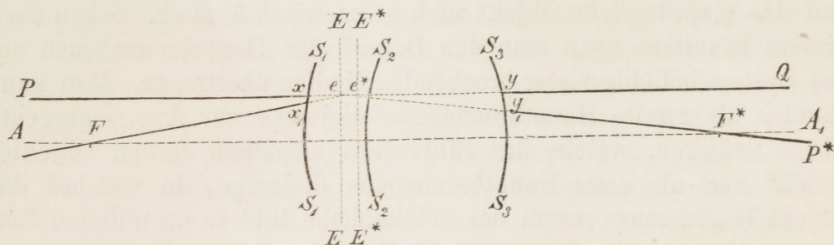


Fig. 2.

als Bestandtheil eines Bündels, das von einem in der Axe unendlich weit abstehenden Punkte ausgegangen ist, und dessen Bild folglich  $F^*$  ist. Ferner liegt der gebrochene Strahl nothwendig mit dem einfallenden und mit der Axe in einer Ebene, d. h. in der Ebene der Zeichnung, die für die sämtlichen vorkommenden Brechungen „Einfallssebene“ ist. Die Richtung dieses Strahles muss demnach die Richtung des einfallenden Strahles nothwendig irgendwo im Endlichen also etwa im Punkte  $e^*$  schneiden, da wir den Fall ausdrücklich ausgeschlossen haben, wo das System die Besonderheit hätte, dass einem parallelstrahligen einfallenden Bündel ein parallelstrahliges im letzten Medium entspräche.

Wir denken uns nun zweitens die fortgesetzte Richtung des einfallenden Strahles  $Px$  von der letzten Fläche an als einen physischen gebrochenen Strahl  $yQ$  und sehen sogleich, dass diesem als einfallender Strahl einer entsprechen muss, der durch den Punkt  $F$  geht und der ebenfalls in der Ebene der Zeichnung liegt, da der angenommene gebrochene Strahl  $yQ$  Bestandtheil eines nach einem unendlich fernen Bildpunkt in der Axe konvergirenden Bündels sein könnte, welcher dem Punkt  $F$  als Objektpunkt entsprechen würde. Der zu  $yQ$  gehörige einfallende Strahl muss aber aus den schon ausgeführten Gründen die Richtung  $yQ$  resp.  $PQ$  im Endlichen treffen, der Schnittpunkt sei beispielsweise  $e$ . Es kann also nicht bezweifelt werden, dass auf irgend einer zur Axe parallelen Richtung  $PQ$  zwei Punkte  $e$  und  $e^*$  zu finden seien von denen der eine  $e$  Durchschnittspunkt zweier einfallender Strahlen ist und von denen der andere  $e^*$  der Durchschnittspunkt der jenen beiden entsprechenden gebrochenen



Strahlen ist. Es bedarf wohl nicht der Ausführung des logischen Beweises dafür, dass zwei solche Punkte in der Beziehung von Objektpunkt und Bildpunkt zueinander stehen, d. h. dass alle Strahlen, welche sich als einfallende im Punkte  $e$  schneiden nach erlittenen Brechungen ein homocentrisches Bündel bilden, dessen Centrum  $e^*$  ist.

Legen wir nun durch  $e$  und  $e^*$  zwei zur Axe senkrechte Ebenen  $EE$  und  $E^*E^*$  so sind es diejenigen, welche in der vorhin angekündigten Wechselbeziehung stehen. Denn wenn man von einem Punkte einer zur Axe senkrechten Ebene weiss, dass sein Bildpunkt in einer bestimmten zweiten zur Axe senkrechten Ebene enthalten ist, so müssen alle Bildpunkte in der letzteren liegen, welche in der ersteren gelegenen Objektpunkten entsprechen. Die allgemein gültige perspektivische Beziehung zwischen Objekt und Bild ergibt aber sofort noch den Satz, dass einem Punkte der Ebene  $E$  als Objektpunkt derjenige Punkt der Ebene  $E^*$  als Bildpunkt entsprechen muss, welcher auf einer durch den Objektpunkt zur Axe parallelen Geraden liegt. In der That kann ja der Punkt der Axe, wo sich alle Verbindungslinien der Objektpunkte und ihrer Bildpunkte schneiden hier nur der unendlich ferne Punkt der Axe sein, da sich in ihm zwei dieser Verbindungslinien nämlich  $PQ$  und die Axe selbst schneiden. Die beiden soeben definirten Ebenen sollen die erste und zweite „Hauptebene“ und ihre Durchschnittspunkte mit der Axe der erste und zweite Hauptpunkt heissen. Diese beiden Punkte sollen gleichfalls mit den Buchstaben  $E$  und  $E^*$  bezeichnet werden.

Der Abstand des ersten Brennpunktes  $F$  von der ersten Hauptebene  $E$  heisse die „erste Hauptbrennweite“ und werde mit  $f$  bezeichnet, ebenso heisse die Entfernung  $E^*F^*$  die zweite Hauptbrennweite des Systems und werde mit  $f^*$  bezeichnet,  $f$  und  $f^*$  sind offenbar Grössen, welche für ein bestimmtes System ein für allemal angebbare konstante Werthe besitzen. Ferner wollen wir auch alle anderen Objektabstände, die wie früher mit  $p$  bezeichnet werden sollen, von  $E$  aus messen und zwar mit der Bestimmung, dass ein positiver Werth von  $p$  die Lage des Objektpunktes auf der Seite von  $E$  andeute, von wo die Strahlen kommen, ein negativer die Lage auf der Seite von  $E$  wohin die Strahlen gehen, diese Bestimmung gilt auch für die Brennweite  $f$ . Andererseits sollen die mit  $p^*$  zu bezeichnenden Bildabstände von  $E^*$  aus gemessen werden und hier soll ein positiver Werth von  $p^*$  andeuten, dass der Bildpunkt auf der Seite von  $E^*$  liegt, nach welcher die Strahlen hingehen, ein negativer, dass er auf der Seite liegt von wo die Strahlen kommen,



diese letztere Bestimmung ist auch für das Vorzeichen von  $f^*$  maassgebend. Es lässt sich nun leicht zeigen, dass zwischen den soeben definirten Grössen, nämlich den Konstanten  $f$  und  $f^*$  und den Variablen  $p$  und  $p^*$  dieselbe Gleichung gilt, welche wir für die weiter oben in einem Medienpaare definirten Grössen ähnlicher Bedeutung gültig gefunden haben.

In der That es sei  $AA_1$  (Fig. 3) die Axe des Systems  $E$  und  $E^*$  seine Hauptebenen resp. Hauptpunkte,  $F$  und  $F^*$  seine Brennpunkte.

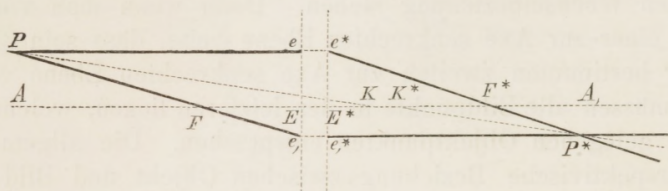


Fig. 3.

Es sei ferner  $P$  ein beliebig gewählter nur den allgemeinen Grundbedingungen entsprechender Objektpunkt. Von den einfallenden Strahlen, welche in ihm ihr Centrum haben, wählen wir zwei aus, nämlich denjenigen  $Pe$ , welcher der Axe parallel geht und denjenigen  $PF$ , welcher den ersten Brennpunkt  $F$  enthält. Der erstere könnte einerseits Bestandtheil eines Bündels sein das der Punkt  $e$ , wo er die erste Hauptebene trifft zum Centrum hat. Da nun dem Punkt  $e$  der in der Verlängerung von  $Pe$  gelegene Punkt  $e^*$  der zweiten Hauptebene als Bildpunkt entspricht, so muss der entsprechende gebrochene Strahl durch den Punkt  $e^*$  gehen.  $Pe$  kann aber auch als Bestandtheil eines Bündels betrachtet werden, dessen Strahlen der Axe parallel verlaufen, es muss ihm also als gebrochener ein Strahl entsprechen, dessen Richtung durch den zweiten Brennpunkt  $F^*$  geht. Durch diese zwei Bestimmungen ist der zu  $Pe$  als einfallendem gehörige gebrochene Strahl vollständig gegeben, er muss in die Richtung der Verbindungslinie von  $e^*$  und  $F^*$  fallen.

Der zweite gewählte einfallende Strahl  $PF$  treffe gehörig verlängert die Ebene  $E$  in  $e_1$ ; dann muss die Richtung des gebrochenen Strahles gemäss der Beziehungen der Hauptebenen durch denjenigen Punkt  $e_1^*$  der Ebene  $E^*$  gehen, welcher mit  $e_1$  auf einer zur Axe parallelen Geraden liegt. Sie muss aber mit dieser Geraden selbst überdiess zusammenfallen, da der einfallende Strahl durch  $F$  geht und ein von  $F$  ausgehendes Bündel nach erlittenen Brechungen aus lauter zur Axe parallelen Strahlen besteht. Der Punkt  $P^*$  also wo die durch  $e_1^*$  zur Axe parallel gezogene Gerade die zuerst kon-

struierte Linie  $e^*F^*$  schneidet, ist der Bildpunkt für den Objektpunkt  $P$ , denn wo sich zwei gebrochene Strahlen schneiden, welche zweien demselben homocentrisch einfallenden Bündel angehörenden entsprechen, da müssen sich alle schneiden, da ja das gebrochene Bündel ein homocentrisches sein soll.

Man bemerkt nun leicht, dass die Dreiecke  $Fe_1E$  und  $Pe_1e$  einander ähnlich sind, und ebenso die Dreiecke  $E^*e^*F^*$  und  $e_1^*e^*P^*$ . Es gelten daher die beiden Gleichungen

$$\frac{e_1 E}{e_1 e} = \frac{FE}{Pe} \quad \text{und} \quad \frac{e^* E^*}{e_1^* e^*} = \frac{E^* F^*}{e^* P^*}$$

oder da gemäss der verabredeten Bezeichnungsweise  $FE = f$ ,  $E^* F^* = f^*$ ,  $eP = p$  und  $e_1^* P^* = p^*$  ist

$$\frac{e_1 E}{e_1 e} = \frac{f}{p} \quad \text{und} \quad \frac{e^* E^*}{e_1^* e^*} = \frac{f^*}{p^*},$$

addirt man diese beiden Gleichungen zueinander so ergibt sich

$$\frac{e_1 E}{e_1 e} + \frac{e^* E^*}{e_1^* e^*} = \frac{f}{p} + \frac{f^*}{p^*},$$

da aber offenbar  $e_1 e = e^* e_1^*$  ist, sowie  $e^* E^* = eE$  so ist die Summe linker Hand = 1 und die Gleichung geht über in

$$1 = \frac{f}{p} + \frac{f^*}{p^*} \dots \dots \dots (2^*)$$

Bezeichnet man die senkrechte Entfernung des Objektpunktes von der Axe  $eE = e^* E^*$  (Siehe Fig. 3) mit  $l$  und die senkrechte Entfernung des entsprechenden Bildpunktes  $e_1 E = e_1^* E^*$  mit  $l^*$  so erhält man durch Division der soeben zueinander addirten Gleichungen noch die Beziehung

$$\frac{l}{l^*} = \frac{p f^*}{p^* f} \quad \text{oder} \quad l \frac{f}{p} = l^* \frac{f^*}{p^*}.$$

Man kann aber auch aus der Aehnlichkeit der beiden Dreieckspaare noch folgern

$$\frac{l}{l^*} = \frac{p - f}{f} = \frac{f^*}{p^* - f^*}.$$

und da, wenn die Summe der Dividenden durch die Summe der Divisoren zweier gleicher Quotienten dividirt ein ihnen gleicher Quotient entsteht

$$\frac{l}{l^*} = \frac{p + (f^* - f)}{p^* - (f^* - f)} \dots \dots \dots (3)$$

Die Differenz der beiden Brennweiten spielt in dieser Formel offenbar eine ähnliche Rolle, wie der Halbmesser einer einzigen trennenden Kugelfläche in der S. 11 ausgedrückten Beziehung zwischen der Grösse des Objectes und des Bildes. Wir wollen sie mit  $q$  bezeichnen und wollen diese Länge von  $E$  und  $E^*$  aus auf der Axe abtragen in der Richtung, nach welcher die Strahlen gehen. Wir erhalten so die beiden Punkte  $K$  und  $K^*$  (Siehe Fig. 3), welche wir



die Knotenpunkte des Systems nennen wollen. Diese Punkte haben offenbar zufolge der Gleichung (3) die Eigenschaft, dass irgend eine lineare Erstreckung eines zur Axe senkrechten Objektes sich zur entsprechenden Erstreckung des Bildes verhält, wie der Abstand des Objektes vom ersten zum Abstände des Bildes vom zweiten Knotenpunkte. Man sieht ferner leicht, dass  $K^*$  das Bild von  $K$  ist, denn der Werth von  $q$  für  $p$  und  $p^*$  in die Grundgleichung eingesetzt genügt derselben, nur muss man beachten, dass für  $p$  die Grösse  $q$  mit negativen Vorzeichen einzusetzen ist, da  $K$  als Objektpunkt betrachtet hinter der ersten Hauptebene liegt. Hieraus, in Verbindung mit der ersten Eigenschaft der Knotenpunkte, ergibt sich noch die Folgerung, dass jedem im ersten Medium auf  $K$  zielenden Strahle im letzten Medium ein durch  $K^*$  gehender dem einfallenden paralleler Strahl entspricht. Der Beweis ist so einfach, dass er nicht ausführlich gegeben zu werden braucht.

Schliesslich mag noch auf ein merkwürdiges Verhältniss der als Brennweiten des Systems ( $f$  und  $f^*$ ) definirten Grössen aufmerksam gemacht werden. Es ist erstens klar, dass die obige Gleichung

$$l \frac{f}{p} = l^* \frac{f^*}{p^*}$$

auch für den Fall nur einer einzigen brechenden Fläche Geltung haben muss, in welchem Falle dann die Entfernungen  $f, p, f^*, p^*$  sämmtlich von dem Scheitel der brechenden Fläche selbst nach beiden Seiten hin zu messen sind. Wenden wir sie auf die Brechung an der ersten Fläche unseres Systems an, indem wir die dabei geltenden Werthe der Brennweiten mit  $f_1$  und  $f_2$  bezeichnen. Ebenso sollen die jetzt an die Stelle von  $l, l^*, p$  und  $p^*$  tretenden Grössen mit  $l_1, l_2, p_1$  und  $p_2$  bezeichnet werden. Beziehen wir nun alle Punkte auf ein Koordinatensystem, dessen Ursprung  $O$  ein willkürlich gewählter Punkt der als  $x$ -Axe angenommenen Axe des Systems ist und dessen  $xy$ -Ebene diejenige Ebene ist, welche ausser der Axe noch den betrachteten Objektpunkt und mithin auch den Bildpunkt enthält. Gemäss diesen Verabredungen drücken sich die Grössen  $l_1, l_2, p_1$  und  $p_2$  in den Koordinaten  $x_1, y_1$  des Objektpunktes und den Koordinaten  $x_2, y_2$  des Bildpunktes folgendermaassen aus. Wenn die Abscisse des Scheitels der Fläche mit  $S$  bezeichnet wird  $l_1 = y_1, l_2 = -y_2, p_1 = S - x_1, p_2 = x_2 - S$  und es gilt also zwischen diesen Koordinaten einerseits die Gleichung

$$\frac{f_1}{S - x_1} - \frac{f_2}{S - x_2} = 1, \text{ andererseits } \frac{f_1 y_1}{S - x_1} = \frac{f_2 y_2}{S - x_2}.$$

Sind  $\xi_1, \eta_1$  die Koordinaten eines anderen Objektpunktes und  $\xi_2, \eta_2$  die des entsprechenden Bildpunktes bezogen auf denselben Ursprung und dieselben Axen dann gelten ebenso die Gleichungen

$$\frac{f_1}{S - \xi_1} - \frac{f_2}{S - \xi_2} = 1 \text{ und } \frac{f_1 \eta_1}{S - \xi_1} = \frac{f_2 \eta_2}{S - \xi_2}.$$

Wenn man jetzt von der ersten Gleichung in  $x y$  die erste in  $\xi_1 \eta$  subtrahirt, so ergiebt sich

$$\frac{f_1 (x_1 - \xi_1)}{(S - x_1) (S - \xi_1)} = \frac{f_2 (x_2 - \xi_2)}{(S - x_2) (S - \xi_2)}.$$

Durch Multiplication der beiden anderen Gleichungen jener Paare erhält man

$$\frac{f_1^2 y_1 \eta_1}{(S - x_1) (S - \xi_1)} = \frac{f_2^2 y_2 \eta_2}{(S - x_2) (S - \xi_2)},$$

und wenn man endlich die beiden gefundenen Gleichungen durch einander dividirt so hat man

$$\frac{f_1 y_1 \eta_1}{x_1 - \xi_1} = \frac{f_2 y_2 \eta_2}{x_2 - \xi_2}.$$

Nun haben wir oben (S. 12) gesehen, dass die beiden Brennweiten eines Medienpaares ein Verhältniss zu einander haben, welches dem Brechungsindex  $n$  beim Uebergange vom ersten ins zweite maassgebend ist. Bekanntlich ist aber

$$n = \frac{v_1}{v_2}$$

wenn  $v_1$  und  $v_2$  beziehlich die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten des Lichtes im ersten und im zweiten Medium bedeuten also

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Durch Einsetzen dieses Werthes geht die letzte Gleichung über in

$$\frac{y_1 \eta_1}{v_1 (x_1 - \xi_1)} = \frac{y_2 \eta_2}{v_2 (x_2 - \xi_2)}.$$

Gehen wir nun zur Brechung an der zweiten Fläche über, indem wir die von der ersten gelieferten Bildpunkte für die zweite als Objektpunkte ansehen, so müssen offenbar die auf denselben Koordinatenursprung bezogenen Koordinaten  $x_3, y_3, \xi_3, \eta_3$  des neuen Bildpunktes zu  $x_2, y_2$  und  $\xi_2, \eta_2$  in derselben Beziehung stehen wie diese zu  $x_1, y_1$  und  $\xi_1, \eta_1$  d. h. wenn man die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes im dritten Medium  $= v_3$  setzt, muss die Gleichung gelten

$$\frac{y_2 \eta_2}{v_2 (x_2 - \xi_2)} = \frac{y_3 \eta_3}{v_3 (x_3 - \xi_3)}, \text{ also auch } \frac{y_1 \eta_1}{v_1 (x_1 - \xi_1)} = \frac{y_3 \eta_3}{v_3 (x_3 - \xi_3)}.$$

Wendet man dies Verfahren der Reihe nach auf sämmtliche Brechungen an, bezeichnet die auf Strahlen im letzten Medium bezüglichen Grössen mit dem Index  $*$  und lässt bei den Grössen, die sich auf Strahlen im ersten Medium beziehen, die Indices ganz fort, so kommt man auf eine Gleichung, welche eine direkte Beziehung zwischen den auf das erste und letzte Medium bezüglichen Grössen herstellt nämlich

$$\frac{y \eta}{v (x - \xi)} = \frac{y^* \eta^*}{v^* (x^* - \xi^*)}.$$

Hier sind  $x, y$  und  $\xi, \eta$  die Koordinaten zweier ganz beliebiger Objektpunkte,  $x^*, y^*$  und  $\xi^*, \eta^*$  die der entsprechenden Bildpunkte. Wir wählen nun den einen der beiden willkürlichen Objektpunkte in der ersten Hauptebene  $E$ , deren Abscissenwerth auch mit dem Buchstaben  $E$  bezeichnet werden soll, so dass  $x = E$  wird. Seine Ordinate  $y$  sei  $h$ , dann sind offenbar die Koordinaten des Bildpunktes  $x^* = E^*$  (wenn der Buchstabe  $E^*$  ebenfalls zur Bezeichnung des Abscissenwerthes der Ebene



$E^*$  gebraucht wird) und  $y^* = h$ . Die Koordinaten  $\xi$  und  $\eta$  des zweiten Objektpunktes wollen wir nun durch die andern früher gebrauchten Grössen ausdrücken und haben dann

$$\xi = E - p, \eta = l \text{ und } \xi^* = E^* + p^*, \eta^* = -l \frac{p^* f}{p f^*}.$$

Dass die Ordinate des andern Bildpunktes nicht  $= -h$  sondern  $= h$  zu setzen ist hat darin seinen Grund, dass wir sie nicht erst als ein  $l^*$  aus dem entsprechenden  $l$  berechnet haben. Durch Einsetzen dieser 8 Werthe in die Formel ergibt sich

$$\frac{h \cdot l}{v(E - E + p)} = - \frac{h l \frac{p^* f}{p f^*}}{v^*(E^* - E^* - p^*)} \text{ oder } v f = v^* f^*.$$

in Worten die beiden Brennweiten des Systems verhalten sich umgekehrt wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten des Lichtes im ersten und letzten Medium. Sind also diese beiden Medien ein und dasselbe, wie das bei Fernrohren, Mikroskopen etc. der Fall ist, wo die Strahlen aus Luft kommen und zuletzt wieder in Luft gehen, so sind die beiden Brennweiten einander gleich.

Bei einem der direkten Beobachtung überall zugänglichen Systeme kann man die Lage der optischen Cardinalpunkte auf der Axe leicht empirisch bestimmen. Die Aufgabe besteht offenbar darin die Entfernungen der 4 Punkte  $F, E, E^*, F^*$  von einem willkürlich gewählten Ausgangspunkt in der Axe zu finden. Man muss also für zwei Objektpunkte die Koordinaten  $x, y$  und  $\xi, \eta$ , sowie auch die Koordinaten ihrer Bildpunkte  $x^*, y^*$  und  $\xi^*, \eta^*$  bezogen auf den willkürlichen Ursprung und die Axe des Systems als  $x$ -Axe, indem man die Bildpunkte auf geeignet gestellten Schirmen zur Darstellung bringt. Man beachte nun, dass, wenn man die Abscissen der Cardinalpunkte durch die Buchstaben  $F, E, E^*, F^*$  wie sie selbst bezeichnet, die Gleichung

$$\frac{f}{p} + \frac{f^*}{p^*} = 1$$

für das erste Paar von konjugirten Punkten übergeht in

$$\frac{E - F}{E - x} + \frac{F^* - E^*}{x^* - E^*} = 1$$

und die Gleichung

$$l \frac{f}{p} = l^* \frac{f^*}{p^*} \text{ in } \frac{(E - F)y}{E - x} + \frac{(F^* - E^*)y^*}{x^* - E^*} = 0.$$

Zwei entsprechende Gleichungen ergeben sich für den zweiten Objekt- und Bildpunkt. Aus diesen 4 Gleichungen, in welchen  $x, y$  und  $x^*, y^*$  sowie  $\xi, \eta$  und  $\xi^*, \eta^*$  als empirisch bestimmt und mithin bekannt gelten, können die 4 gesuchten Grössen  $F, E, E^*, F^*$  berechnet werden. Wenn man mehr als zwei Objekt- und Bildpunkte



empirisch bestimmt ergeben sich einander gegenseitig kontrollirende Bestimmungen der gesuchten Grössen.

Wenn man in dem brechenden System nicht überall bildauffangende Schirme in genau messbaren Lagen aufstellen kann, so ist die zuletzt angedeutete empirische Ermittlung der Brenn- und Hauptpunkte unausführbar. Man kann aber ihre Lage durch Rechnung finden, wenn die maassgebenden Constanten des Systemes bekannt sind. Es sind dies offenbar folgende Grössen: erstens die Brechungsindices der einzelnen Medien, und zwar soll unter dem Brechungsindex eines Mediums derjenige verstanden werden, welcher beim Uebergang von Luft in dies Medium Geltung hat, so dass der Brechungsindex der Luft selbst (die gemeiniglich das erste Medium des brechendem Systems bildet) = 1 zu setzen ist. Diese Brechungsindices sollen der Reihe nach mit  $n_0, n_1, n_2, \dots n^*$  bezeichnet werden. Zweitens sind es die Entfernungen der Scheitel der brechenden Flächen in der Axe von irgend einem darin gewählten Anfangspunkt. Diese Grössen wollen wir der Reihe nach mit  $S_1, S_2, \dots S^*$  bezeichnen ihre Anzahl ist um 1 kleiner als die Anzahl der Grössen  $n$ . Drittens müssen bekannt sein die Grössen  $C_1 - S_1, C_2 - S_2, \dots C^* - S^*$ , wo unter  $C_1, C_2$  etc. die Entfernungen der Mittelpunkte der einzelnen Kugelflächen von dem willkürlich gewählten Anfangspunkte verstanden sind, Die Differenz  $C_u - S_u$  ist also ihrem absoluten Werthe nach der Halbmesser der  $\mu^{\text{ten}}$  Trennungsfläche. Die Differenz hat aber ein charakteristisches Vorzeichen und zwar das positive, wenn der Mittelpunkt hinter, das negative, wenn er vor dem Scheitel liegt, oder mit anderen Worten der Radius ist in die Rechnung mit positivem Zeichen einzuführen, wenn die ankommenden Strahlen auf die konvexe Seite der Fläche, mit negativem wenn dieselben auf die konkave Seite fallen. Sind alle diese Grössen gegeben, so ist offenbar das System optisch vollständig charakterisirt und es muss also auch möglich sein die Lage der Hauptpunkte und Brennpunkte in der Axe zu bestimmen, deren Existenz durch die früheren Betrachtungen erwiesen ist.

Die Art wie die Lage der Cardinalpunkte aus den gegebenen Constanten zu berechnen ist, hat GAUSS<sup>1</sup> in seinen berühmten „dioptrischen Untersuchungen“ sehr elegant entwickelt. Die Wiedergabe dieser Ent-

---

<sup>1</sup> GAUSS, Dioptrische Untersuchungen, besonderer Abdr. aus den Abhandl. der Göttinger Gesellschaft. Göttingen 1841. Neuere Darstellungen der Berechnungsweise der Cardinalpunkte finden sich in verschiedenen monographischen Darstellungen: ZEHENDER, Anleitung zum Studium der Dioptrik des Auges. Erlangen 1856; MATTHIESSEN, Grundriss der Dioptrik etc. Leipzig 1877.

wicklung würde indessen hier zu viel Raum in Anspruch nehmen und kann um so eher hier unterlassen werden, als diese Entwicklung mit aller Ausführlichkeit und Strenge in dem in medicinischen Fachkreisen weit verbreiteten Handwörterbuch der Physiologie von LISTING<sup>2</sup> dargestellt ist. Wir begnügen uns daher damit die Rechnungsregel unbewiesen hier wiederzugeben. Man schreibe sich die charakteristischen Constanten des Systemes in folgender Ordnung nieder, wobei die Anzahl der Flächen  $m$  und also die der Medien  $m + 1$  sein soll

$$\begin{array}{rcl} n_0 & & C_1 - S_1 \\ n_1 & & S_2 - S_1 \\ & C_2 - S_2 & \\ n_2 & & S_3 - S_2 \\ & C_3 - S_3 & \\ n_3 & & \\ \vdots & & \\ \vdots & & S^* - S_{m-1} \\ n_{m-1} & C^* - S^* & \\ n^* & & \end{array}$$

Hierauf bilde man daraus folgende Grössen

$$\begin{array}{rcl} u_0 = -\frac{n_1 - n_0}{C_1 - S_1} & & t_1 = \frac{S_2 - S_1}{n_1} \\ u_1 = -\frac{n_2 - n_1}{C_2 - S_2} & & t_2 = \frac{S_3 - S_2}{n_2} \\ u_2 = -\frac{n_3 - n_2}{C_3 - S_3} & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ u_{m-1} = -\frac{n_{m-1} - n_{m-2}}{C_{m-1} - S_{m-1}} & & t^* = \frac{S^* - S_{m-1}}{n_{m-1}} \\ u^* = -\frac{n^* - n_{m-1}}{C^* - S^*} & & \end{array}$$

Diese Grössen sind hierauf in die Reihenfolge

$$u_0, , t, , u_1, , t_2, , u_2, , \dots, u_{m-1}, t^*, u^*$$

zu bringen und aus den Elementen dieser Reihe sind vier EULER'sche Kettenfunktionen folgendergestalt zu bilden. Im allgemeinen bildet sich eine solche aus einer beliebigen Reihe von Elementen, in dem mit dem Produkte der sämmtlichen Elemente multiplicirt wird eine Summe, welche aus einer Reihe von Summandengruppen gebildet ist. Die erste Gruppe ist die 1 die zweite besteht aus den reciproken Werthen der Produkte von je zwei benachbarten Elementen; die dritte Gruppe aus den reciproken Werthen der Produkte derjenigen Paare von Nennern der zweiten Gruppe die kein gemeinsames Element haben, die vierte aus den reci-

1 Wagner's Hwb. Bd. IV. Artikel Dioptrik des Auges.



proken Werthen der Produkte von je drei Nennern der zweiten Gruppe ohne gemeinsames Element in den fernerer Gruppen würden die Produkte von je 4, je 5 etc. jener Nenner als Nenner auftreten. Offenbar bricht die Bildung dieser Gruppen einmal von selbst ab, wenn nicht mehr die erforderliche Anzahl von Produkten ohne gemeinschaftliches Element zu finden ist.

Wenn wir eine solche Funktion einfach durch die eingeklammerte Reihe der Elemente bezeichnen, so hätten wir beispielsweise

$$(a) = a$$

$$(a, b) = ab \left( 1 + \frac{1}{ab} \right)$$

$$(a, b, c) = abc \left( 1 + \frac{1}{ab} + \frac{1}{bc} \right)$$

$$(a, b, c, d) = abcd \left( 1 + \frac{1}{ab} + \frac{1}{bc} + \frac{1}{cd} + \frac{1}{abcd} \right)$$

$$(a, b, c, d, e) = abcde \left( 1 + \frac{1}{ab} + \frac{1}{bc} + \frac{1}{cd} + \frac{1}{de} + \frac{1}{abcd} + \frac{1}{bcde} + \frac{1}{abde} \right)$$

$$\vdots \qquad \qquad \qquad \vdots$$

Für die Rechnung ist es indessen bequemer die Klammer aufzulösen, indem man das Produkt den sämtlichen Elemente mit 1 und den sämtlichen Brüchen multiplicirt.

Nach diesem Schema bilde man aus den mit  $u$  und  $t$  bezeichneten Grössen folgende 4 Kettenfunktionen

$$g = (u_0, t_1, u_1, t_2, u_2 \dots u_{m-1}, t^*)$$

$$h = (t_1, u_1, t_2, u_2 \dots u_{m-1}, t^*)$$

$$k = (u_0, t_1, u_1, t_2, u_2 \dots u_{m-1}, t^*, u^*)$$

$$l = (t_1, u_1, t_2, u_2 \dots u_{m-1}, t^*, u^*)$$

Mit Hilfe dieser 4 Grössen berechnet sich die Entfernung, in welcher die erste Hauptebeue hinter der ersten Trennungsfläche des Systems liegt

$$E - S_1 = - \frac{n_0 (1 - l)}{k}$$

und die Entfernung in welcher die zweite Hauptebeue vor der letzten Fläche des Systems liegt

$$S^* - E^* = - \frac{n^* (1 - g)}{k}$$

sowie ferner die Entfernung, in welcher der erste Brennpunkt vor der ersten Trennungsfläche zu finden ist nämlich

$$S_1 - F = - \frac{n_0 \cdot b}{k}$$

und die Entfernung, in welcher der zweite Brennpunkt hinter der letzten Trennungsfläche liegt

$$F^* - S^* = - \frac{n^* \cdot g}{k}$$

Die Lage der Knotenpunkte ergibt sich dann leicht nach der oben gegebenen Definition derselben.

## ZWEITES CAPITEL.

## Anatomische Voraussetzungen.

## I. Die Hüllen des Augapfels.

Wie aus der Anatomie bekannt, ist im Augenhintergrund eine Nervenausbreitung der Netzhaut zu finden, von welcher später gezeigt werden wird, dass sie den in der Einleitung gestellten Bedingungen entspricht. Vor ihr liegen 4 durchsichtige Medien, nämlich zunächst die sogenannte Glasfeuchtigkeit oder der Glaskörper, die Linse, die wässrige Feuchtigkeit und endlich die Hornhaut, welche im Augenlidspalt zu Tage tretend, den Lichtstrahlen aus der Luft den Eintritt gestattet, so dass dieselben durch sie, die wässrige Feuchtigkeit, die Linse und den Glaskörper zur Netzhaut vordringen können, indem sie beim Uebergang von einem Medium zum andern im Allgemeinen eine Brechung erleiden.

Die durchsichtigen Körper des Auges sind umschlossen von drei grösstentheils einander unmittelbar anliegenden Hüllen. Die äusserste Hülle ist die harte Haut des Auges *tunica sclerotica*, von welcher die schon erwähnte durchsichtige Hornhaut selbst den vordersten Abschnitt bildet. Die *Sclerotica* ist aus weissem ziemlich undurchsichtigem Sehnngewebe gebildet und durchschnittlich etwa 0,5 mm. dick. Sie geht in die Hornhaut stetig über, deren Struktur jedoch von der ihrigen wesentlich abweicht, wie aus der Histologie bekannt ist. Die äussere Oberfläche der *Sclerotica* ist annähernd eine Kugeloberfläche, doch ist die Abweichung schon mit dem Augenmaasse bemerkbar. Hinten, der Hornhaut gegenüber, ist nämlich die *Sclerotica* etwas abgeplattet, so dass die grössten Durchmesser von etwa 23—26 mm. in die Aequatorialebene fallen. Es sei hier ein für allemal bemerkt, dass wir zur Orientirung am Augapfel die geographische Bezeichnungsweise anwenden wollen. Diejenige Gerade, welche vom Hornhautscheitel zu dem von ihm am weitesten abstehenden Punkte der Oberfläche geht, und um welche die Theile des Auges sehr annähernd symmetrisch liegen, heisse die „Axe des Auges“, ihre Enden die „Pole“. Jede durch die Axe gelegte Ebene heisse eine „Meridianebene“ des Auges, und die im Mittelpunkt der Axe zu ihr senkrechte Ebene die „Aequatorialebene“.

Die Hornhautfläche bildet geometrisch nicht die stetige Fort-



setzung der Scleroticaoberfläche, sondern ist merklich convexer, was man schon am Auge des Lebenden sehen kann. Daher kommt es, dass, trotz der Abplattung am hinteren Pole, doch die Axe von Pol zu Pol gemessen, etwa gerade so lang ist wie der grösste Aequatorialdurchmesser, nämlich 23—26 mm.

Die Hornhaut ist auf ihrer Vorderfläche mit einem Plattenepithel bekleidet, das die Fortsetzung des Epithels ist, welches den ganzen Conjunktivasack auskleidet. Die hintere Fläche der Hornhaut ist noch mit einer besonderen Membran, der sogenannten membrana Descemetii, überzogen, welche sich durch ihre Widerstandsfähigkeit gegen Lösungsmittel, besonders kochendes Wasser, auszeichnet. Die hintere Seite der Descemet'schen Haut ist mit einer Schicht von platten Epithelzellen belegt.

Die zweite Hülle des Augapfels bildet die sogenannte tunica uvea. Sie ist ausgezeichnet einerseits durch grossen Gefässreichthum und andererseits durch überall eingelagerte Pigmentzellen, die auf der inneren Oberfläche eine zusammenhängende Schicht bilden. Endlich enthält sie an gewissen noch näher zu bezeichnenden Stellen auch glatte Muskelfasern. Alle diese Gewebe sind in ein bindegewebiges Lager eingebettet. Die tunica uvea bildet nicht wie die Sclerotica mit der Hornhaut eine vollständig geschlossene Blase, sondern sie hat vorn ein rundes Loch, die Pupille genannt, dessen Mittelpunkt in der Axe liegt.

Der hintere Abschnitt der uvea, auch tunica chorioidea genannt, liegt der sclerotica in ihrer ganzen Ausdehnung unmittelbar an, ohne jedoch mit ihr verwachsen zu sein. Der vordere Abschnitt, die sogenannte Iris, liegt nicht ebenso der Hornhaut unmittelbar an, sondern tritt hinter dieselbe zurück, wodurch ein freier Raum, die Augenkammer, gebildet wird, in welcher sich die wässrige Feuchtigkeit befindet.

Längs des Parallelkreises, wo die Chorioidea in die Iris übergeht, also entsprechend der Grenze zwischen Sclerotica und Hornhaut, ist die uvea mit der äusseren sehnigen Hülle des Auges verwachsen. Diese Verwachsung ist wesentlich dadurch bedingt, dass an einem mit dem Rande der membrana Descemetii zusammenhängenden Netzwerk elastischer Fasern, welches hier von der Grenze zwischen Hornhaut und Sclerotica ausgeht, glatte Muskelfasern entspringen, die in Meridianrichtungen als Theile der chorioidea weiter laufen und eine stetige Schicht an deren Oberfläche bilden, welche bis gegen den Aequator reicht. Diese Muskelschicht wird der Brücke'sche Muskel oder m. tensor chorioideae genannt. In der vorderen

Parthie dieses Muskels finden sich auch cirkuläre Elemente, welche indessen häufig nach hinten in Meridianrichtungen abbiegen. Dieselbe Zone der chorioidea, welche aussen durch diesen Muskel gebildet wird, erscheint auf der inneren Seite halskrausenartig gefaltet; und zwar laufen diese Falten, *plicae ciliares* genannt, ungefähr 80 an Zahl, in Meridianrichtungen gegen den Aequator zu flach aus, während sie sich nach vorn höher erheben, so dass ihre Enden einen Kranz von zottenartigen Vorsprüngen bilden, welche den Linsenrand umgeben.

Der vordere Abschnitt der uvea, die Iris, enthält durchweg viel glatte Muskelfasern. Ein Theil derselben bildet einen ringförmigen Wulst um die Pupille herum, die Zusammenziehung dieser Fasern führt zu einer Verengerung des Loches, man bezeichnet daher diesen Muskelring, der auch eine besondere Innervation hat, als einen besonderen Muskel unter dem Namen des „*sphincter pupillae*“. Von demselben ringförmigen Netzwerke elastischer Fasern, welches den nach hinten ziehenden Bündeln des *musculus tensor chorioideae* zum Ursprung dient, entspringen Muskelfasern, welche im Allgemeinen in radialen Richtungen in der Iris zum Rande der Pupille verlaufen. Da sie an der harten Haut des Auges ringsum feste Ursprungspunkte haben, so müssen sie durch ihre Verkürzung die Pupille erweitern, daher man dieses System von Muskelfasern unter dem Namen des „*dilatator pupillae*“ zusammenfasst.

Die dritte Lage der Umhüllung des Augapfels wird von der Ausbreitung des Sehnerven gebildet. Dieser Nerv durchbohrt bekanntlich ein wenig nasenwärts vom hinteren Pol des Auges die *scerotica* und *chorioidea* und geht sofort in eine flächenartige Ausbreitung die sogenannte Netzhaut (*tunica retina*) über, welche sich der inneren Fläche der *chorioidea* unmittelbar anlegt, ohne aber mit ihr irgendwie verwachsen zu sein. Diese, hinten wo sie am dicksten ist, etwas über  $\frac{2}{10}$  mm. dicke Membran ist in sehr verwickelter Weise aus nervösen und bindegewebigen Elementen zusammengesetzt, welche letztere ein Lager bilden, um die zarten nervösen Elemente in der für ihre Verrichtung nöthigen Stellung sicher zu erhalten. Da der Bau der Retina erst in dem Abschnitte von den Lichtempfindungen sein physiologisches Interesse erhält, so mag derselbe vorläufig unerörtert bleiben. Es genügt hier zu bemerken, dass die nervösen Elemente in der Netzhaut von der Eintrittsstelle des Sehnerven an nach vorn immer spärlicher werden und etwas über den Aequator hinaus ganz aufhören und zwar auf der Zone, auf welcher in der *chorioidea* die Ciliarfalten sich zu erheben anfangen. Da die Aenderung in der Be-



schaffenheit der Netzhaut hier schon dem blossen Auge bemerklich ist und zwar der beginnenden Faltung entsprechend in einer leicht-gezackten Grenzlinie, so hat man dieselbe als „*ora serrata retinae*“ bezeichnet. Darüber hinaus setzt sich von der Netzhaut wesentlich nur noch ihre innerste glashelle, anscheinend structurlose Schicht, die sogenannte „*membrana limitans interna*“ fort und bildet, den Ciliarfalten innen folgend, den Ciliartheil der Netzhaut. An den freien Enden der Ciliarfalten angelangt, geht diese Fortsetzung der Netzhaut mit anderen Gebilden eigenthümliche Verbindungen ein, welche alsbald bei der Beschreibung der Linse zu erwähnen sind. Die Netzhaut hat ihr eigenes von dem der chorioidea unabhängiges Gefässsystem, das durch die Verzweigungen einer kleinen im Innern des Sehnerven eintretenden Arterie, der *arteria centralis retinae* gebildet wird.

## II. Die durchsichtigen Körper des Augapfels.

Der von der beschriebenen, aus drei Schichtsystemen bestehenden Hülle umschlossene Hohlraum ist nun von den durchsichtigen Körpern des Auges in folgender Art ausgefüllt: Vorn hinter der Hornhaut, den Raum zwischen ihr und der Iris einnehmend, findet sich, wie schon gesagt, der *humor aqueus*. Er ist wesentlich Wasser, in welchem die Salze des Blutserums nebst Spuren organischer Stoffe gelöst sind.

Der bei weitem grössere, hintere, von der *sclerotica* umgebene Abschnitt des Augapfels ist angefüllt mit dem sogenannten „Glaskörper“ (*humor vitreus*). Dieser ist zwar aus festen Lamellen und dazwischen eingeschlossenen Flüssigkeitsmengen eigenthümlich aufgebaut. Doch hat diese Struktur für die physiologische Optik kein Interesse und kann daher hier unerwähnt bleiben. Optisch wirkt der Glaskörper wie ein homogener durchsichtiger Körper. Er ist im Ganzen noch umschlossen von einer strukturlosen Membran der Glashaut, welche der *membrana limitans* anliegt und längs der *ora serrata* mit ihr verklebt ist.

Zwischen Glaskörper und wässriger Feuchtigkeit ist noch ein durchsichtiges Gebilde eingeschaltet, das mit seiner Vorderfläche der Iris wenigstens am Pupillarrande unmittelbar anliegt, und das seiner linsenförmigen Gestalt den Namen der Krystalllinse, *lens crystallina*, verdankt. Die Linse ist etwa von butterartiger Konsistenz, besteht aber, ähnlich einer Zwiebel, aus einer Unzahl von leicht trennbaren Schichten, deren Anordnung in Fig. 4 zu sehen ist, wie sie sich auf

einem ebenen Schnitte durch die Axe etwa zeigen würden. Jede Schicht besteht aus Fasern, welche in der Schicht im allgemeinen radial verlaufen, jedoch gegen den Mittelpunkt konvex umbiegen. Die Fasern jeder Schicht bilden so 5 hyperbolische Büschel mit einigen Nebenbüscheln, wie in Fig. 5 zu sehen ist.

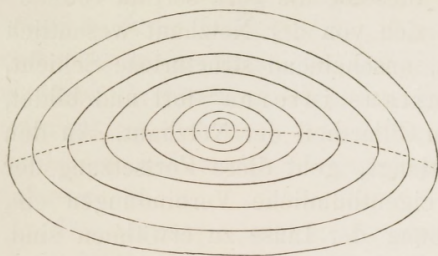


Fig. 4.

Die Linse ist eingeschlossen in eine Kapsel von der Struktur der Glashaut, mit welcher sie auch längs eines Pa-

rallelkreises auf der hinteren Fläche verwachsen ist. Es setzt sich ferner an die Linsenkapsel ringsum noch ein ebenfalls strukturloses membranöses Gebilde fest, welches sich zwischen den ganzen Ciliarteil der Netzhaut und die entsprechende Parthie der Glashaut einschleibt. Dies beim Accommodationsvorgang wichtige Gebilde wird

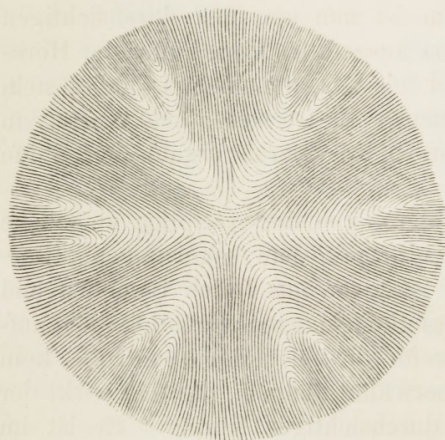


Fig. 5.

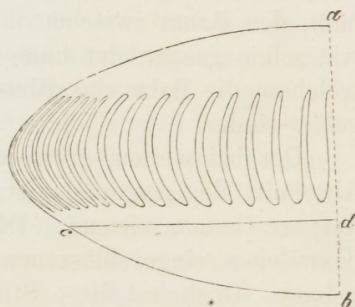


Fig. 6.

Zonula Zinnii genannt und von manchen Anatomen als ein äusseres Blatt der Glashaut angesehen, mit der es jedenfalls, sowie anderseits mit der membrana limitans retinae längs der ora serrata verwachsen ist. Die Zonula Zinnii folgt wie die membrana limitans den Faltungen der chorioidea. Während dann aber die limitans von den freien Enden der Ciliarfalten auf die hintere Fläche der Iris überzutreten und sich da zu verlieren scheint, springt die Zonula, wie schon angedeutet, von den Ciliarfalten auf die Linsenkapsel über, um mit dieser zu ver-



wachsen längs einer der Ciliarfaltung entsprechend wellig gekrümmten Linie. Eine Anschauung von dieser Ansatzlinie giebt die Fig. 6, in welcher ausserdem die Ansatzlinie der eigentlichen Glashaut *cd* zu sehen ist.

Die sämtlichen, vorstehend in Erinnerung gebrachten, optisch bedeutsamen anatomischen Verhältnisse übersieht man gut in Fig. 7.

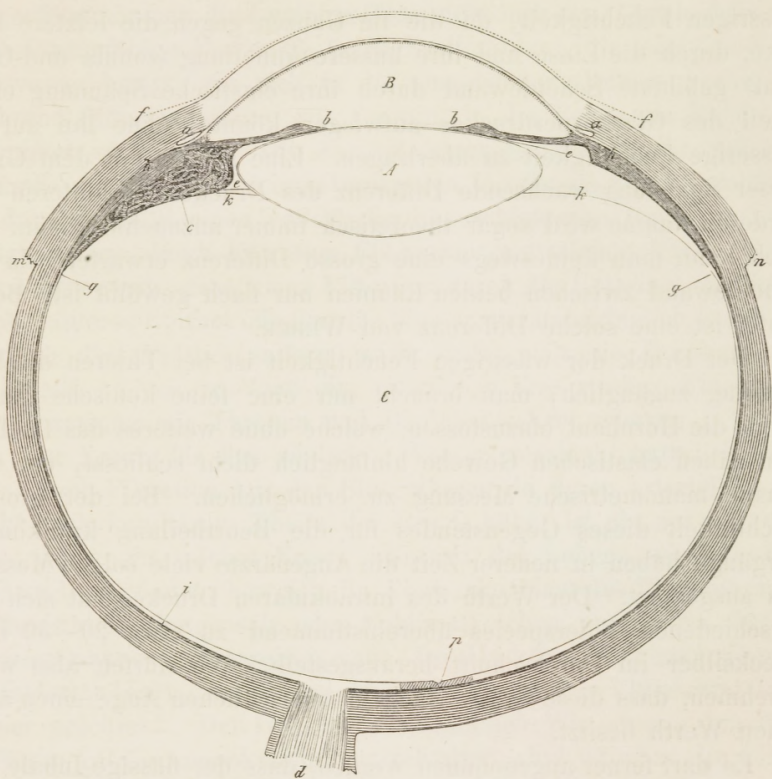


Fig. 7.

Sie stellt einen wagrechten Meridianschnitt eines rechten Auges von oben betrachtet dar und ist der physiologischen Optik von HELMHOLTZ entnommen. Einer besonderen Erklärung bedarf die Figur nach dem Vorstehenden nicht mehr, nur die eine Bemerkung ist noch nöthig, dass angenommen ist der Schnitt treffe rechts die Einsenkung zwischen zwei Ciliarfalten links aber den First einer Falte. Dem entsprechend springt die Zonulae rechts an einen Punkt der Vorderfläche, links an einen Punkt der Hinterfläche der Linsenkapsel.

### III. Der intraokulare Druck.<sup>1</sup>

Bei dem annähernd oder vollkommen flüssigen Aggregatzustande des Inhaltes des Augapfels, mit Ausnahme der Linse, kann man füglich nach dem hydrostatischen Drucke fragen, unter welchem dieser Inhalt stehe. Er braucht freilich nicht überall nothwendig gleich zu sein. Vielmehr kann der Druck im Glaskörper höher sein als in der wässrigen Feuchtigkeit, da die im Ganzen gegen die letztere konvexe, durch die Linse und ihre äussere Anheftung (zonula und Glashaut) gebildete Scheidewand durch ihre elastische Spannung einen Theil des Glaskörperdruckes aufwiegen könnte, ohne ihn auf die wässrige Feuchtigkeit zu übertragen. Eine solche mit dem Grade dieser Spannung wachsende Differenz des Druckes im hinteren und vorderen Raume wird sogar theoretisch immer anzunehmen sein. Jedoch kann man keineswegs eine grosse Differenz erwarten, da die Scheidewand zwischen beiden Räumen nur flach gewölbt ist. Beobachtet ist eine solche Differenz von WEBER.

Der Druck der wässrigen Feuchtigkeit ist bei Thieren direkter Messung zugänglich, man braucht nur eine feine konische Cantile durch die Hornhaut einzustossen, welche ohne weiteres das Loch in dem zähen elastischen Gewebe hinlänglich dicht schliesst, um eine genaue manometrische Messung zu ermöglichen. Bei der grossen Wichtigkeit dieses Gegenstandes für die Beurtheilung krankhafter Vorgänge haben in neuerer Zeit die Augenärzte viele solche Messungen ausgeführt. Der Werth des intraokularen Druckes hat sich bei verschiedenen Thierspecies übereinstimmend zu etwa 20—30 mm. Quecksilber im Durchschnitt herausgestellt. Wir dürfen also wohl annehmen, dass diese Grösse auch im menschlichen Auge einen ähnlichen Werth besitzt.

Es darf ferner angenommen werden, dass der flüssige Inhalt der inneren Augenträume sich ebenso wie alle anderen thierischen Flüssigkeiten in fortwährenden, wenn auch langsamen Strömen befindet, dass also insbesondere z. B. von dem Kammerwasser beständig etwas nach aussen abgegeben und durch neues ersetzt wird, so dass der

---

<sup>1</sup> In der Darstellung dieses Gegenstandes von mehr pathologischem Interesse folge ich im Ganzen LEBER, Handbuch der gesammten Augenheilkunde. Leipzig 1876 und will nach ihm noch folgende Abhandlungen citiren, die mir zum grössten Theil auch selbst vorliegen: C. WEBER, Nonnullae disquisitiones etc. Inauguralabhandlung. Marburg 1850; ADAMÜK, Med. Centralblatt 1866. No. 36 u. 1867. No. 28 und Sitzungsber. der Wiener Akad. 1869. Febr.; GRÜNHAGEN & v. HIPPEL, Berliner klin. Wochenschr. 1866. No. 24; Zeitschr. f. rat. Med. 1866. Bd. 25; Arch. f. Ophthalmol. Bd. 14 und 15; SCHWALBE, Lymphräume des Auges. Arch. f. mikrosk. Anat. Bd. 6; LEBER, Arch. f. Ophthalmol. Bd. 19.



konstante Werth des intraokularen Druckes steigen müsste, wenn die Abflussbedingungen ungünstiger oder die Zufuhrbedingungen günstiger werden und vice versa.

Was nun die Abzugswege des Kammerwassers und der Tränkungsflüssigkeit des Glaskörpers betrifft, so ist die auf den ersten Blick nächstliegende Annahme, es seien die Lymphwege, höchst unwahrscheinlich, wenigstens konnten LEBER und SCHWALBE von der Augenkammer aus die Lymphgefäße nicht injiciren. Auch sieht man diffusionsunfähige Farbstoffe (z. B. Berlinerblau), die man ins Kammerwasser bringt, nie sich in die umgebenden Gefäße verbreiten, während diffusionsfähige, wie Carmin, in die Venen am Rande der Hornhaut eindringen. Die Augenkammer ist also weder mit dem Lymph- noch mit dem Blutgefäßssystem in offenem Zusammenhange, sondern sie stellt einen vollständig abgeschlossenen Raum dar, aus welchem nur durch Filtration Flüssigkeit entweichen kann. Es ist bemerkenswerth, dass keine Filtration durch die Hornhaut stattfindet, deren hinteres Epithel offenbar für Wasser undurchdringlich ist. Wenn nämlich dies Epithel entfernt wird, trübt sich die Hornhaut und quillt auf, und sie trocknet ein, wenn man ihre vordere Fläche vor der Benetzung mit Thränen und Bindehautsekret schützt.

Der Ersatz für das abfiltrirte Wasser geschieht natürlich ebenfalls durch Filtration aus den Blutgefäßen, in deren arteriellem und wohl auch kapillarem Theile der Druck höher ist als der intraokulare. Dass ein solcher Ersatz während des Lebens wirklich fortwährend stattfindet, beweist die Thatsache, dass ins Blut gebrachte Salze (wie Blutlaugensalz oder Sublimat) schon nach etwa 20' im Kammerwasser nachzuweisen sind. Im Glaskörper hat man sie nicht auffinden können, wohl weil hier der Ersatz der Flüssigkeit langsamer geschieht. Der Ort, wo hauptsächlich Wasser aus den Blutgefäßen in die Augenkammer ausschwitzt, sind offenbar die Ciliarfortsätze und die ebenfalls sehr gefäßreiche hintere Fläche der Iris. Wenn nämlich durch Verwachsung des Pupillarrandes diese Gefäße von der vorderen Augenkammer abgesperrt sind, so wird dieselbe allmählich leer und die Linse rückt bis zur Hornhaut vor.

Wird die Augenkammer entleert, so ersetzt sich ihr Inhalt sehr schnell, woraus aber auf die Geschwindigkeit des Stromes unter normalen Verhältnissen nicht geschlossen werden kann, denn nach Entleerung des Kammerwassers ist der Druck daselbst Null und also der Ueberdruck in den Gefäßen bedeutend grösser, was die Filtration beschleunigen muss. Auch ist in diesem Falle die Beschaffenheit des Filtrates eine andere, indem dasselbe reicher an Eiweiss

wird, welches im normalen Kammerwasser nur in minimen Spuren vorhanden ist.

Der intraokulare Druck muss offenbar in jedem Augenblicke gleich sein dem Drucke des Blutes in den Gefässen, vermindert um den Betrag, welchem die Spannung der Wände Gleichgewicht hält. Hieraus folgt, dass jede Ursache, welche den Druck in irgend welchem Theile des Blutgefässsystemes im Innern des Auges steigert, ohne zugleich die Spannung der Gefässwände zu vermehren, auch den intraokularen Druck steigern muss. Dies muss schon von den Schwankungen des arteriellen Blutdruckes durch den Puls gelten. In der That hat K. WEBER, der in Gemeinschaft mit LUDWIG dies Gebiet zuerst betreten hat, vom Pulse sowie auch von der Respiration abhängige Schwankungen des intraokularen Druckes beobachtet. Bei Anwendung sehr enger Manometer, wie sie zu genauen Messungen hier nur anwendbar sind, zeigen sich indessen die Pulsschwankungen meist gar nicht. Jedenfalls sind diese Schwankungen ausserordentlich klein und müssen es auch sein, weil rasche bedeutende Druckschwankungen wohl dem feinen Nervenapparate der Netzhaut gefährlich werden könnten. Wahrscheinlich ist dafür gesorgt, indem das Blut ins Innere des Auges durch sehr enge und verhältnissmässig lange Arterienästchen geführt wird, in denen die Pulswelle zum grössten Theil erlischt.

Alle Ursachen, die den mittleren Druck in der Carotis auf die Dauer erheblich ändern, haben eine sehr merkliche Wirkung auf den intraokularen Druck. So fand ADAMÜK, dass bei Katzen und Hunden der Druck im Auge um 6—8 mm. sank, wenn die Carotis derselben Seite verschlossen wurde. GRÜNHAGEN und v. HIPPEL sowie A. WEBER wiesen nach, dass Verschliessung der Aorta descendens den intraokularen Druck bedeutend steigert. Die ersteren sahen ferner denselben um 10—16 mm. steigen bei Reizung des Halsmarkes. Ebenso steigt auch der intraokulare Druck, wenn durch Erstickung der Blutdruck im allgemeinen gesteigert wird. ADAMÜK hat nachgewiesen, dass Verschliessung der aus dem Bulbus oculi austretenden venae vorticosae eine Steigerung des Kammerwasserdruckes um 90 mm. bewirken kann. Dies ist begreiflich, da ja bei diesem Eingriffe der Druck in den Venen innerhalb des Bulbus die Höhe des arteriellen Druckes annehmen muss, und die Spannung der Venenwände doch kaum einen namhaften Werth besitzen wird. Dagegen steigert Verschliessung der grossen Halsvenen den intraokularen Druck nicht merklich. Dies wird verständlich, wenn man bedenkt, dass schon im normalen Zustande der Druck in den Venen



des Bulbus an der Austrittsstelle mindestens dem intraokularen Drucke gleich sein muss, da ja sonst die Venen im Innern komprimirt werden würden. Bis zu diesem Betrage aber von etwa 30 mm. müsste also der Druck im ganzen Gebiete der vena jugularis erst steigen, ehe eine Steigerung des intraokularen Druckes selbst durch Verschlussung der Halsvenen zu erwarten wäre.

Sehr merkwürdig, aber noch nicht ganz aufgeklärt, sind die Beziehungen des n. sympathicus und trigeminus zum intraokularen Drucke. Reizung dieser beiden Nerven hat nämlich Steigerung desselben zur Folge, während doch von der Reizung des Halssympathicus als Wirkung eher eine Herabsetzung zu erwarten wäre, da ja dadurch voraussichtlich die Spannung der Gefässwände im Bulbus gesteigert wird. Verschiedene Forscher suchen die Steigerung des Druckes bei diesen Nervenreizungen zu erklären, indem sie annehmen, dass dadurch die Absonderungsbedingungen des Augengewässers günstiger würden. Ein strenger Beweis ist indessen für diese Annahme nicht geliefert.

Endlich mag noch erwähnt werden, dass Einträufeln von Atropin eine geringe Minderung, Einträufeln von Nicotin eine Steigerung des intraokularen Druckes bewirkt.

#### IV. Umgebung des Augapfels.

Der Augapfel liegt in der sogenannten Augenhöhle. Da sie etwa die Gestalt einer vierseitigen Pyramide hat, so bleiben zwischen ihren Wänden und dem kugelförmigen Augapfel grosse Lücken. Diese sind ausgefüllt mit fetthaltigem Bindegewebe, durch welches die verschiedenen für den Augapfel bestimmten Nerven und Gefässe hinziehen, vor Allem der durch das Foramen opticum an der Spitze der Augenhöhlenpyramide in sie eintretende nervus opticus, an dem der Augapfel wie an seinem Stiel hängt. Vermöge des lockeren Zusammenhanges der dem Augapfel nächst anliegenden Bindegewebsschichten kann derselbe auf dem Fettpolster gleiten wie ein kugelförmiger Gelenkkopf in seiner Gelenkpfanne. Man kann ihm somit eine arthrodische Beweglichkeit zuschreiben, wie in dem Abschnitte über die Augenbewegungen genauer auszuführen ist.

Bewerkstelligt werden die Bewegungen des Augapfels durch 3 Paare von Muskeln. Die beiden Muskeln jedes Paares sind sehr annähernd Antagonisten. Das erste Paar rectus internus und externus, nahezu in der wagrechten Meridianlinie des Auges verlaufend, drehen es um eine ziemlich senkrechte Axe nach innen und nach

aussen. Das zweite Paar rectus superior und inferior, ungefähr in einer senkrechten Ebene, deren Grundriss auf dem Horizont von hinten und innen nach vorn und aussen gerichtet ist, drehen um eine wagrechte von aussen und hinten nach innen und vorn gerichtete Axe auf- und abwärts. Die Zugrichtungen des dritten Paares musculus obliquus superior und inferior liegen gleichfalls in einer senkrechten Ebene, deren Spurlinie am Horizont von hinten und aussen nach vorn und innen gerichtet ist, sie drehen also auch in entgegengesetztem Sinne um eine wagrechte Axe, die von hinten und innen nach vorn und aussen gerichtet ist. 5 der genannten Muskeln, nämlich die 4 recti und der obliquus superior, entspringen in der Umgebung des Sehnerveneintrittes dicht beieinander. Die 4 recti ziehen von da ziemlich geradlinig die Kantenrichtungen einer 4seitigen Pyramide einhaltend zu ihren Ansatzstellen am Bulbus, die ungefähr auf demselben Parallelkreis etwas vor dem Aequator liegen. Der obliquus superior zieht vom Ursprung nach dem oberen inneren Winkel des Augenhöhlenrandes und hier geht seine Sehne durch eine am Stirnbein befestigte sehnige Schlinge (die trochlea), in der sie fast ohne Reibung gleiten kann. Von der trochlea zieht die Sehne des obliquus superior scharf abknickend nach hinten und aussen unter dem musculus rectus superior durch, um sich als platter Streifen an der hinteren Bulbushälfte zu inseriren. Der obliquus inferior entspringt am inneren unteren Winkel des Augenhöhlenrandes und erreicht ohne plötzliche Richtungsänderung seinen Ansatz am äusseren hinteren Theile des Bulbus, von ihm bei der Ueberkreuzung durch den rectus inferior getrennt.

Der vordere, nahezu die Hälfte bildende Abschnitt des Augapfels, welcher über das Fettpolster der Augenhöhle hervorragt, ist zeitweise ganz, zeitweise zum Theil, bedeckt von den sogenannten Augenlidern. Es sind dies zwei verschiebbare Platten, bestehend aus einer festen bindegewebigen (nicht knorpeligen) Grundlage, dem Tarsus, welcher aussen von einer Fortsetzung der Gesichtshaut überzogen ist, innen von Schleimhaut, welche sich auf den bulbus oculi umschlägt und den aus dem Fettpolster vorragenden Abschnitt der sclerotica überzieht. Sie wird daher als Bindehaut tunica conjunctiva bezeichnet. Die äussere Gestalt des Augenlidspaltes und der Lider selbst in ihren verschiedenen Stellungen sind aus der Anschauung am Lebenden allgemein bekannt. In die beiden Tarsi sind etwa je 20 Drüsenschläuche mit seitlich anhängenden Läppchen eingelagert, die im Ganzen eine zu dem Lidrande nahezu senkrechte Richtung einhalten. Das Sekret dieser Tarsaldrüsen ist eine dickflüssige Fett-



emulsion, welche sie an den Lidrand ergiessen. Zwischen den Ausführungsgängen befinden sich die Wurzeln von etwa 100 starken Haaren in jedem Lide, der sogenannten Augenwimpern.

Die inneren sowohl als äusseren Enden der Tarsi sind durch ziemlich starke bandartige Bindegewebsstränge an die dem inneren und äusseren Augenwinkel gegenüberliegenden Stellen des knöchernen Augenhöhlenrandes angeheftet. Es entsteht so das innere Augenlidband, welches die inneren Enden der tarsi oder den inneren Augenwinkel an den Stirnfortsatz des Oberkiefers stark befestigt, und das etwas schwächere Augenlidband vom äusseren Augenwinkel nach dem Jochbeinrand. Die Tarsi sind übrigens ringsum durch eine Fascie an den Augenhöhlenrand angeheftet.

Die Augenlider werden bewegt durch einen aus verschiedenen Theilen zusammengesetzten Muskelapparat. An den oberen Rand des tarsus setzt sich der levator palpebrae superioris, er entspringt von der Umgebung des foramen opticum wie der m. rectus superior, über dem er in seiner ganzen Ausdehnung hinzieht, und wie dieser wird er auch vom nervus oculomotorius innervirt. Wie aus der Lage dieses Muskels zu schliessen ist und sein Name besagt, hat er die Aufgabe, durch seine Zusammenziehung das obere Augenlid zu heben und so zur Oeffnung des Augenlidspaltes mitzuwirken. Die dabei stattfindende Senkung des unteren Augenlides wird wesentlich durch die Schwere bewirkt, vielleicht jedoch zum Theil auch durch Zusammenziehung gewisser Muskelbündel, welche im Ganzen ähnlich verlaufen wie der Schliessmuskel der Augenlidspalte. Als solcher dient eine sehr dünne Muskelschicht, welche dicht unter der Haut beider Augenlider liegt und deren Fasern den Augenlidspalt in flachen Bogen umziehen. Jedoch gehen die Fasern des oberen Lides nicht an den Augenwinkeln in die des unteren über, so dass der Muskel nur uneigentlich dem äusseren Ansehen nach als „Ringmuskel“ (orbicularis palpebrarum) bezeichnet wird. Es entspringen vielmehr die Fasern des oberen sowohl als die des unteren Lides an dem inneren Lidband und setzen sich an das äussere fest. Indem sich die nach der Lidspalte konkaven Bogen bei der Contraktion in gerade Linien zu verwandeln streben, müssen sie die beiden Augenlider zusammen schieben und mithin den Lidspalt schliessen.

Diejenigen von den Anatomen zum Orbicularis gezählten Muskelfasern, welche oben sowohl als unten hart am freien Lidrande hinziehen, haben einen anderen Ursprung als die in weiteren Bogen verlaufenden. Sie entspringen nämlich etwas tiefer hinten in der Augenhöhle an der crista lacrymalis des Thränenbeins. Den An-

fangstheil dieser Faserbündel von der Ursprungsstelle bis zum inneren Augenwinkel, wo sie auf die Lidränder übertreten, hat man früher als einen besonderen Muskel unter dem Namen des HORNER'schen (*musculus sacci lacrymalis*) beschrieben. Auf Grund eingehender Zergliederung der Verhältnisse hat HENKE<sup>1</sup> die Behauptung aufgestellt, dass die in Rede stehenden Bündel keineswegs wie die bogenförmigen zur Schliessung des Lidspaltes, sondern dass sie vielmehr zu dessen Oeffnung mitwirken. HENKE macht nämlich darauf aufmerksam, dass die gerade Verbindungslinie vom Ursprung dieser Bündel an der *crista lacrymalis* zu ihrem mechanischen Ansatz am Rande des Jochbeins hinter dem Krümmungsmittelpunkt der Hornhaut hergeht und dass mithin die Zusammenziehung der Bündel die Lidränder vom Scheitel der Hornhaut nach hinten abgleiten machen muss. Gestützt wird diese Annahme durch die feine Beobachtung HENKE's, dass der innere Augenwinkel d. h. das Ende des inneren Augenlidbandes bei der Schliessung der Augenlider vortritt, bei ihrer Oeffnung zurückweicht, offenbar rückwärts gezogen durch die Zusammenziehung des HORNER'schen Muskels, der also bei diesem Akte betheiligt sein muss. Da er aber nichts Anderes ist als der Ursprungstheil jener am Lidrande hinziehenden Bündel des *orbicularis*, so werden sie im Ganzen einen Oeffner des Lidspaltes darstellen.

In den Conjunktivalsack nahe der Umschlagfalte oben und aussen ergiessen sich die 3—5 Ausführungsgänge der Thränendrüsen, welche in einer nischenartigen Vertiefung vom Jochfortsatze des Stirnbeins liegen.

Die Thränenflüssigkeit, deren Absonderung und Zusammensetzung in der Lehre von den Sekretionen abgehandelt ist, dient zur Feuchthaltung der freiliegenden Theile des Augapfels, der Ueberschuss derselben wird durch einen besonderen Mechanismus nach der Nase abgeleitet. In der Nähe der inneren Augenwinkel nämlich ist an jedem Lidrande eine kleine Papille auf deren Höhe die freie Ausmündung eines feinen Kanälchens liegt, das in den sogenannten *sacculus lacrymalis* ausmündet. Dieser stellt das obere etwas erweiterte Ende des aus der Anatomie bekannten Thränennasenganges dar, der weiter unten zwischen Knochen hindurch in den unteren Nasengang einmündet.

Es ist eine bekannte Thatsache, dass bei reichlicher Thränenabsonderung das Ueberfliessen derselben über den Lidrand durch häufigen Lidschlag verhindert werden kann, wobei der untere Nasen-

<sup>1</sup> HENKE, Die Oeffnung und Schliessung der Augenlider und des Thränensackes. Arch. f. Ophthalmol. Bd. IV. 2. Abth.



gang offenbar durch die dahin geführte Thränenflüssigkeit merklich feucht wird, oft in dem Grade, dass ein Bedürfniss der Entleerung durch die Nasenlöcher entsteht. Diese Erscheinung deutet darauf hin, dass der Lidschlag eine pumpende Wirkung äussert, welche die Thränenflüssigkeit rasch vom Bindehautsack zur Nasenhöhle fördert. Eine höchst ansprechende Erklärung dieser Pumpwirkung hat HENKE auf die schon oben von ihm entlehnten anatomischen Bemerkungen gegründet. Beim Schliessen der Augenlider nämlich wird wie wir sahen das innere Augenlidband aus seiner Nische etwas hervorgehoben und dadurch der Thränensack entfaltet, da seine vordere Wand mit jenem Bande verwebt ist. Dadurch wird eine saugende Wirkung ausgeübt, welcher die Thränenflüssigkeit durch die kleinen Thränenkanälchen folgen kann, indem die Thränenpunkte in den sogenannten Thränenbach eintauchen, der dem geschlossenen Augenlidrand entlang läuft, da die vorderen Ränder des Lidsaumes enger zusammenschliessen als die hinteren. Die im Thränennasenkanal befindliche Flüssigkeit kann der Saugwirkung weniger Folge geben theils — bei aufrecht stehendem Kopfe — wegen der Schwere theils aber vielleicht gehindert durch eine klappenartige Schleimhautfalte vor der Nasenmündung des Kanales. Bei jedem Lidschluss wird also der Thränensack Flüssigkeit vom Bindehautsack her ansaugen wenn solche vorhanden ist. Bei der Oeffnung der Augenlider ziehen sich nun nach HENKE's Annahme die von der crista lacrymalis entspringenden hinter dem Thränensacke herlaufenden und dann dicht am Lidspalt hinziehenden Bündel zusammen ihr Anfangstheil zieht das innere Augenlidband wieder zurück (siehe oben) und es wird also der Thränensack zusammengedrückt. Er kann sich aber nun nicht nach dem Bindehautsack hin entleeren, da die am Lidrand hinziehenden Bündel die zwischen ihnen befindlichen Thränenpunkte komprimiren, um so mehr als einige Fasern dieser Bündel die Thränenpunkte schlingenförmig umgreifen und somit eigentliche Sphinkteren derselben darstellen. Die bei Oeffnung der Augenlider aus dem Thränensacke ausgepresste Flüssigkeit kann also nur nach der Nasenhöhle entweichen, womit die pumpende Wirkung des abwechselnden Schliessens und Oeffnens der Lidspalte vollständig erklärt wäre.

---

## DRITTES CAPITEL.

## Numerische Bestimmung der für die Strahlenbrechung im Auge maassgebenden Grössen.

**I. Die Brechungsindices der durchsichtigen Augenmedien.**

Wenn jetzt der Gang von Lichtstrahlen durch das beschriebene System durchsichtiger Körper des Auges untersucht werden soll, so müssen erstens die Brechungsindices der einzelnen durchsichtigen Stoffe und zweitens die geometrische Natur und Lage ihrer Trennungsflächen bestimmt werden. Sollen die über den Gang der Strahlen aufzustellenden Gesetze auf ein bestimmtes lebendes Auge anwendbar sein, so müssten streng genommen die erwähnten Bestimmungen an diesem individuellen lebenden Auge selbst gemacht werden. Da indessen verschiedene normale Augen schwerlich sehr bedeutende Unterschiede der hier maassgebenden Grössen aufweisen werden, so wird es erlaubt sein, nachdem die Bestimmungen an einigen Augen ausgeführt sind, durchschnittliche Werthe derselben als normale in die Rechnung einzuführen und so den Gang der Lichtstrahlen durch das System zu behandeln.

Was zunächst die Brechungsindices betrifft, so lassen sich dieselben leider am lebenden Auge gar nicht bestimmen, und ist man daher auf Bestimmungen an Leichen angewiesen. Dies wäre indessen nur ein geringer Nachtheil, da KRAUSE<sup>1</sup> gezeigt hat, dass die Brechungsindices der Medien von Leichenaugen in den ersten 24 Stunden nach dem Tode keine merkliche Aenderung erleiden. Man ist hiernach berechtigt anzunehmen, dass diese Grössen im lebenden Auge dieselben Werthe haben, wie einige Stunden nach dem Tode. Bei verschiedenen Leichenaugen hat nun aber der soeben citirte Forscher merklich von einander abweichende Werthe der Brechungsindices gefunden. Es bleibt daher nichts anderes übrig, als aus einer möglichst grossen Anzahl von Bestimmungen an Leichenaugen Mittelwerthe zu berechnen. Schon verschiedene ältere Forscher, namentlich CHOSSAT und BREWSTER haben gelegentlich Bestimmungen der Brechungsindices einzelner Augenmedien ausgeführt. Ein besonders rei-

---

<sup>1</sup> Die Brechungsindices etc. Hannover 1855.



ches Material hat aber in neuerer Zeit KRAUSE herbeigeschafft, indem er an 20 Leichenaugen Messungen angestellt hat. Sie beziehen sich sämmtlich auf Strahlen von derjenigen Wellenlänge, welcher die hellste Stelle des Sonnenspektrums entspricht. Diese liegt zwischen den FRAUENHOFER'schen Linien *D* und *E* und zwar von *D* aus gerechnet etwa am Ende des ersten Drittels oder Viertels der Entfernung zwischen *D* und *E*. KRAUSE setzt für diese Strahlenart den Brechungsindex des Wassers nach den älteren klassischen Messungen = 1,33424 wodurch die Stelle des Spektrums genau bestimmt ist.

Diesen Bedingungen entsprechend ergab sich der Brechungsindex der Hornhautsubstanz im Mittel = 1,3507 der grösste Werth war 1,3569 der kleinste 1,3431, was auf eine ziemliche Breite der individuellen Schwankungen schliessen lässt.

Der Brechungsindex der wässrigen Feuchtigkeit war im Mittel = 1,3420 der grösste Werth = 1,3557 der kleinste = 1,3349. Der Brechungsindex des Glaskörpers beträgt im Mittel 1,3485, der grösste gefundene Werth war = 1,3569 der kleinste = 1,3361. HELMHOLTZ fand den Brechungsindex der wässrigen Feuchtigkeit und des Glaskörpers kleiner als KRAUSE ihn im Mittel fand nämlich = 1,3365 und = 1,3382. Ebenso fanden auch neuerdings FLEISCHER<sup>1</sup> und HIRSCHBERG<sup>2</sup> für diese Grössen Werthe, welche sich besser den von HELMHOLTZ gefundenen als den KRAUSE'schen Mittelzahlen anschliessen. Auch AUBERT<sup>3</sup> und MATTHIESSEN kamen zu ähnlichen Ergebnissen.

Eine besondere Betrachtung erfordern die Brechungsindices der Linse. Diese ist nämlich keineswegs ein optisch homogener Körper. Im Gegentheil hat der Brechungsindex jeder Linsenschicht einen andern Werth und zwar nimmt dieser Werth von der Oberfläche nach dem Kern stetig und regelmässig zu. Natürlich kann man nicht daran denken, diese Brechungsindices alle zu bestimmen. KRAUSE, der wie gesagt die ersten zahlreichen Bestimmungen der Brechungsindices gemacht hat, beschränkte sich daher darauf, aus jeder untersuchten Linse 3 Proben zu nehmen, eine von einer möglichst oberflächlichen Schicht, die zweite aus einer mittleren Schicht und die dritte aus dem innersten Kern. Die Schlussergebnisse dieser Untersuchung der Linsensubstanz sind in der nachstehenden Tabelle übersichtlich zusammengestellt.

1 S. FLEISCHER, Neue Bestimmungen der Brechungsexponenten der durchsichtigen flüssigen Medien des Auges. Inauguralabhdlg. Jena 1872.

2 HIRSCHBERG, Ophthalmologische Studien. Arch. f. Augen- u. Ohrenheilkunde IV. Sep.-Abdr. Wiesbaden 1874.

3 AUBERT's Darstellung der physiologischen Optik in dem Handbuch der gesammten Augenheilkunde, herausgeg. v. GRAEFE & SAEMISCH. II. S. 409. Leipzig 1876.

	Brechungsindex		
	der äusseren Linsenschicht.	der mittleren Linsenschicht.	des Kernes der Linse.
Maximum . . . . .	1,4743	1,4775	1,4807
Minimum . . . . .	1,3431	1,3523	1,4252
Mittel . . . . .	1,4053	1,4294	1,4541.

Endlich ist über die optischen Eigenschaften der Linse noch zu bemerken, dass dieser Körper in seiner natürlichen Form zwischen polarisirenden Vorrichtungen Spuren von Doppelbrechung zeigt, die wohl auf elastische Spannungen in seinem Innern zu beziehen sind. Da jedoch beim Sehakt keinerlei Wirkung dieser Doppelbrechung zum Vorschein kommt, so ist keine Veranlassung dieselbe weiter zu verfolgen.

Wenn man die Constanten des dioptrischen Systemes des Auges einer Diskussion des Ganges der Lichtstrahlen durch das Auge zu Grunde legen will, so kann man offenbar den unzählig vielen verschiedenen Brechungsindices der Linsen-Schichten nicht Rechnung tragen; man muss vielmehr für eine erste Annäherung die Linse als einen homogenen Körper betrachten und fragen, welchen Brechungsindex man ihrer Substanz beizulegen habe, damit möglichst nahezu derselbe optische Erfolg erzielt werde, damit namentlich die Brennweiten der homogen gedachten Linse gleich denen der wirklichen werden. Es wäre ein grosser Irrthum, wollte man der homogen gedachten Linse als Brechungsindex etwa den Mittelwerth der verschiedenen Brechungsindices der wirklichen Linsenschichten beilegen, man würde dadurch ein weit weniger „kollektives“ System erhalten, als es die wirkliche Linse ist. Ja wenn man der ganzen Linse den Brechungsindex des Linsenkerns beilegte, erhielte man immer noch ein zu wenig kollektives System.

Man kann sich von dem vorstehend ausgesprochenen Satze durch folgende Betrachtung überzeugen. Es ist erstens ohne weiteres in der Anschauung ersichtlich, dass man an jeder Stelle eines dioptrischen Systems eine parallelwandige Schicht eines beliebigen Mediums von verschwindend kleiner Dicke eingeschaltet denken kann ohne den Gang der Strahlen merklich zu ändern. Wir wollen nun die Linse uns beiderseits von unbegrenzten Mengen wässriger Feuchtigkeit umgeben und zwischen je zwei Schichten derselben ebenfalls eine unendlich dünne Schicht wässriger Feuchtigkeit denken. Dann haben wir ein System, dessen erstes und letztes Medium wässrige Feuch-



tigkeit ist, und dazwischen liegen alle Linsenschichten, sowie die bloss gedachten unendlich dünnen Schichten wässriger Feuchtigkeit. Das ganze System wird offenbar kollektiv wirken. Man kann aber dies System auch in Partialsysteme zerlegen, indem man jede Linsenschicht mit den beiden angrenzenden Schichten wässriger Feuchtigkeit für sich betrachtet. Von diesen Partialsystemen ist nur das vom Linsenkern gebildete kollektiv, die andern sind sämtlich dispansiv, denn jede der um den Kern gelagerten Linsenschichten ist auf ihrer konkaven Seite stärker gekrümmt als auf ihrer konvexen und bildet in wässriger Feuchtigkeit eingetaucht eine konvexkonkave Linse. Die dispansive Kraft einer solchen ist offenbar um so grösser, je mehr der Brechungsindex ihrer Substanz den des beiderseits angrenzenden Mediums übertrifft. Man wird also die dispansive Kraft aller dieser konvexkonkaven Linsen steigern, wenn man den Brechungsindex aller vermehrt bis zu dem Werthe, welcher dem Brechungsindex des Linsenkernes zukommt, d. h. wenn man die geschichtete Linse ersetzt denkt durch eine homogene vom Brechungsindex des Kernes. Es ist aber klar, dass eine Erhöhung der dispansiven Kraft der sämtlichen dispansiven Partialsysteme die kollektive Gesamtwirkung vermindern müsste, welche das ganze aus den Konkavlinsen und dem (kollektiv wirkenden) Kern ausübt. Somit ist bewiesen, dass eine homogene Linse, deren Brechungsindex dem des Linsenkernes entspricht, noch immer nicht so kleine Brennweiten besitzen wird, als die wirkliche geschichtete Linse. Will man also eine homogene Linse für die geschichtete setzen, so muss ihr ein Brechungsindex beigelegt werden, noch grösser als der des Linsenkernes. In den neueren Darstellungen der physiologischen Optik hat man — nicht ohne eine gewisse Willkür — als Brechungsindex der homogen gedachten Linse die Zahl  $1\frac{6}{11}$  angenommen, die zuerst von LISTING vorge schlagen ist und die den vorhin angegebenen KRAUSE'schen Mittelwerth 1,4541 des Brechungsindex des Linsenkernes um 0,0004 übertrifft. Jedesfalls giebt diese Zahl in die Rechnungen eingeführt sehr annähernd richtige Resultate. HELMHOLTZ hat an den Linsen von Leichen die Halbmesser der beiden Flächen und die Dicke zwischen den Scheiteln gemessen, und dann mit der Zahl  $1\frac{6}{11}$  als Brechungsindex die Brennweite berechnet. Andererseits hat er diese Brennweite direkt bestimmt und auf beiden Wegen nur sehr wenig abweichende Werthe gefunden.

Auch vom Brechungsindex der Hornhaut und der Linsenkapsel sind neuerdings einzelne Bestimmungen ausgeführt. Sie haben Werthe ergeben, die nicht sehr weit von denen des Brechungsindex der wässrigen

Feuchtigkeit abliegen. Da indessen bei unseren späteren Betrachtungen auf die Brechung an diesen Membranen doch keine Rücksicht genommen wird, so brauchen wir uns mit ihren Brechungsindices nicht zu beschäftigen.

Es verdient endlich noch bemerkt zu werden, dass MATTHIESSEN<sup>1</sup> auf Grund neuer Messungen behauptet, dass die Zunahme der Brechungsindices in den äussersten Linsenschichten rascher erfolge, als in den inneren. MATTHIESSEN schreibt diesem Umstande eine Bedeutung zu für Erhöhung des totalen Brechungsindex und für den Aplanatismus der Linse.

## II. Lage und Gestalt der Trennungsflächen.

Die geometrische Natur und Lage der Trennungsflächen zwischen den brechenden Medien kann am lebenden Auge annähernd bestimmt werden. Es dient hierzu die Spiegelung von aussen einfallenden Lichtes an diesen Flächen. Aeltere Methoden zu demselben Zwecke haben nur noch ein historisches Interesse und sind daher hier ganz zu übergehen.

Ganz unmittelbar ist die vordere Hornhautfläche der Beobachtung zugänglich und die Reflexion des Lichtes an ihr erzeugt ganz deutliche Bilder heller Gegenstände, welche von Alters her bekannt sind. Die Krümmung der Fläche mag nun im ganzen beschaffen sein wie sie wolle, immer wird man, wenn sie nur allseitig konvex ist, in erster Annäherung jedes kleine Stückchen derselben als Stückchen einer Kugelfläche betrachten können. Bei Spiegelung eines entfernten und nicht allzu ausgedehnten Gegenstandes kommt aber eben immer nur ein sehr kleiner Theil der Hornhautfläche als spiegelnde Fläche zur Wirkung. Man weiss nun aus der Katoptrik, dass bei einem konvexen Kugelspiegel die Grösse des Bildes sich zur Grösse des Objektes verhält wie der halbe Halbmesser der Kugelfläche zur Entfernung des Objektes vom Mittelpunkte der Kugel, unter der Voraussetzung dass der Objektabstand gegen den Halbmesser der Kugel sehr gross ist. Stellt man also in der genau gemessenen Entfernung  $p$  von der Hornhautfläche in einer Ebene, welche der Tangentialebene an den untersuchten Hornhautstücken parallel ist, ein geeignetes leuchtendes Objekt auf, von welchem eine Lineardimension  $l$  genau gemessen ist und gelingt es die entsprechende Lineardimension des Spiegelbildes  $l^*$  genau zu messen, so hat man zur Bestim-

---

<sup>1</sup> Grundriss der Dioptrik geschichteter Linsensysteme.



mung des Halbmessers  $r$  des als Kugelstück betrachteten spiegelnden Oberflächenstückes der Hornhaut die Gleichung

$$\frac{l^*}{l} = \frac{1/2 r}{r + p},$$

da indessen  $p$  jedenfalls ein sehr grosses Vielfaches von  $r$  sein muss, genügt es die Gleichung einfach so zu schreiben

$$\frac{l^*}{l} = \frac{1/2 r}{p}.$$

Es kommt also nur noch darauf an eine Methode zu finden, nach der die Bildausdehnung  $l^*$  genau gemessen werden kann. Man hat zu diesem Zwecke früher einfach ein auf kurze Entfernung einstellbares Fernrohr mit Okularmikrometer angewandt. Das hat aber zwei Uebelstände. Erstens muss man hier auch noch den Abstand des Fernrohres vom beobachteten Auge genau kennen und zweitens erfordert die Messung zwei Akte der Aufmerksamkeit des Beobachters, nämlich auf die beiden Punkte des Okularmikrometers, mit denen die beiden Enden des beobachteten Spiegelbildes zusammenfallen. Zwischen diesen beiden Akten der Aufmerksamkeit verstreicht aber eine gewisse Zeit und wenn während derselben das beobachtete Auge eine Bewegung gemacht hat, so geht der ganze Betrag derselben als Fehler in die Messung ein. Um diese Fehlerquellen zu beseitigen hat HELMHOLTZ einen Apparat konstruirt, durch welchen die Messung ausführbar ist in einem Akte der Aufmerksamkeit des Beobachters und ohne dass die Entfernung des Messinstrumentes vom beobachteten Auge bestimmt zu sein braucht. Dieses Instrument, das seither in der physiologischen und pathologischen Optik unter dem Namen des Ophthalmometers eine bedeutende Rolle spielt, ist auf folgendes Princip gegründet. Fällt von einem leuchtenden Punkte  $P$  ein Strahlenbündel schräg auf eine planparallele Glasplatte, deren Abmessungen gegen die Entfernung des leuchtenden Punktes klein sind, so wird hinter derselben ein Bündel entstehen, in welchem jeder Strahl dem entsprechenden einfallenden merklich parallel, aber um ein bestimmtes Stück verschoben ist und zwar nach dem Fusspunkte des Perpendikels vom leuchtenden Punkte auf der Glasplatte. Die in Linienmaass gemessene Verschiebung, welche jeder Strahl parallel mit sich erleidet, hängt lediglich ab vom Brechungsindex des Glases, der Dicke der Platte und dem Einfallswinkel der Strahlen. Je grösser dieser ist, desto grösser ist die lineare Verschiebung. Für irgend ein hinter der Glasplatte befindliches System, welches im Sinne des 1. Abschnittes optische Bilder liefert, wirkt also die Zwichenschiebung der Glasplatte genau so, als ob der leuchtende Punkt

um ein gewisses Stück zur Seite geschoben und ausserdem ein klein wenig angenähert wäre, auf welchen letzteren Umstand jedoch hier nichts ankommt. Man kann sich hiervon leicht überzeugen, wenn man durch eine mit der Hand vor das Auge gehaltene Glasplatte hindurchsieht. Sowie man sie schräg dreht, scheinen alle Objekte ein wenig nach der Seite zu weichen und zwar um so mehr, je schräger die Platte gegen die Sehrichtung gestellt wird. Es ist dabei auch leicht zu bemerken, dass der Werth der linearen Verschiebung unabhängig ist von der Entfernung der Objekte, so dass sie bei sehr entfernten Gegenständen gar nicht mehr wahrgenommen werden kann.

Statt eines Auges wollen wir uns nun zunächst hinter der Glasplatte das Objektiv eines auf kurze Distanzen einstellbaren Fernrohres denken. Ferner wollen wir die Glasplatte in zwei Stücke zerschnitten denken, von denen das eine vor der oberen, das andere vor der unteren Hälfte des Objektivs steht. Endlich sollen diese beiden Stücke der Glasplatte in einen Mechanismus eingefügt sein, vermöge dessen sie immer um gleiche Winkel in entgegengesetztem Sinne gedreht werden können, so dass die optische Axe des Fernrohres stets den Winkel halbirt, unter welchem sich die erweiterten Ebenen der Platten schneiden. Hiermit ist die wesentliche Einrichtung des Ophthalmometers gegeben. Sie ist in Fig. 8 mit Weglas-

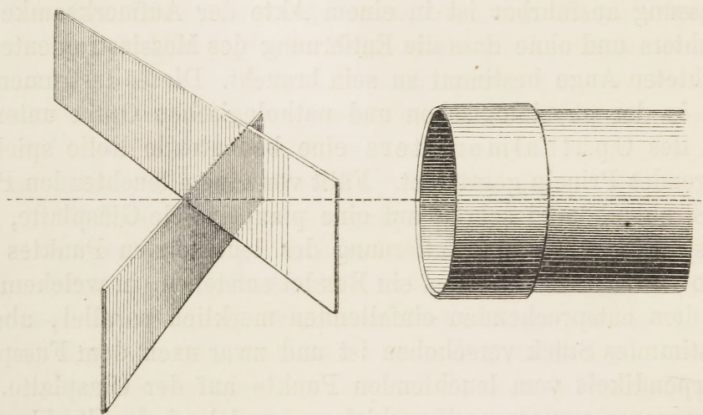


Fig. 8.

sung des Mechanismus, durch welchen die Glasplatten geführt werden, dargestellt. Der Erfolg ist nun leicht vorherzusehen, stellt man die beiden Platten senkrecht zur Axe des Fernrohres so, dass eine die Fortsetzung der andern bildet, dann wird von einem vor ihnen gelegenen Objekte durch das Fernrohr nur ein Bild gesehen werden. So-



wie man aber den Mechanismus anfängt zu drehen, zerfällt das Bild in zwei, welche um so weiter auseinanderrücken je kleiner der Winkel wird, unter welchem die Axe des Fernrohres die Platten schneidet. In der That jetzt zerfällt jedes von einem Punkte des Objektes ausgehende Strahlenbündel in zwei Hälften, die eine durch die obere schräge Platte gehende Hälfte verhält sich dahinter — also im Fernrohr — genau so, als ob sie von einem etwas zur einen Seite des wirklichen Objektpunktes gelegenen Punkte ausgegangen wäre, die andere Hälfte, durch die untere Platte gegangen, verhält sich im Fernrohr so, als wäre sie von einem um ebensoviel zur anderen Seite des wirklichen Objektpunktes gelegenen Punkte ausgegangen. In der Bildebene des Fernrohres müssen demnach von jedem Objektpunkte zwei Bildpunkte entstehen. Ist nun das ganze Objekt hinlänglich schmal, so wird man bei fortgesetzter Drehung der Platten zu einem Punkte kommen, wo der linke Rand des einen scheinbaren Objektes mit dem rechten des anderen zusammenfällt, wo also die Verschiebung der beiden scheinbaren Objekte gegeneinander ihrer Breite gleich geworden ist. Hat man also zum Voraus für jede Winkelstellung der Platten durch Rechnung oder empirisch die Verschiebung ermittelt, so hat man durch Bestimmung der zu dem gedachten Erfolge erforderlichen Winkelstellung eine Messung der Objektbreite ausgeführt, was wie man sieht in einem Akte der Aufmerksamkeit geschieht, ohne dass Bewegungen des Objektes dabei störend wären, da solche Bewegungen von beiden Bildern ganz gleichmässig mitgemacht werden.

Um nun die Krümmungshalbmesser einzelner Stücke der vorderen Hornhautfläche zu bestimmen, stellt man in grosser aber genau gemessener Entfernung von dem beobachteten Auge ein geeignetes Objekt auf, am besten besteht es aus drei Lichtflammen vor einem Maasstab, von denen zwei zu beiden Seiten eines Theilstriches dicht beisammen stehen, die andere vor einem weit davon entfernten Theilstriche. Der Maasstab steht auf einer vom beobachteten Auge nach seiner Mitte gezogenen Geraden senkrecht. Das Spiegelbild dieses Flammensystems in der Hornhaut des beobachteten Auges bildet nun für das Ophthalmometer das Objekt. Da es aus drei Lichtpunkthen besteht, von denen zwei ganz dicht zusammen liegen, ist es sehr geeignet, den Augenblick zu bestimmen, wo die Verschiebung der Doppelbilder gerade seiner Breite gleich ist, denn dieser Augenblick ist derjenige, wo das einzelne Lichtpunkthen vom einen Bilde gerade in die Mitte zwischen die beiden dicht beisammen liegenden Pünktchen vom andern Bilde getreten ist. Als Breite des Objektes

ist dann in Rechnung zu bringen die Strecke des erwähnten Maassstabes zwischen dem Theilstriche, vor welchem die einzelne Flamme steht und demjenigen, zu dessen beiden Seiten die beiden andern Flammen stehen. Natürlich kann man auch das Spiegelbild eines anderen hellen Objectes, z. B. einer entfernten Fensteröffnung, verwenden.

Durchmustert man auf diese Art verschiedene Stellen der Hornhaut desselben Auges, so findet man den Krümmungshalbmesser am Scheitel kleiner als gegen den Rand. Die Gestalt der vorderen Hornhautfläche weicht also sehr merklich von der Kugelgestalt ab und würde genauer zur Deckung gebracht werden können mit einem am Scheitel genommenen Abschnitte eines Ellipsoides, das durch Drehung einer Ellipse um ihre grosse Axe entstanden ist oder etwa einem an der Spitze einer Eioberfläche genommenen Abschnitte. Später werden wir noch eine andere Abweichung der Hornhautoberfläche von der Kugelgestalt zu berücksichtigen haben. Wenn man eine genügende Anzahl von Krümmungshalbmessern für genau bestimmte Stellen eines Meridianes der Hornhaut gefunden hat, so kann man natürlich die Elemente derjenigen Ellipse berechnen, welcher sich dieser Hornhautmeridian am genauesten anschliesst.

In nachstehender Tabelle sind die Ergebnisse dreier Systeme solcher Messungen wiedergegeben, welche HELMHOLTZ an den Augen von 3 weiblichen Individuen zwischen 25 und 30 Jahren ausgeführt hat und zwar beziehen sie sich auf den horizontalen Meridian der drei Augen.

Bezeichnung des Auges	A	B	C
Krümmungshalbmesser am Scheitel . . . . .	7,338	7,646	8,154
Quadrat der Excentricität . . . . .	0,4367	0,243	0,3037
Halbe grosse Axe . . . . .	13,027	10,100	11,711
Halbe kleine Axe . . . . .	9,777	8,788	9,772
Horizontaler Durchmesser des Umfangs . . . . .	11,64	11,64	12,092
Abstand des Scheitels von der Ebene des Umfangs .	2,56	2,531	2,511
Winkel zwischen der grossen Axe und der Gesichtslinie . . . . .	4°19'	6°43'	7°35'

Zu der letzten in der Tabelle aufgeführten Winkelgrösse sei noch bemerkt, dass unter „Gesichtslinie“ die Richtung des genauesten Sehens zu verstehen ist. Die Begründung für das Vorhandensein einer solchen kann erst in der Lehre von den Lichtempfindungen vollständig gegeben werden, doch mag schon hier bemerkt sein, dass sie im Sinne nach vorn verfolgt von der nach vorn verlängerten Symmetrieaxe des Auges meist sehr merklich nasenwärts abweicht.



Die Grösse dieses Winkels ist später noch von andern Forschern<sup>1</sup> an verschiedenen Augen gemessen und stets fand sich, dass die grosse Axe des Hornhautellipsoides schläfenwärts von der Gesichtslinie abwich.

Die Abweichung der vorderen Hornhautfläche von der Kugelgestalt ist offenbar von Vortheil für die Schärfe der Bilder, wenn bei weiter Pupille Strahlenbündel zur Wirkung kommen, deren Randstrahlen schon auf eine Zone der Cornea fallen, welche an deren Mittelpunkt einen nicht ganz kleinen Winkel umspannt, so dass die einschränkenden Bedingungen des ersten Abschnittes nicht mehr hinreichend erfüllt wären. Solche Strahlen würden nämlich an einer wirklichen Kugelfläche früher zur Vereinigung gebracht, als in dem Bildpunkte dessen Lage im ersten Abschnitte für ein sehr schmales Strahlenbündel bestimmt wurde. Diese Abweichung von der Homocentricität der an grösseren Kugelabschnitten gebrochenen Strahlenbündel nennt man Abweichung von der Kugelgestalt. Ein brechen- des System, in welchem diese Abweichung möglichst korrigirt ist, nennt man „aplanatisch“. Es ist klar, dass die schwächere Krümmung der Hornhaut gegen den Rand hin im Sinne des Aplanatismus wirken muss. Ausführlich hat hierüber neuerdings MATTHIESSEN<sup>2</sup> gehandelt. Schon vor längerer Zeit hat VOLKMANN<sup>3</sup> über den Aplanatismus des Gesammtauges Untersuchungen angestellt.

Aeltere Messungen von KOHLRAUSCH mit Okularmikrometer haben für den Krümmungshalbmesser der vorderen Hornhautfläche den durchschnittlichen Werth von 7,87 mm. ergeben.

An der Hinterfläche der Hornhaut findet keine merkbare Spiegelung statt. Der Grund dürfte darin zu suchen sein, dass wegen der kleinen Differenz zwischen den Brechungsindices der hier aneinandergrenzenden Medien die Spiegelung überhaupt sehr schwach ist und dass die von ihr gelieferten Bilder nothwendig ganz dicht neben die von der Vorderfläche der Hornhaut entworfenen Spiegelbilder derselben Objekte fallen müssen und daher neben diesen sehr hellen Bildern verschwinden.

Bezüglich der hinteren Hornhautfläche ist man daher auf direkte Messungen an Leichenaugen angewiesen. Solche haben ergeben, dass die Krümmung derselben wahrscheinlich etwas stärker ist, als die der vorderen, denn man findet regelmässig die Hornhäute von Leichen am Rande ein wenig dicker als in der Mitte. Uebrigens ist eine genaue Bestimmung der Krümmung der hinteren Hornhautfläche nicht

<sup>1</sup> MANDELSTAMM, Zur Ophthalmometrie. Arch. f. Ophthalmologie XI. 2. Abth. S. 259.

<sup>2</sup> Arch. f. Ophthalmologie XXIII. 1. Abth. S. 125.

<sup>3</sup> Wagner's Handwörterb. d. Physiol. Art. „Sehen“.

erforderlich, da die Brechung an ihr auf den Gang der Strahlen durch das Auge sicher nur von ganz verschwindendem Einflusse ist.

Man kann sich hiervon auf folgendem Wege überzeugen. Es ist schon weiter oben erwähnt, dass man in jedes brechende System an jeder Stelle eine verschwindend dünne Schicht eines durchsichtigen Körpers von beliebigem Brechungsindex eingeschaltet denken kann, ohne dass dadurch der Gang der Strahlen merklich verändert würde. Wir wollen uns nun an der vorderen Hornhautfläche eine solche verschwindend dünne Schicht wässriger Feuchtigkeit ausgebreitet denken, was ohnehin den thatsächlichen Verhältnissen entsprechen dürfte, da die hier immer vorhandene benetzende Schicht der Thränenflüssigkeit wohl in ihrer Brechkraft von der wässrigen Feuchtigkeit nicht merklich verschieden sein wird.

Jetzt werden wir also ein System vor uns haben, bestehend aus Luft, wässriger Feuchtigkeit (in kapillärer Schicht), Hornhautsubstanz, wässriger Feuchtigkeit. Lassen wir nun homocentrische Strahlenbündel in die erste Schicht wässriger Feuchtigkeit eintreten, so wird sich darin ein System von wiederum homocentrischen Strahlenbündeln bewegen, deren Centra wir für die weitere Brechung als Objektpunkte anzusehen haben und zwar, beiläufig gesagt, wenn sie hinter der Hinterwand der kapillären Schicht liegen als virtuelle. Wir wollen nun ein solches in dieser Schicht sich fortpflanzendes Strahlenbündel ins Auge fassen, die Entfernung seines Centrums von der wirklichen vorderen Hornhautfläche mit  $q$  bezeichnen und auf seine Brechung an derselben die Formel S. 9 anwenden, wollen aber für die wie immer nach hinten positiv gerechnete Entfernung des Bildpunktes von der Trennungsfläche einstweilen die Bezeichnung  $q^*$  einführen, so dass man hat

$$\frac{1}{q} + \frac{n}{q^*} = \frac{n-1}{r}$$

wo  $r$  den Halbmesser der vorderen Hornhautfläche und  $n$  den Brechungsindex beim Uebergang von Strahlen aus wässriger Feuchtigkeit in Hornhautsubstanz bedeutet. Da nun der absolute Brechungsindex der ersteren 1,3420, der der letzteren = 1,3507 ist, so ist

$$n = \frac{1,3507}{1,3420} = 1,00634$$

zu setzen. Bei der ausserordentlich geringen Abweichung dieses Werthes von 1 ist der aus obiger Formel sich ergebende Werth von

$$q^* = \frac{nqr}{(n-1)q - r} = \frac{nq}{(n-1)\frac{q}{r} - 1}$$

von  $-nq$  nicht merklich verschieden, so lange nicht  $\frac{q}{r}$  eine sehr



grosse Zahl ist, d. h. so lange nicht die Entfernung des Strahlen-centrums von der vorderen Hornhautfläche sehr gross ist gegen den Halbmesser derselben.

Das soeben gefundene Centrum des in der Hornhautsubstanz sich fortpflanzenden Strahlenbündels sehen wir nun als Objektpunkt an für die Brechung an der hinteren Hornhautfläche, deren Radius mit  $q$  bezeichnet werden soll. Für die Brechung beim Uebergang aus Hornhautsubstanz in die dahinter gelegene wässrige Feuchtigkeit gilt nun natürlich als Brechungsindex der reciproke Werth von  $n$ ,

d. h.  $\frac{1}{n}$  und es besteht also hier zwischen Objektabstand  $s$  und

Bildabstand  $s^*$  die Gleichung

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s^*} = \frac{1}{n} - \frac{1}{q} \quad \text{oder} \quad \frac{1}{s} + \frac{1}{ns^*} = -\frac{n-1}{nq}.$$

Es handelt sich aber um Bestimmung des Bildes von dem vorhin gefundenen Bilde, dessen Abstand von der vorderen Hornhautfläche  $q^*$  war. Der Abstand dieses Punktes von der hinteren Fläche der Hornhaut hat zum numerischen Werth  $q^* - d$ , wenn  $d$  die Dicke der Hornhaut bedeutet. Da aber diese Grösse in die neue Rechnung als Objektabstand eingeht, so muss  $s = -(q^* - d) = d - q^*$  gesetzt werden, und wenn man für  $q^*$  den gefundenen Näherungswerth  $-nq$  einsetzt, so hat man die Gleichung

$$\frac{1}{d + nq} + \frac{1}{ns^*} = -\frac{n-1}{nq}.$$

Hieraus ergibt sich

$$s^* = -\frac{\frac{d}{n} + q}{(n-1)\frac{d + nq}{nq} + 1}$$

also aus dem oben angeführten Grunde annäherungsweise

$$s^* = -\left(\frac{d}{n} + q\right).$$

Wenn wir aber die Entfernung des letzten Bildpunktes von der vorderen Hornhautfläche nach hinten durch  $p^*$  bezeichnen, so müssen wir zu dem soeben gefundenen Werthe von  $s^*$ , der von der zweiten Hornhautfläche nach hinten positiv gemessen wird,  $d$  addiren und haben also

$$p^* = d - \left(\frac{d}{n} + q\right) \quad \text{oder} \quad p^* = -q + \frac{n-1}{n} d.$$

Da aber die positive Richtung für die Messung der Objektabstände

$q$  nach vorn, der Bildabstände  $p^*$  nach hinten geht und die Rechnung sehen lässt, dass  $p^*$  und  $q$  entgegengesetztes Zeichen haben, ihr absoluter Werth aber sich nur um die sehr kleine Grösse

$$\frac{n-1}{n} d$$

unterscheidet, so zeigt sich, dass der Bildpunkt, den die beiden Brechungen an den Grenzen der Hornhautsubstanz hervorbringen, mit dem Objektpunkt fast genau zusammenfällt. Objektpunkt aber war das Centrum des in der kapillären Schicht vor der Hornhaut sich fortpflanzenden Strahlenbündels. Man sieht also, dass die aus der Luft kommenden Strahlenbündel in der wässrigen Feuchtigkeit fast genau ebenso verlaufen, als wenn man sich dieselbe bis an die vordere Hornhautfläche erstreckt denkt. Diese letztere Annahme kann man also getrost machen, was die weiteren Betrachtungen wesentlich vereinfacht. Doch mag noch hervorgehoben werden, dass diese Vereinfachung nur zulässig ist für Strahlenbündel, deren Centrum nicht sehr weit von der vorderen Hornhautfläche liegt, denn die Annäherung beruht ja darauf, dass die Grössen

$$(n-1) \frac{q}{r} \text{ und } (n-1) \frac{d+nq}{nq}$$

gegen 1 vernachlässigt werden, was nur angeht, wenn

$$\frac{q}{r} \text{ und } \frac{q}{q}$$

nicht sehr gross sind. Sie gilt also eigentlich nicht mehr, wenn  $q$  sehr gross ist, was bei Strahlenbündeln der Fall sein wird, die von Punkten in der Luft sehr nahe am Auge ausgegangen sind, und die also in der kapillären Schicht an der vorderen Hornhautfläche nahezu parallelstrahlig sein werden. Solche Strahlenbündel kommen indessen beim Sehakt im engeren Sinne des Wortes nicht in Betracht.

Jetzt muss zunächst die Entfernung des Scheitels der vorderen Linsenfläche vom Hornhautscheiden bestimmt werden. Um dies am Lebenden ausführen zu können, hat HELMHOLTZ ziemlich verwickelte Methoden angewandt, denen der folgende Gedankengang zu Grunde liegt. Erstens lässt sich ganz exakt nachweisen, dass, wie schon oben bemerkt wurde, der Pupillenrand der vorderen Linsenfläche unmittelbar anliegt. Wenn man nämlich einen sehr starken Lichtkegel, etwa von einer hellen Lampenflamme, durch eine Konvexlinse in das Auge fallen lässt, so erscheint die Linse graulich getrübt, indem in der starken Beleuchtung die Grenzen zwischen den Formelementen derselben hinlänglich viel Licht zerstreuen, um sichtbar zu werden. Wäre nun die Pupillarebene von der vorderen Linsen-



fläche durch einen Zwischenraum getrennt, so müsste von der Iris ein Schlagschatten auf die Linse fallen, der bei schrägem Einblick als eine dunkle Zone zwischen dem Pupillarrande und dem beleuchteten Theile der Linse sichtbar werden müsste, da dies nie der Fall ist, so besteht ein solcher Zwischenraum nicht. Der Linsenscheitel liegt also in der Pupillarebene sofern man von der Vorwölbung der konvexen Linsenfläche in die Pupille hinein absieht. Es wäre also zu dem vorgesetzten Zwecke genügend, die Entfernung der Pupillarebene vom Hornhautscheitel zu bestimmen, was folgendermaassen geschehen kann. Ist für das zu untersuchende Auge die Krümmung der Hornhaut und die Lage ihrer grossen Axe zur Gesichtslinie nach den früher beschriebenen Methoden bekannt, so kann man einerseits genau den Ort angeben, wo das Spiegelbild eines bestimmten leuchtenden Punktes liegt. Ferner kann man dann auch noch, wenn für den Brechungsindex der wässrigen Feuchtigkeit ein bestimmter Werth angenommen wird, die Beziehung herstellen zwischen der wirklichen Entfernung der Pupillarebene von der vorderen Hornhautfläche und der Entfernung des (virtuellen) Bildes derselben, das entsteht durch die Brechung der von den Punkten des Pupillarrandes ausgehenden Strahlenbündel an der vorderen Hornhautfläche bei ihrem Austritt in die Luft. Wir können dieses Bild die scheinbare Pupille nennen, sofern es das ist, was man als Pupille eines fremden Auges wirklich sieht.

Blickt man nun in ein Auge durch den Ophthalmometer und sucht eine Stellung so, dass die Doppelbilder des Hornhautreflexes von einem bekannten leuchtenden Punkt mit je einem Doppelbilde der Enden des wagrechten Durchmessers der scheinbaren Pupille zusammenfallen, so muss offenbar die auf das Hornhautspiegelbild gerichtete Axe des Ophthalmometers durch den Mittelpunkt der scheinbaren Pupille gehen. Sucht man nun zwei verschiedene solche Stellungen des Ophthalmometers in derselben horizontalen Meridianebene des Auges, so hat man zwei Richtungen, die sich nothwendig im Mittelpunkte der scheinbaren Pupille schneiden. Da auf jeder dieser Richtungen ein im Auge gelegener Punkt, nämlich der Ort des betreffenden Hornhautspiegelbildchens bekannt ist, so kann auch der Durchschnitt bestimmt werden. Ist dieser, d. h. also der Mittelpunkt der scheinbaren Pupille gefunden, so kann dann auch der Mittelpunkt der wirklichen Pupille bestimmt werden.

Die Ergebnisse der Messungen von HELMHOLTZ an denselben 3 Augen, auf welche sich die obigen Messungen S. 48 beziehen, sind in nachstehender kleinen Tabelle verzeichnet.





folge wenn er die Lichtflamme zu seiner Linken<sup>1</sup> hat. Die schwarze Scheibe soll die Pupille des beobachteten Auges bedeuten. Das von

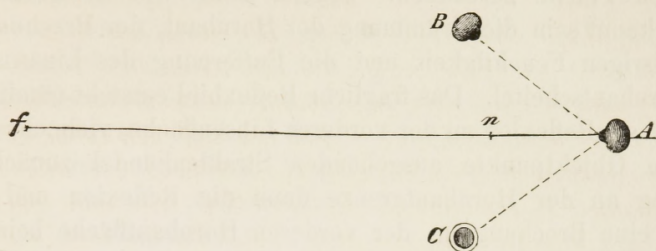


Fig. 9.

der Hornhautfläche gelieferte Spiegelbild *a* braucht übrigens nicht nothwendig im Bereich der Pupille zu erscheinen, wird es aber in der Regel bei den vorhin beschriebenen Anordnungen.

*b* ist das von der vorderen Linsenfläche gelieferte Spiegelbild. Es ist wie der Hornhautreflex ein aufrechtes Bild der Lampenflamme aber gegen jenen ein äusserst matter Schimmer mit nicht ganz scharfer Grenze. Die Form der Flamme ist gleichwohl ungefähr zu erkennen und man bemerkt leicht, dass es bei weitem grösser ist als der Hornhautreflex. Wenn

man das eigene Auge ein wenig hin- und herbewegt, so ändert das Bildchen *b* seine perspektivische Stellung in der Pupille bedeutend im gleichen Sinne mit der Bewegung des beobachtenden Auges und verschwindet meist schon bei mässigen Bewegungen hinter dem Pupillenrand. Daraus geht hervor, dass der Ort dieses (virtuellen) Bildchens weit (etwa 8—12 mm.) hinter der Pupille ist. Das dritte Bildchen *c* verdankt seine Entstehung der Spiegelung an der hinteren Linsenfläche; es ist ebenfalls bedeutend lichtschwächer als der Hornhautreflex und noch kleiner; als Spiegelbild von einem Hohlspiegel mit kleinem Radius ist es umgekehrt. Aus den kleineren perspektivischen Verschiebungen bei Bewegungen des beobachtenden Auges kann man schliessen, dass sein Ort nur etwa 1 mm. hinter der Pupillenebene liegt.

Wenn man nun von einem Gegenstand bekannter Grösse und bekannter Entfernung vom beobachteten Auge, das durch Reflex an



Fig. 10.

<sup>1</sup> Durch ein Versehen ist in Fig. 9 der Grundriss der Versuchsanordnung so dargestellt, dass der Beobachter die Lichtflamme zur Rechten hat. In diesem Falle würde die Anordnung der 3 Bildchen *a*, *b*, *c* die umgekehrte sein wie in Fig. 10.

der vorderen Linsenfläche entstehende Bild messen kann, so lässt sich daraus der Krümmungshalbmesser dieser als Kugelabschnitt betrachteten Fläche berechnen. Jedoch muss von demselben Auge noch bekannt sein die Krümmung der Hornhaut, der Brechungsindex der wässrigen Feuchtigkeit und die Entfernung des Linsenscheitels vom Hornhautscheitel. Das fragliche Reflexbild entsteht nämlich nicht durch blosse Reflexion an der vorderen Linsenfläche, vielmehr erleiden die vom Objektpunkte ausgehenden Strahlenbündel zunächst eine Brechung an der Hornhautgrenze dann die Reflexion und endlich wieder eine Brechung an der vorderen Hornhautfläche beim Rücktritt in die Luft. Dies dioptrisch-katoptrische System Luft, wässrige Feuchtigkeit, Linsenfläche, wässrige Feuchtigkeit, Luft lässt sich natürlich nach den Principien des ersten Abschnittes behandeln und wenn seine Constanten bis auf eine — hier den Halbmesser der spiegelnden vordern Linsenfläche — durch vorläufige andere Messungen bekannt sind, so kann eine fehlende berechnet werden, wenn man für ein bestimmtes Objekt die Grösse des Bildes gemessen hat.

Die Messung des Reflexbildes von der vorderen Linsenfläche kann nicht gut direkt mit dem Ophthalmometer ausgeführt werden weil es zu lichtschwach ist. HELMHOLTZ hat es daher indirekt gemessen durch Vergleichung mit einem Hornhautspiegelbild von einem andern Objekte, dessen Grösse beliebig verändert werden kann bis sein Hornhautbild dem zu messenden Linsenbild der stärkeren Lichtquelle gleich geworden ist.

Auf diese Weise hat HELMHOLTZ immer an denselben drei Augen den Krümmungshalbmesser der vorderen Linsenfläche bestimmt und zwar gefunden

für das Auge	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
	11,9	8,8	10,4.

Es gilt jetzt endlich noch die Lage und Krümmung der hinteren Linsenfläche zu ermitteln. Die Entfernung eines dem Scheitel jedesfalls sehr benachbarten Punktes der hinteren Linsenfläche vom Hornhautscheitel hat HELMHOLTZ am lebenden Auge sehr annähernd bestimmt nach einer Methode, die sich auf folgende Betrachtung gründet. Ein in *D* (Fig. 11) befindliches beobachtendes Auge sehe in der Richtung *Dd* das von der hinteren Linsenfläche des beobachteten Auges gelieferte Spiegelbild einer bei *C* befindlichen Lichtflamme. Bei der Kleinheit dieses Spiegelbildchens wird man den Theil der spiegelnden Fläche, welcher die wirksamen Strahlen liefert als einen Punkt ansehen können, er ist mit *i* bezeichnet und es ist alsdann die ge-



brochene Linie  $Cc i d D$  der Gang eines Lichtstrahles der von  $C$  in der Luft ausgeht, erst an der vorderen Hornhautfläche bei  $c$ , dann in einem nicht bezeichneten Punkte) an der vorderen Linsenfläche gebrochen hierauf reflektirt wiederum zweimal gebrochen bei  $d$  in Luft zurücktritt und sich nach  $D$  fortpflanzt. Genau denselben Weg würde ein von  $D$  ausgehender Lichtstrahl in umgekehrter Richtung verfolgen also am selben Punkte  $c$ , wo der erstgedachte eintrat, die Hornhaut verlassen um sich nach  $C$  fortzupflanzen. Man kann somit den Durchschnittspunkt  $h$  der beiden Richtungen  $cC$  und  $dD$  ansehen als das (virtuelle) Bild

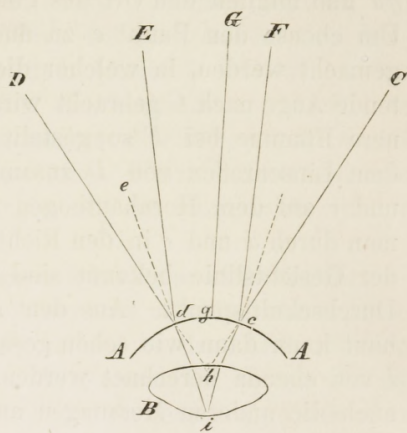


Fig. 11.

des in der Linsensubstanz gelegenen Objektpunktes  $i$  geliefert durch das brechende System Linsensubstanz — wässrige Feuchtigkeit — Luft. Könnte also die Lage von  $h$  zur Hornhaut genau bestimmt werden, so würde sich die Lage von  $i$  berechnen lassen, da die Constanten des genannten Systems nämlich der Halbmesser der Hornhaut der Ort der vorderen Linsenfläche sowie deren Halbmesser und endlich auch die Brechungsindices der wässrigen Feuchtigkeit und der Linsensubstanz für das Auge schon bekannt sind.

Die Lage des Punktes  $h$  oder des scheinbaren hinteren Linsenscheitels zur Hornhaut kann aber nur dann genau bestimmt werden, wenn die Punkte  $c$  und  $d$  an der Hornhaut genau bekannt sind, an welchen die beiden Strahlen in den bekannten Richtungen  $cC$  und  $dD$  aus der Hornhaut austreten. Bei der ersten oben gedachten Beobachtung kann nun schon der Punkt  $d$  bestimmt werden indem man gleichzeitig mit dem Reflex der Flamme  $C$  von der hinteren Linsenfläche einen Hornhautreflex einer anderen kleineren Flamme  $E$  beobachtet und diese so lange verrückt, bis ihr Hornhautreflex mit jenem Linsenreflex zusammenfällt dann ist offenbar der gesuchte Punkt  $d$  die spiegelnde Stelle der Hornhaut, diese aber kann gefunden werden, wenn man noch zuvor den Punkt  $g$  bestimmt hat wo die ebenfalls der Lage nach bekannt vorausgesetzte Gesichtslinie  $gG$  des beobachteten Auges die Hornhaut schneidet. Die Data der Beobachtung bestimmen nämlich den Winkel zwischen  $Ed$  und  $Gg$ , sowie den Winkel  $EdD$  dessen Hälfte zu jenem zwischen  $Ed$  und  $Gg$

addirt den Centriwinkel der beiden durch  $d$  und  $g$  gehenden Hornhautradialen ausmachen. Man kann sonach auch die Länge des Bogens  $gd$  und folglich den Ort des Punktes  $d$  auf der Hornhaut bestimmen. Um ebenso den Punkt  $c$  zu finden, muss eine zweite Beobachtung gemacht werden, in welcher die Flamme nach  $D$  und das beobachtende Auge nach  $C$  gebracht wird und wo abermals eine zweite kleinere Flamme bei  $F$  so gestellt wird, dass ihr Hornhautreflex mit dem Linsenreflex von  $D$  zusammenfällt. Sind aber die Punkte  $d$  und  $c$  auf dem Hornhautbogen  $AA$  bekannt, so findet sich, indem man durch  $d$  und  $c$  in den Richtungen  $Dd$  und  $Cc$ , deren Winkel mit der Gesichtslinie bekannt sind, Gerade zieht der Punkt  $h$  als ihr Durchschnittspunkt. Aus dem Abstand des Bildes  $h$  von der Hornhaut kann dann wie schon gesagt die Entfernung des Objektpunktes  $i$  von ebenda berechnet werden. An den drei Augen, an welchen auch die anderen Messungen ausgeführt sind, fand auf diese Weise HELMHOLTZ:

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Scheinbare Entfernung des hinteren Linsenscheitels von der Hornhaut ( $h$ ) . . . . .	6,775	7,003	6,658
Wirkliche Entfernung ( $i$ ) . . . . .	7,172	7,232	7,141

Zieht man hiervon die früher gefundenen Werthe für die Entfernung der Pupillarebene von der Hornhaut ab, so erhält man für die Dicke der Linse in der Axe gemessen die Werthe

3,148 mm.                      3,635 mm.                      3,402 mm.

Eine kleine Correktion bedürfen diese Werthe noch wegen der Vorwölbung der vorderen Linsenfläche in die Pupille. Mit Berücksichtigung der gemessenen vorderen Linsenkrümmung und der Pupillenweite hat HELMHOLTZ als korrigirte Werthe für die Linsendicke der drei Augen gefunden

3,414 mm.                      3,801 mm.                      3,555 mm.

Der grösste dieser Werthe erreicht aber noch nicht den kleinsten Werth der Linsendicke nämlich 4 mm. wie ihn frühere Forscher durch Messung an Leichenaugen bestimmt haben. HELMHOLTZ glaubt dies nicht auf individuelle Zufälligkeiten beziehen zu dürfen, sondern auf einen gespannten Zustand, in welchem sich die Linse während des Lebens befinde, wovon weiter unten noch zu handeln sein wird.

Was endlich den Halbmesser der hinteren Linsenfläche betrifft,



so könnte man denselben aus der Grösse des Reflexbildes in ganz ähnlicher Weise für ein lebendes Auge berechnen. Hier würden aber in die Rechnung noch zwei Elemente mehr eingehen nämlich die soeben bestimmte Linsendicke und der Brechungsindex der Linsensubstanz, von denen namentlich dem letzteren wie wir sahen doch nur mit einer gewissen Willkür ein bestimmter numerischer Werth beigelegt werden kann. Man könnte sich daher wohl damit begnügen, dem Krümmungshalbmesser einen Werth beizulegen, wie er sich aus Messungen an Leichenlinsen ergibt nämlich in runder Zahl 6 mm.

Die im Vorstehenden beschriebenen ophthalmometrischen Methoden sind von HELMHOLTZ später vervollkommenet worden, so dass seine Schüler<sup>1</sup> direkt die Grösse der Reflexbilder an den Linsenflächen ophthalmometrisch messen konnten. Es kommt für diesen Zweck wesentlich darauf an, ein sehr helles Objekt zu benutzen. Als solches diente die Zusammenstellung der Sonne mit einem Spiegelbild derselben. Nach dieser verbesserten Methode fand sich für ein gewisses Auge der Halbmesser der vorderen Linsenfläche = 9,8243 mm. und der der hinteren = 6,1249 mm.

Es ist jetzt noch die Frage aufzuwerfen, in wie weit die Mittelpunkte der drei als Kugelabschnitte betrachteten brechenden Flächen in eine grade Linie fallen und wie zu dieser Linie — der Augenaxe — die als Gesichtslinie definirte Gerade liege, deren Richtung durch den Fixationspunkt immer leicht zu bestimmen ist.

HELMHOLTZ hat zu diesem Zwecke folgendes Verfahren angewendet. Man denke sich bei *d* Fig. 12 das beobachtete Auge, dessen Linse und Hornhaut im Meridianschnitt angedeutet sind. Bei *a* sei das Auge des Beobachters und bei *b* eine Lichtflamme. Wäre nun das beobachtete Auge genau centriert, d. h. lägen die Mittelpunkte der drei spiegelnden Flächen genau auf einer Geraden, so müsste eine Stellung desselben ermittelt werden können, bei welcher seine Axe, nämlich die Gerade, welche die drei Mittelpunkte enthält,

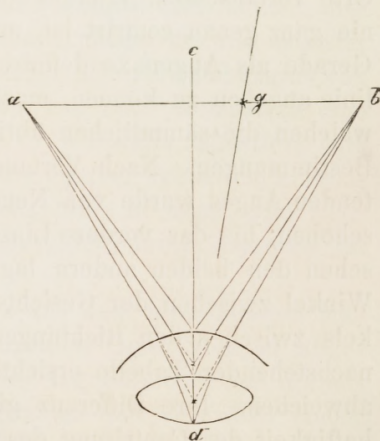


Fig. 12.

<sup>1</sup> Rosow, Zur Ophthalmologie. Arch. f. Ophthalmometrie XI. 2. Abth. S. 129.

den Winkel genau halbirt, den die Richtungen von  $b$  und von  $a$  nach einem Punkte dieser Axe mit einander machen. Behielte das beobachtete Auge diese Stellung bei, so müssten, wenn Beobachter und Licht ihre Orte vertauschen, die drei Reflexbilder wieder ganz genau nur umgekehrt in derselben Lage erscheinen wie vorher. Ueberdiess müsste in beiden Fällen das Spiegelbild von der vorderen Linsenfläche ziemlich genau in der Mitte liegen zwischen dem Hornhautreflex und dem hinteren Linsenreflex da der scheinbare vordere Linsenscheitel ziemlich genau mitten zwischen dem Hornhautscheitel und dem scheinbaren hinteren Linsenscheitel liegt.

HELMHOLTZ prüfte nun viele verschiedene Augen auf folgende Art. Dem beobachteten Auge wurde aufgegeben ein verschiebbares Gesichtszeichen  $g$  zu fixiren. Dies wurde dann so lange hinuntergerückt bis von  $a$  aus gesehen das vordere Linsenbild mitten zwischen dem Hornhautbild und dem hinteren Linsenbild von  $b$  erschien. Es ergab sich vor allem, dass dies niemals eintrat, wenn  $g$  in der Linie  $cd$  stand, welche den Winkel zwischen  $ad$  und  $bd$  halbirt, immer musste  $g$  etwas nasenwärts von  $c$  und oberhalb der Ebene  $abd$  befinden. Ferner zeigte sich, dass stets die drei Bilder sehr merklich andere gegenseitige Lagen hatten, wenn bei festbleibendem beobachteten Auge die Flamme und das Auge des Beobachters ihre Orte vertauschten. Hieraus geht hervor, dass das menschliche Auge nie ganz genau centrirt ist, um aber doch wenigstens annähernd eine Gerade als Augenaxe definiren und ihren Winkel mit der Gesichtslinie angeben zu können, machte HELMHOLTZ für die drei Augen, an welchen die sämtlichen übrigen Grössen gemessen waren, folgende Bestimmungen. Nach Vertauschung der Flamme und des beobachtenden Auges wurde von Neuem das Gesichtszeichen  $g$  so lang verschoben, bis das vordere Linsenspiegelbild wieder in der Mitte zwischen den beiden andern lag. So erhielt er für jedes Auge zwei Winkel zwischen der Gesichtslinie und der Halbirungslinie des Winkels zwischen den Richtungen  $ad$  und  $bd$ , deren Werthe, wie aus nachstehender Tabelle ersichtlich ist, nicht sehr weit von einander abweichen. Ihre Differenz giebt eine Vorstellung von der Mangelhaftigkeit der Centrirung des Auges.

Auge	Winkel	
	Licht von der Nasenseite.	Licht von der Schläfenseite.
$A$	$3^{\circ}47'$	$4^{\circ}57'$
$B$	$5^{\circ}6'$	$8^{\circ}12'$
$C$	$5^{\circ}43'$	$7^{\circ}44'$



Das arithmetische Mittel zwischen diesen beiden Winkeln kann man ansehen als den Winkel zwischen der Gesichtslinie und derjenigen Geraden im Auge, die wenigstens annähernd als Symmetrieaxe des Auges gelten kann.

## VIERTES CAPITEL.

### Das schematische Auge.

#### I. Die Kardinalpunkte des schematischen Auges.

Aus den Bestimmungen des vorigen Capitels geht hervor, dass das menschliche Auge keineswegs ein vollkommenes centrirtes System sphärischer Trennungsflächen zwischen verschiedenen brechenden durchsichtigen Medien darstellt, wie es in den Entwicklungen des ersten Capitels vorausgesetzt wird. Sowohl die Kugelgestalt als die Centrirung der Flächen des Auges steht weit zurück hinter der unserer künstlichen optischen Werkzeuge. Es ist ferner zu bemerken, dass nur bei ziemlich enger Pupille und für Objektpunkte, die nicht weit seitwärts von der Axe liegen, die einschränkenden Bedingungen erfüllt sind, unter welchen die im ersten Abschnitte entwickelten Regeln Geltung haben. Da nun aber für die zunächst um die Scheitel herumliegenden Theile der Trennungsflächen die Abweichungen von der Kugelgestalt nur klein sein können und auch wenigstens eine annähernde Centrirung statthat, so ist es jedesfalls gestattet, fürs erste auf das Auge die für ein centrirtes System sphärischer Trennungsflächen gültigen Regeln anzuwenden, um eine annähernd richtige Vorstellung vom Gange der Lichtstrahlen durch dasselbe zu erhalten.

Zu diesem Zwecke hat HELMHOLTZ aus dem mitgetheilten Material ein System von Werthen der einzelnen Constanten in abgerundeten Zahlen ausgewählt, das sicher im Bereiche der normalen individuellen Schwankungen gelegen ist und das also einem wirklichen Auge zukommen könnte. Wir wollen dies System als schematisches Auge bezeichnen.

Die gewählten Werthe sind folgende:

Brechungsindex der Luft . . . . .	1
Brechungsindex der wässrigen Feuchtigkeit . . . . .	$103/77 = 1,337661$
Brechungsindex der Linsensubstanz . . . . .	$16/11 = 1,4545$
Brechungsindex des Glaskörpers . . . . .	$103/77$

Halbmesser der Hornhautkrümmung . . . . .	8 mm.
Halbmesser der vorderen Linsenkrümmung . . . . .	10 „
Halbmesser der hinteren Linsenkrümmung . . . . .	6 „
Abstand des vorderen Linsenscheitels vom Hornhautscheitel	3,6 „
Abstand des hinteren Linsenscheitels vom Hornhautscheitel	7,2 „

Es mag bemerkt sein, dass schon vor mehr als dreissig Jahren LISTING aus dem damals vorliegenden Material von sehr unvollkommenen Messungen mit überaus glücklichem Takte ein schematisches Auge kombinirt hat, das nur wenig von dem obigen abweicht.

Nach dem Erscheinen von HELMHOLTZ's Arbeiten sind von seinen Schülern und von andern neueren Forschern insbesondere von WOINOW, KNAPP, BECKER, MAUTHNER, HIRSCHBERG zahlreiche ophthalmometrische Untersuchungen an lebenden Augen angestellt. Ihre Resultate würden vielleicht gestatten ein neues System von optischen Constanten zu bilden, das mit noch grösserem Rechte als das HELMHOLTZ'sche schematische Auge Anspruch machen könnte, das mittlere normale menschliche Auge darzustellen. Ich habe mich gleichwohl nicht zu dieser Neuerung entschliessen können. Die HELMHOLTZ'schen Werthe, die sich leicht dem Gedächtnisse einprägen, haben sich mit Recht in alle Darstellungen eingebürgert und würde eine neue Auswahl nur verwirren, ohne doch einen wesentlichen Vortheil zu bringen, da die neu zu wählenden Werthe doch nur sehr wenig von den HELMHOLTZ'schen verschieden sein könnten. Diese widersprechen keiner einzigen wesentlichen Erscheinung des Sehens.

Wenn man das System der gewählten Constanten in die Rechnung S. 23 f. einsetzt, so ergibt sich die Lage der Kardinalpunkte in der Axe des Auges wie folgt. Dabei ist als Anfangspunkt der Scheitel der Hornhaut genommen und die Coordinate eines Punktes positiv gerechnet, wenn der Punkt hinter der Hornhaut, negativ, wenn er vor der Hornhaut in der Luft liegt:

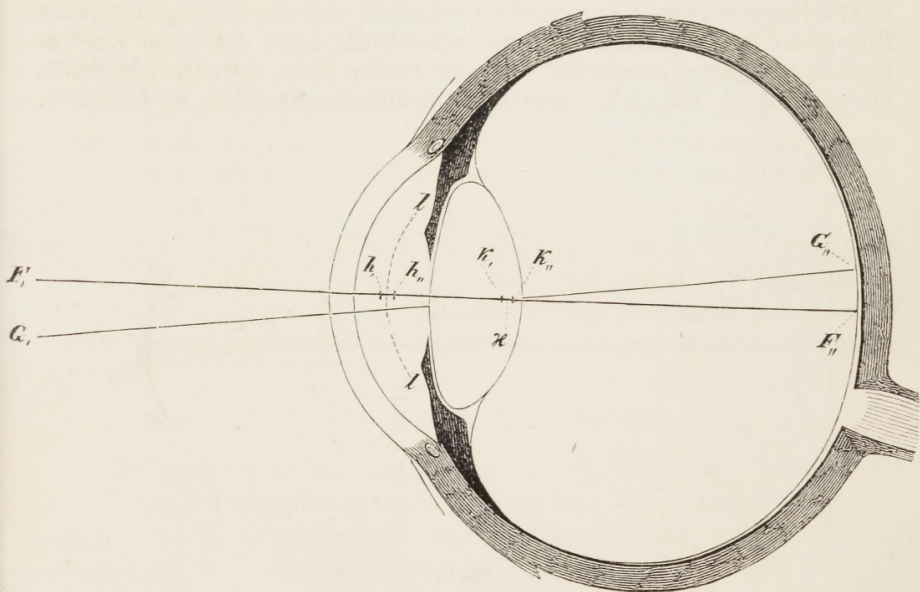
Erster Brennpunkt . . . . .	$F$ . . . . .	— 12,92
Erster Hauptpunkt . . . . .	$E$ . . . . .	1,94
Zweiter Hauptpunkt . . . . .	$E^*$ . . . . .	2,36
Erster Knotenpunkt . . . . .	$K$ . . . . .	6,95
Zweiter Knotenpunkt . . . . .	$K^*$ . . . . .	7,37
Zweiter Brennpunkt . . . . .	$F^*$ . . . . .	22,23
Erste Brennweite = $E - F$ . . . . .	$f$ . . . . .	14,86
Zweite Brennweite = $F^* - E^*$ . . . . .	$f^*$ . . . . .	19,87

Da, wie vorstehende Tabelle zeigt, die beiden Hauptebenen sehr nahe zusammenliegen, so kann man sie für die weiteren Konstruktionen zu einer einzigen verschmolzen denken, welche eine mittlere Lage einnimmt. Ebenso kann man die beiden Knotenpunkte in einen ein-



zigen verschmelzen. Diese Verschmelzung würde soviel heissen als: die sämtlichen Brechungen in den Augenmedien bringen fast genau dieselbe Wirkung hervor, welche eine einzige Fläche hervorbringen würde, welche Luft und Glaskörper trennte, deren Scheitel im verschmolzenen Hauptpunkte läge und deren Halbmesser gleich der Entfernung des einen Hauptpunktes von dem einen Knotenpunkte wäre.

Da nun nach den obigen Angaben die Länge der Augenaxe von Pol zu Pol 23—26 mm. beträgt und da den normalsichtigen Augen im Allgemeinen gerade die kleineren Werthe der Axenlänge zukommen, so hindert uns nichts unserem schematischen Auge eine Axenlänge von 23 mm. beizulegen. Wenn man alsdann auf die Dicke der Sclerotica und Chorioidea 0,76 mm. in Abzug bringt, so fällt der hintere Brennpunkt des Auges in den Bereich der äusseren Netzhautschichten und das nächste Stück der Netzhaut um den hinteren Pol herum, soweit es noch als eben betrachtet werden kann, fällt mit der hinteren Brennebene des Auges zusammen.



Die Lage der Kardinalpunkte des schematischen Auges sowie der Trennungsflächen und der Sclerotica ist in dreifacher Vergrößerung aller Abmessungen in Fig. 13 dargestellt.  $ll$  ist die gedachte

einzigste Trennungsfläche zwischen Luft und Glaskörper, welche annähernd dieselbe Wirkung hervorbringen würde, wie die wirklichen Brechungen im Auge.  $z$  ist der verschmolzene Kreuzungspunkt  $h$ , und  $h_1$ ,  $h_2$  sind die beiden Hauptpunkte, welche sonst im Text mit  $EE^*$  bezeichnet sind.  $K_1$  und  $K_2$  sind die Knotenpunkte,  $F_1$  und  $F_2$  die Brennpunkte. Im übrigen wird die Figur keine Erklärung bedürfen. Sie kann als Darstellung eines wagrechten Meridianschnittes durch ein rechtes Auge von oben betrachtet angesehen werden.

Den Strahl des von einem Objektpunkte ins Auge fallenden Strahlenbündels, welcher durch den ersten Knotenpunkt geht, nennt man den „Richtungsstrahl“ des Objektpunktes. Den aus der Verschmelzung beider Knotenpunkte entstehenden Punkt nennt man daher auch den Kreuzungspunkt der Richtungsstrahlen. Den Winkel zwischen den beiden Richtungsstrahlen zweier Objektpunkte nennt man den „Gesichtswinkel“ oder „Sehwinkel“, unter welchem der Abstand der beiden Objektpunkte erscheint.

Man hat sich wiederholt bestrebt einen oder den andern der Kardinalpunkte des Auges direkt am lebenden Auge zu bestimmen, aber erst in allerjüngster Zeit ist es BERNSTEIN gelungen, eine von allen principiellen Einwänden freie Methode zu finden, wonach die Lage des einen Knotenpunktes wenigstens annähernd bestimmt werden kann. Der Grundgedanke dieser Methode von einigen kleinen Korrekturen abgesehen ist folgender.

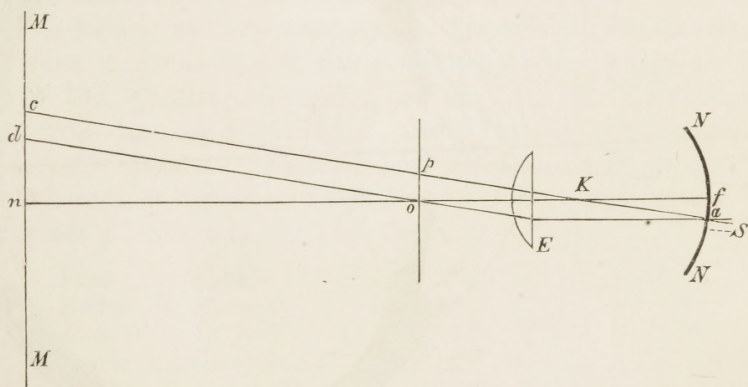


Fig. 14.

$NN$  sei der wagrechte Meridianschnitt einer Netzhaut die mit der Brennebene zusammenfällt, bei  $S$  sei die Eintrittsstelle des Sehnerven. In nicht grosser Entfernung sei ein Fixationszeichen bei  $n$  aufgestellt und hier befinde sich senkrecht zur Gesichtslinie  $fn$  ein Maassstab  $MM$ . Längs desselben verschiebe man einen leuchtenden Punkt und merke dessen Lage  $c$ , für welche sein Bild von  $f$  aus an die Eintrittsstelle des Sehnerven



bei  $a$  kommt, was sich dadurch zu erkennen giebt, dass in diesem Augenblick der Punkt für das Auge verschwindet wie später entwickelt werden wird. Offenbar liegt der Knotenpunkt  $K$  auf der Linie  $ca$ . Jetzt wird nahe vor das Auge in genau gemessener Entfernung von der Hornhaut ein Schirm senkrecht zur Gesichtslinie gestellt mit einem feinen Löchelchen  $o$  das in die Gesichtslinie gebracht wird. Durch dasselbe fixirt wieder das Auge und zwar ohne alle Anspannung des Akkommodationsapparates das Gesichtszeichen  $n$ . Jetzt wird der leuchtende Punkt so lange verschoben bis der von ihm durch  $o$  gehende Strahl wieder den Punkt  $a$  am Rande der Eintrittsstelle des Sehnerven trifft. Die dazu erforderliche Lage sei  $d$ , dann ist offenbar, weil  $NN$  die Brennebene des Auges ist, die Richtung  $do$  parallel zu  $ca$  und  $dc = op$  mithin

$$oK = \frac{on}{dn} \cdot op = \frac{on}{dn} dc,$$

da aber die Längen  $on$ ,  $dn$ ,  $dc$  direkt gemessen sind, kann man  $oK$  berechnen und wenn man hiervon den Abstand des Schirmes von der Hornhaut abzieht, so hat man die Entfernung des Knotenpunktes von der Hornhaut. Da nun aber der Punkt  $n$  und der Maassstab, wie man leicht sieht, nicht sehr weit vom Auge abstehen darf, so muss das Auge zuerst ohne Schirm mit Anspannung des Akkommodationsapparates fixiren wodurch, wie schon eingangs angedeutet, eine kleine Correktion nöthig wird, eine zweite Correktion ist erforderlich, wenn man die Verschmelzung der beiden Knotenpunkte in einen einzigen nicht zulassen will. BERNSTEIN hat nach dieser Methode an einem Auge 3 Systeme von Messungen ausgeführt, welche die sehr gut übereinstimmenden Werthe von 7,22; 7,38; 7,21 mm. für den Abstand des Knotenpunktes vom Hornhautscheitel ergaben. Wie man sieht stimmen diese Werthe auch sehr nahe zusammen mit dem für das schematische Auge berechneten Werthe dieser Grösse.

Eine andere Methode hat neuerdings BADAL<sup>1</sup> angegeben um den Knotenpunkt zu bestimmen. Sie gründet sich auf die Bemerkung dass der Brennpunkt einer vor das Auge gehaltenen Linse mit dem Knotenpunkt zusammenfallen muss, wenn durch dieselbe gesehen dasselbe Objekt in verschiedenen Abständen unter demselben Gesichtswinkel erscheint.

## II. Das emmetropische Auge.

Der optische Erfolg, der für das schematische Auge berechneten Lage der Cardinalpunkte und insbesondere der Annahme des Zusammenfallens der Polarzone der Netzhaut mit der zweiten Brennebene kann in folgenden Sätzen ausgesprochen werden: Alle parallelstrahlige einfallenden Bündel, die nur wenig schräg zur Axe verlaufen werden in Punkten der als eben betrachteten Polarzone der Netzhaut vereinigt; oder mit andern Worten: Die Bildpunkte aller Objektpunkte, deren Entfernungen als unendlich gross gegen die Brennweiten gelten

<sup>1</sup> Gaz. d. hôpitaux 1877. p. 379 und Gaz. méd. d. Paris 1877. p. 225.

können und die gar nicht oder wenig abseits von der Axe liegen, fallen in Punkte der Polarzone der Netzhaut.

Hiermit stimmt die allgemein bekannte Thatsache überein, dass es viele Augen giebt, welche kosmische Objekte wie den Mond und die Sterne oder auch sehr entfernte terrestrische wie einen Berggipfel und dergl. vollkommen deutlich sehen, was ja die Entstehung eines deutlichen Bildes in Coincidenz mit einer Netzhautschicht zur Voraussetzung hat. Man pflegt diese Beschaffenheit des Auges als die eigentlich normale anzusehen, und man nennt ein Auge, bei welchem die hintere Brennebene mit der Polarzone der Netzhaut zusammenfällt, ein „emmetropisches“.

Es verdient ausdrücklich hervorgehoben zu werden, dass die bis jetzt angestellten Betrachtungen gar nichts aussagen über den Gang derjenigen Strahlenbündel durch das Auge, welche von weit abseits der Axe gelegenen Punkten ausgegangen sind, denn auf solche sehr schräg durch ein System centrirter Trennungsflächen gehende Strahlen leiden die Gesetze des ersten Abschnittes keine Anwendung. Es verdient aber andererseits auch hervorgehoben zu werden, dass diese sehr schräg ins Auge gelangenden Strahlenbündel zum eigentlichen genauen Sehen so gut wie gar nicht beitragen, weil, wie später noch zu erörtern sein wird, nur ein sehr kleines Netzhautstück um den hinteren Pol herum so organisirt ist, dass dicht nebeneinander liegende Elemente unterscheidbare Empfindungen vermitteln können. Wie ausserordentlich begrenzt dieser fein organisirte Netzhautbezirk ist, kann man leicht durch folgenden Versuch erfahren. Man lege ein Buch mit gewöhnlicher Druckschrift in etwa 25 cm. Entfernung vor das Auge, bedecke es mit einem weissen Blatt Papier, auf welchem ein Punkt als Fixationszeichen angebracht ist, nun rücke man für einen Moment das bedeckende Blatt fort und schiebe es sofort wieder an seine vorige Stelle. Man wird dann schwerlich mehr als ein Wort von 5 mm. Länge deutlich lesen können, was einem Gesichtswinkel von etwas über  $1^{\circ}$  entspricht. Wenn also ein Objektpunkt nur soweit abseits der Axe liegt, dass sein Richtungsstrahl mit der Gesichtslinie (die hier als Axe gelten muss) einen Winkel von etwas über  $\frac{1}{2}^{\circ}$  macht, so fällt der Bildpunkt schon auf Theile der Netzhaut, die für so genaues Sehen, wie es zum Lesen erforderlich ist, nicht mehr geeignet sind. Aus dem bloss dioptrischen Gesichtspunkt würden sicher weit mehr seitlich gelegene Objektpunkte noch zulässig sein. Wir sind somit berechtigt, fürs erste die schräg einfallenden Strahlenbündel noch ganz 'ausser Acht zu lassen und noch einige weitere Betrachtungen anzustellen, die sich in aller Strenge



nur auf Objektpunkte beziehen, deren Richtungsstrahlen sehr kleine Winkel mit der Axe bilden. Das Sehen der Objekte, deren Bilder ganz nahe an den Pol der Netzhaut fallen und das, wie soeben erörtert wurde, allein ein genaues ist, nennt man das „direkte Sehen“. Im Gegensatze hierzu wird das Sehen weiter von der Axe entfernt gelegener Objekte das „indirekte Sehen“ genannt.

Lassen wir jetzt einen Objektpunkt oder ein in einer zur Axe senkrechten Ebene befindliches System von Objektpunkten aus der unendlichen Ferne an ein emmetropisches Auge heranrücken, so wird das System von entsprechenden Bildpunkten aus der zweiten Brennebene also aus der Retina nach hinten herausrücken. Die konvergierenden Strahlenkegel werden also nicht mehr zur wirklichen Vereinigung kommen, sondern schon vor der Spitze in mehr oder weniger grossen Kreisen — sogenannten Zerstreuungskreisen — von der Netzhaut geschnitten werden. Indem mehrere solche Zerstreuungskreise, die benachbarten Objektpunkten entsprechen, in einander übergreifen und somit nicht mehr jeder Netzhautpunkt nur von einem leuchtenden Punkt aus erregt wird, können nicht mehr ebensoviele Objektpunkte durch gesonderte Empfindungen unterschieden werden, als es selbständig empfindende Stellen in dem beleuchteten Netzhautstücke giebt. Das heisst mit anderen Worten das Sehen hat nicht mehr den Grad von Deutlichkeit, welcher bei vollkommen scharfen optischen Bildern erreichbar ist.

Diese Undeutlichkeit des Sehens wird indessen noch nicht sehr merklich solange die Entfernung des Objektes vom emmetropischen Auge zwar endlich aber noch sehr gross ist. In der That ist ja das Herausrücken des Bildes aus der hinteren Brennebene bei der gedachten Bewegung des Objektes anfangs sehr langsam, so dass die Kreise, in welchen die Retina die Strahlenkegel schneidet der Spitze noch sehr nahe liegen und folglich unmerklich kleine Durchmesser haben. Selbstverständlich hängt übrigens die Grösse der Zerstreuungskreise auf der Netzhaut ausser von der Entfernung ihrer Ebene von den Spitzen der Lichtkegel in der Bildebene noch ab von der Basis dieser Kegel, welche für alle durch die Pupille gebildet wird oder genauer gesprochen durch das von der Linse entworfene optische Bild der Pupille. Nachstehende Tabelle giebt unter Voraussetzung eines Pupillendurchmessers von 4 mm. eine Anzahl von zusammengehörigen Werthen der hier in Betracht kommenden Grössen. Die erste im Sinne der früheren Bezeichnungsweise mit  $p-f$  überschriebene Spalte giebt an, wie weit das Objekt von der vorderen Brennebene absteht. Die zweite mit  $p^*-f^*$  überschriebene Spalte giebt

an wie weit das Bild hinter der hinteren Brennebene liegt und endlich liefert die dritte  $d$  überschriebene Spalte die Werthe für den Durchmesser der Zerstreuungskreise.

$p - f$	$p^* - f^*$	$d$
$\infty$	0	0
10000 mm.	0,029 mm.	0,006 mm.
5000 "	0,059 "	0,013 "
2500 "	0,118 "	0,025 "
1250 "	0,236 "	0,050 "
625 "	0,472 "	0,099 "
312 "	0,946 "	0,193 "
156 "	1,893 "	0,369 "
78 "	3,786 "	0,675 "
39 "	7,571 "	1,000 "
19 "	15,541 "	1,819 "
0 "	$\infty$ "	4,000 "

Aus dieser Tabelle ersieht man, dass der Durchmesser des Zerstreuungskreises kleiner als  $\frac{1}{100}$  mm. ist, sowie die Entfernung des Objektpunktes etwas über 5000 mm. beträgt. So kleine Zerstreuungskreise können aber der Deutlichkeit des Sehens um so weniger Eintrag thun, als eine absolute Schärfe der Bilder auch bei unendlicher Entfernung der Objektpunkte doch nicht stattfindet aus Gründen, die erst später zu erörtern sind. Man wird also folgern können, dass unser emmetropisches schematisches Auge alle Objekte, die mehr als 5 Meter von ihm abstehen mit gleicher Deutlichkeit sieht. Rücken aber die Objekte noch näher an das Auge, so wird Undeutlichkeit bemerkbar und zwar wächst dieselbe bei weiterer Annäherung mit beschleunigter Geschwindigkeit.

Zur Erklärung der Thatsache, dass vom emmetropischen Auge endlich entfernte Objekte, wenn ihre Entfernung nur eine gewisse Grösse übersteigt, mit unendlich fernen gleich deutlich gesehen werden, hat man auch den Umstand geltend gemacht, dass die Schicht der empfindenden Netzhautelemente eine gewisse Dicke besitzt und dass daher, wenn die Bilder unendlich ferner Objekte in die Vorderfläche dieser Schicht fallen die Bilder von Objekten, deren Entfernung zwar endlich aber über eine gewisse Grenze hinaus gross ist, noch in den Bereich jener Schicht fallen. Krüss<sup>1</sup> hat aus der bekannten Dicke der muthmasslich durch Licht reizbaren Netzhautschicht die Grenzdistanz für eine 3,3 mm. weite Pupille zu 13,5 m. berechnet. Hiergegen lässt sich indessen einwenden, dass wenn auch hinten nur ein reizbares Netzhautelement von einem leuchtenden Punkte Strahlen erhält, vorn doch schon mehrere benachbarte davon getroffen werden. Man wird daher doch immer wieder darauf zurückkommen, die gleiche Deutlichkeit des Sehens unendlich entfernter und

1 Ann. d. Physik CLVII. S. 476.



weit entfernter Objekte einfach zu erklären aus der Unwirksamkeit sehr kleiner Zerstreuungskreise.

### III. Das myopische und das hypermetropische Auge.

Die oben gemachte Annahme, dass die Polarzone der Netzhaut mit der zweiten Brennebene zusammenfällt, war offenbar eine unter unzähligen möglichen, denn es ist an sich denkbar, dass die Netzhaut mehr oder weniger vor, sowie auch dass sie mehr oder weniger hinter der zweiten Brennebene liegt. Betrachten wir zunächst einen Fall der letzten Art. Die von unendlich entfernten Objektpunkten ausgehenden Strahlenbündel kommen in Punkten der zweiten Brennebene zur Vereinigung und werden sich also bis sie die jetzt dahinter gedachte Netzhaut erreichen schon wieder ein wenig ausgebreitet haben, so dass sie auf der Netzhaut Zerstreuungskreise beleuchten und ein so beschaffenes Auge wird mithin unendlich entfernte Objekte nicht deutlich sehen. Dagegen wird es jetzt offenbar einen gewissen endlichen Abstand geben, in welchem ein System von Objektpunkten in einer zur Axe senkrechten Ebene liegen muss, wenn die entsprechenden Bildpunkte in die Polarzone der Netzhaut fallen sollen und das Auge wird in diesem endlichen Abstände gelegene Objekte deutlich sehen können. Nehmen wir beispielsweise an, der Netzhautpol läge nicht wie vorhin vorausgesetzt wurde 22,23 mm. sondern 22,56 mm. hinter dem Hornhautscheitel, dann ist der Abstand der Polarzone der Netzhaut von der zweiten Hauptebene = 20,2 mm. und wir können nun leicht eine Objektdistanz  $p$  von der ersten Hauptebene finden, zu welcher dieser Abstand als Bilddistanz  $p^*$  gehört, wir brauchen nur in die Grundformel 20,2 für  $p^*$  einzusetzen und  $p$  zu berechnen. Man hat so die Gleichung

$$\frac{14,86}{p} + \frac{19,87}{20,2} = 1,$$

woraus sich  $p = 909$  in runder Zahl ergibt. Das heisst mit andern Worten 909 mm. von der ersten Hauptebene abstehende Objektpunkte liefern Bildpunkte auf die Polarzone der Netzhaut des gedachten Auges oder dies Auge kann in etwa 909 mm. Abstand liegende Objekte deutlich sehen. Diese Entfernung nennt man die „Sehweite“ des Auges. Liegen dagegen die Objektpunkte viel weiter als 909 mm., so werden sie undeutlich gesehen, weil ihre Bildpunkte vor der Netzhaut entstehen, und liegen die Objektpunkte viel näher als 909 mm., so kann sie das Auge nicht deutlich sehen, weil dann die Bildpunkte hinter der Netzhaut entstehen und wieder auf der Netzhaut Zerstreuungskreise beleuchtet werden.

Solche Augen, bei denen im ruhenden Zustande die Polarzone der Netzhaut hinter der zweiten Brennebene liegt und die daher nicht in unendliche Ferne, wohl aber in eine bestimmte endliche Entfernung deutlich sehen, giebt es nun wirklich und man nennt sie „myopische“ Augen. Die Eigenschaft der „Myopie“ ist eine mathematische Grösse, welche verschiedener Grade fähig ist, denn die Netzhaut kann verschieden weit hinter der zweiten Brennebene liegen. Gleiche Brennweiten vorausgesetzt wird offenbar die Sehweite um so kleiner sein, je weiter die Netzhaut hinter der hinteren Brennebene liegt. Die Entfernung dieser beiden Ebenen von einander eignet sich indessen nicht zum Maass der Myopie, da man sie im Leben nicht messen kann und noch dazu diese Entfernung allein ohne Kenntniss der Brennweiten noch keine vollständige Kenntniss vom Refraktionszustande des Auges geben würde. Gleichwohl ist es für die Augenheilkunde ein Bedürfniss, die Grade der Myopie lebender Augen numerisch darzustellen. Es kann keinen Augenblick zweifelhaft sein, dass man den numerischen Ausdruck für die Myopie eines Auges von seiner leicht bestimmbaren Sehweite abhängig machen muss, aber diese Grösse selbst kann offenbar den Maassstab nicht abgeben, da man umgekehrt ein Auge um so myopischer nennt, je kleiner seine Sehweite ist. Man muss also zum numerischen Ausdruck eine Grösse wählen, welche um so grösser ist je kleiner die Sehweite. In der That ist man auf DONDERS' Vorschlag übereingekommen den reciproken Werth der Sehweite  $P$  d. h.  $\frac{1}{P}$  zum Maass der Myopie zu machen. Dadurch erscheint der als Emmetropie bezeichnete Refraktionszustand des Auges als ein bestimmter Werth von Myopie nämlich als der Werth

$$\frac{1}{\infty} = 0.$$

Es mag noch bemerkt werden, dass die Augenärzte bei Angabe der Myopiegrade nicht das Meter, sondern allgemein den pariser Zoll<sup>1</sup> als Längeneinheit annehmen. Da schwerlich Augen vorkommen, deren Sehweite kleiner ist als ein pariser Zoll, so erscheint der Werth der Myopie stets als ein positiver ächter Bruch dessen Zähler die Einheit und dessen Nenner die Anzahl von pariser Zollen ist, welche die Sehweite des Auges beträgt.

Aus einer Conkavlinse treten bekanntlich parallelstrahlig auffallende Bündel als divergente aus und zwar mit solcher Divergenz als

<sup>1</sup> Auf dem ophthalmologischen Congress zu Heidelberg im Jahre 1875 ist übrigens von DONDERS der Vorschlag gemacht in Zukunft auch für die Messung der Refraktionszustände des Auges das Metermaass zu Grunde zu legen. Die Einheit wird als „Dioptrie“ bezeichnet so dass z. B. einem Auge von 0,5 m. Sehweite der Werth von 2 Dioptrien zukommt.



kämen sie von Punkten die in einem der (negativen) Brennweite der Linse gleichen Abstände vor derselben liegen. Man sieht daher leicht, dass auf der Retina eines myopischen Auges von unendlich fernen Objekten deutliche Bilder entstehen, wenn vor dasselbe noch eine Zerstreuungslinse gesetzt wird, deren negative Brennweite ihrem absoluten Werthe nach gleich ist der Sehweite des Auges vermindert um den Abstand der Linse vom Auge, oder wenn dieser gegen jene vernachlässigt werden darf einfach der Sehweite des Auges. Die optischen Werkstätten pflegen die Brennweiten ihrer Brillengläser in pariser Zollen anzugeben, gerade desswegen ist man auch für die Angabe der Myopiegrade beim pariser Zoll als Längeneinheit geblieben.

Stellen wir uns jetzt einen Fall der zweiten Art vor, wo die Netzhaut vor der hinteren Brennebene liegt. Dann werden unendlich entfernte Objekte ebenfalls nicht deutlich gesehen werden, weil die von ihren Punkten ausgegangenen Strahlenbündel erst hinter der Netzhaut zur Vereinigung kommen. Noch weniger können aber jetzt in irgend einem endlichen Abstände gelegene Punkte deutlich gesehen werden, da die von solchen ausgegangenen Strahlenbündel sogar erst hinter der zweiten Brennebene also noch viel mehr hinter der Netzhaut zur Vereinigung kommen. Augen von solcher Beschaffenheit giebt es ebenfalls wirklich und man nennt sie „hypermetropische“. Um zu sehen wie ein Objektpunkt liegen müsse, um von einem hypermetropischen Auge deutlich gesehen werden zu können wollen wir in unserem schematischen Auge den Netzhautpol beispielsweise nur 21,86 statt 22,23 mm. hinter dem Hornhautscheitel denken, dann ist sein Abstand von der zweiten Hauptebene 19,5 mm. und die Netzhaut liegt etwa 0,37 mm. vor der zweiten Brennebene. Fragen wir in welchem Abstand  $p$  von der ersten Hauptebene ein Objektpunkt liegen müsse, damit sein Bild in die Netzhaut falle, so haben wir nur wieder den Abstand der Netzhaut von der zweiten Hauptebene als Bildabstand  $p^*$  in die Grundgleichung einzuführen und den zugehörigen Werth von  $p$  zu suchen; aus

$$\frac{14,86}{p} + \frac{19,87}{19,5} = 1$$

ergiebt sich aber  $p = -781$  mm. Das Minuszeichen vor dem Werthe von  $p$  deutet an, dass es nicht die Distanz eines vor dem Auge gelegenen reellen, sondern die eines hinter dem Auge gelegenen virtuellen Objektpunktes ist. Da für jedes hypermetropische Auge nach der Definition das einzusetzende  $p^*$  kleiner als  $f^*$  also

$$\frac{f^*}{p^*} > 1$$

ist, so wird sich für ein solches immer eine negative Sehweite  $p$  ergeben d. h. ein hypermetropisches Auge kann kein reelles Objekt deutlich sehen. Ein hypermetropisches Auge kann sich aber die für es deutlich sichtbaren virtuellen Objekte sehr leicht verschaffen, wenn es sich mit einer Sammellinse bewaffnet. In der That verwandelt ja eine solche parallelstrahlig auffallende Bündel in konvergente und zwar liegen die Konvergenzpunkte um ihre Brennweite von der Linse entfernt. Betrachtet also ein hypermetropisches Auge unendlich ferne Objekte durch eine Sammellinse deren positive Brennweite gleich ist dem absoluten Werthe der negativen Sehweite vermehrt um den Abstand zwischen Linse und erster Hauptebene, so wird es jene unendlich ferneren Objekte deutlich sehen, da die von der Sammellinse entworfenen reellen Bilder in der richtigen negativen Sehweite des Auges zu Stande kommen würden.

Gemäss dem bei der Myopie schon angewandten Principe wird man zweckmässig als numerisches Maass der Hypermetropiegrade wieder die reciproken Werthe der Sehweiten verwenden, da aber diese negativ sind, so hat die Hypermetropie stets eine negative Zahl zum Maass. Dies ist auch insofern konsequent und gerechtfertigt, als offenbar die Myopie durch die Emmetropie ( $= 0$ ) in die Hypermetropie stetig übergeht.

Um nach dem aufgestellten Maassprincipe den Grad der Myopie oder Hypermetropie eines Auges wirklich durch eine Zahl darzustellen, muss man Methoden haben, nach denen sich die Sehweite eines Auges bestimmen lässt. Ist die Person der das Auge angehört geübt ihre sinnlichen Eindrücke genau zu beachten und die Thätigkeit des später zu beschreibenden Akkommodationsapparates auszuschliessen, so bedarf es weiter keines Apparates als einiger schwarzer Striche von verschiedner Breite auf weissem Papier und eines Maassstabes um die Entfernung des Papierblattes vom Auge zu messen. In der That wird eine solche Person, wenn man das Blatt mit den Strichen aus grosser Entfernung heranrückt, angeben können, wann zuerst die Striche scharf begrenzt erscheinen, welche in dieser Entfernung überhaupt gesehen werden können. Werden solche Proben mit Annäherung und Entfernung der Objekte wiederholt, so werden sich allerdings kleine Unterschiede in den gemessenen Abständen zeigen, auf die deutlich gesehen wird. Dies liegt daran, dass eben eine sehr kleine Undeutlichkeit nicht wahrgenommen werden kann, also jedes Auge von einer gewissen Entfernung an bis zu einer gewissen andern hin mit merklich gleicher Deutlichkeit sieht. Diese beiden Grenzen der Sehweite, wenn man so sagen darf, liegen um so



enger beisammen je kleiner sie in absolutem Werthe ist. Sind diese Grenzen für ein individuelles Auge bestimmt, so ist das arithmetische Mittel ihrer reciproken Werthe als numerisches Maass des Refraktionszustandes zu nehmen. Ist das zu prüfende Auge ein hypermetropisches, so muss es natürlich eine Sammellinse von bekannter Brennweite vor sich nehmen und die Objekte müssen ausserhalb der Brennweite vor der Linse verschoben werden. Die Lage des reellen Bildes, das hier als virtuelles Objekt dient, ergibt sich dann leicht aus der Brennweite und dem Abstände des wirklichen Objektes von der Linse.

Da der praktische Augenarzt oft in der Lage ist die Sehweite bei Personen zu bestimmen, welche sich von ihren sinnlichen Wahrnehmungen nicht genau Rechenschaft zu geben gewöhnt sind, so hat man besondere Methoden ersonnen, um die Undeutlichkeit der Bilder solchen Personen auch dann zum Bewusstsein zu bringen, wenn sie zu klein ist um von selbst aufzufallen. Künstliche Vorrichtungen zu diesem Zwecke nennt man Optometer.

Eine der verbreitetsten optometrischen Vorrichtungen beruht auf dem sogenannten SCHEINER'schen Versuch. Dieser besteht darin, dass man einen leuchtenden Punkt durch zwei feine Löchelchen in einem dicht vor dem Auge befindlichen Schirm betrachtet. Der Abstand der beiden Löchelchen von einander muss so klein sein, dass die beiden vom leuchtenden Punkte durch sie fallenden Strahlen durch die Pupille gehen. Befindet sich der leuchtende Punkt in der deutlichen Sehweite, so werden die beiden gedachten Strahlen denselben Punkt der Netzhaut treffen, da ja unter dieser Voraussetzung alle von jenem Punkte aus in die Pupille gelangenden Strahlen auf einen Punkt der Netzhaut vereinigt werden. Das Auge wird also einen leuchtenden Punkt zu sehen glauben. Befindet sich dagegen der leuchtende Punkt nicht in der deutlichen Sehweite, so werden die beiden Strahlen nicht denselben Punkt der Netzhaut treffen, da der Bildpunkt jetzt vor oder hinter der Netzhaut liegt. Das Auge glaubt jetzt natürlich zwei leuchtende Punkte vor sich zu sehen, da zwei gesonderte Elemente der Netzhaut erregt werden. Ist der Abstand des leuchtenden Punktes kleiner als die Sehweite, so liegt der Bildpunkt hinter der Netzhaut und die beiden Strahlen haben sich also noch nicht gekreuzt wenn sie die Netzhaut treffen, der Strahl, welcher durch das Löchelchen rechter Hand gegangen ist trifft also die Netzhaut rechts und der durch das Löchelchen linker Hand gegangene Strahl trifft sie links. Das Bewusstsein setzt aber die Ursache eines links gelegenen Punktes der Netzhaut nach rechts im Raume und umgekehrt, da wegen der Verkehrtheit der deutlichen Netzhautbilder

in der Regel links gelegene Netzhauttheile von rechts her, rechts gelegene von links her erregt zu werden pflegen. Von der Projektion der Ursachen von Lichtempfindungen überhaupt wird in einem späteren Abschnitte ausführlicher zu handeln sein. Die beiden scheinbaren leuchtenden Punkte entsprechen also jetzt übers Kreuz den beiden Löchelchen und wenn man das Löchelchen rechter Hand zudeckt wird der scheinbare Lichtpunkt links verschwinden und vice versa. Ist dagegen der leuchtende Punkt weiter entfernt als die Sehweite, so kreuzen sich die beiden Strahlen schon vor der Netzhaut und der durch das Löchelchen rechter Hand gegangene beleuchtet einen Punkt links auf der Netzhaut und umgekehrt. Aus dem vorhin angegebenen Grunde entsprechen daher jetzt die beiden scheinbaren Lichtpunkte den Löchelchen in ihrer Lage so, dass wenn man das Löchelchen rechter Hand verdeckt der scheinbar rechts gelegene Lichtpunkt verschwindet und vice versa. Sowie also Doppelbilder erscheinen, kann man wissen ob der leuchtende Punkt zu nah oder zu fern liegt, wenn man weiss ob dem Geprüften bei Verdeckung des Löchelchens rechter Hand das Scheinbild links oder rechts verschwindet. Fig. 15 wird ohne weitere Erklärung das Gesagte deutlich machen.

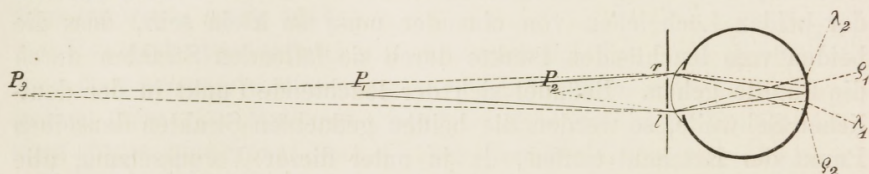


Fig. 15

An die Stelle des leuchtenden Punktes kann man auch eine leuchtende Linie setzen, wenn ihre Richtung die Verbindungslinie der beiden Löchelchen senkrecht überkreuzt. Ferner kann man statt der Löchelchen auch zwei Spalten in dem Schirm verwenden, deren Richtung der leuchtenden Linie parallel ist. In dem auf dies Princip gegründeten Optometer dient als leuchtende Linie ein feiner Spalt in einem dunklen Schirm vor einem sehr ausgedehnten hellen Hintergrunde. Der Schirm bildet den Boden eines Rohres, welches in einem andern wie ein Fernrohr auszug verschoben werden kann, so dass der Schirm in jeden beliebigen Abstand von dem Ende des äusseren Rohres gebracht werden kann. An diesem Ende befindet sich nun das zu prüfende Auge dicht hinter einem die Oeffnung verschliessenden Schirm mit zwei zum erstgedachten parallelen Schlitten. Verschiebt man jetzt das eine Rohr im andern, so wird das geprüfte Auge nur eine Lichtlinie zu sehen glauben, wenn der Spalt vom Auge



um die Sehweite absteht, dagegen zwei, wenn der Spalt zu weit oder zu nahe steht. Wenn es nun gilt auch grosse Sehweiten zu bestimmen, so müsste das Rohr eine unbequeme Länge haben, negative Sehweiten würde man gar nicht bestimmen können. Diese Uebelstände sind aber sehr leicht zu vermeiden, wenn man in das weitere Rohr dicht vor dem am Auge befindlichen Schirm mit Doppelspalt eine Sammellinse von etwa 6 Zoll Brennweite bringt, das Rohr braucht nicht viel länger als diese Brennweite zu sein, um alle positiven und negativen Sehweiten bestimmen zu können. In der That wird ja jetzt für das Auge nicht der Spalt selbst als Objekt zu betrachten sein, sondern dessen von der Linse entworfenen Bild. Dies kann man aber in jede beliebige positive und negative Entfernung vom Auge bringen. In unendlicher Entfernung insbesondere liegt es dann, wenn der Objektspace von der Linse gerade um ihre Brennweite absteht. An das engere Rohr kann man gleich eine Scala eingraviren, welche für jede Stellung sogleich den Abstand des Linsenbildes vom Auge liefert.

Das Optometer v. GRAEFE'S ist einfach ein galileisches Fernrohr (Operngucker), und es wird dem zu prüfenden Auge aufgegeben dasselbe so einzustellen, dass es ein sehr entferntes Objekt, etwa das Ziegeldach eines entfernten Hauses, deutlich sieht, so dass die Ziegel gezählt werden können. Es ist aus der Theorie des galileischen Fernrohres und aus der alltäglichen Erfahrung mit diesem in jedermanns Händen verbreiteten Instrumentes bekannt, dass die für unendliche Entfernung erforderliche Einstellung abhängt von der Sehweite des Auges, insbesondere weiss man, dass ein Auge mit kleiner Sehweite das Okular näher ans Objektiv bringen muss, um ein fernes Objekt deutlich zu sehen, als ein Auge mit grösserer Sehweite. Es ist mithin principiell klar, dass aus der Einstellung auf die Sehweite geschlossen werden kann. Wenn also an dem Auszugrohre eine geeignete Scala angebracht ist, so kann an dieser ohne Weiteres die Sehweite des Auges abgelesen werden. An den von den optischen Werkstätten gelieferten GRAEFE'schen Optometern kann man zwischen drei verschiedenen Zerstreuungslinsen als Okularen wechseln und dem entsprechend sind 3 verschiedene Skalen am Auszug angebracht; je nachdem das zu untersuchende Auge stark myopisch, schwach myopisch oder hypermetropisch ist. Wollte man nämlich für schwach myopische Augen dieselbe starke Zerstreuungslinse als Okular verwenden wie für stark myopische, so würden die Unterschiede der Einstellung für verschiedene Grade der schwachen Myopie zu gering ausfallen, um genau messbar zu sein.

Eine andere auf bloss objektive Beobachtung des Auges mit dem Augenspiegel gegründete Methode der Sehweitebestimmung kann erst später erörtert werden.

Die mit der Prüfung der Sehschärfe Hand in Hand gehenden Methoden der Optometrie können hier nicht behandelt werden, vielmehr ist bezüglich derselben auf die Darstellungen der Augenheilkunde zu verweisen.

#### IV. Die Bilder seitlich gelegener Objekte.

Bisher haben wir bloss den Bildern solcher Objektpunkte, deren Richtungsstrahlen sehr kleine Winkel mit der Axe bilden, eingehendere Aufmerksamkeit geschenkt. Nur ganz vorübergehend wurde bemerkt, dass auch von weit seitwärts gelegenen Objekten jedesfalls ziemlich deutliche Bilder auf der Netzhaut entstehen. Einerseits nämlich hat man dies an ausgeschnittenen Thieraugen direkt beobachtet. Andererseits würde das Sehen solcher seitlich gelegenen Objekte — das sogenannte indirekte Sehen — auch nicht einmal mit der Schärfe stattfinden können, mit welcher es wirklich geschieht, wenn nicht das von je einem seitlich gelegenen Objektpunkte ins Auge gelangende Strahlenbündel wenigstens einigermaassen auf je einen Punkt der Netzhaut vereinigt würde. Es hat daher einiges Interesse, zu untersuchen, inwieweit eine solche Entstehung annähernd deutlicher Bilder von seitlich gelegenen Objekten aus den bis jetzt bekannten und in den vorstehenden Abschnitten beschriebenen Einrichtungen des Auges erklärt werden kann. Zur Beurtheilung des Ganges sehr schräg auffallender Strahlenbündel durch ein brechendes System können, wie mehrfach hervorgehoben wurde, die im ersten Abschnitte entwickelten Regeln nicht dienen. Man kann sich aber davon eine annähernde Vorstellung verschaffen, wenn man wenigstens die eine von den im ersten Abschnitte zu Grunde gelegten einschränkenden Bedingungen aufrecht erhält, dass nämlich das Strahlenbündel eine sehr kleine Basis auf den brechenden Flächen hat, welche Bedingung bei einigermaassen enger Pupille im Auge in der That erfüllt ist. Ein solches eng begrenztes Strahlenbündel wird durch Brechung an einer kugelförmigen Trennungsfläche sehr annäherungsweise verwandelt in ein Bündel eigenthümlicher Gestalt. Um sie bequem zu beschreiben, müssen wir einige Bezeichnungen einführen. Der mittelste Strahl des von einem Punkte  $P$  (Fig. 16) ausgegangenen Bündels heisse der Leitstrahl  $L$ . Durch ihn und den Mittelpunkt der Trennungsfläche  $c$  legen wir eine Ebene,



welche die Meridianebene des Bündels heissen mag und das in ihr liegende Büschel<sup>1</sup> soll das Meridianbüschel des Bündels heissen, ihm gehören die Strahlen  $s_1$  und  $s_2$  in der Figur an. Eine auf der Meridianebene senkrechte durch den Leitstrahl gelegte Ebene heisse

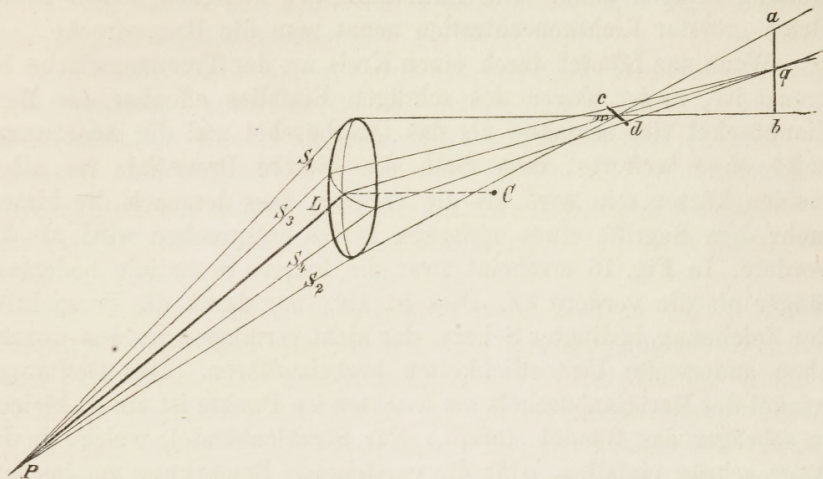


Fig. 16.

die Querebene und die darin enthaltenen Strahlen des Bündels bilden ein Büschel, das wir Querbüschel nennen wollen, dem in der Figur die Strahlen  $s_3$  und  $s_4$  angehören. Es vereinigen sich nun die Strahlen des Querbüschels in einem von der Trennungsfläche weiter entfernt gelegenen Punkte  $q$  des gebrochenen Leitstrahles, als die Strahlen des Meridianbüschels, welche übrigens sämtlich auch nach der Brechung noch in der Meridianebene enthalten sind. Der Vereinigungspunkt der Strahlen des Meridianbüschels sei  $m$ . In der Entfernung, wo die Strahlen des Querbüschels zur Vereinigung kommen, gehen die sämtlichen übrigen Strahlen des Bündels durch Punkte einer in der Meridianebene enthaltenen Strecke  $ab$  — der hinteren Brennlinie — welche durch die beiden äussersten Strahlen des hier schon wieder divergirenden Meridianbüschels begrenzt sind. Ebenso sind in der Entfernung, wo der Vereinigungspunkt des Meridianbüschels liegt, sämtliche Strahlen vereinigt auf einer geradlinigen Strecke  $cd$ , deren Richtung senkrecht zur Meridianebene steht und die begrenzt ist durch die beiden äussersten Strahlen des Querbüschels, die hier noch nicht zur Vereinigung gekommen sind, sie

<sup>1</sup> Ich bediene mich hier des Sprachgebrauches der synthetischen Geometrie, welche Strahlenbüschel ein System von Strahlen in der Ebene, Bündel ein solches im Raume nennt.

heisst die vordere Brennlinie. An diesen beiden Stellen findet also eine, wenn auch nicht punktuelle, so doch wenigstens auf einen unendlich schmalen Strich beschränkte Vereinigung sämmtlicher Strahlen des Bündels statt, die man auf einem Schirme objektiv zur Darstellung bringen kann. Die Entfernung  $mq$  zwischen diesen beiden Orten grösster Lichtkonzentration nennt man die Brennstrecke.

Wenn das Bündel durch einen Kreis an der Trennungsfläche begrenzt ist, so ist wegen des schrägen Einfall es offenbar das Meridianbüschel viel schmäler als das Querbüschel und die Anschauung zeigt ohne weiteres, dass dann die hintere Brennlinie im allgemeinen kürzer sein wird als die vordere, dass demnach die hintere mehr dem Begriffe eines optischen Bildes entsprechen wird als die vordere. In Fig. 16 erscheint zwar die hintere Brennlinie bedeutend länger als die vordere  $cd$ . Dies ist aber nur durch die Perspektive der Zeichnung bedingter Schein, der nicht vermieden werden konnte, ohne anderweite Undeutlichkeiten herbeizuführen. Der Oeffnungswinkel des Meridianbüschels am leuchtenden Punkte ist um so kleiner, je schräger das Bündel einfällt. Für Strahlenbündel, welche in das Auge schräg einfallen, trifft die vorstehende Bemerkung zu, insofern diese Bündel durch die mit der einen brechenden Fläche zusammenfallende kreisförmige Pupille begrenzt sind.

Bezeichnet man die Entfernung der ersten Brennlinie vom Einfallspunkt auf dem gebrochenen Leitstrahle gemessen durch  $f'$  und die der zweiten durch  $f''$ , so hat man <sup>1</sup>

$$f' = \frac{\frac{r}{n} (n^2 - \sin^2 \varphi)}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi} - \cos \varphi - \frac{r}{e} \cos^2 \varphi}$$

$$f'' = \frac{nr}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi} - \cos \varphi - \frac{r}{e}}$$

wo  $n$  den Brechungsindex,  $r$  den Radius der Trennungsfläche,  $e$  die Entfernung des Objektpunktes vom Einfallspunkt und  $\varphi$  den Einfallswinkel des Leitstrahles bedeutet.

Mit Hülfe dieser Formeln habe ich folgende Berechnungen ausgeführt. Zunächst wurde der Rechnung das reducirte schematische Auge zu Grunde gelegt, d. h. eine einzige trennende Kugelfläche angenommen in der S. 63 beschriebenen Weise. Dass diese einzige Kugelfläche bezüglich aller der Axe nahezu parallel einfallenden Strahlenbündel merklich dasselbe leistet, wie der wirkliche

1 KUMMER, Borchardt's Journ. f. Mathem. LVII. S. 189; HERMANN, Ueber schiefen Durchgang u. s. w. Gratulationsschrift an C. LUDWIG. Zürich 1874.



brechende Apparat des Auges, ist weiter oben gezeigt worden. Es wurden nun 4 parallelstrahlige Bündel von kleinem Querschnitt angenommen, deren Leitstrahlen unter den Winkeln von  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $80^\circ$  mit der Axe auf den Scheitel der Fläche fallen und für diese wurden die Lagen der gebrochenen Leitstrahlen und auf diesen die Orte der Brennpunkte bestimmt.

Einer zweiten Rechnung wurde der brechende Apparat des schematischen Auges selbst zu Grunde gelegt. Es wurden wiederum 4 parallelstrahlige Bündel angenommen, deren Leitstrahlen ebenfalls nahezu Winkel von  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $80^\circ$  mit der Axe bildeten und so auf die Hornhaut fallen, dass sie nach der Brechung an ihr durch den Scheitel der vorderen Linsenfläche oder den Mittelpunkt der Pupille gehen.

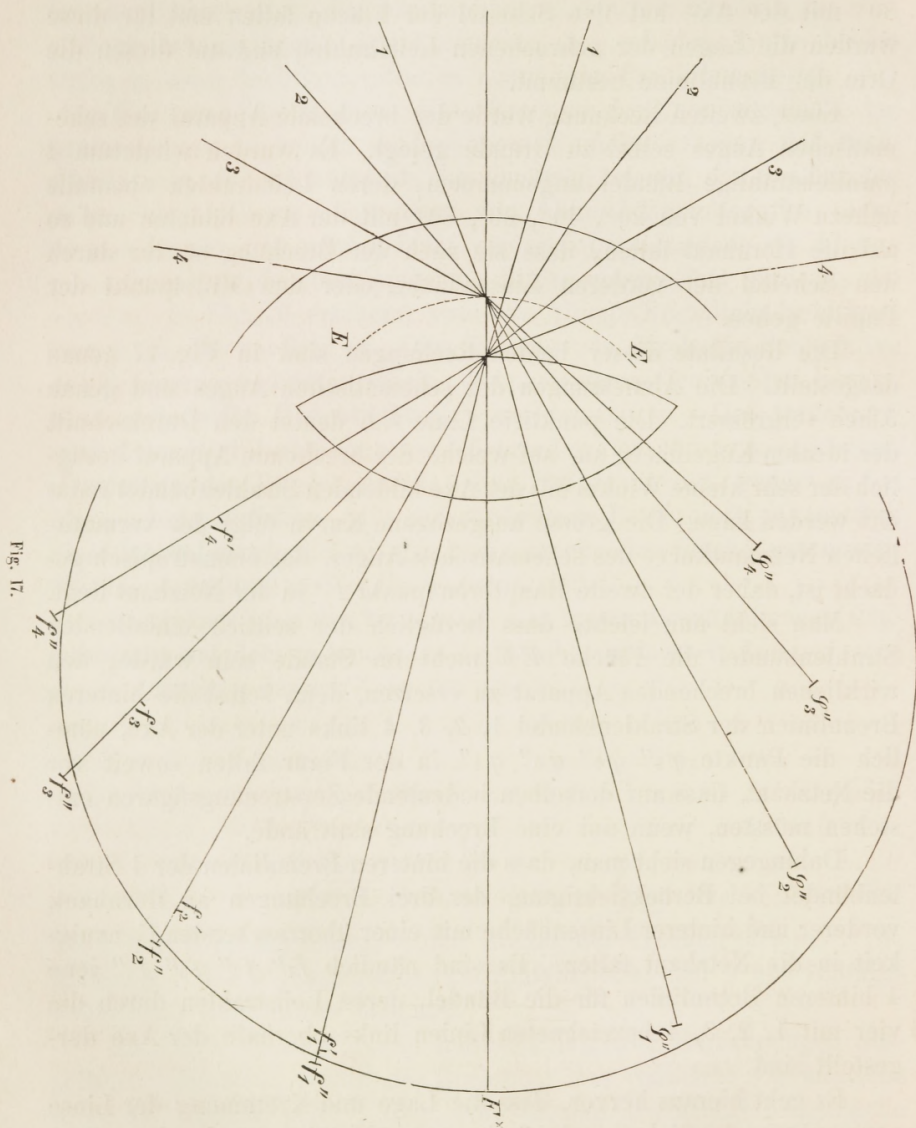
Die Resultate dieser beiden Rechnungen sind in Fig. 17 genau dargestellt. Die Abmessungen des schematischen Auges sind genau 5fach vergrößert. Die punktierte Linie  $EE$  deutet den Durchschnitt der idealen Kugelfläche an, auf welche der brechende Apparat bezüglich der sehr kleinen Winkel mit der Axe bildenden Strahlenbündel reducirt werden kann. Die grosse ausgezogene Kurve folgt der vermuthlichen Netzhautkurve des schematischen Auges, das emmetropisch gedacht ist, daher der zweite Hauptbrennpunkt  $F^*$  in der Netzhaut liegt.

Man sieht nun leicht, dass bezüglich der seitlich einfallenden Strahlenbündel die Fläche  $EE$  nicht im Stande sein würde, den wirklichen brechenden Apparat zu ersetzen, denn selbst die hinteren Brennpunkte der Strahlenbündel 1, 2, 3, 4 links unter der Axe, nämlich die Punkte  $\varphi_1''$   $\varphi_2''$   $\varphi_3''$   $\varphi_4''$  in der Figur fallen soweit vor die Netzhaut, dass auf derselben bedeutende Zerstreungsfiguren entstehen müssten, wenn nur eine Brechung stattfände.

Dahingegen sieht man, dass die hinteren Brennpunkte der 4 Strahlenbündel bei Berücksichtigung der drei Brechungen an Hornhaut, vorderer und hinterer Linsenfläche mit einer überraschenden Genauigkeit in die Netzhaut fallen. Es sind nämlich  $f_1''$   $f_2''$   $f_3''$   $f_4''$  jene 4 hinteren Brennpunkte für die Bündel, deren Leitstrahlen durch die vier mit 1, 2, 3, 4 bezeichneten Linien links oberhalb der Axe dargestellt sind.

Es geht hieraus hervor, dass die Lage und Krümmung der Linse ganz ausserordentlich zweckmässig angeordnet ist, um das Auge, wie man es passend bezeichnen kann, „periskopisch“ zu machen. In der That wird das emmetropisch gedachte schematische Auge schon ohne Berücksichtigung der Linsenschichtung auch von weit seitlich gelegenen sehr entfernten Objekten annähernd deutliche Bilder auf der

Netzhaut haben. Sofern die grösste Concentration der seitlich einfallenden Strahlenbündel in der hinteren Brennpunktlinie ein wenig hinter die Netzhaut fällt, könnte man sagen, dass nach der ausgeführten Be-



rechnung die Seitentheile eines in der Axe emmetropischen Auges etwas hypermetropisch wären, womit die Beobachtungen von STAMMESHAUS<sup>1</sup> übereinstimmen.

<sup>1</sup> STAMMESHAUS, Arch. f. Ophthalmologie XX. S. 147.



Die Schichtung der Linse macht diese Bilder der seitlich gelegenen Objekte jedesfalls noch bedeutend genauer. Es ist nämlich von L. HERMANN<sup>1</sup> allgemein nachgewiesen, dass bei einer geschichteten Linse von der Art wie die des menschlichen Auges die Brennstrecke für seitlich einfallende Bündel kürzer ist, als für eine homogene Linse von gleicher Hauptbrennweite. Die Rechnung von HERMANN, deren Einzelheiten als zu verwickelt hier nicht angeführt werden können — ist durchgeführt unter der Annahme, dass alle Strahlen des Bündels alle Schichten der Linse durchsetzen. Noch günstiger würde sich wahrscheinlich dies Resultat stellen, wenn man dem Umstande Rechnung tragen könnte, dass nicht alle Strahlen des Meridianbüschels die sämtlichen Schichten wirklich durchsetzen, welche von den Strahlen des Querbüschels durchsetzt werden. Betrachten wir nämlich z. B. das schräg von oben einfallende Bündel No. 3 in Fig. 17, so ist wohl anzunehmen, dass die untersten Strahlen in seinem Meridianbüschel an einigen inneren Schichten der Linse ganz vorübergehen, durch welche seine oberen Strahlen noch passieren müssen, dass also jene untersten Strahlen schliesslich weniger abgelenkt aus der Linse hervorgehen und so der Vereinigungspunkt des Meridianbüschels noch weiter hinausgertickt, d. h. dem Vereinigungspunkte des Querbüschels mehr genähert wird, und dieser also noch mehr einem genauen punktuellen Bilde ähnlich wird.

Was hier zunächst vom emmetropischen Auge gezeigt wurde, wird wohl vom myopischen auch annähernd gelten, so dass man auch bei ihm voraussetzen darf, dass von seitlich gelegenen Objekten, die um seine direkte Sehweite von ihm abstehen, sehr annähernd deutliche Bilder auf der Netzhaut entworfen werden.

Man kann jetzt noch die Frage aufwerfen, ob die Verbindungslinien der seitlich gelegenen Objektpunkte mit ihren beziehlichen Bildpunkten auf der Netzhaut einander selbst und die Axe in demselben „Kreuzungspunkte der Richtungsstrahlen“ schneiden, wo die entsprechenden Verbindungslinien der der Axe benachbarten Objektpunkte und ihrer Bildpunkte einander nahezu schneiden. Es sind über diese Frage am ausgeschnittenen Kaninchenauge von LANDOLT und NUEL<sup>2</sup> Versuche angestellt, welche die von Lichtflammen entworfenen Bilder auf der Sclera direkt beobachteten. Sie fanden, dass die Verbindungslinien zwischen Objektpunkt und Bildpunkt bei

1 HERMANN, Ueber schiefen Durchgang von Strahlenbündeln durch Linsen und über eine darauf bezügliche Eigenschaft der Krystalllinse. Gratulationsschrift der Züricher med. Fak. für C. LUDWIG. 1874.

2 Arch. f. Ophthalmologie XIX. Heft 3.

seitlich gelegenen Objektpunkten die Axe vor dem „Kreuzungspunkte der Richtungsstrahlen“ schneiden.

Wenn man in unserer Fig. 17 durch die Punkte  $f_1''$   $f_2''$   $f_3''$   $f_4''$  Parallelen mit den einfallenden Leitstrahlen 1, 2, 3, 4 zieht, welche die Verbindungslinien zwischen Objektpunkt und Bildpunkt darstellen würden, so sieht man, dass dieselben die Axe sehr entschieden hinter dem „Kreuzungspunkte der Richtungsstrahlen“ schneiden. Doch ist offenbar die sehr verwickelte Konstruktion unserer Figur nicht hinlänglich genau, um diese Verhältnisse getreu wiederzugeben. Es findet sich nämlich kein ganz stetiges Weiterücken des Schnittpunktes mit wachsendem Einfallswinkel, was doch ohne Zweifel zu erwarten wäre. Immerhin ist der Widerspruch zwischen dem Ergebniss der Konstruktion für das schematische Menschenauge und der experimentellen Bestimmung am Kaninchenauge beachtenswerth und kann zu Wiederholung der Bestimmungen auf beide Arten auffordern.

---

## FÜNFTES CAPITEL.

# Die Akkommodation des Auges.

---

### I. Verschiedene Refraktionszustände desselben Auges.

Der im vorigen Abschnitte charakterisirte Refraktionszustand ist für ein und dasselbe Auge keineswegs eine zu allen Zeiten konstante Grösse. Das normale Auge kann vielmehr zu verschiedenen Zeiten sehr verschiedene Refraktionszustände willkürlich annehmen. Man überzeugt sich am leichtesten hiervon am eigenen Auge. Man halte z. B. in einiger Entfernung soweit man noch eben bequem kleine Druckschrift lesen kann ein bedrucktes Blatt und in die Hälfte der Entfernung zwischen dies und das Auge ein Stück von einem weitmaschigen Gewebe z. B. Gaze oder Tüll. Man wird bemerken dass man willkürlich bald die Buchstaben deutlich sehen kann, bald die Fäden des Gewebes. Im ersten Falle verschwimmen diese in Zerstreuungsbildern, im letzteren Falle sieht man die gedruckten Buchstaben undeutlich. Es hängt also von der Willkür ab, den Grad der Myopie zu verändern innerhalb gewisser Grenzen, in denen natürlich auch der Werth 0 und negative Werthe d. h. Emmetropie und gewisse Grade der Hypermetropie eingeschlossen sein können.



Der Versuch lässt sich auf die mannigfachste Weise variiren und man kann dabei auch die Grenzen bestimmen, innerhalb deren es eben möglich ist, den Refraktionszustand zu verändern. Diese Fähigkeit des Auges nennt man das „Anpassungsvermögen“ oder „Akkommodationsvermögen“ für verschiedene Entfernungen. Die grösste Entfernung, für welche ein gegebenes Auge einstellbar ist, nennt man seinen Fernpunktsabstand, und die kleinste Entfernung, für welche es eingerichtet werden kann, den Nahepunktsabstand. Als Fernpunkt und Nahepunkt kann man etwa zwei Punkte der nach aussen verlängerten Augenaxe definiren und zwar wäre der Fernpunkt derjenige, dessen deutliches Bild auf den Pol der Retina fällt zu der Zeit, wo das Auge seinen geringst möglichen Grad von Myopie hat und der Nahepunkt derjenige, dessen Bild ebendahin fällt, wenn der Myopiegrad des Auges auf seinen höchst möglichen Werth gesteigert ist. Selbstverständlich kann dem Fernpunktsabstand auch der Werth unendlich (Emmetropie) oder gar ein negativer Werth (Hypermetropie) zukommen. Die Differenz zwischen Fernpunktsabstand und Nahepunktsabstand oder die Strecke der Axe zwischen Fernpunkt und Nahepunkt, welche eine wesentlich positive Grösse ist, heisst das Akkommodationsspatium. Die so definirte Grösse kann unendlich sein. Wenn z. B. der Minimalwerth der Myopie des Auges  $= 0$  (Emmetropie) ist, so reicht das Akkommodationsspatium von dem endlich gelegenen Nahepunkt bis in unendliche Ferne. Ist der Minimalwerth der Myopie gar negativ und der Maximalwerth positiv, so besteht das Akkommodationsspatium aus den beiden unendlichen Strecken der Axe von dem Nahepunkt bis in unendliche Ferne nach vorn und von dem hinter dem Auge endlich gelegenen Fernpunkt bis in unendliche Ferne nach hinten. Hier wäre also das Akkommodationsspatium die ganze unendliche Axe mit Anschluss der den Augenmittelpunkt enthaltenden endlichen Strecke vom Nahepunkt bis zum Fernpunkt.

Man bemerkt bei subjektiver Prüfung der Akkommodation des eigenen Auges ferner leicht, dass nur zum Uebergange von niederen zu höheren Graden der Myopie eine aktive Anstrengung von muskulösen resp. nervösen Apparaten erforderlich ist und dass der Nachlass dieser Anstrengung die Myopie vermindert. Hieraus folgt, dass das vollständig ruhende Auge auf seinen Fernpunkt eingestellt ist, oder so wenig myopisch ist, als es überhaupt zu sein vermag.

Die Fähigkeit, sich verschiedenen Entfernungen anzupassen, besitzen nicht alle Augen in gleichem Maasse. Von zwei im ruhenden Zustande emmetropischen Augen kann z. B. das eine im Stande sein,

bei grösster Anstrengung seiner akkommodirenden Kräfte noch in 5 Zoll Abstand deutlich zu sehen, während das andere es nur bis auf 7 Zoll Entfernung zu bringen vermag. Es ist daher vor allen Dingen wichtig, besonders für die Zwecke der praktischen Augenheilkunde ein Maassprincip zu besitzen, wonach man die Werthe des Akkommodationsvermögens verschiedener Augen vergleichen kann. Nachdem im vorigen Abschnitte bereits gelehrt wurde, die verschiedenen Refraktionszustände des Auges oder Grade der Myopie (resp. Hypermetropie) durch Zahlenwerthe auszudrücken, kann es nicht mehr zweifelhaft sein, welche Zahl als Maass eines bestimmten Akkommodationsvermögens zu dienen hat. Offenbar ist nämlich dies Maass die Differenz der beiden Zahlen, welche den Grad der Myopie bei grösster Anstrengung des Akkommodationsvermögens und bei vollständiger Ruhe desselben messen, mit anderen Worten die Differenz des reciproken Werthes des Nahepunkts- und des Fernpunktsabstandes. Nennen wir also den ersteren  $N$ , den letzteren  $F$ , so ist

$$\frac{1}{N} - \frac{1}{F}$$

das Maass des Akkommodationsvermögens. Ist der Fernpunkt unendlich weit oder das Auge in der Ruhe emmetropisch, so zieht sich diese Maasszahl auf  $\frac{1}{N}$  zurück. Man entnimmt aus dieser Formel

sogleich, dass ein im Ruhezustande schon sehr myopisches Auge nur ein ganz kleines Akkommodationsspatium zu beherrschen braucht, ohne dass man ihm darum ein abnorm kleines Akkommodationsspatium zuzuschreiben hätte. Nehmen wir z. B. an, dass ein im Ruhezustande emmetropisches und mit normalem Akkommodationsvermögen ausgerüstetes Auge sich durch möglichste Anstrengung desselben auf 5 par. Zoll Abstand einrichten könnte, so wäre das Maass dieses als normal angenommenen Akkommodationsvermögens

$$\frac{1}{5} - \frac{1}{\infty} = \frac{1}{5}.$$

Stellen wir uns nun ein im Ruhezustande schon myopisches Auge vor, dessen Fernpunktsabstand 7 Zoll beträgt, so würde sein Akkommodationsvermögen als ein ganz normales gelten können, wenn es im Stande wäre, sich dadurch in ein Auge vom Myopiegrade  $\frac{1}{2\frac{1}{2}}$  zu verwandeln, d. h. wenn sein Nahepunkt in  $2''11'''$  Abstand läge oder sein Akkommodationsspatium nicht mehr als  $7 - 2\frac{1}{2}$  oder 4 Zoll 1 Linie betrüge, während das Akkommodationsspatium des im Ruhezustande emmetropischen Auges von gleichwerthigem Akkommoda-



tionsvermögen unendlich lang ist. So paradox dies auf den ersten Blick aussieht, so wird es doch sofort verständlich, wenn man bedenkt, dass unser myopisches Auge durch Vorsetzen eines Zerstreuungsglases von 7 Zoll negativer Brennweite in einen dioptrischen Apparat verwandelt wird, der das unendliche Akkommodationsspatium von  $\infty$  bis 5 Zoll beherrscht. In der That fallen jetzt in dem aus Auge und Zerstreuungsglas zusammengesetzten Apparate beim Ruhezustande des Auges die Bilder unendlich ferner Gegenstände auf die Netzhaut denn von einem unendlich fernen Punkt erzeugt die Linse zunächst ein virtuelles Bild in 7 Zoll Abstand von sich selbst und das Bild dieses Bildes im Auge fällt unter den gemachten Voraussetzungen auf die Netzhaut, sofern wir von dem kleinen Abstände zwischen Linse und Auge absehen. Verwandelt sich nun aber das Auge in eines von der Myopie  $\frac{1}{2\frac{1}{2}}$ , so sieht es mit der Linse zusammen einen

5" abstehenden Punkt deutlich, denn von diesem erzeugt die Linse  

$$\left( \text{da } \frac{1}{5} + \frac{1}{-2\frac{1}{2}} = \frac{1}{-7} \text{ ist} \right)$$
 ein Bild gerade im Abstände von  $2\frac{1}{2}$  Zoll, wie es das veränderte Auge zum deutlichen Sehen braucht.

Das vorstehend entwickelte Maassprincip des Akkommodationsvermögens ist von DONDERS in die Ophthalmologie eingeführt. Jedoch habe ich selbst schon, ehe DONDERS die Refraktionszustände durch die reciproken Werthe der Sehweite zu messen vorschlug, die Werthe des Akkommodationsvermögens nach demselben Princip verglichen.<sup>1</sup>

## II. Die Veränderungen des brechenden Systemes.

Es lassen sich von vornherein verschiedene Wege denken, auf welchen der Myopiegrad des Auges erhöht werden kann. Demgemäss sind auch in der Geschichte der Wissenschaft verschiedene Ansichten über das Wesen des Anpassungsvorganges aufgetaucht, die indessen gegenwärtig, wo man das Problem vollständig gelöst hat, nur noch ein historisches Interesse haben, und nur flüchtig zu berühren sind.

Am nächsten läge offenbar die Annahme, dass die Anpassung des Auges an verschiedene Entfernungen ähnlich bewerkstelligt würde wie die Anpassung der photographischen Camera obscura, nämlich ohne Veränderung des dioptrischen Apparates durch Verschiebung

1 Siehe FICK, Medicinische Physik. 1. Aufl. S. 306 f. Braunschweig 1856.

des bildauffangenden Schirmes. In der That würde das Auge mit der Polarzone seiner Netzhaut nähere Objekte als bisher deutlich sehen, wenn diese Zone weiter von der Hornhaut wegrückte, denn bei gleichbleibenden brechenden Flächen fallen ja die Bilder näherer Objekte weiter nach hinten als die entfernterer Gegenstände. Gegen diese Annahme, der es nicht an Vertheidigern gefehlt hat, lassen sich aber schon von vornherein schwer wiegende Bedenken geltend machen. Vor allem ist ersichtlich, dass die Polargegend der Netzhaut nur durch eine Gestaltveränderung des ganzen Augapfels zum Zurückweichen gebracht werden könnte. Dazu gehörten aber bei dem grossen intraokularen Drucke sehr bedeutende äussere Kräfte. Diese könnte man nur suchen in den äusseren Augenmuskeln, besonders wohl den beiden schiefen, welche den Bulbus gürtelartig umfassen und ihn wohl in der Aequatorialzone pressen könnten, so dass die Axe von Pol zu Pol verlängert würde. Da diese Muskeln aber ganz andere Aufgaben haben, zu denen eine ausserordentliche Feinheit der Abstufung ihrer Zusammenziehung erforderlich ist, so kann man nicht wohl daran denken, ihnen auch noch diese Last aufzubürden. Ein anderes Bedenken gegen die fragliche Annahme besteht darin, dass die mit dem Zurückweichen der Polarzone nothwendig verknüpfte Verengung der Aequatorialzone für die seitlichen Objekte die Myopie schwächen würde, während sie für die der Axe benachbarten verstärkt wird. Wenn nun auch die seitlichen Bilder für den Sehakt weit weniger wichtig sind, so ist man doch nicht gewohnt in der organischen Welt selbst in untergeordneten Punkten grelle Widersprüche gegen die Zweckmässigkeit zu finden.

Wenn nun die Anpassung für die Nähe nicht durch Verschiebung des bildauffangenden Schirmes bewerkstelligt wird, so muss sie durch Verstärkung der Strahlenablenkung im brechenden Apparate selbst bewirkt werden, derart dass der Convergenzpunkt des von einem nahen Punkte ausgehenden Strahlenbündels, der anfangs hinter die Retina fiel, nunmehr schon in dieselbe fällt. Dies würde geschehen können, entweder wenn die Brechungsindices der Augenmedien grösser würden, oder wenn eine oder mehrere brechende Flächen sich stärker wölbten, d. h. der Krümmungshalbmesser derselben eine Verkleinerung erlitt. Was die erste dieser beiden Möglichkeiten betrifft, so ist sie ohne weiteres auszuschliessen, da wir uns gar keine Vorstellung machen können, wie durch Nerven Einfluss ganz plötzlich die chemische Natur der Augenmedien Veränderungen erleiden sollte, auch ist meines Wissens nie an eine Erklärung der Anpassung durch Aenderung der Brechungsindices gedacht. Es bleibt also nur die Möglichkeit übrig



anzunehmen, dass die Krümmung der brechenden Flächen verändert werde. In erster Linie hat man wohl die Hornhautkrümmung ins Auge gefasst. Eine Aenderung derselben könnte aber wie ein Zurückweichen der Polargegend der Netzhaut nur durch eine Gestaltveränderung des ganzen Bulbus bewirkt werden und ist eine solche aus den oben angeführten Gründen schon sehr unwahrscheinlich. Es ist auch schon vor vielen Jahren von KOHLRAUSCH experimentell nachgewiesen, dass die Hornhautkrümmung bei der Anpassung für die Nähe keine Aenderung erleidet. Der Grund der vermehrten Myopie bei der Anpassung kann demnach schon von vornherein eigentlich nur in Veränderungen der Linse gesucht werden. Zur Aenderung ihrer Lage und Gestalt reichen auch schon geringe Kräfte aus, da der intraokulare Druck von allen Seiten auf dieselbe wirkt und mithin nicht als Gegenkraft in Betracht kommt. Aehnlich wie eine Verstärkung der Krümmung würde übrigens auch ein Verschieben der ganzen Linse gegen die Hornhaut hin wirken, auch dadurch würde der Erfolg herbeigeführt werden, dass ein in der wässrigen Feuchtigkeit fortgepflanztes Strahlenbündel früher zur Vereinigung kommt. Die Annahme, dass die Anpassung für die Nähe auf dem Vorrücken der Linse beruhe, ist von HUECK sehr sorgfältig entwickelt und hat sich in der physiologischen Optik lange Zeit behauptet. Dies ist um so merkwürdiger als ihr nicht nur die Schwierigkeit einer mechanischen Erklärung des Vorrückens entgegensteht, sondern noch weit mehr der Umstand, dass die faktischen Leistungen des Accommodationsvermögens ein so weites Vorrücken fordern würden, dass es dem oberflächlichsten Blicke nicht entgehen könnte.

Obwohl nach diesen Erwägungen schon von vornherein die Anpassung des Auges für die Nähe kaum anders erklärt werden kann als durch verstärkte Krümmung der Linse, so ist doch diese Theorie in der Geschichte der Wissenschaft erst zuletzt aufgetreten. Nachdem zuerst M. LANGENBECK beiläufig bemerkt hatte, dass die von den Linsenflächen gelieferten Reflexbilder bei der Anpassung für die Nähe Veränderungen erleiden, haben später CRAMER in Holland und HELMHOLTZ gleichzeitig und unabhängig von einander in exakter Weise durch Beobachtung dieser Veränderungen nachgewiesen, dass die Anpassung des Auges für die Nähe bewerkstelligt wird durch Zunahme der Krümmung beider Linsenflächen, so jedoch, dass vorzugsweise die vordere Linsenfläche stärker gewölbt wird und dass der hintere Linsenscheitel merklich an Ort und Stelle verbleibt.

Wir folgen bei der ausführlicheren Darstellung den Untersuchungen von HELMHOLTZ, die an denselben Augen angestellt sind, an

welchen auch die in den bisherigen Abschnitten schon gebrauchten Messungen ausgeführt wurden.

Vor Allem ist eine schon ohne alle besonderen Hilfsmittel zu beobachtende Aenderung des Auges kurz zu erwähnen, welche daher auch schon seit langer Zeit bekannt ist. Sie besteht darin, dass sich beim Nahesehen die Pupille verengert. Man sieht dies sofort am eigenen Auge im Spiegel oder an einem fremden Auge, wenn man nur dafür sorgt, dass vor und während des Aktes der Anpassung für die Nähe das Auge nicht durch allzu helle Beleuchtung geblendet ist, so dass die Pupille beim Sehen in die Ferne einigermaassen weit ist.

Man kann ferner bemerken, dass der Pupillarrand nicht nur enger wird, sondern auch vorrückt. Zu diesem Ende beobachte man ein Auge von der Seite und sogar noch ein wenig von hinten, so dass es einen Anblick etwa wie Fig. 18 *a* darbietet. Man bemerkt darin,

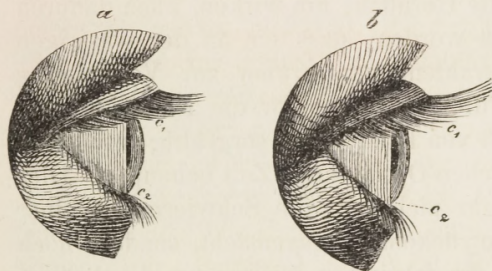


Fig. 18.

als schwarzen Streif neben dem Sklerarande das verzerrte Bild der Pupille und als schwarzen beiderseits spitz auslaufenden Streif  $c_1$   $c_2$  dem Profil der Hornhaut entlang das verzerrte Bild der beschatteten Innenseite des über die Iris vortretenden Randes der Sklera in

der abgewandten Hälfte des Auges. Zwischen diesen beiden schwarzen Streifen zieht sich durch die Hornhaut gesehen ein hellerer farbiger Streif hin — das verzerrte Bild der abgewandten Irishälfte. Dieser hellere Streif wird nun schmaler sowie sich das beobachtete Auge für die Nähe anpasst ohne seine Stellung zu verändern, was leicht zu erreichen ist, wenn man dem beobachteten Auge von vorn herein zwei in derselben Richtung gelegene Gesichtszeichen darbietet, eines fern und eines, am besten aus einer Nadelspitze bestehend, nahe, und nun dem Auge aufgiebt abwechselnd dem einen und dem andern die Aufmerksamkeit zuzuwenden. Das für die Nähe eingerichtete Auge bietet alsdann den Fig. 18 *b* dargestellten Anblick. Die Verschmälernng des hellen Zwischenraumes zwischen den erwähnten beiden schwarzen Streifen kann unmöglich durch die vorhin erwähnte Verengerung der Pupille bedingt sein, denn durch diese wird ja die Iris breiter und es müsste also auch ihr Bild sich verbreitern. Ebenso müsste eine etwaige Drehung des Auges nach der Seite des Beob-



achters den Streif breiter machen. Seine Verschmälerung kann nur durch das Vorrücken des Pupillarrandes gegen die Hornhaut bedingt sein. Bisweilen wird auch noch zwischen dem schwarzen Bilde der Pupille und dem Sklerarande ein wenig von der diesseitigen Hälfte der Iris beim Nahesehen sichtbar.

Man kann sogar den Betrag des Vorrückens der Pupillarebene wenigstens annähernd schätzen, wenn man bei dem Auge zuvor die Maasse der Hornhaut und die Lage der Pupillarebene beim Fernsehen bestimmt hat. Es sei Fig. 19  $ab$  der Pupillendurchmesser beim Fernsehen und man beobachte das Auge aus einem solchen Standpunkte, dass die Pupille gerade eben ganz hinter dem Sklerarande bei  $c$  verschwindet, dann ist die Linie  $cb$  vollständig bekannt als die in das beobachtete Auge wie ein Strahl hineingebrochene Gesichtslinie des Beobachters.

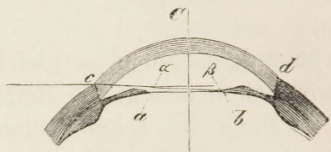


Fig. 19.

Bei Einrichtung des beobachteten Auges für die Nähe wird nun die etwas verengerte Pupille, deren Durchmesser  $\alpha\beta$  bezeichnet ist, ganz oder zum Theil für den Beobachter sichtbar. In der Figur ist angenommen, dass sie eben gerade ganz sichtbar geworden ist, dann muss also der eine Endpunkt ihres Durchmessers in die Linie  $cb$  fallen und der Durchmesser ganz vor derselben liegen, und wenn man die Länge des Durchmessers kennt, kann man seine Lage construiren, mithin messen, um wie viel er nach vorn gerückt ist. Tritt nicht die ganze Pupille eben gerade sichtbar hervor, so muss man den sichtbar werdenden Theil abschätzen und auf diese Schätzung die Construction gründen. Auf diese Weise fand HELMHOLTZ beim Auge A ein Vorrücken der Pupillarebene um 0,36 und beim Auge B ein Vorrücken um 0,44 mm.

Hat man vor das zu beobachtende Auge in der S. 55 beschriebenen Anordnung Lichtflammen aufgestellt, so dass man deren Reflexbilder an der Hornhaut und den beiden Linsenflächen sieht, so bemerkt man an den beiden letzteren eine Verkleinerung, sowie sich das beobachtete Auge für die Nähe einrichtet, und zwar ist die Verkleinerung am Bildchen von der ersten Linsenfläche sehr bedeutend, dagegen am Bildchen von der hinteren Linsenfläche kaum wahrnehmbar. Das Hornhautbildchen bleibt vollkommen unverändert. Zur Veranschaulichung der Grösse dieser Veränderungen kann die Fig. 20 dienen. Die schwarzen Kreisflächen stellen die Pupille des Auges beim Fernsehen A und beim Nahesehen B dar mit den darin erscheinenden 3 Reflexbildchen. Als Objekt dienen zwei quadratische

Oeffnungen in einem Schirm, die durch dahinter stehende Flammen hell leuchtend gemacht sind. *a* ist in beiden Theilen der Hornhaut-

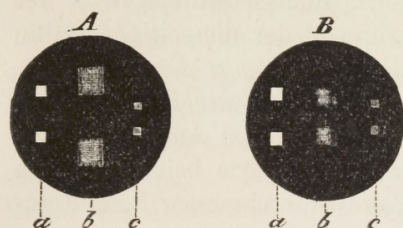


Fig. 20.

reflex, *b* der Reflex von der vorderen, *c* der von der hinteren Linsenfläche. Man sieht wie das erste Linsenbild *b* beim Nahesehen fast um die Hälfte verkleinert wird. Es lässt sich zeigen, dass blosses Vorrücken der vorderen Linsenfläche eine Verkleinerung dieses Reflexes bedingen würde, doch

könnte dieselbe ohne gleichzeitige Krümmungsänderung niemals den wirklich beobachteten Betrag erreichen.

Nach den schon früher beschriebenen Methoden kann man mit Hülfe der Reflexbilder für das nahe sehende Auge die Krümmungshalbmesser der Linsenflächen und die Lage ihrer Scheitel ebenso bestimmen, wie dies für das ruhende oder fernsehende Auge schon geschehen ist. Auf diese Weise fand HELMHOLTZ den Krümmungshalbmesser der vorderen Linsenfläche in dem oben S. 56 mit *A* bezeichneten Auge beim Nahesehen = 8,6 mm., und in dem mit *B* bezeichneten Auge beim Nahesehen = 5,9 mm. Beim Fernsehen war in denselben Augen der Halbmesser der vorderen Linsenfläche = 11,9 und = 8,8 gefunden. Die Abnahme des Halbmessers der hinteren Linsenfläche ist von HELMHOLTZ nicht quantitativ bestimmt worden, weil zu viele hypothetische Faktoren in die Rechnung eingehen würden. Er begnügte sich mit dem Nachweis, dass eine Verkleinerung dieses Halbmessers von sehr geringem Betrage stattfindet.

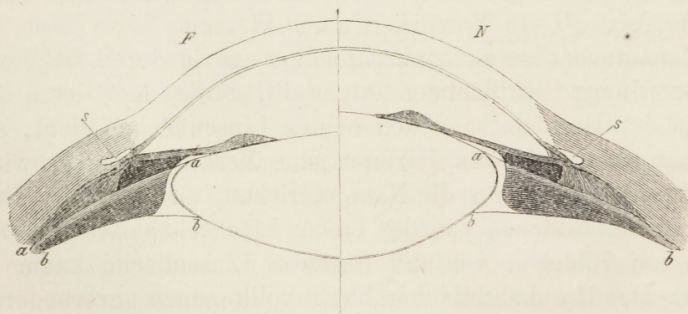


Fig. 21.

Da nun, wie schon ausgeführt, der hintere Linsenscheitel an Ort und Stelle verbleibt, der vordere aber ein wenig vorrückt (beim



Auge *A* um etwa 0,36, beim Auge *B* um etwa 0,44 mm.), so kann man sich von der grössten Veränderung, welche ein normales Auge durch volles Aufgebot der Akkommodationsfähigkeit erleidet, eine deutliche Vorstellung machen. Eine Anschauung davon gibt Fig. 21, wo die vorderen Theile des Auges den gefundenen Messungen entsprechend, in 5 facher Vergrösserung dargestellt sind und zwar links unter *F* so wie sie beim Fernsehen, rechts unter *N* so wie sie beim Nahesehen beschaffen sind.

Durch ähnliche Abrundung der aus den Messungen am nahesehenden Auge hervorgegangenen Zahlen wie sie S. 61 an den für das fernsehende Auge gefundenen angebracht wurde, kann man ein akkommodirtes schematisches Auge bilden und seine Cardinalpunkte berechnen. Die so von HELMHOLTZ gewählten Werthe sind mit den S. 61 u. 62 gegebenen Werthen für das fernstehende schematische in der nachstehenden Tabelle zusammengestellt.

	Akkommodation für	
	die Ferne	die Nähe
Angenommen:		
Brechungsindex der wässrigen Feuchtigkeit . . . . .	$\frac{103}{77}$	$\frac{103}{77}$
Brechungsindex der Linsensubstanz . . . . .	$\frac{16}{11}$	$\frac{16}{11}$
Brechungsindex des Glaskörpers . . . . .	$\frac{103}{77}$	$\frac{103}{77}$
Krümmungshalbmesser der Hornhaut . . . . .	8,0	8,0
Krümmungshalbmesser der vorderen Linsenfläche . . .	10,0	6,0
Krümmungshalbmesser der hinteren Linsenfläche . . .	6,0	5,5
Ort des vorderen Linsenscheitels . . . . .	3,6	3,2
Ort des hinteren Linsenscheitels . . . . .	7,2	7,2
Berechnet:		
Ort des vorderen Brennpunktes . . . . .	— 12,107	— 11,241
Ort des ersten Hauptpunktes . . . . .	1,940	2,033
Ort des zweiten Hauptpunktes . . . . .	2,356	2,492
Ort des ersten Knotenpunktes . . . . .	6,957	6,515
Ort des zweiten Knotenpunktes . . . . .	7,373	6,974
Ort des hinteren Brennpunktes . . . . .	22,231	20,248

Wenn man jetzt annimmt, dass das schematische Auge im ruhenden d. h. fernsehenden Zustande emmetropisch ist, so kann man leicht berechnen, für welchen Abstand es eingestellt ist, wenn es die Veränderungen erlitten hat, welche durch die Zahlen der zweiten Spalte unserer Tabelle dargestellt sind. In der That annehmen, das fernsehende Auge sei emmetropisch, heisst annehmen, dass der Pol seiner Netzhaut mit dem zweiten Brennpunkte zusammenfällt, d. h. 22,231 mm. hinter dem Hornhautscheitel liegt. Hier muss er dann aber auch nach den Veränderungen bleiben und man kann sich fragen in wel-

cher Entfernung  $p$  muss ein leuchtend gedachter Punkt der Axe vom ersten Hauptpunkt liegen, damit sein Bild, 22,231 mm. hinter die Hornhaut fällt, wenn die in der zweiten Spalte der Tabelle aufgeführten Data gelten. Um die gesuchte Grösse  $p$  zu berechnen, bedenken wir erstens, dass der Abstand des Netzhautpoles vom zweiten Hauptpunkte des für die Nähe eingerichteten Auges 22,231—2,492 also 19,739 mm. beträgt. Dieser Abstand muss aber als Bildabstand dem gesuchten Objektabstand  $p$  entsprechen, d. h. mit ihm und den Brennweiten des nahesehenden Auges in der bekannten Beziehung stehen, die durch die Gleichung

$$\frac{f}{p} + \frac{f^*}{p^*} = 1$$

(s. S. 19) gegeben ist. Nun ist aber für das nahesehende schematische Auge  $f = 11,241 + 2,033 = 13,274$  mm. und  $f^* = 20,248 - 2,492 = 17,756$  mm. Man hat also  $p$  zu berechnen aus der Gleichung

$$\frac{13,274}{p} + \frac{17,756}{19,739} = 1$$

und es ergibt sich = 132,08 mm. Das heisst also mit andern Worten, wenn das schematische Auge im fernsehenden Zustande emmetropisch ist, so ist es bei Aufgebot seiner ganzen Akkommodationskräfte für etwa 132 mm. oder für ungefähr 5 pariser Zoll Entfernung eingestellt, und das Maass des Akkommodationsvermögens würde unter Annahme der in obiger Tabelle verzeichneten Veränderungen ungefähr  $\frac{1}{5} - \frac{1}{\infty}$  oder ungefähr  $\frac{1}{5}$  sein. Da nun dieser Zahlwerth

in der That den beobachteten Leistungen eines normalen Akkommodationsvermögens etwa entspricht, so genügen die vorstehend gemachten Annahmen vollkommen, um es zu erklären, und es zeigt sich kein Bedürfniss noch nach anderen Veränderungen im Auge zu suchen.

### III. Mechanismus der Akkommodation.

Nachdem die Veränderungen des dioptrischen Apparates, welche das Auge myopischer machen, erkannt sind, entsteht die Frage, durch welche Kräfte sie bewirkt werden. Da die Veränderung willkürlich ist, also unter dem Einflusse des Gehirns geschieht, so ist von vornherein kaum zweifelhaft, dass sie durch die Kräfte von Muskeln bewirkt werde, welche ihre motorischen Nerven aus dem Hirn erhalten. Die wirksamen Muskelfasern müssen offenbar im Inneren des Augapfels liegen, da die äusseren Augenmuskeln nicht eine Gestaltveränderung der Linse bewirken könnten, ohne die Gestalt des ganzen



Bulbus zu ändern, welche, wie wir gesehen haben, ganz unverändert bleibt. Nun haben wir zwar im Inneren des Augapfels glatte Muskelfasern kennen gelernt, nämlich in der Iris den Kreismuskel und den Dilator, sowie im vorderen Abschnitte der Chorioidea den musculus ciliaris; es ist aber keineswegs auf den ersten Blick ersichtlich, in welcher Weise eine Zusammenziehung eines dieser Muskeln die beschriebenen Veränderungen der Linse hervorbringt.

Von den beiden Forschern, welche unabhängig von einander die Vorwölbung der vorderen Linsenfläche als Ursache der Anpassung für die Nähe bewiesen haben, sind zwei verschiedene Hypothesen zur Erklärung des Mechanismus aufgestellt. CRAMER schreibt den Muskelfasern der Iris die Hauptrolle dabei zu, indem er annimmt, dass diese Membran nicht nur mit ihrem Pupillarrande, sondern in grösserer Breite der vorderen Linsenwölbung aufliegt. Wenn sich nun die radialen und Kreisfasern der Iris gleichzeitig zusammenziehen, so soll durch das Streben der vorgewölbten Iris sich bei wachsender Spannung abzuflachen, ein Druck auf den Rand der Linse ausgeübt werden, welcher die Mitte derselben in die Pupille vorzuquellen zwänge. Hiernach würde sich das ruhende und das akkommodirte Auge in übertriebener schematischer Darstellung so ausnehmen, wie *R* und *A* Fig. 22. CRAMER hat zwar diese Hypothese durch Versuche an Seehundsäugen zu stützen gesucht, deren vordere Theile er vor und nach Zerschneidung der Iris elektrisch reizte, doch dürften dieselben kaum beweisend sein, da die Augen zu sehr verstümmelt zur Beobachtung kamen. Für das Auge des Menschen und der meisten Säugethiere kann auch schon auf Grund der anatomischen Verhältnisse kaum an einen solchen Anpassungsmechanismus gedacht werden. Immerhin könnte es sein, dass bei dem zum abwechselnden Sehen in Luft und Wasser einer kolossalen Anpassungsfähigkeit bedürftigen Seehundsauge der von CRAMER beschriebene Vorgang wirklich vorkäme.

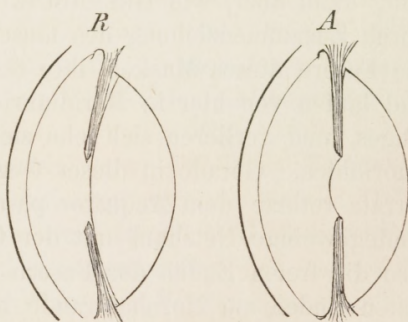


Fig. 22.

Ganz anders erklärt HELMHOLTZ die Vorwölbung der Linse durch Muskelwirkung. Er legt die Annahme zu Grunde, dass die Linse im ruhenden Auge nicht diejenige Gestalt besitzt, welche dem Gleichgewicht ihrer eigenen elastischen Kräfte entspricht. Vielmehr würde

die Linse, wenn man sie aus ihrer Umgebung befreite, sich selbst überlassen dicker auf beiden Seiten stärker gewölbt sein und mithin, da das Volum konstant sein muss, einen entsprechend kleineren Randumfang haben. Im lebenden ruhenden Auge sei die Linse durch eine in der zonula Zinnii vorhandene radiale Spannung in der Richtung ihrer Randdurchmesser gedehnt und von vorn nach hinten entsprechend abgeplattet. Die Annahme einer fortdauernden elastischen Spannung in einem Organe, die durch die Ernährungsbedingungen unverändert aufrecht erhalten wird, hat an sich durchaus nichts paradoxes; sehen wir doch derartige Spannungen in fast allen lebenden Geweben. Zur Stütze seiner Annahme über die Gleichgewichtsfigur der Linse macht HELMHOLTZ noch besonders darauf aufmerksam, dass alle frühere Messungen an Leichenlinsen eine grössere Dicke ergeben haben als seine und Anderer Messungen an Lebenden. Da man nun kaum annehmen kann, dass die früheren Forscher zufällig sehr dicke die späteren an lebenden untersuchenden Forscher zufällig sehr dünne Linsen zu Gesicht bekamen, so liegt die Annahme nahe, dass die Linse aus dem Zwange ihrer Umgebungen befreit dicker wird.

Wenn wir diese Voraussetzung zugeben, so ist klar, dass auch im lebenden Auge die Linse sich stärker wölbt, sowie der abflachende Zug der zonula Zinni abnimmt. Eine solche Abnahme dieser Spannung kann aber, wie HELMHOLTZ behauptet, hervorgebracht werden durch Zusammenziehung des musculus ciliaris. In der That haben die Fasern dieses Muskels ihre festen Punkte am Rande der Cornea und laufen von hier in Meridianrichtungen gegen den Aequator des Auges, und verlieren sich ehe sie diesen erreichen im Gewebe der Chorioidea. Gerade in dieser Gegend aber, wo die sogenannte ora serrata retinae dem Aequator parallel verläuft, ist die bloss noch bindegewebige Netzhaut mit der Chorioidea fester verklebt. Wenn also die freien Enden der Fasern des musculus ciliaris gegen ihre festen Enden am Hornhautrande hingezogen werden, so wird sich auch die ora serrata etwas dem Hornhautrande nähern und damit wird die radiale Spannung der zonula Zinnii, wofern eine solche vorhanden war, nachlassen und der Linse Freiheit geben, sich ihrer natürlichen Gleichgewichtsfigur zu nähern. Die Ciliarfortsätze sollen dabei nach einigen Autoren vor- nach anderen zurücktreten.

Dieser von HELMHOLTZ nur vermuthungsweise ausgesprochene Vorgang ist von HENSEN und VÖLKERS<sup>1</sup> am Hundsauge, sowie später auch am Auge der Katze, des Affen und an einem ausge-

<sup>1</sup> HENSEN und VÖLKERS, Experimentaluntersuchung über den Mechanismus der Akkommodation. Kiel 1868 und Arch. f. Ophthalmologie XIX. 1. Abth.



schnittenen menschlichen Auge experimentell beobachtet worden. Der beweisendste Versuch dieser Forscher bestand darin, dass sie eine feine Nadel durch die Sklera in die Chorioidea einstießen, da wo der Ciliarmuskel schon sein Ende erreicht hat. Wenn sie nun die Ciliarnerven oder das Ganglion ciliare elektrisch reizten, so bewegte sich das frei herausstehende Ende der Nadel merklich nach hinten, wodurch eine Verschiebung der chorioidea unter der Sklera nach vorn erwiesen ist, indem die Nadel in der Sklera ihren festen Drehpunkt hat. Auch konnten sie durch ein in die Sklera vorn eingeschnittenes Fensterchen nach Abtragung der betreffenden Theile des Ciliarkörpers durch ein an den Wundrand der Sklera angelegtes Glasfädchen dessen Spitze sich auf die freigelegte Zonula stützte das Verrücken derselben bei Reizung der Ciliarnerven beobachten. Das positive Ausfallen dieses Versuches ist um so beweisender, als der freigelegte Streif der Zonula nur noch durch die zu beiden Seiten unter den unverletzten Scleratheilen liegenden Fasern des Ciliarmuskels mitgenommen werden konnte.

Die Versuche von HENSEN und VÖLKERS ergeben ausser der Bestätigung der HELMHOLTZ'schen Theorie vom Mechanismus der Anpassung noch den Beweis dafür, dass der Ciliarmuskel vom ganglion ciliare aus innervirt wird, und zwar offenbar von Fasern, welche diesem ganglion durch seine motorische Wurzel, also aus dem nervus oculomotorius zugeführt werden. Dieser Satz wird übrigens durch zahlreiche pathologische Erfahrungen bestätigt, nach denen Lähmung des n. oculomotorius regelmässig mit Verlust des Akkommodationsvermögens verknüpft ist.

HENSEN und VÖLKERS bemerkten ferner bei ihren Versuchen, dass die Rückkehr des Akkommodationsapparates in seinen Ruhezustand beim Aufhören der Reizung stets merklich rascher geschah als der Uebergang in den möglichst angestrengten bei Beginn der Reizung. Hierüber sind auch beim Menschen Versuche durch Selbstbeobachtung angestellt, welche ein ähnliches Resultat ergeben haben. So fand VIERORDT<sup>1</sup> dass der Uebergang aus der Anpassung für 18m. auf die für 0,1m. die Zeit von 1,18" in Anspruch nahm der umgekehrte Uebergang aber nur 0,87" erforderte. AEBY<sup>2</sup> fand zum Uebergang aus dem Anpassungszustand für 0,43m in den für 0,115m nahezu 2" erforderlich zum Uebergang in umgekehrtem Sinne dagegen nur 1,2".

Diese Plötzlichkeit des Zurückspringens der bei der Anpassung für die Nähe veränderten Theile des Auges in ihre alte Lage und

1 VIERORDT, Arch. f. physiol. Heilk. N. F. I. S. 17. 1857.

2 AEBY, Ztschr. f. rat. Med. 1861. N. F. XI. S. 300.

die damit sehr plötzlich zurückkehrende alte Spannung der Zonula Zinnii scheint die Ursache einer sehr merkwürdigen zuerst von PURKINJE<sup>1</sup> beobachteten subjektiven Lichterscheinung zu sein, welche CZERMAK<sup>2</sup> das „Akkommodationsphosphen“ genannt hat. Sie besteht darin, dass manche Individuen beim plötzlichen Nachlassen der Anpassung für kleinsten Abstand im Dunklen einen hellen Ring aufblitzen sehen der ungefähr die in sich zurücklaufende Grenze des einäugigen Gesichtsfeldes bildet. Es muss also dieser Erscheinung eine Reizung der etwa an der ora serrata gelegenen Netzhautelemente entsprechen. Eine solche Reizung kann aber in der That bei der plötzlichen Wiederanspannung der Zonula wohl eintreten, da die im Bereich der ora serrata mit der Zonula eng verklebte Netzhaut hier in diesem Augenblicke eine Zerrung erleiden muss.

In der Regel ist die Innervation des Akkommodationsapparates verknüpft mit der der musculi recti interni, so dass Convergenz der beiden Gesichtslinien des rechten und linken Auges und Myopiegrad gleichen Schritt halten. Es sind jederzeit so genau als möglich eben die beiden Augen eingestellt für den „fixirten Punkt“, welcher den Durchschnittspunkt ihrer beiden Gesichtslinien bildet. Die Verknüpfung der beiden Innervationsströme, die beide im Bereiche des n. oculomotorius fließen, ist jedoch nicht unauflöslich. Vielmehr ist es möglich durch Uebung die Anspannung des Akkommodationsapparates von der Zusammenziehung der mm. recti interni unabhängig zu machen.

Die oben erwähnte Verengung der Pupille<sup>3</sup> soll nach WEBER nur dann mit der Anpassung für die Nähe einhergehen, wenn dieselbe mit einer Vermehrung der Convergenz der Gesichtslinien verknüpft ist. Ferner ist von DONDERS<sup>4</sup> beobachtet, dass die Verengung der Pupille mit der Akkommodation für die Nähe nicht ganz gleichzeitig eintritt, sondern ihr erst nachfolgt.

Immerhin ist die Pupillenverengung im Allgemeinen eine die Anpassung für die Nähe regelmässig begleitende Erscheinung und man kann daher füglich die Frage aufwerfen ob die Verengung der Pupille dabei für den Sehakt irgend welchen Vortheil hat, sind wir doch gewohnt, alle typischen Einrichtungen der organischen Natur „zweckmässig“ zu finden. Man könnte die teleologische Bedeu-

<sup>1</sup> PURKINJE, Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne. II. S. 125. Berlin 1825.

<sup>2</sup> CZERMAK, Ueber das Akkommodationsphosphen. Sitzgsber. d. Wiener Acad. XXVII. S. 78. 1857.

<sup>3</sup> Siehe Seite 88.

<sup>4</sup> DONDERS, Pupilbeweging bij Accommodatio. Nederl. Arch. v. Genees- en Naturk. II.



tung der Pupillenverengerung etwa in folgender Betrachtung suchen. Die Grösse des Netzhautbildes hängt ab von der Entfernung des Objectes vom Knotenpunkte die Oeffnung des von einem Punkte des Objectes ausgehenden Strahlenkegels dagegen vom Abstände des Objectes von der scheinbaren Pupille. Man denke sich nun eine gleichmässig leuchtende Fläche aus der Ferne an das Auge herangerückt und dieses folge mit seiner Anpassung, so dass immer ein deutliches Netzhautbild entsteht. Offenbar würde hier die Oeffnung der von den einzelnen Punkten ausgehenden Strahlenbündel rascher zunehmen als die Grösse des Netzhautbildes und somit würde das Netzhautbild heller werden. Man könnte nun vermuthen, dies werde kompensirt durch die bei der Annäherung des Objectes stattfindende Verengerung der Pupille. Es ist aber in Wirklichkeit dieselbe bedeutend grösser als es jene Compensation erfordert. Wir besitzen nämlich von der Pupillenverengerung beim Nahesehen sehr genaue Messungen von OLBERS<sup>1</sup>. Er fand die in nachstehender Tabelle verzeichneten Zahlen

Entfernung des Objectes in mm.	Durchmesser der Pupille in mm.
108	4,04
216	4,93
324	5,31
432	5,62
540	5,89
648	6,07
756	6,16

Nimmt man nun die Entfernung der scheinbaren Pupille von der Hornhaut zu drei und die Entfernung des Knotenpunktes zu 7 mm. an, so ergibt sich, dass die Helligkeit des Netzhautbildes bei Annäherung des Objectes von 648 bis auf 108 mm. im Verhältnisse von 37,3 : 17,5 abnimmt während sie nur im Verhältnisse von 1,012 : 1,073 zunehmen würde wenn die Pupillenöffnung konstant bliebe.

Die Innervation der muskulösen Elemente der tunica uvea ist von verschiedenen Forschern zum Gegenstand besonderer Untersuchungen gemacht worden, und es ist ausser den schon gelegentlich ausgesprochenen Sätzen hierüber noch folgendes festgestellt. Der Oculomotorius führt die Nervenfasern für den der Accommodation dienenden musculus ciliaris, sowie für den sphincter pupillae und zwar verlaufen diese Fasern in den vordersten Strängen seiner Wurzeln. Ihre nächste centrale Ursprungsstelle scheinen nach Versuchen von HENSEN und VÖLKERS<sup>2</sup> diese Fasern im hinteren Theile des Bodens

1 OLBERS, De mutationibus oculi internis. Diss. inaug. Göttingen 1780.

2 HENSEN und VÖLKERS, Arch. f. Ophthalmologie. XXIV. 1. Abth.

vom 3. Hirnventrikel zu haben. Reizt man nämlich den vorderen Abschnitt dieses Theils, so erfolgt Accommodation. Reizung etwas weiter hinten hat Verengerung der Pupille zur Folge. Geschieht die Reizung noch weiter hinten, wo der 3. Ventrikel in die Sylvische Wasserleitung übergeht, so zieht sich der *rectus internus* zusammen. Geht man mit dem Reize noch weiter nach hinten, so folgen der Reihe nach Contraktionen des *rectus superior levator palpebrae*, *rectus inferior* und endlich *obliquus inferior*. Dem *sphincter pupillae* sollen nach der Ansicht einiger Forscher<sup>1</sup> auch noch motorische Fasern in der Bahn des *I. trigemini* zugeführt werden.

Der *dilatator pupillae* erhält, wie schon seit langer Zeit bekannt ist, seine Innervation auf ganz anderen Bahnen nämlich durch Sympathicuszweige aus dem Halsmarke, welche sich den Aesten der *Carotis* anschliessen. Nach HENSEN und VÖLKERS sollen die pupillenerweiternden Fasern des Sympathicus nicht alle das ganglion ciliare durchsetzen, da nach Abtragung desselben Reizung des Sympathicus am Halse immer noch Erweiterung der Pupille hervorbringe.

Im Laufe des normalen Lebens wird, wie von Alters her bekannt, der Pupillenverengerer nicht bloss bei der Accommodation mit Convergenz der Augenaxen erregt, sondern auch reflektorisch durch jeden stärkeren Lichtreiz der die Netzhaut trifft. Die Zweckmässigkeit dieses Reflexmechanismus ist ersichtlich, denn es schützt sich auf diese Weise die Netzhaut so viel als möglich vor allzu starker Reizung, indem das Netzhautbild bei gleicher Helligkeit des Objectes um so dunkler ist je enger die Pupille. Die Pupillenverengerung ist um so bedeutender je grösser die gesammte ins Auge fallende Lichtmenge ist, wächst also sowohl mit der Helligkeit des Objectes als mit der Grösse seines Netzhautbildes. Ferner wirkt Licht, das die Polargegend der Netzhaut beleuchtet, stärker pupillenverengend als solches, das auf die Seitentheile fällt. Lichtreiz, der nur auf eine Netzhaut wirkt, bringt Pupillenverengerung in beiden Augen hervor und zwar in gleichem Maasse.

Wird der *oculomotorius* und der *sympathicus* gleichzeitig künstlich (elektrisch) gereizt, so überwiegt in der Iris die Wirkung des ersteren, indem Pupillenverengerung eintritt. Gegen natürliche reflektorische Reizung des *Oculomotorius* durch starke Belichtung der Netzhaut kann aber künstliche starke Reizung des Sympathicus aufkommen und eine Erweiterung der Pupille hervorbringen. Starke directe

---

<sup>1</sup> GRÄFE, *Arch. f. Ophthalmologie* II. 2. Abth. S. 302.



elektrische Reizung der ganzen Iris bringt eine mittlere Weite der Pupille zu Stande.<sup>1</sup>

Bemerkenswerth sind endlich die Beziehungen einiger Gifte zu der Innervation der Iris. Die sogenannten Mydriatica besonders Atropin und Hyoscyamin bewirken in die Säftemasse gebracht oder ins Auge geträufelt sehr andauernde Erweiterung der Pupille. Umgekehrt giebt es Gifte namentlich das Physostigmin, welche ebenso angewandt andauernde Verengerung bewirken und deshalb als „Myotica“ bezeichnet werden.

## SECHSTES CAPITEL.

### Abweichungen des wirklichen Auges vom idealen.

#### I. Farbenabweichung des Auges.

In allen bisherigen Betrachtungen wurde jedem brechenden Medium des Auges ein bestimmter Brechungsindex beigelegt. Dies ist aber streng genommen nicht zulässig, wenn es sich um das Sehen der uns umgebenden Objekte in natürlicher Beleuchtung durch Sonnenlicht oder auch in künstlicher Beleuchtung durch gewöhnliches Lampenlicht handelt. Es gehen alsdann bekanntlich von jedem Punkte der Oberfläche eines Körpers im Allgemeinen verschiedene — meist unzählige — Strahlenarten aus, die sich durch ihre Schwingungsdauer unterscheiden und die, wie später gezeigt werden wird, auf die Netzhaut verschiedenartige Eindrücke machen. Strahlen von verschiedener Schwingungsdauer kommen aber bekanntlich für dieselbe Zusammenstellung zweier brechender Medien im Allgemeinen verschiedene Brechungsindices zu, und zwar ist in der Regel der Brechungsindex um so grösser, je kleiner die Schwingungsdauer ist.

Sendet also ein Objektpunkt gleichzeitig Strahlenbündel von verschiedener Schwingungsdauer aus, so muss eine brechende Kugelfläche von demselben ebenso viele Bilder hintereinander liefern als Strahlenarten vorhanden sind, indem sich das gebrochene Strahlenbündel der geringsten Schwingungsdauer zuerst vereinigt, da seine Strahlen am stärksten abgelenkt werden und dann erst nach der Reihe die übrigen. Dasselbe

<sup>1</sup> ENGELHARDT, Beiträge zur Lehre von den Bewegungen der Iris. In den Untersuchungen aus dem Würzburger Laborat. 4. Heft. herausgeg. von R. GSCHIEDLEN.

muss stattfinden, wenn mehrere Brechungen an hintereinander liegenden Kugelflächen erfolgen, wenigstens sicher dann, wenn alle Brechungen im selben Sinne erfolgen, d. h. wenn die Knickungswinkel der Strahlen alle nach derselben Seite hohl sind, denn alsdann müssen zwei ursprünglich in derselben Richtung fortgepflanzte Strahlen von verschiedener Brechbarkeit bei jeder Brechung weiter auseinandertreten. Dies ist aber beim Auge im Allgemeinen der Fall. Es müssen also jedesfalls im Auge von ein und demselben Objektpunkte, wenn er verschiedene Lichtarten gleichzeitig aussendet, verschiedene Bilder hintereinander entstehen. Wenn also der die Strahlen von 450 Billionen Schwingungen in der Sekunde vereinigende Bildpunkt für einen gegebenen Objektpunkt in die Netzhaut fällt, so liegt der Bildpunkt sicher vor der Netzhaut, in welchem sich die Strahlen von 750 Billionen Schwingungen in der Sekunde vereinigen, die von demselben Objektpunkte ausgegangen sind, und es werden also diese Strahlen auf der Netzhaut in einen Zerstreuungskreis ausgebreitet sein.

Es scheint hiernach als wäre ein deutliches Sehen bei nicht homogener Beleuchtung unmöglich. Gleichwohl bemerkt man beim gewöhnlichen Sehakt auch in Beleuchtung mit gemischtem Lichte nichts von einer auf Farbenzerstreuung beruhenden Undeutlichkeit. Dies hat in verschiedenen Umständen seinen Grund. Erstens nämlich ist für die brechenden Medien des Auges, wie für alle wässrigen Lösungen der Unterschied der Brechungsindices der Strahlen verschiedener Schwingungsdauer nicht sehr gross, so dass die Vereinigungspunkte der verschiedenfarbigen Strahlen nur wenig hintereinander liegen, um so weniger als die Vereinigungsweiten im Auge überhaupt kurz sind. Die durch Farbenzerstreuung bedingten Zerstreuungskreise werden also überall sehr klein sein. Nimmt man z. B. für das brechende Medium des oben beschriebenen reducirten Auges dieselbe Dispersion an wie für das Wasser, so hätte man für das rothe Licht der Fraunhofer'schen Linie *C* den Brechungsindex 1,33 und für das violette Licht der Linie *G* den Brechungsindex 1,34 zu setzen. Die Brennweiten wären dann für rothes Licht 20,57, für violettes 20,14 mm. Wenn nun die Netzhaut mit der Brennweite für rothe Strahlen zusammenfiel, so würde der Zerstreuungskreis für die violetten bei einem Pupillendurchmesser von 4 mm. etwa 0,08 mm. Durchmesser haben, was allerdings schon eine in Betracht kommende, aber doch immerhin sehr kleine Grösse wäre. In Wirklichkeit scheint sogar die resultirende Farbenzerstreuung noch etwas grösser zu sein als die für das reducirte Auge soeben berechnete. Diese nämlich ergibt, dass, wenn das Auge in monochromatischer rother Beleuchtung em-



metropisch angenommen wird, es in monochromatischer violetter Beleuchtung für 713 mm. oder 26 Zoll eingerichtet wäre. FRAUNHOFER hatte aber gefunden, dass sein eigenes bei rother Beleuchtung emmetropisches Auge in violetter Beleuchtung für nur 18 bis 24 Zoll eingerichtet war. Ebenso fanden HELMHOLTZ und MATTHIESSEN den Unterschied der Sehweite für rothes und violettes Licht etwas freilich nur wenig grösser, als es den obigen Annahmen für das reducirte Auge entspricht. Trotzdem stört wie gesagt die chromatische Abweichung den gewöhnlichen Sehakt niemals in merklichem Grade. Dazu trägt besonders folgender Umstand bei. Beim gewöhnlichen Sehakt wirkt in der Regel Licht, in dem die Strahlen von kleinster und grösster Brechbarkeit nur in geringer Intensität physiologisch wirken, so dass wenn die Retina sich in der Vereinigungsweite der Strahlen von mittlerer Brechbarkeit befindet, die Zerstreuungskreise, welche alsdann schon geometrisch noch kleiner sind als vorhin berechnet wurde, auch so schwach beleuchtet sind, dass ihre Helligkeit gegenüber der Helligkeit des Centrums geradezu verschwindet. Man sieht leicht, dass auch abgesehen von der geringen Intensität der äussersten rothen und violetten Strahlen ein Zerstreuungsbild der in Rede stehenden Art in der Mitte am hellsten sein muss, da sie von Strahlen aller Brechbarkeitststufen beleuchtet ist, während jede folgende concentrische Zone von weniger Strahlen getroffen wird als die nächst vorhergehende von ihr umschlossene.

Betrachtet man eine weisse Fläche auf dunklem Grunde und nimmt man das Auge für Strahlenbündel mittlerer Brechbarkeit, welche von Punkten dieser Fläche ausgehen, eingerichtet an, so kann man berechnen, wie die Helligkeit am Rande des Netzhautbildes abnimmt.

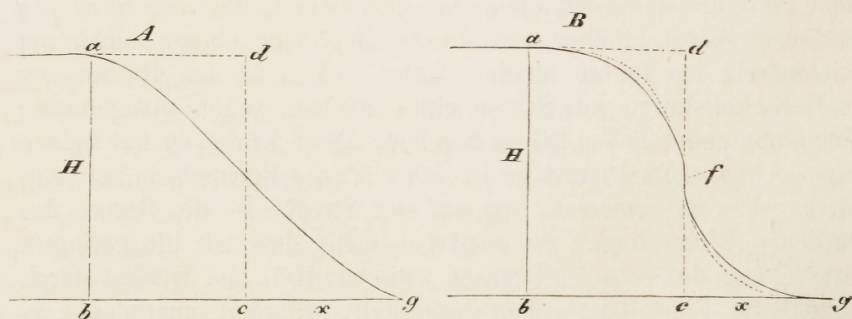


Fig. 23.

HELMHOLTZ stellt das Ergebniss dieser Rechnung durch die Curve *afg* unter *B* Fig. 23 dar. Als Abscissenaxe ist eine Linie gedacht, welche den Rand des Bildes senkrecht durchschneidet und der Punkt *c*

bedeutet den Durchschnittspunkt derselben mit der Randlinie, welche gelten würde, wenn nur Strahlen von mittlerer Brechbarkeit vorhanden wären und mithin ein geometrisch scharfes Bild entstände. Wegen der chromatischen Zerstreuungskreise greift nun die Helligkeit ein wenig nach aussen (bei  $g$ ) über diesen Rand hinüber und ein wenig nach innen erstreckt sich die Verminderung der vollen Helligkeit, welche erst von  $b$  an nach links im Inneren des Bildes statthat. Die Helligkeit in jedem Punkte ist durch die daselbst zu errichtende Ordinate der Curve  $afg$  dargestellt;  $ba$  ist mithin das Maass der vollen Helligkeit, welche von  $b$  nach links konstant bleibt. Der Gang der Curve zeigt einen senkrechten Abfall (bei  $f$ ) also eine plötzliche Verminderung der Helligkeit in dem Punkte  $c$ , welcher dem Rande des absolut deutlichen Bildes entspricht. Dieser plötzliche Abfall der Helligkeit muss sich aber dem Bewusstsein als eine scharfe Grenze bemerklich machen, so dass ein solches Bild für das Sehen denselben Dienst leistet wie ein vollkommenes, dessen Helligkeitskurve durch die geknickte Linie  $adcg$  darzustellen wäre. Es ist noch zu bemerken, dass die Curve  $afg$  von HELMHOLTZ konstruirt ist ohne Rücksicht auf den Umstand, dass die Strahlen von grösster und von kleinster Brechbarkeit im Spektrum des weissen Lichtes von weit geringerer Wirkung sind. Wenn man hierauf Rücksicht nimmt, so nähert sich die Curve der geknickten Linie  $adcg$  noch mehr, in dem sie etwa wie die punktirte Linie verlief.

Ganz anders verläuft die Helligkeitskurve auf einer den Rand des Bildes durchsetzenden Linie, wenn Zerstreuungskreise in Folge unvollkommener Anpassung vorhanden sind. Jeder solche einzeln betrachtet, ist gleichmässig hell in seiner ganzen Ausdehnung und daher greift die Helligkeit annähernd gleichmässig über den Rand des deutlichen Bildes hinüber und die Verdunkelung ebenso annähernd gleichmässig ins Innere hinein. Unter  $A$  Fig. 23 hat HELMHOLTZ die Helligkeitskurve am Saume eines solchen wegen mangelhafter Einstellung undeutlichen Bildes gegeben. Diese Curve  $ag$  hat keinen ausgezeichneten Punkt und es ist daher für das Bewusstsein kein Anhalt gegeben zu ermessen, wo auf der Strecke  $bg$  die Grenze des deutlichen Bildes liegt. So erklärt es sich, dass wir die geringste Verwischung der scharfen Grenzen zwischen Hell und Dunkel durch mangelhafte Einstellung schon bemerken, während uns eine Verwischung durch Farbenzerstreuung vollständig entgeht.

Um die unzweifelhaft vorhandene Farbenzerstreuung wirklich am eigenen Auge zu bemerken, muss man daher besondere Veranstaltungen treffen. Eine solche besteht darin, dass man seine Seh-



weite nacheinander in verschiedener monochromatischer Beleuchtung bestimmt. Man findet sie, wie oben schon erwähnt wurde, stets in rother Beleuchtung beträchtlich grösser als in violetter. Da man hier aber immer noch den freilich nur spitzfindigen Einwand erheben könnte, es handle sich um unwillkürliche Akkommodationsvorgänge, so ist es lehrreich noch einige Thatsachen kennen zu lernen, bei denen wirklich farbige Säume entstehen, wie an den Bildern mangelhaft achromatisirter Fernröhre. Die einfachste derartige Thatsache kann man jeden Augenblick in folgender Art beobachten. Man betrachte eine Grenze zwischen einer weissen und schwarzen Fläche mit vollkommener Anpassung. Man wird keinen farbigen Saum bemerken. Sowie man aber jetzt einen grossen Theil der Pupille mit einem Schirm verdeckt, dessen Kante parallel ist der Grenze zwischen hell und dunkel im Objekte, so erscheint jene Grenze gelb gesäumt, wenn der Theil der Pupille verdeckt ist, welcher nach der Seite des Schwarz im Objekte liegt und sie erscheint blau gesäumt im entgegengesetzten Falle. Die Erklärung ist sehr einfach. Sei in Fig. 24  $A$  ein weiss leuchtender Punkt,

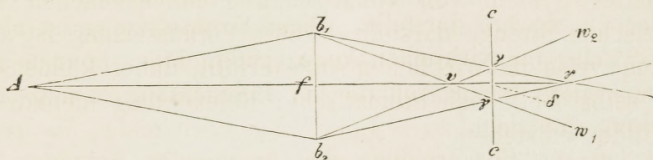


Fig. 24.

$b_1 b_2$  sei die Pupille, das violette von  $A$  ausgehende Strahlenbündel vereinige sich in  $v$ , das rothe in  $v'$ . Die Netzhaut befinde sich bei  $cc$ , so dass in ihr das Bündel von Strahlen mittlerer Brechbarkeit vereinigt wird. Der sehr kleine Zerstreungskreis  $\gamma\gamma$  wird überall von gemischtem Lichte getroffen werden, also nicht merklich gefärbt erscheinen. Schiebt man aber einen Schirm vor, der z. B. die untere Hälfte des Strahlenbündels  $fb_2$  abhält, so kommen auf den oberen Theil des Zerstreungskreises nur noch Strahlen von kleiner Brechbarkeit und auf den unteren Theil nur noch solche von grosser Brechbarkeit. Daher wird nach aussen projicirt der Punkt  $A$  oben blau und unten gelb und roth aussehen. Ist  $A$  ein Punkt der wagrechten Grenze zwischen einer oben gelegenen weissen und unten gelegenen schwarzen Fläche, so schieben sich nur die oberen Säume der Zerstreungskreise über die andern hervor und die Grenze erscheint gelb oder röthlich gesäumt. Ist umgekehrt  $A$  ein Punkt der wagrechten Grenze zwischen unten weiss und oben schwarz, so schieben sich nur die unteren blauen Theile der Zerstreungskreise über das ganz weisse

Feld hervor und bilden einen blauen Saum wie es dem obigen Satze entspricht.

Alle Erscheinungen der Farbenzerstreuung treten subjektiv weit stärker hervor, wenn man nicht weisse Beleuchtung anwendet, sondern solche, in welcher zwei Lichtarten von möglichst verschiedener Brechbarkeit vorherrschen. Solches Licht erhält man z. B. wenn man Sonnen- oder Lampenlicht durch Kobaltglas gehen lässt. Das durchgelassene Licht enthält nämlich vorwiegend rothe und blaue Strahlen und nur sehr wenig von mittlerer Brechbarkeit. Wenn man solches Licht anwendet, erscheint schon ohne Verdeckung eines Theiles der Pupille ein hellleuchtender Punkt entweder mit einem blauen oder rothen Hofe, je nachdem das Auge für blaue oder für rothe Strahlen eingerichtet ist.

## II. Astigmatismus.

Bisher haben wir immer ein ideales Auge vorausgesetzt, welches ein centrirtes System von sphärischen Trennungsflächen in aller mathematischen Strenge darstellt. Diese Voraussetzung ist aber nur annäherungsweise im wirklichen Auge erfüllt, daher können auf der Netzhaut selbst bei monochromatischer Beleuchtung niemals absolut scharfe Bilder entstehen.

Schon bei der Beschreibung des brechenden Systemes wurde erwähnt, dass die vordere Hornhautfläche nicht genau einen Kugelabschnitt darstellt, dass sich ihr wagrechter Meridian vielmehr eher einer Ellipse, als einem Kreise anschliesst. Diese Abweichung bringt aber keine Ungenauigkeit der Bilder hervor, vielmehr trägt sie zur Erhöhung der Deutlichkeit bei, da an einer Kugelfläche die Randstrahlen eines homocentrischen Bündels verhältnissmässig zu stark gebrochen werden und dieser Fehler also durch die schwächere Krümmung der Hornhaut am Rande verbessert wird. Ueberhaupt kann aber dieser Umstand für das direkte Sehen nur bei ausnahmsweise weiter Pupille zur Sprache kommen.

Es wurde ferner bei der Beschreibung der brechenden Flächen noch einer andern Abweichung gedacht, nämlich der unvollkommenen Centrirung, d. h. es wurde gezeigt, dass die Mittelpunkte der drei Haupttrennungsflächen nicht genau auf einer geraden Linie liegen. Hierdurch muss nothwendig eine gewisse Asymmetrie in die Brechung jedes Strahlenbündels gebracht werden, so dass seine Strahlen nicht mehr genau gleichmässig um den mittleren herum vertheilt bleiben können, selbst wenn dieser mittlere Strahl die Axe selbst



wäre. Eine ähnliche Asymmetrie wird hervorgebracht durch eine andere Abweichung der Trennungsflächen, welche bei der Beschreibung derselben einstweilen unberücksichtigt geblieben ist. Durch genaue ophthalmometrische Messung der Reflexbilder in verschiedenen Meridianebenen kann man nämlich direkt nachweisen, dass die Krümmung der verschiedenen Hornhautmeridiane selbst am Scheitel verschieden ist. Es ist hierbei vor Allem der folgende allgemeine geometrische Satz zu beachten: wenn man in einem Punkt einer irgendwie gestalteten krummen Fläche die Normale errichtet und durch dieselbe ein Büschel von Ebenen legt, so stehen allemal die beiden dieser Ebenen aufeinander senkrecht, in welche die Schnitkurven fallen, welche in dem gedachten Punkte die grösste und die kleinste Krümmung haben. Wenden wir dies auf den Scheitel der Hornhaut an, so ergibt sich, dass, wofern überall die verschiedenen Meridiane verschiedene Krümmung besitzen, der Meridian grösster und der Meridian schwächster Krümmung jedesfalls aufeinander senkrecht stehen.

Um anschaulich zu machen, wie gross die Verschiedenheiten der Krümmung am Hornhautscheitel in verschiedenen Meridianen bei normalen Augen zu sein pflegen, sind in der Tabelle (S. 106) einige Resultate ophthalmometrischer Messung zusammengestellt.

In der ersten Spalte bedeutet der Buchstabe *m* männliches, *w* weibliches Geschlecht und die Zahl das Alter in Jahren. In der zweiten Spalte bedeutet *E* Emmetropie, *M* Myopie, *H* Hypermetropie und der dabei stehende Bruch den Grad derselben. In den nun folgenden 12 Spalten sind die Krümmungsradien am Scheitel der vorderen Hornhautfläche in 12 Meridianebenen in Millimetern eingeschrieben. Der Meridian ist durch den in der Ueberschrift der Spalte bezeichneten Winkel mit dem horizontalen Meridian bestimmt, so dass die mit  $0^0$  überschriebene Spalte die Halbmesser der horizontalen, die mit  $90^0$  überschriebene die Halbmesser der vertikalen Meridiane enthält. Im dritten Theil der nun folgenden Spalte ist der Winkel angegeben, welchen der Meridian grösster Krümmung (welche dem kleinsten Krümmungshalbmesser entspricht) mit dem horizontalen Meridian einschliesst. Die Strichelchen in den beiden ersten Abtheilungen dieser Spalte sollen ungefähr eine Idee von der Lage des Meridians grösster Krümmung geben und zugleich andeuten, ob sich die Messung auf ein rechtes oder linkes Auge bezieht. Ist der Strich in der ersten Abtheilung, so bezieht er sich auf ein rechtes Auge und umgekehrt. Die Senkrechte zwischen den beiden Abtheilungen kann so angesehen werden als bedeute sie die Medianebene des Gesichtes, dessen Antlitz-





fläche man wie die Tabelle vor sich hätte. Die beiden folgenden Spalten enthalten Grössen, welche erst im Folgenden zu behandeln sind.

Geht man die 12 Krümmungshalbmesser derselben Hornhaut der Reihe nach durch, so sieht man den Werth allmählich zu- und wieder abnehmen und im allgemeinen liegen die Meridiane des maximalen und minimalen Werthes um  $90^\circ$  auseinander, wie der oben angezogene Satz erfordert. Es fehlt übrigens nicht an kleinen Abweichungen von der Regelmässigkeit des Wachsens und Abnehmens, wie das bei so schwierigen Messungen kaum anders zu erwarten ist.

Fällt auf eine brechende Fläche von solcher Beschaffenheit ein Strahlenbündel von kleiner Basis, so kann natürlich eine punktuelle Vereinigung des gebrochenen Bündels nicht stattfinden, selbst wenn das Bündel nahezu normal auffällt, d. h. selbst wenn alle Strahlen des Bündels nur sehr kleine Winkel mit den entsprechenden Einfallsloten bilden. Denn nennen wir  $r_1$  den grössten und  $r_2$  den kleinsten Krümmungshalbmesser am Scheitel der Fläche, sowie  $n$  den Brechungsindex und denken wir uns das Bündel von einem in der Entfernung  $p$  gelegenen Punkte ausgegangen, so werden die Strahlen des Bündels, welche auf den Meridian schwächster Krümmung fallen, in einer Entfernung

$$= \frac{n p \cdot r_1}{p (n - 1) - r_1}$$

vereinigt werden, so als ob sie auf eine Kugelfläche mit dem Radius  $r_1$  gefallen wären, und die Strahlen, welche auf den Meridian stärkster Krümmung treffen, vereinigen sich in einem Abstände

$$= \frac{n p r_2}{p (n - 1) - r_2}$$

der offenbar kleiner ist als jener. Es lässt sich nun zeigen, dass die übrigen Strahlen des Bündels in der letzteren Entfernung sämmtlich durch eine kleine begrenzte Gerade hindurchgehen, die im Vereinigungspunkte der stärkstgebrochenen Strahlen auf dem mittleren Strahle senkrecht steht und in der Ebene des Meridianes schwächster Krümmung liegt; und dass in der Vereinigungsweite der schwächst gebrochenen Strahlen die sämmtlichen übrigen Strahlen durch die Punkte einer kleinen begrenzten Geraden gehen, welche im Vereinigungspunkte der schwächst gebrochenen Strahlen auf dem mittleren Strahle senkrecht steht und in der Ebene des Meridianes stärkster Krümmung liegt. Die Begrenzung der erstgedachten Vereinigungslinie sämmtlicher Strahlen des Bündels — oder der „vorderen Brennpunktlinie“ — wird gebildet durch die beiden äussersten Strahlen des

schwächst gebrochenen Büschels<sup>1</sup>, die von allen Strahlen des Bündels hier noch am weitesten von einander abstehen. Aehnlich wird die Begrenzung der zweiten Vereinigungslinie sämtlicher Strahlen des Bündels oder die „hintere Brennnlinie“ gebildet durch die beiden äussersten Strahlen des stärkst gebrochenen Büschels, welche hier von allen Strahlen schon wieder am weitesten auseinander getreten sind. Die Gestalt des ganzen gebrochenen Bündels wird also ganz dieselbe sein wie die schon früher beschriebene, welche entsteht durch Brechung eines dünnen Strahlenbündels an einer Kugelfläche, wenn es sehr schräg auf dieselbe fällt.

In Fig. 25 sind vier Randstrahlen des stärkst und des schwächst gebrochenen Büschels und der mittlere Strahl perspektivisch ge-

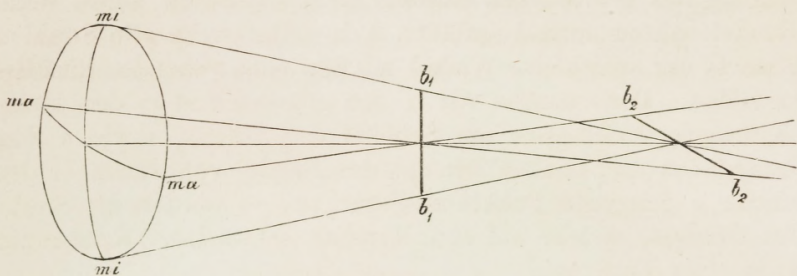


Fig. 25.

zeichnet. Es sei der senkrechte Meridian *mi mi* der Meridian schwächster Krümmung oder von grösstem Halbmesser und der wagrechte *ma ma* der Meridian stärkster Krümmung, dann wird das ganze Strahlenbündel zuerst auf der senkrechten begrenzten Brennnlinie *b<sub>1</sub> b<sub>1</sub>* und hernach auf der wagrechten begrenzten Brennnlinie *b<sub>2</sub> b<sub>2</sub>* vereinigt sein. Die zwischen den beiden Brennnlinien eingeschlossene Strecke des Centralstrahles heisst „Brennstrecke“. Man kann diese Gestalt des Strahlenbündels anschaulich machen, indem man eine parallelepipedische Wassermasse vorn begrenzt durch ein uhrglasartiges Stück, dessen Krümmung in den verschiedenen Meridianen verschieden ist. Ein solches erhält man leicht durch Ausprengen aus einem Flaschenbauch. Lässt man auf die Vorderfläche dieses Glasstückes (das als die vordere Begrenzung der Wassermasse selbst gelten kann) von einem helleuchtenden Punkte ein homocentrisches Strahlenbündel fallen, so kann man die Durchschnittsfigur des gebrochenen Strahlenbündels sichtbar machen auf einem in die Wassermasse eingesetzten matten Glasschirm. Ist wie oben an-

<sup>1</sup> Bezüglich der Bedeutung des Wortes Büschel im Unterschiede von Bündel siehe Seite 77, Anm.



genommen wurde der senkrechte Meridian der Trennungsfläche in Wirklichkeit am schwächsten gekrümmt, so giebt es eine Stellung des Schirmes, in der auf ihm ein kleiner senkrechter Strich beleuchtet erscheint und eine zweite Stellung in etwas grösserer Entfernung von der Trennungsfläche, wo ein kleiner wagrechter Strich auf dem Schirm beleuchtet ist. Wenn nun der durchsichtige Theil der Trennungsfläche, so genau als es die Krümmung zulässt, kreisförmig begrenzt ist, so erscheint in jeder anderen Stellung des Schirmes auf demselben eine elliptische Lichtfigur, deren grosse Axe senkrecht steht, wenn der Schirm eine Stellung zwischen der Trennungsfläche und der ersten Brennnlinie einnimmt. Steht dagegen der Schirm weiter als die 2te Brennnlinie von der Trennungsfläche ab, so liegt die grosse Axe der Ellipse wagrecht. Zwischen den Brennnlinien giebt es eine Lage des Schirmes, wo der beleuchtete Fleck kreisförmig begrenzt ist. In Fig. 26 ist eine Reihe der aufeinander folgenden Durchschnichtsfiguren

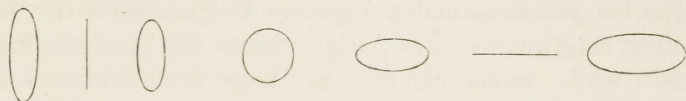


Fig. 26.

des Strahlenbündels gezeichnet. Wenn ein dünnes, ursprünglich homocentrisches Strahlenbündel durch mehrere hintereinander liegende Trennungsflächen hindurchgeht, von denen eine oder auch mehrere nicht genau drehrund ist, oder von denen eine oder mehrere nicht sehr annähernd normal vom mittleren Strahle des Bündels getroffen werden, so hat das Bündel nach der letzten Brechung stets die soeben beschriebene Gestalt, d. h. an zwei Stellen ist es auf eine kleine gerade Linie concentrirt und die Richtungen dieser beiden Linien, der Brennnlinien überkreuzen einander senkrecht. Die Abweichung der Gestalt des gebrochenen Bündels von der eines homocentrischen braucht aber, nachdem sie an einer Fläche entstanden ist, nicht nothwendig durch die folgenden Brechungen vergrössert zu werden. Im Gegentheil ist es denkbar, dass sie bei einer folgenden wieder verkleinert wird, wenn nämlich an der betreffenden Fläche die grösste Krümmung in die Ebene fällt, in welche an der vorhergehenden Fläche die kleinste Krümmung fiel. Es ist sogar der Fall an sich denkbar, dass die durch eine Brechung erzeugte Abweichung durch eine folgende vollständig aufgehoben und das resultirende Strahlenbündel genau homocentrisch wird. Denkt man sich aber die Orientirung der Flächen um die Axe herum rein zufällig, so hat dieser Fall natürlich eine

unendlich kleine Wahrscheinlichkeit und es werden im Allgemeinen die Ebenen der stärksten Krümmung bei den verschiedenen Flächen weder zusammenfallen, noch aufeinander senkrecht stehen, sondern beliebige schiefe Winkel miteinander bilden. In einem solchen Falle wird die Lage der vorderen Brennlinie mit keiner der Ebenen schwächster Krümmung genau zusammenfallen, sondern eine mittlere Lage einnehmen, die von der Orientirung der Flächen und von den Unterschieden ihrer Krümmungshalbmesser abhängt in einer Weise, die hier nicht eingehend zu erörtern ist.

Da an einer Fläche des Auges, nämlich an der vorderen Hornhautfläche eine verschiedene Krümmung in verschiedenen Meridianen als normale Bildung nachgewiesen ist, so haben wir nach den vorstehenden Erörterungen zu erwarten, dass die Strahlenbündel im Glaskörper, die soeben beschriebene Abweichung von der Homocentricität zeigen, welche als „Astigmatismus“ bezeichnet wird. In der That ist es ja, wie schon bemerkt wurde, sehr unwahrscheinlich, dass [etwa bei jedem normalen Auge der Astigmatismus der Hornhaut durch einen entgegengesetzten Astigmatismus der Linsenflächen genau compensirt wird. Sahen wir doch die Lage des Meridianes stärkster Krümmung der Hornhaut bei verschiedenen Augen ganz regellos variiren. Wie sollte da der compensirende Astigmatismus der Linse diesen regellosen Variationen in jedem Individuum genau folgen?

Man könnte jetzt verlangen, dass die Abweichungen der Linsenflächen von der Kugelgestalt oder von der genauen Centrirung ähnlich wie die der Hornhaut objektiv durch Messung der Reflexbilder bestimmt würden und dass dann der resultirende Astigmatismus des Auges berechnet würde. Die Lösung dieser Aufgabe ist indessen wohl fürs erste unmöglich. Man muss sich daher darauf beschränken, durch subjektive Prüfungen über den resultirenden Astigmatismus eines Auges sich Kenntniss zu verschaffen. Jedesfalls ist derselbe übrigens bei normalen Augen so gering, dass er sich beim Sehen der alltäglichen Objekte nicht störend bemerklich macht. Beim Betrachten gewisser Objekte kann man sich aber leicht überzeugen, dass fast jedes Auge mit einem mehr oder weniger hohen Grade von Astigmatismus behaftet ist. Das geeignetste Objekt zu diesem Zwecke bildet ein sternförmiges System feiner schwarzer Striche auf hellem Grunde wie Fig. 27. Stellt man ein solches dem Auge gegenüber in die Ferngrenze des Sehens (ein emmetropisches oder hypermetropisches Auge wäre dabei mit einer Sammellinse zu bewaffnen), so wird man selten auf ein Auge treffen, welches alle Striche gleich deutlich sieht, wenn es den Kreuzungspunkt derselben fixirt.



In weitaus den meisten Fällen wird der Geprüfte angeben, dass er eine (oder zwei benachbarte) am deutlichsten oder am „schwärzesten“ sieht, die übrigen aber so als wären sie schwächer gezogen. Die schärfst gesehene Linie ist bei dem einen Menschen die wagrechte, bei einem andern die senkrechte, bei wieder andern diese oder jene von den schrägen. Die Richtung der schärfst gesehene Linie bezeichnet nun für das Auge die Meridianebene, welcher die hinteren Brennpunkte der im Glaskörper fortgepflanzten Strahlenbündel parallel sind. Man kann dies auch so ausdrücken: Sollte die optische Wirkung des Auges durch eine einzige Trennungsfläche so annähernd als möglich

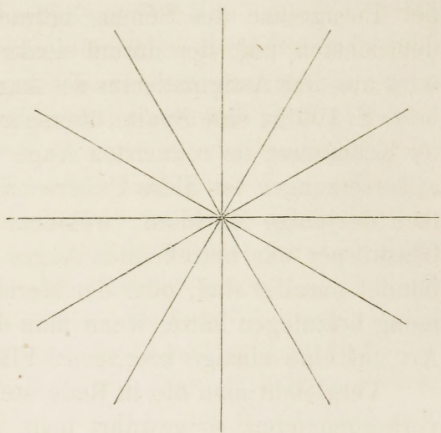


Fig. 27.

ausgeübt werden, so müsste man dieser eine Abweichung von der Kugelgestalt in dem Sinne beilegen, dass die Meridianebene stärkster Krümmung den deutlichst gesehenen Strich enthält. Ist nämlich das Objekt an der Ferngrenze des Sehens, so dass jede weitere Entfernung schon eine merkliche Undeutlichkeit hervorbringt, so liegen offenbar die hinteren Brennpunkte der einzelnen Strahlenbündel in der Netzhaut, denn wenn die Netzhaut die Strahlenbündel weiter vorn etwa in der vorderen Brennpunktlinie schnitte, so würde ein weiteres Wegrücken des Objektes zunächst noch keine Undeutlichkeit zur Folge haben, da bei diesem Weiterrücken erst noch die übrige Brennweite und zuletzt die hintere Brennpunktlinie die Netzhaut durchwandern würde. Das Bild eines schwarzen Striches im Objekte, dessen Richtung der hinteren Brennpunktlinie jedes Strahlenbündels parallel ist, wird aber bei einem noch so hohen Grade des Astigmatismus, wofern derselbe nur ganz regelmässig ist, ganz ebenso deutlich sein, wenn diese hinteren Brennpunktlinien in die Retina fallen, als wenn in derselben eine vollkommen punktuelle Vereinigung der Strahlenbündel stattfände. Von den Brennpunktlinien der Punkte des hellen Grundes ragt ja nichts in den Raum des idealen Bildes des schwarzen Striches hinein. Anders verhält es sich für jeden Strich im Objekte, dessen Richtung eine andere ist. Hier greifen die schräg dazu liegenden Brennpunktlinien von benachbarten Punkten des hellen Grundes in den Raum des idealen

Bildes ein und erhellen also mehr oder weniger das Dunkel, welches hier herrschen sollte. Im höchsten Grade wird dies gelten für den Strich, dessen Richtung auf der Richtung der hinteren Brennpunkte senkrecht steht. Es wäre somit die Erscheinung, dass in einer an der Ferngrenze des Sehens betrachteten Sternfigur ein Strich am deutlichsten und der darauf senkrechte am undeutlichsten gesehen wird aus dem Astigmatismus des Auges befriedigend erklärt. In der Tabelle S. 106 ist eine Spalte überschrieben „Lage des Meridianes grösster Krümmung im reducirten Auge“. Nach den vorstehenden Auseinandersetzungen ist diese Ueberschrift verständlich. Es ist eben einfach derjenige Meridian, welchem die hinteren Brennpunkte der im Glaskörper des betreffenden Auges wirklich fortgepflanzten Strahlenbündel parallel sind, oder der Meridian, dem man die stärkste Krümmung beizulegen hätte, wenn man dasselbe in der S. 64 angegebenen Art auf eine einzige brechende Fläche reducirt.

Vergleicht man die in Rede stehende Spalte der Tabelle mit der vorhergehenden, so gewahrt man, dass die hinteren Brennpunkte der im Glaskörper wirklich fortgepflanzten Strahlenbündel nicht parallel sind dem Meridiane stärkster Krümmung der Hornhaut. Dies zeigt, dass der Astigmatismus des Gesamtauges nicht allein abhängt von der Abweichung der vorderen Hornhautfläche von der Kugelgestalt, dass vielmehr auch die Linsenflächen durch Abweichung, sei es von der Centrirung, sei es von der Kugelgestalt Einfluss darauf haben. Durch diesen Einfluss wird natürlich einerseits die Lage der Ebene stärkster Gesamtbrechung mitbestimmt, andererseits kann der Betrag des Gesamtastrigmatismus dadurch sowohl grösser als kleiner werden, als der Betrag des Hornhutastrigmatismus.

Rückt man jetzt die Sternfigur (die übrigens aus sehr feingezogenen Strichen bestehen muss) an die Nahegrenze des Sehens, so ist bei einem regelmässig gebildeten Auge stets derjenige Strich zuletzt noch deutlich zu sehen, welcher auf dem an der Ferngrenze deutlichst gesehenen senkrecht steht. Dies ist auch von vorn herein zu erwarten, wenigstens unter der Voraussetzung, dass die beim Versuch stattfindende Anpassung den Astigmatismus nicht wesentlich verändert. In der That wird beim Annähern des Objectes die Undeutlichkeit dann anfangen merklich zu werden, wenn die ganze Brennweite hinter der Netzhaut liegt.<sup>1</sup> Wenn also gerade noch die vorderen Brennpunkte der Strahlenbündel mit der Netzhaut

<sup>1</sup> Für einen Beobachter, der bei Annäherung des Objectes den ursprünglichen Refraktionszustand aufrecht erhalten kann, ist es nicht erforderlich das Object bis an die Nahegrenze des Sehens heranzurücken.



zusammenfallen, wird wenigstens derjenige Strich der Sternfigur noch vollkommen deutlich erscheinen, dessen Richtung der Richtung der vorderen Brennnlinien parallel ist. Da diese aber die Richtung der hinteren Brennnlinie senkrecht überkreuzt, so muss an der Nahegrenze des Sehens diejenige Linie der Sternfigur am deutlichsten erscheinen, welche auf der an der Ferngrenze am deutlichsten gesehenen senkrecht steht. An meinen eigenen Augen kann ich z. B. gegenwärtig in dieser Beziehung folgendes feststellen. Dem linken Auge erscheint an der Ferngrenze am deutlichsten eine Linie, deren linkes Ende sich etwa  $5-10^{\circ}$  Grad unter den Horizont neigt und an der Nahegrenze eine solche deren oberes Ende sich ein wenig nach links von der Vertikalen entfernt, die also auf jener ersteren in der That merklich senkrecht steht. Dem rechten Auge erscheint an der Ferngrenze am deutlichsten eine Linie deren oberes Ende unter einem Winkel von etwa  $15^{\circ}$  von der Vertikalen nach links abweicht an der Nahegrenze eine solche die sich links unter einem eben solchen Winkel unter den Horizont neigt. Die an der Fern- und Nahegrenze deutlichsten gesehenen Linien stehen also gleichfalls auf einander senkrecht.

Wenn sich bei einem Auge von dieser gesetzmässigen Beziehung grössere oder kleinere Abweichungen finden sollten, so würde dies darauf deuten, dass durch die Anpassungsveränderung des Auges der Astigmatismus wesentlich verändert wird, was an sich keineswegs unmöglich ist, da ja derselbe theilweise von der Gestalt der Linsenflächen bedingt ist. Die Meridianebene stärkster Krümmung hat wie schon aus den angeführten Beispielen ersichtlich ist, bei verschiedenen Augen verschiedene Lage, doch soll nach SNELLEN<sup>1</sup> die nahezu verticale Lage derselben am häufigsten sein.

Für einen bestimmten Zustand des Auges z. B. den Ruhezustand des Akkommodationsapparates ist offenbar dem Astigmatismus ein bestimmter numerisch ausdrückbarer Grad zuzuschreiben. Die Wahl einer Grösse deren numerischer Werth zweckmässig zum Maasse des Astigmatismus dienen kann, wird auf dasselbe Princip zu gründen sein, welches wir zur Messung des Refraktionszustandes (Myopie, Emmetropie, Hypermetropie) des ideal gedachten Auges angewandt haben. In der That können wir ja den Astigmatismus so auffassen, als käme dem Auge in verschiedenen Meridianen ein verschiedener Grad von Myopie (negative Werthe nicht ausgeschlossen) zu. Wäre nämlich das Auge rings um die Axe so gestaltet wie im Meridian stärkster Brechung dem die hinteren Brennnlinien parallel sind, so

<sup>1</sup> SNELLEN, Arch. f. Ophthalmologie XV. 2. Abth. S. 199.

würde es in einem gewissen Betrage stärker myopisch sein, als wenn es rings um die Axe so gestaltet wäre, wie in dem Meridiane schwächster Brechung. Die Differenz zwischen diesen beiden Myopiegraden giebt offenbar das geeignetste Maass für den Grad des Astigmatismus.

Man kann diese Differenz auf verschiedene Art ermitteln. Am nächsten liegt es ganz einfach optometrisch zu verfahren. Man kann ja durch Vorsetzen eines engen Spaltes vor das Auge bewirken, dass von jedem aus einem leuchtenden Punkt ausgehenden Strahlenbündel nur ein ebenes Büschel ins Auge gelangt, welches sich nur in einer Meridianebene oder nahezu in einer solchen weiter fortpflanzt und mithin da punktuell vereinigt wird, wo das ganze Bündel zur punktuellen Vereinigung käme, wenn das Auge rings um die Axe so gestaltet wäre, wie in dem betreffenden Meridiane. Lässt man also das Auge durch einen solchen Spalt ein geeignetes Probeobjekt betrachten, so kann man die Sehweite für den Meridian direkt abmessen d. h. die Entfernung, in welcher das Objekt durch den Spalt gesehen, am deutlichsten erscheint. Das geeignetste Probeobjekt für diese Untersuchung bildet ein System feiner schwarzer Linien, deren Richtung zur Richtung des Spaltes senkrecht steht. An einem solchen muss nämlich jede Undeutlichkeit am leichtesten bemerklich werden, weil die zur Wirksamkeit kommenden Büschel vor und nach ihrer punktuellen Vereinigungen den auffangenden Schirm in einer Linie schneiden die auf der gedachten Richtung der Objektlinien senkrecht steht. Hat man nun die Richtung der vorderen und hinteren Brennnlinie für das Auge zuvor schon ermittelt, so wird man nur diese beiden Meridiane zu prüfen haben. Man ermittelt nämlich die Sehweiten für dieselben in der beschriebenen Art, indem man einmal den Spalt in die Meridianebene der vorderen und dann in die Meridianebene der hinteren Brennnlinie bringt. Wenn man dann die reciproken Werthe der beiden gefundenen Sehweiten in pariser Zollen ausgedrückt von einander abzieht und die Differenz in die Form eines Bruches mit dem Zähler 1 bringt, hat man das konventionelle Maass des Astigmatismus.

Eine Prüfung nach dem vorstehenden Princip könnte auch mit einem auf den SCHEINER'schen Versuch gegründeten Optometer ausgeführt werden wenn man in den Okularschirm statt der üblichen beiden Schlitze bloss zwei Löchelchen anbrächte und diesen Schirm um die Axe des Instrumentes drehbar einrichtete, so dass die Verbindungslinie der beiden Löchelchen in jede beliebige Meridianebene des Auges bringen könnte. Als Objekt müsste dabei ein einzelner leuchtender Punkt oder eine leuchtende Linie angewandt werden deren Richtung jedesmal senkrecht stehen müsste auf der Richtung der Verbindungslinie der beiden Okularlöchelchen d. h. auf der Meridianebene, welche untersucht wird. Einrichtungen dieser letzteren Art scheinen indessen bei den Augenärzten nicht in Gebrauch zu sein, dagegen liefern die für ophthalmologische Zwecke arbeitenden Werkstätten Bestecke zur optometrischen Bestimmung des Astigmatismus nach der ersten Art, die einen mit Handgriff versehenen Okularschirm enthalten. Derselbe ist in der Fassung in seiner Ebene drehbar, so dass ein darin befindlicher schmaler Spalt bequem in jede Meridianebene des Auges gebracht werden kann. Als Probeobjekt ist ein Drahtgitter in einem Rähmchen mit Handgriff beigegeben, das vor einem hel-



len Hintergrund in die passende Sehweite so gestellt wird, dass die Stäbe des Gitters senkrecht auf der jeweiligen Richtung des Okularspaltes stehen.

Auch zu dem S. 75 erwähnten GRÄFE'schen Optometer liefern die optischen Werkstätten einen Schirm mit Spalt, der vor das Okular gesetzt und gedreht werden kann, so dass man damit die Sehweite in verschiedenen Meridianebenen gesondert prüfen kann. Natürlich muss dann das entfernte Objekt so ausgewählt werden, dass darin feine Linien vorkommen, deren Richtung wieder zur jeweiligen Lage des Okularspaltes senkrecht steht, damit an ihnen die Undeutlichkeit bei der geringsten Abweichung von der punktuellen Vereinigung der wirksamen Büschel auf der Netzhaut bemerkbar wird.

Der Grad des Astigmatismus kann noch auf einem andern Wege ermittelt werden, der, so verschieden er von dem soeben beschriebenen auch erscheint, doch zu demselben Ziele, d. h. im bestimmten Falle zu demselben Zahlwerth führen muss. Denken wir uns ein Strahlenbüschel durch einen Okularspalt aus dem Bündel ausgeschnitten in der Meridianebene der vorderen Brennnlinie und die Retina des Auges so gelegen, dass sie diese Brennnlinie aufnimmt. Jetzt ist leicht zu sehen, dass man durch eine vor das Auge in richtige Lage gesetzte convexe Cylinderlinse von geeigneter Krümmung die Divergenz des einfallenden Büschels so weit vermindern kann, dass sich seine Strahlen genau in der Netzhaut schneiden, wo sie ohne die Cylinderlinse noch auf der Ausdehnung der vorderen Brennnlinie zerstreut waren. Unter einer Cylinderlinse versteht man ein Glasstück, welches begrenzt ist von zwei Theilen zweier Cylindermäntel deren Axen parallel sind aber nicht zusammenfallen. Einer der Cylindermäntel kann auch eine Ebene sein. Man unterscheidet wie bei Kugellinsen convexe und concave, erstere wirken sammelnd mögen sie biconvex, planconvex oder concavconvex sein, letztere wirken zerstreuend mögen sie biconcav, planeconcav oder convexconcav sein. Die Stellung der Cylinderlinse muss so gewählt sein, dass die unter sich parallelen Axen der beiden Cylinder, von welchen die Linsenflächen Abschnitte bilden, senkrecht stehen zur Ebene des untersuchten Augenmeridianes oder was dasselbe sagt, dass die Ebenen stärkster Krümmung der Linsenflächen jener Meridianebene parallel sind. Nimmt man jetzt den Okularschirm weg, dessen Spalt aus dem Bündel das Büschel ausschnitt (der überhaupt nur zur Erleichterung der Vorstellungen hinzugedacht war), so werden sich offenbar sowohl die in der Ebene der vorderen Brennnlinie als die in der Ebene der hinteren Brennnlinie fortgepflanzten Strahlen auf der Netzhaut punktuell vereinigen. Die letzteren Strahlen nämlich thaten es der gemachten Voraussetzung nach schon ohne Einschlebung der Linse. Ihr Gang wird aber durch dieselbe nicht wesentlich beeinflusst da sie bei der gedachten Lage durch dieselbe hindurchgehen müssen wie durch eine planparallele Glasplatte. Ist nun das Bündel nur überhaupt sehr dünn, wie bei allen unsern dioptrischen Betrachtungen immer vorausgesetzt wird, so werden auch die anderen Strahlen desselben in demselben Punkte vereinigt und werden wir also auf der Netzhaut ein sehr annähernd punktuell Bild haben. Der Astigmatismus wird „durch die Cylinderlinse korrigirt sein“. Ebenso wie man durch eine convexe Cy-

linderlinse den Astigmatismus so korrigiren kann, dass die punktuelle Vereinigung im Mittelpunkt der vorderen Brennnlinie stattfindet, kann man ihn auch durch eine concave Cylinderlinse derart korrigiren, dass die sämtlichen Strahlen des Bündels im Mittelpunkte der hinteren Brennnlinie vereinigt werden. Natürlich muss alsdann die Axenrichtung der Cylinderflächen der Linse senkrecht auf dem Meridiane stärkster Brechung d. h. also auf der Richtung der hinteren Brennnlinie stehen.

Ist das zu prüfende Auge mehr oder weniger myopisch, so kann man aus einer hinlänglich grossen Auswahl von concaven Cylinderlinsen leicht diejenige herausfinden, welche den Astigmatismus gerade korrigirt. Man braucht nur an der Ferngrenze des Sehens dem Auge eine Sternfigur darzubieten und ihm dann die verschiedenen concaven Cylinderlinsen in der geeigneten Lage vorzusetzen, die man ja nach vorausgegangener Ermittlung des Meridianes stärkster Brechung von vornherein bestimmen kann. Es wird bald diejenige gefunden sein, durch welche alle Linien der Sternfigur mit gleicher Deutlichkeit gesehen werden. Diese muss offenbar die Eigenschaft haben, dass sie die Divergenz des auf den Meridian stärkster Brechung fallenden Büschels soweit vermehrt, dass es nunmehr auch erst da zur Vereinigung kommt, wo ohne und mit Cylinderlinse die Strahlen des auf den Meridian schwächster Brechung fallenden Büschels vereinigt werden, welcher Punkt in die Retina fällt, wenn sich die Objektpunkte an der Ferngrenze des Sehens befinden.

Man kann nun bei einer Cylinderlinse auch von einer Brennweite reden, wenn man darunter versteht die Entfernung des Punktes, wo sich die Strahlen eines Büschels durchschneiden, das in einer zur Axenrichtung der Cylinderflächen senkrechten Ebene fortgepflanzt wird und vor der Brechung aus parallelen Strahlen bestand. Dieser Brennweite ist wie bei einer Kugellinse im Falle der Convexität ein positiver im Falle der Concavität ein negativer Werth beizulegen.

Hat man die den Astigmatismus korrigirende Cylinderlinse, mag die Korrektion durch eine convexe oder durch eine concave bewerkstelligt sein, gefunden, so ist der reciproke Werth ihrer Brennweite, der unter allen Umständen positiv zu nehmen ist, das Maass des Astigmatismus. Dass dies Maass mit dem zuerst definirten numerisch übereinstimmen muss, ist leicht zu sehen. In der That sei  $a$  die deutliche Sehweite für den Meridian stärkster Brechung und  $b$  die für den Meridian schwächster Brechung, so dass also  $a < b$  wäre, dann hätten wir den Grad des Astigmatismus nach der ersten Bestimmungsweise zu setzen

$$= \frac{1}{a} - \frac{1}{b}.$$

Nun würde aber die negative Brennweite einer zerstreuenen Cylinderlinse offenbar

$$= \frac{ba}{a-b}$$

sein müssen wenn sie in richtiger Lage vor das Auge gebracht einem aus der Entfernung  $b$  kommenden auf den Meridian stärkster Brechung fallenden Büschel denjenigen Divergenzgrad beibringen sollte, dass es ebenfalls erst da vereinigt wird, wo ein auf den Meridian schwächster Brechung fallendes Büschel vereinigt wird. Dieser Divergenzgrad müsste



nämlich derjenige sein, welcher ein von der Entfernung  $a$  ausgegangenes Büschel besitzt. Auf eine Cylinderlinse von dieser negativen Brennweite würde also die Wahl des geprüften Auges fallen um den Astigmatismus zu korrigiren und der reciproke Werth ihrer Brennweite

$$= \frac{a-b}{ab}$$

positiv genommen d. h.

$$\frac{b-a}{ab} \text{ wäre } = \frac{1}{a} - \frac{1}{b}$$

d. h. gleich dem auf die andere Art bestimmten Maasse des Astigmatismus.

Eine ganz ähnliche Schlussweise führt zu der Einsicht, dass auch bei Korrektion mit convexer Cylinderlinse der reciproke Werth ihrer Brennweite den Grad des Astigmatismus angiebt.

In der Tabelle S. 106 ist in der vorletzten Spalte der Grad des Astigmatismus der einzelnen Augen numerisch angegeben.

Nach den Erfahrungen der Augenärzte bringt der Astigmatismus wenn er den numerischen Werth von  $\frac{1}{40}$  nicht erreicht keinerlei Störung im gewöhnlichen Sehakte hervor und kann als normal gelten. Ueberschreitet er dagegen diesen Werth, so veranlasst er auch beim gewöhnlichen Sehen Störungen. Ist er dabei ganz regelmässig, so können seine Folgen durch Vorsetzen einer geeigneten Cylinderlinse leicht beseitigt werden. Eine ausführliche Besprechung des hochgradigen Astigmatismus ist Gegenstand der Pathologie des Auges und kann hier unterbleiben.

Es kann jetzt noch die Frage aufgeworfen werden, wie im Innern des Bereiches des Akkommodationsspatiums das Auge instinktiv eingerichtet wird. Hier ist es nämlich offenbar an sich möglich einen beliebigen Theil der Brennstrecke mit der Netzhaut zusammenfallen zu machen. Es ist zu vermuthen, dass man beim einzelnen Sehakte vielleicht mit dem Akkommodationszustande hin- und herschwankt und bei demjenigen stehen bleibt, der das günstigste Resultat für die Deutlichkeit ergiebt. Je nach der Gestalt des zu sehenden Objektes kann dies ein verschiedener sein. Gilt es z. B. im Objekte vorwiegend parallele Linien zu erkennen und stimmt ihre Richtung mit derjenigen der hinteren Brennlinien überein, so wird eine Einstellung am günstigsten sein, bei welcher die hinteren Brennlinien der Strahlenbündel in die Netzhaut fallen, und umgekehrt. Man bemerkt oft auch, dass jemand, der einen fernen Gegenstand mit dem Auge recht genau untersuchen will, den Kopf hin- und herneigt. Offenbar hat dies den Zweck, bald diese bald jene Linien des Objektes mit der Richtung derjenigen Brennlinien in Uebereinstimmung zu bringen, welche gerade in die Retina fallen.

### III. Unregelmässigkeiten des brechenden Apparates.

Ausser der im vorigen § behandelten zeigt der brechende Apparat des Auges noch zahlreiche unregelmässige Abweichungen von einem centrirten Systeme sphärischer Trennungsflächen zwischen homogenen brechenden Medien. Sämmtliche Medien des Auges sind nämlich keineswegs ganz gleichartige durchsichtige Körper. Dies ist schon darum nicht möglich, weil sie mit Ausnahme der wässrigen Feuchtigkeit „Gewebe“ sind, d. h. Körper, die aus ursprünglich getrennten Theilen zusammengefügt sind. Es kann natürlich nicht erwartet werden, dass diese Theile und die Tränkungsflüssigkeit zwischen ihnen absolut gleichen Brechungsindex besitzen. Sowie aber dies nicht der Fall ist, muss an den Grenzen der Gewebelemente Reflexion und Lichtzerstreuung stattfinden. Dass dem wirklich so ist, gewahrt man, wenn man einen starken Lichtkegel ins Auge sendet. Sofort wird der beleuchtete Theil der Hornhaut und der Linse sichtbar, d. h. sendet unregelmässig zerstreutes Licht von jedem Punkte aus. Dies beweist, dass ein Strahl nicht lediglich auf dem Wege regelmässiger Brechung durchgeht resp. zum Theil an der Grenze des ganzen Mediums regelmässig zurückgeworfen wird.

Das unregelmässig zerstreute Licht muss zum Theil auch zur Retina gelangen und dieselbe mit einem mehr oder weniger gleichmässigen Lichtnebel überziehen, aus welchem sich die der regelmässigen Brechung ihren Ursprung verdankenden Bilder hervorheben. Dieser allgemeine Lichtnebel stört indessen den gewöhnlichen Sehakt durchaus nicht, weil er die Helligkeitsabstufungen der deutlichen Bilder nur sehr wenig im Sinne einer Ausgleichung der Unterschiede beeinflusst. Für gewöhnlich beachtet man nicht einmal das Vorhandensein desselben, so leicht es auch zu bemerken ist. Man braucht nur Abends in einem beleuchteten Zimmer die von der Lampenflamme direkt ins Auge gelangenden Strahlen abzublenden, sogleich wird man bemerken, dass irgend ein dunkler Winkel viel schwärzer erscheint, und dass darin Helligkeitsunterschiede wahrnehmbar werden, die vorher unmerklich waren, weil sie verwischt wurden durch den Lichtnebel, welcher von den mit direktem Lampenlicht beleuchteten Theilen der brechenden Medien ausging.

Ausser diesen überall ziemlich gleichmässig im Auge verbreiteten Ursachen der Lichtzerstreuung kommen aber noch gröbere Unregelmässigkeiten vor, die zu besonderen Erscheinungen Veranlassung geben. Bei passender Einstellung des Auges werden sich natürlich diese Unregelmässigkeiten ebensowenig bemerklich machen wie die



gleichmässige Trübung der brechenden Medien. Jeder Strahl eines Bündels nämlich, welcher auf eine gröbere Unregelmässigkeit trifft, wird zurückgeworfen absorbiert oder seitwärts gebrochen, fällt also aus dem Bündel aus. Vereinigen sich nun die übrigen regelmässig weitergehenden Strahlen auf einen Punkt der Netzhaut, so wird man nichts bemerken. Nur wenn die Unregelmässigkeiten ihren Sitz ganz hinten im Glaskörper haben, da wo die zu den Bildpunkten konvergierenden Strahlenbündel schon überaus dünn sind, können sie ganze solche Bündel abfangen und Lücken oder Schatten im deutlichen Bilde erzeugen, die unter dem Namen der „fliegenden Mücken“ bekannt sind.

Sowie aber die Einstellung des Auges fehlerhaft ist, so dass jedem leuchtenden Punkte ein Zerstreuungskreis auf der Netzhaut entspricht, so machen sich die gröberen Unregelmässigkeiten durch Schattenwerfen geltend. Mag nämlich der Zerstreuungskreis dadurch entstehen, dass der Bildpunkt vor oder hinter die Retina fällt, so werden in ihm ebenso viele dunklere Stellen sein als gröbere Unregelmässigkeiten auf dem Wege des Strahlenbündels lagen. In der That sieht auch der Zerstreuungskreis eines einzelnen leuchtenden Punktes im Auge durchaus nicht so aus wie eine gleichmässig beleuchtete runde Scheibe, sondern man sieht innerhalb der im allgemeinen kreisförmigen oder wegen des Astigmatismus etwas ovalen Umgrenzungslinie hellere und dunklere Stellen in unregelmässigem Wechsel nebeneinander. Ein kurzsichtiges Auge kann sich diesen Anblick leicht verschaffen durch Anblicken eines hellen Sternes oder einer fernen Flamme z. B. einer Strassenlaterne in dunkler Nacht. Ein Normalsichtiger müsste eine convexe Linse dabei vor das Auge nehmen Um einen einzelnen leuchtenden Punkt zu nahe vor dem Auge zu haben, braucht man nur ein feines Löchelchen in einem schwarzen Kartenblatt einige Centimeter vom Auge entfernt vor einen hellen Hintergrund zu bringen. Hier zeigt sich wesentlich dieselbe Erscheinung.

Regelmässig hat in der Zerstreuungsfigur die Lichtvertheilung einen mehr oder weniger ausgesprochen sternförmigen Charakter. Dies hängt ganz entschieden mit dem sternförmigen Bau der Linse zusammen, doch ist eine strenge Erklärung der Einzelheiten noch nicht gegeben. Ebenso dürfte die nicht zu bezweifelnde Thatsache noch der Erklärung warten, dass immer gegen den Rand des Zerstreuungskreises die durchschnittliche Helligkeit geringer ist als in der Mitte, wenn der Zerstreuungskreis durch zu grosse Ferne des leuchtenden Punktes bedingt ist.

Aus der beschriebenen ungleichmässigen Lichtvertheilung im Zer-

streuungsfelde erklärt sich ferner noch leicht die Thatsache, dass linienförmige Objekte bei unpassender Einrichtung des Auges für ihre Entfernung meist scheinbar mehrfach gesehen werden. In der That denken wir uns an Stelle des einzelnen leuchtenden Punktes eine leuchtende Gerade, so wird sich auf der Netzhaut die Zerstreuungsfigur sovielmale in stetiger Folge nebeneinanderlegen als die Gerade Punkte enthält. Die auffallend hellen Stellen der Zerstreuungsfigur werden sich dabei zu ebensovielen Bildern der Linie aneinanderreihen, zwischen denen die dunkleren Stellen der Zerstreuungsfigur wegen des Contrastes ganz übersehen werden. Die Linie wird also mehrfach erscheinen. Dasselbe wird auch noch stattfinden, wenn das Objekt nicht eine unendlich feine Linie ist, sondern ein Flächenstreif, dessen Breite nur so klein ist, dass ihr genaues Bild auf der Netzhaut schmaler wäre als die Zerstreuungsfigur eines Punktes. Aus diesem Grunde sehen Kurzsichtige stets den Mond, besonders den sichelförmigen, scheinbar mehrfach.

Die Lage und Grösse der Schatten von gröberen Unregelmässigkeiten auf der Retina wird der wirklichen Lage und Grösse derselben um so genauer entsprechen, je annähernder parallelstrahlig das im Auge fortgepflanzte Bündel ist. Auf diese Bemerkung gründet sich eine Methode, kleine Körperchen im Auge zu untersuchen oder wie man sich ausdrückt „entoptisch wahrzunehmen“.

Man bringe einen leuchtenden Punkt in die vordere Brennebene des Auges, also etwa 12 mm. vor die Hornhaut, dann wird das von ihm ausgesandte Strahlenbündel den Glaskörper ziemlich parallelstrahlig durchlaufen und auf der Netzhaut eine Zerstreuungsfigur beleuchten, welche der Pupille ähnlich und ein wenig grösser als sie ist. Der leuchtende Punkt ist am leichtesten herzustellen, indem man in ein schwarzes Kartenblatt mit einer Nadel ein feines Löchelchen sticht und das Blatt senkrecht zur Axe des Auges in etwa 12 mm. Entfernung von der Hornhaut hält vor einem ausgedehnten gleichmässig leuchtenden Hintergrund. Auch das von einer Sammellinse gelieferte physische Bild eines stark leuchtenden Punktes kann zweckmässig verwendet werden. Kleine Bewegungen des Objektpunktes in der vorderen Brennebene lassen sich durch Verschiebungen des Kartenblattes bei der ersten Versuchsweise leicht ausführen. Solche haben den Erfolg, dass das parallelstrahlige Bündel abwechselnd in verschiedener Richtung den Glaskörper durchläuft und verschiedene Stellen der Netzhaut trifft. Dabei treten dann auch oft Schatten von zwei Körperchen auseinander, welche bei der ersten Stellung des Lichtpunktes zusammenfielen, weil sie in der ersten Richtung des Strahlenbündels genau hintereinander liegen. Auch verschieben sich



die Schatten der Körperchen relativ gegen den Rand des Zerstreuungsfeldes. Aus dieser Verschiebung kann man dann beurtheilen, ob das schattenwerfende Körperchen vor oder hinter der Pupillenebene seinen Sitz hat. Wie ein Blick auf die nebenstehende Fig. 28 zeigt, wird bei einer Verschiebung des Lichtpunktes in einer gewissen Richtung der Schatten eines Körpers vor der Pupille relativ im Zerstreuungskreise in entgegengesetzter Richtung verschoben. Der Schatten eines Körpers hinter der Pupillarebene wird in gleichem Sinne verschoben und der Schatten eines Körpers in der Pupillarebene behält seine relative Stellung im Zerstreuungskreise. Verschiebt man z. B. den Lichtpunkt nach unten, so rücken die Schatten der drei Körper  $v, i, h$ , die ursprünglich (unter  $A$ ) dicht aneinander lagen auseinander, wie es unter  $B$ , siehe  $v, i, h$ , gezeichnet ist, und zwar ist  $v$ , dem oberen Rande des Zerstreuungskreises  $r_o$  dagegen  $h$ , dem unteren Rande  $r_u$  näher gerückt, während der Schatten des in der Pupillarebene gelegenen Körpers  $i$  nach wie vor in der Mitte des Zerstreuungskreises liegt. Bei der subjektiven Auffassung dieser Schatten muss man natürlich beachten, dass die Empfindungen verkehrt nach aussen projicirt werden, so dass dem oberen Rand des Zerstreuungskreises der untere Rand eines scheinbaren Objektes entspricht und umgekehrt.

Unter den verschiedenen Körperchen, deren Schatten sich bei der entoptischen Beobachtung gewöhnlich zeigen, sind folgende Arten zu unterscheiden.

1. Tröpfchen auf der vorderen Hornhautfläche von Schleim oder dem Sekrete der Meibom'schen Drüsen. Ihre Schatten zeigen sich meist als dunkle Flecken mit heller Mitte und leicht daran kenntlich, dass sie beim Blinzeln verschwinden oder Lage und Gestalt verändern.

2. Perlflecke von grösserer Beharrlichkeit. LISTING hält sie für die Schatten von Schleimklümpchen in der Flüssigkeit zwischen Linsenkörper und Linsenkapsel.

3. Eine matte sternartige Zeichnung vom strahligen Bau der Linse herrührend.

4. Verschiedene unregelmässige Gebilde fadenartiger und perl-

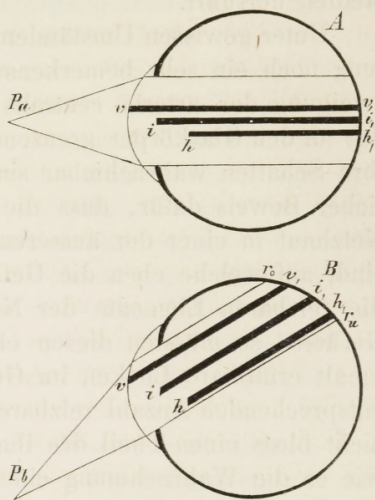


Fig. 28.

schnurartiger Gestalt. Sie sind die Schatten von Unregelmässigkeiten im Glaskörper, die meist beweglich sind.

Endlich ist zu erwähnen, dass das ganze entoptische Gesichtsfeld wie bestäubt erscheint, was offenbar von den feinsten überall mehr gleichmässig verbreiteten Unregelmässigkeiten der brechenden Medien herrührt.

Unter gewissen Umständen taucht bei der entoptischen Beobachtung noch ein sehr bemerkenswerthes Objekt auf, nämlich die Verzweigung der arteria centralis retinae. Diese liegt bekanntlich in der an den Glaskörper grenzenden Schicht der Netzhaut. Wenn also ihre Schatten wahrnehmbar sind, so ist dies ein direkter thatsächlicher Beweis dafür, dass die durch Licht reizbaren Elemente der Netzhaut in einer der äusseren Schichten dieser Membran zu suchen sind, auf welche eben die Gefässe Schatten werfen können. Lägen die reizbaren Elemente der Netzhaut in derselben Schicht wie die Gefässe, so müssten diesen ebenso viele niemals mit Empfindungsinhalt erfüllbare Lücken im Gesichtsfelde entsprechen, da sie einer entsprechenden Anzahl reizbarer Elemente den Platz wegnähmen und nicht bloss einen Theil des ihnen sonst zukommenden Reizquantums, wie es die Wahrnehmung eines Schattens erfordert.

Die Gefässschatten tauchen nun im entoptischen Gesichtsfelde dann auf, wenn man den leuchtenden Punkt in der vorderen Brennebene ein wenig schnell hin- und herbewegt. Bewegt man den Punkt auf und ab, so erscheinen nur Gefässzweige, die nahezu wagrecht verlaufen. Bewegt man ihn von rechts nach links, so erscheinen nur fast senkrechte Zweige. Die Stelle des direkten Sehens ist stets frei von Gefässschatten, wie es ihre Gefässlosigkeit erwarten lässt.

Die Gefässschatten sind bei dieser Beobachtungsart sehr zart gezeichnet und wie gesagt nur bruchstückweise zu erkennen. Es ist daher von Interesse, noch zwei andere Methoden kennen zu lernen, nach denen man ein weit vollständigeres Bild von der Gefässverzweigung im eigenen Auge bekommt. Die erste dieser Methoden besteht darin, dass man mittels einer kleinen Sammellinse ein möglichst kleines Sonnenbildchen auf einem Punkte der Sklerotika entwirft, welcher möglichst weit vom Hornhautrande abliegt, während man nach einem gleichmässig dunklen Hintergrunde blickt. Dieser überzieht sich dann scheinbar mit einem bronzefarbenen Schleier in welchem deutlich der ganze Gefässbaum der vasa centralia retinae dunkel gezeichnet ist, die Stelle des deutlichsten Sehens erscheint auch hier natürlich gefässlos und hat ein Ansehen, welches HELMHOLTZ mit chagrinirtem Leder vergleicht, auch zeigt sie einen stär



keren Glanz. Behält das Sonnenbildchen seine Lage dauernd bei, so wird allmählich die Erscheinung matter, um zuletzt ganz zu verschwinden. Jede kleine Bewegung des Sonnenbildchens ruft sofort die Erscheinung wieder hervor und es bewegt sich dabei der Gefässbaum in gleichem Sinne mit dem Sonnenbildchen, der glänzendere Fleck aber bewegt sich ein wenig in entgegengesetzter Richtung. Die Erscheinung beruht darauf, dass das Sonnenbildchen auf der Sklerotika diese gleichsam selbstleuchtend macht. Das von diesem Punkte der Sklerotika ins Innere des Auges gesandte Licht wird nun durch die pigmentirte Chorioidea nicht ganz abgehalten, besonders wenn der beleuchtete Punkt noch ausserhalb der Ciliarfortsätze liegt, wo die Pigmentanhäufung nicht so gross ist. Da nun also der ganze Glaskörper von einem Punkte aus durchstrahlt ist, so werden die Gefässe grosse Schatten in den äusseren Schichten der Netzhaut werfen und da sie auf derselben ungewohnte Stellen fallen, so werden sie bemerkbar. Dass sich die als scheinbare Objekte nach aussen projecirten Schatten mit einer Bewegung des Lichtpunktes gleichsinnig bewegen ist selbstverständlich, da die Schatten selbst sich in entgegengesetztem Sinne bewegen müssen. Warum sich die wie chagriniertes Leder aussehende Figur im gelben Fleck der Netzhaut umgekehrt bewegt, ist noch nicht erklärt, es deutet aber jedenfalls auf eine andere Entstehungsart dieser Figur.

Die zweite Methode zur Darstellung der Aderfigur besteht in folgendem: Während man auf einen möglichst dunklen Hintergrund blickt, hält man weit seitlich von der Augenaxe eine stark leuchtende Flamme. Der dunkle Hintergrund scheint sich auch hier mit einem gelblichen Lichtnebel zu überziehen, aus welchem bei kleinen Bewegungen der Flamme die Schatten der Gefässverzweigungen schwarz gezeichnet auftauchen.

Der Stelle des deutlichsten Sehens entspricht bei dem Versuche eine hellere Stelle auf einer Seite von einem halbmondförmigen Schatten eingefasst.

Bei Bewegungen der Flamme bewegen sich die Schatten der Gefässe im Gesichtsfelde im gleichen Sinne, wenn die Bewegung in einer Meridianebene stattfindet. Geht dagegen die Bewegung senkrecht zu einer Meridianebene vor sich, so bewegen sich die Schatten entgegengesetzt wie die Flamme.

Die soeben beschriebenen Erscheinungen sind zum grössten Theil schon von PURKINJE beobachtet, aber erst viel später ist von H. MÜLLER die richtige Erklärung gegeben. Sie beruht darauf, dass ein sehr helles Netzhautbildchen bei sonst sehr dunkeltem Gesicht-

felde als eine Lichtquelle anzusehen ist, welche nach allen Seiten Strahlen aussendet. Dem entspricht der allgemeine Lichtnebel, welcher das dunkle Gesichtsfeld überzieht. Sei beispielsweise  $a$  in Fig. 29 die Flamme, dann wird ihr Netzhautbild  $b$  Strahlen aussenden, welche den ganzen Augenhintergrund beleuchten, befindet sich nun bei  $v$  ein Gefäßquerschnitt, so wird der von  $b$  nach  $c$  gehende Strahl abgefangen und der an die ungewohnte Stelle bei  $c$  fallende Schatten des Gefäßes wird bemerkt und im Gesichtsfelde in der Richtung nach  $d$  projicirt. Bewegt sich die Flamme von  $a$  nach  $\alpha$  so rückt das Netzhautbild von  $b$  nach  $\beta$ , der Schatten von  $c$  nach  $\gamma$ , die Netzhautstelle  $\gamma$  setzt aber die Ursache ihrer Erregung in der Richtung  $\delta$  nach aussen.

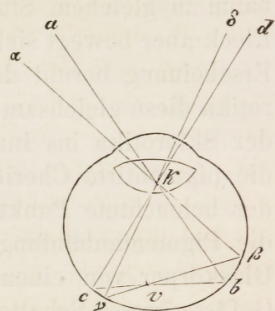


Fig. 29.

Das scheinbare Schattenobjekt hat sich also in gleichem Sinne von rechts nach links wie die Lichtflamme bewegt. Anders muss es sich bei einer Bewegung der Flamme senkrecht zur Meridianebene verhalten. Geht z. B. die Flamme vom Punkte  $a$  weg hinter die Ebene des Papiers, so geht das Bild von  $b$  weg vor dieselbe, der Schatten  $c$  geht dahinter und endlich das scheinbare Objekt  $d$  vor die Ebene des Papiers, macht also eine Bewegung in umgekehrtem Sinne wie die Flamme.

Den halbmondförmigen Schatten in der Gegend des deutlichsten Sehens erklärt MÜLLER für den Schatten, welchen der dem hellen Netzhautbildchen zugewandte Rand der Netzhautgrube in diese hinein werfen muss.

Derselbe Forscher hat noch versucht die Bewegungen der Gefäßschatten zu benutzen, um zu bestimmen, wie weit hinter der gefäßführenden Schicht diejenige Schicht der Netzhaut liegt, welche die durch das Licht gereizten Elemente enthält. Es ist nämlich klar, dass unter sonst gleichen Umständen die Bewegung der Schatten um so grösser sein muss, je weiter vor der reizbaren Schicht die Gefässe liegen und wenn man also die Verschiebung der Schatten misst bei einer gleichfalls gemessenen Verschiebung der Lichtquelle, so kann man die Entfernung der Gefässe von der reizbaren Schicht berechnen. H. MÜLLER benutzte zur Berechnung die erst beschriebene Beobachtungsart der Gefäßschatten, wo als Lichtquelle ein auf der Sklera entworfenen Sonnenbildchen diente. Eine Verschiebung desselben wurde mit dem Zirkel direkt gemessen und gleichzeitig die Verschiebung der scheinbaren Schattenobjekte beobachtet. Auf Grund leicht herzustellender Konstruktionen fand MÜLLER, dass die reizbare



Schicht der Netzhaut etwa 0,2 bis 0,3 mm. hinter der gefässführenden liegen müsse. Die reizbare Schicht der Netzhaut ist hiernach jedenfalls eine der äussersten. Es werden sich aus der Lehre von der Lichtempfindung später noch Gründe ergeben, aus welchen man die Eigenschaft der Reizbarkeit durch Licht der äussersten Schicht der Netzhaut, nämlich der Stäbchen- und Zapfenschicht zuschreiben muss.

Dass beim gewöhnlichen Sehakte die Schatten der Gefässe nicht auffallen, hat seinen Grund theils darin, dass hierbei keine eigentlichen Kernschatten in der reizbaren Netzhautschicht entstehen. Ist nämlich das ganze Sehfeld mit mehr oder weniger hellen Objekten erfüllt, so wirkt die Pupille gleichsam wie eine leuchtende Scheibe. Da nun die stärksten Zweige der v. centralis retinae nur 0,038 mm. dick sein sollen, so würde ihr Kernschatten — eine 4 mm. weite Pupille als Lichtquelle gedacht — nur etwa 0,17 mm. lang sein, also noch nicht bis in die reizbare Stäbchenschichte reichen. Die verwaschenen Halbschatten werden aber unbemerkt bleiben, weil sie sich beständig auf denselben Netzhautelementen halten und diese daher durch die relative Schonung an Reizbarkeit gewinnen, was ihnen an Reizstärke durch die Beschattung entgeht.

Wenn diese längst allgemein anerkannte Erklärung für die Unmerklichkeit der Gefässschatten beim gewöhnlichen Sehen richtig ist, so müssen dieselben bei erstem Aufschlag der Augen auf jedem hellen Hintergrund erscheinen<sup>1</sup>, wenn das Auge längere Zeit geschlossen war, so dass alle Elemente der Netzhaut eine gleiche Reizbarkeit erlangt haben. Dies kann man in der That sehr leicht beobachten. Ich sehe einige Gefässschatten beim ersten Augenaufschlag schon aufblitzen, wenn ich das Auge nur eine einzige Minute vorher geschlossen gehalten habe. Bei dieser Art die Gefässschatten sichtbar zu machen tritt aber etwas noch auffälliger hervor als bei jeder anderen, was mir zu beweisen scheint, dass die Unsichtbarkeit der Gefässschatten im gewöhnlichen Sehakte doch noch andere Gründe haben muss als die gemeiniglich angeführten, dass nämlich die Reizbarkeit der ausserhalb der Gefässschatten liegenden Netzhautelemente durch die stärkere Bestrahlung alsbald abgestumpft würde. Es müssten nämlich in Folge dieses Umstandes die beim ersten Augenaufschlag erscheinenden Gefässschatten dadurch verschwinden, dass die Helligkeit des Grundes zu dem Grade herabsänke der in den Schatten herrscht. Faktisch verschwinden aber die Schatten indem ihre Helligkeit auf den Grad der Helligkeit des Grundes rasch ansteigt. Es muss also ohne Zweifel noch ein bisher übersehener wirksamer Umstand aufgesucht werden.

1 HERMANN, Grundr. d. Physiol. 5. Aufl. S. 366.

## SIEBENTES CAPITEL.

Das vom Augenhintergrunde zurückkehrende  
Licht. (Augenspiegel).

Schon im vorigen Abschnitte hat sich gezeigt, dass das auf den Augenhintergrund fallende Licht keineswegs vom Pigmente der Chorioidea ganz verschluckt wird, da wir ein Flammenbildchen auf der Netzhaut als eine Lichtquelle wirken sahen, die den ganzen übrigen Augenhintergrund mit einem sehr merklichen Lichtschimmer überzieht. In der That giebt es auch gar kein schwarzes Pigment, welches das darauf fallende Licht vollständig absorhirt. Es muss also stets von einem durch helle Objekte stark beleuchteten Augenhintergrund eine sehr erhebliche Lichtmenge zurückstrahlen und es muss ohne Zweifel von diesem Lichte auch ein entsprechender Theil seinen Weg durch die Pupille wieder nach aussen nehmen. Wenn man dies bedenkt, könnte es paradox erscheinen, dass gleichwohl die Pupille jedes fremden Auges absolut schwarz erscheint, selbst wenn der Hintergrund dieses Auges ausgedehnte Bilder sehr heller Objekte enthält. Stellt man sich aber den Gang der vom Augenhintergrund zurückkehrenden Strahlen genauer vor, so ergiebt sich der Grund für die tiefe Schwärze der Pupille. In der That wird ja jedes von einem Punkte des Augengrundes ausgehende Strahlenbündel, welches die Pupille durchsetzt nach dem bekannten Gesetze der Reciprocität beim Strahlengange hin und her durch die brechenden Flächen in ein homocentrisches Strahlenbündel verwandelt, dessen Vereinigungspunkt auf dem durch den leuchtend gedachten Punkt des Augengrundes gezogenen Richtungsstrahl liegt, und zwar in der Entfernung für welche das Auge eingestellt ist. Bringt nun an diesen Ort der Beobachter sein Auge um das Strahlenbündel hineinfallen zu lassen, so kann ein solches unmöglich existiren, da sich ja an diesem Orte eine starke Lichtquelle befinden muss, wenn der betreffende Punkt im Hintergrund des beobachteten Auges stark beleuchtet und mithin selbst leuchtend sein soll. Man sieht also, dass sicher wenigstens in dem Falle, wo das beobachtete Auge auf die Entfernung eingerichtet ist, in welcher sich das beobachtende Auge befindet, diesem letzteren die Pupille des beobachteten absolut schwarz erscheinen muss aus dem einfachen Grunde, weil nur von solchen Punkten des be-



obachteten Augenhintergrundes Licht durch dessen Pupille ins beobachtende Auge gelangen könnte, die das Bild von der Pupille des letzteren aufnehmen, welches Bild aber eben dunkel ist. Auf die Lichtabsorption im Hintergrund des beobachteten Auges kommt es dabei gar nicht an. Von der Richtigkeit dieser Ueberlegung kann man sich leicht überzeugen, wenn man auf die Blendung des Okulares eines Fernrohres oder Mikroskopes ein Blättchen Papier legt, das farbig oder sogar weiss sein darf. Immer wird die Oeffnung der Okularlinse von einiger Entfernung aus gesehen schwarz erscheinen, wenn man dafür sorgt, dass nur durch diese und nicht von der anderen Seite des Okularrohres her Licht auf das Blättchen fallen kann. Man wird nämlich auch hier nur von solchen Punkten des Blättchens Licht erhalten können, die im Bereiche des (freilich nicht ganz scharfen) Bildes liegen, das die Okularlinse von der Pupille des eigenen Auges auf dem Blättchen entwirft und diese Stelle desselben ist eben unbeleuchtet.

Der soeben gegebenen Erklärung von der Dunkelheit einer beobachteten Pupille scheint die Thatsache zu widersprechen, dass die Pupille eines albinotischen Menschen oder Thieres nicht schwarz, sondern röthlich erscheint. Hiergegen hat aber DONDERS einen sehr schlagenden Versuch geltend gemacht, der darin besteht, dass man die Sklerotica und Cornea des albinotischen Auges mit einem undurchsichtigen Schirm bedeckt, in welchem ein rundes Loch etwas kleiner als die Pupille eingeschnitten ist, das gleichsam eine künstliche Pupille bildet. Diese erscheint dann ebenso schwarz wie die Pupille eines pigmentirten Auges. Dieser Versuch beweist, dass der Hintergrund des albinotischen Auges keineswegs deswegen hell erscheint weil ihm selbst das Pigment fehlt, sondern weil die Iris und die angrenzenden Theile der Chorioidea wegen Pigmentmangels durchscheinend sind, so dass durch sie hindurch ein diffuser Lichtschimmer im ganzen Auge verbreitet wird, der auch die Stelle des Hintergrundes beleuchtet, welche das Bild des beobachtenden Auges aufnimmt.

Indem man das an die Spitze dieser Erörterung gestellte Princip schärfer fasst, kann man den Satz aussprechen: In die Pupille eines beobachtenden Auges können nur von solchen Punkten des Hintergrundes eines beobachteten Auges Strahlen gelangen, auf welche auch umgekehrt von Punkten jener Pupille Strahlen fallen können. Der Inbegriff aller dieser Punkte ist aber das Bild — im weiteren Sinne des Wortes — der Pupille des Beobachters auf dem Grunde des beobachteten Auges. Ist dies Bild ein Zerstreuungsbild, so kön-

nen sehr wohl einzelne Theile desselben mit Theilen der Zerstreuungsbilder anderer Gegenstände zusammenfallen. Wenn also das beobachtete Auge nicht für die Entfernung angepasst ist, in welcher sich die (scheinbare) Pupille des Beobachters befindet, so kann es unter günstigen Umständen Stellen im Hintergrunde jenes Auges geben, die einerseits von einer starken Lichtquelle wirklich Licht empfangen andererseits aber in die Pupille des Beobachters wirklich Licht senden. Dieser letztere wird alsdann die beobachtete Pupille nicht ganz schwarz, sondern mit einem matten röthlichen Schimmer erfüllt sehen. Am leichtesten kann man die erforderlichen Bedingungen folgendermaassen herstellen. Es sei  $T$  Fig. 30 ein stark

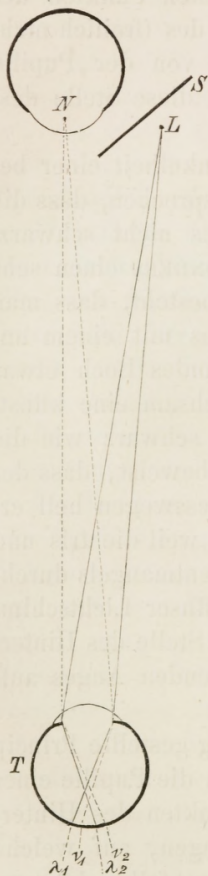


Fig 30.

myopisches Auge, die Myopie kann nöthigenfalls durch willkürliche Akkommodation hergestellt werden. In einer die Sehweite dieses Auges weit übertreffenden Entfernung stellt man nun eine Lichtflamme davor auf. Ein Punkt  $L$  derselben wird alsdann auf der Netzhaut von  $T$  einen Zerstreuungskreis beleuchten dessen Durchmesser  $\lambda_1 \lambda_2$  ist. Das beobachtende Auge  $N$  stellt sich nun dicht neben  $L$  und blendet sich durch einen Schirm  $S$  den störenden Schein von  $L$  weg. Dem Mittelpunkt der Pupille von  $N$  wird auf der Netzhaut von  $T$  ein Zerstreuungskreis  $v_1 v_2$  entsprechen, dem die Strecke  $v_1 v_2$  mit dem Zerstreuungskreis von  $L$  gemeinsam ist. Jeder Punkt dieser Strecke kann also von  $L$  Licht empfangen und solches nach  $N$  senden. Z. B. empfängt der Punkt  $v_1$  auf einem Wege zwischen den ausgezogenen Linien Licht von  $L$  und sendet einen Strahl nach  $N$  auf dem Wege der punktirten Linie. In der That sieht unter diesen Umständen der Beobachter bei  $N$  die Pupille von  $T$  schwach röthlich schimmernd, wie zuerst BRÜCKE bemerkt hat.

Noch viel vollkommener und vom Anpassungszustand des beobachteten Auges ganz unabhängig kann man den Zweck erreichen, die Pupille leuchtend zu sehen durch einen sinnreichen Kunstgriff von HELMHOLTZ. Man stellt nämlich wie Fig. 31 im Grundriss andeutet zwischen das beobachtende Auge  $B$  und das beobachtete  $C$  eine planparallele Glasplatte  $S$  schräg auf. Sie macht als Spiegel wirkend von der Licht-



flamme *A* ein Bild  $\alpha$ . Die Strahlen der Flamme fallen also in das Auge *C* so hinein als kämen sie von  $\alpha$  her, welche Richtung dieselbe ist wie die von *B* her. Sie werden also jedesfalls auch die Netzhautpunkte in *C* beleuchten, welche dem Zerstreuungsbilde der Pupille von *B* entsprechen. Dies Auge wird demnach durch die Platte *S* hindurch die Pupille von *C* hell sehen. War einmal die Möglichkeit gegeben vom Hintergrunde eines Auges wirksame Lichtstrahlen in das eigene Auge zu leiten, so konnte man auch den Plan fassen, jenen Augenhintergrund deutlich zu sehen. Eine Vorrichtung, welche dies ermöglicht, nennt man einen „Augenspiegel“. Die erste solche ist von HELMHOLTZ erfunden, welcher dadurch eine neue Aera der Augenheilkunde heraufgeführt hat.

Stellt man sich die richtige Stelle vom Hintergrunde des beobachteten Auges irgendwie leuchtend gemacht vor, so kommt es um sie deutlich sichtbar zu machen nur noch darauf an, dass die von den einzelnen Punkten dieser Stelle ausgehenden Strahlenbündel nach ihrem Austritt aus dem Auge so gebrochen werden, dass ihre Strahlen oder deren Richtungen sich in Punkten schneiden, welche in der deutlichen Sehweite vom beobachtenden Auge liegen. Diesen Zweck kann man nun auf zwei Wegen zu erreichen suchen. Entweder man stellt das beobachtende Auge nahe an das beobachtete und sucht die aus dem letzteren hervortretenden Strahlenbündel (wenn sie es nicht schon sind) in divergente zu verwandeln, deren bloss virtuelle Schnittpunkte hinter dem beobachteten Auge in der deutlichen Sehweite des beobachtenden liegen. Oder zweitens man stellt das beobachtende Auge weiter entfernt vom beobachteten auf und bringt die aus diesem ausfahrenden Strahlenbündel sehr rasch zur reellen Convergenz, so dass die Schnittpunkte vom beobachtenden Auge in dessen deutlicher Sehweite liegen, das letztere kann dabei nöthigesfalls noch mit einer seine Sehweite verkürzenden Sammellinse versehen werden.

Jede dieser beiden Beobachtungsarten kann man kombiniren mit jeder der beiden Beleuchtungsarten, und erhält so 4 Grundformen des Augenspiegels, nämlich : 1. Beleuchtung mittels der durchsichtigen spiegelnden Platte, Beobachtung im virtuellen Bilde (die ursprüngliche Form des Augenspiegels von HELMHOLTZ). 2. Beleuchtung ebenso,

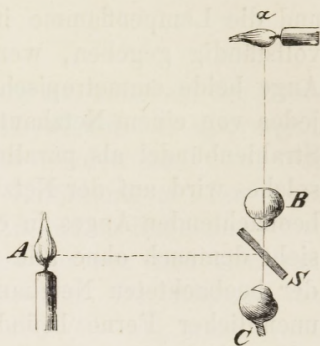


Fig. 31.

Beobachtung im reellen Bilde (Augenspiegel von ENGELHARD <sup>1)</sup>). 3. Beleuchtung durch theilweise Deckung des Zerstreuungsbildes von der Pupille des Beobachters mit dem Zerstreuungsbilde von einer starken Lichtquelle im beobachteten Auge, Beobachtung im virtuellen Bilde (Augenspiegel von DONDERS und VAN TRIGT, COCCIUS, LIEBREICH etc.). 4. Beleuchtung nach demselben Princip, Beobachtung im reellen Bilde (Augenspiegel von RUETE, LIEBREICH etc.).

Die erste dieser 4 Grundformen ist durch die schräge Glasplatte und die Lampenflamme in der Anordnung von Fig. 31 schon ganz vollständig gegeben, wenn das beobachtete und das beobachtende Auge beide emmetropisch sind. In der That in diesem Falle geht jedes von einem Netzhautpunkte des beobachteten Auges ausgesandte Strahlenbündel als parallelstrahliges aus demselben hervor und ein solches wird auf der Netzhaut des ebenfalls emmetropisch gedachten beobachtenden Auges in einem Punkte wieder vereinigt. Das letztere sieht demnach ohne alle weitere Hilfsmittel die beleuchteten Theile der beobachteten Netzhaut deutlich und zwar als ein scheinbar in unendlicher Ferne befindliches Objekt, in welchem oben, unten, rechts, links liegt was in Wirklichkeit ebenso liegt. Das beobachtende Auge sieht also ein aufrechtes virtuelles Bild der Netzhaut. Da es in unendlicher Ferne liegt ist es auch unendlich gross. Der Vergrößerungscoefficient ist demnach hier nach einem anderen Princip zu berechnen, wie weiter unten gezeigt werden soll.

Der Beobachter sieht auch dann ohne jede künstliche dioptrische Vorrichtung die Netzhaut eines dicht vor ihm befindlichen Auges deutlich, wenn das beobachtende Auge in ungefähr demselben Grade myopisch ist, in welchem das beobachtete hypermetropisch ist oder umgekehrt. In jedem andern Falle bedarf aber das beobachtende Auge noch eines künstlichen dioptrischen Apparates, um die beobachtete Netzhaut deutlich zu sehen, und zwar besteht derselbe einfach aus einer Konkavlinse, wenn beide Augen myopisch sind oder das eine wenigstens stärker myopisch ist als das andere hypermetropisch, mit einem Worte, wenn die Summe der Refraktionswerthe beider Augen positiv ist. Um dies anschaulich zu machen, ist in Fig. 32 ein Meridianschnitt des beobachteten Auges bei *A* dargestellt, dasselbe sei auf die Entfernung des Punktes *b*, die wir selbst mit *b* bezeichnen wollen, eingestellt, dann wird das von einem Punkte *a* seiner Netzhaut ausgesandte Strahlenbündel nach *b* konvergierend aus treten und würde auf der Netzhaut des für die Entfernung des Punktes

1 ENGELHARD, Eine neue Form des Augenspiegels. München 1878.





um den Refraktionswerth des beobachteten Auges zu erhalten. Dies ist die S. 76 erwähnte Methode, den Refraktionswerth eines Auges ohne subjektive Sehprüfungen zu bestimmen.

Um die Vergrößerung bei dieser Art der Beobachtung numerisch darstellen zu können, muss man verabreden, was man darunter verstehen will, denn die Vergleichung der Abmessungen des virtuellen Bildes und des als Objekt dienenden Netzhautstückes hat kein Interesse, da jene Abmessungen mit der Sehweite des beobachtenden Auges bis ins Unendliche wachsen können. Wir setzen demnach fest, unter der Vergrößerungszahl soll hier wie bei mikroskopischen Bildern verstanden werden, wievielmals grösser der Schwinkel ist, unter welchem das virtuelle Bild erscheint, als der Schwinkel, unter welchem das gesehene Netzhautstück in 8 par. Zoll Entfernung versetzt erscheinen würde. Sei nun der Pfeil  $\alpha$  der Durchmesser des gesehenen Netzhautstückes und der Pfeil bei  $b$  das reelle Bild, welches durch den brechenden Apparat des beobachteten Auges davon aussen entworfen würde. Seine Länge  $\beta$  wird  $= \frac{b}{z} \alpha$  sein, wenn mit  $z$  die Entfernung des Knotenpunktes von der Netzhaut im Auge  $A$  bezeichnet wird. Die Linse  $B$  entwirft nun von dem für ihren Standpunkt virtuellen Objekte bei  $b$  ein virtuelles Bild bei  $d$ , dessen Durchmesser  $\delta$  sich berechnet

$$= \frac{d - e_2}{b - e_1} \cdot \frac{b}{z} \alpha.$$

Diese Grösse durch  $d$  dividirt oder

$$\frac{d - e_1}{d} \cdot \frac{b}{b - e_2} \cdot \frac{\alpha}{z},$$

ist aber die doppelte Tangente des halben Gesichtswinkels, unter welchem das schliesslich virtuelle Bild dem beobachtenden Auge erscheint, oder da es sich hier nur um kleine Gesichtswinkel handeln kann, geradezu das Bogenmaass dieses Gesichtswinkels. Ebenso ist das Bogenmaass des Winkels, unter welchem der Durchmesser  $\alpha =$  des Netzhautstückchens in eine Entfernung von 8 Zoll frei vor das Auge gesetzt erscheinen wird  $\frac{\alpha}{8}$  oder wenn man in Millimetern messen

will  $\frac{\alpha}{216}$ . Die Vergrößerungszahl wäre also der Verabredung entsprechend

$$= \frac{d - e_2}{d} \cdot \frac{b}{b - e_1} \cdot \frac{\alpha}{z} : \frac{\alpha}{216} = \frac{d - e_2}{d} \cdot \frac{b}{b - e_1} \cdot \frac{216}{z}$$

oder wenn wir wieder  $e_2$  und  $e_1$  gegen  $d$  und  $b$  vernachlässigen  $=$



$\frac{216}{z}$ . Setzen wir nun  $z$  für ein normales Auge in runder Zahl = 15 mm., so ergibt sich die Vergrößerung der Netzhaut bei Beobachtung aus unmittelbarer Nähe im virtuellen aufrechten Bilde als eine etwa 14,4fache. Diese Zahl ist, wie man sieht, unabhängig von den Refraktionszuständen der beiden Augen, nur müssen die beiden Sehweiten viel grösser als der Abstand zwischen beiden Augen sein, welche Bedingung immer erfüllt ist, wenn nicht ein oder beide Augen sehr myopisch sind.

Eine theoretisch sehr bemerkenswerthe Eigenthümlichkeit des HELMHOLTZ'schen Augenspiegels besteht darin, dass man mit demselben im beobachteten Auge das deutliche Netzhautbild der beleuchtenden Flamme sehen kann, denn man kann ja diese in solcher Entfernung aufstellen, dass von ihrem Spiegelbild ein deutliches Bild auf der Netzhaut des beobachteten Auges entsteht, welches dann vom beobachteten Auge 14mal vergrößert deutlich gesehen wird.

Beim HELMHOLTZ'schen Augenspiegel wie bei der Beobachtungsart aus der Nähe in aufrechtem virtuellen Bilde überhaupt ist das zu übersehende Netzhautstück immer sehr klein. Es ist nämlich, wie gezeigt wurde, immer das Zerstreuungsbild der Pupille des beobachtenden Auges im beobachteten. Dies ist aber, wie man leicht sieht, klein, wenn beide Augen einander nahe sind und nur eine Zerstreuungslinse dazwischen steht.

Bei allen ophthalmoskopischen Untersuchungen pflegen die Hornhautreflexe der unentbehrlichen starken Lichtquelle sehr störend zu sein. Um diesen Uebelstand möglichst zu vermindern und um die Beleuchtungsstärke zu vergrößern, hat HELMHOLTZ bei Construction seines Augenspiegels einen sinnreichen Kunstgriff angewendet. Er nimmt nämlich zur Beleuchtung nicht eine, sondern drei dicht zusammengelegte parallele Glasplatten die drei fast zusammenfallende beleuchtende Bilder geben. Stehen sie aber unter einem gewissen Winkel zu den von der Flamme kommenden Strahlen, so wird das reflektirte Licht nahezu vollständig polarisirt sein. Das an der Hornhaut reflektirte Licht wird diese Polarisation behalten und folglich auf dem Wege zum beobachtenden Auge beim Durchgange durch die Platten sehr geschwächt werden. Das von der beobachteten Netzhaut zurückkehrende Licht hat dagegen durch die diffuse Zerstreuung die Polarisation verloren und wird also beim Durchgang durch die Platten nur soweit geschwächt, als es die gewöhnliche Absorption bedingt.

Trotz dieses Kunstgriffes bleibt die Lichtstärke des schliesslichen

Bildes bei Beleuchtung mit durchsichtigen Glasplatten immer gering. Zu praktischen Zwecken pflegt man daher die Beobachtung im aufrechten Bilde aus der Nähe zu kombiniren mit dem anderen Princip der Beleuchtung. Um zu verstehen, wie dies zweckmässig auszuführen ist, stelle man sich zunächst vor, dass ein Hohlspiegel von dem Orte aus, wohin er das Bild einer Flamme wirft, gesehen, selbst wie eine stark leuchtende Fläche erscheint, da ja von jedem Punkte derselben ein Strahlenbündel ausgeht, das nach den einzelnen Punkten des Bildes divergirt. Steht also hier die Pupille eines Auges, die kleiner als das Flammenbild ist, so wird sie von jedem Punkte des Spiegels her von einem Strahlenkegel erfüllt. Dasselbe gilt annähernd auch dann noch, wenn das Auge zwischen dem Flammenbilde und dem Spiegel steht. Stellt man also einen Hohlspiegel an die Stelle der Glasplatte schräg vor das beobachtete Auge und die Lampenflamme an die geeignete Stelle zur Seite, so kann der Hohlspiegel selbst als leuchtende Fläche angesehen werden und er wird ein grosses Feld auf der Netzhaut stark beleuchten. Zum Zwecke der Beobachtung muss nun freilich der undurchsichtige Hohlspiegel ein kleines Loch in der Mitte haben, von welchem kein Licht ausgehen kann, da aber der Rand dieses Loches ein Zerstreuungsbild im beobachteten Auge entwirft, so wird die dadurch entstehende Lücke in der Beleuchtung seiner Netzhaut keine vollständige sein, sondern nur an einer Stelle eine Schwächung derselben bedingen. Eine Idee von der Lichtvertheilung in dem Zerstreuungsbilde des Loches im Spiegel *ab* kann Fig. 33 geben, wo der radial gemessene Abstand

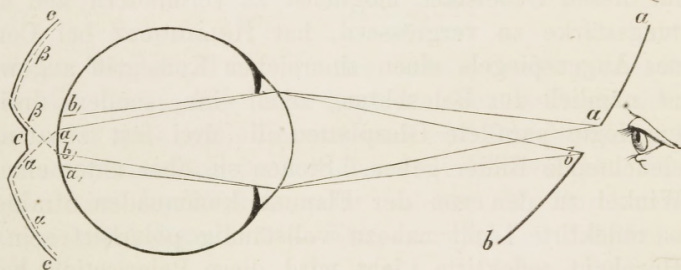


Fig. 33.

der ausgezogenen Kurve *cc* von der Umfangslinie des Augapfels ungefähr die Beleuchtungsstärke im betreffenden Punkte der Netzhaut misst. Der radial gemessene Abstand der punktierten Kurve *bb* stellt nämlich die vom Spiegeltheil *bb* herrührende Beleuchtungsstärke dar und ebenso der Abstand der punktierten Kurve *aa* die vom Spiegeltheil *aa* herrührende Beleuchtungsstärke, die radialen Ordinaten der



Kurve *ccc* sind aber die Summen der Ordinaten der punktierten Kurven. Eine direkte subjektive Anschauung vom Umfang und von der Stärke der Beleuchtung an den verschiedenen Stellen erhält man, wenn man das eigene Auge an die Stelle des beobachteten vor den Spiegel und die Lichtflamme an ihren Ort bringt. Man sieht leicht, dass die Lücke in der vollen Beleuchtung um so heller wird, je weiter die Pupille des beobachteten Auges ist. Da andererseits auch das Zerstreuungsbild der Pupille des Beobachters im beobachteten Auge oder das vom Beobachter zu überschauende Gesichtsfeld von der Pupillenweite des beobachteten Auges abhängt, so ist es für die Beobachtung aus der Nähe im virtuellen Bilde wesentlich jene Pupillenweite so gross als möglich zu machen, was durch Atropineinträufelung geschehen kann.

Statt des durchbohrten Hohlspiegels kann auch ein durchbohrter Planspiegel dienen, wenn zwischen ihn und die Lichtflamme eine Konvexlinse gesetzt wird. Verschiedene Kombinationen der soeben beschriebenen Beleuchtungsapparate mit den erforderlichen Zerstreuungslinsen in verschiedenen Fassungen mehr oder weniger fest vereinigt bilden die Augenspiegel von COCCIUS, DONDERS & VAN TRIGT und LIEBREICH.

Um den Augengrund im reellen Bilde zu beobachten, brauchte man — so scheint es wenigstens — für mehr oder weniger myopische Augen nur die in Fig. 30 dargestellte Anordnung zu verwirklichen und den Abstand der beiden Augen gleich der Summe ihrer Sehweiten zu machen. In der That muss ja in der Sehweite des beobachteten Auges vom beleuchteten Theile seines Grundes ein reelles umgekehrtes Bild entstehen, was alsdann für den Beobachter in seiner Sehweite läge. Man sieht aber leicht, dass hier die Lichtstärke sehr gering sein und das übersehene Gesichtsfeld fast auf einen Punkt zusammenschrumpfen würde.

Um zunächst diesem letzteren Uebelstande zu begegnen, setzt man nahe vor das beobachtete Auge *A* (Fig. 34) eine starke Konvexlinse *B*, deren Brennweite ungefähr gleich ihrem Abstände vom Knotenpunkte dieses Auges ist. Stellt sich jetzt das beobachtende Auge bei *C* in wenigen Decimeter Entfernung von der Linse auf, so wird sein Gesichtsfeld im Auge *A* sehr gross. Denkt man sich nämlich jetzt ein Strahlenbündel vom Mittelpunkte der Pupille des Auges *C*

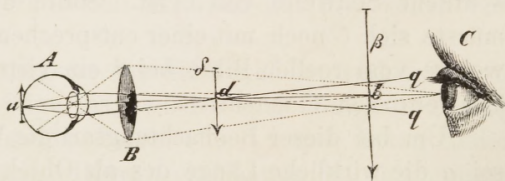


Fig. 34.

ausgehend, so würde dasselbe durch die Linse  $B$  in einem Punkte vereinigt, der nahe am Knotenpunkt von  $A$  liegt, seine Strahlen gingen also durch das Auge  $A$  fast ungebrochen und würden auf seiner Netzhaut ein sehr grosses Feld beleuchten. Die beiden äussersten Strahlen dieses Bündels, welche durch den Rand der Linse gehen, sind in der Figur als punktirte Linien zu verfolgen. Dieses ganze Feld ist aber das von  $C$  aus zu übersehende Gesichtsfeld, denn auf jedem Wege, auf welchem ein Strahl von der Pupille des Auges  $C$  auf die Netzhaut von  $A$  gelangen kann, auf dem kann auch ein Strahl von der Netzhaut des Auges  $A$  in die Pupille von  $C$  fallen. Es verdient noch bemerkt zu werden, dass jetzt das Gesichtsfeld gar nicht von dem Pupillenrande des Auges  $A$  begrenzt, also auch nicht von ihrer Weite abhängig ist. Es ist vom Linsenrande begrenzt, wie aus der Konstruktion ersichtlich, und hängt daher von ihrer Oeffnung allein ab.

Da die Pupille des Beobachters in Wirklichkeit doch nicht ein blosser Punkt ist, so ist das Gesichtsfeld eigentlich noch ein wenig grösser als aus dieser Konstruktion hervorgeht.

Die Linse  $B$  bewirkt aber zugleich noch etwas Anderes. Ein vom Netzhautpunkte  $a$  des Auges  $A$  ausgehendes Strahlenbündel würde offenbar in der Sehweite dieses Auges, die  $b$  heissen mag, wieder vereinigt werden. Der Punkt dieser Vereinigung sei der Punkt  $b$  der Figur. Vermöge der Brechung, die das Bündel in  $B$  erleidet, wird es aber schon früher, etwa in  $d$ , vereinigt. Hier kommt also ein reelles Bild des Punktes  $a$  zu Stande. Ebenso entstehen von den  $a$  benachbarten Punkten der Netzhaut von  $A$ , wenn sie leuchtend sind, reelle Bilder in der Nähe von  $d$  und stellen hier in einer zur Axe des Auges  $A$  senkrechten Ebene ein verkehrtes reelles Bild der ganzen um  $a$  herum gelegenen Netzhautgegend dar. Dies Bild kann nun von  $C$  aus deutlich gesehen werden, wenn der Abstand des Punktes  $d$  von  $C$ , den wir mit  $d$  bezeichnen wollen, die deutliche Sehweite von  $C$  ist. Sollte diese grösser als  $d$  sein, so müsste sich  $C$  noch mit einer entsprechenden Sammellinse bewaffnen, welche vom reellen Bilde bei  $d$  ein virtuelles Bild in der deutlichen Sehweite von  $C$  macht.

Um bei dieser Beobachtungsart die Vergrösserung zu berechnen, sei  $\alpha$  die wirkliche Länge des als Objekt dienenden Netzhautstückes von  $A$  (des Pfeiles bei  $a$ ). Davon würde bei  $b$  durch die brechenden Medien von  $A$  ein reelles Bild entworfen, dessen Länge  $\beta =$

---

1 Die Sehweite  $b$  mag hier vom Knotenpunkte aus statt vom Hauptpunkte aus gemessen sein.



$\frac{b}{z} \alpha$  wäre, wenn wir wie oben mit  $z$  den Abstand zwischen Netzhaut und dem Knotenpunkte von  $A$  bezeichnen. Dieses reelle Bild dient nun der Linse  $B$  als virtuelles Objekt. Setzen wir die Linse, wie oben angenommen, um ihre Brennweite  $f$  abstehend vom Knotenpunkte des beobachteten Auges abstehend voraus, so ist der Abstand  $x$  des reellen Bildes, das sie von dem um  $b - f$  von ihr abstehenden virtuellen Objekte entwirft, zu berechnen aus der Gleichung

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{-(b-f)} = \frac{1}{f} \text{ oder } x = \frac{f(b-f)}{b}.$$

Die Länge  $\delta$  dieses Bildes ist also

$$\frac{f(b-f)}{b} \cdot \frac{1}{b} \cdot \frac{b}{z} \alpha = \frac{f(b-f)}{b} \cdot \frac{\alpha}{z}.$$

Da aber gemeiniglich Linsen von kurzer Brennweite angewandt werden, also  $f$  meist klein gegen  $b$  ist, so wird  $\delta$  nahezu

$$\delta = \frac{f}{z} \alpha$$

sein. Da  $z$  ungefähr 15 mm. beträgt, wird also für  $f = 30$  mm.,  $\delta = 2\alpha$ , für  $f = 45$  mm.  $\delta = 3\alpha$ , für  $f = 60$  mm.  $\delta = 4\alpha$  sein, d. h. das schliesslich sichtbare reelle Bild des Netzhautstückes ist in Wirklichkeit 2-, 3- und 4 mal so gross als das Objekt, wenn eine Linse von 30, 45 und 60 mm. Brennweite vor das beobachtete Auge gesetzt wird. Wollte man die Vergrößerungszahl hier nach demselben Principe berechnen wie oben S. 132, so hätte man den Gesichtswinkel, unter welchem  $\delta$  von  $C$  aus erscheint, nämlich

$$\frac{\delta}{d} \text{ oder } \frac{f\alpha}{zd}$$

zu dividiren durch den Gesichtswinkel, unter welchem  $\alpha$  in 8 par. Zoll oder 216 mm. Entfernung erscheint, d. h.  $\frac{\alpha}{216}$ , dies giebt  $\frac{f \cdot 216}{z \cdot d}$

Wäre die Sehweite  $d$  des Auges  $C$  selbst gerade 216 mm., so stimmt die so berechnete Vergrößerungszahl natürlich mit der reellen Vergrößerung überein.

Um für diese Beobachtungsart aus der Ferne im verkehrten reellen Bilde zu beleuchten, kann man wieder eine Glasplatte schräg vor  $C$  setzen und an geeigneter Stelle eine Lampe, deren Reflex durch  $B$  in das Auge  $A$  fällt. Diese Combination ist mit einigen Besonderheiten verwirklicht in dem Augenspiegel von ENGELHARDT.

Wenn man zur Beleuchtung den durchbohrten Hohlspiegel verwendet, so wird er dicht vor  $C$  so gehalten, dass er das reelle Bild einer grossen und hellen Lampenflamme gerade auf die Linse  $B$  wirft.

Füllt dies die ganze Linse  $B$  aus, so erscheint für den Standpunkt von  $A$  die ganze Linse  $B$  wie eine stark leuchtende Scheibe, welche also stets ein hinlänglich grosses Zerstreuungsbild auf der Netzhaut von  $A$  erleuchtet. Darin ist auch kaum etwas von einer Lücke, dem Loche des Spiegels entsprechend, wahrzunehmen. Davon kann man sich subjektiv leicht überzeugen, wenn man alles wie zur Beobachtung aufstellt und sein eigenes Auge an die Stelle von  $A$  bringt. Aber auch durch Konstruktion des Strahlenganges von der Lampenflamme zum Spiegel und durch die Linse ins Auge kann leicht gezeigt werden, dass keine störend wirkende Lücke in der Beleuchtung zu Stande kommt.

---