

Erster Abschnitt.

Die Dioptrik des Auges.

§ 9. Gesetze der Brechung in Systemen kugeliger Flächen.

Der Gang der Lichtstrahlen im menschlichen Auge wird hauptsächlich durch Brechung verändert. Es ist aber nicht bloß eine einzelne brechende Fläche vorhanden, sondern eine Reihe von solchen. Ich werde also die allgemeinen Gesetze der Lichtbrechung in einfach brechenden Mitteln und namentlich auch der Brechung in einer Reihe von gekrümmten Flächen, welche die Grundlage des vorliegenden Abschnitts bilden, vorausschicken.

An einer einzelnen brechenden Fläche ist die Lage des zurückgeworfenen und gebrochenen Strahls in folgender Weise bestimmt. In *Fig. 32* sei *ab* die Grenzfläche beider Medien, welche man die brechende Fläche nennt; *fc* sei einer der darauf fallenden Lichtstrahlen, *de* die im Punkte *c* auf *ab* senkrecht stehende Linie, welche man das Einfallslotth nennt, *ch* der zurückgeworfene und *cg* der gebrochene Strahl. Die Ebene, welche durch das Einfallslotth und den einfallenden Strahl zu legen ist, nennt man Einfallsebene, den Winkel zwischen dem einfallenden Strahle und dem Einfallslotthe den Einfallswinkel (in der Figur ist es der Winkel *d c f*, mit α bezeichnet), den Winkel zwischen dem Einfallslotthe und dem zurückgeworfenen Strahle den Reflexionswinkel $36'$ (in der Figur *h c d*) und denjenigen zwischen dem Einfallslotthe und dem gebrochenen Strahle (*g c e* oder β) den Brechungswinkel. Bei einfach brechenden Medien ist dann die Lage des zurückgeworfenen und gebrochenen Strahls dadurch gegeben, daß erstens beide in der Einfallsebene liegen, und daß zweitens der Reflexionswinkel gleich dem Einfallswinkel ist, der Brechungswinkel aber von dem Einfallswinkel in der Weise abhängt, daß ihre Sinus

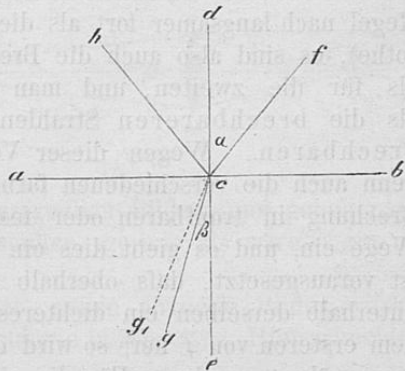


Fig. 32.

sich verhalten wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten des Lichts in den betreffenden beiden Medien. Das Verhältniß der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts im Vacuum zu der in einem gegebenen Mittel nennt man das Brechungsverhältniß, Brechungsvermögen oder den Brechungscoefficienten dieses Mittels. Ist also c die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im Vacuum, c_1 in dem ersten, c_2 in dem zweiten Mittel, n_1 das Brechungsverhältniß des ersten, n_2 das des zweiten Mittels, so ist

$$n_1 = \frac{c}{c_1}$$

$$n_2 = \frac{c}{c_2}$$

$$\frac{\sin \alpha}{c_1} = \frac{\sin \beta}{c_2} \text{ oder}$$

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta.$$

In der letzteren Form pflegt man gewöhnlich das Brechungsgesetz auszusprechen. Für das Vacuum ist das Brechungsverhältniß nach der gegebenen Definition = 1, für die Luft bei gewöhnlichem Drucke so wenig davon unterschieden (nämlich 1,00029 bei 0° und 760 mm Druck), daß man in den meisten Fällen den Unterschied vernachlässigen kann. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der verschiedenen einfachen farbigen Strahlen sind im Vacuum nicht, in den Gasarten sehr wenig, in den durchsichtigen tropfbaren und festen Körpern mehr von einander verschieden. In den letzteren pflanzen sich die Strahlen von kleinerer Schwingungsdauer (die blauen und violetten) der Regel nach langsamer fort als die von längerer Schwingungsdauer (gelbe und rothe), es sind also auch die Brechungsverhältnisse für die ersteren größer als für die zweiten, und man bezeichnet deshalb jene (die violetten) als die brechbareren Strahlen, letztere (die rothen) als die weniger brechbaren. Wegen dieser Verschiedenheit der Brechbarkeit schlagen denn auch die verschiedenen farbigen Theile des weißen Lichts nach einer Brechung in tropfbaren oder festen Körpern im Allgemeinen verschiedene Wege ein, und es giebt dies ein Mittel ab, sie zu trennen. In der *Fig. 32* ist vorausgesetzt, daß oberhalb der brechenden Fläche sich ein dünneres, unterhalb derselben ein dichteres Medium befinde. Kommt das Licht aus dem ersteren von f her, so wird der gebrochene Strahl eg dem Einfallslothe ce genähert werden. Für die violetten Strahlen ist die Ablenkung stärker als für die rothen. Wenn also die violetten etwa den Weg eg einschlagen, geht das rothe Licht des Strahls fc in der Richtung eg_1 fort, und trennt sich somit von den brechbareren Farben.

37 Im Auge haben wir es mit der Brechung des Lichts an kugeligen oder nahehin kugeligen Flächen zu thun. Die Gesetze der Brechung vereinfachen sich für eine jede solche Fläche außerordentlich, wenn das Licht nur unter sehr kleinen Einfallswinkeln, d. h. nahe senkrecht auf sie fällt. Sie vereinfachen sich auch für ein System solcher Flächen, wenn die Mittelpunkte

der Kugelflächen alle in einer geraden Linie, der Axe des Systems, liegen. Systeme von kugeligen Flächen, in denen diese letzte Bedingung erfüllt ist, nennt man centritt. Licht, welches ursprünglich von einem Punkte ausgegangen ist, oder allgemeiner, Licht, dessen Strahlen hinreichend verlängert alle durch einen Punkt gehen, d. h. homocentrisches Licht, wird, nachdem es durch ein solches System gegangen ist, und alle brechenden Flächen nur unter kleinen Einfallswinkeln getroffen hat, entweder wirklich sich in einen Punkt wieder vereinigen, oder doch so fortgehen, als käme es alles von einem leuchtenden Punkte her, also wieder homocentrisch sein. Den Convergenzpunkt der Lichtstrahlen nennt man in beiden Fällen das optische Bild des ursprünglich leuchtenden Punktes, oder da Lichtstrahlen, welche von dem Orte des Bildes rückwärts gingen, an der Stelle des ursprünglich leuchtenden Punktes wieder vereinigt werden würden, nennt man den Ort des leuchtenden Punktes und den seines Bildes auch conjugirte Vereinigungspunkte der Strahlen. Man nennt ferner das optische Bild reell, wenn die Lichtstrahlen, welche von dem leuchtenden Punkte ausgegangen sind, in ihm wirklich zur Vereinigung kommen. Dies kann nur geschehen, wenn das Bild hinter den brechenden Flächen liegt. Man nennt es virtuell, wenn der Vereinigungspunkt der Lichtstrahlen in ihren rückwärts gezogenen Verlängerungen vor der letzten brechenden Fläche liegt. Im letzteren Falle schneiden sich also nicht die Lichtstrahlen selbst, sondern nur ihre Verlängerungen.

Convexe Glaslinsen (Brenngläser oder Sammellinsen) geben von entfernten Gegenständen reelle Bilder, wie *Fig. 33* zeigt; cd ist die Linse, a der leuchtende Punkt, die einfallenden Lichtstrahlen ac und ad werden in die Richtungen cf und de gebrochen, vereinigen sich wirklich in dem Punkte b , dem Punkte des reellen Bildes, und gehen nach der Schneidung wieder divergirend auseinander, gerade als wäre b ein ursprünglich leuchtender Punkt.

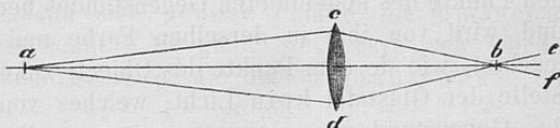


Fig. 33.

Concave Glaslinsen (Zerstreuungsgläser) geben virtuelle Bilder wie in *Fig. 34*, wo die Bezeichnungen dieselben sind wie in *Fig. 33*. Hier schneiden sich die Lichtstrahlen nicht wirklich, wohl aber ihre Verlängerungen in b , und gehen hinter der Linse weiter, als kämen sie von b , so daß ein hinter der Linse zwischen f und e stehendes Auge glauben würde, den leuchtenden Punkt in b zu sehen.

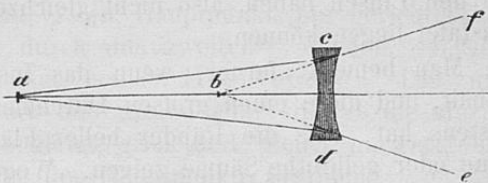


Fig. 34.

38

Wenn mehrere leuchtende Punkte in einer gegen die Axe des brechenden Systems senkrechten Fläche liegen, und der Axe nahe genug sind, daß ihre Strahlen auf sämtliche brechende Kugelflächen unter sehr kleinen Einfallswinkeln treffen, so liegen ihre reellen oder virtuellen Bilder auch alle in einer auf die optische Axe senkrechten Ebene, und ihre Vertheilung in dieser Ebene ist geometrisch ähnlich der Vertheilung der leuchtenden Punkte, und gehören die leuchtenden Punkte einem Objecte an, so ist das optische Bild dieses Objectes ihm selbst geometrisch ähnlich.

Ein Beispiel reeller Bilder von Objecten, welches zugleich den Verhältnissen des Auges sehr nahe entspricht, giebt unter den physikalischen Instrumenten die *Camera obscura*. Ein innen geschwärzter Kasten *A* enthält in seiner vorderen Wand eine verschiebbare Röhre, in welche eine oder mehrere Glaslinsen *l* eingesetzt sind. Die Rückseite des Kastens *g* besteht aus einer matten Glastafel. Wenn man die Gläser *l* gegen entfernte erleuchtete Objecte wendet, und die matte Tafel *g* beschattet, so sieht man auf ihr ein umgekehrtes, natürlich gefärbtes Bild der Objecte entworfen, welches auch bei einer richtigen

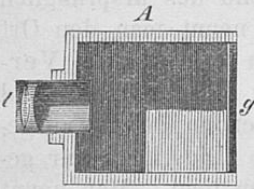


Fig. 35.

Stellung der Linsen *l* sehr scharf gezeichnet erscheint. Die Linsen müssen zu dem Ende so gewählt und gestellt sein, daß die Strahlen, welche von einem jeden einzelnen Punkte des abgebildeten Gegenstandes ausgegangen sind, sich in einem Punkte der mattgeschliffenen Glasfläche wieder vereinigen. Dam empfängt dieser Punkt der Glasfläche alles Licht, welches von dem entsprechenden Punkte des abgebildeten Gegenstandes her in das Instrument gefallen ist, und wird von ihm in derselben Farbe und entsprechender Helligkeit erleuchtet, wie sie dem Punkte des Objectes zukommen. Dagegen fällt auf diese Stelle der Glastafel kein Licht, welches von irgend einem anderen Punkte des Gegenstandes ausgegangen wäre, weil solches Licht eben in anderen Punkten der Tafel sich vereinigt.

Bei diesen Beobachtungen bemerkt man zunächst, daß die Bilder ungleich von dem Instrumente entfernter Gegenstände nicht gleichzeitig deutlich auf der matten Tafel entworfen werden, daß man vielmehr die Röhre mit den Linsen etwas herausziehen muß, um nähere Gegenstände abzubilden, für entferntere dagegen mehr hineinschieben. Der Grund davon ist der, daß die Bilder ungleich entfernter Punkte auch selbst verschiedene Entfernung von den Linsen haben, also nicht gleichzeitig genau in der Ebene der matten Glastafel liegen können.

Man bemerkt ferner, wenn das Instrument nur eine einfache Linse enthält, und diese einen großen Durchmesser im Verhältniß zur Länge des Kastens hat, daß die Ränder heller Flächen in dem Bilde farbige, meist blaue oder gelbrothe Säume zeigen. Wegen der verschiedenen Brechbarkeit des verschiedenfarbigen Lichts liegen die Vereinigungspunkte verschiedenfarbiger Strahlen nicht genau in derselben Entfernung hinter der Linse, und

die Bilder für die verschiedenen Farben decken sich nicht genau. Man nennt dies die chromatische Abweichung. Sie kann fast vollständig aufgehoben werden durch eine passende Verbindung von Linsen, die aus verschiedenem Stoffe bestehen. Dergleichen optische Instrumente, in welchen so die chromatische Abweichung beseitigt ist, nennt man achromatisch.

Aber auch bei der Beleuchtung mit einfarbigem Lichte zeigen die Bilder der *Camera obscura* und anderer optischer Instrumente mit brechenden Kugelflächen bei großen Öffnungen der Linsen eine gewisse Ungenauigkeit der Umrisse, welche daher entsteht, daß die durch eine kugelige Fläche gebrochenen Strahlen des abgebildeten Punktes zwar nahehin, aber doch nicht absolut genau in einen Punkt wieder vereinigt werden. Nur bei verschwindend kleinen Einfallswinkeln werden sie genau vereinigt. Diese zweite Art der Abweichung nennt man die sphärische oder die Abweichung wegen der Kugelgestalt. Instrumente, in denen sie durch passende Zusammenstellung der brechenden Flächen möglichst verringert ist, nennt man aplanatisch. Vollständige Aplanasie ist durch Kugelflächen im allgemeinen nicht zu erreichen, sondern dazu würde man andere gekrümmte Flächen und zwar Rotationsflächen des zweiten oder vierten Grades anwenden müssen, welche aber an optischen Instrumenten bisher noch nicht praktisch ausgeführt werden können.

Die Lage und GröÙe der optischen Bilder, welche centrirte Systeme von kugeligen brechenden Flächen entwerfen, sowie auch der Gang eines jeden durch sie hindurchgegangenen Lichtstrahls, der sämmtliche brechende Flächen unter sehr kleinen Einfallswinkeln passirt hat, ist nach verhältnißmäÙig einfachen Regeln zu bestimmen, wenn man gewisse Punkte, die optischen Cardinalpunkte des Systems kennt. Es giebt drei Paare von solchen Punkten, nämlich die beiden Brennpunkte, die beiden Hauptpunkte und die beiden Knotenpunkte.

Man nenne die Seite des Systems, von der das Licht herkommt, die erste, die, nach der es hinget, die zweite Seite, das Brechungsverhältniß des ersten Mittels sei n_1 , das des letzten n_2 .

Der erste Brennpunkt ist dadurch bestimmt, daß jeder Strahl, der vor der Brechung durch ihn geht, nach der Brechung parallel mit der Axe wird.

Der zweite Brennpunkt ist dadurch bestimmt, daß durch ihn jeder Strahl geht, der vor der Brechung parallel der Axe ist.

Der zweite Hauptpunkt ist das Bild des ersten, d. h. Strahlen, welche im ersten Mittel nach dem ersten Hauptpunkt hin gerichtet sind, gehen nach der letzten Brechung durch den zweiten. Ebenen, senkrecht zur Axe durch die Hauptpunkte gelegt, heißen Hauptebenen. Die zweite Hauptebene ist das optische Bild des ersten, und zwar sind es die einzigen zusammengehörigen Bilder, welche gleich groß und gleich gerichtet sind. Durch diese Bedingung ist die Lage der Hauptpunkte bestimmt.

Der zweite Knotenpunkt ist das Bild des ersten. Ein Strahl, der im ersten Medium nach dem ersten Knotenpunkte gerichtet ist, geht nach

der Brechung durch den zweiten Knotenpunkt, und die Richtungen des Strahls vor und nach der Brechung sind einander parallel.

Die Entfernung des ersten Hauptpunkts vom ersten Brennpunkte ist die erste Hauptbrennweite. Sie wird positiv gerechnet, wenn der erste Hauptpunkt im Sinne der Fortbewegung des Lichts hinter dem ersten Brennpunkte liegt. Ist also in *Fig. 36* *AB* die Axe, und *A* die Richtung,

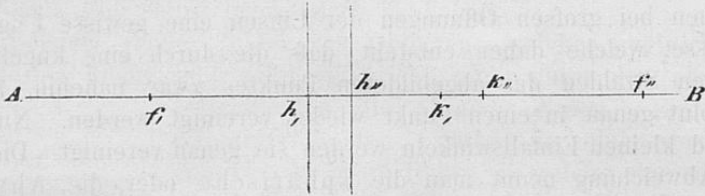


Fig. 36.

von welcher das Licht herkommt, f' der erste, f'' der zweite Brennpunkt, h' der erste, h'' der zweite Hauptpunkt, K' der erste, K'' der zweite Knotenpunkt, so ist f' , h' die positive erste Hauptbrennweite. Dagegen f'' , h'' , als die Entfernung des zweiten Brennpunkts vom zweiten Hauptpunkte, ist die zweite Hauptbrennweite, positiv gerechnet, wenn, wie in der Figur, der Brennpunkt hinter dem Hauptpunkte liegt.

Die Entfernung des ersten Knotenpunkts vom ersten Brennpunkte ist gleich der zweiten Hauptbrennweite, die des zweiten Knotenpunkts vom zweiten Brennpunkte gleich der ersten Hauptbrennweite. Also:

$$\left. \begin{aligned} f', K' &= \dots \dots \dots \alpha) \\ f', h' &= f'', K'' \end{aligned} \right\}$$

Daraus folgt, dafs der Abstand der gleichnamigen Haupt- und Knotenpunkte von einander gleich dem Unterschiede der beiden Brennweiten sei:

$$K', h' = K'', h'' = f'', h'' - f', h' \dots \dots \dots \beta)$$

und dafs auferdem der Abstand der beiden Hauptpunkte von einander gleich sei dem Abstände der beiden Knotenpunkte von einander:

$$h', h'' = K', K'' \dots \dots \dots \gamma)$$

Endlich verhalten sich die beiden Hauptbrennweiten zu einander wie die Brechungsverhältnisse des ersten und letzten Mittels:

$$\frac{f', h'}{n_1} = \frac{f'', h''}{n_2} \dots \dots \dots \delta)$$

Ist also das letzte Mittel dem ersten gleichartig und $n_1 = n_2$, wie es bei den meisten künstlichen optischen Instrumenten, nicht aber beim Auge der Fall ist, so sind die beiden Hauptbrennweiten gleich, und es fallen die gleichnamigen Hauptpunkte und Knotenpunkte zusammen, nach Gleichung β).

Die ersten Brenn-, Haupt- und Knotenpunkte beziehen sich nach den gegebenen Definitionen stets auf den Gang der Strahlen im ersten Medium, die zweiten auf den Gang im letzten Medium.

Legt man senkrecht zur Axe Ebenen durch die beiden Brennpunkte, so heißen diese Brennebenen. Lichtstrahlen, welche von einem Punkte der ersten Brennebene ausgegangen sind, sind nach der Brechung unter einander parallel, und da nach der Definition der Knotenpunkte der vom leuchtenden Punkte nach dem ersten Knotenpunkte gerichtete Strahl nach der Brechung seiner ursprünglichen Richtung parallel sein soll, so müssen alle Strahlen, die von einem leuchtenden Punkte in der ersten Brennebene ausgegangen sind, jenem Strahle nach der Brechung parallel sein.

Strahlen, welche im ersten Mittel unter einander parallel sind, vereinigen sich in einem Punkte der zweiten Brennebene, und da derjenige von den parallelen Strahlen, welcher durch den ersten Knotenpunkt geht, nach der Brechung vom zweiten Knotenpunkte aus seiner früheren Richtung parallel weiter geht, so muß der Vereinigungspunkt der parallelen Strahlen da liegen, wo dieser letztere Strahl die zweite Brennebene schneidet.

Diese Regeln genügen, um in jedem Falle, wenn der Weg eines Strahls im ersten Medium gegeben ist, seinen Weg nach der letzten Brechung zu finden, und wenn ein leuchtender Punkt im ersten Medium gegeben ist, den Ort seines Bildes nach der letzten Brechung zu finden.

Es sei bekannt der Weg eines Strahls im ersten Medium; man soll seinen Weg im letzten Medium suchen.

In *Fig. 37*, deren hier nicht angegebene Bezeichnungen mit denjenigen von *Fig. 36* übereinstimmen, sei *a* der Punkt, wo der Strahl die erste Brennebene schneidet, *b* der Punkt, wo er die erste Hauptebene schneidet, wobei im allgemeinen die beiden Punkte *a* und *b* nicht in einer Ebene mit der Axe des Systems *AB* liegen

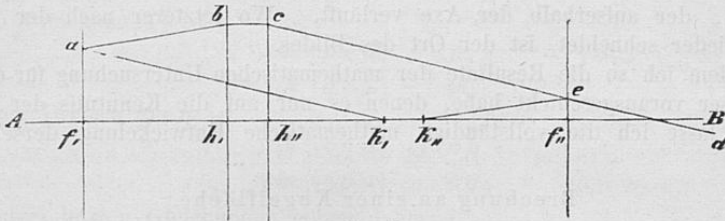


Fig. 37.

werden. Das Bild des Punktes *b* liegt in der zweiten Hauptebene, da die eine Hauptebene das Bild der anderen ist; und da ferner in diesem Falle das eine Bild dem anderen gleich und gleich gerichtet sein soll, so liegt das Bild des Punktes *b* der ersten Hauptebene in *c*, dem Fußpunkte des von *b* auf die zweite Hauptebene gefällten Lothes *bc*. Jeder Lichtstrahl, der von *b* ausgeht, oder durch *b* hindurchgeht, muß also nach der Brechung durch *e* gehen, als dem Bilde von *b*. So auch die Fortsetzung des Strahls *ab*.

Zweitens geht der Strahl *ab* durch den Punkt *a* der ersten Brennebene. Jeder Strahl, welcher von einem Punkte der ersten Brennebene ausgeht, ist nach den oben hingestellten Regeln nach der Brechung parallel dem Strahle, welcher von jenem Punkte *a* nach dem ersten Knotenpunkte geht. Also muß der Strahl *ab* nach der Brechung durch *e* gehen und parallel *aK'*, sein. Man ziehe *cd* parallel *aK'*, so ist *cd* der gebrochene Strahl.

Nach dem, was ich vorher über die Eigenschaft der zweiten Brennebene gesagt habe, können wir auch so verfahren. Man falle das Loth bc auf die zweite Hauptebene, ziehe $K,,e$ parallel ab , welches in e die zweite Brennebene schneidet, so ist ce der gebrochene Strahl. Dafs dieser mit cd zusammenfällt, läßt sich leicht zeigen.

42 Es sei a Fig. 38 ein leuchtender Punkt; es soll sein Bild gefunden werden.

Man braucht nur zwei Strahlen von a aus nach der ersten Hauptebene zu ziehen, und deren Weg nach der Brechung zu construiren. Wo sie sich schneiden,

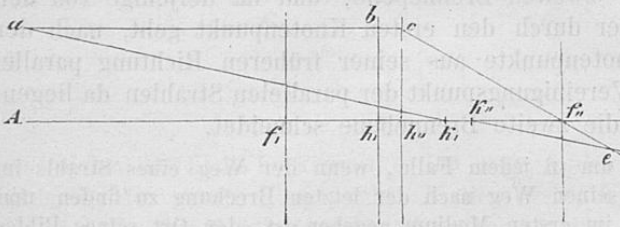


Fig. 38.

liegt das Bild von a . Wenn a auferhalb der Axe liegt, ist es am bequemsten, den mit der Axe parallelen Strahl ac und den nach dem ersten Knotenpunkte gehenden aK , zu benutzen. Wenn c der Punkt ist, wo der erstere Strahl die zweite

Hauptebene schneidet, so ziehe man cf'' , und verlängere es rückwärts oder vorwärts hinreichend, bis es die durch $K,,$ mit aK , gelegte Parallele in e schneidet. Der Ort des Bildes ist e .

Dafs der Strahl ac nach der Brechung längs ce und aK , längs $K,,e$ geht,

ergiebt sich leicht aus der vorigen Aufgabe und den obigen Definitionen. Liegt der Punkt a in der Axe, so geht einer seiner Strahlen in der Axe selbst ungebrochen fort. Man braucht dann nur irgend einen anderen Strahl zu construiren, der auferhalb der Axe verläuft. Wo letzterer nach der Brechung die Axe wieder schneidet, ist der Ort des Bildes.

Nachdem ich so die Resultate der mathematischen Untersuchung für diejenigen meiner Leser vorausgeschickt habe, denen es nur auf die Kenntniß der Resultate ankommt, lasse ich die vollständige mathematische Entwicklung derselben hier folgen.

Brechung an einer Kugelfläche.

Es sei a der Mittelpunkt der Kugelfläche cb , und p ein auferhalb der Kugel liegender leuchtender Punkt. Ein von p ausgehender Lichtstrahl, welcher in der

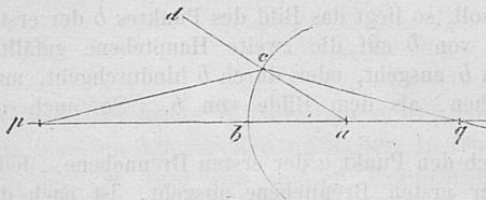


Fig. 39.

geraden Linie pa auf den Mittelpunkt der Kugel zugeht, trifft die Kugelfläche normal, und geht deshalb ungebrochen weiter in der Verlängerung von ap nach q hin. Ein anderer Lichtstrahl pc treffe die Kugelfläche in c und werde hier gebrochen. Unsere nächste Aufgabe ist, seinen Weg nach der Brechung zu bestimmen.

Nach dem oben angeführten Brechungsgesetze muß derselbe zunächst in der Einfallsebene bleiben, d. h. in der durch den einfallenden Strahl und das Einfallslot

gelegten Ebene. Da der Radius stets auf demjenigen Theile der Kugeloberfläche, zu welchem er hingehet, senkrecht steht, so ist in diesem Falle das Einfallslot cd die Verlängerung des Radius ac , und die Einfallsebene die durch pc und ad gelegte. In derselben liegt auch die ganze Linie pq , da zwei ihrer Punkte p und a darin liegen. Der gebrochene Strahl muß also die Linie pa , wenn sie nach beiden Seiten in das Unendliche verlängert gedacht wird, in irgend einem Punkte q schneiden, dessen Entfernung von b zunächst bestimmt werden soll. Sollte der Strahl der Linie pa parallel sein, so können wir den Durchschnittpunkt q als unendlich entfernt betrachten.

Die Lage des Punktes q wird nun durch die Bedingung gegeben, daß

$$n_1 \cdot \sin(pcd) = n_2 \cdot \sin(qca), \dots \dots \dots 1)$$

wo n_1 das Brechungsverhältniß des Mediums ist, aus welchem das Licht kommt, n_2 desjenigen, in welches es eintritt.

Da sich in geradlinigen Dreiecken die Sinus der Winkel wie die gegenüberliegenden Seiten verhalten, ist in dem Dreiecke apc

$$\frac{\sin(pca)}{\sin(cpa)} = \frac{ap}{ac},$$

und in dem Dreiecke aqc

$$\frac{\sin(qca)}{\sin(cqa)} = \frac{aq}{ac}.$$

43

Wenn wir die erste dieser Gleichungen durch die zweite dividiren, und dabei bemerken, daß der Sinus des Winkes pca gleich dem seines Nebenwinkels pcd ist, so erhalten wir

$$\frac{\sin(pcd)}{\sin(qca)} \cdot \frac{\sin(cqa)}{\sin(cpa)} = \frac{ap}{aq}.$$

Nach Gleichung 1) ist

$$\frac{\sin(pcd)}{\sin(qca)} = \frac{n_2}{n_1}$$

und in dem Dreieck pcq ist

$$\frac{\sin(cqa)}{\sin(cpa)} = \frac{cp}{cq}.$$

Die drei letzten Gleichungen geben daher

$$\frac{n_2 \cdot cp}{n_1 \cdot cq} = \frac{ap}{aq} \dots \dots \dots 2).$$

Für $ap = \infty$ wird daraus

$$n_1 \cdot cq = n_2 \cdot aq, \dots \dots \dots 2a),$$

da alsdann bis auf unendlich kleine Größen

$$\frac{cp}{ap} = 1.$$

Man kann die Gleichung 2) leicht benutzen, um den Gang der Lichtstrahlen durch Construction zu finden, wobei man denn, da im Allgemeinen der Punkt q seine Lage ändert, wenn dem Punkte c eine andere Lage gegeben wird, findet, daß die Lichtstrahlen sich nicht genau in einem Punkte, sondern in einer krummen Linie (kaustischen Linie) schneiden, von der Art, wie sie in *Fig. 40* für

parallel auffallende Strahlen dargestellt ist. BB ist hier

die brechende Kugel-
fläche, C sind die ein-
fallenden Strahlen,
 GFG die kaustische
Linie, welche durch
die Durchschnit-
tpunkte je zweier zu-
nächst auf einander
folgender gebrochener
Strahlen gebildet wird.
Die mittelsten Strahlen
vereinigen sich in der
Spitze dieser Linie
bei F .

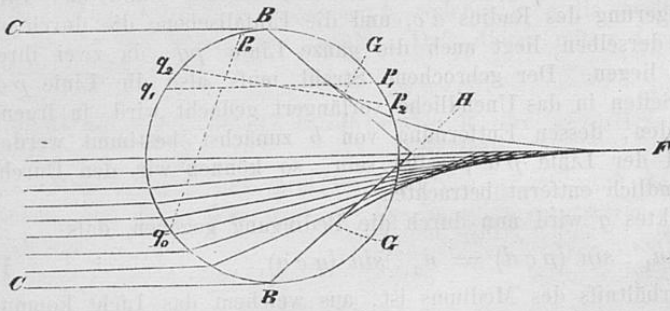


Fig. 40.

Beschränkung auf die mittleren Strahlen.

Bis hierher sind die entwickelten Gleichungen streng richtig. Von hier ab wollen wir uns auf diejenigen Strahlen beschränken, welche nahe senkrecht auf die brechende Fläche, also sehr nahe der Achse auf sie fallen. Dann sehen wir aus der Fig. 39, dafs, wenn der Punkt c sehr nahe an b rückt, das Verhältnis

$\frac{cp}{cq}$ übergeht in $\frac{bp}{bq}$. Die Gleichung 2) wird dann also

$$\frac{n_2 \cdot bp}{n_1 \cdot bq} = \frac{ap}{aq} \dots \dots \dots 2b).$$

44 Bezeichnen wir den Radius ab der brechenden Fläche mit r , die Entfernung

- bp mit f_1 ,
- bq mit f_2 ,
- ap mit g_1 ,
- aq mit g_2 ,

so dafs also

$$\left. \begin{aligned} f_1 + r &= g_1 \\ f_2 &= g_2 + r \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 2c).$$

so wird die Gleichung 2b)

$$\frac{n_2 \cdot f_1}{n_1 \cdot f_2} = \frac{f_1 + r}{f_2 - r} \text{ oder}$$

$$\frac{n_2 \cdot (g_1 - r)}{n_1 \cdot (g_2 + r)} = \frac{g_1}{g_2}$$

Daraus erhält man durch eine leichte Umformung:

$$\left. \begin{aligned} \frac{n_1}{f_1} + \frac{n_2}{f_2} &= \frac{n_2 - n_1}{r}, \text{ oder} \\ \frac{n_2}{g_1} + \frac{n_1}{g_2} &= \frac{n_2 - n_1}{r}, \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 3).$$

aus denen die gesuchte Gröfse f_2 oder g_2 zu bestimmen ist.

Nennen wir die Werthe von f_2 und g_2 , welche einer unendlichen Entfernung des leuchtenden Punkts entsprechen, beziehlich F_2 und G_2 , so erhalten wir, da $f_1 = \infty$ und $g_1 = \infty$,

$$\left. \begin{aligned} F_2 &= \frac{n_2 \cdot r}{n_2 - n_1} \\ G_2 &= \frac{n_1 \cdot r}{n_2 - n_1} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 3a).$$

F_2 ist nach der oben gegebenen Definition die zweite Hauptbrennweite.

Setzen wir f_2 und g_2 unendlich groß, und bezeichnen für diesen Fall f_1 und g_1 mit F_1 und G_1 , so ist

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \frac{n_1 \cdot r}{n_2 - n_1} = G_2, \\ G_1 &= \frac{n_2 \cdot r}{n_2 - n_1} = F_2. \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 3b)$$

F_1 ist die erste Hauptbrennweite.

Jetzt können wir den Gleichungen 3) die einfache Form geben

$$\left. \begin{aligned} \frac{F_1}{f_1} + \frac{F_2}{f_2} &= 1, \\ \frac{G_1}{g_1} + \frac{G_2}{g_2} &= 1. \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 3c).$$

Die erste dieser Gleichungen giebt, nach f_1 und nach f_2 aufgelöst, folgende Formeln zur Berechnung dieser Größen:

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= \frac{F_1 \cdot f_2}{f_2 - F_2} \\ f_2 &= \frac{F_2 \cdot f_1}{f_1 - F_1} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 3d).$$

Findet man negative Werthe dieser Größen, so bedeutet es, daß sie auf ⁴⁵ der entgegengesetzten Seite der brechenden Fläche liegen, als in *Fig. 39* angenommen ist.

Bemerkungen. 1) Wenn das Licht nicht von p im ersten Medium, sondern von q im zweiten ausgeht, wird für den Strahl cq *Fig. 39*, der vorher der gebrochene Strahl, jetzt der einfallende ist, cp der zugehörige gebrochene sein, welcher vorher der einfallende war. Sind also die nahe senkrecht von p auf die brechenden Flächen fallenden Strahlen in q vereinigt, so werden die von q nahe senkrecht auffallenden in p vereinigt werden. Daraus ergeben sich nun gleich die Formeln für den Fall, daß die Lichtstrahlen auf die concave Seite der Kugel- fläche fallen. Man braucht nur das erste Medium jetzt das zweite zu nennen und umgekehrt, und dem entsprechend alle Indices der Buchstaben zu vertauschen. Die Grundgleichungen 3) werden alsdann

$$\frac{n_2}{f_2} + \frac{n_1}{f_1} = \frac{n_1 - n_2}{r}$$

$$\frac{n_1}{g_2} + \frac{n_2}{g_1} = \frac{n_1 - n_2}{r}$$

Man braucht also für eine concave brechende Fläche nur den Krümmungsradius r negativ zu setzen, so gilt auch für sie die Formel 3), und natürlich gelten eben so auch die daraus abgeleiteten 3 a), 3 b), 3 c) und 3 d).

2) Wenn q das Bild von p ist, ist auch p das Bild von q . Um diese gemeinsame Beziehung auszudrücken, nennt man sie conjugirte Vereinigungspunkte, wobei man es zweifelhaft läßt, von welchem beider Punkte das Licht ausgeht. Ebenso ist es für die Brechungsgesetze einerlei, ob der Licht aussendende Punkt ein materieller, Licht erzeugender oder auffallendes Licht zerstreuer Punkt sei, oder nur der Vereinigungspunkt von gebrochenen Strahlen. Daher kann der leuchtende Punkt auch ein virtueller Vereinigungspunkt solcher Strahlen sein, und in der Verlängerung der Strahlen hinter der brechenden Fläche liegen.

3) Wenn r unendlich groß, d. h. die brechende Fläche eben wird, so werden nach 3 a) auch die Brennweiten unendlich groß, und die erste der Gleichungen 3) verwandelt sich in

$$\frac{n_1}{f_1} + \frac{n_2}{f_2} = 0$$

oder

$$f_2 = - \frac{n_2}{n_1} \cdot f_1 \dots \dots \dots 3e).$$

Das Bild liegt also auf derselben Seite von der brechenden Fläche, wie der Gegenstand, aber in einer anderen Entfernung.

Die Änderung der Divergenz der Strahlen.

Für die Änderung der Divergenz eines engen von einer kugeligen Fläche gebrochenen oder auch gespiegelten Strahlenbündels bei nahezu senkrechter Incidenz läßt sich ein wichtiges allgemeines Gesetz angeben, welches eigentlich am vollständigsten und zugleich am anschaulichsten das Wesen dieses Vorgangs bezeichnet. Da es bei der Spiegelung am einfachsten hervortritt, und wir im Folgenden auf die Reflexion an gekrümmten Flächen vielfach Rücksicht nehmen müssen, so will ich das Divergenzgesetz zunächst für Kugelspiegel erörtern.

Es sei aa_1 Fig. 41 eine convexe spiegelnde Fläche und o ihr Mittelpunkt.

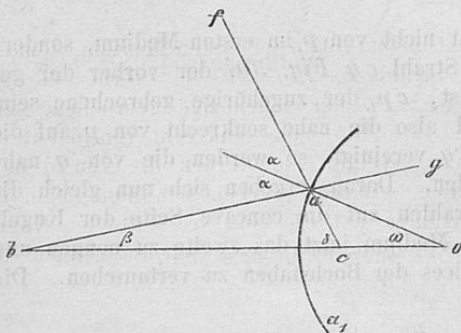


Fig. 41.

Der leuchtende Punkt b werde durch die Gerade bo mit dem Mittelpunkte der Kugel verbunden. Ein zweiter Strahl ba treffe bei a die spiegelnde Fläche. Das Einfallslot ist in diesem Falle der verlängerte Radius oa ; Einfallswinkel und Reflexionswinkel, welche beide einander gleich sind, sind beide mit α bezeichnet. Da der gespiegelte Strahl in derselben Ebene, wie ba und oa , d. h. in der Ebene der Zeichnung liegen muß, so wird er passend verlängert die Linie bo schneiden müssen; der Schnittpunkt sei c . Alsdann ist der Einfallswinkel

Außenwinkel zu dem Dreieck $ab o$, folglich gleich der Summe der beiden innern gegenüberliegenden Winkel:

$$\alpha = \beta + \omega.$$

Der Reflexionswinkel α dagegen ist als Scheitelwinkel gleich dem Winkel cao in dem gleichnamigen Dreieck, und bildet in diesem mit dem Winkel ω das Paar der inneren gegenüberliegenden Winkel zum Winkel γ . Also

$$\gamma = \alpha + \omega.$$

Addire ich beide Gleichungen, so hebt sich α fort, und es bleibt

$$\gamma - \beta = 2\omega \dots \dots \dots 4)$$

Nun ist γ der Winkel, um den der Strahl von der Axe bo divergirt nach der Spiegelung, β derselbe vorher. Es ist also die Divergenz des Strahls gegen die Axe durch die Spiegelung um 2ω vermehrt worden, d. h. um die doppelte Divergenz des nach dem Einfallspunkt gerichteten Radius der Kugelfläche.

Diese Vermehrung der Divergenz ist nicht abhängig von der Entfernung, in der der leuchtende Punkt von der Kugelfläche liegt; sie würde auch dieselbe sein für alle anderen Strahlen, welche einen auf die spiegelnde Fläche gezeichneten Kreis treffen, dessen Punkte alle dieselbe Entfernung wie a von der Axe haben. Wenn wir uns also die Ausdehnung der spiegelnden Fläche durch einen kreisförmigen Rand begrenzt denken, so würde der obige Satz für die Divergenzvermehrung der Randstrahlen eines beliebigen in der Axe liegenden leuchtenden Punktes gelten.

Käme das Licht von f in der Richtung fa und würde nach ab reflectirt, so wäre es in beiden Fällen convergent zur Axe und diese Convergenz würde vermindert. Betrachten wir Convergenz als negative Divergenz, so wird auch in diesem Falle die Divergenz durch die Spiegelung gröfser, und zwar um 2ω .

Dieselbe Kugelfläche könnte auch auf der andern Seite spiegeln, dann müfsten die Verlängerungen der bisher betrachteten Strahlen für diese eintreten. Das Licht könnte von c nach a gehen und nach g zurückgeworfen werden; γ wäre der Divergenzwinkel vor, β nach der Spiegelung. Die Divergenz wäre um 2ω durch die Spiegelung verringert. Ginge das Licht von g nach a und c , so hätten wir convergentes Licht, dessen Convergenz um 2ω vermehrt wird.

Concavspiegel also vermindern die Divergenz der Strahlen um 2ω , Convexspiegel vermehren sie um ebenso viel. Jene heifsen deshalb auch Sammelspiegel, letztere Zerstreungsspiegel.

Entsprechende Sätze lassen sich auch für enge Strahlenbündel aufstellen, die von kugeligen brechenden Flächen unter kleinen Einfallswinkeln gebrochen werden, welche letztere Beschränkung bei den Kugelspiegeln nicht nöthig ist.

In *Fig. 39* ist $\angle cpb$ der Divergenzwinkel der einfallenden Strahlen, und mag als solcher kurzweg mit p bezeichnet werden. cqb ist der Convergenzwinkel der gebrochenen Strahlen und heifse dem entsprechend $(-q)$; cab ist der Winkel am Mittelpunkt der brechenden Kugel, und heifse ω . Dann ist der Einfallswinkel:

$$dcp = p + \omega;$$

der Brechungswinkel

$$acq = \omega - (-q) = \omega + q;$$

und nach dem Brechungsgesetz

$$n_1 \cdot \sin(p + \omega) = n_2 \cdot \sin(q + \omega),$$

oder wenn wir die Sinus der Summen auflösen:

$$\cos \omega [n_1 \cdot \sin p - n_2 \cdot \sin q] = \sin \omega [n_2 \cdot \cos q - n_1 \cdot \cos p].$$

Wenn diese Winkel sehr klein sind, können wir ihre Cosinus gleich 1, ihre Sinus gleich dem Bogen setzen, und erhalten

$$n_1 \cdot p - n_2 \cdot q = (n_2 - n_1) \cdot \omega \dots \dots \dots 4a)$$

Das Product der Divergenzwinkel mit dem Brechungsverhältniß des Medium, in welchem der Strahl verläuft, können wir die optische Divergenz der Strahlen nennen. Diese wird bei der Brechung verändert um eine Größe $(n_2 - n_1) \cdot \omega$, welche unabhängig von der Entfernung des leuchtenden Punktes ist.

Die optische Divergenz der Strahlen wird vermindert, wenn das stärker brechende Medium an der concaven Seite der Kugelfläche liegt; sie wird vergrößert im entgegengesetzten Falle. Erstere Flächen sind sammelnde, collective, letztere zerstreuende, dispersive. Man erkennt das leicht, wenn man die Strahlen der *Fig. 39* vorwärts und rückwärts gehen läßt, beziehlich $n_2 < n_1$ annimmt.

Fällt man in beiden Fällen vom Einfallspunkt an der Kugelfläche ein Loth auf die Axe, welches mit ρ bezeichnet werde, und nennt die Entfernungen seines Fußpunkts vom leuchtenden Punkte f_1 , von seinem Bilde f_2 , und rechnet beide Größen bei Linsen, wie bei Spiegeln als positiv, wenn das Licht erst den Objectpunkt passiert, dann die Kugelfläche, dann das Bild: so kann der Divergenzwinkel der einfallenden Strahlen, wenn er sehr klein ist, durch seine Tangente $\frac{\rho}{f_1}$ ersetzt

werden, der Convergenzwinkel der abgelenkten Strahlen durch $\frac{\rho}{f_2}$, der Winkel ω durch $\frac{\rho}{r}$. Zugleich rückt bei Verkleinerung des Winkels ω der Fußpunkt des

Lothes immer näher der Kugelfläche, so daß f_1 und f_2 die Entfernungen von Object und Bild von der Kugelfläche werden. Dann giebt Gleichung 4) für spiegelnde Kugelflächen unmittelbar

$$\frac{\rho}{f_1} + \frac{\rho}{f_2} = \frac{2\rho}{r},$$

oder

$$\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{2}{r};$$

und Gleichung 4a) ergibt das Gesetz der Gleichung 3)

$$\frac{n_1}{f_1} + \frac{n_2}{f_2} = \frac{n_2 - n_1}{r} \dots \dots \dots 5)$$

Man kann also das Gesetz der Bildabstände unmittelbar aus dem Divergenzgesetz herleiten.

Für ebene Flächen wird $\omega = 0$, also die optische Divergenz der Strahlen, durch Brechung und Spiegelung nicht geändert.

Abbildung flächenhafter Objecte durch eine brechende Kugelfläche.

Wenn seitwärts von dem leuchtenden Punkte in gleicher Entfernung von der brechenden Kugelfläche und ihrem Mittelpunkte a ein zweiter leuchtender Punkt s liegt, dessen Strahlen ebenfalls nur unter kleinen

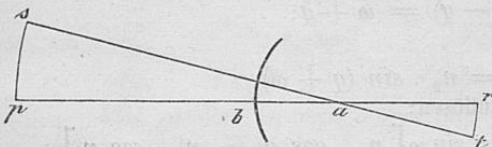


Fig. 42.

Einfallswinkeln auf die Kugelfläche fallen, so wird dieser ein Bild ebenfalls in gleicher Entfernung hinter der Kugel und ihrem Mittelpunkte haben. Sind viele leuchtende Punkte s vorhanden, die alle diesen Bedingungen entsprechen, so werden sie alle, da sie gleiche Entfernung von a haben, in einer mit der brechenden Fläche concentrischen Kugelfläche liegen. Das gleiche gilt von ihren Bildern t . Für jeden Punkt s der einen Kugelfläche findet man den Ort des Bildes t dann, indem man von s aus eine Gerade bis zum Krümmungsmittelpunkt a zieht, und diese verlängert, bis sie die Kugelfläche der Bilder in t schneidet. Dann ist t das Bild von s . Daraus geht hervor, daß ein solches Bild seinem Objecte geometrisch ähnlich ist.

Das Größenverhältniß zwischen Object und Bild ergibt sich hierbei:

$$\frac{ps}{rt} = \frac{pa}{ar} = \frac{g_1}{g_2}$$

Bezeichnen wir die Größe des Objectes $ps = \beta_1$, und die des Bildes mit $-\beta_2$, weil es umgekehrt ist, so ist demnach

$$-\frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{g_1}{g_2} \dots \dots \dots 6)$$

Die Bedingung, daß alle Strahlen, welche von einem der leuchtenden Punkte s auf die brechende Kugelfläche fallen, dies nur unter sehr kleinen Einfallswinkeln thun dürfen, beschränkt übrigens den deutlich abzubildenden Theil des Objectes sp auf einen sehr kleinen Theil der betreffenden Kugelfläche, welcher Theil sich nicht merklich von einer in p senkrecht zu pa errichteten, und daher die Kugelfläche ps tangirenden Ebene unterscheidet. Dasselbe gilt von der entsprechenden Fläche des Bildes rt . Man kann also von der Krümmung der beiden kleinen Kugelstücke absehen, und Object, wie Bild, als gelegen in zwei sehr kleinen zur Axe senkrechten ebenen Flächen betrachten.

Aus Gleichung 6) ergibt sich in Verbindung mit 2 c), 3 a), 3 b) und 3 c)

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{G_2}{G_1 - g_1} = \frac{G_2 - g_2}{G_1} \dots \dots \dots 6 a)$$

oder

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{F_1}{F_1 - f_1} = \frac{F_2 - f_2}{F_2} \dots \dots \dots 6 b)$$

Wenn die brechende Fläche eben ist, werden die Brennweiten unendlich groß, und die Gleichung 6 b) verwandelt sich in

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = 1 \dots \dots \dots 6 c)$$

Das Bild, welches eine ebene brechende Fläche entwirft, ist also so groß wie sein Object.

Brennpunkte, Hauptpunkte und Knotenpunkte der einfachen brechenden Fläche.

Die Brennpunkte sind diejenigen Punkte, in denen sich Strahlen vereinigen, die im ersten oder zweiten Mittel parallel der Axe verlaufen. Die Entfernungen der beiden Brennpunkte F_1 und F_2 von dem Scheitel der brechenden Fläche, und G_1 und G_2 von deren Mittelpunkte sind schon oben in den Gleichungen 3 a) und 3 b) 48 gefunden, und dadurch ist die Lage der Brennpunkte bestimmt.

Die Brennebenen sind senkrecht durch die Brennpunkte gelegene Ebenen. Da das Bild jedes Brennpunktes in unendlicher Entfernung liegt, so muß dasselbe auch für solche Punkte der Brennebenen der Fall sein, welche der Axe nahe genug sind, um regelmäßige Bilder geben zu können. Strahlen, die von einem Punkte einer Brennebene ausgehen, werden also nach der Brechung parallel sein.

Die Hauptpunkte und die durch sie senkrecht zur Axe gelegten Hauptebenen sind dadurch charakterisirt, daß Bilder in den Hauptebenen liegend gleich gerichtet und gleich groß seien. Für die Hauptebenen muß also $\beta_1 = \beta_2$ sein. Das kann nach den Gleichungen 6 b) nur der Fall sein, wenn $f_1 = 0$ und $f_2 = 0$, was laut der Gleichungen 3 d) stets gleichzeitig der Fall sein muß. Beide Hauptpunkte fallen also in unserem Falle zusammen in dem Punkt, wo die Axe die brechende Fläche schneidet, und dieser Hauptpunkt ist sein eigenes Bild.

Die Knotenpunkte sind dadurch definirt, daß jeder Strahl, der vor der Brechung durch den ersten geht, nach der Brechung durch den zweiten geht, und dabei seiner ersten Richtung parallel bleibt. Auch diese beiden fallen in einen Punkt, nämlich den Mittelpunkt der Kugel zusammen. Denn ein Strahl, der im ersten Mittel auf den Mittelpunkt der Kugel zugeht, geht ungebrochen durch die Fläche, geht also auch im zweiten Mittel durch den Mittelpunkt, und ist seiner früheren Richtung parallel.

Die Constructionen der Richtung der Strahlen, welche S. 58 und 59 aus den Definitionen der genannten Ebenen und Punkte hergeleitet sind, lassen sich also auch auf eine einzelne brechende Fläche anwenden, und die Constructionen vereinfachen sich noch dadurch, daß erstens jeder Punkt in der ersten Hauptebene sein eigenes Bild ist, und man nicht erst den zugehörigen in der zweiten Hauptebene zu suchen hat, und zweitens dadurch, daß der nach dem ersten Knotenpunkte gehende Strahl unmittelbar in seiner eigenen Verlängerung weiter geht und man nicht erst eine Parallele mit ihm durch den zweiten Knotenpunkt zu legen hat.

Verallgemeinerung des Gesetzes für die Abstände der Bilder.

Wir haben unter 3 c) zwei Gleichungen ganz ähnlicher Form aufgestellt, bei denen aber die Entfernungen der Bilder von verschiedenen Punkten aus gemessen waren. Gleichungen von derselben einfachen Form erhalten wir immer, wenn wir die Entfernungen der Vereinigungspunkte, welche dem ersten Mittel angehören,

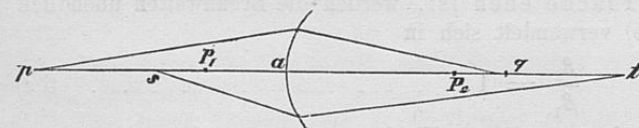


Fig. 43.

von einem beliebigen Punkte *s* Fig. 43 der Centrallinie *ap* abmessen, und von dem Bilde *t* dieses Punktes aus die Entfernungen der Vereinigungspunkte, die dem zweiten Mittel angehören.

Ist also *t* das Bild von *s*, *q* das Bild von *p*, P_1 der erste, P_2 der zweite Hauptbrennpunkt, und bezeichnen wir

$$\begin{array}{ll} sa \text{ mit } f_1, & P_1 a \text{ mit } F_1, \\ ta \text{ mit } f_2, & P_2 a \text{ mit } F_2, \\ pa \text{ mit } \varphi_1, & \\ qa \text{ mit } \varphi_2, & \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} p s \text{ mit } h_1, & q t \text{ mit } -h_2, \\ P_1 s \text{ mit } -H_1, & t P_2 \text{ mit } -H_2, \end{array}$$

so ist

$$\begin{array}{l} \alpha) \quad \frac{F_1}{f_1} + \frac{F_2}{f_2} = 1 \\ \beta) \quad \frac{F_1}{g_1} + \frac{F_2}{g_2} = 1 \\ \gamma) \quad g_1 - f_1 = h_1, \\ \delta) \quad g_2 - f_2 = h_2, \\ \epsilon) \quad F_1 - f_1 = H_1, \\ \zeta) \quad F_2 - f_2 = H_2. \end{array}$$

Setzt man aus $\gamma)$ und $\delta)$ die Werthe von g_1 und g_2 in $\beta)$, so erhält man

$$\frac{F_1}{h_1 + f_1} + \frac{F_2}{h_2 + f_2} = 1, \text{ oder}$$

$$F_1 \cdot (h_2 + f_2) + F_2 \cdot (h_1 + f_1) = (h_1 + f_1) \cdot (h_2 + f_2).$$

Subtrahirt man hiervon die aus $\alpha)$ abzuleitende Gleichung

$$F_1 \cdot f_2 + F_2 \cdot f_1 = f_1 \cdot f_2,$$

so erhält man als Rest

$$\begin{array}{l} F_1 \cdot h_2 + F_2 \cdot h_1 = h_1 \cdot h_2 + h_1 \cdot f_2 + h_2 \cdot f_1, \text{ oder} \\ (F_1 - f_1) \cdot h_2 + (F_2 - f_2) \cdot h_1 = h_1 \cdot h_2, \end{array}$$

was vermöge der Gleichungen $\epsilon)$ und $\zeta)$ sich verwandelt in

$$H_1 \cdot h_2 + H_2 \cdot h_1 = h_1 \cdot h_2, \text{ oder}$$

$$\frac{H_1}{h_1} + \frac{H_2}{h_2} = 1 \dots \dots \dots 7).$$

Wenn man also als Ausgangspunkte für die Messung der Abstände irgend ein Paar zusammengehöriger Vereinigungspunkte von Lichtstrahlen benutzt, kommt man immer wieder zu derselben einfachen Formel zurück. Da in der brechenden Fläche selbst und in ihrem Mittelpunkte der leuchtende Punkt mit seinem Gegenstande zusammenfällt, sind diese beiden Punkte ihre eigenen Bilder und die Formeln 3c) bilden deshalb nur spezielle Fälle von 7).

Abstände der Bilder von den Brennpunkten.

Wenn man den Punkt s in den ersten Brennpunkt verlegt, wird die Gleichung 7) unbrauchbar, weil H_2 und h_2 unendlich groß werden. Man findet aber die entsprechende Gleichung leicht aus der ersten der Gleichungen 3d):

$$f_1 = \frac{F_1 \cdot f_2}{f_2 - F_2}.$$

Zieht man von beiden Seiten F_1 ab, so erhält man:

$$f_1 - F_1 = \frac{F_1 \cdot F_2}{f_2 - F_2} \dots \dots \dots 7a).$$

Setzen wir hier $f_1 - F_1 = l_1$; und $f_2 - F_2 = l_2$, wobei l_1 die Entfernung des leuchtenden Punktes vom ersten Brennpunkte aus nach vorn gerechnet, l_2 die Entfernung seines Bildes vom zweiten Brennpunkte aus nach hinten sein würde: so erhalten wir die einfachste Form, in der sich das Gesetz für die Lage der Bilder darstellen läßt:

$$l_1 \cdot l_2 = F_1 \cdot F_2 \dots \dots \dots \quad 7b).$$

In derselben Bezeichnungsweise wird das Gesetz für die Gröfse der Bilder, die Gleichung 6b)

$$\left. \begin{aligned} \frac{\beta_1}{\beta_2} &= - \frac{l_1}{F_1} \text{ oder} \\ \frac{\beta_2}{\beta_1} &= - \frac{l_2}{F_2} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots \quad 7c).$$

n Diese Formeln 7c) sind bei weitem die einfachsten und übersichtlichsten, in denen die Gesetze der optischen Bilder ausgedrückt werden können. Wir werden im Folgenden sehen, daß sie gleichzeitig ganz allgemein für beliebig zusammengesetzte Systeme von centrirten, brechenden und spiegelnden Kugelflächen gelten. Man sieht daraus unmittelbar, daß Bilder collectiver Flächen umgekehrt sind, wenn das Object vor dem ersten Brennpunkt, das Bild also hinter dem zweiten liegt.

Dagegen ist das Bild collectiver Flächen aufrecht, wenn ihr Object hinter dem ersten Brennpunkt liegt, ihr Bild also vor dem zweiten.

Bei dispersiven Flächen verhält sich dies Alles umgekehrt.

Beziehung zwischen der Gröfse der Bilder und optischen Neigung der Strahlen.

50 Es sei in Fig. 44 pq die Axe, sp ein Objekt und qr sein Bild. Wir wollen die Winkel α_1 und α_2 bestimmen, welche einer der von p ausgehenden Strahlen pc

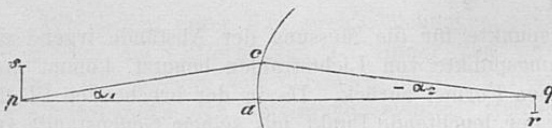


Fig. 44.

vor und nach der Brechung mit der Axe macht, und diese Winkel positiv rechnen, wenn der Strahl sich in Richtung der als positiv gerechneten Bilder von der Axe entfernt. Es ist also $\angle cpa = \alpha_1$, $\angle cqa = -\alpha_2$. Es sei ferner, wie bisher, $sp = \beta_1$, $qr = -\beta_2$, $ap = f_1$,

$aq = f_2$. Da die Einfallswinkel der Strahlen an der brechenden Fläche immer sehr klein bleiben sollen, muß ca ein sehr kleiner Bogen sein, den wir annähernd als eine gegen die Axe senkrechte gerade Linie betrachten können. Wir können also setzen

$$\begin{aligned} ac &= f_1 \cdot \text{tg } \alpha_1, \\ ac &= -f_2 \cdot \text{tg } \alpha_2, \text{ also} \\ f_1 \cdot \text{tg } \alpha_1 &= -f_2 \cdot \text{tg } \alpha_2 \dots \dots \dots \quad A. \end{aligned}$$

Wir haben ferner nach 3d) und 6b):

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{F_2}{f_1 - F_1} = \frac{f_2 - F_2}{F_1}$$

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{F_1}{F_1 - f_1} = \frac{F_2 - f_2}{F_2}$$

und $\frac{F_2}{F_1} = \frac{n_2}{n_1}$ nach 3a) und 3b). Daraus folgt:

$$\frac{f_2}{f_1} = - \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{\beta_2}{\beta_1}$$

Dies in die Gleichung A gesetzt, giebt

$$n_1 \cdot \beta_1 \cdot \text{tg } \alpha_1 = n_2 \cdot \beta_2 \cdot \text{tg } \alpha_2 \quad \dots \dots \dots 7d).$$

Diese Gleichung spricht ein wichtiges von LAGRANGE aufgestelltes Gesetz aus, welches die Größe der Bilder mit der Divergenz der Strahlen verknüpft, unabhängig von der Entfernung und der Brennweite der brechenden Fläche.

Da die Winkel α_1 und α_2 klein sein müssen, wenn überhaupt regelmässige Bilder entworfen werden sollen, so können wir in der letzten Gleichung auch ihre Tangenten durch die Bögen ersetzen und schreiben:

$$n_1 \cdot \alpha_1 \cdot \beta_1 = n_2 \cdot \alpha_2 \cdot \beta_2 \quad \dots \dots \dots 7e).$$

Wir wollen die Producte $n\alpha$ hier als die optische Neigung der betreffenden Theile des Strahls gegen die Axe bezeichnen.

Dann lautet das Gesetz von LAGRANGE, daß das Product aus der optischen Neigung eines Strahls mit der linearen Größe des demselben Medium angehörenden Bildes bei der Brechung an einer Kugelfläche unter kleinem Einfallswinkel constant bleibt.

Umgekehrten Bildern, deren Größe negativ gerechnet wird, entspricht demnach auch ein negativer Werth der optischen Neigung.

Bei der früheren Berechnung der Convergenz und Divergenz der Strahlen haben wir alle Strahlen auf eine gleichbleibende Axendistanz ac an der brechenden Fläche bezogen, und brauchten die Strahlen nicht zu unterscheiden, die in verschiedenen durch die Axe gelegten Ebenen verlaufen. Wenn convergente Strahlen die Axe schneiden, werden sie divergent. Zwischen den Punkten p und q Fig. 43 würden die Winkel α_1 und α_2 auch als die Divergenz- und Convergenzwinkel für den Axenabstand ac betrachtet werden können. Der Neigungswinkel wird aber als unverändert betrachtet, wenn der Strahl bei q die Axe schneidet. Insofern sind beide Winkel verschieden.

Brechung in Systemen von Kugelflächen.

Wir wollen jetzt die Gesetze der Brechung in centrirten optischen Systemen untersuchen, d. h. solchen, welche eine Reihe von brechenden Kugelflächen enthalten, deren Mittelpunkt alle in einer geraden Linie, der optischen Axe des Systems, liegen.

Vorn nennen wir in Bezug auf das System die Seite, von der das Licht kommt, hinten die, wo es hingeht. Die brechende Fläche, welche das Licht zuerst trifft, ist die erste, das Medium, welches vor der ersten brechenden Fläche gelegen ist, das erste, das zwischen der ersten und zweiten gelegene, das zweite, das hinter der letzten, das letzte. Wenn wir m brechende Flächen haben, so haben wir $m + 1$ brechende Medien. Es sei n_1 das Brechungsverhältniß des ersten, n_2 des zweiten, n_{m+1} des letzten brechenden Mittels. Wie bisher nehmen wir die Radien der brechenden Flächen positiv, wenn deren Convexität nach

vorn, negativ, wenn sie nach hinten sieht. Auch bemerke ich hier gleich ein für alle Mal, dafs, wenn von einem Strahlencentrum oder Bilde gesprochen wird, welches in einem gewissen brechenden Mittel liege, oder diesem angehöre, darunter auch stets der Fall mitverstanden ist, wo das Bild potentiell ist, und erst durch Verlängerung der Strahlen über die Grenzen des Mittels hinaus entstehen würde.

Zunächst wissen wir aus der bisherigen Untersuchung, dafs homocentrische Strahlen, welche unter kleinen Einfallswinkeln auf kugelige brechende Flächen fallen, homocentrisch bleiben. Daraus folgt, dafs homocentrische Strahlen, welche unter kleinen Winkeln gegen die Axe in das optische System eintreten, nach jeder Brechung homocentrisch bleiben, und ebenso aus der letzten brechenden Fläche wieder heraustreten. Wenn das einfallende Licht einer Anzahl von Vereinigungspunkten angehört, welche alle in einer kleinen auf der optischen Axe senkrechten Ebene liegen, so wissen wir ferner, dafs nach der ersten Brechung die Vereinigungspunkte wieder alle in einer auf der optischen Axe senkrechten Ebene liegen, und ihre Vertheilung der früheren geometrisch ähnlich ist. So wird es daher auch nach jeder folgenden Brechung sein, und auch das letzte Bild wird dem ursprünglichen geometrisch ähnlich sein, und wie dieses in einer auf die optische Axe senkrechten Ebene liegen.

Indem man nun das Bild, welches von der ersten brechenden Fläche entworfen ist, als den Gegenstand für die zweite betrachtet, das Bild der zweiten als den Gegenstand der dritten u. s. w., kann man ohne besondere Schwierigkeit schliesslich Gröfse und Lage des letzten Bildes berechnen. Allerdings werden aber die Formeln schon bei einer mäfsigen Zahl brechender Flächen sehr weitläufig.

Hier kommt es uns nur darauf an, einige allgemeine Gesetze zu beweisen, welche für jede beliebige Zahl brechender Flächen gültig sind, was uns für das Auge desto wichtiger ist, da dieses in den verschiedenen Schichten der Krystalllinse unendlich viele brechende Flächen enthält, die Rechnung auf dem angedeuteten Wege also doch nicht zu Ende zu führen sein würde.

I.

Zuerst will ich zeigen, dafs das in Gleichung 7) für eine Fläche ausgesprochene Gesetz auch für beliebig viele gilt.

Es sei in *Fig. 45* die mit 1 bezeichnete brechende Fläche die erste, die mit $(m - 1)$ bezeichnete die vorletzte, die mit m bezeichnete die letzte Fläche des

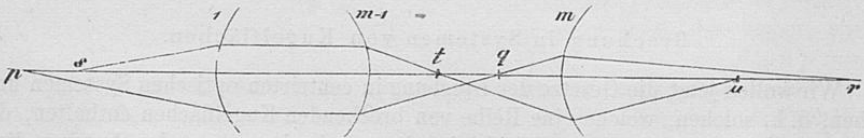


Fig. 45.

Systems. Wenn s der Vereinigungspunkt der eintretenden Strahlen ist, sei u der der austretenden, wenn p der der eintretenden ist, sei r der der austretenden. Wir bezeichnen ps mit h_1 , ur mit h_{m+1} , so will ich beweisen, dafs

$$\frac{H_1}{h_1} + \frac{H_2}{h_{m+1}} = 1,$$

52 wo H_1 der Abstand des ersten Hauptbrennpunktes von s , H_2 der des zweiten von u ist.

Um das Gesetz allgemein zu beweisen, werde ich zeigen, dafs, wenn es für ein System von $(m - 1)$ Flächen richtig ist, es auch für m Flächen gilt. Da es nun für eine Fläche bewiesen ist, folgt dann, dafs es auch für zwei, und wenn für zwei, auch für drei u. s. w. *in infinitum* richtig sei.

Das System der $(m - 1)$ ersten Flächen entwerfe von dem Punkte s das Bild t , und von dem Punkte p das Bild q , und tq werde bezeichnet mit h_m . Die Entfernungen der Hauptbrennpunkte des Systems der $(m - 1)$ Flächen von den Punkten s und t seien beziehlich L_1 und L_2 , die Entfernungen der Hauptbrennpunkte der letzten m ten Fläche von den Punkten t und u seien beziehlich M_1 und M_2 , wobei alle diese Entfernungen immer von den Punkten s , t und u aus in der Richtung positiv gerechnet werden, in welcher das brechende Medium, dem die betreffenden Strahlenbündel angehören, von den betreffenden brechenden Flächen oder Systemen liegt. Nun haben wir nach der obigen Voraussetzung

$$\frac{L_1}{h_1} + \frac{L_2}{h_m} = 1,$$

und für die Brechung in der letzten Fläche

$$-\frac{M_1}{h_m} + \frac{M_2}{h_{m+1}} = 1.$$

Wenn wir die erste dieser Gleichungen mit L_2 , die zweite mit M_1 dividiren und beide addiren, erhalten wir

$$\frac{L_1}{L_2} \cdot \frac{1}{h_1} + \frac{M_2}{M_1} \cdot \frac{1}{h_{m+1}} = \frac{1}{L_2} + \frac{1}{M_1},$$

oder, indem wir mit $\frac{M_1 \cdot L_2}{M_1 + L_2}$ multiplizieren:

$$\frac{M_1 \cdot L_1}{M_1 + L_2} \cdot \frac{1}{h_1} + \frac{M_2 \cdot L_2}{M_1 + L_2} \cdot \frac{1}{h_{m+1}} = 1.$$

Setzen wir $h_1 = \infty$, wobei $h_{m+1} = H_2$ werden muss, so ergiebt diese Gleichung

$$H_2 = \frac{M_2 \cdot L_2}{M_1 + L_2},$$

und setzen wir $h_{m+1} = \infty$, wobei $h_1 = H_1$ werden muss, so ergiebt sich

$$H_1 = \frac{M_1 \cdot L_1}{M_1 + L_2};$$

also haben wir schliesslich

$$\frac{H_1}{h_1} + \frac{H_2}{h_{m+1}} = 1, \quad \dots \dots \dots 8),$$

wie zu beweisen war.

Diese Gleichung liefert für jeden reellen Werth zwischen $+\infty$ und $-\infty$ von h_1 einen und nur einen von h_{m+1} , und ebenso für jeden der letzteren Grössen einen und nur einen von h_1 . Der erste wie der letzte Vereinigungspunkt können also an jeder Stelle der Axe liegen, und sobald der eine gegeben ist, ist auch die Lage des anderen eindeutig bestimmt.

II.

Jedes optische System hat zwei und nur zwei zusammengehörige Vereinigungspunkte der Lichtstrahlen, in denen die Gröfse eines auf die Axe senkrechten ebenen Bildes der des zugehörigen Gegenstandes gleich wird. Wir nennen die Ebene eines solchen Gegenstandes die erste und die des zugehörigen Bildes die zweite Hauptebene des Systems, und die beiden Punkte, wo sie die optische Axe schneiden, beziehlich den ersten und zweiten Hauptpunkt. Die zu den Hauptpunkten gehörigen Hauptbrennweiten sind den zugehörigen Brechungsverhältnissen des ersten und letzten Mittels proportional.

Beweis. Es sei sp der abgebildete Gegenstand, p ein Punkt desselben in der Axe, s ein anderer seitlich davon. Wenn wir den Gegenstand längs der Axe

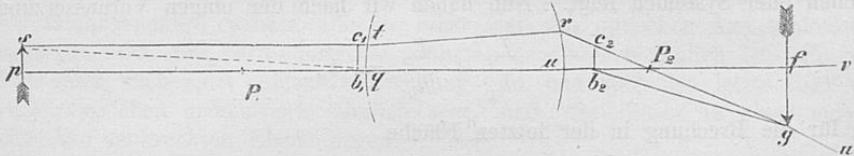


Fig. 46.

verschieben, so daß er immer sich selbst parallel bleibt, so wird sich der Punkt s in der mit der Axe parallelen Linie st bewegen. Der Lichtstrahl st wird also stets dem Punkte s angehören, welches auch die Entfernung $p q$ sein möge. Die der Axe parallelen Lichtstrahlen werden nun durch das brechende System so gebrochen, daß sie schließlic durch den zweiten Hauptbrennpunkt P_2 gehen. Es sei rw der Gang des Lichtstrahls st nach der letzten Brechung. Da st stets dem leuchtenden Punkt s angehört, muß rw stets dem Bilde dieses Punktes angehören, d. h. das Bild von s muß in rw liegen. Es sei fg das Bild von sp , welches nach dem Vorausgeschickten senkrecht gegen die Axe uv sein muß. Wenn p sich längs der Axe verschiebt, wird sich auch f längs uv , und g längs rw verschieben, und es ist ersichtlich, daß die Gröfse des Bildes fg sich hierbei proportional dem Abstände $P_2 f$ ändern muß, wie dasselbe für eine einfache brechende Fläche oben in den Gleichungen 7c) ausgesprochen ist. Da ferner aus Gleichung 8) zu ersehen ist, daß die Entfernung $P_2 f$ jeden beliebigen Werth zwischen $+\infty$ und $-\infty$ annehmen kann, so wird auch die Gröfse des Bildes, wenn wir die eines umgekehrten Bildes negativ bezeichnen, jeden zwischen diesen Grenzen liegenden Werth und einen jeden nur einmal annehmen können. Es wird also auch seinem Gegenstande sp an einer und nur an einer Stelle gleich werden müssen; es sei $c_1 b_1$ in diesem Falle der Gegenstand und $c_2 b_2$ das ihm gleiche Bild, so bezeichnen diese beiden Linien die Lage der sogenannten Hauptebenen des Systems.

Formeln für Gröfse und Lage der Bilder bezogen auf die Hauptpunkte und Brennpunkte.

Bezeichnen wir nun

$$\begin{aligned} sp &= c_2 b_2 = \beta_1, \\ fg &= -\beta_2, \\ b_1 P_1 &= F_1, & b_1 p &= f_1, \\ b_2 P_2 &= F_2, & b_2 f &= f_2, \end{aligned}$$

so ist

$$\frac{c_2 b_2}{fg} = \frac{b_2 P_2}{P_2 f} \quad \text{oder}$$

$$-\frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{F_2}{f_2 - F_2};$$

und da nach Gleichung 8):

$$\frac{F_1}{f_1} + \frac{F_2}{f_2} = 1, \quad \dots \dots \dots \quad 8a),$$

so erhält man entsprechend der für eine brechende Fläche geltenden Gleichung 6b) 54

$$\frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{F_2}{F_2 - f_2} = \frac{F_1 - f_1}{F_1} \quad \dots \dots \dots \quad 8b).$$

Nennen wir die Entfernung der zusammengehörigen Bilder von den Brennpunkten l_1 und l_2 , so daß also

$$l_1 = f_1 - F_1,$$

$$l_2 = f_2 - F_2,$$

so erhalten wir aus der Gleichung 8a) in derselben Weise die einfachste Form für das Gesetz der Lage der Bilder eines zusammengesetzten Systems, wie wir für die einer einzelnen Fläche aus Gleichung 3d) die 7b) erhalten haben, nämlich

$$l_1 \cdot l_2 = F_1 \cdot F_2 \quad \dots \dots \dots \quad 8c),$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\beta_1}{\beta_2} &= -\frac{l_1}{F_1} \\ \frac{\beta_2}{\beta_1} &= -\frac{l_2}{F_2} \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad 8d).$$

Verhältniß der beiden Brennweiten.

Um endlich das Verhältniß der Größen F_1 und F_2 zu finden, wenden wir das in der Gleichung 7d) ausgesprochene Gesetz auf den Strahl an, welcher vor der Brechung durch s und b_1 , Fig. 46, nach der Brechung also durch b_2 und g geht.

Nennen wir die Größe eines in der ersten Hauptebene enthalten Bildes γ_1 , die Reihe der Bilder, welche bei den einzelnen Brechungen in dem Systeme gebildet werden, γ_2, γ_3 etc. und γ_{m+1} das in der zweiten Hauptebene nach der letzten Brechung entworfenene. Nach der Definition der Hauptebene ist $\gamma_1 = \gamma_{m+1}$. Nennen wir ferner α_1 den Winkel zwischen dem Strahl $s b_1$ und der Axe im ersten Mittel, α_2, α_3 u. s. w. in den folgenden Mitteln, α_{m+1} im letzten Mittel, so daß

$$\angle s b_1 p = -\alpha_1,$$

$$\angle g b_2 f = -\alpha_{m+1}.$$

Nach der Gleichung 7d) ist

$$n_1 \cdot \gamma_1 \cdot \text{tg } \alpha_1 = n_2 \cdot \gamma_2 \cdot \text{tg } \alpha_2,$$

$$n_2 \cdot \gamma_2 \cdot \text{tg } \alpha_2 = n_3 \cdot \gamma_3 \cdot \text{tg } \alpha_3$$

u. s. w., woraus folgt

$$n_1 \cdot \gamma_1 \cdot \text{tg } \alpha_1 = n_{m+1} \cdot \gamma_{m+1} \cdot \text{tg } \alpha_{m+1} \quad \dots \dots \dots \quad 9),$$

oder da $\gamma_1 = \gamma_{m+1}$, so ist

$$n_1 \cdot \text{tg } \alpha_1 = n_{m+1} \cdot \text{tg } \alpha_{m+1} \quad \dots \dots \dots \quad 9a).$$

Ferner ist mit Berücksichtigung der oben aufgestellten Bezeichnungen

$$\begin{aligned} sp &= \beta_1 = -f_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_2, \\ fg &= -\beta_2 = -f_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_{m+1}, \quad \text{folglich} \\ \frac{n_1 \cdot \beta_1}{f_1} &= -\frac{n_{m+1} \cdot \beta_2}{f_2}; \end{aligned}$$

Setzt man in diese Gleichung aus 8a) den Werth von f_2 , so erhält man

$$\frac{n_1 \cdot \beta_1}{f_1 - F_1} = -\frac{n_{m+1} \cdot \beta_2}{F_2}$$

55 und nach 8b) ist

$$\frac{\beta_1}{f_1 - F_1} = -\frac{\beta_2}{F_1}$$

Beide Gleichungen durch einander dividirt geben:

$$\frac{n_1}{n_{m+1}} = \frac{F_1}{F_2}, \quad \dots \dots \dots 9c)$$

was zu beweisen war.

III.

In jedem optischen Systeme giebt es ein und nur ein Paar von Knotenpunkten, welche die Eigenschaft haben, daß alle Lichtstrahlen, deren Richtung im ersten Mittel durch den ersten Knotenpunkt geht, nach der letzten Brechung eine ihrer früheren parallele Richtung haben, und durch den zweiten Knotenpunkt gehen. Die durch die Knotenpunkte senkrecht gegen die optische Axe gelegten Ebenen heißen die Knotenebenen. Da die im ersten Knotenpunkte sich schneidenden Lichtstrahlen sich also nach der letzten Brechung im zweiten schneiden, so ist der zweite offenbar das Bild des ersten. Die zu ihnen gehörigen Brennweiten verhalten sich umgekehrt wie die Brechungsverhältnisse des ersten und letzten Mediums.

Wir gehen von der in der vorigen Nummer gefundenen Gleichung 9) aus:

$$n_1 \cdot \gamma_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 = n_{m+1} \cdot \gamma_{m+1} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{m+1} \quad \dots \dots \dots 10)$$

Wenn wir diese auf die Knotenpunkte beziehen, soll $\alpha_1 = \alpha_{m+1}$ werden. Dies wird der Fall sein, wenn

$$n_1 \cdot \gamma_1 = n_{m+1} \cdot \gamma_{m+1}.$$

Die Lineardimensionen zweier zusammengehöriger in den Knotenebenen liegender Bilder verhalten sich also umgekehrt wie die zugehörigen Brechungsverhältnisse des ersten und letzten Mittels.

Da die Bilder desselben Gegenstandes γ_1 sich verhalten wie ihre Abstände vom zweiten Hauptbrennpunkte, so läßt sich dieser Abstand aus der Größe des Bildes bestimmen. Fällt das Bild des Gegenstandes γ_1 in die zweite Hauptebene, so ist seine Größe auch gleich γ_1 , sein Abstand vom Brennpunkte F_2 ; fällt es in die zweite Knotenebene, so ist seine Größe, wie eben bewiesen,

$$\gamma_{m+1} = \frac{n_1}{n_{m+1}} \cdot \gamma_1.$$

Sein Abstand vom Brennpunkte sei G_2 , so ist

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_{m+1}} = \frac{F_2}{G_2}, \text{ also (9c)}$$

$$G_2 = \frac{n_1}{n_{m+1}} \cdot F_2 = F_1 \dots \dots \dots 10a).$$

Der Abstand zwischen der zweiten Haupt- und Knotenebene ist danach

$$\begin{aligned} a_2 &= F_2 - G_2 \\ &= F_2 - F_1. \end{aligned}$$

Die erste Knotenebene soll das Bild der zweiten sein. Nennen wir ihren Abstand von der ersten Hauptebene a_1 , so daß

$$a_1 = G_1 - F_1,$$

so ergibt die Gleichung 8a)

56

$$-\frac{F_1}{a_1} + \frac{F_2}{a_2} = 1, \text{ daher}$$

$$a_1 = a_2 = F_2 - F_1$$

$$G_1 = F_2 \text{ und } \dots \dots \dots 10b)$$

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{n_{m+1}}{n_1} \dots \dots \dots 10c)$$

Methoden, die Brenn-, Haupt- und Knotenpunkte eines aus zwei anderen zusammengesetzten centrirten Systems brechender Kugelflächen zu finden.

IV.

Es seien gegeben zwei centrirte optische Systeme A und B , welche dieselbe Axe haben. Es seien p , und p_{11} , *Fig. 47*, die beiden Brennpunkte, a , und a_{11} , die beiden Hauptpunkte des Systems A , π , und π_{11} , die Brennpunkte, α , und α_{11} , die Hauptpunkte von B . Der Abstand des ersten Hauptpunktes α , des zweiten

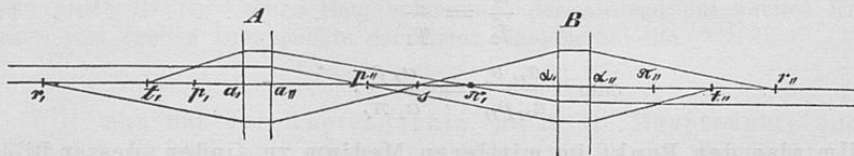


Fig. 47.

Systems vom zweiten a_{11} des ersten Systems sei d , und dies werde positiv gerechnet, wenn, wie in *Fig. 47*, α , hinter a_{11} liegt. Die Hauptbrennweiten des ersten Systems a, p , und a_{11}, p_{11} bezeichnen wir mit f_1 und f_2 , die des zweiten α, π , und α_{11}, π_{11} , mit q_1 und q_2 .

Der erste Brennpunkt des combinirten Systems ist offenbar das Bild, welches das System A vom ersten Brennpunkte π , des Systems B entwirft. Ist t , dieser Punkt, so ist klar, wie auch durch den in der Figur von t_1 ausgehenden Strahl angedeutet ist, daß Strahlen, welche von t , ausgehen, nach der Brechung im ersten Systeme A in π , sich vereinigen und nach der Brechung im zweiten

parallel der Axe werden müssen, so daß also t , der Definition des vorderen Brennpunkts entspricht. Die Entfernung a, π , ist gleich $d - g_1$; daraus ergibt sich für a, t , der Werth

$$a, t = \frac{(d - g_1) \cdot f_1}{d - g_1 - f_2} \dots \dots \dots 11a).$$

Ebenso ist der zweite Brennpunkt des combinirten Systems das Bild, welches das zweite System B von dem zweiten Brennpunkte p , des ersten Systems entwirft. Es sei t , der Ort dieses Bildes, so ist

$$\alpha, t = \frac{(d - f_1) \cdot g_2}{d - g_1 - f_2} \dots \dots \dots 11b).$$

Die beiden Hauptpunkte des combinirten Systems sollen jeder des anderen Bild sein, und zwar bezieht sich der erste auf den Gang der Lichtstrahlen im ersten Medium, der zweite auf den im letzten. Die beiden Hauptpunkte müssen daher ein beider gemeinsames Bild in dem mittleren Medium haben, was zwischen den beiden optischen Systemen vorhanden ist. Es sei dieses Bild s in *Fig. 47*, r , und r , dagegen die Hauptpunkte des combinirten Systems. Wenn s das Bild von r , und r , das Bild von s ist, so ist auch r , das letzte Bild von r , und der ersten Bedingung für die beiden Hauptpunkte geschieht dadurch Genüge. Die zweite Bedingung für diese Punkte ist die, daß zusammengehörige Bilder in den Hauptebenen gleich groß und gleich gerichtet seien. Es sei nun σ die Größe eines Objects in s , β_1 sein Bild entworfen vom System A in r , β_2 sein Bild entworfen vom System B in r , und x gleich der Länge a, s , y gleich $s \alpha_1$, so ist nach 8b)

$$\frac{\beta_1}{\sigma} = \frac{f_2}{f_2 - x}$$

$$\frac{\beta_2}{\sigma} = \frac{g_1}{g_1 - y}$$

Soll $\beta_1 = \beta_2$ sein, so muß sein

$$\frac{f_2}{f_2 - x} = \frac{g_1}{g_1 - y} \quad \text{oder}$$

$$\frac{x}{f_2} = \frac{y}{g_1} \dots \dots \dots 11c)$$

$$\text{oder} \quad \frac{a, s}{a, p} = \frac{\alpha, s}{\alpha, \pi}$$

Um also den Punkt im mittleren Medium zu finden, dessen Bilder die beiden Hauptpunkte sind, theile man die Entfernung zwischen dem zweiten Hauptpunkte des ersten und ersten Hauptpunkte des zweiten Systems in zwei Theile, welche sich verhalten wie die zu diesen Hauptpunkten gehörigen Hauptbrennweiten der beiden Systeme.

Da $x + y = d$ ist nach 11c)

$$\frac{x}{f_2} = \frac{d - x}{g_1}$$

$$\frac{d - y}{f_2} = \frac{y}{g_1} \quad \text{Daraus folgt}$$

$$x = \frac{d \cdot f_2}{g_1 + f_2}$$

$$y = \frac{d \cdot g_1}{g_1 + f_2}$$

Aus dem Werthe von x findet man die Entfernung $a, r, = h_1$ des ersten Hauptpunktes des combinirten Systems vor dem ersten Hauptpunkte des Systems A ,

$$h_1 = \frac{x \cdot f_1}{x - f_2}$$

$$h_1 = \frac{d \cdot f_1}{d - g_1 - f_2} \dots \dots \dots 11d).$$

Ebenso die Entfernung $\alpha, r, = h_2$ des zweiten Hauptpunktes des combinirten Systems hinter dem zweiten Hauptpunkte des Systems B ,

$$h_2 = \frac{g_2 \cdot y}{y - g_1}$$

$$h_2 = \frac{d \cdot g_2}{d - g_1 - f_2} \dots \dots \dots 11e).$$

Daraus ergeben sich die Werthe F_1 und F_2 der Hauptbrennweiten des combinirten Systems:

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= a, t, - a, r, \\ &= \frac{g_1 \cdot f_1}{g_1 + f_2 - d} \\ F_2 &= \alpha, t, - \alpha, r, \\ &= \frac{g_2 \cdot f_2}{g_1 + f_2 - d} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 11f).$$

Hat man die Haupt- und Brennpunkte gefunden, so findet man die Knotenpunkte sehr leicht, da der Abstand des ersten Knotenpunktes vom ersten Brennpunkte gleich ist der zweiten Hauptbrennweite, der Abstand des zweiten Knotenpunktes vom zweiten Brennpunkte der ersten Hauptbrennweite.

V.

Will man nur die Knotenpunkte, nicht die Hauptpunkte suchen, so kann man ein ähnliches Verfahren einschlagen wie für die Hauptpunkte, wobei man die Bedingung benutzt, daß die linearen Dimensionen zusammengehöriger Bilder in den Knotenebenen sich umgekehrt wie die Brechungsverhältnisse der betreffenden Media verhalten.

Es seien in *Fig. 47* jetzt $a,$ und $a, ,$ $\alpha,$ und $\alpha, ,$ nicht mehr die Hauptpunkte, sondern die Knotenpunkte der beiden Systeme A und $B,$ $r,$ und $r, ,$ die Knotenpunkte des combinirten Systems, ihr gemeinsames Bild im mittleren Medium der Punkt $s,$ so daß nun

$$\begin{aligned} a, p, &= f_2 & \alpha, \pi, &= g_2 \\ a, , p, &= f_1 & \alpha, , \pi, &= g_1 \\ a, , s &= x & \alpha, s &= y. \end{aligned}$$

Es ist

$$a, r_1 = \frac{x \cdot f_2}{x - f_1}$$

$$\alpha, r_{11} = \frac{y \cdot \varphi_1}{y - \varphi_2}$$

Ist nun σ die lineare GröÙe eines Objects im Punkte s des mittleren Medium, β_1 die seines vom System A in r_1 entworfenen Bildes, β_2 die seines vom System B in r_{11} entworfenen Bildes, so ist nach den bekannten Eigenschaften der Knotenpunkte

$$\frac{\beta_1}{\sigma} = \frac{a, r_1}{x} = \frac{f_2}{x - f_1}$$

$$\frac{\beta_2}{\sigma} = \frac{\alpha, r_{11}}{y} = \frac{\varphi_1}{y - \varphi_2}$$

Da nun in den Knotenebenen, wenn n_1 das Brechungsverhältniß des ersten n_2 des letzten, ν des mittleren Mittels ist, sein muß

$$n_1 \cdot \beta_1 = n_2 \cdot \beta_2, \text{ so folgt, daÙ}$$

$$\frac{n_1 \cdot f_2}{x - f_1} = \frac{n_2 \cdot \varphi_1}{y - \varphi_2}$$

59 Nun ist aber

$$n_1 \cdot f_2 = \nu \cdot f_1$$

$$n_2 \cdot \varphi_1 = \nu \cdot \varphi_2, \text{ also}$$

$$\frac{f_1}{x - f_1} = \frac{\varphi_2}{y - \varphi_2} \text{ und}$$

$$\frac{x}{f_1} = \frac{y}{\varphi_2} \text{ oder}$$

$$\frac{a, s}{a, p_{11}} = \frac{\alpha, s}{\alpha, \pi}$$

Die entsprechende Gleichung hatten wir aber auch gefunden in 11c), als wir angenommen hatten, daÙ die Punkte $a, a_{11}, \alpha, \alpha_{11}, r_1$ und r_{11} Hauptpunkte seien. Zur Auffindung der Knotenpunkte des combinirten Systems verfährt man also ganz wie zur Auffindung seiner Hauptpunkte, nur daÙ man dabei von den Knotenpunkten der einzelnen Systeme, nicht von den Hauptpunkten ausgeht, und die zu den Knotenpunkten gehörigen Brennweiten nimmt.

VI.

Wir wollen hier noch die Formeln für den einfachsten Fall hinschreiben, wo jedes der beiden verbundenen Systeme nur aus einer einzelnen Kugelfläche besteht. Es sei r_1 der Radius der ersten, r_2 der der zweiten Fläche, d ihr Abstand in der Axe von einander, n_1 das Brechungsverhältniß des ersten, n_2 des zweiten, n_3 des dritten Mittels. Dann ist nach 3a) und 3b)

$$f_1 = \frac{n_1 \cdot r_1}{n_2 - n_1} \qquad \varphi_1 = \frac{n_2 \cdot r_2}{n_3 - n_2}$$

$$f_2 = \frac{n_2 \cdot r_1}{n_2 - n_1} \qquad \varphi_2 = \frac{n_3 \cdot r_2}{n_3 - n_2}$$

Setzen wir der Kürze wegen

$$n_2 \cdot (n_3 - n_2) \cdot r_1 + n_2 \cdot (n_2 - n_1) \cdot r_2 - (n_3 - n_2) \cdot (n_2 - n_1) \cdot d = N,$$

so sind die Hauptbrennweiten:

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \frac{n_1 \cdot n_2 \cdot r_1 \cdot r_2}{N} \\ F_2 &= \frac{n_2 \cdot n_3 \cdot r_1 \cdot r_2}{N} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 12),$$

die Entfernungen der Hauptpunkte h_1 und h_2 von den Flächen:

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= \frac{n_1 \cdot (n_2 - n_3) \cdot d \cdot r_1}{N} \\ h_2 &= \frac{n_3 \cdot (n_1 - n_2) \cdot d \cdot r_2}{N} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 12a),$$

und die Entfernung der Hauptpunkte von einander ist

$$H = d \cdot \frac{(n_2 - n_1) \cdot (n_3 - n_2) \cdot (r_1 - r_2 - d)}{N} \dots \dots \dots 12b).$$

Für $d = 0$ wird $h_1 = h_2 = H = 0$

$$F_1 = \frac{n_1 \cdot r_1 \cdot r_2}{(n_3 - n_2) \cdot r_1 + (n_2 - n_1) \cdot r_2}$$

$$F_2 = \frac{n_3 \cdot r_1 \cdot r_2}{(n_3 - n_2) \cdot r_1 + (n_2 - n_1) \cdot r_2}$$

Setzen wir hierin $r_2 = r_1$, so erhalten wir

$$F_1 = \frac{n_1 \cdot r_1}{n_3 - n_1}$$

$$F_2 = \frac{n_3 \cdot r_1}{n_3 - n_1}$$

Die Brennpunkte und Hauptpunkte sind dann also genau dieselben, als wäre nur eine brechende Fläche vorhanden; das Resultat ist unabhängig von n_2 . Daraus folgt:

In einem Systeme von brechenden Kugelflächen können wir uns an jeder brechenden Fläche eine unendlich dünne, durch concentrische Kugelflächen begrenzte Schicht von beliebigem Brechungsverhältnisse eingeschoben denken, ohne die Brechung der Strahlen dadurch zu ändern.

Es wird uns dieser Satz später zur Vereinfachung mancher Betrachtungen dienen.

VII.

Linsen. Endlich will ich noch die Formeln für Linsen mit zwei kugelförmigen Begrenzungsflächen hersetzen, bei denen das erste und letzte Mittel einander gleich sind, also $n_1 = n_3$. Dann ergibt Gleichung 12):

$$F_1 = F_2 = \frac{n_1 \cdot n_2 \cdot r_1 \cdot r_2}{(n_2 - n_1) \cdot [n_2 \cdot (r_2 - r_1) + (n_2 - n_1) \cdot d]} \dots \dots \dots 13).$$

Die Entfernungen der Hauptpunkte, welche in diesem Falle mit den Knotenpunkten zusammenfallen, von den Linsenflächen sind nach 12a)

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= \frac{n_1 \cdot d \cdot r_1}{n_2 \cdot (r_2 - r_1) + (n_2 - n_1) \cdot d} \\ h_2 &= - \frac{n_1 \cdot d \cdot r_2}{n_2 \cdot (r_2 - r_1) + (n_2 - n_1) \cdot d} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 13a).$$

Die Entfernung der Hauptpunkte von einander:

$$H = d \cdot \frac{(n_2 - n_1) \cdot (d + r_2 - r_1)}{n_2 \cdot (r_2 - r_1) + (n_2 - n_1) \cdot d} \dots \dots \dots 13b).$$

Die beiden ersten sind positiv gerechnet, wenn sie außerhalb der Linse liegen.

Den Punkt in der Linse, dessen Bilder die beiden Knotenpunkte sind, nennt man in diesem Falle das optische Centrum der Linse. Es liegt in der optischen Axe, und seine Entfernungen von den beiden Flächen verhalten sich zu einander wie die Radien dieser Flächen.

Substitution verschiedener optischer Systeme für einander.

Da die Resultate der Brechung in einem optischen Systeme, was Gröfse und Lage der Bilder betrifft, nur von der Lage der Brennpunkte und Hauptpunkte (oder Knotenpunkte) abhängen, so kann man ohne Aenderung der Lage und Gröfse der Bilder zwei optische Systeme für einander substituiren, deren Brennpunkte und Hauptpunkte dieselbe Lage haben. Da das Verhältniß des Brechungsvermögens des ersten und letzten Mittels nicht geändert werden kann, ohne das Verhältniß der Hauptbrennweiten zu einander zu ändern, wollen wir voraussetzen, dafs das erste und letzte Mittel bei einer solchen Substitution ungeändert bleiben. Dann braucht nur die eine Hauptbrennweite und der Abstand der Hauptpunkte von einander in dem einen System gleich den entsprechenden Gröfßen des anderen gemacht zu werden, um die beiden Systeme für einander substituiren zu können. In einem Systeme von nur zwei brechenden Flächen würde man zur Erfüllung dieser Bedingungen über 4 Gröfßen, r_1 , r_2 , n_2 und d , bestimmen können. Es kann daher für jedes centrirte System brechender Kugelflächen ein System von
61 nur zwei solchen Flächen gesetzt werden, welches eben so grofse und eben so gelegene Bilder entwirft wie jenes, und im Allgemeinen kann man dabei sogar noch immer zwei andere Bedingungen für das System von zwei Flächen aufstellen, z. B. dafs es aus einem bestimmten Stoffe zu bilden sei u. s. w., und diese gleichzeitig erfüllen.

Für den Fall, wo das erste und letzte Mittel identisch sind, beide ein kleineres Brechungsvermögen haben als das mittlere Mittel, und der Abstand der brechenden Flächen kleiner ist als die Krümmungsradien, also für die sogenannten Linsen, will ich hier noch die einzelnen Fälle durchgehen, weil dergleichen Linsen eine ausgedehnte praktische Anwendung finden.

Verschiedene Arten der Linsen.

Man unterscheidet nach der Gestalt 1) biconvexe Linsen, bei denen beide Flächen convex, also r_1 positiv, r_2 negativ ist; die Brennweite ist immer positiv nach Gleichung 13). Die Abstände der Hauptpunkte von den Flächen sind negativ, d. h. diese Punkte liegen innerhalb der Linse, und der Abstand der Hauptpunkte

von einander ist positiv, d. h. der erste liegt vor dem zweiten. In *Fig. 48* ist die Lage der Brennpunkte p_1 und p_2 und Hauptpunkte h_1 und h_2 einer biconvexen Linse dargestellt. Die erste und zweite Fläche der Linse sind mit 1 und 2 bezeichnet. Ein Grenzfall der biconvexen Linsen sind die planconvexen, bei denen einer der Radien unendlich groß wird, und ein Hauptpunkt in die gekrümmte Fläche der Linse fällt.

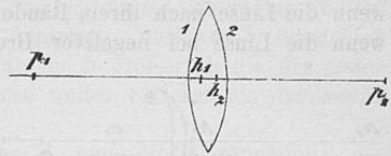


Fig. 48.

2) Biconcave Linsen mit zwei concaven Flächen; r_1 ist negativ, r_2 positiv. Die Brennweiten sind negativ, die Abstände der Hauptpunkte von den Flächen beide negativ, d. h. die Hauptpunkte liegen innerhalb der Linse. Ihr Abstand ist positiv, d. h. der erste liegt vor dem zweiten. *Fig. 49* stellt die Lage der Hauptpunkte h_1 und h_2 , sowie der Brennpunkte p_1 und p_2 einer biconcaven Linse dar. Einen Grenzfall bilden die planconcaven Linsen, bei denen einer der Radien unendlich wird und einer der Hauptpunkte in die gekrümmte Fläche fällt.

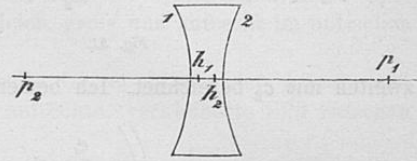


Fig. 49.

3) Concavconvexe Linsen, beide Radien entweder positiv oder negativ. Wir wollen das erstere annehmen; der zweite Fall ergibt sich aus diesem sogleich, wenn wir nachher die erste Seite der Linse zur zweiten machen. Die Brennweite wird positiv, wenn

$$n_2 \cdot (r_2 + d - r_1) > n_1 \cdot d;$$

sie wird unendlich, wenn beide Seiten der Gleichung gleich sind; sie wird negativ, wenn der Ausdruck links kleiner als der rechts ist. Der Ausdruck $r_2 + d - r_1$ ist der Abstand des Krümmungsmittelpunkts der zweiten Fläche von dem der ersten nach hinten gerechnet. Liegt der zweite Mittelpunkt hinter dem ersten, so wird die Linse von ihrer Mitte nach dem Rande zu dünner; liegt jener vor dem ersten, so wird sie dicker. Man kann also sagen: Wird eine concavconvexe Linse nach dem Rande zu dicker, so ist ihre Brennweite negativ, und soll ihre Brennweite positiv sein, so muß sie nach dem Rande hin dünner werden. Aber man darf beide Sätze nicht umkehren, wie es oft geschieht.

Der erste Hauptpunkt liegt vor der convexen Fläche (d. h. an ihrer convexen Seite), wenn die Brennweite positiv ist; er entfernt sich sehr weit, bis in das Unendliche, wenn die Brennweite selbst sehr groß und unendlich wird. Wird die Brennweite negativ, so liegt der erste Hauptpunkt hinter der convexen Fläche der Linse, d. h. auf ihrer concaven Seite, ebenfalls unendlich weit entfernt, wenn die 62 Brennweite unendlich sein sollte.

Der zweite Hauptpunkt liegt vor der concaven Fläche der Linse, d. h. auf ihrer convexen Seite, wenn die Brennweite der Linse positiv, er liegt hinter dieser Fläche, wenn die Brennweite negativ ist, und rückt ebenfalls in das Unendliche hinaus, wenn die Brennweite unendlich groß wird. Bei einer positiven Brennweite liegt der zweite Hauptpunkt immer hinter dem ersten, d. h. der Linse näher. Bei einer negativen liegt er hinter dem ersten, d. h. der Linse ferner,

wenn die Linse nach ihrem Rande zu dicker wird; er liegt dagegen vor dem ersten, wenn die Linse bei negativer Brennweite von der Mitte nach dem Rande dünner wird; er fällt mit ihm zusammen, wenn die beiden Linsenflächen concentrischen Kugeln angehören, und zwar liegen beide Hauptpunkte dann in dem gemeinschaftlichen Centrum der Kugel. *Fig. 50* stellt eine concavconvexe Linse von positiver

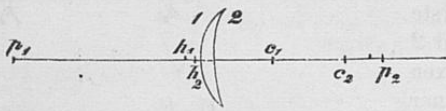


Fig. 50.

Brennweite dar, *Fig. 51* eine solche von negativer Brennweite, die nach dem Rande zu dicker wird, *Fig. 52* eine solche von negativer Brennweite, welche nach dem Rande zu dünner wird. Der Krümmungsmittelpunkt der ersten Fläche ist mit c_1 , der der

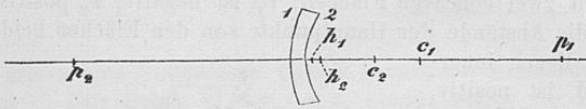


Fig. 51.

zweiten mit c_2 bezeichnet. Ich bemerke noch, daß die Brennpunkte nie in die Linse und stets auf entgegengesetzte Seiten derselben fallen.

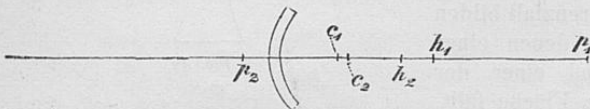


Fig. 52.

Was die Lage der Bilder betrifft, so vereinfacht sich die Gleichung 8a) und 8b), wenn die beiden Brennweiten gleich werden, in folgende:

wenn die beiden Brennweiten gleich werden, in folgende:

$$\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{F}, \text{ oder} \dots \dots \dots 14)$$

$$f_2 = \frac{F \cdot f_1}{f_1 - F}, \dots \dots \dots 14a)$$

und

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{F}{F - f_1} = \frac{F - f_2}{F}, \dots \dots \dots 14b)$$

oder, wenn wir wie oben

$$\begin{aligned} f_1 - F &= l_1 \\ f_2 - F &= l_2 \end{aligned}$$

setzen, erhalten wir den Gleichungen 7c) entsprechend

$$-\frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{l_1}{F} = \frac{F}{l_2} \dots \dots \dots 14c)$$

und

$$l_1 \cdot l_2 = F^2 \dots \dots \dots 14d)$$

Hiernach ist die Brennweite F der Linse in allen Fällen die mittlere geometrische Proportionale zwischen den beiden Bildabständen von den Brennpunkten l_1 und l_2 . Ebendeshalb muß von den letztern einer nothwendig größer als F , der andere kleiner sein, wenn nicht beide gleich $+F$ oder gleich $-F$ sind. Auch ergibt sich, daß l_1 und l_2 immer gleichzeitig positiv oder negativ sein müssen, d. h. wenn das Object vor dem ersten Brennpunkte liegt, liegt das Bild hinter dem zweiten, und umgekehrt.

Bei Linsen mit positiver Brennweite (Sammellinsen, Convexlinsen) liegt der erste Brennpunkt vor der Linse, der zweite dahinter. Positives l_1 bezeichnet also eine Entfernung des Objects von der Linse, die noch gröfser als die des ersten Brennpunkts ist, während das Bild hinter der Linse weiter entfernt als der zweite Brennpunkt liegt und nach 14 c) umgekehrt ist.

Dabei ist die Entfernung l_2 wie die Bildgröfse β_2 umgekehrt proportional der Entfernung l_1 des Objects vom ersten Brennpunkte; l_2 wird gleich l_1 und $\beta_2 = -\beta_1$, wenn $l_1 = F$, d. h. das Object um die doppelte Brennweite von der Linse absteht.

Für ein negatives l_1 , welches absolut kleiner als F ist, liegt das Object zwischen erstem Brennpunkt und Linse; das virtuelle und aufrechte Bild vor der Linse, da l_2 nun auch negativ, aber, absolut genommen, gröfser als F sein mufs; das Bild ist vergrößert. Dies entspricht dem Falle, wo die Linse als Loupe gebraucht wird.

Für $l_1 = -F$ fallen Object und Bild gleich grofs und aufrecht im optischen Centrum der Linse zusammen.

Für $-l_1 > F$ liegt das nunmehr virtuelle Object hinter der Linse, und da nun $-l_2 < F$ sein mufs, das wieder reelle, aufrechte, verkleinerte Bild zwischen der Linse und ihrem zweiten Brennpunkte.

Für Linsen mit negativer Brennweite (Concavlinsen, Zerstreungslinsen) liegt der erste Brennpunkt hinter der Linse, der zweite davor.

Der Fall $l_1 > (-F)$ giebt eine Lage des Objects vor der Linse. Dabei wird nach 14c) und 14d) $l_2 < (-F)$, d. h. das Bild liegt vor der Linse, ist also virtuell, aufrecht verkleinert.

Der Fall $l_1 = -F$, macht Object und Bild aufrecht und gleich grofs im Centrum der Linse zusammenfallen.

Der Fall, wo ein positives $l_1 < (-F)$, entspricht einem virtuellen Bilde hinter der Linse zwischen ihr und dem hinter ihr liegenden Brennpunkte. Dann ist $l_2 > (-F)$, d. h. das Bild liegt hinter der Linse, ist also reell, dabei aufrecht, um so mehr vergrößert, je näher das virtuelle Object an den virtuellen Brennpunkt rückt.

Endlich, wenn l_1 negativ wird, d. h. das virtuelle Object hinter dem virtuellen Brennpunkt liegt, wird auch l_2 negativ, d. h. das virtuelle Bild ist weiter vor der Linse gelegen, als ihr vorderer (zweiter) Brennpunkt, und ist umgekehrt. Das ist der Fall, der in dem Galilei'schen Fernrohre eintritt.

§ 10. Brechung der Strahlen im Auge.

Das Auge verhält sich gegen das einfallende Licht im Wesentlichen 64 wie eine *Camera obscura*. Das von einem leuchtenden Punkte ausgegangene Licht mufs, wenn dieser Punkt deutlich gesehen werden soll, durch die brechenden Mittel des Auges so gebrochen werden, dafs Alles auch wieder auf einem Punkte der Netzhaut vereinigt wird. Auf der Fläche dieser Haut wird in der That ein reelles optisches Bild der äufseren gesehenen Gegenstände entworfen. Dasselbe ist umgekehrt und verkleinert. Man kann es an frisch ausgeschnittenen Augen sichtbar machen, wenn man vorsichtig den hinteren mittleren Theil der Sclerotica und Chorioidea entfernt, die Netzhaut aber stehen läfst, und nun die Hornhaut eines so präparirten Auges gegen

helle Gegenstände kehrt. Das Bild erscheint alsdann klein, hell, scharf und wie angegeben, umgekehrt auf der stehengebliebenen Netzhaut. Noch besser ist das Bildchen nach der Methode von GERLING¹ zu sehen, wenn man die Elemente der Netzhaut mit einem Pinsel entfernt, und dann ein Täfelchen von Glas oder Glimmer in die Öffnung einschiebt. Ohne viele Mühe kann man die Netzhautbildchen auch in den Augen weißer Kaninchen sehen, denen das Pigment der Aderhaut fehlt. Bei diesen braucht man nicht einmal die harte Haut zu entfernen, sondern sieht das Bild durch sie hindurchscheinen, allerdings nicht so scharf wie bei freigelegter Netzhaut, aber doch deutlich genug, um seine Stellung, Gröfse u. s. w. zu erkennen. Auch ist es bei lebenden Menschen, namentlich bei blonden Personen mit hellblauen Augen, welche wenig Pigment in der Aderhaut zu haben pflegen, zuweilen möglich, das Bild durch die harte Haut hindurch zu sehen. Man läßt einen solchen in einem verdunkelten Zimmer das Auge so drehen, daß die Hornhaut im äußeren Augenwinkel steht, und in dem größeren mittleren und inneren Theile der Augenlidspalte daher die innere Seite der weißen Sehnenhaut erscheint. Hält man dann noch weiter seitlich, als die seitlich gekehrte Sehaxe steht, eine Kerzenflamme, so erscheint deren Bild auf der inneren Seite der Netzhaut, und schimmert oft so deutlich durch die weiße Sehnenhaut hindurch, daß man die umgekehrte Stellung des Bildes, die Spitze der Flamme und den Ort des Dochtes erkennen kann².

Die genaueste Untersuchung der Netzhautbildchen im lebenden Auge des Menschen ist mittels des im § 16 zu beschreibenden Augenspiegels möglich. Mit diesem Instrumente kann man von vorn in das Auge hineinschauen, und die Netzhaut selbst mit ihren Gefäßen, sowie die auf ihr entworfenen optischen Bilder deutlich sehen. Man überzeugt sich leicht davon, daß von hinreichend hellen Objecten, welche das beobachtete Auge deutlich sieht, sehr scharfe und genau begrenzte optische Bilder auf der Fläche der Netzhaut entworfen werden.

Bei der Beschreibung der Netzhaut habe ich schon erwähnt, daß im Hintergrunde des Auges sich eine eigenthümlich gebaute Stelle der Netzhaut finde, der gelbe Fleck. In seiner Mitte, der sogenannten Netzhautgrube, fehlen die Gefäße, welche sich in den übrigen Theilen der Netzhaut verästeln; hier finden sich nur nervöse Elemente vor, und zwar von den Schichten der Netzhaut, wie es scheint, nur Körnchen und Zapfen. Diese Stelle ist in physiologischer Hinsicht von der größten Wichtigkeit als die Stelle des directen Sehens. Derjenige Punkt des Gesichtsfeldes, welchen wir direct betrachten, oder mit dem Blicke fixiren, wird jedesmal an dem Orte der Netzhautgrube abgebildet. Mittels des Augenspiegels kann dieser Satz, von dessen Richtigkeit man sich schon längst wegen der besonderen Structur des gelben Flecks überzeugt hielt, auch durch directe Beobachtungen erwiesen werden. Den Ort des gelben Flecks erkennt man mit dem Augen-

¹ C. L. GERLING, *Poggendorffs Ann.* XLVI. 243. 1839.

² VOLCKMANN, Artikel: Sehen in WAGNERS *Handwörterbuch der Physiologie.* S. 286—289.

spiegel, wenn die ganze Netzhaut erleuchtet ist, an dem Mangel der Gefäße. In der Mitte der gefäßlosen Stelle, entsprechend dem Orte der Netzhautgrube, findet sich eine eigenthümlich helle Stelle, welche COCCIUS¹ zuerst beschrieben hat, und deren Helligkeit er einem Reflexe der Netzhautgrube zuschreibt. DONDERS² hat ferner gezeigt, daß dieser helle Reflex stets an derjenigen Stelle des optischen Bildes erscheint, welche das beobachtete Auge im Gesichtsfelde fixirt, und ich habe mich von der Richtigkeit dieser Angabe überzeugt. Man kann nach der Stellung des sogenannten Reflexes der Netzhautgrube dem beobachteten Individuum genau bezeichnen, welchen Punkt es fixirt, und wenn man ihm Anweisung giebt, bald diesen, bald jenen Punkt des Gegenstandes zu fixiren, sieht man den Reflex immer auf den entsprechenden Punkt des Bildes sich einstellen. Die Ausführung dieser Versuche wird in § 16 beschrieben werden. 66

Nur in der Gegend der Augenaxe pflegt das optische Bild auf der Netzhaut seine volle Schärfe zu haben, von ihr entfernter ist es weniger gut begrenzt. Wir sehen deshalb im Gesichtsfelde in der Regel nur den einen Punkt deutlich, welchen wir fixiren, alle übrigen undeutlich. Diese Undeutlichkeit im indirecten Sehen ist übrigens auch durch eine geringere Empfindlichkeit der Netzhaut bedingt; sie ist schon in geringer Entfernung von dem fixirten Punkte viel bedeutender als die objective Undeutlichkeit der Netzhautbilder. Das Auge stellt ein optisches Werkzeug von sehr großem Gesichtsfelde dar, aber nur in einer kleinen, sehr engbegrenzten Stelle dieses Gesichtsfeldes sind die Bilder deutlich. Das ganze Feld entspricht einer Zeichnung, in der zwar der wichtigste Theil des Ganzen sorgfältig ausgeführt, die Umgebungen aber nur skizzirt, und zwar desto roher skizzirt sind, je weiter sie von dem Hauptgegenstande abstehen. Durch die Beweglichkeit des Auges wird es aber möglich, nach einander jeden einzelnen Punkt des Gesichtsfeldes genau zu betrachten. Da wir zu einer Zeit doch nur einem Gegenstande unsere Aufmerksamkeit zuwenden können, ist der eine deutlich gesehene Punkt ausreichend, sie vollständig zu beschäftigen, so oft wir sie auf Einzelheiten lenken wollen; und wiederum ist das große Gesichtsfeld trotz seiner Undeutlichkeit geeignet, die Hauptzüge der ganzen Umgebung mit einem schnellen Blicke aufzufassen, und neu auftauchende Erscheinungen an den Seiten des Gesichtsfeldes sogleich zu bemerken.

Das Gesichtsfeld eines einzelnen Auges wird bestimmt durch die Weite der Pupille und ihre Lage zum Rande der Hornhaut. Ich finde, daß ich in einem dunklen Zimmer, wenn ich mein Auge in einem Spiegel besehe, und seitlich ein Licht aufstelle, die Anwesenheit des Lichts so lange noch wahrnehme, als Strahlen von dem Lichte auf den gegenüberliegenden Rand der Pupille und in diese selbst fallen. Alles Licht also, was durch die Hornhaut in die Pupille fällt, wird noch empfindliche Theile der Netzhaut treffen. Die Pupille liegt zwar etwas weiter zurück als der äußere Horn-

¹ A. COCCIUS, *Ueber die Anwendung des Augenspiegels*. Leipzig 1853. S. 64.

² F. C. DONDERS, *Onderzoekingen gedaan in het Physiolog. Laborat. d. Utrechtsche Hoogeschool*. Jaar VI. S. 133.

hautrand, aber wegen der Brechung in der Hornhaut können selbst noch Strahlen zu ihr gelangen, welche senkrecht gegen die Augenaxe verlaufend auf den Rand der Hornhaut fallen, so daß das Gesichtsfeld eines einzelnen Auges etwa einer halben Kugel entspricht, eine Gröfse, welche keinem künstlichen optischen Instrumente zukommt. Individuelle Verschiedenheiten müssen darin vorkommen, abhängig von der Weite und Lage der Pupille. Da beim Sehen für die Nähe die Pupille sich der Hornhaut nähert, wird das Gesichtsfeld dabei etwas gröfser, wie ich an meinen Augen wenigstens leicht erkennen kann, wenn ich am äußersten Rande des Gesichtsfeldes ein recht helles Licht anbringe.

Ein Theil des Gesichtsfeldes jedes einzelnen Auges nach innen, oben und unten wird durch Theile des Antlitzes, Nase, Augenbrauenrand, Wangen, eingenommen, nur nach aufsen hin ist es ganz frei¹. Beide Augen zusammen
67 überschauen aber, wenn ihre Axen parallel in die Ferne gerichtet sind, einen horizontalen Bogen von 180 oder mehr Graden, jedes einzelne bis 150°. Vergrößert wird das überschaubare Feld noch durch die Bewegungen der Augen, auf welche wir später zurückkommen.

Die Lichtstrahlen, welche von einem entfernteren leuchtenden Punkte auf das Auge fallen, werden zuerst von der Hornhaut gebrochen, und zwar so, daß sie ungestört weitergehend sich etwa 10 mm hinter der Netzhaut in einem Punkte vereinigen würden. Indem sie somit convergirend [durch die vordere Augenkammer gehen, treffen sie auf die Krystalllinse, werden von dieser noch convergenter gemacht, und können in Folge dessen nun schon auf der Netzhaut zur Vereinigung gelangen.

Die stärksten Brechungen der Lichtstrahlen geschehen an der Hornhaut, demnächst an der vorderen und hinteren Fläche der Krystalllinse. Aber auch im Inneren der Krystalllinse finden an den Grenzen ihrer einzelnen Schichtflächen Brechungen statt, da diese Schichten von verschiedener Dichtigkeit sind. Wir können diese verschiedenen brechenden Flächen annähernd gleichsetzen einem System von Rotationsflächen, deren Axen alle in eine gerade Linie zusammenfallen. Wenn auch kleine Abweichungen in der Lage der Axen der einzelnen Flächen bei den meisten menschlichen Augen vorkommen scheinen, so sind diese doch so gering, daß wir sie in Bezug auf die Lage und Gröfse der optischen Bilder vernachlässigen und das Auge im Ganzen als ein centrirtes optisches System betrachten können.

Die Axe dieses Systems, deren vorderes Ende etwa mit dem Mittelpunkte der Hornhaut zusammenfällt, während das hintere zwischen dem gelben Flecke und der Eintrittsstelle des Sehnerven hindurchgeht, nennen wir die Augenaxe.

¹ Instrumente zur Ausmessung der Grenzen des Gesichtsfeldes, *Perimeter*, werden jetzt von den Augenärzten viel gebraucht. Sie sind theils ebene Tafeln mit verschiebbaren Gesichtszeichen, vor denen der Kopf festgestellt wird, wie die von WECKER (*Zehender's Monatsbl.* 1867 p. 275) und DOR construirten, theils drehbare Gradbogen wie die von AUBERT und FÖRSTER (*Graefe's Archiv f. Ophthalmol.* III. 1857), LANDOLT (*Annali d'Ottalmologia del prof. Quaglino.* 1872. p. 1), CARTER (*Zehender's Monatsbl.* 1872) theils halbe Hohlkugeln, wie die von SCHENK (ebenda 1872. X. S. 151.)

Die Lage der Brennpunkte, Hauptpunkte und Knotenpunkte des Auges unterliegt wohl ziemlich bedeutenden individuellen Verschiedenheiten, da überhaupt die meisten Abmessungen des Auges und seiner einzelnen brechenden Flächen bei verschiedenen Menschen so von einander abweichen, wie man es bei einem Organe, dessen Wirkungen eine so große Genauigkeit der Construction zu verlangen scheinen, kaum erwarten sollte. Ausserdem werden wir weiter unten sehen, daß auch in jedem einzelnen Auge diese Punkte ihre Lage ändern, wenn das Auge nach einander Gegenstände in verschiedener Entfernung betrachtet. Man kann über die Lage der genannten Punkte im normalen, fernsehenden Auge nur etwa so viel sicher aussagen: Der erste Hauptpunkt ist dem zweiten Hauptpunkte sehr nahe, ebenso der erste dem zweiten Knotenpunkte. Die beiden Hauptpunkte des Auges liegen etwa in der Mitte der vorderen Augenkammer, die beiden Knotenpunkte sehr nahe der hinteren Fläche der Linse, der zweite Brennpunkt dicht an der Netzhaut.

Da es bei sehr vielen Gelegenheiten nothwendig ist, wenigstens angenäherte Werthe für die einzelnen optischen Constanten des Auges zu kennen, so will ich hier die Werthe anführen, welche LISTING für ein schematisches mittleres Auge gewonnen hat, indem er, den bis dahin ausgeführten Messungen sich möglichst anschließend, einfache abgerundete Zahlen für die hier in Betracht kommenden Größen wählte. Eine den neueren Messungen besser angepaßte Berechnung eines schematischen Auges folgt in § 12.

LISTING nimmt an

1) das Brechungsvermögen der Luft gleich	1	68
2) das Brechungsvermögen der wässrigen Feuchtigkeit.....	$\frac{103}{77}$	
3) Brechungsvermögen der Krystalllinse.....	$\frac{16}{11}$	
4) Brechungsvermögen des Glaskörpers	$\frac{103}{77}$	
5) Krümmungshalbmesser der Hornhaut	8 mm	
6) Krümmungshalbmesser der vorderen Linsenfläche.....	10 „	
7) Krümmungshalbmesser der hinteren Linsenfläche	6 „	
8) Entfernung der vorderen Hornhaut- und vorderen Linsenfläche	4 „	
9) Dicke der Linse.....	4 „	

Er berechnet aus diesen Annahmen:

- 1) Der erste Brennpunkt liegt 12,8326 mm vor der Hornhaut, der zweite Brennpunkt 14,6470 mm hinter der Hinterfläche der Linse.
- 2) Der erste Hauptpunkt liegt 2,1746 mm, der zweite 2,5724 mm hinter der Vorderfläche der Hornhaut, ihr gegenseitiger Abstand beträgt 0,3978 mm.
- 3) Der erste Knotenpunkt liegt 0,7580 mm, der zweite 0,3602 mm vor der Hinterfläche der Linse.

4) Die erste Hauptbrennweite des Auges beträgt hiernach 15,0072 mm, die zweite 20,0746 mm.

Die Lage der Hauptpunkte h , und h'' , Knotenpunkte k , und k'' , Brennpunkte F' , und F'' , nach LISTING ist in *Fig. 53* angegeben. Unter den von

ⁿ LISTING der Berechnung zu Grunde gelegten Werthen ist der Hornhautradius und das Brechungs-Vermögen der Linse etwas zu groß angenommen. Beide nicht erheblichen Fehler

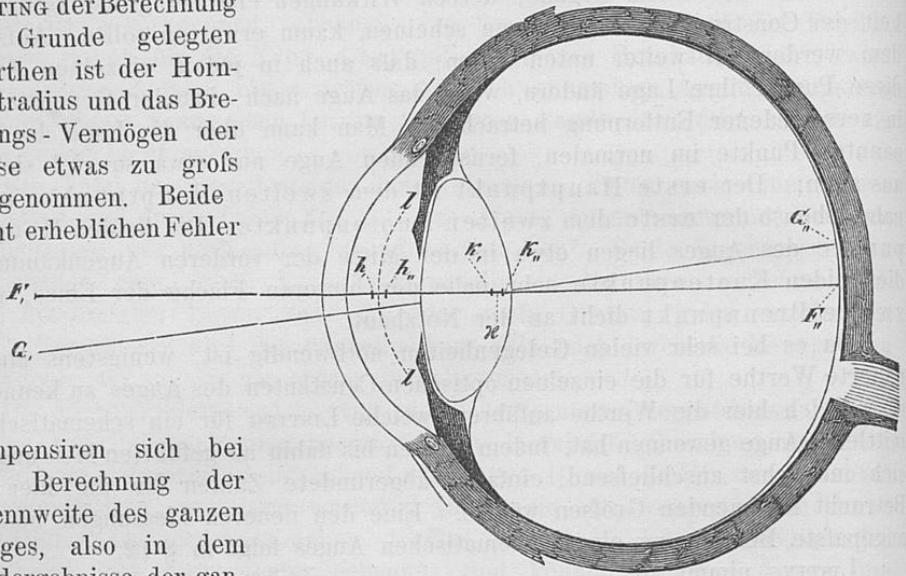


Fig. 53.

compensiren sich bei der Berechnung der Brennweite des ganzen Auges, also in dem Endergebnisse der ganzen Brechung. Auf die Lage der Haupt- und Knotenpunkte hat dies sehr wenig Einfluss. Wir brauchen also nicht zu zweifeln, daß LISTING's in runden Zahlen gegebenes

69 Schema mit dem natürlichen Verhältnisse wirklich so gut übereinstimmt, als es bei der großen Breite der individuellen Unterschiede möglich ist.

Vermittelst der angegebenen Cardinalpunkte des Auges läßt sich der Weg eines gegebenen einfallenden Strahls nach der letzten Brechung vermöge der in § 9 vorgeschriebenen Constructionen finden; ebenso der Ort des Bildes eines beliebigen, in der Nähe der Augenaxe liegenden leuchtenden Punktes. Da übrigens sowohl die beiden Hauptpunkte des Auges, als auch die beiden Knotenpunkte einander sehr nahe liegen, so kann man ohne erhebliche Beeinträchtigung der Genauigkeit des Resultats die beiden Hauptpunkte in einen Punkt zusammenziehen und ebenso die beiden Knotenpunkte. Man erhält dadurch ein noch mehr vereinfachtes Schema des Auges, welches LISTING das reducirte Auge nennt. Er legt den einfachen Hauptpunkt eines solchen Auges 2,3448 mm hinter die Vorderfläche der Hornhaut, den Knotenpunkt z *Fig. 53* 0,4764 mm vor die hintere Fläche der Linse, die Brennpunkte bleiben unverändert. Die Wirkung des reducirten Auges würde durch eine brechende Kugelfläche hervorgebracht werden können, deren Mittelpunkt der Knotenpunkt wäre, und deren Scheitel im Hauptpunkt läge, während sich vor ihr Luft, hinter ihr wässrige Feuchtigkeit oder Glaskörper

befände. Der Krümmungshalbmesser einer solchen Fläche würde 5,1248 mm betragen. Bei vielen theoretischen Betrachtungen, wo es nur auf die GröÙe und Lage der Bilder ankommt, kann man sich durch Anwendung dieses reducirten Schemas des Auges die Untersuchung sehr erleichtern. In *Fig. 53* ist die brechende Kugelfläche des reducirten Auges durch den gestrichelten Bogen *ll*, ihr Mittelpunkt bei *z* angegeben.

In dem sehr häufig vorkommenden Falle, wo man weiß, daß genaue optische Bilder auf der Netzhaut entworfen werden, und es nur darauf ankommt, den Ort des Bildes für einen bestimmten Punkt des Gegenstandes zu finden, genügt die Kenntniß der Knotenpunkte. Erlaubt man sich dabei die Vereinfachung, nur einen (und zwar als solchen am besten den zweiten) Knotenpunkt anzunehmen, so findet man den Ort des Bildes, wenn man von dem leuchtenden Punkte eine gerade Linie nach dem Knotenpunkte zieht, und diese bis zur Netzhaut verlängert; wo sie die Netzhaut trifft, ist der Ort des Bildes. Eine solche gerade Linie nennt man Richtungslinie des Sehens. Der einfach gedachte Knotenpunkt ist also der Kreuzungspunkt der Richtungslinien. Das vor der Hornhaut und das hinter der Linse liegende Stück einer solchen Linie würde zugleich dem Wege eines gewissen Strahls angehören, den man Richtungsstrahl nennen kann. Nur zwischen der vorderen Hornhaut- und hinteren Linsenfläche fällt der Richtungsstrahl nicht nothwendig mit der Richtungslinie zusammen.

Will man die genauere Construction machen, wobei man beide Knotenpunkte als getrennt betrachtet, so hat man zwei Richtungslinien zu unterscheiden. Die erste geht vom leuchtenden Punkte zum ersten Knotenpunkte, und die zweite ist parallel mit der ersten durch den zweiten Knotenpunkt zu legen. Wo letztere die Netzhaut schneidet, ist der Ort 70 des Bildes. Das außerhalb des Auges liegende Stück der ersten Richtungslinie und das im Glaskörper liegende Stück der zweiten gehören wieder dem Wege eines Lichtstrahls an, des Richtungsstrahls.

Ich nenne den Richtungsstrahl, welche die Stelle des directen Sehens trifft, die Gesichtslinie. Der vordere gerade Theil der Gesichtslinie geht also von dem fixirten Punkte des Gesichtsfeldes in der Richtung des ersten Knotenpunktes, der hintere gerade Theil von dem zweiten Knotenpunkte her nach der Netzhautgrube. Da man früher den gelben Fleck meist in dem hinteren Ende der optischen Axe des Auges gelegen glaubte, hielt man die Gesichtslinie auch für identisch mit der Augenaxe, und nannte diese Linie auch wohl Sehaxe oder Gesichtsaxe. Nach meinen Untersuchungen sind aber beide merklich von einander unterschieden. Vor dem Auge liegt die Gesichtslinie nach innen und meist etwas nach oben von der Augenaxe, die Netzhautgrube also nach außen und meist etwas nach unten von der Axe. Ich habe in *Fig. 53* die Lage der Gesichtslinie $G_1 G_2$ im horizontalen Durchschnitte des Auges angegeben, sowie ich sie in einem gut gebildeten Auge im Verhältniß zur Augenaxe F, F'' liegen fand. Die obere Seite der *Figur* ist die Schläfenseite, die untere die Nasenseite.

Um die Brechung der Lichtstrahlen in den einzelnen Mitteln des Auges zu berechnen, theilen wir uns das optische System des Auges in zwei Theile, deren ersten die Hornhaut, deren zweiten die Krystalllinse ausmacht, so dafs das erste Mittel des ersten Systems Luft, das Mittel zwischen beiden Systemen, oder das letzte des ersten, das erste des zweiten Systems wässrige Feuchtigkeit, das letzte Mittel des zweiten Systems Glaskörper ist.

Die Brechung in der Hornhaut.

Die Untersuchung der Brechung in dieser wird wesentlich vereinfacht durch den Umstand, dafs die Hornhaut sehr dünn ist, fast gleichgekrümmte Flächen hat, und ihr Brechungsvermögen nur wenig das der wässrigen Feuchtigkeit übertrifft. Ich habe § 9 bei den Gleichungen 12), 12 a), 12 b) nachgewiesen, dafs man an jeder brechenden Fläche eine unendlich dünne Schicht von beliebigem Brechungsvermögen und gleichgekrümmten Flächen einschieben könne, ohne die Brechung zu verändern. Man denke sich somit vor der Hornhaut eine unendlich dünne Schicht wässriger Feuchtigkeit ausgebreitet, wie sich denn sogar in Wahrheit dort eine ähnliche Schicht befindet, nämlich die Schicht der die Hornhaut netzenden Thränen. Dann können wir nachher die Hornhaut selbst als eine uhrglasförmige Linse betrachten, welche auf beiden Seiten von dem gleichen Medium, wässriger Feuchtigkeit, umgeben ist. Eine solche Linse hat eine sehr grofse oder unendliche Brennweite, d. h. sie verändert den Gang der Lichtstrahlen nicht merklich. Daraus folgt, dafs die Brechung der Lichtstrahlen in der Hornhaut fast dieselbe sein wird, als wenn die wässrige Flüssigkeit bis an die vordere Fläche der Hornhaut reichte. Diese Annahme ist daher bis jetzt auch fast immer bei der Berechnung des Ganges der Lichtstrahlen in der Hornhaut gemacht worden, und sie ist hier nicht zu vermeiden, da wir bisher zwar gute Messungen der äufseren Hornhautkrümmung, aber keine genügend zuverlässigen für die innere besitzen.

Sollte die bezeichnete Annahme streng gerechtfertigt sein, so müfste nach § 9 Gleichung 13) sein

$$n_2 \cdot (r_2 - r_1) + (n_2 - n_1) \cdot d = 0,$$

wo n_1 das Brechungsvermögen der wässrigen Feuchtigkeit, n_2 das der Hornhaut, d die Dicke, r_1 den Krümmungshalbmesser der vorderen, r_2 der hinteren Fläche ⁷¹ der Hornhaut bezeichnet. Diese Gleichung kann nun in der That auf die Hornhaut nicht wohl passen. Wenn wir sie schreiben:

$$(r_2 + d) - r_1 = \frac{n_1}{n_2} \cdot d,$$

so ist $(r_2 + d)$ der Abstand des Krümmungsmittelpunktes der hinteren Fläche vom Scheitel der vorderen, und die Gleichung würde aussagen, dafs der Krümmungsmittelpunkt der hinteren Fläche hinter dem der vorderen liege. Dann müfste die Hornhaut von der Mitte nach dem Rande zu an Dicke abnehmen, während in der Regel das Umgekehrte der Fall ist. Die Hornhaut wird also den Folgerungen gemäfs, welche am Ende des § 9 für concavconvexe Linsen aus der Gleichung 13) gezogen sind, in der Regel als Linse in wässriger Feuchtigkeit aufgehängt eine negative, aber sehr grofse Brennweite haben.

Nehmen wir $r_1 = 8$ mm, $r_2 = 7$ mm, $d = 1$ mm und nach W. KRAUSE $n_2 = 1,3507$, $n_1 = 1,3420$, so wird nach § 9 Gleichung 13) die Brennweite der

in wässriger Feuchtigkeit befindlichen Hornhaut gleich — 8,7 Meter, eine Gröfse, welche wir im Verhältnisse zu den Dimensionen des Auges als unendlich grofs betrachten können.

Dasselbe wurde bestätigt durch Versuche mit dem Ophthalmometer, mittels welches Instrumentes ich die Gröfse eines Objects mafs, welches sich hinter einem Glasgefäfse mit parallelen Wänden befand. Brachte ich in das Wasser eine frische Hornhaut einer menschlichen Leiche, so dafs ich das Object nur durch die Hornhaut erblickte, so war durch das Ophthalmometer keine Verkleinerung des Bildes zu entdecken. Diese war also so gering, dafs die leichte Trübung des Bildes durch die eingeführte Hornhaut hinreichte, sie unwahrnehmbar zu machen.

Um berechnen oder schätzen zu können, um wie viel sich die wirkliche Brechung am Auge von derjenigen unterschiede, welche eintreten würde, wenn das Brechungsvermögen der Hornhaut wirklich dem der wässrigen Feuchtigkeit gleich wäre, wollen wir die optischen Constanten der Hornhaut nach der Formel § 9 Nr. 12) bestimmen, und dabei setzen, $n_1 = 1$, $n_3 = n$, $n_2 = n + \Delta n$, $r_1 = r$, $r_2 = r - \Delta r$, wobei wir die Gröfsen Δn , Δr und die Dicke der Hornhaut d als sehr klein gegen n und r ansehen können. Wenn wir diese Bezeichnungen in § 9 Gleichungen 12) einsetzen, und die höheren Dimensionen der kleinen Gröfsen vernachlässigen, erhalten wir die Brennweiten.

$$F_1 = \frac{1}{n} \cdot F_2 = \frac{r}{n-1} \left\{ 1 - \Delta n \cdot \frac{(n-1) \cdot d - n \cdot \Delta r}{n \cdot (n-1) \cdot r} \right\} \quad \dots \quad 1).$$

Der Unterschied der Brennweiten von dem Werthe $\frac{r}{n-1}$, den wir durch die Annahme $\Delta n = 0$ erhalten, ist eine kleine Gröfse zweiter Dimension; ebenso die Entfernung x des ersten Hauptpunktes, von der vorderen Hornhautfläche nach vorn gerechnet,

$$x = \frac{d \cdot \Delta n}{n(n-1)} \quad \dots \quad 1 a)$$

Die Entfernung der beiden Hauptpunkte von einander a wird sogar eine kleine Gröfse dritter Dimension.

$$a = \frac{d^2 \cdot \Delta n}{n \cdot r} \quad \dots \quad 1 b)$$

Für die Berechnung der Bilder wird es daher genügen, nur eine Brechung an der vorderen Fläche der Hornhaut in Betracht zu ziehen, und dabei das Brechungsvermögen der Hornhaut gleich dem der wässrigen Feuchtigkeit zu setzen.

Die Brechung in der Krystalllinse.

Der zweite Theil des optischen Systems des Auges besteht aus der Krystalllinse. Vor dieser befindet sich die wässrige, hinter ihr die Glasfeuchtigkeit. Da das Brechungsvermögen dieser beiden Stoffe nur äußerst geringe Unterschiede zeigt, 72 so wollen wir diesen Unterschied vernachlässigen. In optischen Systemen, deren erstes und letztes Mittel identisch ist, fallen die Hauptpunkte mit den Knotenpunkten zusammen. Wir können also bei der Krystalllinse im Auge, wie bei den gewöhnlichen Glaslinsen unserer optischen Instrumente, beide Arten von Punkten identificiren. Die Krystalllinse unterscheidet sich aber dadurch wesentlich von

künstlichen Glaslinsen, daß die Dichtigkeit ihrer Substanz nicht constant ist, sondern von außen nach innen zunimmt. Da wir das Gesetz dieser Zunahme nicht genau kennen, sind wir auch außer Stande den Gang der Lichtstrahlen durch die Linse vollständig zu berechnen, und den Ort ihrer Brennpunkte und Hauptpunkte genau zu bestimmen. Wir müssen uns begnügen, Grenzen für die Lage dieser Punkte zu finden. In dieser Beziehung lassen sich folgende Sätze aufstellen.

1) Die Brennweiten der Krystalllinse sind kleiner, als sie sein würden, wenn ihre ganze Masse das Brechungsvermögen ihres Kerns hätte.

Um diesen wichtigen Satz zu beweisen, denken wir uns die Krystalllinse nach ihrer natürlichen Schichtung zerlegt in den Kern, der eine fast kugelige biconvexe Linse von positiver Brennweite darstellt, und in die einzelnen ihn umschließenden Schichten, deren zunächst der Augenaxe gelegene Theile concavconvexen Linsen entsprechen. Und zwar sind dies Linsen, die nach dem Rande zu dicker oder wenigstens nicht dünner werden, bei denen also $r_1 \geq r_2 + d$ (s. Ende von § 9), wenn wir mit r_1 den Radius der convexen, mit r_2 den der concaven Fläche, und mit d die Dicke der Linse bezeichnen.

Da nach S. 81 die Brechung in einem optischen System nicht geändert wird, wenn wir unendlich dünne durch concentrische Kugelflächen begrenzte Schichten eines beliebigen brechenden Medium an beliebiger Stelle eingeschoben denken, so können wir uns zwischen je zwei Linsenschichten eine unendlich dünne Schicht Kernsubstanz eingeschaltet denken, und also alle übrigen Linsenschichten als in Kernsubstanz eingebettet betrachten. Da die einzelnen Linsenschichten nach dem Aequator der Linse hin dicker werden, so haben sie die Form von Concavlinen, welche nach Gleichung 13) in § 9 und den sich daran schließenden Erörterungen über die Wirkung der Linsen negative Brennweite haben, wenn wie bei Glaslinsen in Luft $n_2 > n_1$, d. h. die Linse aus stärker brechender Substanz besteht. In unserem Falle aber ist es umgekehrt. Die in Kernsubstanz eingebetteten Linsenschichten würden $n_2 < n_1$ haben, und deshalb wie Sämellinsen auf das in Kernsubstanz eingetretene Licht wirken. Daraus folgt nach § 9 S. 84, daß sie dieses Licht, ehe es die Hinterfläche der Krystalllinse erreicht, convergenter machen müssen, als es ohne ihre Anwesenheit in der aus Kernsubstanz gebildeten Linse geworden wäre. Somit wird es auch convergenter die Linse verlassen, und eher in deren Axe zur Vereinigung kommen, als es durch eine ganz aus Kernsubstanz bestehende ungeschichtete Linse geschehen wäre.

Daß bei dieser Verschiebung des Vereinigungspunkts auch die Brennweite verkürzt werden muß, ergibt sich, wenn wir einen der Axe parallel in der Entfernung q von ihr verlaufenden Strahl verfolgen, der also auch verlängert die erste, wie die zweite Hauptebene in der Entfernung q von der Axe trifft. Dieser muß hinter der Linse durch deren zweiten Brennpunkt gehen. Bezeichnen wir den Convergenzwinkel, unter dem der Strahl die Axe im Brennpunkt schneidet mit α , so ist

$$q = F \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

Für denselben Strahl wird aber die Convergenz der Strahlen größer, wie wir eben gesehen, wenn wir die geschichtete Linse statt der einfachen Linse aus Kernsubstanz setzen. Wenn q gleich bleibt, α größer wird, muß F kleiner werden.

Herr L. MATTHIESSEN¹ hat kürzlich die Strahlenbrechung in einer Linse theoretisch berechnet, die eine Zunahme des Brechungsverhältnisses von der Ober-

¹ L. MATTHIESSEN. *Pflueger's Archiv für Physiologie*. Bd. 36. S. 72.

fläche gegen den Kern zeigt, deren Gesetz zuvor hypothetisch angenommen, aber doch den Verhältnissen der menschlichen Krystalllinse möglichst angenähert ist.

2) Die Entfernung der Hauptpunkte von einander ist in der Kry- 75
stalllinse kleiner als in einer Linse, welche dieselbe Form und das Brechungsvermögen des Kerns hätte.

Die Hauptpunkte sind die von der Linse selbst entworfenen Bilder eines in ihr liegenden Punktes, nämlich ihres sogenannten optischen Mittelpunktes. Wo dieser auch liegen mag, so läßt sich in ganz ähnlicher Weise, wie es eben zur Bestimmung der Brennpunkte geschehen ist, nachweisen, daß die Bilder des optischen Mittelpunktes desto näher den Oberflächen der Linse rücken werden, je mehr das Brechungsvermögen der einzelnen Schichten der Krystalllinse steigt, daß dabei also auch die Entfernung der beiden Bilder von einander algebraisch größer wird. Wenn nun sämtliche Schichten der Linse schliesslich das Brechungsvermögen des Kerns erreicht haben, wird im Allgemeinen der optische Mittelpunkt der Krystalllinse nicht mehr mit dem optischen Mittelpunkte dieser neuen gleichartigen Linse zusammenfallen. Da aber bei einer Linse mit positiven Brennweiten die Entfernung der Hauptpunkte ein Maximum ist unter den Entfernungen der Bilder je eines inneren Punktes, so ist die Entfernung der Hauptpunkte dieser neuen gleichartigen Linse jedenfalls größer als die Entfernung der von ihr entworfenen Bilder des optischen Mittelpunktes der unveränderten Krystalllinse, folglich auch größer als die Entfernung der Hauptpunkte der unveränderten Krystalllinse von einander.

Es läßt sich ferner nachweisen, daß die Entfernung der Hauptpunkte der Krystalllinse einen positiven Werth hat, d. h. daß der zweite Hauptpunkt hinter dem ersten liegt, wenn wir annehmen, wie dies aus der Form der Linsenschichten hervorzugehen scheint, daß die Krümmungsradien der in der Axe gelegenen Theile der Schichtflächen größer sind als die Entfernungen dieser Flächen vom Kerne der Linse. Brechende Kugelflächen entwerfen von Punkten, welche zwischen ihnen und ihrem Mittelpunkte liegen, Bilder, die der brechenden Fläche näher sind, als das Object. Folglich wird das Bild des Mittelpunktes des Linsenkerns, welches die vordere Linsenhälfte entwirft, vor seinem Objecte, das, welches die hintere Linsfläche entwirft, hinter seinem Objecte liegen. Die beiden zusammengehörigen Bilder des Mittelpunktes des Linsenkerns haben also eine positive Entfernung. Da der Abstand der Hauptpunkte algebraisch größer ist als der aller anderen zusammengehörigen Bilder, so ist dieser Abstand jedenfalls positiv.

Die Hauptpunkte einer Linse, welche die Gestalt der menschlichen Krystalllinse und das Brechungsvermögen ihres Kerns hätte, würden nur etwa $\frac{1}{4}$ mm von einander entfernt sein; dadurch ist die Entfernung der Hauptpunkte der Krystalllinse 76
von einander also in sehr enge Grenzen eingeschlossen.

Die Brechungsverhältnisse der durchsichtigen Mittel des menschlichen Auges sind früher von CHOSSAT¹ und BREWSTER² bestimmt worden; später ist eine große Zahl solcher Messungen von W. KRAUSE³ ausgeführt worden, während die erstgenannten Beobachter, wie es scheint, nur wenige Augen untersucht haben. BREWSTER brachte die zu untersuchende Substanz zwischen die krumme Fläche einer Convexlinse, welche als Objectiv eines Mikroskops diente, und ein gegen die Axe des Mikroskops senkrecht gestelltes Planglas. Dadurch wird die Brennweite des Mikroskops verändert. BREWSTER maß den Objektabstand des Mikroskops vor und nach der Einbringung der brechenden Substanz und nach der Einbringung von reinem Wasser,

¹ C. J. E. CHOSSAT, *Bulletin des sc. par la Société philom. de Paris*. A. 1818. Juin. p. 294.

² D. BREWSTER, *Edinburgh Philos. Journal*. 1819. No. 1. p. 47.

³ W. KRAUSE, *Die Brechungsindices der durchsichtigen Medien des menschl. Auges*. Hannover 1855.

dessen Brechungscoefficient bekannt war. CAHOURS und BECQUEREL¹ schlugen vor, die GröÙe der Bilder des Mikroskops zu messen, und dieser Methode ist auch W. KRAUSE gefolgt. Ich lasse hier die Beschreibung des Verfahrens folgen, welches der Letztere angewendet hat, da es für Ärzte, die ein Mikroskop zu gebrauchen pflegen, leicht ausführbar ist.

Ein gewöhnliches (KELLNERSCHES) Mikroskop, dessen unterer Theil in Fig. 54 abgebildet ist, wurde für die Messungen auf folgende Art eingerichtet. An die Stelle des Objectivs wurde eine biconvexe Linse von Crown-glas von etwa 30 mm Brennweite gebracht, indem die Fassung *b* in das Rohr des Mikroskops *a* eingeschraubt wurde. Die Linse befand sich in einer concaven, geschwärtzten Vertiefung, und wurde darin durch die Hülse *d*, die in der Mitte mit einer Öffnung von 2,6 mm Durchmesser versehen war, festgeschraubt. Die Linse lag luftdicht auf dem Rande dieser Öffnung an. Unter ihr wurde eine plane Glasplatte *e*, ebenfalls von Crown-glas, angebracht, vermittelt eines Ringes *f*, dessen Innenraum konisch ausgeschliffen war und auf die Hülse *d*, die ebenfalls konisch ausgeschliffen war, paßte, jedoch nicht so genau, daß sich Luft langsam dazwischen hindurchdringen konnte.

Das zu prüfende Augenmedium wurde in den Ring *f* auf die Mitte der ebenen Platte gebracht, und dann der Ring so fest auf die Hülse *d* aufgedrückt, daß die letztere auf den vorspringenden Rand *g* aufstieÙ, um dadurch das Planglas sicher vertikal gegen die Axe des Mikroskops zu stellen. Nach jeder Messung konnte die Objectivlinse herausgenommen und gereinigt werden.

Im Oculare des Mikroskops war ein Glasmikrometer, getheilt in $\frac{1}{30}$ Wiener Linien, befestigt; auf den Objecttisch wurde ein eben solches, getheilt in $\frac{1}{10}$ Linien, gelegt, und das Mikroskop so gestellt, daß beide Theilungen gleichzeitig deutlich gesehen wurden, und bestimmt, wie viel Theilstrichen des unteren Mikrometers einer des oberen entsprach. Eben solche Messungen wurden angestellt, wenn bloÙ Luft zwischen der Objectivlinse und der ebenen Platte, und wenn destillirtes Wasser dazwischen war.

Zur Berechnung der Resultate können wir die Gleichungen 12) in § 9 benutzen; zwar beziehen sich diese nur auf zwei brechende Flächen und in dem Objectivsystem von KRAUSE's Apparate haben wir vier, nämlich die erste und zweite Fläche des Planglases, die erste und zweite Fläche der biconvexen Linse. Wenn wir uns das System in zwei zerlegen, von denen das erste die beiden ebenen Flächen umfaßt, das zweite die beiden Flächen der Linse, so sind die Brennweiten des ersten Systems unendlich. Bezeichnen wir die erste (untere) Brennweite des Planglases entsprechend der Bezeichnung in § 9. Gleichung 11a) bis 11f) mit f_1 , die zweite des Planglases mit f_2 , die erste (untere) der Linse mit q_1 , die zweite mit q_2 , den Abstand des zweiten Hauptpunktes des Planglases vom ersten der Linse mit d , so giebt die letztere der Gleichungen 11f), wenn wir f_2 unendlich groß setzen, für die zweite (obere) Brennweite des ganzen Systems:

$$F_2 = q_2.$$

77 Die erste Brennweite des ganzen Systems ist dieser gleich, da das erste und letzte Mittel (Luft) identisch sind.

Für die Entfernung des zweiten Hauptpunktes des ganzen Systems vom zweiten Hauptpunkte der Linse giebt die Gleichung 11e) den Werth 0, wenn wir $f_2 = \infty$ setzen. Der zweite Hauptpunkt und zweite Brennpunkt sind also in diesem Falle dieselben, als wenn das zwischen der ebenen Platte und der Linse eingeschlossene Mittel nach vorn unbegrenzt wäre.

Wir nennen also, entsprechend der Bezeichnung die Gleichung 12) in § 9, das Brechungsverhältniß der zu prüfenden Substanz n_1 , das der Glaslinse n_2 ; das der Luft n_3 können wir = 1 setzen; dann entspricht der Werth von F_2 der genannten Gleichungen der Brennweite F unseres Objectivsystems:

$$F = \frac{n_2 \cdot r_1 \cdot r_2}{n_2 \cdot (1 - n_2) \cdot r_1 + [n_2 \cdot r_2 - (1 - n_2) \cdot d] \cdot (n_2 - n_1)}$$

Nennen wir F_0 die Brennweite des Objectivsystems für den Fall, daß destillirtes Wasser zwischen die Platte und Linse eingebracht ist, n_0 das Brechungsvermögen des destillirten Wassers, und Φ die Brennweite für den Fall, wo sich Luft zwischen der Platte und Linse befindet, so erhalten wir noch zwei ähnliche Gleichungen, welche wir mit der vorigen in folgender Form schreiben können:

$$\left. \begin{aligned} F \cdot A - n_2 \cdot r_1 \cdot r_2 &= n_1 \cdot F \cdot B \\ F_0 \cdot A - n_2 \cdot r_1 \cdot r_2 &= n_0 \cdot F_0 \cdot B \\ \Phi \cdot A - n_2 \cdot r_1 \cdot r_2 &= \Phi \cdot B \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 2),$$

wenn wir der Abkürzung wegen setzen:

$$\begin{aligned} A &= n_2 \cdot [(1 - n_2) \cdot r_1 + n_2 \cdot r_2 - (1 - n_2) \cdot d] \\ B &= n_2 \cdot r_2 - (1 - n_2) \cdot d. \end{aligned}$$

Wenn wir die zweite der Gleichungen 2) von der ersten, und die dritte von der zweiten abziehen, erhalten wir:

$$\begin{aligned} (F - F_0) \cdot A &= (n_1 \cdot F - n_0 \cdot F_0) \cdot B \\ (F_0 - \Phi) \cdot A &= (n_0 \cdot F_0 - \Phi) \cdot B. \end{aligned}$$

Diese beiden Gleichungen durch einander dividirt geben:

$$\frac{F - F_0}{F_0 - \Phi} = \frac{n_1 \cdot F - n_0 \cdot F_0}{n_0 \cdot F_0 - \Phi}.$$

Daraus folgt endlich:

$$n_1 = 1 + (n_0 - 1) \cdot \frac{F_0 \cdot (F - \Phi)}{F \cdot (F_0 - \Phi)} \dots \dots \dots 2a).$$

Wir können also das Brechungsverhältniß der zu prüfenden Substanz n_1 berechnen, wenn wir das Brechungsverhältniß des destillirten Wassers n_0 kennen und die drei Brennweiten des Objectivsystems F , F_0 und Φ . Diese Brennweiten lassen sich aber aus der Messung der Bilder berechnen. Ist b die Größe eines Theilstrichs des unteren Mikrometers, und β die absolute Größe seines in der Ocularblendung des Mikroskops entworfenen Bildes, ohne Rücksicht auf seine umgekehrte Stellung, F die Brennweite des Objectivsystems und g die Entfernung des Bildes β vom zweiten Hauptpunkte des Objectivsystems, so ist nach § 9 Gleichung 8b):

$$\begin{aligned} \frac{\beta}{b} &= \frac{g - F}{F} \text{ oder} \\ F &= \frac{g \cdot b}{b + \beta} \dots \dots \dots 2b) \end{aligned}$$

Wenn man b und β gemessen hat, würde man also g noch kennen müssen, um F zu finden. Vorausgesetzt aber, daß g in allen Fällen dasselbe bleibt, was in KRAUSE'S Apparat mit großer Annäherung der Fall ist, würde sich dessen Werth aus der Gleichung für n_1 fortheben, braucht also dann nicht gekannt zu sein. Lassen wir den drei Brennweiten F , F_0 und Φ entsprechen die drei Werthe β , β_0 und b , so wird der Werth von n_1

$$n_1 = 1 + (n_0 - 1) \cdot \frac{b - \beta}{b - \beta_0} \dots \dots \dots 2c).$$

Zur Berechnung von n_1 braucht man also unter diesen Umständen nicht einmal die Größe des Objects b zu kennen, welches man unter das Mikroskop gelegt hat, sondern es genügt, irgend ein beliebiges Object zu nehmen, wenn es nur immer dasselbe bleibt.

Der Werth von g ist in diesen Messungen constant, wenn sich die Stellung des Mikrometers im Oculare, und die des zweiten Hauptpunktes des Objectivsystems nicht ändert. Die letztere ist bei Einschaltung verschiedener Flüssigkeiten zwischen der ebenen Platte und Linse nur dann streng constant, wenn die obere Fläche der Linse eben ist.

In § 9 Gleichung 12a) ist h_2 die Entfernung des zweiten Hauptpunktes von der hinteren Fläche der Linse. Wenn r_2 nicht unendlich ist, ist diese Entfernung von n_1 , dem Brechungsvermögen der eingeschalteten Substanz, abhängig. Wenn man r_2 unendlich groß setzt, nachdem man Zähler und Nenner des Ausdrucks für h_2 dadurch dividirt hat, wird

$$h_2 = -\frac{n_3 \cdot d}{n_2}$$

also unabhängig von n_1 . Es möchte daher besser sein, bei solchen Messungen statt der biconvexen eine planconvexe Linse zu nehmen, die plane Seite nach oben gewendet. Indessen ist der Fehler, welcher durch Anwendung einer biconvexen entstehen kann, jedenfalls äußerst unbedeutend, wenn nur die Dicke der Linse gegen die Länge des Körpers des Mikroskops vernachlässigt werden kann.

BREWSTER hat bei seinen Messungen den Brechungscoefficienten des destillirten Wassers = 1,3358 gesetzt, was nach FRAUNHOFER'S Messungen etwa der Linie E in Grün, also den Strahlen mittlerer Brechbarkeit entsprechen würde. KRAUSE zieht auf LISTING'S Rath vor, als Grundlage den intensivsten Strahl des Spectrums zu nehmen, welcher nach FRAUNHOFER den Brechungsindex 1,33424 hat. Ich gebe in der folgenden Tafel die Resultate, welche CHOSSAT, BREWSTER und KRAUSE für das menschliche Auge erhalten haben. W. KRAUSE hat 20 Augen von 10 Individuen untersucht und sehr beträchtliche individuelle Abweichungen gefunden.

Tabelle der Brechungsindices menschlicher Augen.

Beobachter.	Hornhaut.	Wässrige Feuchtig-keit.	Glas-körper.	Krystalllinse.		
				Äußere Schicht.	Mittlere Schicht.	Kern.
CHOSSAT.	1,33	1,338	1,339	1,338	1,395	1,420
BREWSTER. $n_0 = 1,3358$.		1,3366	1,3394	1,3767	1,3786	1,3896
W. KRAUSE. $n_0 = 1,3342$.	Max.	1,3569	1,3557	1,3569	1,4743	1,4807
	Min.	1,3431	1,3349	1,3361	1,3431	1,3523
	Mittel.	1,3507	1,3420	1,3485	1,4053	1,4294
HELMHOLTZ. $n_0 = 1,3354$.		1,3365	1,3382	1,4189		

Die von mir selbst angestellten Messungen sind in folgender Weise ausgeführt: Es wurden Proben der zu untersuchenden Flüssigkeit zwischen einer ebenen Glasplatte und der concaven Fläche einer kleinen planconcaven Linse eingeschlossen; Bilder dieses optischen Systems wurden mit dem Ophthalmometer gemessen, daraus die Brennweiten berechnet. Außerdem konnte der Radius der concaven Linsenfläche direct mit dem Ophthalmometer bestimmt werden, ähnlich wie dies in § 2 für den Krümmungsradius der Hornhaut geschehen ist. Unter diesen Umständen war es nicht nöthig, auch mit destillirtem Wasser zwischen den Gläsern zu beobachten, und dessen Brechungs-
79 verhältniß als bekannt vorauszusetzen. Das Brechungsverhältniß des destillirten Wassers fand sich auf diese Weise 1,3351, was zwischen BREWSTER'S und KRAUSE'S Zahl liegt.

KRAUSE hat noch eine Reihe von Brechungsverhältnissen an Kalbsaugen untersucht, namentlich in der Absicht zu ermitteln, ob die Brechungsverhältnisse in den ersten 24 Stunden nach dem Tode sich merklich verändern, indem er 20 solcher Augen unmittelbar nach dem Tode untersuchte, 20 andere, nachdem sie 24 Stunden bei 15° R. aufbewahrt worden waren. Er fand folgende Mittelzahlen:

	frische Augen	nach 24 Stunden
Hornhaut	1,3467	1,3480
Wässrige Feuchtigkeit	1,3421	1,3415
Glaskörper	1,3529	1,3528
Äußere Linsenschicht	1,3983	1,4013
Mittlere Linsenschicht	1,4194	1,4211
Linsenkern	1,4520	1,4512.

Daraus geht hervor, daß sich die Brechungsverhältnisse der Kalbsaugen in den ersten 24 Stunden nach dem Tode nicht merklich verändern, und es läßt sich demnach dasselbe für die menschlichen annehmen.

Später sind verschiedene Bestimmungen der Brechungsverhältnisse der brechenden ⁿ Theile des Auges mit dem dafür sehr geeigneten Refractometer von ABBE¹ ausgeführt worden. In diesem Instrumente sind zwei rechtwinkelige Prismen mit den Hypotenusenflächen aneinander gelegt, zwischen diese Flächen wird ein Tropfen der Substanz, die man untersuchen will, gebracht, und dann untersucht, unter welchem Winkel totale Reflexion eintritt. Diese tritt bekanntlich für Licht, das sich in einem stärker brechenden Medium bewegt, ein, wenn das Brechungsgesetz

$$\sin \alpha_1 = \frac{n_2}{n_1} \cdot \sin \alpha_2$$

erfordern würde, daß $\sin \alpha_1 > 1$ würde, was der Sinus eines reellen Winkels nicht kann. Die Grenze ist also gegeben, wo

$$\sin \alpha_2 = \frac{n_2}{n_1}$$

ABBE's Instrument erlaubt diesen Winkel genau zu messen, mit gleichzeitiger Compensation der Farbenzerstreuung und Messung der mittleren Dispersion. Man braucht für diese Messungen nur äußerst wenig der betreffenden Substanz.

Bestimmungen nach dieser Methode sind ausgeführt von den Herren SIGMUND FLEISCHER², HIRSCHBERG³, AUBERT und MATTHIESSEN⁴. Herr HIRSCHBERG hat besonders frische Augen benutzen können; er fand

für Kammerwasser: 1,337 (Max. 1,33799 — Min. 1,33705)
für Glaskörper 1,336 (Max. 1,33798 — Min. 1,33541)

Die Herren AUBERT und MATTHIESSEN fanden gemeinsam bei den Augen eines Mannes von 50 Jahren und eines Kindes von 2 Tagen, während das Brechungsverhältniß des destillirten Wassers, mit demselben Instrument bestimmt, gleich 1,3310 gefunden wurde:

	Mann		Kind	
	I.	II.	I.	II.
Hornhaut.	—	1,377	1,3721	—
Kammerwasser . . .	—	—	1,3338	—
Vordere Linsenkapsel	—	—	1,3831	1,3780
Hintere	1,3374	1,3376	1,3503	1,3572
Äußere Linsenschicht	1,3953	1,3967	} 1,3967	—
Mittlere	1,4087	1,4067		
Kern	1,4119	1,4093		
Glaskörper	—	1,3348	1,3340	

Experimentelle Bestimmung der Cardinalpunkte todter Krystallinsen.

Da aus der Gestalt und den Brechungsverhältnissen der einzelnen Schichten der 79 Krystallinse deren Brennweite nicht unmittelbar zu berechnen ist, so will ich hier die Resultate von directen Messungen der optischen Constanten zweier menschlicher Linsen anführen, welche ich etwa 12 Stunden nach dem Tode untersuchen konnte.

An der Luft trocknet und faltet sich die Oberfläche einer aus dem Auge genommenen Linse sehr bald, in Wasser quillt sie auf und wird trübe. Ich habe deshalb die todten Linsen während ihrer Untersuchung mit Glasfeuchtigkeit umgeben. Außerdem sind die Linsen außerordentlich nachgiebig gegen jeden Zug und Druck; so lange sie aber von

¹ E. ABBE. *Neue Apparate zur Bestimmung des Brechungs- und Zerstreuungsvermögens.* Jena 1874.

² S. FLEISCHER. *Neue Bestimmungen der Brechungsexponenten der durchsichtigen flüssigen Medien des Auges.* Inaug. Diss. Jena 1874.

³ J. HIRSCHBERG, *Archiv für Augen- und Ohrenheilkunde.* Bd. IV. Wiesbaden 1874.

⁴ H. AUBERT, *Grundsätze der Physiologischen Optik.* Leipzig 1876.

ihrer elastischen und sie sehr prall umschliessenden Kapsel umgeben sind, sind diese Formveränderungen vorübergehend. Man muß die Linsen während der Untersuchung also so lagern, daß sie keinem äußeren Zuge oder Drucke ausgesetzt sind. Ich that das

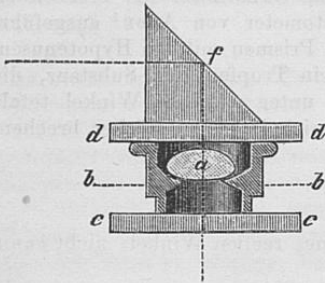


Fig. 55.

auf folgende Weise. In Fig. 55 ist ein Durchschnitt des kleinen Apparates, den ich dazu brauchte, in natürlicher Größe dargestellt. In der Mitte befindet sich ein hohles cylindrisches Stück aus Messing, welches im Inneren bei $b b$ eine horizontale, auf der oberen Seite concave und in der Mitte mit einer runden Oeffnung versehene Scheidewand hat. Ich benutzte dazu die Fassung eines der Objectivgläser eines älteren Mikroskops. Der untere Rand dieses Messingstücks wird auf die planparallele Glasplatte $c c$ aufgeklebt, aber so, daß sich keine Schicht Kitt von merklicher Dicke zwischen die unterste Rundung des Randes und die Glasplatte einschiebt. Nun

füllt man erst den unteren Hohlraum des Messingcylinders mit Glasfeuchtigkeit, legt dann die Krystalllinse, welche man vorsichtig und ohne Verletzung oder harte Berührung aus dem Auge genommen hat, mit ihrer platteren Seite auf das Diaphragma $b b$. Dann füllt man oben noch etwas Glasfeuchtigkeit nach, bis sie bis zum oberen Rande des Messinggefäßes steht, und deckt die zweite planparallele Glasplatte $d d$ darüber, so daß diese auch oben der Glasfeuchtigkeit eine gerade Oberfläche giebt. Da ich mein Ophthalmometer nicht bequem vertical stellen konnte, so setzte ich auf die Glasplatte $d d$ noch ein rechtwinkeliges, gleichschenkeliges Glasprisma f , welches das von unten her durch die Linse kommende Licht horizontal reflectirte. Das Ganze setzt man dann bequem auf den Körper eines Mikroskops, von dem man alle Gläser und die enge Blendung am unteren Theile entfernt hat, und bringt eine Messingplatte mit GRAVESAND'Schen Schneiden, deren Zwischenraum als optisches Object für die Krystalllinse gebraucht werden soll, einmal auf den Objecttisch des Mikroskops, und dann 80 wieder dicht unter die Glasplatte $c c$, zwischen sie und den oberen Rand des Körpers des Mikroskops. Zur Beleuchtung gebraucht man den Spiegel des Mikroskops, indem man ihn von unten her Licht durch den zwischen den Schneiden gelegenen Ausschnitt der Messingplatte werfen läßt. Mittels des Ophthalmometers mißt man nun die Größe des Bildes, welches die Krystalllinse von dem Ausschnitte der Messingplatte entwirft.

Zur Rechnung muß man die Entfernung des Ausschnitts zwischen den GRAVESAND'Schen Schneiden von der unteren Fläche der Platte $c c$ kennen. Diese Größe sei a_1 , wenn der Schirm auf dem Tische des Mikroskops liegt, und a_2 , wenn er dicht unter der Platte liegt. Je größer man a_1 und je kleiner man a_2 machen kann, desto bessere Resultate giebt der Versuch. Ferner muß man die Dicke der Platte $c c$ kennen, welche wir c nennen wollen, und wenigstens annähernd ihr Brechungsvermögen n_c , endlich die Entfernung b zwischen der oberen Fläche der Platte $c c$ und dem oberen Rande der Öffnung $b b$, und das Brechungsverhältniß des Glaskörpers gegen Luft n_2 . Ferner sei b_1 die Entfernung der GRAVESAND'Schen Schneiden von einander zu der Zeit, wo sie auf dem Tische des Mikroskops um a_1 entfernt von der Platte c lagen, β_1 die Breite des von der Krystalllinse entworfenen Bildes, ihres Zwischenraums, welche in diesem Falle eine negative Größe ist wegen der Umkehrung des Bildes, b_2 und β_2 die entsprechenden Größen bei der anderen Lage des Schirms, f die gesuchte Brennweite der Linse in Glasfeuchtigkeit, und x der Abstand ihres ersten Knotenpunktes von der Ebene des oberen Randes der Öffnung $b b$. So ergiebt sich aus dem, was über die Brechung in ebenen Platten § 9 Gleichung 3 e) und 6 c) gefunden ist, daß die Lichtstrahlen, wenn sie in der Glasfeuchtigkeit vor der Krystalllinse angekommen sind, einem Bilde von der Größe b_1 und b_2 entsprechen, welches in der Entfernung beziehlich $\left(n \cdot a_1 + \frac{n}{n_c} \cdot c + b + x \right)$ oder $\left(n \cdot a_2 + \frac{n}{n_c} \cdot c + b + x \right)$ liegt. Die Größe des Bildes β_1 oder β_2 wird nachher durch

die Brechung an den ebenen Flächen der oberen Glasplatte nicht weiter verändert. Wir haben also die Gleichungen:

$$\frac{\beta_1 - b_1}{\beta_1} = \frac{n \cdot a_1 + \frac{n}{n_c} \cdot c + b + x}{f}$$

$$\frac{\beta_2 - b_2}{\beta_2} = \frac{n \cdot a_2 + \frac{n}{n_c} \cdot c + b + x}{f}$$

Durch Subtraction erhält man:

$$\frac{\beta_1 - b_1}{\beta_1} - \frac{\beta_2 - b_2}{\beta_2} = \frac{n \cdot (a_1 - a_2)}{f},$$

woraus f zu finden ist:

$$f = \frac{n \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot (a_1 - a_2)}{b_2 \cdot \beta_1 - b_1 \cdot \beta_2},$$

und dann erhält man aus einer der beiden früheren Gleichungen auch x . Man vergesse bei der Rechnung nicht, daß β_1 , wenn a_1 grösser als die Brennweite ist, ein umgekehrtes Bild, also negativ ist. Die Gröfse x ist nicht unmittelbar gleich dem Abstände des Knotenpunktes von der vorderen Fläche der Linse zu setzen, sondern bedarf dazu noch einer kleinen Correction, weil die gekrümmte Fläche der Linse sich etwas unter die Ebene der Öffnung, auf deren Rändern sie ruht, herabwölbt. Wenn man den Durchmesser der Öffnung und den Krümmungsradius der Linse kennt, ist die Höhe des betreffenden Kugelabschnitts leicht zu berechnen.

Den Abstand des zweiten Knotenpunktes von der hinteren Fläche der Linse erhält man in derselben Weise, nachdem man die Linse umgekehrt hat.

Die kleine Gröfse $\frac{c}{n_c}$ kann man durch Beobachtungen mit dem Ophthalmometer bestimmen, indem man die Glasplatte cc , ähnlich wie sie hier zwischen dem Spalt und 81 der Krystallinse angebracht ist, zwischen diesen und eine kleine Glaslinse von bekannter Brennweite und bekannter Lage der Knotenpunkte bringt. In ähnlicher Weise kann auch die Gröfse b ermittelt werden. Dieselben Gleichungen, welche wir für die Ermittlung von x und f aufgestellt haben, können bei bekanntem x und f auch dienen, b oder $\frac{c}{n_c}$ zu ermitteln.

Die Krümmungshalbmesser für die Scheitel der Linse können entweder, wie oben angegeben ist, durch Spiegelung ermittelt werden, oder auch durch Brechung. Zu dem Ende läßt man die Linse in ihrem Messinggehäuse liegen, und entfernt nur den Theil der Glasfeuchtigkeit, welcher ihre obere Fläche bedeckt, und stellt nun entweder den Ausschnitt zwischen den GRAVESAND'schen Schneiden vor dem Prisma f , etwas seitlich von der Gesichtslinie des Ophthalmometers auf, und mißt die Gröfse seines Spiegelbildes, oder man läßt den Messingschirm mit den Schneiden auf dem Objecttische des Mikroskops liegen, und mißt das dioptrische Bild, welches jetzt entworfen wird. Wie die Messung des Spiegelbildchens zur Rechnung zu benutzen ist, ist schon oben angegeben. Für die dioptrische Messung mögen b_1 , β_1 und f die bisherige Bedeutung behalten, β_3 die Gröfse des Bildes bezeichnen, nachdem man die Glasfeuchtigkeit von der oberen Fläche der Linse entfernt hat, und y der Abstand des oberen Knotenpunktes von der oberen Fläche sein. (Dieser Abstand bezieht sich immer auf den Fall, wo die Linse in Glasfeuchtigkeit liegt.) Endlich sei R der Krümmungsradius im Scheitel der oberen Fläche. Dann kann R aus der Gleichung gefunden werden:

$$R \cdot \frac{n \cdot (\beta_1 - \beta_3)}{(n - 1) \cdot \beta_3} = f \cdot \frac{b_1 - \beta_1}{b_1} - y.$$

Ich habe für den eigenthümlichen Bau der Linse erwiesen, daß ihre Brennweite kürzer sei, als wenn sie ganz und gar die Dichtigkeit und das Brechungsvermögen ihres Kerns hätte. Wollte man also eine homogene Linse von gleicher Gestalt und Größe und gleicher Brennweite, wie der Krystallkörper ist, herstellen, so würde man dieser ein noch höheres Brechungsvermögen geben müssen, als selbst sein Kern hat. Dieses Brechungsvermögen einer imaginären gleichgestaltigen und gleichwerthigen homogenen Linse hat SENFF das totale Brechungsvermögen genannt. Es ist wohl zu unterscheiden von dem mittleren Brechungsvermögen, welches dem arithmetischen Mittel sämtlicher Schichten entspricht. Das totale ist im Gegentheile höher als das höchste Brechungsvermögen der dichtesten Theile der Linse. Ich gebe hier zunächst eine Zusammenstellung der von mir für menschliche Linsen gefundenen Werthe, die Lineardimensionen in Millimetern. Brennweite und Hauptpunkte beziehen sich auf den Fall, wo die Linse von Glasfeuchtigkeit umgeben ist. Die Krümmungshalbmesser sind durch Spiegelung bestimmt.

1) Brennweite	45,144	47,435
2) Abstand des ersten Hauptpunktes von der vorderen Fläche	2,258	2,810
3) Abstand des zweiten Hauptpunktes von der hinteren Fläche	1,546	1,499
4) Dicke der Linse	4,2	4,314
5) Krümmungshalbmesser im Scheitel der vorderen Fläche	10,162	8,865
6) Krümmungshalbmesser im Scheitel der hinteren Fläche	5,860	5,889
7) Totales Brechungsvermögen	1,4519	1,4414.

Form der Krystalllinse an lebenden Augen.

Ob aber Form und Brennweite todter Linsen denen des lebenden fernsehenden Auges gleich sind, ist mir durch Messungen, die ich an lebenden Augen ausgeführt habe, zweifelhaft geworden. Ich habe nämlich die Dicke der Linse an drei lebenden Personen zum Theil um mehr als 1/2 mm kleiner gefunden, als die kleinsten Werthe der Dicke sind, die man an todtten Linsen findet¹. Wie man die Entfernung der Pupille von der vorderen Hornhautfläche findet, ist in § 3 beschrieben. Dicht am Pupillarrande der Iris befindet sich auch die vordere Linsenfläche. Um die Dicke der Linse zu bestimmen, muß man also noch die Entfernung der hinteren Linsenfläche von der Hornhaut zu ermitteln suchen.

82

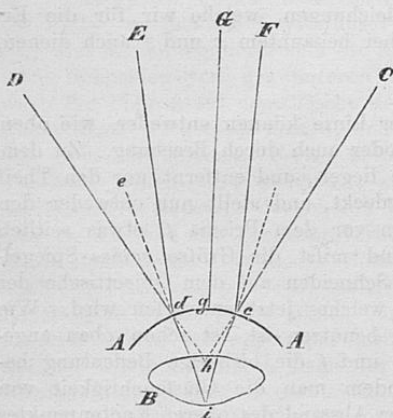


Fig. 56.

Es sei in Fig. 56 *AA* die Hornhaut, *B* die Linse. Es falle in der Richtung *Cc* Licht in das Auge, werde gebrochen an der Hornhaut und vorderen Linsenfläche, dann an der hinteren Linsenfläche in *i* reflectirt. Der zurückgeworfene Strahl trete bei *d* aus der Hornhaut und gehe fort in der Richtung *dD*, wo er das Auge des Beobachters trifft. Jetzt bringe der Beobachter sein Auge nach *C* genau an die Stelle des Lichts und das Licht nach *D* genau an die frühere Stelle seines Auges, so wird ein Lichtstrahl wieder genau auf demselben Wege, nur in umgekehrter Richtung *DdicC* vom Lichte zum Auge des Beobachters gehen, und es wird bei dieser zweiten Stellung wieder genau dieselbe Stelle der hinteren Linsenfläche das Licht zurückwerfen, wie bei der ersten. Indem man den Ort des Lichts und des Auges des Beobachters, den Ort des beobachteten

Auges, so wie den Fixationspunkt des letzteren durch passende Abmessungen bestimmt, erhält man die Winkel, welche die Linien *Cc*, *Dd* und die Gesichtslinie des beobachteten

¹ H. HELMHOLTZ, Graefe's Archiv für Ophthalmologie. Bd. I. (2.) S. 56.

Auges Gg mit einander bilden. Um die Punkte c und d auf der Hornhaut zu finden, bringt man, wenn das Auge des Beobachters in D steht, ein kleines Licht entfernt vom Auge in E so an, daß für den Beobachter der von der Hornhaut entworfene Reflex dieses Lichts mit dem von der hinteren Linsenfläche entworfenen Reflexe des Lichts C zusammenfällt. Dies geschieht, wenn der Strahl Ed nach D zurückgeworfen wird, wenn also die Halbirungslinie des Winkels EdD senkrecht auf der Hornhautfläche steht. Es sei ed diese Halbirungslinie. Hat man durch passende Abmessungen den Winkel EdD oder EdG bestimmt, so berechnet sich daraus leicht der Winkel, den ed mit Gg bildet, und daraus, wenn man die Form und Krümmung der Hornhaut schon gemessen hat, die Länge des Hornhautbogens, der zwischen beiden liegt, oder die Lage des Punktes d auf der Hornhaut. Eben so wird die Lage des Punktes c bestimmt.

Jetzt kennt man also die Lage der Punkte c und d , die Richtung der Linien Cc und Dd ; man verlängere beide, bis sie sich in h schneiden, so ist h der scheinbare Ort des spiegelnden Punktes der hinteren Linsenfläche, d. h. der Ort, wie er durch die Substanz der Linse und Hornhaut hin erscheint.

Die nöthigen Data zu diesen Bestimmungen bekommt man auf folgende Weise. ⁿ

Es wird, wie in *Fig. 15*, in einiger Entfernung vor dem beobachteten Auge A eine Scale aufgestellt. Symmetrisch zur Linie AB werden die beiden Stellungen des Ophthalmometers (von dem man aber nur das Fernrohr benutzt) in G_1 und G_2 construirt und bezeichnet, so daß man das Instrument leicht aus der einen in die andere bringen kann. Wenn das Fernrohr in G_1 steht, wird in G_2 ein Schirm mit einer Öffnung aufgestellt, durch welche eine große und helle Lampenflamme ihr Licht auf das Auge A wirft. Das Gesichtszeichen F wird so gestellt, daß die Axe der Hornhaut nach dem Punkte B gerichtet ist. Außerdem wird an der Scale verschiebbar noch ein kleiner Schirm mit einer engeren, durch ein blaues Glas verschlossenen Öffnung angebracht, hinter der ein Wachslichtchen steht. Die ganze Anordnung, wie sie dem beobachteten Auge erscheint, ist in *Fig. 57* dargestellt. F' ist das Gesichtszeichen, E der Schirm mit dem blauen Lichtchen. Man verschiebt E so lange, bis sich der Hornhautreflex des blauen Lichts mit dem Linsenreflex der großen Flamme deckt, und merkt den Theilstrich der Scale, wo E steht. Dann vertauscht man die Stellungen des Fernrohrs und der Lampe, und wiederholt dasselbe Verfahren.

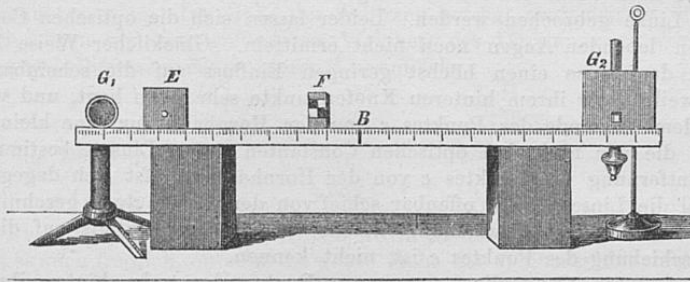


Fig. 57.

Die Orte der Hornhautbildchen, und den Durchschnittspunkt der Gesichtslinien des Beobachters im beobachteten Auge kann man ganz ebenso, wie ich es für die Iris beschrieben habe, bestimmen. Ich habe es für die folgenden Beobachtungen mit Berücksichtigung der Ellipticität der Hornhaut gethan.

Falls die Linse ein Rotationskörper wäre, dessen Axe genau mit der der Hornhaut zusammenfiel, müßte bei diesem Verfahren der spiegelnde Punkt der hinteren Linsenfläche, also auch sein scheinbarer Ort, der Durchschnittspunkt der Gesichtslinien des Beobachters, in der Axe der Hornhaut liegen. Meine Versuche zeigen, daß das nicht der Fall sei.

In dem Auge O. H. ist die Abweichung allerdings so gering, daß sie kleinen Beobachtungsfehlern in der Bestimmung der Hornhaut zugeschrieben werden könnte; aber in den beiden andern Augen ist sie dafür zu groß. Ich gebe im Folgenden die Ordinaten der scheinbaren Lage des reflectirenden Punktes c für die drei untersuchten Augen an. Als Abstand von der Axe der Hornhaut habe ich angegeben die Länge des Lothes, welches von c auf die Hornhautaxe gefällt ist, und als Abstand von der Hornhaut die Länge zwischen dem Fußpunkte des Lothes und dem Scheitelpunkte der Hornhaut. Die so gefundene Lage des Punktes c ist immer nur eine scheinbare, wie sie dem Beobachter durch die Linse und Hornhaut erscheint, indessen ist die Abweichung von der wirklichen Lage jedenfalls nicht sehr bedeutend, da die hintere Linsenfläche dem zweiten Knotenpunkte des Auges sehr nahe liegt. Die Brechung in der Hornhaut kann berechnet, und dadurch die Lage des Punktes c gefunden werden, wie sie einem in der wässrigen Feuchtigkeit stehenden Beobachter erscheinen würde. Die Bezeichnung scheinbare Lage in Luft und in wässriger Feuchtigkeit erklärt sich hiernach. Es sind die Resultate zweier Versuchsreihen angeben.

Scheinbare Lage des Punktes c der hinteren Linsenfläche.

		O. H.	B. P.	J. H.
Abstand von der Hornhaut	in Luft	{ 6,763 6,788	{ 7,013 6,993	{ 6,655 6,662
	in Hum. aq.	{ 6,899 6,932	{ 7,162 7,189	{ 6,979 6,989
Abstand von der Hornhautaxe nach der Nase zu	in Luft	{ 0,034 0,173	{ 0,190 0,236	{ 0,194 0,284
	in Hum. aq.	{ 0,026 0,133	{ 0,143 0,177	{ 0,146 0,213

Die scheinbare Lage des Punktes c , von der wässrigen Feuchtigkeit aus gesehen, ist nun immer noch nicht seine wahre Lage, da die von ihm kommenden Lichtstrahlen noch in der Linse gebrochen werden. Leider lassen sich die optischen Constanten der Linse an den lebenden Augen noch nicht ermitteln. Glücklicher Weise hat aber die Brechung in der Linse einen höchst geringen Einfluss auf die scheinbare Lage des Punktes c , weil dieser ihrem hinteren Knotenpunkte sehr nahe liegt, und wir brauchen deshalb an dem Abstände des Punktes c von der Hornhaut nur eine kleine Correction anzubringen, die wir nach den optischen Constanten todter Linsen bestimmen können. Die wahre Entfernung des Punktes c von der Hornhautaxe läßt sich dagegen nicht bestimmen, weil die Linsenflächen offenbar schief von der Hornhautaxe geschnitten werden, und wir die Größe dieser Abweichung, welche von großem Einfluss auf die scheinbare seitliche Verschiebung des Punktes c ist, nicht kennen.

Ein durch eine Convexlinse gesehener Punkt, der nahe hinter ihrem zweiten Knotenpunkte liegt, wird scheinbar vorgerückt um die Entfernung ihrer Knotenpunkte von einander, ein Theil dieser Verschiebung wird aber wieder dadurch aufgehoben, daß die Distanz des Bildes vom ersten Knotenpunkte nach hinten gerechnet, etwas größer ausfällt, als die wahre Entfernung des Punktes vom zweiten Knotenpunkte ist. Ist für eine in wässriger Feuchtigkeit liegende Linse die Entfernung der Knotenpunkte von einander d , die Entfernung des Punktes c vom hinteren Knotenpunkte a , und p die Brennweite der Linse, so ist die scheinbare Verschiebung x des Punktes c nach vorn, wenn man die höheren Potenzen von $\frac{a}{p}$ vernachlässigt, gleich

$$x = d - \frac{a^2}{p}$$

In LISTING's schematischem Auge ist für die in wässriger Feuchtigkeit liegende Linse:

$$\begin{aligned} d &= 0,203 \text{ mm} \\ a &= 1,424 \text{ „} \\ p &= 44,301 \text{ „} \\ x &= 0,157 \text{ „} \end{aligned}$$

Die Messungen an todtten Linsen (S. 102) ergaben:

$$\begin{aligned} a &= 1,546 & 1,499 \\ p &= 45,14 & 47,43, \end{aligned}$$

was mit LISTING's Annahmen hinreichend übereinstimmt; d konnte ich leider nicht genau genug bestimmen, weil sich in dieser sehr kleinen Größe die Fehler in der Bestimmung der Dicke der Linse und der Abstände der beiden Knotenpunkte von den betreffenden Linsenflächen addirten.

Wende ich den gefundenen Werth der Correction x auf die von mir durchgemessenen Augen an, (wie dies auszuführen, wird in § 12 beschrieben werden), so ergibt sich:

	O. H.	B. P.	J. H.	
Abstand vom Scheitel der Hornhaut	der hinteren Linsenfläche	7,172	7,232	7,141
	der Pupille	4,024	3,597	3,739
Dicke der Linse in mm:		3,148	3,635	3,402

Diese Werthe der Linsendicke sind kleiner, als man sie an todtten Linsen gefunden hat.

KRAUSE giebt an, an solchen $1\frac{3}{4}$ bis $2\frac{3}{8}$ par. Lin. (4,05 bis 5,4 mm) gefunden zu haben; ich selbst fand 4,2 und 4,3 mm. Nun wölbt sich die vordere Linsenfläche in der Pupille ein wenig, und ihre Mitte tritt deshalb etwas vor die Ebene des Kreises hervor, in der die Pupille ihr anliegt, und diese Wölbung könnte der Dicke der Linse noch zugerechnet werden. Die Höhe der Wölbung beträgt nach den in den Messungen an lebenden Augen von mir gefundenen Werthen des Durchmessers der Pupille und des Krümmungshalbmessers der vorderen Linsenfläche:

$$\begin{aligned} & \text{O. H.} & \text{B. P.} & \text{J. H.} \\ & 0,266 & 0,166 & 0,153 \end{aligned}$$

dann würde die Dicke der Linse:

$$\begin{aligned} & 3,414 & 3,801 & 3,555. \end{aligned}$$

Aber auch diese Werthe reichen noch nicht an die der todtten Linsen, und doch ist es auch fraglich, ob man die ganze Höhe der Wölbung hinzurechnen darf, da dem Rande der Pupille, da wo er der Linse anliegt, auch noch eine Dicke von einigen Hundertel Millimeter gegeben werden muss, um welche der von vorn sichtbare Rand von der Linsenfläche entfernt bleiben wird. Andererseits erscheint es unwahrscheinlich, dass bei diesen Messungen ein Fehler von einem halben Millimeter begangen sein sollte.

Auch neuere Messungen bestätigen dies Ergebniss. Herr A. v. REUSS¹ findet bei Emmetropen zwischen 3,5 bis 4,19 Linsendicke, bei Kurzsichtigen sogar nur 2,97 bis 3,68. Um die Reflexe zu verstärken hat er DRUMMOND'sches Licht, Herr ROSOW² vor ihm Sonnenlicht angewendet.

¹ A. v. REUSS, *Gräfe's Archiv für Ophthalm.* XXIII. (4). S. 241—243.

² B. ROSOW. *Gräfe's Archiv für Ophthalm.* XI. (2). S. 129.

83 Da der jüngere KRAUSE die Brechungsverhältnisse von Kalbslinsen unmittelbar nach dem Tode und 24 Stunden später merklich gleich gefunden hat, so ist es unwahrscheinlich, daß die Linse durch Aufnahme von Wasser sich verdicke. Dann müssten wir nämlich eine Abnahme des Brechungsvermögens erwarten. Dagegen erscheint es möglich, daß dieser Unterschied mit den Veränderungen der Linse beim Fern- und Nahesehen zusammenhängt, worauf wir unten in § 12 noch zurückkommen werden.

Lage der Cardinalpunkte des Auges.

Es bleibt noch übrig auseinander zu setzen, in wie weit sich bis jetzt die optischen Cardinalpunkte des Auges bestimmen lassen.

84 Nennen wir r den Krümmungsradius der Hornhaut, und n das Brechungsvermögen der wässrigen Feuchtigkeit, so ist die vordere Brennweite der Hornhaut nach § 9 Gleichung 3 a) und 3 b):

$$F_2 = \frac{r}{n-1},$$

die hintere Brennweite derselben:

$$F_3 = \frac{n \cdot r}{n-1},$$

Nach LISTING's Annahmen wird:

$$F_1 = 23\frac{9}{13}, \quad F_2 = 31\frac{9}{13}.$$

Nehmen wir nach den Beobachtungen von SENFF $r=7,8$, was auch ungefähr mit dem Mittel meiner Beobachtungen stimmt, und nach W. KRAUSE $n=1,342$, so wird:

$$F_1 = 22,81, \quad F_2 = 30,61.$$

LISTING giebt der Linse seines schematischen Auges das Brechungsverhältniß $\frac{16}{11}$, eine Dicke von 4 mm und Krümmungsradien von 10 und 6 mm. Nach § 9 Gleichung 13), 13 a) und 13 b) giebt dies für den Fall, wo die Linse in wässriger Feuchtigkeit liegt, die Brennweite 43,796 mm, den Abstand der Hauptpunkte von einander 0,2461 mm, den Abstand des vorderen Hauptpunktes von der vorderen Linsenfläche 2,3462, und den des hinteren von der hinteren Fläche 1,4077. Diese Annahmen stimmen sehr nahe überein mit den vorher angeführten Werthen, welche ich selbst an zwei Krystallinsen menschlicher Leichen durch directe Messung gefunden habe. Daß es bisher unmöglich sei, aus der Form und den Brechungsindices der verschiedenen Linsenschichten die Brennweite zu berechnen, ist oben auseinandergesetzt und namentlich geht aus dem über diese Brennweite aufgestellten Theorem hervor, daß es unrichtig ist, die Krystalllinse durch eine homogene Linse ersetzen zu wollen, welche die Form und das mittlere Brechungsvermögen derselben habe, wie das von den älteren Optikern meistens geschah, sondern daß im Gegentheile einer solchen Linse ein höheres Brechungsvermögen als das ihrer dichtesten Theile beigelegt werden müsse. Für die Linse eines Ochsen fand SENFF¹ für dieses totale Brechungsvermögen 1,539, während Grenzschicht und Kerntheil die Werthe 1,374 und 1,453 ergaben. Die aus meinen Messungen folgenden Werthe des totalen Brechungsvermögens sind niedriger (1,4519 und 1,4414), und entsprechen etwa nur dem Mittel der Werthe, welche W. KRAUSE für das Brechungsverhältniß des Kerns gefunden hat (Max. 1,4807, Min. 1,4252; Mittel 1,4541). LISTING hat vor meinen und W. KRAUSE's Untersuchungen damit sehr übereinstimmend $\frac{16}{11} = 1,4545$ gewählt.

Sollte sich der Unterschied zwischen todtten und lebenden Linsen, den meine Messungen ergaben, als constant herausstellen, so würde LISTING's schematisches Auge wahrscheinlich nur einem nahesehenden Auge entsprechen, und wir würden der Linse

¹ VOLKMANN Artikel „Sehen“ in R. WAGNER's *Handwörterbuch d. Physiologie*. Bd. III. S. 290.

eines fernsehenden Auges eine grössere Brennweite und geringere Dicke beilegen müssen.

Die Entfernung der vorderen Linsenfläche von der vorderen Hornhautfläche hat LISTING gleich 4 mm gesetzt, was dem von mir untersuchten kurzsichtigen Auge O. H. entspricht. Bei kurzsichtigen Augen pflegt überhaupt die vordere Augenkammer tiefer, die Iris flacher zu sein. Bei den übrigen beiden normalsichtigen Augen war die Entfernung geringer. Bei allen dreien lag die hintere Linsenfläche vor dem Krümmungsmittelpunkte der Hornhaut. Ich vermute deshalb, daß bei normalsichtigen Augen die Linse im Allgemeinen etwas näher der Hornhaut liegt, als LISTING angenommen hat. Jedenfalls würde aber auch der Einfluß dieser Abweichung sehr gering sein.

Wenn die Brennweiten der Hornhaut, die Lage der Hauptpunkte und die Brennweiten der Linse gegeben sind, sind die Cardinalpunkte des ganzen Auges nach § 9 Gleichung 11 a) bis 11 f) zu finden. Die Werthe, welche LISTING aus seinen Angaben berechnet hat, sind schon oben angegeben.

Von den Cardinalpunkten am wichtigsten für die Bestimmung der Lage der Bilder auf der Netzhaut sind uns die Knotenpunkte des Auges. Glücklicher Weise kann deren Lage jetzt nicht mehr vielem Zweifel unterworfen sein.

Derjenige Punkt, dessen Bilder die beiden Knotenpunkte sind, liegt nach den in § 9 angegebenen Methoden zur Auffindung dieser Punkte zwischen dem Knotenpunkte der Hornhaut, d. h. ihrem Krümmungsmittelpunkte und dem ersten Hauptpunkte der Linse, und seine Abstände von diesen beiden Punkten verhalten sich wie die kleinere Brennweite der Hornhaut zu der der Linse, also nahe wie 1 zu 2. In LISTING's schematischem Auge beträgt der Abstand des vorderen Hauptpunktes der Linse vom Mittelpunkt der Hornhaut, der bei ihm in die hintere Linsenfläche fällt, 1,627 mm, nach meinen Messungen an lebenden Augen kann die hintere Linsenfläche bis zu 1 mm vor dem Mittelpunkt der Hornhaut liegen; jene Entfernung würde also bis etwa 2,6 steigen können. Der Punkt also, dessen Bilder die beiden Knotenpunkte sind, würde 0,54 bis 0,87 mm vor dem Krümmungsmittelpunkte der Hornhaut liegen, ein, wie man sieht, sehr enges Intervall für seine Lage. Der erste Knotenpunkt ist sein durch die Hornhaut unterworfenes Bild. Bilder von Objecten, die sehr nahe vor dem Krümmungsmittelpunkte einer kugeligen brechenden Fläche liegen, liegen sehr wenig vor ihrem Objecte. Nehmen wir LISTING's Werthe für die Brennweiten der Hornhaut und Linse, so liegt bei seinen Annahmen der vordere Knotenpunkt 0,758 mm vor dem Mittelpunkt der Hornhaut. Wenn dagegen der Punkt, dessen Bild er ist, 0,87 mm vor dem Mittelpunkt der Hornhaut läge, würde der Knotenpunkt etwa 1,16 mm vor diesem liegen.

Wir werden daher schwerlich fehlen, wenn wir annehmen, daß in normalen Augen der vordere Knotenpunkt $\frac{3}{4}$ bis $\frac{5}{4}$ mm vor dem Mittelpunkt der Hornhaut liegt.

Zu erwähnen ist hier noch ein Versuch von VOLKMANN¹, auf experimentellem Wege am menschlichen Auge die Lage des Knotenpunktes zu finden. Ich habe oben erwähnt, daß, wenn die Strahlen eines Lichts von der äußeren Seite her in das Auge fallen, das Flammenbildchen namentlich bei blonden Personen im inneren Augenwinkel sichtbar werden kann. Er maß den Abstand dieses Bildes von der Hornhaut, während zugleich die Richtung der einfallenden Strahlen und der Gesichtslinie passend bestimmt wurde. Er zeichnete dann den horizontalen Querschnitt des menschlichen Auges, bestimmte in der Zeichnung den Punkt, wo das Netzhautbild durch die Sclerotica erschienen war, und legte durch diesen Punkt eine Linie, welche die Augenaxe unter demselben Winkel schnitt, den die einfallenden Strahlen mit der Gesichtslinie gebildet hatten. Den Durchschnittspunkt sah er als Knotenpunkt an. Er findet im Mittel von fünf Personen, daß die Knotenpunkte $3''$,97 (8,93 mm) hinter der Hornhaut liegen. Jedenfalls ist dieser Werth zu groß, weil die Knotenpunkte nach dieser Bestimmung hinter dem Krümmungsmittelpunkte der Hornhaut liegen würden, während sie nothwendig vor ihm liegen müssen. Die Abweichung in VOLKMANN's Resultate erklärt sich einmal daraus, daß er

¹ VOLKMANN, R. WAGNER'S *Handwörterbuch d. Physiologie*. Art. Sehen. S. 286.

den Unterschied zwischen Augenaxe und Gesichtslinie noch nicht kannte, und daraus, dafs die Lichtstrahlen bei diesem Versuche die brechenden Flächen des Auges unter sehr grossen Einfallswinkeln treffen, und die auf die Knotenpunkte und Hauptpunkte bezüglichen Sätze streng genommen nur für beinahe senkrechte Incidenz gelten. Auch BUROW¹ bemerkte deshalb bei der Wiederholung von VOLKMANN'S Versuchen über den Knotenpunkt in weissen Kaninchenaugen, dafs bei sehr schiefen Incidenzen die Netzhautbilder der Augenaxe näher fallen, als sie es sollten, wenn alle Richtungslinien sich in einem Punkte schnitten. Beide Ursachen müssen dazu beitragen, bei VOLKMANN'S Versuch den Abstand des Knotenpunktes von der Hornhaut etwas gröfser erscheinen zu lassen, als er wirklich ist.

86 Endlich will ich hier noch beschreiben, wie man die Centrirung des Auges, die Lage der Augenaxe und der Gesichtslinie untersuchen kann. Es dienen dazu die Spiegelbilder, welche die Hornhaut und die beiden Linsenflächen von einem vor dem Auge befindlichen hellen Lichte entwerfen.

Ueber das Aussehen dieser Spiegelbilder, und die Art, sie am besten zu beobachten, s. § 12. Es sei in *Fig. 58 cd* die Axe eines genau centrirten Auges, bei *a* das Auge des Beobachters, bei *b* ein Licht, es sei $ac = cb$ und *ac* senkrecht auf *cd*. Unter diesen Umständen würden, wie leicht ersichtlich ist, die in der Axe gelegenen Scheitel der drei reflectirenden Flächen, der Hornhaut, der vorderen und hinteren Linsenfläche, Licht, welches von *b* auf sie fällt, von *b* nach *a* reflectiren, da Alles auf beiden Seiten symmetrisch sein soll; und wenn das Auge und Licht ihren Platz tauschten, würde dasselbe wieder der Fall sein müssen, und dabei würden die drei reflectirenden Punkte in derselben perspectivischen Stellung zu einander bleiben. Namentlich würde in beiden Stellungen der Reflex von der vorderen Linsenfläche etwa in der Mitte zwischen den beiden anderen erscheinen müssen, da der scheinbare (durch die Hornhaut gesehene) Ort der vorderen Linsenfläche etwa in der Mitte zwischen der Hornhaut und dem scheinbaren Orte der hinteren Linsenfläche sich befindet.

Die Untersuchung des Auges in dieser Weise ist nun leicht auszuführen. Es sei *ab* ein horizontaler Mafsstab, an dessen Enden passende Oeffnungen für das Auge und das Licht angebracht sind. Dem untersuchten Auge *d* werde ein Platz in der Linie *cd* angewiesen, welche auf der Mitte von *ab* senkrecht steht, und man gebe ihm einen Fixationspunkt an einem beweglichen Körper *g*, den man so lange verschiebt nach oben und unten, nach rechts und links, bis der Beobachter den Reflex der vorderen Linsenfläche zwischen dem der Hornhaut und dem der hinteren Linsenfläche erblickt.² Dann vertausche er den Ort des Lichts und seines Auges, und versuche, ob er bei derselben Stellung des Fixationspunktes auch von der anderen Seite her die drei Reflexe in der

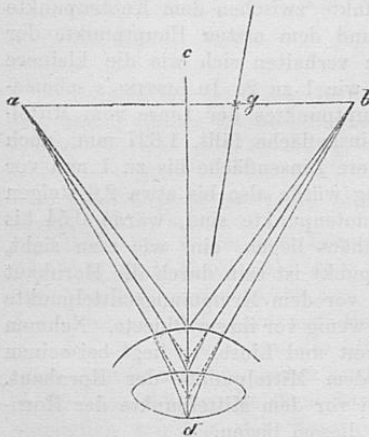


Fig. 58.

¹ A. BUROW, *Beiträge zur Physiologie d. menschl. Auges*. S. 56–60.

² Den Einwänden von Herrn EHRNROTH (*Pflüger's Archiv*. Bd. 35. S. 390.) gegenüber, bemerke ich, dass ganz kleine Aenderungen in der Stellung des Gesichtszeichens *g* das mittlere Bild auffällig verschieben. Für die Messung des Winkels *cdg* ist es daher fast indifferent, ob man die Abstände der Bilder gleich macht, oder den Abstand der äusseren im Verhältniss 12 : 10 theilt. Der genannte Autor hat nicht einmal die leicht auszuführende Probe auf seine Rechnungen gemacht, ob überhaupt irgend ein Theilungsverhältniss des Abstandes zu finden ist, bei dem sich ein lebendes Auge symmetrisch verhält.

angegebenen Stellung erblicken kann. Ist das beobachtete Auge richtig centrirt, so muß es offenbar möglich sein, eine Stellung des Fixationspunktes zu finden, welche die angegebene Forderung erfüllt.

Ich habe noch kein menschliches Auge gefunden, welches dem entsprochen hätte. Wenn von der einen Seite gesehen die drei Reflexe die richtige Stellung hatten, war dies nicht mehr der Fall von der anderen Seite her; man mußte dann das Fixationszeichen mehr oder weniger verschieben, um die richtige Stellung wieder hervorzubringen.

Bei den drei Augen, für welche ich das System von Messungen angestellt habe, mußte der Fixationspunkt sich immer etwas oberhalb der Ebene abd befinden. Die Gesichtslinie lag immer auf der Nasenseite der Linie cd . Ihre horizontale Projection bildete mit der Linie cd unter den angegebenen Umständen folgende Winkel:

Beobachter.	Auge.	Licht kommt	
		von der Schläfenseite	von der Nasenseite
HELMHOLTZ	O. H.	3° 47'	4° 57'
	B. P.	5° 6'	8° 12'
	J. H.	5° 43'	7° 44'
KNAPP ¹	J. S.	4° 50'	6° 48'
	H. S.	3° 40'	6° 22'
	F. S.	4° 36'	7° 56'
	H. Sch.	6° 4'	5° 39'

Daraus folgt, daß das menschliche Auge nicht genau centrirt ist. Da jedoch die Unterschiede der zusammengehörigen Winkel verhältnißmäßig klein sind, so erfüllt die Linie cd für die in den Versuchen gefundenen Stellungen der beobachteten Augen wenigstens annähernd die Ansprüche, welche man an eine Augenaxe zu machen hat, und man mag als Winkel zwischen der horizontalen Projection der Gesichtslinie und der Linie, welche einer Augenaxe am besten entspricht, das arithmetische Mittel aus den angeführten Winkeln nehmen. Diese Linie fällt nach meinen Untersuchungen auch nahe genug mit der Hornhautaxe zusammen, und geht durch den Mittelpunkt des Hornhautumfangs. 87

Derjenige, welcher zuerst eine klare Vorstellung von der Brechung der Strahlen im Auge und von der Entstehung und Lage des Netzhautbildchens gehabt hat, ist KEPLER. Vor ihm hatte allerdings schon MAUROLICUS die Krystalllinse des Auges mit einer Glaslinse verglichen, und behauptet, daß sie die Strahlen nach der Axe hin breche, aber er läugnete, daß auf der Netzhaut ein umgekehrtes Bild entworfen werde, weil wir ja sonst Alles verkehrt sehen müßten. Auch PORTA, der Erfinder der *Camera obscura*, verglich das Auge mit einer solchen, meinte aber, daß die Bilder auf der Krystalllinse entworfen würden. Erst KEPLER, der überhaupt die Grundsätze der Theorie der optischen Instrumente aufgefunden hat, läßt auf der Netzhaut ein umgekehrtes optisches Bild entstehen, und stellt als Bedingung des deutlichen Sehens hin, daß die Strahlen eines leuchtenden Punktes auf einen Punkt der Netzhaut vereinigt werden. KEPLER'S Theorie wurde noch

¹ H. KNAPP, *Gräfe's Archiv f. Ophthalm.* VI. (2) S. 8.

weiter ausgeführt durch den berühmten Jesuiten SCHEINER¹, der den Bau des Auges, die Brechung in den Feuchtigkeiten weiter untersuchte. Er bewies, daß die optischen Bilder auf der Netzhaut entworfen werden, indem er an Augen von Thieren die Netzhaut hinten frei legte. An einem menschlichen Auge stellte er diesen Versuch 1625 zu Rom an. Die brechende Kraft der wässrigen Flüssigkeit setzt er der des Wassers gleich, die Linse dem Glase, den Glaskörper zwischen beide. HUYGENS² endlich verfertigte eine künstliche Nachbildung des Auges, an der er die wesentlichsten Vorgänge des Sehens, den Nutzen der Brillen u. s. w. auseinandersetzte.

Die Theorie KEPLER'S behielt von nun an ziemlich allgemeine Anerkennung, wenn auch noch einzelne Liebhaber paradoxer Theorien sich in Widersprüchen dagegen gefielen. So N. TH. MÜHLBACH³ und CAMPBELL⁴, welche die Existenz des Netzhautbildchens läugnen, LEHOT⁵, der im Glaskörper ein räumliches Bild der Gegenstände entstehen läßt. PLAGGE⁶ läßt das Auge wie einen Spiegel wirken, und hält das durch Spiegelung auf der Hornhaut entstehende Bildchen für das Object des Sehens. J. READE⁷ stimmt ihm bei und läßt es durch die Nerven der Hornhaut empfinden. MAYER⁸ widerlegt die Ansicht von PLAGGE, stellt aber eine ebenso wunderliche auf, daß die Netzhaut als Hohlspiegel wirke. Ebenso läßt ANDREW HORN⁹ das Bild gegen den Glaskörper reflectiren und von hier aus auf den Sehnerven wirken.

Was die Lage der optischen Cardinalpunkte betrifft, so erhob sich zunächst eine Schwierigkeit für den hinteren Brennpunkt, weil nach der Rechnung, die auf die gemessenen Dimensionen und Brechungsverhältnisse des Auges gestützt war, dieser Punkt hinter die Netzhaut zu fallen schien. Der Grund davon lag darin, daß man für die Krystalllinse das mittlere Brechungsverhältniß ihrer einzelnen Schichten wählen zu müssen glaubte¹⁰. VALLÉE¹¹ glaubte deshalb annehmen zu müssen, daß das Brechungsverhältniß des Glaskörpers von vorn nach hinten zunehme. PAPPENHEIM¹² will wirklich solche, wenn auch sehr kleine Unterschiede durch den Versuch gefunden haben. Ueber die Lage der Knotenpunkte des Auges herrschte vor den theoretischen Arbeiten von GAUSS einige Verwirrung unter Physikern und Physiologen, weil die Theorie der optischen Instrumente bis dahin sich ausschließlich mit Systemen brechender Flächen beschäftigt hatte, deren Entfernung von einander vernachlässigt werden konnte, wie das z. B. bei den Objectivgläsern der Fernröhre der Fall war. Im Auge ist die Entfernung der 88 brechenden Flächen von einander im Vergleich zur Brennweite des ganzen Systems aber ziemlich beträchtlich, und wegen der mangelnden Ausbildung der Theorie wußte man die Fragen, auf die es ankam, nicht scharf zu stellen. Man suchte lange nach dem Punkte, der im Auge dem optischen Mittelpunkte der Glaslinsen entspräche und dadurch charakterisirt würde, daß der durch ihn gegangene Strahl ungebrochen durch die Augenmedien ginge. Wenn wir uns beide Knotenpunkte in einen zusammenzuziehen erlauben, so würde dieser dem gesuchten Punkte entsprechen. Man verwechselte namentlich auch diesen Punkt mit demjenigen Punkte, in welchem sich Linien schneiden, welche durch die im Gesichtsfelde sich deckenden Punkte verschieden entfernter Gegenstände gelegt sind. Der letztere, den wir Kreuzungspunkt der Visirlinien nennen wollen, ist, wie wir im nächsten Paragraphen zeigen werden, der Mittelpunkt des von der Hornhaut

¹ C. SCHEINER, *Oculus*. Inspruck 1619.

² C. HUYGENS, *Dioptica in Opera posthuma*. Lugduni 1704. p. 112.

N. TH. MÜHLBACH, *Inquisitio de visus sensu*. Vindob. 1816.

⁴ CAMPBELL, *Annals of philosophy*. X. 17. — *Deutsches Archiv*. IV. 110.

⁵ LEHOT, *Nouvelle Théorie de la Vision*. Paris 1825.

PLAGGE, *Hecker's Annalen*. 1830. S. 404.

J. READE, *Annals of philos.* XV. 260.

⁸ MAYER, MÜNCKE Art. Gesicht. in GEHLER'S *Wörterbuch*. Das dortige Citat ist falsch.

⁹ A. HORN, *The seat of vision determined*. London 1813.

¹⁰ L.F. MOSER in *Dove's Repertorium*. V. 337—349*. — J.D. FORBES, *Proc. Edinb. Roy. Soc.* 1849. Dec. p. 251.

¹¹ L. L. VALLÉE, *Comptes rendus*. 1845. XIV. 481.

¹² PAPPENHEIM, *Comptes rendus*. XXV. 901.

entworfenen Bildes der Pupille, und wesentlich vom Knotenpunkte verschieden. MUNCKE¹ identificirt beide Punkte und verlegt sie in die Mitte der Linse, BARTELS² dagegen in das Centrum der Hornhaut. VOLKMANN³ nennt den Punkt, wo sich Linien, die von einzelnen Punkten der Netzhautbilder nach den entsprechenden Bildern des Objects gezogen werden, schneiden, Kreuzungspunkt der Richtungsstrahlen, später, nach MILE's Einwendungen, der Richtungslinien. Er zeigt experimentell an Augen weisser Kaninchen, dafs wirklich alle Richtungslinien in einem Punkte sich schneiden, und bestimmt die Lage dieses Punktes, welcher zwischen beide Knotenpunkte fallen mufs, für das Kaninchenaug. Er findet, dafs derselbe hinter die Linse fällt. Er versuchte denselben Punkt nach einer anderen Methode am lebenden menschlichen Auge zu finden. Zwei 6 Zoll vom Auge entfernte Haarvisire werden durch zwei dem Auge nähere Diopter betrachtet, und letztere so eingestellt, dafs die Haare gleichzeitig in der Mitte der Diopteröffnungen erscheinen. Jedes Haar mit der zugehörigen Diopteröffnung, durch eine gerade Linie verbunden, giebt eine Visirlinie. VOLKMANN würde also den Kreuzungspunkt der Visirlinien im Auge haben finden können, wenn die von ihm beobachteten Personen im Stande gewesen wären, gleichzeitig und ohne Bewegung des Auges beide Haare in ihren Dioptern zu sehen. Dies ist aber auferordentlich schwer, weil man dann nur eines direct sehen kann, und das andere durch indirectes Sehen auf den Seitentheilen der Netzhaut erkennen mufs. Die Experimentirenden haben deshalb ohne Zweifel die beiden Diopter nach einander direct betrachtet, und ihre Visirlinien schnitten sich im Drehungspunkte des Auges, den VOLKMANN demzufolge für identisch mit dem Kreuzungspunkt der Richtungslinien erklärte.

MILE⁴, KNOCHENHAUER⁵ und STAMM⁶ stritten gegen VOLKMANN's Folgerungen. Ersterer zeigte, dafs Richtungslinien und Visirlinien nicht nothwendig identisch seien, und erklärte den Mittelpunkt der Hornhaut für den Kreuzungspunkt der Richtungslinien, weil er die Brechung in der Linse glaubte vernachlässigen zu dürfen. Daraus folgert er denn, dafs die Richtungslinien nicht nothwendig durch die Mitte eines Zerstreungskreises zu gehen brauchen, welcher im Auge von einem nicht deutlich gesehenen Objecte entworfen wird. KNOCHENHAUER suchte MILE's Beweis, dafs das Decken der Bilder im Gesichtsfelde unabhängig sei von den Richtungslinien, zu vereinfachen, und vermeidet dabei MILE's bei dem damaligen Stande der theoretischen Kenntnisse allerdings bedenkliche und in der That nur annähernd richtige Voraussetzung, dafs der Kreuzungspunkt der Richtungslinien für verschiedene Objectabstände gleich sei. Auch BUROW⁷ widerlegte VOLKMANN's Folgerungen, benutzte dessen Methode, um den Drehpunkt des Auges zu bestimmen, und schlug einen neuen Weg ein, den Kreuzungspunkt der Richtungslinien zu bestimmen, der aber aus einem von LISTING später aufgedeckten Grunde auch nicht zum Ziele führte.

MOSER⁸ war der Erste, der die theoretischen Arbeiten von GAUSS⁹ und BESSEL¹⁰ auf das Auge anwendete, und aus den bis dahin ausgeführten Bestimmungen der Form der brechenden Flächen und der Brechungsverhältnisse die Lage der beiden Knotenpunkte, die er übrigen Hauptpunkte nennt, berechnete. Die Werthe, welche er für die Entfernung dieser Punkte von der Hornhaut fand, waren 3,19 und 3,276 Par. Lin. (7,18 und 7,37 mm). Da er aber als Brechungsverhältnifs der Krystalllinse BREWSTER's Mittelwerth 1,3839 angenommen hatte, und die Strahlen ferner Lichtpunkte sich dabei erst

¹ MUNCKE, GEHLER's *physik. Wörterbuch* neu bearb. Leipzig 1828. Art. Gesicht. Bd. IV. 2. S. 1434*.

² E. D. A. BARTELS, *Beiträge zur Physiol. d. Gesichtsinns*. Berlin 1834. S. 61.

³ A. W. VOLKMANN, *Neue Beiträge zur Physiol. d. Gesichtsinns*. Leipzig 1836. Kap. IV. — *Poggendorff's Ann.* XXXVII. 342.

⁴ J. MILE, *Poggendorff's Ann.* XLII. 37—71. 235—263*. Dagegen A. W. VOLKMANN, *Pogg. Ann.* XLV. 207—226*.

⁵ K. W. KNOCHENHAUER, *Pogg. Ann.* XLVI. 248—258*.

⁶ W. STAMM, *Pogg. Ann.* LVII. 346—382*.

⁷ A. BUROW, *Beiträge zur Physiologie u. Physik d. menschl. Auges*. Berlin 1841. S. 26—93.

⁸ L. F. MOSER, *Dove's Repertorium der Physik*. V. 337 u. 373.

⁹ C. F. GAUSS, *Dioptrische Untersuchungen*. Göttingen 1841.

¹⁰ F. W. BESSEL, *Astronomische Nachrichten*. XVIII. Nr. 415.

hinter der Netzhaut vereinigten, glaubte er den Radius der Hornhaut verkleinern zu müssen von 3''',39 auf 2''',88, und berechnete danach noch andere Werthe für den Abstand der Knotenpunkte von der Hornhaut, nämlich 2''',835 und 2''',890 (6,38 und 6,50 mm).

LISTING¹ erörterte die Eigenschaften der Haupt- und Knotenpunkte (welchen letzteren er den Namen gab) in ihrer Beziehung zum Auge, gab angenäherte Werthe für ihre Lage, und hob namentlich hervor, daß der Brechungscoefficient der Linse, wenn man diese sich homogen denke, höher gesetzt werden müsse als der ihres dichtesten Theils. VOLKMANN² machte dann noch den schon oben erwähnten Versuch, die Lage der Knotenpunkte im lebenden menschlichen Auge experimentell zu bestimmen. Endlich gab LISTING³ neben einer vollständigen mathematischen Theorie eine Berechnung der Zahlenwerthe nach den besten bis dahin ausgeführten Messungen.

§ 11. Zerstreungsbilder auf der Netzhaut.

Wenn Licht von einem leuchtenden Punkte in das Auge fällt, so bildet dasjenige, welches durch die kreisförmige Pupille hindurchgegangen ist, hinter der Pupille einen Strahlenkegel, dessen Basis kreisförmig und nach vorn, dessen Spitze nach hinten gekehrt ist, und dem Bilde des leuchtenden Punktes entspricht. Jenseits ihres Vereinigungspunktes divergiren die Strahlen wieder.

Es sei in *Fig. 59 a* der leuchtende Punkt, *b, b''*, die Pupille, *c* der Convergenzpunkt der Strahlen, *c d*, die Verlängerung des Strahles *b, c*, ebenso *c d''*, die Verlängerung

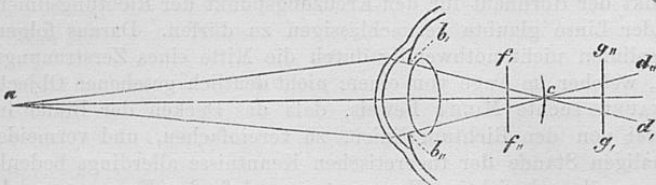


Fig. 59.

von *b, c*. Wenn der Vereinigungspunkt der Strahlen gerade auf die Fläche der Netzhaut trifft, so beleuchtet der einzelne leuchtende Punkt *a* nur einen einzelnen Punkt *c* der Netzhaut, und es wird ein scharfes Bild des leuchtenden Punktes entworfen. Wenn aber die Netzhaut vor oder hinter dem Vereinigungspunkte der Strahlen, etwa in *f, f''*, oder in *g, g''*, von dem Strahlenkegel getroffen würde, so würde nicht bloß ein einzelner Punkt, sondern eine dem kreisförmigen Durchschnitte des Strahlenkegels entsprechende Kreisfläche der Netzhaut erleuchtet werden. Man nennt einen solchen von dem Licht eines leuchtenden Punktes außerhalb des Auges beleuchteten Kreis der Netzhaut einen Zerstreungskreis. Die Kreisform entspricht, wie aus dem Gesagten erhellt, der kreisförmigen Gestalt der Pupille. Wird deren Form oder die Grundfläche des einfallenden Lichtkegels geändert, was namentlich auch dadurch geschehen kann, daß man einen Schirm mit einer beliebig gestalteten kleinen Öffnung von kleinerem Durchmesser als die Pupille dicht

¹ J. LISTING. *Beitrag zur physiologischen Optik*. Göttingen 1845.

² J. VOLKMANN, R. WAGNER'S *Handwörterbuch d. Physiologie*. Art. Sehen. S. 286*.

³ J. LISTING, R. WAGNER'S *Handwörterbuch der Physiologie*. Art. Dioptrik des Auges.

vor die Hornhaut bringt, so erhalten auch die Zerstreuungsfelder eine entsprechende andere Form, welche, auf den mittleren Theilen der Netzhaut wenigstens, der Grundfläche des Strahlenkegels geometrisch ähnlich ist. Sehr kleine Zerstreuungsbilder im Auge, welche in geringer Entfernung vom Vereinigungspunkte der Strahlen auf der Netzhaut entworfen werden, zeigen auffallende Abweichungen von diesen Regeln, wovon wir in § 14 weiter handeln werden.

Objectiv kann man das Entstehen der Zerstreuungsbilder leicht nachahmen, indem man eine Sammellinse aufstellt, vor ihr in einiger Entfernung ein kleines Licht, oder besser einen Schirm mit einer engen Öffnung, durch welche ein Licht scheint, und das Bild der Lichtquelle hinter der Linse auf einem weißen Papiere auffängt, welches man der Linse bald nähert, bald von ihr entfernt. Dabei sieht man, daß nur in einer gewissen Entfernung von der Linse das Bild des Lichtpunktes scharf gezeichnet und punktförmig ist, sonst sich zu lichten Kreisen ausdehnt.

Bringt man vor der Linse als Object eine helle Linie an, z. B. einen schmalen Spalt in einem dunklen Schirme, hinter welchem ein Licht steht, so decken sich die Zerstreuungskreise der einzelnen hellen Punkte dieser Linie, wie in *Fig. 60 b* angedeutet ist, theilweise, und es erscheint statt der scharfen Linie *a* eine helle Figur ähnlich der *c*.

Wird eine scharf begrenzte gleichmäßig helle Fläche in einem Zerstreuungsbilde abgebildet, so bleibt die Mitte der Fläche in unveränderter Helligkeit, die Ränder aber erscheinen verwaschen, so daß an ihnen die Helligkeit der Mitte der Fläche allmähig in die Helligkeit des umgebenden Grundes übergeht.

Dergleichen Zerstreuungsbilder können nun auch im Auge entworfen werden. Allerdings können wir nicht die Netzhaut willkürlich hin- und herücken gleich dem Papierschirme bei der beschriebenen objectiven Darstellung der Zerstreuungsbilder, aber wir können den leuchtenden Punkt dem Auge nähern und ihn davon entfernen, so daß sein Bild im Glaskörper vor- und zurückweicht. Wie bei einem jeden optischen Systeme von kugeligen brechenden Flächen liegen die Bilder verschieden entfernter Gegenstände auch beim Auge in verschiedenen Entfernungen von den brechenden Flächen. Das Bild eines unendlich weit entfernten hellen Punktes liegt in der hinteren Brennebene des Auges, das Bild eines näheren leuchtenden Punktes hinter der Brennebene. Wenn also eines von diesen Bildern auf die Netzhaut fällt und scharf gezeichnet ist, so bildet das andere nothwendig einen Zerstreuungskreis. Daraus folgt:

Wir können verschieden weit vom Auge entfernte Gegenstände nicht gleichzeitig deutlich sehen.

Um sich davon zu überzeugen, halte man in der Entfernung von etwa 92 6 Zoll vor dem Auge einen Schleier oder ein anderes durchsichtiges Gewebe, und dahinter in etwa 2 Fufs Entfernung ein Buch, und schliesse ein Auge,

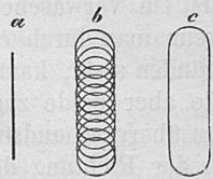


Fig. 60.

so wird man sich leicht überzeugen, daß man es in seiner Gewalt hat, nach einander bald die Fäden des Schleiers, bald die Buchstaben des Buches zu betrachten und deutlich zu sehen, daß aber die Buchstaben undeutlich werden, während man die Fäden des Schleiers betrachtet, und daß der Schleier nur noch als eine leichte gleichmäßige Verdunkelung des Gesichtsfeldes erscheint, während man die Buchstaben fixirt. Wenn man, ohne die Richtung des Auges zu verändern, bald den näheren, bald den ferneren Gegenstand betrachtet, fühlt man bei jedem solchen Wechsel, daß das Auge eine gewisse Anstrengung macht, um den Wechsel zu Stande zu bringen.

Denselben Versuch kann man mannigfach variiren. Man wende sich nach einem Fenster und halte etwa 6 Zoll vor dem Auge senkrecht eine Nadel, so daß sie einen der horizontalen Stäbe des Fensters kreuzt, so kann man entweder die Nadel fixiren, während dabei der Stab des Fensterkreuzes als verwaschener dunkler Streifen erscheint, oder das Fensterkreuz und die Gegenstände der Landschaft draussen fixiren, während die Nadel nur noch als ein verwaschener dunkler Streifen im Gesichtsfelde erscheint. Ebenso, wenn man durch ein Loch von 1 bis 2 Linien Durchmesser nach fernem Gegenständen sieht, kann man bald diese, bald die Ränder des Loches scharf sehen, nie aber beide zugleich. Indessen ist der Versuch in seiner ersten Gestalt am überraschendsten, und dabei zugleich jeder Verdacht, daß eine Änderung in der Richtung der Sehaxe von Einfluß sei, am besten beseitigt.

Bei allen diesen Versuchen überzeugt man sich, daß, wenn man auch nicht gleichzeitig zwei verschieden entfernte Gegenstände deutlich sehen kann, dies doch gelingt, indem man sie nach einander betrachtet, und daß man willkürlich bald den einen, bald den anderen deutlich, mit scharf begrenzten Umrisen erblicken kann.

Die eigenthümliche Veränderung, welche im Zustande des Auges vor sich geht, um bald ferne, bald nahe Gegenstände deutlich zu sehen, nennt man die Accommodation oder Adaptation des Auges für die Entfernung des Objects.

Für sehr ferne Objecte kann sich die Entfernung des Objects sehr beträchtlich verändern, ohne daß die Entfernung seines optischen Bildes von den Hauptpunkten des Auges sich merklich ändert. Wenn ein Auge für unendliche Entfernung accommodirt ist, so sind die Zerstreungskreise auch für Objecte von etwa 12 Meter Entfernung immer noch so klein, daß keine merkliche Undeutlichkeit des Bildes entsteht. Ist aber das Auge für einen nahen Gegenstand accommodirt, so erscheinen Gegenstände in sehr kleinen Distanzen vor oder hinter jenem schon undeutlich. Den Theil der Gesichtslinie, in welchem die bei einem gegebenen Accommodationszustande des Auges ohne merkliche Undeutlichkeit sichtbaren Objecte liegen, hat J. CZERMAK die Accommodationslinie genannt. Die Länge dieser Accommodationslinien ist desto größer, je weiter ihr Abstand vom Auge ist, und für einen sehr großen Abstand unendlich groß.

Von dem angegebenen Verhalten kann man sich leicht überzeugen, wenn man vor einem bedruckten Blatte in der Entfernung eines oder einiger Zolle ⁹³ eine Spitze als Fixationspunkt befestigt. Nähert man sich mit dem Auge der Spitze, so weit man sie deutlich sehen kann, und accommodirt das Auge für die Spitze, so erscheinen die Buchstaben undeutlich: je weiter man sich aber entfernt, immer das Auge für die Spitze accommodirend, desto deutlicher werden sie.

Eben weil die Zerstreuungskreise ferner Gegenstände sehr klein sind, wenn das Auge für andere ferne Gegenstände accommodirt ist, ist es auch möglich zu visiren, d. h. zu erkennen, ob verschieden entfernte Punkte an einer Stelle des Gesichtsfeldes liegen. Streng genommen kann man immer nur einen der beim Visiren betrachteten Punkte deutlich sehen, die anderen in größeren und kleineren Zerstreuungskreisen. Eine genaue Deckung zweier Punkte nehmen wir an, wenn der deutlich gesehene Punkt in der Mitte des Zerstreuungsbildes des anderen liegt. Eine Linie, welche durch zwei sich deckende Punkte gezogen ist, nennen wir Visirlinie. Die Visirlinien kreuzen sich in einem Punkte des Auges, nämlich im Mittelpunkte des von der Hornhaut entworfenen Bildes der Pupille, dem Kreuzungspunkte der Visirlinien.

Dafs bei der Accommodation nicht blos, wie mehrere Physiologen früher annahmen, die Art, wie das Netzhautbildchen empfunden wird, sich verändere, sondern dafs das optische Bild auf der Netzhaut selbst Veränderungen erleide, läfst sich am unzweifelhaftesten bei der Untersuchung eines lebenden Auges mit dem Augenspiegel nachweisen. Durch dieses Instrument, welches in § 16 beschrieben werden wird, kann man den Hintergrund des Auges, also die Netzhaut mit ihren Gefäfsen und die auf ihr entworfenen Bilder, deutlich sehen. Läfst man das beobachtete Auge einen Gegenstand in einer gewissen Entfernung fixiren, so findet man, dafs das Bild eines Lichtes, welches in derselben Entfernung steht, auf der Netzhaut ganz scharf entworfen wird, während man in dem hellen Grunde des Bildes auch die Gefäfsen und sonstigen anatomischen Einzelheiten der Netzhaut deutlich sieht. Wenn man aber das Licht sehr nähert, wird sein Bild undeutlich, während die Einzelheiten des Gewebes der Netzhaut deutlich bleiben. Die Versuche, die Veränderungen der Bilder an todtten Augen, denen man den hinteren Theil der Sclerotica und Chorioidea weggenommen hatte, oder an Augen weifser Kaninchen, deren Sclerotica sehr durchscheinend ist, zu sehen, sind meist gescheitert, weil unter diesen Umständen die Bilder überhaupt nicht mehr genau genug sind, um kleine Veränderungen an ihnen wahrzunehmen. Auch für das lebende Auge sind nur an verhältnifsmäfsig feinen Gegenständen die Veränderungen des Bildes bei veränderter Adaptation auffällig. Größere Gegenstände erkennen wir auch bei unpassender Accommodation noch ihrer Form nach. In dem Netzhautbilde eines todtten Auges erscheinen aber überhaupt nur noch größere Objecte, die feineren sind verwischt, wie man so gleich erkennt, wenn man es künstlich vergrößert, so dafs die Bilder dem

Beobachter in ähnlicher Gröfse erscheinen, wie sie dem beobachteten Auge, als es lebte, erschienen waren.

Eine noch nähere Erläuterung der Accommodationserscheinungen und der verschiedenen Lage des Vereinigungspunktes der Strahlen zur Netzhaut giebt der SCHEINER'sche Versuch. Man steche durch ein Kartenblatt mit einer Nadel zwei Löcher, deren Entfernung kleiner ist als der Durchmesser der Pupille, und blicke nun durch die beiden Löcher nach einem feinen Gegenstande hin, der sich dunkel auf hellem Grunde oder hell auf dunklem Grunde scharf abzeichnet, z. B. nach einer Nadel, die man vor den hellen Hintergrund des Fensters hält, und zwar vertical, wenn die Löcher des Kartenblatts horizontal neben einander liegen, dagegen horizontal, wenn letztere vertical übereinander stehen. Fixirt man nun die Nadel selbst, so sieht man sie einfach; fixirt man dagegen einen näheren oder ferneren Gegenstand, so erscheint sie doppelt. Schiebt man dann von der Seite her einen Finger über das Kartenblatt, so dafs er eines der Löcher verdeckt, so findet man in dem Falle, wo das Bild der Nadel einfach ist, keine andere Veränderung, als dafs das Gesichtsfeld dunkler wird. Sieht man dagegen die Nadel doppelt, so verschwindet beim Verdecken der Oeffnung eines der Doppelbilder, während das andere unverändert stehen bleibt, und zwar verschwindet, wenn man einen ferneren Gegenstand, als die Nadel ist, fixirt, das linke Bild der Nadel beim Verdecken des rechten Loches; wenn man aber das Auge für einen näheren Gegenstand eingerichtet hat, verschwindet das rechte Bild beim Verdecken des rechten Loches. Hat man sich noch nicht genügend geübt, das Auge für die Nähe und Ferne zu accommodiren, ohne dafs man einen entsprechenden Fixationspunkt hat, so stelle man zwei Nadeln hinter einander vor einem hellen Hintergrunde auf, die eine in 6 Zoll, die andere in 2 Fufs Entfernung, die eine horizontal, die andere vertical, und fixire die eine, um die Doppelbilder der anderen zu sehen, wobei man natürlich die Löcher des Kartenblatts stets quer gegen die Richtung der Nadel stellen mufs, welche doppelt erscheinen soll.

Macht man drei Löcher in ein Kartenblatt, welche nahe genug zusammenstehen, um gleichzeitig vor die Pupille gebracht zu werden, so erscheinen

drei Bilder der Nadel. Haben die Löcher die Stellung wie in *Fig. 61 a*, so erscheinen bei der Accommodation für einen näheren Gegenstand drei Nadeln in der Stellung wie bei *b*, so dafs ihre Köpfe die Stellung der Löcher in gleichem

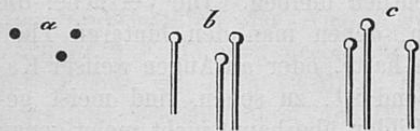


Fig. 61.

Sinne wiedergeben. Bei der Accommodation für einen ferneren Gegenstand erscheinen die Nadeln in der Stellung *c*, so dafs ihre Köpfe ein umgekehrtes Bild von der Stellung der Löcher geben. Ganz dieselben vielfachen Bilder zeigen sich, wenn man einen hellen Gegenstand auf dunklem Grunde, eine Oeffnung eines dunklen Schirms, durch welche Licht fällt, oder ein Nadelköpfchen, welches Sonnenlicht reflectirt, betrachtet.

Die Erklärung dieser Versuche ergibt sich leicht aus entsprechenden Versuchen mit Glaslinsen. Es sei *Fig. 62 b* eine Sammellinse, vor welcher ein undurchsichtiger Schirm mit zwei Oeffnungen *e* und *f* angebracht ist; *a* sei ein leuchtender Punkt und *c* der Vereinigungspunkt für seine Strahlen, nachdem sie durch die Linse gegangen sind. Es werden demgemäß alle Strahlen der beiden Strahlenbündel, welche durch die beiden Oeffnungen des Schirms *e* und *f* gehen, sich im Punkte *c* schneiden, und ein weißer Schirm, welcher in *c* angebracht ist, wird nur eine helle Stelle als Bild des Lichts zeigen. Ein Schirm aber, der vor dem Vereinigungspunkte in *m m*, oder ⁹⁵ hinter ihm in *ll* angebracht ist, wird die den beiden Oeffnungen entsprechenden Strahlenbündel gesondert auffangen und zwei helle Stellen

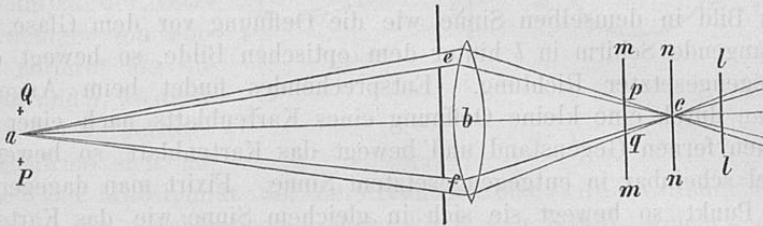


Fig. 62.

zeigen. Denkt man sich statt der Glaslinse die brechenden Mittel des Auges, statt des Schirms die Retina gesetzt: so ergibt sich analog, daß ein Punkt der Retina vom Lichte getroffen wird, wenn ihre Fläche durch den Vereinigungspunkt der Strahlen geht, zwei Punkte dagegen, wenn sie sich vor oder hinter dem Vereinigungspunkte der Strahlen befindet. Die Stellung des Schirms in *m* entspricht dem Falle, wo das Auge für einen ferneren, die bei *l*, wo es für einen näheren Gegenstand accommodirt ist. Nur ein scheinbarer Widerspruch zeigt sich. Wenn man nämlich in dem Versuche mit der Glaslinse die obere Oeffnung *e* des durchbrochenen Schirms verdeckt, verschwindet bei der Stellung des Schirms in *m* das gleichseitige obere Bild, bei dem fernsehenden Auge aber das entgegengesetzte. Bei der Stellung des Schirms in *l* verschwindet umgekehrt bei der Glaslinse das entgegengesetzte, in dem nahsehenden Auge dagegen das gleichseitige Bild. Der Widerspruch erklärt sich dadurch, daß die Bilder auf der Netzhaut stets umgekehrt sind, also einem tiefer liegenden lichten Gegenstande ein höher stehendes Bild auf der Netzhaut entspricht. Wird also die in *m* stehende Netzhaut bei *p* und *q* von Licht getroffen, so schließt der Sehende von dem oberen Punkte *p* auf einen im Gesichtsfelde unterhalb des wirklichen leuchtenden Punktes bei *P* liegenden Gegenstand, und aus dem unteren Punkte *q* auf einen oberhalb bei *Q* liegenden. Wird die Oeffnung *e* verdeckt, so verschwindet demnach der obere helle Punkt *p* auf der Netzhaut, und der Experimentirende glaubt deshalb den Gegenstand *P* verschwinden zu sehen, welcher der verdeckten Oeffnung entgegengesetzt ist.

Umgekehrt ist es beim Fixiren eines nahen Gegenstandes, wo die Netzhaut dem Schirme in l entspricht.

Bringt man vor der Glaslinse einen Schirm mit drei Oeffnungen, wie in *a Fig. 61*, an, so entstehen auch drei lichte Punkte auf dem in m oder l gestellten Schirme, und zwar in m gleich, in l dagegen entgegengesetzt gerichtet als auf dem vorderen Schirme; also wieder umgekehrt, als es scheinbar im Auge der Fall ist, was sich in derselben Weise erklärt, wie eben auseinandergesetzt ist.

Bringt man vor die Glaslinse einen Schirm mit einer Oeffnung, und bewegt ihn hin und her, so bleibt das Bild des lichten Punktes unbeweglich, wenn (siehe in *Fig. 62*) der Vereinigungspunkt c der Lichtstrahlen in den auffangenden Schirm fällt. Steht dieser Schirm aber vor c in m , so bewegt sich das Bild in demselben Sinne wie die Oeffnung vor dem Glase. Steht der auffangende Schirm in l hinter dem optischen Bilde, so bewegt es sich ⁹⁶ in entgegengesetzter Richtung. Entsprechendes findet beim Auge statt. Sieht man durch eine kleine Oeffnung eines Kartenblatts nach einer Nadel, fixirt einen fernen Gegenstand und bewegt das Kartenblatt, so bewegt sich die Nadel scheinbar in entgegengesetztem Sinne. Fixirt man dagegen einen näheren Punkt, so bewegt sie sich in gleichem Sinne wie das Kartenblatt. Die Erklärung dieser Versuche ergibt sich leicht aus dem Vorausgeschickten, wenn man für *Fig. 62* annimmt, daß der Schirm nicht zwei Oeffnungen, sondern nur eine hat, die sich bald in e , bald in f befindet.

Man kann einen Schirm mit enger Oeffnung, welche man vor das Auge bringt, auch benutzen, um Gegenstände deutlich zu sehen, für welche man das Auge nicht accommodiren kann. Die Grundfläche des in das Auge eindringenden Strahlenkegels wird dadurch kleiner, und in demselben Verhältnisse auch alle seine Querschnitte, zu denen auch der Zerstreungskreis auf der Netzhaut gehört.

Wenn man einen nahe vor dem Auge befindlichen Gegenstand, der deshalb im Zerstreungsbilde erscheint, durch eine feine Oeffnung betrachtet, erscheint er aus dem angeführten Grunde deutlich und außerdem vergrößert. Ja, er erscheint sogar größer, als wenn man ihn ohne Oeffnung bei derselben Entfernung im Zerstreungsbilde betrachtet. Seine Vergrößerung wird um so bedeutender, je mehr man die Oeffnung vom Auge entfernt. Diese Erscheinungen erklären sich auf folgende Weise. Es seien in *Fig. 63* a und b zwei leuchtende Punkte des Objects, S der Schirm, A das Auge. Vom Punkte a fällt durch die Oeffnung des Schirms nur der Lichtstrahl am_1 in das Auge, von b der Lichtstrahl bm_2 . Ist $\beta\alpha$ das dem Objecte ab entsprechende Bild, welches die Augenmedien entwerfen, so geht der Strahl am_1 nach der Brechung nach α und schneidet die Netzhaut in f ; der Strahl bm_2 geht dagegen nach β und trifft die Netzhaut in g . Zieht man von f und g aus die Linien $f\varphi$ und $g\gamma$ durch den Knotenpunkt des Auges k , so geben diese die Richtungen an, in welchen leuchtende Punkte beim gewöhnlichen deutlichen Sehen liegen müßten, um sich in f und g abzubilden. In diese Linien verlegt unser Urtheil deshalb auch die Punkte a und b .

Wenn der Schirm sich vom Auge entfernt und dem Objecte nähert, ist leicht ersichtlich, daß die Punkte m_1 und m_2 und ebenso die Linien $m_1 \alpha$ und $m_2 \beta$ mit den Punkten f und g sich von der Augenaxe entfernen müssen. Das Netzhautbild wird in diesem Falle also größer.

Nehmen wir den Schirm weg, so entwirft jeder lichte Punkt des Objects einen Zerstreungskreis. Die Mittelpunkte der Zerstreungsbilder von a und b sind dann auf der Netzhaut weniger von einander entfernt als die Punkte f und g , wo diese Punkte bei vorgehaltenem Schirme sich ab-

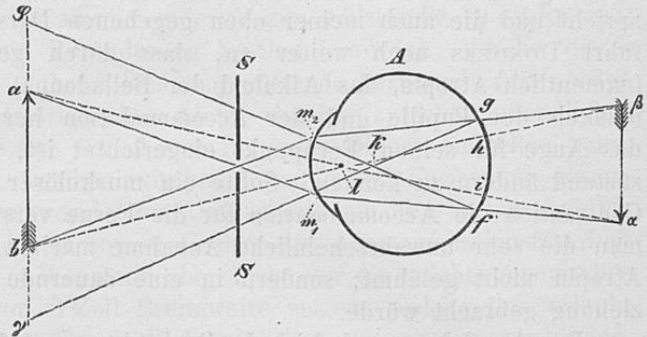


Fig. 63.

abbilden. Der Mittelpunkt der Zerstreungskreise wird bestimmt durch den Axenstrahl des Strahlenkegels, d. h. durch den Strahl, welcher durch den Mittelpunkt der Pupille gegangen ist. Es sei l dieser Punkt. Der von a durch l nach α gehende Strahl trifft dann die Netzhaut in i , der von b durch l nach β gehende in h . Die Punkte h und i sind also die Mittelpunkte der Zerstreungsbilder, wenn der Schirm entfernt wird. Sie liegen einander näher als die Punkte f und g .

Sieht man dagegen durch eine enge Oeffnung nach entfernten Gegenständen, während man das Auge für die Nähe accommodirt, so erscheinen die Gegenstände kleiner, und desto kleiner, je weiter man die Oeffnung vom Auge entfernt.

Die Entfernungen, für welche sich das menschliche Auge accommodiren kann, sind bei verschiedenen Individuen sehr verschieden. Man nennt den dem Auge nächsten Punkt, für den eine vollständige Accommodation ausgeführt werden kann, den Nahpunkt, den entferntesten den Fernpunkt der Accommodation.

Die Lehre von den individuellen Verschiedenheiten des Refraktionszustands der Augen ist namentlich durch die wichtigen Arbeiten von DONDERS¹ vollständig aufgeheilt worden und hat denn auch schon die fruchtbarste Anwendung in der Augenheilkunde gefunden, nicht bloß direct für die Verbesserung mangelhaften Accommodationsvermögens durch Brillen, sondern auch indirect, indem eine Reihe bisher dunkler Krankheitszustände sich als Folge mangelhafter Refraction und Accommodation des Auges ergaben.

Der Fortschritt, den DONDERS gemacht hat, hängt namentlich davon ab, dass er getrennt hat die Erscheinungen, welche einem abnormen Refraktionsgrade im Ruhezustande des Auges angehören bei der Accommodation für

¹ F. C. DONDERS, *Anomalies of accommodation and refraction*. London 1864.

die Ferne, von denen, welche sich auf die grössere oder geringere Breite der Accommodation beziehen und die also in einer Aenderung des Refraktionszustandes durch Muskelthätigkeit bestehen.

Für die Ansicht, dass der Zustand des Fernsehens der Ruhezustand des Auges sei, für welche schon die subjective Empfindung sehr entschieden spricht und die auch meiner oben gegebenen Darstellung zu Grunde liegt, führt DONDERS noch weiter an, dass durch gewisse narkotische Stoffe (namentlich Atropin, das Alkaloid der Belladonna) eine Lähmung des Ringmuskels der Pupille und der Accommodation hervorgebracht wird, wobei das Auge für seinen Fernpunkt eingerichtet ist, ohne diesen Refraktionszustand ändern zu können. Sollte ein muskulöser Apparat da sein, dessen Contraction die Accommodation für die Ferne verstärken könnte, so müsste man die sehr unwahrscheinliche Annahme machen, dass dieser durch das Atropin nicht gelähmt, sondern in eine dauernde krampfhaftige Zusammenziehung gebracht würde.

Daneben lehren pathologische Beobachtungen, dass wenn durch Lähmung des *Nervus oculomotorius* der Accommodationsapparat gelähmt wird, das Auge sich stets auf seinen früheren Fernpunkt dauernd einstellt. Dagegen sind durchaus keine Fälle von Bewegungslähmungen des Auges beobachtet worden, wobei der Fernpunkt sich genähert hätte.

826 Die grösste Sehweite entspricht also dem Ruhezustande des Auges. Als normale Lage des Fernpunktes kann die in unendlicher Ferne betrachtet werden. Solche Augen nennt DONDERS emmetropisch (von *ἐμμετρος*, *modum tenens*, und *ὄψ*, *oculus*), um die Vieldeutigkeit des Ausdrucks „normale“ oder „normalsichtige“ Augen zu vermeiden. Emmetropische Augen können natürlich noch an mancherlei anderen Fehlern leiden und brauchen nicht „normal“ zu sein.

Augen, deren Fernpunkt vor ihnen, aber nicht in unendlicher Ferne liegt, nennt er brachymetropisch oder, mit dem älteren Namen, myopisch; diese Augen können nur divergirend einfallende Strahlenbündel auf der Netzhaut vereinigen.

Augen, die im Gegentheil nicht nur parallele, sondern auch convergirend einfallende Strahlen vereinigen können, heissen hypermetropisch.

Die myopischen Augen können sich ohne Hilfe eines Brillenglases für weit entfernte Objecte nicht einstellen; es mangelt ihnen also ein wichtiger Theil der Fähigkeit eines emmetropischen Auges. Die hypermetropischen dagegen sind genöthigt jedes Mal, wo sie ein reelles Object fixiren wollen, eine Accommodationsanstrengung zu machen, wodurch mannigfache und häufig sehr störende Ermüdungserscheinungen herbeigeführt werden. Beiderlei Arten der Abweichung sind also für den praktischen Gebrauch des Auges nachtheilig und werden deshalb von DONDERS unter dem Namen der ametropischen Augen zusammengefasst.

Der Grund dieser Abweichungen beruht der Regel nach auf der verschiedenen Länge der Augenaxe, die in den hypermetropischen kürzer ist

als in den emmetropischen. Damit hängt auch die Lage des Drehpunkts dieser Augen zusammen, der in den myopischen Augen weiter nach hinten, in den hypermetropischen weiter nach vorn liegt. Die Hornhaut und Linse zeigen in der Regel keine Krümmungsänderungen, aus denen die Ametropie erklärt werden könnte.

Um den Zustand solcher abweichender Augen vollständig zu bestimmen, muß ferner die Größe der Veränderung bestimmt werden, welche durch active Muskelanstrengung in ihrem Brechungszustande hervorgebracht werden kann. Wenn wir ein emmetropisches Auge, welches zwischen unendlicher Ferne und einer Sehweite von 6 Zoll sich für jedes Object einstellen kann, und ein stark myopisches, welches zwischen 6 und 3 Zoll Entfernung accommodiren kann, mit einander vergleichen, so scheint auf den ersten Anblick vielleicht das letztere eine viel engere Grenze der Accommodationsfähigkeit zu haben, als das letztere. Wenn wir aber dicht vor ein solches myopisches Auge eine Concavlinse von 6 Zoll Brennweite setzen, welche ihm erlaubt unendlich entfernte Gegenstände deutlich zu sehen, so werden wir finden, daß dasselbe Auge mit Hilfe dieser Brille nun auch, wie das zuerst genannte emmetropische Auge zwischen unendlicher Ferne und 6 Zoll Abstand accommodiren kann, also eine ebenso große Breite der Accommodation hat, wie das erstere. Die genannte Linse mit 6 Zoll negativer Brennweite entwirft nämlich von Objecten, die 6 Zoll hinter ihr liegen, ein virtuelles Bild in 3 Zoll Entfernung, für welches sich also das supponirte myopische Auge accommodiren kann.

Wir können also die Accommodationsbreite zweier verschieden fern- 827sichtiger Augen nicht unmittelbar nach dem Abstand ihres Fernpunkts vom Nahpunkte mit einander vergleichen, sondern wir müssen sie durch eine vorgesezte Linse erst auf gleichen Refractionszustand gebracht denken, um sie vergleichen zu können.

Soll eine solche Linse die Objecte nicht vergrößern oder verkleinern, so muß ihr zweiter Knotenpunkt mit dem ersten des Auges zusammenfallen (was sich praktisch, wenn es der Mühe werth erscheinen sollte, bei dicken convexconcaven Linsen erreichen lassen würde; vergleiche Seite 83 und 84). Nennen wir die Entfernung des Fernpunktes eines gegebenen Auges vom ersten Knotenpunkte F , die des Nahpunktes N , und A die Entfernung des nächsten Punktes, für den das mit einer Linse von der negativen Brennweite F versehene Auge sich noch accommodiren kann, so ist

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

und die Größe $\frac{1}{A}$ wird von DONDERS als Maafs der Accommodationsbreite benutzt.

Die Einheit dieses Accommodationsmaafses ist also Eins dividirt durch das Längenmaafs, wozu bisher, den Brillennummern entsprechend, Pariser Zolle gewählt sind.

n Zweckmäßiger erscheint das von Herrn NAGEL vorgeschlagene System, als Einheit für die brechenden Wirkungen der Linsen und deren Unterschiede eine Linse von einem Meter Brennweite zu brauchen (Meterlinse). Man kann dann stärker brechende Systeme herstellen, indem man mehrere Meterlinsen an einander legt, und von andern Linsen also sagen, daß sie eine gewisse Anzahl zusammengelegter Meterlinsen ersetzen. Die brechende Kraft einer Meterlinse nennen die neueren französischen Augenärzte eine Dioptrie. Sagt man also eine Linse habe n Dioptrien, so heißt das, ihre Brennweite sei $\frac{1}{n}$ Meter.

In diesem Sinne läßt sich auch der Grad der Myopie oder Hypermetropie in Dioptrien ausdrücken, indem man angiebt, wie viel derselben die Linse haben müßte, welche das entspannte Auge auf unendlich einstellt.

Endlich die Angabe, daß die Accommodation 6 Dioptrien entspreche, bedeutet, daß sie die Sehweite in einem emmetropischen Auge von ∞ bis auf $\frac{1}{6}$ Meter verringert. Dieselbe Accommodationsbreite aber hätte auch ein myopisches Auge, das von $\frac{1}{12}$ bis $\frac{1}{6}$ Meter accommodiren kann, oder ein hypermetropisches, das von $+\frac{1}{3}$ bis $-\frac{1}{3}$ Meter reicht.

827 Die Größe der Accommodation $\frac{1}{A}$ nimmt mit zunehmendem Lebensalter continuirlich ab, und zwar bei ganz oder nahehin emmetropischen Augen annähernd proportional den Jahren, so daß sie im zehnten Jahre im Mittel $13\frac{1}{2}$ Dioptrien beträgt, im 65. Jahre Null wird. Verlust der Accommodationsfähigkeit findet also im höheren Lebensalter regelmäsig statt, und auf diesen Zustand hat DONDERS den Namen Presbyopie beschränkt. Dabei ist aber noch zu bemerken, daß im höheren Alter, etwa vom 50. Jahre ab, auch der Fernpunkt des Auges etwas hinausrückt, früher emmetropische Augen also hypermetropisch, schwach myopische emmetropisch werden.

Die allmälige Verminderung der Accommodationsbreite hängt wahrscheinlich davon ab, daß die Festigkeit der äußeren Schichten der Krystalllinse wächst und die Linse deshalb weniger nachgiebig wird. Vermehrung des Brechungscoefficienten ihrer äußeren Schichten muß nach Seite 94 auch eine Verminderung der Brechung in der Linse zur Folge haben und also den hintern Brennpunkt des Auges nach hinten rücken lassen.

828 Zu erwähnen ist noch, daß wir der Regel nach immer Convergenz- und Accommodationsanstrengung gleichzeitig vollführen und daher auch unwillkürlich eine bestimmte Verbindung zwischen beiden Anstrengungen einhalten. Jemand, der seine Accommodation nicht willkürlich beherrschen gelernt hat, accommodirt deshalb besser für die Ferne bei parallelen

Gesichtslinien und erreicht die stärkste Anstrengung der Accommodation besser bei stark convergenten Gesichtslinien.

DONDERS unterscheidet daher 1. die absolute Accommodationsbreite, wo der Fernpunkt genommen wird bei parallelen (oder selbst divergenten) Blicklinien, der Nähepunkt bei möglichst stark convergenten. Der Nähepunkt der Accommodation liegt hierbei ferner als der Convergenzpunkt. Es ist dies die größte erreichbare Accommodationsbreite, sie betrug bei einem emmetropischen Beobachter im Alter von 15 Jahren $\frac{1}{3,69}$ (nach Pariser Zollen) oder 10 Dioptrien.

2. Die binoculare Accommodationsbreite. Die Convergenz wird hierbei nicht stärker gemacht, als zur Fixirung des Punktes, für den man accommodirt, nöthig ist. Man erreicht hierbei nicht ganz denselben Grad der Accommodation, wie im ersten Falle. Die Breite der binocularen Accommodation desselben Beobachters war $\frac{1}{3,9}$ (9,5 Dioptrien).

3. Die relative Accommodationsbreite für einen gegebenen Grad der Convergenz. Diese war für denselben Beobachter bei parallelen Gesichtslinien nur gleich $\frac{1}{11}$ (3,7 D.), erreichte bei einer Convergenz von 11° ihr Maximum von $\frac{1}{5,76}$ (6,4 D.), blieb dann bei steigender Convergenz ziemlich unverändert, so dafs sie bei 23° noch $\frac{1}{6,4}$ (5,8 D.) betrug, und bei der Stellung des binocularen Nähepunkts, bei 38° Convergenz, $\frac{1}{9}$ (4,1 D.). In der Stellung des absoluten Nähepunkts, bei 73° Convergenz, war sie Null.

Für ärztliche Zwecke müssen also bestimmte Grade der Convergenz gewählt werden, um vergleichbare Grade der Accommodation zu erhalten, und man muß mit passend gewählten Linsen, die man vor das Auge setzt, dem Patienten die Accommodation bei einem solchen Convergenzgrade möglich zu machen suchen.

Für die Bestimmung des Fernpunkts empfiehlt sich die parallele Richtung der Gesichtslinien auf ein entferntes Object; die Brennweite der schwächsten concaven Linsen, welche einem myopischen, oder der stärksten convexen Linsen, welche einem hypermetropischen Auge noch vollkommen genaues Sehen sehr entfernter kleiner Objecte gestatten, ist unmittelbar gleich der Entfernung des Fernpunktes vom Auge. Für die Bestimmung des Nähepunktes schreibt DONDERS vor, ihn durch passende Convexgläser stets bis auf etwa 8 Zoll heranzubringen, wenn er weiter abliegen sollte, um einer genügenden Accommodationsanstrengung sicher zu sein. Dabei muß dann natürlich der Einfluß der Linse auf die Lage des gesehenen Bildes in Rechnung gebracht werden.

829

Als Probeobjecte zur Prüfung der Sehweite ungeübter Beobachter dienen Buchstaben, Ziffern und Punktsysteme verschiedener Größe¹ und eine Sammlung abgestufter und leicht zu wechselnder Brillengläser.

Im Ganzen ist es rathsam bei Augen, deren Sehweite für die gewählte Beschäftigung nicht genügt, rechtzeitige Unterstützung durch passende Brillen anzuwenden. Presbyopische Augen brauchen eine Convexbrille beim Lesen und Schreiben, überhaupt bei der Beschäftigung mit nahen Objecten, um die Zerstreungskreise zu vermindern. Bei schwacher Beleuchtung, wenn die Pupille weit ist und deshalb die Zerstreungskreise größer, ist eine stärkere Brille nothwendig als bei stärkerer Beleuchtung. In der Regel genügt eine Brille, welche den Nähepunkt auf 10 bis 12 Zoll heranbringt; nur bei sehr alten Leuten, zwischen 70 und 80 Jahren, wo die Gesichtsschärfe sich beträchtlich vermindert, ist es wünschenswerth, die Objecte bis auf 8 oder 7 Zoll heranbringen zu können, um sie unter größerem Gesichtswinkel zu sehen.

Bei myopischen Augen ist namentlich darauf zu sehen, daß bei der Beschäftigung mit nahen Gegenständen gebückte Haltung des Kopfes und starke Convergenz der Augen vermieden wird, weil die Verdünnung, Ausbauchung und Zerrung der Membranen im hinteren Theile des Auges durch gesteigerten Blut- und Muskeldruck schnell wächst und die höheren Grade der Myopie das Sehvermögen sehr erheblich beeinträchtigen und gefährden. Bei den schwächeren Graden von Kurzsichtigkeit, wobei der Fernpunkt über 5 Zoll vom Auge liegt, ist es im Allgemeinen zulässig, concave Brillengläser, welche den Fernpunkt in unendliche Ferne rücken, anzuwenden und fortdauernd zu tragen. Das myopische Auge wird dadurch einem emmetropischen ähnlich gemacht. Dabei ist aber sehr sorgfältig darauf zu achten, daß Bücher, Papierblätter, auf denen geschrieben wird, und Handarbeiten nicht näher als 12 Zoll den Augen genähert werden. Bei übrigens guter Beschaffenheit des Auges ist in dieser Entfernung ohne Schwierigkeit möglich zu lesen und zu schreiben. Zwingen die Umstände gebieterisch zu feinerer Arbeit, die den Augen näher gebracht werden muß, so ist hierfür der Gebrauch schwächerer Concavgläser und vielleicht achromatisirter prismatischer Gläser, die auf der Nasenseite dicker als auf der Schläfenseite sind, rathsam, weil dann die sehr genäherten Objecte mit geringerer Convergenz und geringerer Anstrengung der Accommodation gesehen werden können.

Gläser, welche die Myopie vollkommen neutralisiren, können zuweilen bei solchen Kurzsichtigen, die noch nie Brillen getragen haben, erst nach einiger Gewöhnung an schwächere Gläser, statt deren man nach und nach schärfere substituirt, angewendet werden, weil die Verbindung zwischen

¹ Dergleichen sind herausgegeben von JAEGER jun., *Schriftscalen*, Wien 1857; und SNELLEN, *Test types for the determination of the acuteness of vision*; London, Williams and Norgate; Paris, Germer Baillière; Berlin, Peters; Utrecht, Greven. Die letztern sind in regelmäßiger Abstufung der Größe ausgeführt und mit Nummern versehen, welche die Zahl der Pariser Fusse angeben, um welche entfernt ein normales Auge die Buchstaben noch lesen kann. Aehnliche auch von GIRAUD TELON. Paris, Nacet. Ferner M. BURCHARDT, *Internationale Sehproben zur Bestimmung der Sehschärfe und Sehweite*. Cassel, A. Freyschmidt.

Accommodation und Convergenz den neuen Umständen allmählig angepaßt werden muß. Bei geringerer Accommodationsbreite oder merklich verminderter Gesichtsschärfe ist es überhaupt rathsamer, für nahe Objecte schwächere Brillen zu tragen, die für die gewöhnlichen Beschäftigungen genügen, und für ferne Objecte eine Lorgnette zu Hilfe zu nehmen.

Bei höheren Graden von Myopie ist das Auge überhaupt schon leidend ⁸³⁰ und gefährdet; es sind dann mancherlei andere Rücksichten noch zu nehmen, die hier nicht weiter erörtert werden können, und der Rath eines intelligenten Arztes jedenfalls nothwendig. Überhaupt ist die Gleichgültigkeit, womit die meisten Kurzsichtigen den Zustand ihrer Augen betrachten, die Ursache späterer Entwicklung gefährlicher Augenkrankheiten und vieler Erblindungen, und es kann nicht genug vor Nachlässigkeit in dieser Hinsicht gewarnt werden.

Hypermetropische Augen brauchen convexe Linsen, und zwar wähle man im Anfang, wo sie ihre fortdauernde Accommodationsanstrengung noch nicht ganz zu beseitigen wissen, etwas zu starke Gläser, durch die sie schon ferne Objecte nicht mehr ganz deutlich sehen können. Je mehr sie sich der übermäßigen Accommodation entwöhnen, desto schwächere Gläser werden ausreichen. Bei verminderter Accommodationsbreite brauchen sie stärkere Convexgläser für die Nähe, schwächere für die Ferne. Die sehr bedeutenden Beschwerden der fortdauernden Accommodationsanstrengung werden durch passende Gläser ganz beseitigt, und es ist einer der bedeutendsten praktischen Triumphe der neueren Ophthalmologie, daß die äußerst hartnäckige Asthenopie, die auf Hypermetropie beruht und die die Verzweiflung der Patienten und Ärzte war, nachdem ihr Grund erkannt worden ist, durch ein so einfaches Mittel so leicht beseitigt werden kann.

Wenn man das Auge in Wasser taucht, fällt die Brechung der Licht- ⁹⁸strahlen an der Hornhaut fast ganz fort, und es bleibt nur die in der Krystalllinse wirksam, welche nicht hinreicht, um deutliche Bilder auf der Netzhaut zu entwerfen. Das Auge verhält sich dann wie ein überweitsichtiges, und braucht eine stark convexe Linse als Brille, um irgend etwas zu erkennen.

Um die Größe der Zerstreungskreise berechnen zu können, bemerke man zunächst, daß alle Strahlen, die außerhalb des Auges auf die scheinbare (d. h. durch die Hornhaut gesehene) Pupille hinzielen, nach der Brechung in der Hornhaut die wirkliche Pupille treffen, und daß sie im Glaskörper so verlaufen, als kämen sie von dem Bilde der Pupille her, welches die Linse nach hinten zu entwirft. Es ergibt sich dies sogleich aus dem Begriffe des optischen Bildes. Ein gewisser Punkt der wirklichen Pupille und der correspondirende Punkt ihres Hornhautbildes sind in Rücksicht auf die Brechung an der Hornhaut correspondirende Vereinigungspunkte der Lichtstrahlen. Strahlen, die von dem Punkte der wirklichen Pupille aus nach vorn gehen, scheinen vor dem Auge von dem Bilde dieses Punktes zu kommen, und umgekehrt, Strahlen, welche in der Luft nach einem Punkte der scheinbaren Pupille convergiren, müssen sich nach der Brechung an der Hornhaut in dem entsprechenden Punkte der wirklichen Pupille vereinigen.

LISTING nimmt für sein schematisches Auge an, daß die Iris $\frac{1}{2}$ mm vor der vorderen Linsenfläche liege, und berechnet, daß alsdann ihr von der Linse entworfenes Bild um $\frac{1}{15}$ vergrößert und um 0,055 mm nach hinten gerückt sei. Verlegt man dagegen die Pupille dicht an die Vorderfläche der Linse, was naturgemäßer ist, so beträgt die Vergrößerung nur etwa $\frac{1}{18}$ (genauer $\frac{3}{53}$), und sie wird um 0,113 mm nach hinten gerückt. Behält man die übrigen Data von LISTING'S schematischem Auge bei, so würde der Abstand des Linsenbildes der Pupille von der Netzhaut gleich 18,534 mm zu setzen sein. Durch die Hornhaut würde dieselbe Pupille dagegen um $\frac{1}{7}$ (genauer $\frac{12}{90}$) vergrößert und um 0,578 mm vorgerückt erscheinen.

Die GröÙe der Zerstreuungskreise auf dem mittleren Theile der Netzhaut läßt sich auf folgende Weise berechnen. Es sei in *Fig. 64* *gf* die Augenaxe, *qq* ein vor

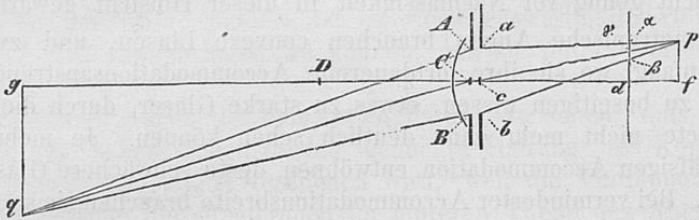


Fig. 64.

dem Auge liegendes Object, und die Linie *qq* senkrecht gegen *fg*. Es sei ferner *p* das Bild von *q*, und *f* von *g*; *αd* die Netzhaut, welche wir als eine auf die Augenaxe senkrechte Ebene betrachten, da nur Bilder auf der Mitte der Netzhaut in Betracht gezogen werden sollen; *ab* sei das Linsenbild der Pupille, *AB* das Hornhautbild, beide senkrecht gegen die Augenaxe, die von ihren Ebenen in den Punkten *c* und *C* geschnitten wird. Die von dem Rande der Pupille ausgehenden Strahlen *ap* und *bp* schneiden die Netzhaut in *α* und *β*, so daß *αβ* ein Durchmesser des Zerstreuungskreises ist, dessen GröÙe berechnet werden soll. Da *ab* parallel *αd* ist, ist nach bekannten geometrischen Sätzen:

99

$$ap : \alpha p = ab : \alpha \beta$$

$$ap : \alpha p = cf : df, \text{ also auch}$$

$$\alpha \beta = \frac{ab \cdot df}{cf} \dots \dots \dots 1 a).$$

Fällt die Ebene der Netzhaut mit der hinteren Brennebene des Auges zusammen, und ist *D* der vordere Brennpunkt des Auges, so können wir wie in § 9 Gleichung 8) bezeichnen *CD* mit *H*₁, *cd* mit *H*₂, *Cg* mit *h*₁, *cf* mit *h*₂ (statt *h_{m+1}*) und haben dann wie dort

$$\frac{H_1}{h_1} + \frac{H_2}{h_2} = 1 \text{ oder}$$

$$\frac{H_1}{h_2} = \frac{h_2 - H_2}{h_2} = \frac{df}{cf}, \text{ also}$$

$$\alpha \beta = ab \cdot \frac{H_1}{h_1} \dots \dots \dots 1 b).$$

Wenn *c* der Mittelpunkt des Linsenbildes der Pupille ist, also *ac* = *bc*, und

der Strahl cp die Netzhaut in γ schneidet, so ist γ der Mittelpunkt des Zerstreuungskreises. Denn wegen des Parallelismus von ab und $\alpha\beta$ verhält sich

$$\begin{aligned} ac : bc &= \alpha\gamma : \beta\gamma \\ ac &= bc, \text{ folglich} \\ \alpha\gamma &= \beta\gamma. \end{aligned}$$

Der Strahl also, welcher die Mitte des Zerstreuungskreises trifft, geht im Glaskörper verlängert durch den Mittelpunkt des Linsenbildes der Pupille. Wir können hinzusetzen, er geht in der vorderen Kammer in der That durch den Mittelpunkt der wirklichen Pupille und in der Luft verlängert durch den Mittelpunkt des Hornhautbildes der Pupille.

Daraus folgt, dafs, wenn die Mittelpunkte der Zerstreuungskreise für zwei ungleich vom Auge entfernte Punkte auf einander fallen, der nach diesem gemeinsamen Mittelpunkte von dem Mittelpunkte des Linsenbildes der Pupille gehende Strahl beiden Strahlensystemen gemeinsam sein mufs. Die Fortsetzung dieses gemeinsamen Strahls vor dem Auge mufs also auch beide leuchtende Punkte treffen, und wird verlängert durch den Mittelpunkt des Hornhautbildes der Pupille gehen. Dasselbe wird der Fall sein, wenn das eine Zerstreuungsbild sich auf einen Punkt reducirt, der im Mittelpunkte des anderen Zerstreuungskreises liegt.

Beim Visiren decken sich zwei ungleich entfernte Punkte, wenn das Bild des einen in die Mitte des Zerstreuungsbildes des anderen fällt, oder die Mittelpunkte beider Zerstreuungsbilder auf einander fallen, falls beide undeutlich gesehen werden. Die sie verbindende gerade Linie nenne ich Visirlinie. Sie mufs nach der eben gemachten Auseinandersetzung mit dem Strahle zusammenfallen, der nach dem Mittelpunkte des Hornhautbildes der Pupille geht, und dieser letztere Punkt wird deshalb der Kreuzungspunkt aller Visirlinien sein.

Der Begriff des Gesichtswinkels hängt hiermit nahe zusammen. Wenn man sagt, dafs Objecte, die unter gleichem Gesichtswinkel erscheinen, gleiche scheinbare Gröfse haben, so mufs man den Scheitel des Gesichtswinkels in den Kreuzungspunkt der Visirlinien legen. Gewöhnlich hat man ihn aber in den Kreuzungspunkt der Richtungslinien (den ersten Knotenpunkt) verlegt, und wenn es sich um Fälle handelt, wo die beiden gesehenen Punkte nach einander direct gesehen werden, würde man ihn in den Drehpunkt des Augapfels legen müssen. Für sehr weit entfernte Punkte wird die Gröfse des Gesichtswinkels dadurch nicht 100 verändert, für nahe aber allerdings.

Ich füge hier noch eine kleine Tafel bei, welche LISTING für sein schematisches Auge unter der Annahme berechnet hat, dafs die Netzhaut in der zweiten Brennebene des Auges liege, und die Pupille 4 mm Durchmesser habe. Es sind darin angegeben unter l_1 die Entfernungen des leuchtenden Punktes von dem vorderen Brennpunkte nach vorn, unter l_2 die des Bildes von der Netzhaut nach hinten, unter ε der Durchmesser des Zerstreuungskreises. Die Rechnung ist ausgeführt nach § 9 Gleichung 8 c)

$$l_1 \cdot l_2 = F_1 \cdot F_2$$

und § 11 Gleichung 1 a). Das Product $F_1 \cdot F_2$ ist für LISTING's schematisches Auge gleich 301,26 Quadratmillimeter. (Als runde Zahl genügt 300.)

l_1	l_2	z
∞	0 mm	0 mm
65 Meter.	0,005	0,0011
25	0,012	0,0027
12	0,025	0,0056
6	0,050	0,0112
3	0,100	0,0222
1,5	0,200	0,0443
0,75	0,40	0,0825
0,375	0,80	0,1616
0,188	1,60	0,3122
0,094	3,20	0,5768
0,088	3,42	0,6484

Man sieht aus dieser Tabelle auch, wie wenig sich die Lage des Bildchens ändert, wenn die sich ändernde Entfernung des Objects noch sehr groß ist, und wie schnell das Bildchen sich von der Netzhaut entfernt, wenn das Object in geringerer Entfernung vom Auge sich mehr und mehr nähert.

Um zu ermitteln, für welche Entfernungen sich ein Auge accommodiren kann, sind verschiedene Instrumente, Optometer, vorgeschlagen worden.

Die zuerst sich darbietende Methode, nach welcher wir im täglichen Leben Kurzsichtigkeit und Weitsichtigkeit zu unterscheiden pflegen, ist die, zu beobachten, in welcher Entfernung kleinere Gegenstände, z. B. Buchstaben, am besten gesehen werden. Indessen ist dabei keine grosse Genauigkeit der Angaben möglich. Einmal sind gedruckte Buchstaben nie so klein, um nicht auch bei ziemlich beträchtlichen Abweichungen der Accommodation noch gelesen werden zu können. So kann ich eine Druckschrift, wie die vorliegende, in 13 Zoll Entfernung noch lesen, während mein Auge für seinen Fernpunkt, 3 Fuss Entfernung accommodirt ist. Und ebenso kann ich sie in 2,7 Zoll Entfernung lesen, obgleich ich das Auge nur auf 3,6 Zoll accommodiren kann. Ausserdem ist zu bemerken, dass die Gegenstände, wenn man sie dem Auge nähert, unter einem grösseren Gesichtswinkel erscheinen, und deshalb unter übrigens gleichen Umständen deutlicher erkannt werden als in grösserer Entfernung. Sehr kleine, schwer zu erkennende Gegenstände werden deshalb dem Auge zuweilen näher gebracht, namentlich von Hypermetropen, als die Accommodationsdistanz ist, weil man bei mässiger Ungenauigkeit des Bildes und grösserem Sehwinkel zuweilen mehr erkennt, als bei genauer Accommodation und geringerem Sehwinkel. Will man also die Accommodationsweiten auf diese Art ermitteln, so muß man für verschiedene Abstände verschiedene Gesichtsobjekte wählen, und alle so fein, daß sie in der betreffenden Entfernung von einem gut accommodirten Auge nur eben noch erkannt werden können.

PORTERFIELD¹ hat zuerst den SCHEINERSCHEN Versuch zur Untersuchung der Sehweiten empfohlen, und darauf ein Optometer gegründet, welches TH. YOUNG² verbesserte. Letzterer empfiehlt einen feinen weissen Faden auf dunklem Grunde auszuspannen, so daß sein eines Ende nahe unter dem Auge sich befindet, und dann durch einen Schirm mit zwei Löchern nach dem Faden zu sehen. Er erscheint dann nur an der Stelle, für welche das Auge accommodirt ist, einfach, an allen übrigen Stellen doppelt. Die einfach erscheinende Stelle kann leicht bezeichnet werden. Ihre Entfernung vom Auge entspricht der beim Versuche stattfindenden Sehweite des Auges. Übrigens kann man auch andere feine Objecte benutzen, welche man in verschiedene Entfernung vom Auge bringt. Man muß die Objecte für diese Versuche so fein wählen, daß sie durch die Löcher des Schirms eben noch deutlich gesehen werden können, z. B. feine Nadeln auf hellem

¹ W. PORTERFIELD, *On the eye*. Vol. I. p. 423. — *Edinb. medical Essays*. IV. 185.

² TH. YOUNG, *Phil. Transactions*. 1801. P. I. p. 34.

Grunde, oder feine Löcher und Spalten in dunklen Schirmen. Auch muß man darauf achten, dass man das Object durch beide Löcher gleichzeitig erblickt, sonst ist man Irrungen leicht ausgesetzt. Das Gesichtsfeld reducirt sich bei diesen Versuchen auf die verhältnißmäßig breiten Zerstreungsbilder der beiden Löcher des Schirms, welche zum Theil in einander greifen müssen, wie *Fig. 65 a* und *b* darstellt. Nur in dem mittleren gemeinsamen Theile *c*, welcher zugleich am hellsten ist, können Doppelbilder erscheinen wie die Nadelspitzen *g*, nicht aber in den seitlichen Theilen, welche nur je einem Zerstreungsbilde angehören. In dem letzteren erscheinen die Bilder stets einfach, wie die Nadel *h*. Dieser Umstand macht für ungeübte Personen das Gelingen des Versuchs oft schwierig.

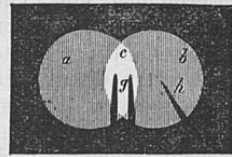


Fig. 65.

Eine ähnliche Methode, um die Accommodationsdistanzen, namentlich den Fernpunkt zu bestimmen, schien mir in der Ausführung noch größere Genauigkeit zu geben als das Sehen durch zwei Löcher. Man läßt durch eine kleine Öffnung eines Schirms Licht des Himmels oder eine Kerzenflamme fallen. Solch ein kleiner Lichtpunkt erscheint einem Auge, welches nicht genau für ihn accommodirt ist, als ein fünf- oder sechsstrahliger Stern (s. unten § 14), während er bei passender Accommodation als ein ziemlich gut begrenzter, wenn auch nicht ganz regelmäßig runder Lichtpunkt erscheint. Schiebt man nun einen Schirm von der Seite her vor die Pupille, so sieht man die Lichtfigur, welche der Punkt bildet, in der Regel von einer Seite her sich verdunkeln, und zwar von derselben Seite, wo der Schirm vorgeschoben wird, wenn das Object weiter entfernt ist, als die Accommodationsdistanz beträgt; von der entgegengesetzten Seite, wenn es näher ist. Bei richtiger Accommodation dagegen wird das Object entweder in allen seinen Theilen gleichzeitig dunkler, oder es wird in unregelmäßiger Weise verlöscht, so daß es z. B. oben und unten an zu schwinden fängt, während man den Schirm von einer Seite her vor die Pupille schiebt.

Ein anderes Mittel, die Sehweite zu bestimmen, welches namentlich für Ungeübte leichter ausführbar ist als der SCHEINER'sche Versuch, ist von der Farbenzerstreuung im Auge hergenommen, und wird in § 13 beschrieben werden.

RUEBE's Optometer ist bestimmt, sich gegen absichtliche Täuschungen durch den Untersuchten zu sichern. Es ist ein kastenartiger Schirm, durch welchen eine Röhre geht. Der zu untersuchende Mensch blickt durch diese Röhre auf ein Buch, von dem er nur einige Worte sieht, und dessen Entfernung zu beurtheilen er kein Mittel hat (als die Accommodation des Auges selbst). Man hält ihm bald kleinere, bald größere Druckschrift in verschiedenen Entfernungen vor; bei beabsichtigter Täuschung wird er schwer vermeiden, sich in Widersprüche zu verwickeln.

Noch sicherer ist zu diesem Zweck der Augenspiegel mit aufrechtem Bilde (s. u. § 16) zu gebrauchen, indem der Beobachter zu ermitteln sucht, durch welche Linse er selbst bei Entspannung seiner eigenen Accommodation die Netzhautgefäße im Hintergrunde des fremden Auges deutlich sieht.

Statt der wechselnden Brillengläser hat A. v. GRAEFE¹ auch ein ganz schwach vergrößerndes GALILEI'sches Doppelfernrohr angewendet, in welchem die Änderung des Abstandes von Objectiv und Ocular durch ein Getriebe geschieht, dessen Drehung genau abgelesen werden kann. Ein ähnliches Optometer mit KEPLER'schem Fernrohr ist später von J. HIRSCHBERG² construiert.

Künstliche Augen zur Erläuterung von KEPLER's Theorie des Sehens und der Wirkung der Brillen sind beschrieben worden von HALLER³, HUYGENS⁴, WOLF⁵, ADAMS⁶ und KRIES⁷.

¹ A. v. GRAEFE, *Klinische Monatsblätter*. Bd. III. S. 392.

² J. HIRSCHBERG, *Beiträge zur praktischen Augenheilkunde*. II. p. 4. Leipzig 1877.

³ A. HALLER, *Elementa Physiologiae*. 1763. V. 469.

⁴ C. HUYGENS, *Dioptrica*. Lugduni 1704. p. 112.

⁵ C. v. WOLF, *Nützliche Versuche*. III. 481. Halle 1721.

⁶ G. ADAMS, *Essay on vision*. London 1792.

⁷ F. C. KRIES, *Übersetzung des Vorigen*. Gotha 1794.

KEPLER¹, welcher zuerst richtige Begriffe von der Brechung des Lichts im Auge hatte, sah auch die Nothwendigkeit einer Accommodation des Auges für verschiedene Entfernungen ein, und erklärte die bei unpassender Accommodation auftretenden Zerstreuungskreise. SCHEINER² beschrieb die Erscheinungen, welche bei unpassender Accommodation eintreten, wenn man durch einen Schirm mit zwei Öffnungen sieht. Erklärungen dieses Versuchs gaben DE LA HIRE³, der aber dabei die Möglichkeit der Accommodation für verschiedene Entfernungen läugnete, später J. DE LA MOTTE⁴ und PORTERFIELD⁵, welcher Letztere zugleich die irrigen, von DE LA HIRE aus dem Versuche gezogenen Schlüsse berichtigte. Die scheinbaren Bewegungen eines aufser der Sehweite liegenden Gegenstandes, wenn man ihn durch eine enge Öffnung erblickt und diese selbst bewegt, erwähnt MILE⁶ zuerst und beschrieb später H. MAYER⁷ ausführlicher, mit Beziehung auf die Theorie der Accommodation.

Eine ausführliche Darstellung des Entstehens der Zerstreuungskreise, ihres Uebereinandergreifens u. s. w. gab JURIN⁸.

Was den Gebrauch der Brillengläser betrifft, so kommt bei PLINIUS⁹ eine Stelle vor, welche darauf hinzudeuten scheint. Er berichtet, daß concave Smaragde vorkämen, welche das Gesicht sammelten (*visum colligere*), und deshalb nicht geschnitten werden dürften. Der Kaiser NERO, welcher kurzsichtig war (PLINIUS I. II. c. 34), sah durch einen solchen Smaragd den Kämpfen der Gladiatoren zu. Später findet man wieder Nachrichten aus dem Anfange des 14. Jahrhunderts, wo die Brillen als eine neue Erfindung betrachtet wurden. Ein Florentiner Edelmann, SALVINUS ARMATUS, gestorben 1317, wird in seiner Grabschrift als Erfinder der Brillen genannt¹⁰. ALEXANDER DE SPINA, ein Mönch aus Pisa, gestorben 1313, soll ein Paar Brillen bei Jemandem gesehen haben, der ein Geheimniß daraus machte, solche nachgemacht und an viele Leute vertheilt haben¹¹. MAUROLYCUS (1494 bis 1575) versuchte später eine Erklärung der Wirkung zu geben, die aber entsprechend seiner Theorie vom Sehen unrichtig war. Er läßt nämlich die Sehstrahlen, d. h. Strahlen, von denen je einer von je einem Punkte des Objects ausgeht, durch die Gläser convergenter oder divergenter werden, so wie es in der That nur mit den von einem einzigen Punkte ausgehenden Lichtstrahlen der Fall ist. Erst KEPLER¹² gab die vollständige und richtige Theorie von dem Nutzen der Brillen.

§ 12. Mechanismus der Accommodation.

103

Die Veränderungen, welche man bei Accommodationsänderungen am Auge eines Anderen beobachten kann, sind folgende:

1) Die Pupille verengert sich bei der Accommodation für die Nähe, erweitert sich bei der für die Ferne. Diese Veränderung ist leicht zu beobachten, und am längsten bekannt. Man bemerkt sie an jedem

¹ J. KEPLER, *Paralipomena*. p. 200.

² C. SCHEINER, *Oculus*. p. 37 u. 41. *Ähnliche Versuche*. p. 32 u. 49.

³ PH. DE LA HIRE, *Journal des Savans*. 1685 und in *Accidens de la vue*. 1693.

⁴ J. DE LA MOTTE, *Versuche und Abhandlungen der Gesellschaft in Danzig*. Bd. II. p. 290.

⁵ W. PORTERFIELD, *On the eye*. Vol. I. Book 3. Chapt. 3.

⁶ J. MILE, *Poggendorff's Ann.* XLII. 40.

⁷ H. MAYER, *Prager Vierteljahrsschrift*. 1851. Bd. IV. S. 92.

⁸ J. JURIN, *Essay on distinct and indistinct vision*. R. SMITH, *A complete system of optics*. Cambridge 1738.

⁹ PLINIUS, L. XXXVII. c. 5.

¹⁰ VOLKMANN'S *Nachrichten von Italien*. Bd. I. S. 542. Die Grabschrift in der Kirche Maria maggiore zu Florenz wurde später weggenommen und hiefs:

Qui giace Salvino degli Armati

Inventore degli Occhiali.

Dio gli perdoni le peccati.

¹¹ R. SMITH, *A complete system of optics*. Remarks p. 12. Cambridge 1738.

¹² J. KEPLER, *Paralipomena*. p. 200.

Auge, welches man abwechselnd einen nahen und einen in derselben Richtung fern liegenden Gegenstand betrachten läßt. Man hat nur darauf zu achten, daß die Pupille nicht durch zu starkes einfallendes Licht dauernd sehr verengt wird.

2) Der Pupillarrand der Iris und die Mitte der vorderen Linsenfläche verschieben sich bei eintretender Accommodation für die Nähe etwas nach vorn. Um dies zu beobachten, wähle man einen scharf bestimmten fernen Fixationspunkt, und stelle als näheren eine Nadelspitze hin. Der Beobachtete bedeckt das eine Auge, und bringt das andere in eine solche Stellung, daß die Nadelspitze ihm den ferneren Fixationspunkt genau deckt. Er muß darauf achten, daß sein Auge diese Stellung nicht verläßt, und darf es auch nicht auf seitlich liegende Gegenstände abschweifen lassen, weil es bei diesem Versuche wesentlich darauf ankommt, daß die Richtung des Auges nicht verändert wird. Der Beobachter stellt sich so, daß er die Hornhaut des beobachteten Auges von der Seite und etwas von hinten sieht, und daß er die schwarze Pupille dieses Auges etwa noch zur Hälfte vor dem Hornhautrande der Sclerotica hervorragen sieht, so lange das beobachtete Auge in die Ferne blickt. Nun lasse er den näheren Gesichtspunkt, die Nadelspitze, fixiren; sogleich wird er bemerken, daß das schwarze Oval der Pupille und auch wohl ein Theil des ihm zugekehrten Irisrandes vor der Sclerotica sichtbar werden. *Fig. 66 a* stellt dar, wie das fernsehende Auge hierbei erscheint, *Fig. 66 b* das nahesehende. Die Veränderung in der Stellung des schwarzen Flecks wird am auffallendsten, wenn man auf die Breite des hellen Zwischenraums zwischen ihm und einem am vorderen Rande der Hornhaut erscheinenden dunkleren Streifen $c_1 c_2$ achtet. Dieser Streifen ist das durch die Brechung in der Hornhaut verzerrte Bild des über die Iris hervorstehenden jenseitigen Randes der Sclerotica, der an seiner inneren Seite gewöhnlich beschattet, und daher dunkler als die von vorn erleuchtete Iris erscheint. Wenn die Accommodation für die Nähe eintritt, sieht man den Zwischenraum zwischen diesem Streifen $c_1 c_2$ und der dunklen Pupille schmaler werden. Verschiebe sich der Pupillarrand nicht nach vorn, so müßte beim Nahesehen dieser Zwischenraum umgekehrt breiter werden, weil sich die Pupille von allen Seiten gleichmäßig verengt, und ebenso würde er breiter werden, wenn das Hervortreten der Pupille durch eine zufällige Wendung des beobachteten Auges gegen den Beobachter hin entstände. Indem man also auf den genannten Streifen achtet, kann man sich vor jeder Täuschung sichern. Daß die vordere Linsenfläche stets dicht hinter der Pupille bleibt, ist in § 3 erwiesen.

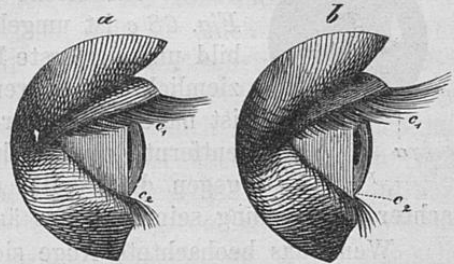


Fig. 66.

3) Die vordere Fläche der Krystalllinse wird gewölbter beim Nahesehen, flacher beim Sehen in die Ferne. Man kann sich davon durch das an der vorderen Fläche der Linse zurückgeworfene Licht überzeugen. Man gebe, wie beim vorigen Versuche, dem beobachteten Auge wieder zwei scharf bestimmte, in einer Linie vor ihm liegende Gesichtspunkte. Das Zimmer muß vollständig verdunkelt sein, und aufser einer großen und hellen Lampenflamme, welche man seitwärts von der Gesichtslinie in gleicher Höhe mit dem Auge aufstellt, darf sich kein größerer heller Gegenstand vor dem beobachteten Auge befinden, um alle störenden

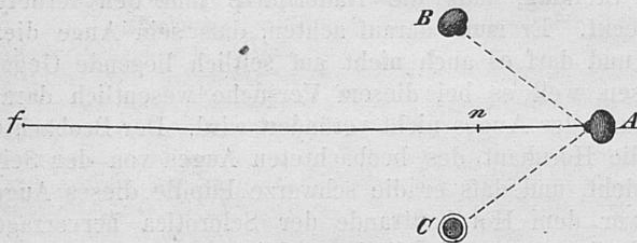


Fig. 67.

Hornhautreflexe zu vermeiden. In Fig. 67 sei A das beobachtete Auge, C die Flamme in Grundrisse, n der nähere, f der fernere Gesichtspunkt. Der Beobachter muß

105 nun sein Auge in gleicher Höhe mit dem beobachteten Auge und der Lampe anbringen, so daß der Winkel $B A f$ ungefähr gleich $C A f$ ist, und so lange sein Auge in der Nähe von B hin und her bewegen, bis er die Reflexe von beiden Linsenflächen sieht. Diese beiden Reflexe Fig. 68 b und c sind sehr viel lichtschwächer als der Reflex der Hornhaut a . Der von der vorderen Linsenfläche b bildet ein aufrechtstehendes Bildchen der Flamme, etwas größer als das von der Hornhaut entworfene, aber meist so verwaschen, daß man die Gestalt der Flamme nicht genau erkennen kann. Sein scheinbarer Ort ist weit (8 bis 12 mm) hinter der Pupille. Es verschwindet daher auch schon bei leichten Bewegungen des beobachtenden Auges oder des Lichts hinter dem Irisrande. Wir wollen



Fig. 68.

es das erste Linsenbild nennen, das von der hinteren Fläche entworfene dagegen das zweite. Dieses letztere, Fig. 68 c ist umgekehrt und viel kleiner als das Hornhautbild und das erste Linsenbild, erscheint daher als ein helles, ziemlich gut begrenztes Pünktchen. Sein scheinbarer Ort ist nahe hinter der Fläche der Pupille, etwa 1 mm von ihr entfernt; es verschiebt sich daher verhältnismäßig wenig gegen die Pupille und das Hornhautbild, wenn der Beobachter die Stellung seines Kopfes ändert.

Wenn das beobachtete Auge sich für die Nähe accommodirt, wird das erste Linsenbild beträchtlich kleiner, und nähert sich in der Regel auch der Mitte der Pupille. Die Verkleinerung bemerkt man am besten, wenn man statt einer Flamme einen Schirm mit zwei senkrecht über einander stehenden Öffnungen angewendet hat, durch deren jede eine Flamme ihr Licht wirft, oder wenn man etwas unterhalb der einen Flamme einen horizontalen

Spiegel bringt, in dem sich die Flamme spiegelt. Das Spiegelbild der Flamme vertritt dann die zweite Flamme. Jedes der reflectirten Bilder besteht dann aus zwei lichten Stellen, und man sieht leicht und deutlich, wie die der vorderen Linsenfläche angehörigen sich einander nähern, wenn das Auge in die Nähe, aus einander treten, wenn es in die Ferne sieht. In *Fig. 69* stellt *A* die Reflexe beim Fernsehen, *B* beim Nahesehen dar; *a* ist der Reflex an der Hornhaut, *b* an der vorderen, *c* an der hinteren Linsenfläche. Als Lichtquelle sind zwei Flammen angenommen, welche durch rechtwinklige Ausschnitte eines Schirms Licht senden.

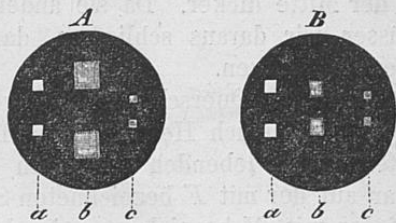


Fig. 69.

Da nun ein convexer Spiegel unter übrigens gleichen Umständen desto kleinere Bilder entwirft, je kleiner sein Radius, so folgt aus dieser Beobachtung, daß die vordere Fläche der Krystalllinse bei der Accommodation für die Nähe sich stärker wölbt. Allerdings würde eine sehr geringe Verkleinerung des Spiegelbildchens auch wegen der Brechung der Strahlen in der Hornhaut entstehen, wenn die vordere Fläche der Krystalllinse sich nur der Hornhaut näherte, ohne ihre Wölbung zu verändern. Doch ergibt die Rechnung, daß die Verkleinerung des Bildchens aus dieser Ursache äußerst unbedeutend sein würde im Vergleich zu der wirklich beobachteten.

4) Auch das Spiegelbildchen, welches die hintere Fläche der Krystalllinse entwirft, wird bei der Accommodation für die Nähe etwas kleiner. Um dies zu constatiren, muß man genauere Beobachtungsmethoden anwenden, welche im Anhang dieses Paragraphen beschrieben werden sollen. Durch eben solche Methoden findet man, daß der scheinbare (durch Linse und Hornhaut gesehene) Ort der hinteren Linsenfläche sich nicht merklich verändert. Da der scheinbare Ort der hinteren Linsenfläche sich nur sehr wenig von ihrem wirklichen Orte unterscheidet, und die Veränderungen der Cardinalpunkte des Auges bei Accommodationsänderungen, wie unten gezeigt werden wird, der Art sind, daß sie einen sich wenigstens theilweis gegenseitig aufhebenden Einfluß auf diesen scheinbaren Ort ausüben würden, können wir annehmen, daß der wahre Ort der hinteren Linsenfläche bei der Accommodation sich nicht merklich ändert. Auch auf die Größe des Spiegelbildchens der hinteren Linsenfläche üben die Veränderungen der Cardinalpunkte einen theilweis entgegengesetzten Erfolg aus. Doch läßt sich zeigen, daß auch bei den günstigsten Annahmen, welche für die Veränderung der optischen Constanten möglicher Weise gemacht werden können, um die Verkleinerung des Bildchens beim Nahesehen zu erklären, die Verkleinerung nicht ganz so groß ausfallen könnte, als sie wirklich beobachtet wird. Daraus kann also geschlossen werden, daß jedenfalls auch die hintere Linsenfläche beim Nahesehen sich stärker wölbt, aber nur in geringem Grade.

Da somit den Beobachtungen gemäß die vordere Fläche der Linse vorrückt, die hintere ihren Ort nicht verläßt, wird die Linse beim Nahesehen in der Mitte dicker. Da sie andererseits ihr Volumen nicht verändern kann, müssen wir daraus schliessen, daß sich die Durchmesser ihrer Äquatorial-ebene verkürzen.

In dem Querschnitte des vorderen Theiles des menschlichen Auges *Fig. 70* habe ich Hornhaut und Linse nach den Mafsen eines der von mir untersuchten lebenden Augen in fünfmaliger Vergrößerung construirt, und zwar auf der mit *F* bezeichneten Seite in der Accommodation für die Ferne, auf der mit *N* bezeichneten in der für die Nähe. Die Ciliarfortsätze sind in dieser Figur so gezeichnet, als wenn man sie durch die zwischen sie eingeschobene Falte der Zonula hindurch sähe, so daß man den Verlauf der Zonula erkennt. Mit *a a* ist der vordere Rand ihrer Falten, mit *b b* der hintere bezeichnet.

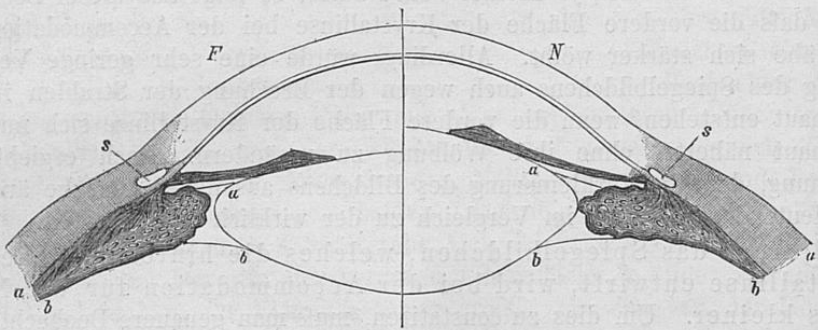


Fig. 70.

Durch die stärkere Wölbung der Oberflächen der Linse wird ihre Brennweite verkürzt, während ihre Hauptpunkte sich gleichzeitig nach vorn verschieben, theils weil die vordere Fläche der Linse vorrückt, theils weil die vordere Fläche im Verhältniß zur hinteren sich stärker wölbt. Beide Umstände tragen dazu bei, die von der Hornhaut convergent auf die Linse fallenden Strahlen äußerer leuchtender Punkte eher zur Vereinigung zu bringen, als dies in dem fernsehenden Auge geschieht. Die Gröfse der an der Linse beobachteten Veränderungen scheint auch auszureichen, um die Breite der Accommodation des lebenden Auges zu erklären.

- 109 5) Der peripherische Rand der Iris weicht beim Nahesehen zurück. CRAMER hat zuerst bemerkt, daß man bei Kindern mit bloßem Auge beobachten könne, wie sich die vordere Kammer beim Nahesehen erweitert. Ich selbst habe gefunden, daß man dies auch bei Erwachsenen mittels einer besonderen Art der Beleuchtung des Auges erkennen könne. Wenn man nämlich Licht ganz von der Seite her auf das Auge fallen läßt, so daß die Iris größtentheils beschattet ist, so bildet sich bei einer richtigen Stellung des Auges auf der dem Lichte gegenüberliegenden Seite der

Iris ein gekrümmter heller Streifen, eine kaustische Linie. In *Fig. 71* ist in der unteren Hälfte der Gang der gebrochenen Strahlen für eine Kugel von dem Brechungsvermögen der wässrigen Feuchtigkeit dargestellt, auf welche parallele Strahlen fallen. *F* sei der Brennpunkt der Centralstrahlen.

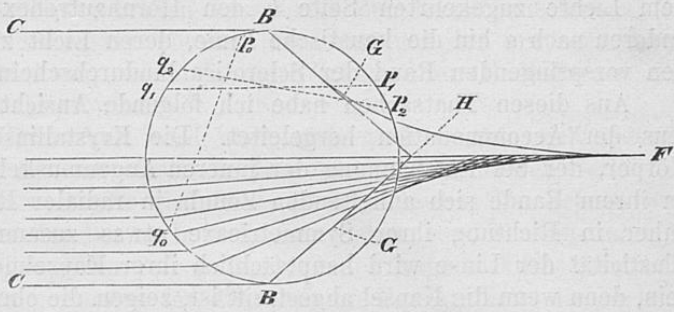


Fig. 71.

Die Randstrahlen weichen erheblich von dem Brennpunkte der Centralstrahlen ab, und schneiden sich mit den nächst benachbarten Strahlen in einer kaustischen Fläche, deren Durchschnitt durch die Curven *G F* angegeben ist. Der äußerste Strahl ist *C B*, er wird gebrochen nach *B H*; in dem Halbirungspunkte der Sehne des Kreises, welche der gebrochene Strahl bildet, in *G*, ist das Ende der kaustischen Linie *G F*. Nun denke man sich im Inneren der brechenden Kugel Ebenen gelegt, die ähnlich der Iris in der wässrigen Feuchtigkeit liegen. Legen wir eine solche Ebene senkrecht zur Ebene der Zeichnung durch $q_0 P_0$, so wird ihre ganze Vorderfläche vom Lichte getroffen und beleuchtet werden. Legen wir die Ebene durch $q_1 P_1$, so liegt ein Theil ihrer oberen Seite vor dem äußersten gebrochenen Strahle *B G*, dieser wird beleuchtet werden; ein anderer liegt dahinter und bleibt dunkel. Legen wir die Ebene durch $q_2 P_2$, so schneidet sie die kaustische Fläche. Es bleibt wieder ein Theil hell, einer dunkel, aber die Grenze zwischen dem beleuchteten und nicht beleuchteten Theile wird jetzt durch eine helle Linie bezeichnet, welche der Linie entspricht, in welcher die Ebene $q_2 P_2$ die kaustische Fläche schneidet. Aus der Figur ist leicht ersichtlich, daß, wenn der Theil der Ebene $q_2 P_2$, welcher die kaustische Fläche schneidet, sich rückwärts gegen den Mittelpunkt der Kugel hin bewegt, die helle Linie dem Rande näher rücken muß. Die Strahlen, um die es sich hierbei handelt, sind die zwischen q_2 und *B* eintretenden.

Dies kann man nun an der Iris beobachten, wenn sich das Auge für die Nähe accommodirt. Beleuchtet man das Auge eines Anderen, welcher abwechselnd einen näheren und ferneren Fixationspunkt betrachtet, die sich genau decken, so von der Seite, daß die kaustische Linie nahe am Ciliarrande der Iris erscheint, so sieht man sie bei der Accommodation für die Nähe sich dem Rande nähern, bei der für die Ferne sich davon entfernen. In *Figur 72* ist diese Beleuchtung der Iris dargestellt; das Licht fällt von der Seite

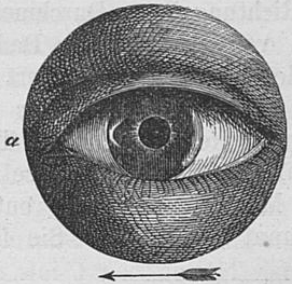


Fig. 72.

in der Richtung des Pfeils auf das Auge: auf der Iris sieht man an der dem Lichte zugekehrten Seite b den Hornhautreflex des Lichts, auf der anderen nach a hin die kaustische Linie, deren Licht zum Theil noch durch den vorspringenden Rand der Sclerotica hindurchscheint.

ⁿ Aus diesen Thatsachen habe ich folgende Ansicht über den Mechanismus der Accommodation hergeleitet. Die Krystalllinse ist ein elastischer Körper, der bei Entspannung der inneren Augenmuskeln durch den Zug der an ihrem Rande sich anheftenden Zonula in radialer Richtung gedehnt und daher in Richtung ihrer Symmetrieaxe etwas zusammengezogen ist. Die Elasticität der Linse wird hauptsächlich ihrer Kapselmembran zu verdanken sein, denn wenn die Kapsel abgestreift ist, zeigen die oberflächlichen Schichten der Linse mehr eine schleimige als eine gallertige Consistenz. Sie haben keine Spur von dem Bestreben ihre Form gegen äußere Kraft zu behaupten, oder nach Änderung der Form in die frühere Form zurückzukehren. Dafs aber die von der Kapsel umschlossene Linse elastisch ist, und dafs der Zug der Zonula genügt, sichtbare Formveränderungen hervorzubringen, läfst sich an toden, nicht zu alten menschlichen und thierischen Augen zeigen, wenn man von vorn her Linse und Zonula freilegt, und dann vorsichtig mit zwei feinen Pincetten die Zonula an entgegengesetzten Seiten der Linse fassend einen Zug ausübt. Man sieht dabei die Linse sich in Richtung des Zuges verlängern und wieder in ihre Kreisform zurückkehren, sobald der Zug nachläßt.

Im unverletzten Zustande ist die Zonula an ihrem äußeren Rande ziemlich fest mit den niedrig auslaufenden Firsten der Ciliarfortsätze und dadurch mit der Aderhaut verbunden, so dafs Linse, Zonula und Aderhaut eine vollständig geschlossene vom Glaskörper prall ausgefüllte Kapsel bilden. Der Druck der Flüssigkeit wird die Spannung der genannten Theile unterhalten müssen.

Die in Richtung der Meridiane des Auges verlaufenden Radialfasern des Ciliarmuskels, welche am hintern Ende der Ciliarfortsätze im Gewebe der Aderhaut endigen, werden bei ihrer Zusammenziehung das dort mit der Aderhaut und Glashaut fest verbundene hintere Ende der Zonula nach vorn ziehen, und dadurch die Spannung der Zonula und ihren Zug gegen die Peripherie der Linse aufheben müssen, so dafs in Folge davon die Linse in Richtung ihrer Durchmesser sich zusammenziehen, in Richtung ihrer Axe sich verdicken wird. Dadurch wird auch nothwendig die Wölbung ihrer beiden Flächen vergrößert werden.

Die vordersten mehr nach der Augenaxe hin gerichteten Fasern des Ciliarmuskels biegen zum Theil in Richtungen um, die dem Rande der Linse parallel verlaufen, und setzen so eine Art Ringfaserschicht zusammen, die von MAX LANGENBECK¹ entdeckt und *Compressor lentis* oder *Sphincter lentis* genannt worden ist. Sie liegen der Linse aber nirgend an. Die Function

¹ MAX LANGENBECK, *Klinische Beiträge zur Chirurgie und Ophthalmologie*. 1849.

dieser Fasern scheint mir nur die zu sein, auch den vorderen Theil der Ciliarfortsätze der zurückweichenden Linse und Zonula nachzuschieben, so daß keine Zerrung in deren Gewebe und kein Zug auf den vorderen Theil der Zonula entstehen kann, wodurch die Wirkung der Radialfasern des Ciliarmuskels beeinträchtigt würde.

Der Zug des Ciliarmuskels wird aber auch nach vornhin sich geltend machen, wo er sich an das elastische Gewebe an der inneren Seite des *Canalis Schlemmii* ansetzt. Er wird dieses nach rückwärts hin dehnen und damit auch den Ansatz der Iris nach rückwärts ziehen, was, wie die unter 5) oben beschriebenen Thatsachen zeigen, im lebenden Auge wirklich geschieht. Es wird dadurch Platz gewonnen für die wässrige Feuchtigkeit, die andererseits durch das Vordringen der Krystalllinse in der Augenaxe an Raum verliert.

Welche Fläche der Linse durch diese Änderung stärker verändert wird, muß wesentlich davon abhängen, ob der Zug der Zonula mehr die vordere oder hintere Linsenfläche trifft. Nach MAX SCHULTZE¹ treten geradezu alle Fasern der Zonula auf den peripherischen Rand der vorderen Hälfte der Linsenkapsel. Jedenfalls thun das die starken Fasern, welche auf den nach vorn vortretenden Firsten der Zonulafalten verlaufen. Daß diese gespannt und unnachgiebig sind, zeigt sich auch bei dem alten, oben schon erwähnten anatomischen Experimente PETIT's, wo man eine feine Canüle in den sogenannten *Canalis Petiti*, d. h. in den Raum zwischen Zonula und Glashaut einsticht und dann Luft einbläst. Dabei stülpen sich die hinteren schlaffen Theile der Zonula nach vorn aus und treten zwischen den straff gespannten Aufsenfirsten eiförmig gewölbt nach vorn, einer antiken Eierleiste entsprechend, daher PETIT den Canal *Canal godronné* nannte.

Aus dieser Straffheit der Aufsenfirsten der Zonula folgt nun, daß der Zug derselben hauptsächlich die vordere Linsenkapsel treffen und abplatten muß, wodurch das ganze Centrum der Linse etwas nach rückwärts gedrängt wird.

Eine solche Durchbiegung der Linse wird die vordere Fläche platter machen müssen, als sie durch rein radialen Zug geworden wäre. An der hinteren Fläche dagegen wird der größere Theil der Abplattung, den die radiale Spannung hervorbringen könnte, durch die Durchbiegung wieder aufgehoben. Auch die Verschiebung nach vorn, welche die hintere Fläche durch die Verkürzung der Linsenaxe erleiden sollte, wird durch die beschriebene Durchbiegung wieder aufgehoben. Indessen ist klar, daß die Linsensubstanz und der vor ihr ausweichende Glaskörper längs der Peripherie der Linse der wässrigen Feuchtigkeit gegenüber an Platz wieder gewinnen müssen, was die Linse in der Mitte durch das Zurückweichen ihrer vorderen Fläche verliert.

In der That schiebt sich, wie wir gesehen, wenn diese Spannung im fernsehenden Auge eintritt, der davor liegende peripherische Theil der Iris vor. Da die Iris ventilartig der vorderen Fläche der Linse anliegt, ist an

¹ M. SCHULTZE, *Archiv für mikroskopische Anatomie*. Bd. III. S. 496.

ein schnelles Eindringen von Wasser in den Raum hinter der Iris nicht zu denken; das Vortreten der peripherischen Iris zeigt ohne Zweifel auch ein entsprechendes Vortreten des hinter ihr liegenden Ciliarkörpers an.

Gespannte elastische Membranen, die ein unveränderliches Volumen einer incompressibeln Flüssigkeit umschließen, und mit einem kreisförmigen Rande angeheftet sind, wie die Zonula an der Aderhaut, streben, je mehr ihre Spannung wächst, desto mehr sich der Form eines Kugelsegments zu nähern. Im ungespannten Zustande, beim Nahesehen, wölbt sich die vordere Linsenfläche vor der flachen Krümmung der vorderen Zonulafirsten hervor. Im gespannten Zustande, beim Fernsehen, viel weniger. Indessen ist der Krümmungsradius der vorderen Linsenfläche von etwa 10 mm doch immer noch kleiner, als der der Zonulawölbung, der etwa auf 14 mm zu schätzen ist.

Für die Theorie des Mechanismus der Accommodation sind noch einige der an operirten Menschen gemachten Erfahrungen wichtig. A. VON GRAEFE¹ beobachtete an einem Auge, wo er die ganze Iris durch Operation entfernt hatte, daß die normale Breite der Accommodation vorhanden war, und auch die Krümmungsänderung der vorderen Linsenfläche deutlich beobachtet werden konnte. Daraus geht hervor, daß die Iris bei der Accommodation keine wesentliche Rolle spielt, wie es A. CRAMER² vermuthet hatte.

DONDERS³ stellte in zwei für die Untersuchung sehr günstigen Fällen, wo die Linse durch Staaroperation entfernt war, aber mit Hülfe einer convexen Brille noch gut gesehen werden konnte, fest, daß keine Spur von Accommodation vorhanden war, trotzdem bei dem Bestreben nahe Objecte zu sehen Converganz beider Augenaxen und Verengerung der Pupille eintrat. Das zeigt also namentlich, daß keine Veränderung in der Länge der Axe des Augapfels der Accommodation zu Hülfe kommt, wie dies früher vielfach vermuthet worden war.⁴

Dasselbe wird bestätigt durch die Wirkung des Atropins auf das Auge, wobei der *Sphincter pupillae* und der Ciliarmuskel zeitweilig vollständig gelähmt werden, die Pupille sich stark erweitert und die Accommodation ganz aufhört. Die äußeren Augenmuskeln, durch deren Druck auf den Äquator des Bulbus dieser nach hinten verlängert werden könnte, sind indessen ganz wirkungskräftig. Es ergiebt sich also daraus, daß sie nicht wesentlich zur Accommodation beitragen.

⁸³¹ Zu erwähnen ist in dieser Hinsicht noch ein Versuch von BAHR⁵ am unverletzten Auge.

BAHR betrachtete im Zustande der Accommodation ein nahes scharf beleuchtetes Rechteck, bis ein kräftiges Nachbild in seinem Auge entwickelt war, und warf dieses dann mit nachlassender Accommodation auf eine ferne Fläche, auf der er die scheinbare Größe des Nachbildes bestimmte. Da

¹ A. V. GRAEFE, *Graefes Archiv für Ophthalmol.* Bd. VII. (2) 150.

² A. CRAMER, *het Accommodatievermogen der Oogen*, Haarlem, 1853. Übersetzt von DODEN, Leer. 1855.

³ F. C. DONDERS, *On the anomalies of accommodation and refraction*. London. 1864. p. 320–321.

⁴ Eine entgegengesetzte Beobachtung will FÖRSTER gemacht haben. *S. Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde*. X. Jahrg. Febr., März. 1872.

⁵ C. R. BAHR, *De oculi accommodatione experimenta nova*. Berlin 1857. (Dissert.)

nun die Größe des Bildes auf der Netzhaut proportional ist dem Abstände der Netzhaut vom hinteren Knotenpunkte des Auges, und die Größe des Netzhautbildes in beiden Beobachtungen dieselbe war, so läßt sich aus einem solchen Versuche berechnen, in welchem Verhältniß sich der Abstand der Netzhaut vom zweiten Knotenpunkte ändert. BAHR fand aus seinen Versuchen eine Verschiebung des Knotenpunkts nach vorn um 0,35 Millimeter; meine weiter unten angestellte neuere Berechnung ergibt 0,356. Fände eine Verlängerung des Augapfels statt, so müßte die Veränderung jener Entfernung viel bedeutender sein, und wenn eine solche Verlängerung der einzige Grund der Accommodation wäre, bis zu 3 Millimeter betragen, was demnach, wie auch diese Versuche von BAHR zeigen, nicht der Fall sein kann.

Auch an frischen Augen getödteter Thiere läßt sich Zusammenziehungⁿ des Ciliarmuskels durch elektrische Reizung der vorderen Hälfte des Augapfels hervorbringen, wie schon CRAMER gefunden hat, dem es auch bei Tauben, wo der Muskel quergestreifte, sich schnell bewegende Fasern hat, gelang, die Änderung der Form der vorderen Linsenfläche zu beobachten. Später haben V. HENSEN und C. VOELCKERS¹ durch Reizung der Ciliarnerven bei Hunden Contractionen des Muskels hervorgebracht. Sie konnten constatiren, daß, wenn die Hornhaut bis auf einen 2 mm breiten peripheren Saum abgetragen war, dieser Saum bei Reizung des Muskels nach innen gezogen wurde; die Hornhaut also wirklich den vorderen Ansatzpunkt des Muskels bildete. Ein Stückchen der Hornhaut, welches mit dem Muskel nur noch durch das *Lig. pectinatum* in Verbindung stand, wurde bei der Contraction des Muskels an diesen herangezogen.

Durch ein Fenster der Sclera konnte die bei der Reizung eintretende Verschiebung der Aderhaut nach vorn beobachtet werden.

Eine sehr feine Nadel durch die Sclera und Aderhaut eingestochen bewegt sich bei Reizung der Ciliarnerven mit ihrem äußeren Ende nach hinten, was ebenfalls das Vorrücken der Aderhaut bei Spannung des Muskels anzeigt. Am Äquator des Auges schätzen die genannten Beobachter die Verschiebung auf $\frac{1}{2}$ mm. Auf den Ciliarmuskel eingestochen, bewegt sich die Nadel nicht.

Die vordere Fläche der Linse wölbt sich beim Hunde bei Tetanisirung des *Ganglion ciliare* stärker vor, auch wenn vorher die Iris theilweis weggenommen war. Die hintere Fläche verschob sich ein wenig nach hinten, was theils durch eine mit einem Deckgläschen geschlossene Öffnung in der Sclerotica beobachtet, theils durch ein Fühlhebelchen constatirt wurde. Zusammenziehung der Querdurchmesser der Linse war nicht sicher zu beobachten. Dagegen gelang es beiden Beobachtern, das Erschlaffen der Zonula bei Spannung des Ciliarmuskels mittels eines Fühlhebels zu beobachten.

War die Hornhaut bis auf einen Randstreifen von 1 mm Breite weggenommen, so war die Vorwölbung der Linse bei Reizung noch vorhanden,

¹ V. HENSEN u. C. VOELCKERS, *Experimentaluntersuchung über den Mechanismus der Accommodation*. Kiel, 1868.

wenn auch vermindert, ebenso wenn auch noch die Iris weggenommen wurde. Nach Entfernung auch der Linse wölbt sich der Glaskörper convexer vor. Läßt man jetzt den Accommodationsapparat spielen, so sieht man, wie die tellerförmige Grube sich stark vorwölbt, und beim Aufhören der Reizung schnell zurückgeht.

Ich gebe hier aufser der ersten von mir durchgeführten Berechnung eines schematischen Auges in zwei verschiedenen Accommodationszuständen¹ noch eine neuere Berechnung, welche gewonnen ist unter Anwendung von Mittelwerthen, wie sie durch die ophthalmometrischen Messungen bisher gefunden sind. Als Krümmungsradius der Hornhaut ist das Mittel von DONDERS Beobachtungen an normalsichtigen Männern und Frauen genommen.² Als Ort verschiedener Punkte und Flächen ist immer ihre Entfernung vom Hornhautscheitel angegeben, und zwar nach hinten positiv gerechnet, nach vorn negativ. Die Längen sind in Millimeter angegeben.

	Alte Berechnung Accommodation für		Neue Berechnung Accommodation für	
	Ferne	Nähe	Ferne	Nähe
Angenommen.				
Brechungsvermögen des Kammerwassers und Glaskörpers	103 <u>77</u>	103 <u>77</u>	1.3365	1.3365
Totales Brechungsvermögen der Krystalllinse .	16 <u>11</u>	16 <u>11</u>	1.4371	1.4371
Krümmungsradius der Hornhaut	8.0	8.0	7.829	7.829
Krümmungsradius der vorderen Linsenfläche .	10.0	6.0	10.0	6.0
Krümmungsradius der hinteren Linsenfläche .	6.0	5.5	6.0	5.5
Ort der vorderen Linsenfläche	3.6	3.2	3.6	3.2
Ort der hinteren Linsenfläche	7.2	7.2	7.2	7.2
Berechnet.				
Vordere Brennweite der Hornhaut	23.692	23.692	23.266	23.266
Hintere desgl.	31.692	31.692	31.095	31.095
Brennweite der Linse	43.707	33.785	50.617	39.073
Abstand des vorderen Hauptpunktes der Linse von ihrer Vorderfläche	2.1073	1.9745	2.126	1.989
Abstand des hinteren von der hinteren Fläche	-1.2644	-1.8100	-1.276	-1.823
Abstand der beiden Hauptpunkte der Linse von einander	0.2283	0.2155	0.198	0.187
Hintere Brennweite des Auges	19.875	17.756	20.713	18.689
Vordere desgl.	14.858	13.274	15.498	13.990
Ort des ersten Hauptpunktes	1.9403	2.0330	1.753	1.858
Ort des zweiten Hauptpunktes	2.3563	2.4919	2.106	2.257
Ort des ersten Knotenpunktes	6.957	6.515	6.968	6.566
Ort des zweiten Knotenpunktes	7.373	6.974	7.321	6.965
Ort des vorderen Brennpunktes	-12.918	-11.241	-13.745	-12.132
Ort des hinteren Brennpunktes	22.231	20.248	22.819	20.955

¹ Erste Auflage dieses Buches, S. 111.

² Die Berechnung für das fernsichtige Auge ist wohl nach einem Collegienhefte schon in GRAEFE und SÄMISCH, *Handbuch der Ophthalmologie*, VI., S. 230 unter HELMHOLTZ II von Herrn NAGEL mitgetheilt. Ein kleiner Rechnungsfehler ist hier verbessert.

Nimmt man an, daß bei der Accommodation für die Ferne dieses schematische Auge in unendliche Ferne blicken könne, so würde die Netzhaut nach der neuen Berechnung in der Axe des Auges 22,819 mm von der vorderen Hornhautfläche entfernt sein, und bei dem anderen berechneten Accommodationszustande ein Gegenstand deutlich gesehen werden, welcher 140,33 mm vor dem vorderen Brennpunkte, oder 152,46 mm vor der Hornhaut liegt. Es würde dies der Accommodationsbreite eines normalen Auges gut entsprechen.

Veränderungen der Hornhautkrümmung wollten einige ältere Beobachter¹ bei ungenaueren Untersuchungsmethoden gefunden haben. Neuere genauere Messungen dieser Krümmung mit Hilfe der reflectirten Bilder haben ergeben, daß sie ganz unverändert bleibt. Solche sind von SENEF², CRAMER³ und mir selbst angestellt worden. Das Ophthalmometer läßt eine sehr genaue Ausführung dieser Versuche zu, wobei Änderungen des Radius um $\frac{1}{200}$ seiner Größe wahrzunehmen sein würden, während ein Wechsel der Sehweite zwischen 5 Zoll und unendlicher Entfernung einen Wechsel des Krümmungshalbmessers von 6,8 auf 8 mm erfordern würde, wenn eine solche Veränderung die Accommodation bewirken sollte. Ich habe aber durchaus negative Resultate erhalten. Zu erwähnen ist hier noch ein sehr sinnreicher Versuch von TH. YOUNG, welcher dasselbe beweist. Er beschreibt ihn folgendermaßen: „Ich nehme aus einem kleinen botanischen Mikroskope eine biconvexe Linse von $\frac{8}{10}$ Zoll Radius und Brennweite, befestigt in einer beckenförmigen Fassung von $\frac{1}{5}$ Zoll Tiefe, und mache ihre Kante mit Wachs wasserdicht. Ich tröpfe ein wenig mäfsig kaltes Wasser hinein, bis es zu drei Vierteln damit angefüllt ist, und bringe es dann an das Auge, so daß die Hornhaut in das Becken hineinragt und überall mit dem Wasser in Berührung ist. Mein Auge wird dadurch sogleich weitsichtig, und das Brechungsvermögen der Glaslinse, welches durch das Wasser auf etwa 1,6 Zoll Brennweite zurückgeführt ist, ist nicht hinreichend, die Stelle der Hornhaut zu vertreten, welche durch das Wasser unwirksam geworden ist; aber die Hinzufügung einer anderen Linse von $5\frac{1}{2}$ Zoll Brennweite bringt mein Auge zu seinem natürlichen Zustande zurück, und noch etwas darüber hinaus. Ich wende dann das Optometer an, und finde dieselbe Ungleichheit in der horizontalen und verticalen Brechung wie ohne Wasser, und ich habe in beiden Richtungen eine Accommodationsfähigkeit bis zu einer Sehweite von 4 Zollen wie vorher. Im ersten Augenblicke erschien mir die Accommodation allerdings etwas geringer und nur im Stande, das Auge von dem für parallele Strahlen geeigneten Zustande zu einer Sehweite von 5 Zoll zu bringen, und dies liefs mich glauben, daß die Hornhaut eine kleine Wirkung im natürlichen Zustande haben könnte; indem ich aber überlegte, daß die künstliche Hornhaut ungefähr $\frac{1}{10}$ Zoll vor der Stelle der natürlichen sich befand, berechnete ich die Folgen dieses Unterschiedes und fand ihn genau ausreichend, um die Verringerung des Spielraums der Sehweite erklären.“

Um wie viel sich beim Nahesehen der Pupillarrand der Iris nach vorn verschiebt, läßt sich wenigstens annähernd bestimmen, nachdem man die Dimensionen und Krümmung der Hornhaut und die Entfernung der Pupillenfläche von

¹ J. P. LOBÉ, *Diss. de oculo humano*. Lugd. Batav. 1742. p. 119. — HOME, *Philos. Transact.* 1796. p. 1.

² Artikel „Sehen“ in R. WAGNER, *Handwörterbuch der Physiologie*.

³ A. CRAMER, *Het Accommodatievermogen der Oogen*. Harlem 1853. p. 45

113 der Hornhaut bestimmt hat. Es sei *C* Fig. 73 die Hornhaut, *c* und *d* ihr äußerer Rand, *a* *b* die Pupille beim Fernsehen. Hat sich nun der Beobachter gegen dieses Auge so gestellt, daß ihm die ganze Pupille gerade verdeckt wird, so muß *cb* die Gesichtslinie des Beobachters in der wässrigen Feuchtigkeit sein. Wird nun beim Nahesehen die ganze Pupille vor dem Rande der Sclerotica eben sichtbar, und kennt man ihre Breite $\alpha\beta$, so muß sie ganz vor der Linie *cb* liegen, und doch an diese anstoßen, so wie in Fig. 65 angegeben ist, und dadurch findet man wenigstens angenähert die Größe ihrer Verschiebung. Diese betrug unter den von mir untersuchten Augen bei dem Auge *O. H.* 0,36 mm, bei dem Auge *B. P.* 0,44 mm. Tritt die Pupille beim Nahesehen nicht ganz vor, sondern nur die Hälfte, zwei Drittel u. s. w. derselben, so muß man die Größe des hervortretenden Theils schätzen und danach die Berechnung anstellen.

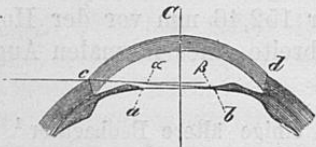


Fig. 73.

Da die vordere Fläche der Linse eine, wenn auch kleine, Quantität des einfallenden Lichtes reflectirt — das größere der bekannten SANSON'schen Bildchen — so kann diese Spiegelung, wie bei der Hornhaut, zur Bestimmung des Krümmungshalbmessers der vorderen Linsenfläche gebraucht werden. Indessen muß eine andere Methode eingeschlagen werden, und läßt sich auch nicht eine gleiche Genauigkeit erreichen, wie bei den Messungen der Hornhaut, weil der Reflex kein recht scharfes Bild formt, und wenigstens, wenn er von Lampenlicht herrührt, zu schwach ist, um im Ophthalmometer in deutlich sichtbare Doppelbilder zerlegt werden zu können. Jedes der Doppelbilder hat natürlich nur die halbe Lichtstärke des einfachen Bildes.

Es schien mir daher am besten, die Größe des Bildchens der vorderen Linsenfläche mit einem dicht daneben stehenden Hornhautbildchen zu vergleichen, dessen Größe leicht berechnet oder gemessen werden kann. Ich mußte deshalb zwei gespiegelte Objecte haben, das eine von veränderlicher Größe, um das Hornhautbild des einen gleich dem ersten SANSON'schen Bilde des andern machen zu können.

Die Anordnung des Apparates ist perspectivisch dargestellt Fig. 75 und im Grundrifs in Fig. 74. *O* ist das beobachtete Auge, dicht vor ihm liegt ein kleines ebenes Metallspiegelchen *A* (ich benutzte ein OERTLING'sches Stahlspiegelchen) horizontal auf einer festen Unterlage. In einiger Entfernung ($1\frac{1}{2}$ Fufs) davor befinden sich zwei stellbare Schirme *b* und *cc* mit den Öffnungen *f* und *g*. Die Öffnung *f* ist eng (2 Linien im

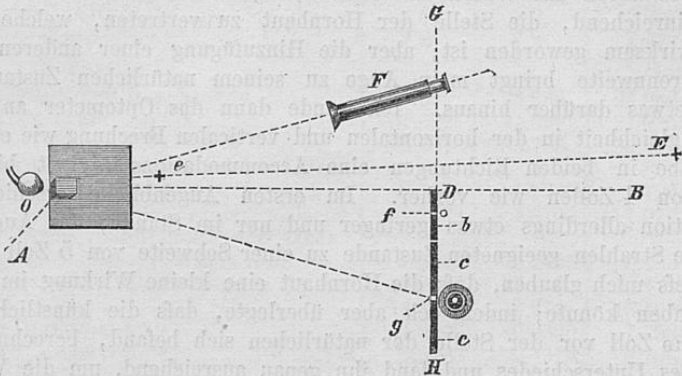


Fig. 74.

Die Anordnung des Apparates ist perspectivisch dargestellt Fig. 75 und im Grundrifs in Fig. 74. *O* ist das beobachtete Auge, dicht vor ihm liegt ein kleines ebenes Metallspiegelchen *A* (ich benutzte ein OERTLING'sches Stahlspiegelchen) horizontal auf einer festen Unterlage. In einiger Entfernung ($1\frac{1}{2}$ Fufs) davor befinden sich zwei stellbare Schirme *b* und *cc* mit den Öffnungen *f* und *g*. Die Öffnung *f* ist eng (2 Linien im

Quadrat), hinter ihr steht ein kleines Wachslichtchen. Die Öffnung g ist größer (9 Linien im Quadrat), hinter ihr befindet sich eine recht helle und große Lampenflamme. Das Auge O stellt sich nun so, daß es gleichzeitig über den Spiegel A hinweg die beiden erleuchteten Öffnungen sieht, als auch im Spiegel ihre Spiegelbilder, welche scheinbar bei f_1 und g_1 liegen. Die Öffnung f und ihr Spiegelbild f_1 bilden nun das Object für die Hornhautspiegelung, die Öffnung g und ihr Spiegelbild g_1 das Object für die Linsenpiegelung. Um die Schirme richtig zu stellen, werden auf dem Tische erst, wie der Grundriß zeigt, die Linien OB und senkrecht dazu GH gezogen. Letztere fällt mit der Ebene beider Schirme zusammen. Dem beobachteten Auge O wird ein Fixationspunkt E neben dem Ständer des Schirms b vorbei in der Ferne angewiesen. Der Beobachter hat sein Auge, entweder unbewaffnet oder mit einem schwach vergrößernden, aber lichtstarken Fernrohre F , versehen über der Linie OF , welche mit OB einen Winkel bildet, der gleich dem Winkel gOB ist. Das Gesichtszeichen E wird nun so gestellt, daß der Linsenreflex in der Mitte der Pupille erscheint, und das Hornhautbildchen der kleineren Lichtpunkte dicht daneben. Dann wird der Schirm b so lange gehoben oder gesenkt, bis der Abstand der kleinen gespiegelten Lichtpunkte genau eben so groß ist, wie der der Mittelpunkte der größeren.

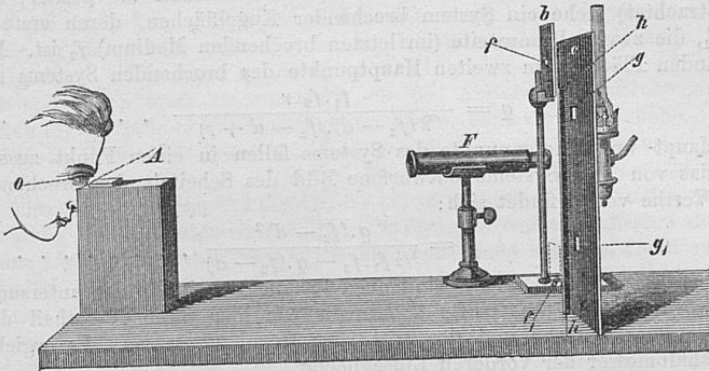


Fig. 75.

Die Spiegelung auf der Hornhaut wird durch eine einfache spiegelnde Fläche bewirkt, deren negative Brennweite nach den bekannten Gesetzen der Katoptrik gleich dem halben Krümmungsradius ist. Die vordere Linsenfläche ist aber in diesem Falle ein aus einer brechenden und einer spiegelnden Fläche zusammengesetztes spiegelndes System, ähnlich einer convex-concaven gläsernen Sammellinse, deren concave Seite mit Spiegelfolie belegt ist. Die Brennweite q dieses spiegelnden Systems ist sowohl von der Krümmung der brechenden, als von der der spiegelnden Fläche und ihrem gegenseitigen Abstände abhängig. Diese Brennweite q läßt sich aus dem beschriebenen Versuche bestimmen. Die Bilder, welche spiegelnde Systeme von weit entfernten Gegenständen entwerfen, verhalten sich nämlich direct wie die Brennweiten der Systeme, wenn also zwei verschiedene Systeme von ungleichen gleich weit entfernten Gegenständen gleiche Bilder entwerfen, muß sich ihre Brennweite umgekehrt, wie die Gegenstände verhalten. Es verhält sich also

$$q : \frac{1}{2}R = f_1 : gg_1.$$

Um den scheinbaren Abstand der Öffnung g von ihrem Spiegelbilde g_1 zu finden, stellt man neben sie einen senkrechten Maßstab hh (Fig. 75). Das Spiegelbild g_1 liegt eben so tief unter der verlängerten Ebene des Spiegels A , als g selbst darüber. Um nun den Ort zu finden, wo die Spiegelebene den Maßstab schneidet, braucht man nur sehr flach über das Spiegelchen hinweg nach dem Maßstabe hin zu visiren. Man sieht dann an der Grenzlinie direct gesehene und gespiegelte Theilstriche sich decken. Die

Mitte zwischen zwei solchen sich deckenden Theilstrichen ist der Punkt des Maßstabes, der in die Verlängerung der Spiegelebene fällt. Dessen Abstand von der Mitte der Öffnung g doppelt genommen ist gleich dem Abstände gg_1 . Ebenso findet man ff_1 .

Es ergaben sich in drei verschiedenen Reihen von Versuchen folgende Werthe für

das Verhältniß $\frac{R}{2q}$:

	O. H.	B. P.	I. H.
$\frac{R}{2q} =$	0,308	0,635	0,544
	0,313	0,618	0,544
	0,346	0,571	0,478
Mittel	0,322	0,608	0,522
$q =$	11,39 mm	6,288 mm	7,810 mm

Endlich ist aus q noch der Radius r der vorderen Linsenfläche zu berechnen. Die Herleitung der Formel, welche die Brennweite eines zusammengesetzten brechenden und spiegelnden Systems giebt, ist weitläufig aber ohne Schwierigkeiten. Ich gebe daher hier nur ihr Resultat, und zwar gleich für einen etwas allgemeineren Fall. Vor der spiegelnden Fläche vom Radius r (Radien concaver Flächen als positiv, convexer als negativ betrachtet) stehe ein System brechender Kugelflächen, deren erste Brennweite (in Luft) f_1 , die zweite Brennweite (im letzten brechenden Medium) f_2 ist. Der Abstand der spiegelnden Fläche vom zweiten Hauptpunkte des brechenden Systems sei d , so ist

$$q = \frac{f_1 \cdot f_2 \cdot r}{2(f_2 - d) \cdot (f_2 - d + r)} \dots \dots \dots 1)$$

Die Haupt- und Knotenpunkte des Systems fallen in einen Punkt zusammen, und dieser ist das von dem Systeme entworfene Bild des Scheitels der brechenden Fläche. Aus dem Werthe von q findet sich:

$$r = \frac{q \cdot (f_2 - d)^2}{\frac{1}{2} f_1 \cdot f_2 - q \cdot (f_2 - d)} \dots \dots \dots 1a)$$

Die beiden Größen f_1 und f_2 sind oben für die Hornhäute der untersuchten Augen berechnet worden. Für die Größe d können wir hier ohne Nachtheil den Abstand zwischen der Pupillarfläche und der Mitte der Hornhaut setzen. Es ergibt sich der Krümmungshalbmesser der vorderen Linsenfläche

für das Auge	O. H.	gleich	11,9 mm
- - -	B. P.	-	8,8 -
- - -	I. H.	-	10,4 -

Bei zwei todtten Linsen fand ich mit dem Ophthalmometer den Krümmungsradius der vorderen Fläche gleich 10,2 und 8,9 mm, was mit den Messungen an den lebenden Augen gut stimmt.

Mittels des Apparates, *Fig. 73* und *74*, kann nun auch leicht die Größenveränderung des Bildes der vorderen Linsenfläche gemessen werden, indem man die Beobachtung ganz ebenso ausführt, wie dort beschrieben ist, und nur die Augen für das nähere Ge- sichtszeichen accommodiren läßt. Ich fand unter diesen Umständen die Brennweite q des aus der Hornhaut und vorderen Linsenfläche zusammengesetzten spiegelnden Systems und den Krümmungsradius r der vorderen Linsenfläche, wie folgt:

Auge.	Krümmungshalbmesser der vorderen Linsenfläche		Verschiebung der Pupille bei Accommodation für die Nähe.
	fernsehend.	nahsehend.	
O. H.	11,9	8,6	0,36
B. P.	8,8	5,9	0,44
J. H.	10,4		

Um den Krümmungsradius der vorderen Linsenfläche nach den obigen Gleichungen ¹¹⁴ berechnen zu können, muß man den Krümmungsradius der Hornhaut und die Entfernung der vorderen Linsenfläche (Pupille) von der Hornhaut kennen. Beide Größen waren an den angeführten Augen schon vorher gemessen.

Das Spiegelbild, welches die hintere Linsenfläche von fernen Gegenständen entwirft, verändert seine Größe ebenfalls bei geänderter Accommodation des Auges, aber in sehr unbedeutendem Grade. Ich beobachtete diese Veränderung durch das Ophthalmometer, indem ich zwei Flammen senkrecht über einander seitlich vom Auge hinter den Öffnungen eines Schirms aufstellte und deren von der hinteren Linsenfläche gespiegelte Bilder beobachtete. Ich stellte die Doppelbilder der beiden Lichter, so wie *Fig. 76* zeigt, neben einander. Hier sind a_0 und a_1 die Doppelbilder des unteren, b_0 und b_1 die des oberen Lichts. Die einander genäherten Bilder a_1 und b_0 deckten sich nicht, sondern standen dicht neben einander, so daß ich sie gesondert erkennen konnte. Bei der Accommodation für die Nähe verschob sich b_0 etwas in der Richtung nach a_0 und a_1 in der Richtung nach b_1 hin. Ich schätzte die Breite der Verschiebung etwa gleich der Hälfte der Breite eines jeden lichten Flecks, und da die Entfernung der Mittelpunkte der Öffnungen, durch welche das Licht fiel, gleich der sechsfachen Breite der Öffnungen war, so war die Verkleinerung des Bildes etwa $\frac{1}{12}$ seiner Größe. Andere Beobachter haben zum Theil etwas größere Änderungen gefunden (s. S. 147).

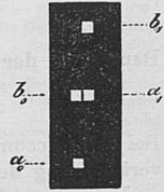


Fig. 76.

Endlich suchte ich noch zu ermitteln, ob die hintere Linsenfläche sich bei der Accommodation für die Nähe in der Richtung von hinten nach vorn verschöbe. Ich verfuhr dabei in derselben Weise, wie ich die scheinbare Entfernung der hinteren Linsenfläche von der Hornhaut bestimmt hatte. Bei derselben Anordnung des Apparates untersuchte ich, ob der Lichtreflex der hinteren Linsenfläche bei veränderter Accommodation und unveränderter Richtung der Augenaxe seinen Platz änderte, wobei abwechselnd das Fernrohr rechts und das Licht links, dann wieder das Fernrohr links und das Licht rechts stand. Indessen habe ich keine Ortsveränderung dieses Bildchens bemerken können. Die scheinbare Entfernung der hinteren Linsenfläche von der Hornhaut wird also bei den Accommodationsänderungen nicht merklich verändert.

Was dürfen wir nun aus diesen Veränderungen des Spiegelbildchens und des scheinbaren Ortes der hinteren Linsenfläche auf die wirklichen Veränderungen derselben für Schlüsse ziehen? Der scheinbare Ort dieser Fläche wird durch die Brechung in der Linse überhaupt sehr wenig geändert, da sie dem hinteren Knotenpunkte der Linse ziemlich nahe liegt, und wir können daraus schließen, daß auch die Unterschiede ihrer Verschiebung durch die Brechung bei verschiedenen Accommodationszuständen des Auges jedenfalls so klein sein werden, daß wir sie vernachlässigen können. So wird z. B. in dem neueren schematischen Auge, dessen optische Constanten wir in diesem Paragraphen als Beispiel berechnet haben, beim Fernsehen die hintere Linsenfläche scheinbar um 0,166 mm, beim Nahesehen um 0,102 mm nach vorn verschoben; sie würde also, während sie in Wirklichkeit an ihrer Stelle bleibt, sobald das Auge sich für die Nähe accommodirt, scheinbar um 0,064 mm nach hinten rücken. Dies ist aber zu wenig, um wahrgenommen zu werden. Übrigens kann diese Rechnung eben nur dazu dienen zu zeigen, daß die Verschiebungen und ihre Unterschiede überhaupt klein sind, keineswegs um den Sinn dieses Unterschiedes in der wirklichen Krystalllinse zu zeigen, weil hierbei wesentlich die Entfernung der Hauptpunkte der Linse von einander in Betracht kommt, welche in der Krystalllinse jedenfalls geringer ist als in den schematischen homogenen Linsen.

Wir können also nur sagen, daß der wahre Ort der hinteren Linsenfläche bei den Accommodationsänderungen nicht merklich geändert werde.

Um zu ermitteln, wie das von der hinteren Linsenfläche entworfene Spiegelbild sich bei Änderungen der Augenmedien verändere, denken wir uns die spiegelnde Fläche durch eine unendlich dünne Schicht Glaskörper von der letzten brechenden Fläche des

Auges getrennt. Dann können wir für die Cardinalpunkte des brechenden Systems die Cardinalpunkte des Auges nehmen. Es sei n das Brechungsverhältniß des Glaskörpers; ferner nennen wir p die Entfernung des hinteren Brennpunktes des Auges von der hinteren Linsenfläche nach hinten gerechnet, ϵ die des zweiten Knotenpunktes des Auges von derselben Fläche nach vorn gerechnet. In der Gleichung 1), welche die Brennweite eines zusammengesetzten brechenden und spiegelnden Systems giebt, haben wir zu setzen

$$\begin{aligned} f_1 &= p + \epsilon \\ f_2 &= n \cdot (p + \epsilon) \\ f_2 - d &= p. \end{aligned}$$

Dann wird der Werth der Brennweite des brechenden und spiegelnden Systems:

$$q = \frac{n \cdot r}{2} \cdot \frac{(p + \epsilon)^2}{p \cdot (p + r)} \quad \dots \dots \dots 2)$$

Bei der Accommodation für die Nähe wird ϵ jedenfalls größer, weil bei der Gestaltveränderung der Linse die Knotenpunkte des Auges vorrücken müssen; dadurch würde auch, wenn sich r und p gar nicht veränderten, der Werth von q und die Größe des Spiegelbildes zunehmen müssen. Dagegen wird p bei der Accommodation für die Nähe kleiner und dadurch kann der Werth von q auch kleiner werden, unter den Verhältnissen dieser Größen im Auge. Differentiirt man q nach p , so erhält man

$$\frac{dq}{dp} = \frac{n \cdot r}{2} \cdot \frac{p + \epsilon}{p^2 \cdot (p + r)^2} \cdot [p \cdot r - (2p + r) \cdot \epsilon].$$

Von den Factoren dieses Ausdrucks kann nur der letzte, in der eckigen Klammer eingeschlossene negativ werden, wird es aber wohl im normalen Auge nicht, da ϵ gegen p und r sehr klein ist. Es wird $\frac{dq}{dp}$ positiv sein, d. h. q wird mit p zugleich größer

und kleiner werden. Es würde also bei der Accommodation für die Nähe, wobei p kleiner wird, wenn wir vorläufig von der Veränderung von ϵ absehen und r constant setzen, auch q und das Spiegelbild der hinteren Linsenfläche kleiner werden können, und man könnte vermuthen, die beobachtete Verkleinerung dieses Bildes sei dadurch hervorgebracht. Die Rechnung nach der Gleichung 2) indessen ergiebt das Gegentheil. Nehmen wir aus LISTING's schematischem Auge die Werthe $p = 14,647$, $\epsilon = 0,3601$, $r = 6$, so würde p auf 10,597 verkleinert werden müssen, um q um $\frac{1}{12}$ seines Werthes zu verringern. Der hintere Brennpunkt des Auges müßte also 4 mm vor die Netzhaut rücken, was jedenfalls schon die mögliche Veränderung der Lage dieses Punktes überschreitet. Aber da ein Theil der hierdurch bewirkten Verkleinerung des Bildes durch das Vorrücken der Knotenpunkte (d. h. Vergrößerung von ϵ) wieder aufgehoben werden würde, wie vorher auseinandergesetzt ist, so können wir nicht zweifeln, dafs die Verkleinerung des Bildchens auf der hinteren Linsenfläche ohne eine, wenn auch geringe Vermehrung der Krümmung dieser Fläche nicht die beobachtete Größe haben könne.

Berechnet man die Brennweiten q für das neuere schematische Auge dieses Paragraphen, so findet man für das fernsehende 2,850, für das nahesehende 2,715, welche Größen nur um $\frac{1}{21}$ ihres Werthes unterschieden sind, während die dazu gehörigen Krümmungsradien (6 und 5,5 mm) um $\frac{1}{12}$ differiren. Hier verdeckt also die Änderung der brechenden Mittel die des Krümmungsradius zum Theil, und läßt sie kleiner erscheinen, als sie wirklich ist. Wir schliessen daraus, dafs die hintere Fläche der Linse bei der Accommodation für die Nähe sich stärker wölbt.

KNAPP¹ hat an vier individuellen Augen die Lage des Fernpunktes und Nahepunktes, die Krümmung und Lage der Hornhaut und der Linsenflächen beim Sehen für die Ferne, wie bei der Accommodation für die Nähe bestimmt und gefunden, dafs die aus den Krümmungsänderungen der Krystalllinse berechnete Accommodation hinreichend gut mit

¹ H. KNAPP, *Graefe's Archiv für Ophthalmologie*. VI. (2) S. 1. 1860.

der wirklich stattfindenden Accommodationsbreite übereinstimmte, so daß die Annahme einer Verlängerung des Auges hierdurch ausgeschlossen war.

Ähnliche Bestimmungen sind ferner gemacht worden von ADAMÜCK und WOINOW² von MANDELSTAMM und SCHÖLER³, von REICH⁴ und endlich von WOINOW⁵.

Ich gebe hier die von diesen Beobachtern gemessenen Werthe sowohl beim Sehen für die Ferne, wie bei der Accommodation für die Nähe, und füge, des Vergleichs halber, die schon oben angegebenen Resultate meiner eigenen Bestimmungen hinzu.

		Krümmungsradius der Hornhaut	Abstand der vorderen Fläche der Krystalllinse von dem Hornhautscheitel		Abstand der hinteren Fläche der Krystalllinse von dem Hornhautscheitel		Krümmungsradius der vorderen Linsenfläche		Krümmungsradius der hinteren Linsenfläche	
			für den Fernpunkt	für den Nahepunkt	für den Fernpunkt	für den Nahepunkt	für den Fernpunkt	für den Nahepunkt	für den Fernpunkt	für den Nahepunkt
HELMHOLTZ	I	7.338	4.024	3.664	7.172	7.172	11.9	8.6	5.83	
	II	7.646	3.597	3.157	7.232	7.232	8.8	5.9	5.13	
	III	8.154	3.739	—	7.141	7.141	10.4	—	5.37	
KNAPP	IV	7.7705	3.5924	3.0343	7.5127	7.5127	8.2972	5.3213	5.3546	4.6585
	V	8.0303	3.6073	3.0533	7.4568	7.4568	7.9459	4.8865	5.4867	4.9536
	VI	7.1653	3.3774	2.7295	7.1534	7.1534	7.8600	4.8076	6.9012	5.6098
	VII	7.2053	3.4786	2.8432	7.1011	7.1011	9.0641	5.0296	6.4988	5.0855
ADAMÜCK und WOINOW	VIII	7.2303	3.9981	3.29523	7.200	7.200	9.77751	8.21771	6.06353	4.6941
	IX	7.15568	3.23731	2.98985	7.200	7.200	10.2021	8.5975	6.2156	5.0001
	X	6.85224	2.8997	2.4876	6.8435	6.8247	9.1139	7.3104	7.6008	6.3792
	XI	7.17369	3.6332	3.07682	7.200	7.200	10.543	8.80103	6.5331	5.6293
MANDELSTAMM und SCHÖLER	XII	7.3408	3.7097	3.4606	7.5780	7.9048	10.5409	6.4881	6.4088	5.0494
	XIII	7.785	3.539	2.954	7.1218	6.803	10.159	6.496	6.331	5.664
REICH	XIV	7.201	3.654	3.3924	7.6474	7.7817	10.408	5.9358	6.5875	4.9872
	XV	7.4544	3.708	3.3234	7.4164	7.4879	10.5650	7.3822	5.5373	4.5825
	XVI	7.7939	3.6516	3.2626	7.4332	7.5861	11.197	8.2045	6.2229	5.1976
WOINOW	XVII	8.00747	3.6175	3.0028	7.200	7.200	9.3785	5.2304	6.2480	4.9714

Für den Mechanismus der Accommodation ist es wichtig, den Ursprung der Iris genau zu kennen. Ich habe den *Canalis Schlemmii* mit Umgebung, wie er sich auf feinen Querschnitten der Augenhöhle darstellt, in Fig. 2 (S. 7) abgebildet. *A* ist der Querschnitt des Kanals, der wohl auch im lebenden fernsehenden Auge eine längliche Spalte bildet, *C* die Cornea, *S* die Sclerotica, *D* die Bindehaut, *B* die Aderhaut, *E* ein Ciliarfortsatz, *J* die Iris. Die innere Wand des Kanals ist aus verschiedenen Geweben zusammengesetzt. Der hinterste Theil dieser Wand bei *a* besteht ganz deutlich aus demselben Gewebe eng durchflochtener Sehnenfasern wie die Sclerotica, von der er ausgeht. Der vordere Theil besteht dagegen aus einem anderen Gewebe, welches undurchsichtiger ist als das Sehngewebe, stärker sich abzeichnende, gegen Essigsäure und Kali sehr

¹ E. ADAMÜCK u. M. WOINOW, *Gräfe's Archiv für Ophthalmologie*. XVI. (1) S. 144. 1870.

² L. MANDELSTAMM u. H. SCHÖLER, *Gräfe's Archiv für Ophthalmol.* XVIII. (1) S. 155. 1872.

³ M. REICH, *Gräfe's Archiv für Ophthalmol.* XX. (1) S. 207. 1874.

⁴ M. WOINOW, *Ophthalmometrie*. Wien. 1871. S. 119.

116

resistente Fasern enthält, und daher wohl für elastisches Gewebe zu halten ist. Nach vorn schiebt es sich zwischen *Membrana Descemetii* und die Knorpelsubstanz der Hornhaut ein, nach hinten heftet es sich theils an den hinteren sehnigen Theil der Wand, theils verbindet es sich mit den Faserzügen des Spannmuskels der Aderhaut. Das System der Aderhaut hängt nur mit der hinteren Hälfte der inneren Wand des SCHLEMMschen Kanals fest zusammen, wo der sehnige und elastische Theil sich verbinden. Doch entspringt auch von dem vorderen Theile der Kanalwand ein lockeres Netzwerk von Fasern, die die Charaktere der elastischen an sich tragen, welche sich an den Anfang der Iris anheften. Die Fasermassen, welche dem Spannmuskel und der Iris angehören, sieht man zum Theil von der Wand des Kanals entspringen, zum Theil mögen sie aber auch direct von der Aderhaut auf die Iris übergehen. In dem Gewebe der Ciliarfortsätze sieht man eine große Zahl weiter Lumina durchschnittener Blutgefäße, auf ihrem dem Glaskörper zugekehrten Rande die Lage des schwarzen Pigments.

Um sich von der Richtigkeit der hier gegebenen Darstellung des Ansatzes der Iris zu überzeugen, muß man einerseits feine Schnitte von getrockneten Augenhäuten untersuchen, dabei aber beachten, daß das Trocknen sehr starke Verzerrungen hervorbringen kann, und daß die elastischen Fasern vor dem Ansatz der Iris sehr leicht reißen oder brechen, wenn man die Iris von der Hornhaut abzieht. Andererseits muß man frische Präparate untersuchen, wobei man am besten eine Borste in den SCHLEMMschen Kanal einführt, ebenfalls aber sehr sorgfältig jedes Ziehen an der Iris oder Chorioidea vermeiden muß, denn dadurch kann man der Muskelmasse, durch welche diese Theile befestigt sind, jede beliebige Gestalt geben. Hebt man die Iris leise auf, und legt sie auf die Ciliarfortsätze zurück, so bemerkt man die feinen elastischen Fäden, welche sich zum vorderen Rande des Kanals hinüberspannen. Zieht man dann die Borste nach vorn, so erkennt man leicht die elastische Dehnbarkeit des vorderen Theils der Kanalwand. Schlägt man dagegen Iris und Chorioidea nach vorn über, und zieht die Borste nach hinten an, so zeigt sich der hintere Theil der Wand als unausdehnbar.

Die beschriebene Art des Ansatzes scheint mir für das Zurückweichen der Seitentheile der Iris beim Nahesehen wichtig zu sein. Ist die Iris nämlich erschlafft, so wird sie durch das Netzwerk der elastischen Fasern bei b bis zum vorderen Rande des SCHLEMMschen Kanals an dessen innerer Wand festgehalten. Spannen sich dagegen die circulären und radialen Fasern der Iris gleichzeitig, so bietet erst die Sehnenmasse am hinteren Rande des Kanals ihrem Zuge einen genügend festen Widerstand, und man kann daher sagen, die erschlaffte Iris setzt sich an den vorderen, die gespannte an den hinteren Rand des SCHLEMMschen Kanals, welche im Mittel 0,45 mm auseinanderliegen. In *Fig. 70*, S. 134, habe ich das verschiedene Verhalten des Ansatzes der Iris beim Fernsehen (Seite *F'*) und Nahesehen (Seite *N* der Figur) darzustellen gesucht. Der SCHLEMMsche Kanal ist auf beiden Seiten mit *s* bezeichnet.

Ein anderer Theil des Auges, dessen Wirkungen bei der Accommodation noch in Betracht kommen könnten, sind die Ciliarfortsätze. L. FICK¹ hat nachgewiesen, daß sie unter dem Einflusse des elektrischen Stromes sich zusammenziehen, und ihr Blut entleeren, welches durch ziemlich weite Gefäßverbindungen leicht in die *Vasa vortiosa* der Aderhaut abfließen kann. Er nimmt an, daß durch diesen Übergang des Blutes in dem Theile des Auges, welcher hinter der durch die Linse und Zonula gebildeten Scheidewand liegt, der hydrostatische Druck vermehrt, vorn vermindert werde. Dadurch werde die Mitte der Linse nach vorn gedrängt, ihre vordere Fläche wölbe sich deshalb mehr. Dagegen behauptet FICK folgerichtig, daß die hintere Fläche dabei flacher werde, was den Beobachtungen nicht entspricht. Auch J. CZERMAK² hat in einem Versuche, den Mechanismus der Accommodation zu erklären, neben der von CRAMER angenommenen Spannung der Iris und des Ciliarmuskels eine Anschwellung der Ciliarfortsätze zu Hilfe genommen, wodurch ein Druck auf den Rand der Linse ausgeübt werden könnte.

¹ L. FICK, *J. Müller's Archiv.* 1853. S. 449.

² J. CZERMAK, *Prager Vierteljahrsschr. für praktische Heilkunde.* XLIII. S. 109.

Gegen die Ansicht, daß die Augenmuskeln durch ihren Druck auf den Augapfel dessen Gestalt veränderten, ihn namentlich in Richtung der Augenaxe verlängerten, und dadurch die Netzhaut weiter von der Linse entfernten, eine Ansicht, die vor der Entdeckung der Formänderung der Linse viel gewichtige Freunde hatte, ist anzuführen, erstens, daß, wie ich durch Messungen mit dem Ophthalmometer gefunden habe, jede Steigerung des hydrostatischen Drucks im Auge die Hornhaut flacher macht, was man an lebenden Augen würde beobachten können, wenn es der Fall wäre, und zweitens, daß bei einem geringen Drucke mit dem Finger auf den Augapfel durch den Augenspiegel beobachtet werden kann, wie die Gefäße der Netzhaut enger werden, nur noch intermittirende Blutströme bei den Pulswellen hindurchlassen, endlich ganz collabiren. Sobald die intermittirende Bewegung (sichtbare Pulsation der Schlagadern) beginnt¹, verschwindet die Empfindlichkeit der Netzhaut, wahrscheinlich wegen ungenügender Blutzufuhr, und das Gesichtsfeld wird vollkommen schwarz.

Endlich sind noch die Versuche von TH. YOUNG anzuführen, welche wohl kaum einen Zweifel darüber bestehen lassen können, daß auch nicht die geringste Verlängerung der Augenaxe beim Nahesehen eintritt. Man kann die Fläche der Bindehaut des Auges zwischen den Augenlidern mit einem glatten, gut polirten Stücke Metall ohne erhebliche Beschwerde berühren. Man setze in den inneren Augenwinkel auf die Bindehaut einen glatten eisernen Ring (eines Schlüssels) auf, den man fest gegen den inneren Rand der Augenhöhle anstëmmt, und wende das Auge nach der inneren Seite herüber, so daß man durch den Ring und an dem Nasenrücken vorbei in die Ferne sieht. Dabei kommt der innere Umfang der Hornhaut ganz dicht an den Schlüssel zu liegen, und es wird somit verhindert, daß der Augapfel bei der Accommodation sich nach vorn verschieben könne. Nun dränge man den Ring eines ganz kleinen Schlüssels am äußeren Augenwinkel zwischen den Augapfel und Knochen ein. Dabei wird durch den Druck auf den Augapfel die Netzhaut gereizt, und es erscheint im Gesichtsfelde scheinbar vor dem Nasenrücken ein dunkler, anfangs auch wohl heller Fleck, ein Druckbild. Dieses reichte bei YOUNG bis auf die Stelle des deutlichsten Sehens, und er konnte erkennen, daß gerade Linien im Bereiche dieses Druckbildes eine leichte Krümmung erhielten, welche von einer durch den Druck veranlaßten leichten Einbiegung der Sclerotica herzurühren schien. Da das Druckbild an der Stelle des deutlichsten Sehens entstand, mußte der kleine Schlüssel die Gegend des gelben Flecks an der Hinterseite des Augapfels treffen. Unter diesen Umständen kann eine Verlängerung der Augenaxe offenbar nicht eintreten, ohne die Schlüssel von ihrer Stelle zu drängen. Wäre also die Accommodation mit einer Verlängerung der Augenaxe verbunden, so müßte sie unter diesen Umständen entweder ganz unmöglich sein, oder es müßten die Schlüssel verdrängt werden, und es müßte dabei das Druckbild wegen stärkerer Einbiegung der Hinterwand des Augapfels an Umfang außerordentlich zunehmen. Nichts von allem diesem ist der Fall. Das Auge kann vollständig so gut wie sonst accommodirt werden, und das Druckbild bleibt bei veränderter Accommodation ganz dasselbe.

TH. YOUNG scheint etwas hervorstehende Augen gehabt zu haben, wie auch aus anderen Versuchen, welche er beschreibt, hervorgeht. In meinem eigenen Auge reicht nur der eine Rand des Druckbildes bis zur Stelle des deutlichsten Sehens; übrigens konnte auch ich mich vollständig von der Möglichkeit der Accommodation und der Unveränderlichkeit des Druckbildes überzeugen.

Aus diesem Versuche folgt zunächst unmittelbar, daß die Entfernung des inneren Umfangs der Hornhaut von dem gelben Flecke oder einem Punkte der Hinterwand etwas nach außen vom gelben Flecke vollständig unveränderlich sei. Es würde aber die Entfernung der Hornhaut von dem gelben Flecke ohne auffallende Asymmetrie des Auges sich nicht verändern können, wenn nicht die genannte Entfernung ihres Randes sich ebenfalls änderte.

¹ F. C. DONDEERS, *Nederl. Lancet.* 1854. Nov. S. 275.

FORBES meinte, dafs bei der Accommodation für die Nähe das innere Auge unter einen stärkeren Druck gesetzt werde, und die Linse, weil sie wegen der verschiedenen Form und Dichtigkeit ihrer Schichten nach verschiedenen Richtungen hin verschieden elastisch sei, ihre Form ändere. DE HALDAT hat dagegen keine Veränderung der Brennweite des brechenden Apparates des Auges und einzelner Linsen finden können, welche er im Wasser comprimirt¹.

Über keinen anderen Gegenstand der physiologischen Optik sind so viel widersprechende Ansichten aufgestellt worden, als über die Accommodation des Auges, weil erst in neuerer Zeit entscheidende Beobachtungsthaten gefunden wurden, und man bis dahin fast nur einem Spiel von Hypothesen überlassen gewesen war. Um die Übersicht zu erleichtern, werde ich die chronologische Ordnung verlassen, welche überdies in der späteren Zusammenstellung der Literatur beibehalten werden wird, und werde die verschiedenen Ansichten vielmehr nach ihren wesentlichen Zügen zusammenzugruppiren.

1) Ansichten, welche die Nothwendigkeit (und das Vorhandensein einer Änderung des brechenden Apparates ganz leugnen. Mehrere Naturforscher glaubten, dafs das thierische und menschliche Auge die Fähigkeit habe, abweichend von den künstlich gefertigten Linsen die Bilder verschieden entfernter Gegenstände an gleichem oder wenigstens unmerkbar verschiedenem Orte zu entwerfen. MAGENDIE² behauptete sich davon an den Augen von weissen Kaninchen überzeugt zu haben, bei denen das Pigment der Aderhaut fehlt, und daher das Bild durch den hinteren Theil der Sehnhaut gesehen werden kann. In der That kann aber das Bild nicht scharf genug durch die Sehnhaut gesehen werden, um die geringen Unterschiede, welche bei der Accommodation in Betracht kommen, zu bemerken. Dasselbe wie MAGENDIE behaupteten RITTER³ und HALDAT⁴. Für die Krystalllinse allein genommen, behaupteten HALDAT und ENGEL⁵ dasselbe. Wenn man die Krystalllinse aus den Augenflüssigkeiten herausnimmt, und sie von Luft umgeben untersucht, wird ihre Brennweite außerordentlich kurz, und dann folgt aus den allgemeinen optischen Gesetzen, dafs die Abstände der Bilder für unendlich oder 7 Zoll entfernte Objecte nicht merklich unterschieden seien. Dadurch erklären sich die von ENGEL erhaltenen Resultate⁶.

Durch genauer angestellte Versuche haben sich dagegen HUECK⁷, VOLKMANN⁸, GERLING⁹, MAYER⁶ und CRAMER¹⁰ experimentell überzeugt, worüber die Theorie schon keinen Zweifel lassen konnte, dafs auch thierische und menschliche Augen Bilder verschieden entfernter Gegenstände in verschiedenen Entfernungen entwerfen.

TREVIRANUS¹¹ glaubte auch eine theoretische Erklärung für die vermeintliche That- sache geben zu können, dafs die Lage der Bilder unabhängig von der Lage des Gegenstandes sei, indem er ein besonderes Gesetz für die Zunahme der Dichtigkeit in der Linse zu diesem Ende annahm. Seine mathematische Beweisführung ist durch KOHLRAUSCH¹² widerlegt worden.

STURM¹³ glaubte die Abweichungen, welche die brechenden Flächen des Auges ver- gleichen mit genauen Rotationsflächen zeigen, benutzen zu können, um die Accommodation

¹ C. N. A. DE HALDAT, *Comptes rendus*. XX. p. 61, 458 u. 1561.

² F. MAGENDIE, *Précis élémentaire de Physiologie*. I. p. 73. 1816.

³ RITTER, *Graefe und Waither's Journal*. 1832. Bd. VIII. S. 347.

⁴ DE HALDAT, *Comptes rendus*. 1842. *Ann. d. Chim. et de Phys.* Sér. 3. Tom. XII. p. 94.

⁵ J. ENGEL, *Prager Vierteljahrsschr.* 1850. Bd. I. S. 167.

⁶ S. ihre Widerlegung durch MAYER ebenda. 1850. Bd. IV. Aufserord. Beilage.

⁷ A. HUECK, *Diss. de mutationibus oculi internis*. Dorpati 1826. p. 17. — *Die Bewegung der Krystalllinse*. Leipzig 1841.

⁸ A. W. VOLKMANN, *Neue Beiträge zur Physiol. d. Gesichtssinnes*. 1836. S. 100.

⁹ C. L. GERLING, *Poggendorff's Ann.* XLVI. 243.

¹⁰ A. CRAMER, *Het Accommodatievermogen*. Haarlem 1853. S. 9.

¹¹ G. R. TREVIRANUS, *Beiträge zur Anat. u. Physiol. der Sinneswerkzeuge*. 1828. Heft I.

¹² R. H. KOHLRAUSCH, *Über Treviranus' Ansichten v. deutlichen Sehen in der Nähe u. Ferne*. Rinteln 1836.

¹³ J. K. F. STURM, *Comptes rendus*. XX. 554, 761 u. 1238. S. die Widerlegungen von CRAHAY, *Bull. de Bruxelles*. XII. 2. 311. E. BRÜCKE, *Berl. Berichte*. I. 207.

für verschiedene Abstände zu erklären. Er untersucht zunächst den Gang homocentrischer Strahlen, wenn sie durch eine krumme Fläche gebrochen sind, welche nicht eine Rotationsfläche ist, und findet, dafs sie dann nicht in einen Brennpunkt vereinigt werden, sondern dafs zwei Brennebenen für die gebrochenen Strahlen existiren. In der einen dieser Brennebenen findet die Vereinigung der Strahlen nach einer Richtung statt, in der anderen nach der darauf senkrechten. Wenn der Querschnitt des Strahlenbündels in der einen Brennebene eine kurze horizontale gerade Linie bildet, so geht er durch eine Ellipse mit horizontaler größter Axe in einen Kreis über, wenn man sich der anderen Brennebene nähert, und dann durch eine Ellipse mit senkrechter großer Axe in eine senkrechte gerade Linie, wenn man bis zur anderen Brennebene fortschreitet. Zwischen den beiden Brennebenen hält STURM den Querschnitt des Strahlenbündels im Auge für klein genug, um deutliche Bilder zu geben. Wird der leuchtende Punkt dem Auge genähert, so werden beide Brennebenen sich von der Linse entfernen, so lange aber die Netzhaut sich zwischen beiden Brennebenen befindet, würden die Bilder doch hinreichend deutlich bleiben.

Abweichungen der Art, wie sie STURM annimmt, scheinen in der That bei den meisten menschlichen Augen vorzukommen, und wir werden die davon abhängigen Erscheinungen in § 14 beschreiben, ebenda uns aber auch überzeugen, dafs das Intervall der beiden Brennebenen lange nicht so bedeutend ist, wie STURM voraussetzt, und dafs die erwähnte Abweichung des Auges keineswegs die Deutlichkeit des Sehens vermehrt, im Gegentheil vermindert. 119

DE LA HIRE¹ behauptete, dafs es nur einen Abstand des deutlichen Sehens gebe, und dafs in einer gewissen Entfernung vor ihm und hinter ihm die Gegenstände noch nicht so undeutlich erschienen, um nicht erkannt zu werden; sonst gebe es keine Accommodation. HALLER² ist im Wesentlichen derselben Meinung, und meint nur, dafs auch die Verengung der Pupille ein Hilfsmittel sei, um die Zerstreungskreise naher Gegenstände kleiner zu machen; ebenso BESIO³.

Alle diese Ansichten, welche die Nothwendigkeit und das Vorhandensein einer inneren Veränderung des Auges ganz läugnen, werden am einfachsten widerlegt durch die Thatsache, dafs wir einen in unveränderlicher Entfernung vor dem Auge liegenden Punkt willkürlich bald deutlich, bald undeutlich sehen können. Sie werden ferner widerlegt durch den SCHEINER'schen Versuch, da wir einen solchen Punkt durch ein Kartenblatt mit zwei Öffnungen willkürlich bald einfach, bald doppelt sehen können, und endlich durch die schon in § 11 erwähnten Beobachtungen mit dem Augenspiegel, wobei die Veränderungen des optischen Bildes auf der Netzhaut auch objectiv sichtbar gemacht werden.

2) Ansichten, wonach die Verengung der Pupille zur Accommodation für die Nähe genügen sollte. Die Thatsache, dafs sich die Pupille beim Nahesehen verengt, war von SCHEINER⁴ gefunden worden. Wäre das Auge für die Ferne accommodirt, so würden die Zerstreungskreise, in welchen nahe leuchtende Punkte auf der Netzhaut sich abbilden, durch Verengung der Pupille allerdings verkleinert werden können. Indessen überzeugt man sich durch einen einfachen Versuch leicht davon, dafs die Verengung der Pupille nicht genügend ist, um das Auge für die Nähe zu accommodiren. Man braucht nur durch ein Kartenblatt mit einer Öffnung zu sehen, die enger als die Pupille ist, und welches gleichsam eine künstliche unbewegliche Pupille vertritt, um sich zu überzeugen, dafs man auch dann beim Fernsehen nahe Gegenstände undeutlich sieht, beim Nahesehen ferne. Anhänger einer solchen Ansicht waren aufser HALLER, den ich schon genannt habe, LE ROY⁵, HALL⁶, MORTON⁷. Die Beweise gegen diese

¹ PH. DE LA HIRE, *Journal des Sçavans*. 1685. p. 398.

² A. V. HALLER, *Elementa Physiologiae*. 1763. Tom. V. p. 516.

³ BESIO, *Giornale Arcad.* 1846. CV. p. 3.

⁴ CHR. SCHEINER, *Oculus*. p. 31.

⁵ CH. LE ROY, *Mém. d. l'Acad. d. Sciences*. 1755. p. 594.

⁶ HALL, *Mackel's Archiv*. Bd. IV. S. 611.

⁷ S. G. MORTON, *American Journal of med. Sciences*. 1831. Nov.

Meinung brachten vor OLBERS¹, DUGÈS², HUECK und DONDERS³. Eine eigenthümliche Ansicht über den Erfolg der Verengerung der Pupille, die aber durch den schon genannten Versuch ebenfalls widerlegt wird, stellte J. MILE⁴ auf, nahm sie aber selbst später wieder zurück⁵. Er glaubte, daß beim Fernsehen die Randstrahlen des Lichtbündels, welche vor der Netzhaut die Augenaxe schneiden würden, durch Diffraction am Rande der Pupille von der Augenaxe abgelenkt würden, und sie deshalb erst später schnitten. Die Diffraction des Lichts besteht aber keineswegs in einer solchen einfachen Ablenkung der ganzen Strahlen.

3) Ansichten, welche eine veränderte Krümmung der Hornhaut voraussetzen. LOBÉ⁶ scheint der Erste gewesen zu sein, der eine Veränderung der Hornhautkrümmung wahrgenommen zu haben meinte. OLBERS⁷ wagt nach seinen eigenen Beobachtungen nicht bestimmt zu behaupten, daß die Convexität beim Nahesehen zunehme. HOME⁸, ENGLEFIELD und RAMSDEN dagegen wollten eine Vermehrung der Krümmung bestimmt wahrgenommen haben. Jemand, der ein gutes Accommodationsvermögen besitzt, wurde mit dem Kopf in den Ausschnitt eines festen Brettes befestigt, so daß sein Kopf möglichst unbeweglich war. An dem Brette, in einem kleinen Abstände vom Auge, war eine Platte mit einer kleinen Öffnung befestigt (als Fixationspunkt), während ebenfalls an dem Brette zur Seite des Auges ein bewegliches Mikroskop angebracht war, durch welches man die vorderste Krümmung der Hornhautfläche wahrnehmen konnte. Das Mikroskop selbst war mit einem Ocularmikrometer versehen. Beim Nahesehen sollte die Hornhaut stärker gekrümmt werden, so daß ihre Mitte um $\frac{1}{800}$ eines englischen Zolles vorrückte. Messung der Spiegelbildchen auf der Hornhaut, welche HOME später ausführte, ergab zweifelhaftere Resultate. Wahrscheinlich ist er in beiden Fällen durch sehr kleine, regelmäsig eintretende Verschiebungen des Kopfes der beobachteten Person von hinten nach vorn getäuscht worden. TH. YOUNG⁹ fand, indem er die Spiegelbilder der Hornhaut der Messung unterwarf, keine solche Unterschiede, und widerlegte namentlich die Hypothese der veränderten Hornhautkrümmung sehr schlagend in der oben beschriebenen Weise dadurch, daß er die unveränderte Existenz des Accommodationsvermögens nachwies, auch wenn das Auge unter Wasser gebracht ist. HUECK¹⁰ fand bei der Wiederholung von HOME's Versuchen ähnliche Resultate, meint aber ermittelt zu haben, daß die Athmungsbewegungen regelmäsig Schwankungen des Kopfes hervorbringen, indem wir beim Nahesehen gewöhnlich einathmen, beim Fernsehen ausathmen. Sobald er den Athem anhalten liefs, traten gar keine oder nur sehr unregelmäsig Schwankungen der Mitte der Hornhaut ein. Diese unregelmäsig Schwankungen schienen durch Contractionen des Schließmuskels der Augenlider hervorgebracht zu sein, da bei jeder Berührung der Cilien der Augapfel etwas zurückgedrängt wurde. BUROW¹¹ fand bei einer sorgfältigen Wiederholung von HOME's Versuchen keine regelmäsig Schwankungen der Hornhautfläche; ebenso VALENTIN¹². SENFF¹³ stellte Messungen der Spiegelbildchen mit einem Fernrohr an, wodurch seine Messungen von kleinen Verschiebungen des Auges unabhängig wurden, und fand, daß der Krümmungshalbmesser der Hornhaut sich nicht um 0,01 Par. Linie veränderte, während das Auge bald auf 4, bald

¹ H. W. M. OLBERS, *De oculi mutationibus internis*. Gotting. 1780. p. 13.

² DUGÈS, *Institut* 1834. No. 73.

³ F. C. DONDERS in RUETE, *Leerboek der Ophthalmologie*. 1846. bl. 110.

⁴ J. MILE, MAGENDIE, *Journal de Physiologie*. VI. p. 166.

⁵ J. MILE, *Poggendorff's Ann.* XLII.

⁶ LOBÉ, ALBINUS, *Dissert. de oculo humano*. Lugd. Bat. 1742. p. 119.

⁷ H. W. M. OLBERS, *De oculi mutat. int.* p. 39.

⁸ E. HOME, *Philosoph. Transact.* 1795. p. 13 u. 1796. p. 2.

⁹ TH. YOUNG, *Philosoph. Transact.* 1801. I. p. 55.

¹⁰ A. HUECK, *Die Bewegung der Krystalllinse*. S. 40.

¹¹ BUROW, *Beiträge zur Physiologie und Physik des menschl. Auges*. Berlin 1842. S. 115.

¹² G. VALENTIN, *Lehrbuch der Physiologie*. 1848. Bd. II. S. 122.

¹³ SENFF, Art. „Sehen“ in R. WAGNER'S *Handwörterbuch der Physiologie*. S. 303.

auf 222 Zoll accommodirt wurde. Auch CRAMER¹ erhielt negative Resultate bei einer Messung der Spiegelbilder auf der Hornhaut mit Hilfe seines Ophthalmoskops. Sehr leicht und genau läßt sich diese Art von Messungen mittels des von mir construirten Ophthalmometers² ausführen, und gab mir ebenfalls negative Resultate.

Als Anhänger der Ansicht, wonach die Accommodation durch Änderung der Hornhautkrümmung bewirkt werde, sind aus späterer Zeit noch anzuführen FRIES³, VALLÉE⁴ und PAPPENHEIM⁵. Der Letztere nimmt an, daß die Contraction der Iris beim Nahesehen die Hornhaut convexer mache.

4) Ansichten, nach welchen die Accommodation durch Verschiebung der Linse bewirkt wird. Diese Annahme war die älteste, denn schon KEPLER⁶, aus dessen Theorie des Sehens sich zuerst auch die Nothwendigkeit der Accommodation ergab, stellte sie auf, und sie hat zu jeder Zeit viele Anhänger gehabt. Ihm folgten SCHEINER⁷, PLEMPIUS⁸, STURM⁹, CONRADI¹⁰, PORTERFIELD¹¹, PLATNER¹², JACOBSON¹³, BREWSTER¹⁴, J. MÜLLER¹⁵, MOSER¹⁶, BUROW¹⁷, RUETE¹⁸, WILLIAM CLAY WALLACE¹⁹, C. WEBER²⁰. Die meisten dieser Männer hielten es für wahrscheinlich, daß der Ciliarkörper durch wirklich hervorgebrachte Zusammenziehungen die Linse vor- und rückwärts bewegen könne. Um bei der Berechnung der Größe, um welche die Linse verschoben werden müßte, um das Auge zu accommodiren, nicht unmögliche Größen zu finden, war man gezwungen, der Hornhaut eine größere, der Linse eine geringere Brennweite beizulegen, als diese Theile wirklich besitzen. Unterstützt wurde diese Ansicht in neuerer¹²¹ Zeit auch namentlich durch Beobachtungen am lebenden Auge, welche bewiesen, daß die Pupille sich beim Nahesehen der Hornhaut nähert. Bei Vögeln hat BIDLOO²¹ schon die stärkere Wölbung der Iris beim Nahesehen bemerkt, was für den Menschen später HUECK²², BUROW²³ und RUETE bestätigten. C. WEBER zeigte auf mechanischem Wege, daß bei Hunden die Vorderfläche der Linse sich nach vorn bewegt, sobald der vordere Theil des Auges durch elektrische Ströme gereizt wird. Er machte zu dem Ende an dem Auge eines lebenden, durch Opium betäubten Hundes in der Mitte der Cornea eine runde Öffnung, führte ein passend befestigtes Stäbchen ein, bis es die vordere Fläche der Linse berührte. Das andere Ende des Stäbchens stützte sich gegen den kürzeren Arm eines Fühlhebels, der das Vordrängen der vorderen Linsenfläche in vergrößertem Maas stabe anzeigte.

HANNOVER²⁴ nahm dagegen die Möglichkeit an, daß die Linse in ihrer Kapsel sich nach vorn und hinten bewegen könnte, wozu ihr der sogenannte *Liquor Morgagnii*

¹ A. CRAMER, *Het Accommodatievermogen der Oogen*. Harlem 1853. bl. 45.

² H. HELMHOLTZ, *Graefe's Archiv für Ophthalmologie*. Bd. I. (2) S. 303.

³ FRIES, *Über den optischen Mittelpunkt im menschl. Auge*. Jena 1839. S. 27.

⁴ L. L. VALLÉE, *C. R. de l'Acad. d. Sciences*. 1847. Oct. p. 501.

⁵ PAPPENHEIM, *Specielle Gewebelehre des Auges*. Breslau 1842

⁶ J. KEPLER, *Dioptrice*. Propos. 64.

⁷ C. SCHEINER, *Oculus*. Oeniponti 1619. Lib. III. p. 163.

⁸ PLEMPIUS, *Ophthalmographia*. Lovanii 1648. B. III.

⁹ J. CHR. STURM, *Dissertatio visionem ex obscurae camerae tenebris illustrans*. Altdorfii 1693. p. 172.

¹⁰ CONRADI, *Froriep's Notizen*. Bd. 45.

¹¹ W. PORTERFIELD, *On the eye*. Edinburgh 1759. Vol. I. p. 450.

¹² J. Z. PLATNER, *De motu ligamenti ciliaris*. Lipsiae 1738. p. 5.

¹³ JACOBSON, *Suppl. ad. Ophthalm.* Copenh. 1821.

¹⁴ D. BREWSTER, *Edinb. Journal of Science*. I. 77. — *Poggendorff's Ann.* II. 271.

¹⁵ J. MÜLLER, *Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns*. Leipzig 1826. S. 212.

¹⁶ L. MOSER, *Dove's Repertor. d. Physik*. Berlin 1844. Bd. V. S. 364.

¹⁷ BUROW, *Beiträge zur Physiol. u. Physik des menschl. Auges*. Berlin 1842.

¹⁸ C. G. TH. RUETE, *Lehrbuch der Ophthalmologie*.

¹⁹ WILLIAM CLAY WALLACE, *The accommodation of the eye to distances*. New York 1850.

²⁰ C. WEBER, *Disquisitiones quae ad facultatem oculum accommandandi spectant*. Marburgi 1850. p. 31.

²¹ BIDLOO, *Observy, de oculis et visu variorum animalium*. Lugd. Bat. 1715.

²² A. HUECK, *Bewegung der Krystalllinse*. S. 60.

²³ BUROW, *Beiträge zur Physiol. u. Physik des menschl. Auges*. S. 136.

²⁴ A. HANNOVER, *Bidrag til Oiets Anatomie*. Kjöbenhavn 1850. p. 111.

Platz lassen sollte. Dafs eine solche Flüssigkeit in der normalen Linsenkapsel nicht existirt, ist schon erwähnt worden.

5) Ansichten, welche eine Formveränderung der Linse annehmen. Diese Annahme, welche sich endlich als die richtige erwiesen hat, wurde ebenfalls schon sehr früh gemacht und von Vielen vertheidigt, ohne dafs sie aber das Stattfinden einer solchen Veränderung durch wirkliche Beobachtungen hätten erweisen können. Der erste war DESCARTES¹, es folgten PEMBERTON², CAMPER³, HUNTER⁴, TH. YOUNG⁵, PURKINJE⁶, GRAEFE⁷, TH. SMITH⁸, HUECK⁹, STELLWAG VON CARION¹⁰, FORBES¹¹. Ältere Anatomen, wie LEEUWENHOEK, PEMBERTON, nannten die Linse deshalb auch wohl *Musculus crystallinus*, weil sie voraussetzten, dafs ihre Fasern contractil seien. TH. YOUNG stützte diese Ansicht auf Versuche, welche nicht jedem Auge gelingen, für ihn selbst aber vollständig beweisend waren. Wenn man durch ein feines Gitter von geraden Drähten das Zerstreungsbild eines Lichtpunktes betrachtet, ist das Bild von geraden dunklen Linien, Schattenbildern der Drähte, durchzogen. Diese waren vollständig gerade, wenn YOUNG's Auge für die Ferne accommodirt war, an den Seiten des Zerstreungskreises dagegen nach außen convex, wenn er in die Nähe sah. Die Erscheinung blieb dieselbe, wenn er das Auge unter Wasser brachte, und so den Einfluß der Hornhaut eliminirte. Die Krümmung der vorher geraden Schattenlinien konnte nur durch eine veränderte Krümmung der Linsenflächen bedingt sein. Zur Ausführung des Versuchs gehört eine weite Pupille. WOLLASTON konnte die Erscheinung nicht sehen (auch Referent nicht), wohl aber ein anderer Freund YOUNG's, KOENIG. Dem entsprechend fand YOUNG mittelst seines Optometers, dafs beim Sehen durch vier neben einander liegende Spalten die vier Bilder des Fadens sich in einem Punkte schnitten, wenn er für die Ferne, aber nicht, wenn er für die Nähe accommodirte.

Die Veränderung der Linsenreflexe bei Accommodationsänderungen beobachtete zuerst MAX LANGENBECK¹², und schloß auch richtig daraus, dafs die vordere Linsenfläche beim Nahesehen gewölbt wird. Seine Beobachtungsweise ist aber ungünstig, indem er den Beobachteten direct in die Flamme blicken liefs, wobei die drei Spiegelbildchen dem Beobachter sehr nahe an einander zu stehen scheinen, und das überwiegend helle Hornhautbild die Wahrnehmung der beiden anderen erschwert. Dies mag der Grund sein, weshalb LANGENBECK's Beobachtung die Aufmerksamkeit der Physiologen nicht erregte. CRAMER beobachtete dasselbe, verbesserte aber die Methode der Beobachtung namentlich dadurch, dafs er die Lichtstrahlen von der Seite her in das Auge fallen und den Beobachter von der anderen Seite hereinblicken liefs. Auch beschrieb er ein Instrument, welches er Ophthalmoskop nannte, um die Beobachtungen leichter und sicherer zu machen. Es ist dies im Wesentlichen ein Gestell, an welchem eine Lampe, ein Fadenkreuz als Gesichtszeichen, ein Mikroskop von ungefähr 10 bis 20maliger Vergrößerung und ein hohles kegelförmiges Stück mit den nöthigen Ausschnitten, an welches der Beobachtete sein Auge fest anlegt, angebracht sind. Der Beobachter stellt die Flamme so, dafs er durch das Mikroskop in der Pupille des beobachteten Auges den Reflex der mittleren Linsenfläche zwischen den beiden anderen Reflexen erscheinen sieht. Indessen ist die wesentlichste Thatsache, die Verkleinerung des von der vorderen Linsenfläche entworfenen Bildes, auf diese Weise nicht so bequem zu beobachten, als wenn man das

¹ R. CARTESIUS, *Dioptrice*. Lugd. Bat. 1637.

² PEMBERTON, *Dissert. de facultate oculi, qua ad diversas distantias se accommodat*. Lugd. Bat. 1719.

³ P. CAMPER, *Dissert. physiol. de quibusdam oculi partibus*. Lugd. Bat. 1746. p. 23.

⁴ J. HUNTER, *Philosoph. Transact.* 1794. p. 21.

⁵ TH. YOUNG, *Philosoph. Transact.* 1801. P. I. p. 53.

⁶ J. E. PURKINJE, *Beobachtungen u. Versuche zur Physiol. d. Sinne*. Berlin 1825.

⁷ K. F. V. GRAEFE, *Reil's Archiv für Physiologie*. Bd. IX. S. 231.

⁸ TH. SMITH, *Philosophical Magazine*. 1833. T. V. 3. No. 13. — *Schmid's Jahrbücher*. 1834. Bd. I. S.

⁹ A. HUECK, *Bewegung der Krystalllinse*. Leipzig 1841.

¹⁰ STELLWAG VON CARION, *Zeitschrift der k. k. Gesellschaft der Ärzte zu Wien*. 1850. Heft 3 u. 4.

¹¹ FORBES, *Comptes rendus*. XX. p. 61.

¹² MAX LANGENBECK, *Klinische Beiträge*. Göttingen 1849.

Spiegelbild von zwei leuchtenden Punkten mit bloßem Auge beobachtet, wie ich es oben beschrieben habe. Die Verschiebung des Reflexes der vorderen Linsenfläche dagegen, welche durch CRAMER'S Ophthalmoskop leicht und sicher zu beobachten ist, ist wegen der von CRAMER noch nicht gekannten Asymmetrie des Auges für sich allein nicht beweisend, wenn man sich nicht, was leicht auszuführen ist, durch eine Reihe von Versuchen überzeugt, dafs von jeder Stelle der Pupille aus das genannte Bild sich stets der Mitte der Pupille nähert.

Ohne von den beiden genannten Forschern zu wissen, und zu einer Zeit, wo CRAMER'S Entdeckung erst kurze Notizen¹, die er selbst und DONDERS gegeben hatte, veröffentlicht war, ehe noch seine von der Holländischen Gesellschaft der Wissenschaften gekrönte Abhandlung erschienen war, fand ich selbst dieselbe Thatsache², und ermittelte weiter dasjenige, was ich oben über das Verhalten der hinteren Fläche der Linse bei der Accommodation angeführt habe³.

Gegen die Abhängigkeit des Accommodationsvermögens von Verschiebungen und Formänderungen der Linse wurden vielfach Fälle geltend gemacht, in denen das Auge sich noch sollte accommodiren können, nachdem die Linse durch die Staaroperation entfernt war. Indessen ist dabei zu bedenken, dafs eine Regeneration der Linse möglich ist, und dafs die Kranken auch bei unpassender Accommodation aus Zerstreungsbildern mancherlei erkennen können. Dafs Jemand, der mit der Staarbrille Druckschrift liest, mit derselben Brille auch ferne Menschen, Fensterkreuze und dergleichen erkennen kann, berechtigt noch nicht, ihm Accommodationsvermögen zuzuschreiben. Ein Jeder kann sich leicht überzeugen, dafs, wenn er einen Finger in etwa 4 Fufs Entfernung fixirt, er dabei doch eine Menge Einzelheiten an weit entfernten Gegenständen wahrnehmen kann. Zum Beweis des Vorhandenseins von Accommodation gehört, dafs der Kranke mit derselben Brille einen Gegenstand in bestimmter Entfernung willkürlich deutlich und undeutlich sehen kann, je nachdem er sein Auge für dieselbe oder eine andere Entfernung einzurichten strebt. SZOKALSKY will einen solchen Fall wirklich beobachtet haben; aber das betreffende Auge konnte ohne Staarbrille in 17 Zoll Entfernung deutlich sehen, was ohne Ersatz der Linse nicht möglich ist. Um bei operirten Augen während des Lebens zu erkennen, ob die Linse hergestellt sei, schlägt DONDERS vor die entoptischen Erscheinungen zu benutzen.

6) Ansichten, welche eine Formveränderung des Augapfels annehmen. Wenn die Netzhaut sich von den brechenden Flächen entfernen, der Augapfel sich also verlängern könnte, würde das Auge sich dadurch für die Nähe accommodiren. Die Anhänger dieser Ansicht nahmen meistentheils an, dafs die Augenmuskeln, entweder die rechten allein, oder die schiefen allein, oder alle zusammen, oder auch der Schließmuskel der Augenlider, durch Druck auf den Augapfel dessen Gestalt verändern könnten. Hierzu gehören STURM⁴, LE MOINE⁵, BUFFON⁶, BOERHAVE⁷, MOLINETTI⁸, OLBERS⁹, HAESSELER¹⁰, WALTHER¹¹, MONRO¹², HIMLY¹³, MECKEL¹⁴, PARROT¹⁵, POPPE¹⁶, SCHROEDER VAN

¹ A. CRAMER, *Tydschrift der Maatschappij voor Geneeskunde*. 1851. W. 11. bl. 115. und *Nederlandsch Lancet*. 2. Serie. W. 1. bl. 529. 1851—52.

² H. HELMHOLTZ, *Monatsberichte der Berliner Akad.* 1853. Februar. S. 137.

³ H. HELMHOLTZ, *Graefe's Archiv für Ophthalmologie*. Bd. 1. (2) S. 1—74.

⁴ J. CHR. STURM, *Dissert. de presbyopia et myopia*. Altdorfii 1697.

⁵ LE MAINE, *Quaestio an obliqui musculi retinam a crystallino removeant*. Parisiis 1743.

⁶ G. L. L. BUFFON, *Histoire naturelle*. Paris 1739. T. III. p. 331.

⁷ H. BOERHAVE, *Praelectiones academ.* Taurini 1755. Vol. III. p. 121.

⁸ A. v. HALLER, *Elementa Physiologiae*, 1763. T. V. p. 511.

⁹ H. W. M. OLBERS, *Dissert. de oculi mutat. int.* Gottingae 1780. § 43.

¹⁰ J. F. HAESSELER, *Betrachtungen über das menschliche Auge*.

¹¹ WALTHER, *Dissert. de lente crystallina*. § 1.

¹² MONRO, *Attenburger Annalen f. d. J.* 1801. S. 97.

¹³ HIMLY, *Ophthalmologische Beobachtungen und Untersuchungen*. Bremen 1801.

¹⁴ G. CUVIER, *Vorlesungen über vergl. Anat.* Übers. von MECKEL. Leipzig 1809. Bd. II. S. 369.

¹⁵ G. F. PARROT, *Entretiens sur la physique*. Dorpat 1820. T. III. p. 434.

¹⁶ J. H. M. POPPE, *Die ganze Lehre vom Sehen*. Tübingen 1823. S. 153.

123 DER KOLK¹, ARNOLD², SERRE³, BONNET⁴, HENLE⁵, SZOKALSKY⁶, LISTING⁷. Dafs die Augenmuskeln nicht nur die Form des Augapfels ändern können, sondern auch mittelbar die Hornhaut gewölbter machen und die Linse nach vorn verschieben, nimmt CLAVEL⁸ an. Die Gründe, aus denen eine solche Gestaltänderung des Augapfels unwahrscheinlich erscheint, habe ich schon oben angeführt.

Die angeführten Ansichten sind die wichtigeren, welche über diesen schwierigen Gegenstand aufgestellt worden sind: daneben wurden von Einzelnen noch mancherlei andere Erklärungsweisen hervorgesucht, welche sich mit Recht geringeren Beifalls zu erfreuen hatten. Ich erwähne v. GRIMM⁹, welcher annahm, das Brechungsvermögen der Augenmedien könnte sich ändern; WELLER¹⁰, welcher die Accommodation nicht durch eine Veränderung des Auges, sondern durch einen psychischen Prozeß erklären wollte u. s. w.

125

§ 13. Von der Farbenzerstreuung im Auge.

Dafs die Lichtstrahlen, welche von einem gesehenen leuchtenden Punkte ausgegangen sind, durch die brechenden Mittel des Auges wieder in einen Punkt vereinigt werden, ist nur annähernd richtig. Wir wenden uns jetzt zum Studium der Abweichungen von dem genannten Gesetze, und wollen zunächst die chromatische Abweichung betrachten, welche daher entsteht, dafs die Lichtstrahlen von verschiedener Schwingungsdauer auch verschiedene Brechbarkeit in tropfbaren und festen durchsichtigen Mitteln haben. Da die Gröfse der Brennweiten gekrümmter brechender Flächen von dem Brechungsverhältnisse abhängig ist, so liegen die Vereinigungspunkte von Strahlen verschiedener Farbe bei Systemen solcher Flächen im Allgemeinen an verschiedenen Orten, und nur durch besondere Combinationen verschiedenartiger brechender Mittel läfst es sich erreichen, dafs die Brennpunkte verschiedenfarbiger Strahlen in optischen Apparaten zusammenfallen, so dafs diese dadurch achromatisch werden.

Das Auge ist nicht achromatisch, obgleich beim gewöhnlichen Sehen die Farbenzerstreuung sich fast gar nicht merklich macht. Dafs der brechende Apparat des Auges verschiedene Brennweiten für verschiedenfarbige einfache Strahlen habe, zeigte FRAUENHOFER folgendermaßen. Er beobachtete ein prismatisches Spectrum durch ein achromatisches Fernrohr, in dessen Oculare ein sehr feines Fadenkreuz angebracht war, und bemerkte, dafs er die Ocularlinse dem Fadenkreuze näher schieben mußte, um dies deutlich sehen zu können, wenn er den violetten Theil des Spectrum im Gesichtsfelde hatte, als wenn er den rothen betrachtete. Indem er mit einem Auge einen

126

¹ LUCHTMANS *Diss. de mutatione axis oculi*. Traject. ad Rhenum 1832.

² ARNOLD, *Untersuchungen über das Auge des Menschen*. Heidelberg 1832. S. 38.

³ SERRE, *Bulletin de thérapie*. 1835. T. 8. L. 4.

⁴ BONNET, *Froriep's Notizen*. 1841. S. 233.

⁵ J. HENLE, *Canstatt's Jahresbericht für 1849*. Bd. I. S. 71.

⁶ SZOKALSKY, *Archiv für physiologische Heilkunde*. VII. 1849. 7.—8. Heft.

⁷ J. LISTING, *Wagner's Handwörterbuch d. Physiologie*. IV. 498.

⁸ CLAVEL, *Comptes rendus*. XXXIII. p. 259.

⁹ v. GRIMM, *Dissert. de visu*. Göttingae 1758. S. auch H. W. M. OLBERS *de oculi mutationibus internis*. p. 29.

¹⁰ WEBER, *Diätetik für gesunde und schwache Augen*. Berlin 1821. S. 225.

äußeren Gegenstand fixirte, mit dem anderen den Faden im Fernrohre betrachtete, stellte er die Ocularlinse so, daß ihm der Faden ebenso deutlich wie das äußere Object erschien, und maß, um wie viel die Linse verschoben werden mußte, um den Faden in zwei verschiedenen Farben gleich deutlich zu sehen. Mit Berücksichtigung der schon vorher gemessenen chromatischen Abweichung der Ocularlinse selbst konnte er dann berechnen, welches die entsprechenden Sehweiten des Auges seien. Er fand bei diesen Versuchen, daß ein Auge, welches ein unendlich entferntes Object deutlich sieht, dessen Licht der Linie *C* des Sonnenspectrum, also der Grenze zwischen Roth und Orange entspricht, bei demselben Accommodationszustande ein Object, dessen Licht der Farbe der Linie *G* (Grenze von Indigblau und Violett) entspräche, auf 13 bis 24 Par. Zoll nähern müßte, um es deutlich zu sehen.

Ich habe an meinen eigenen Augen ähnliche Resultate erhalten. Ich ließ verschiedenfarbiges, mittels eines Prisma isolirtes Licht durch eine punktförmige Öffnung eines dunklen Schirms fallen, und suchte dann die größte Entfernung auf, aus der ich die kleine Öffnung noch punktförmig sehen konnte. Die größte Sehweite meines Auges für rothes Licht beträgt gegen 8 Fufs, für violette $1\frac{1}{2}$ Fufs und für das brechbarste übertviolette Licht der Sonne, welches durch Ablendung des helleren Lichts des Spectrum sichtbar gemacht werden kann, nur einige Zolle.

Auffallend bemerkt man die Verschiedenheit der Sehweiten, wenn man ein regelmäsig rechteckiges, auf einen weißen Schirm projicirtes prismatisches Spectrum aus einiger Entfernung betrachtet. Während man das rothe Ende noch ziemlich gut in seiner wirklichen Form erkennt, erscheint das violette als eine Zerstreungsfigur (die für meine Augen schwalbenschwanzförmig ist).

Das im Vergleiche mit künstlichen optischen Instrumenten ziemlich geringe Zerstreungsvermögen des menschlichen Auges erklärt sich daraus, daß die Dispersion des Wassers und der meisten wässrigen Lösungen überhaupt viel geringer ist als die des Glases. Da die Brechungsverhältnisse der optischen Medien des Auges meist nicht beträchtlich von dem des Wassers abweichen, so scheint es wahrscheinlich zu sein, daß wenigstens die wässrige Feuchtigkeit und der Glaskörper auch nahezu dasselbe Zerstreungsvermögen wie das Wasser haben werden. Ich habe deshalb die Dispersion für LISTING's reducirtes Auge mit einer brechenden Fläche berechnet unter der Annahme, daß Wasser darin als brechende Substanz gebraucht sei. Für die von FRAUENHOFER bei seinen Versuchen gebrauchten Strahlen sind die Brechungsverhältnisse des Wassers folgende:

für das rothe Licht der Linie <i>C</i>	1,331705
für das violette Licht der Linie <i>G</i>	1,341285.

Der Radius der einzigen brechenden Fläche von LISTING's reducirtem Auge

ist 5,1248 Millimeter. Daraus ergeben sich die Brennweiten im Innern des Auges:

im Roth 20,574 mm

im Violett 20,140 mm.

127 Ist das Auge im Roth für unendliche Ferne accommodirt, steht also die Netzhaut im Brennpunkte der rothen Strahlen, so liegt der Brennpunkt der violetten 0,434 mm vor ihr, woraus folgt, daß in violetterm Lichte dieses Auge für eine Entfernung von 713 mm (26 Zoll) accommodirt sein würde. FRAUENHOFER fand für sein eigenes Auge 18 bis 24 Zoll, woraus folgt, daß die Farbenzerstreuung in einem aus destillirtem Wasser gebildeten Auge selbst noch etwas geringer sein würde, als sie im menschlichen Auge sich findet. Nimmt man dagegen an, daß das reducirte Auge wie meines im Roth für 8 Fufs (2,6 m) accommodirt sei, so würde die Netzhaut noch 0,123 mm hinter dem Brennpunkte der rothen Strahlen liegen müssen, und im Violett das Auge für $20\frac{3}{4}$ Zoll (560 mm) accommodirt sein, während meines in der That für 18 Zoll accommodirt war. Auch MATTHIESSEN¹ berechnet aus seinen Versuchen den Abstand des rothen und violetten Brennpunktes im menschlichen Auge auf 0,58 bis 0,62 mm, während er in einem Auge aus destillirtem Wasser nur gleich 0,434 mm ist. MATTHIESSEN hat seine Messungen in der Weise angestellt, daß er den kürzesten Abstand maßt, in welchem eine Glastheilung von rothem oder violetterm Lichte beleuchtet deutlich gesehen werden konnte. Alle diese nach verschiedenen Methoden ausgeführten Untersuchungen stimmen darin überein, daß das menschliche Auge in Bezug auf Farbenzerstreuung mit einem Auge aus destillirtem Wasser sehr nahe übereinstimmt, wahrscheinlich aber eine etwas stärkere Dispersion hat. Wir dürfen danach wohl vermuthen, daß die Krystalllinse ein im Verhältniß zu ihrem Brechungsvermögen etwas stärkeres Zerstreungsvermögen als reines Wasser hat.

Ich will hier noch die Beschreibung einiger Versuche anreihen, bei denen sich die Farbenzerstreuung im Auge merklich macht. Im Allgemeinen sind die hierhergehörigen Erscheinungen viel auffallender, wenn man dabei nicht weißes Licht, sondern Licht braucht, welches aus nur zwei prismatischen Farben von möglichst verschiedener Brechbarkeit zusammengesetzt ist. Am leichtesten erhält man solches Licht, wenn man Sonnenlicht durch die gewöhnlichen violetgefärbten Gläser gehen läßt. Diese Gläser absorbiren die mittleren Strahlen des Spectrum ziemlich vollständig, und lassen nur die äußersten Farben Roth und Violet hindurch. Will man mit Lampenlicht experimentiren, welches wenig blaue und violette Strahlen enthält, so wendet man besser die gewöhnlichen blauen (durch Kobalt gefärbten) Gläser an, welche ebenfalls vom Orange, Gelb und Grün nur wenig, reichlich dagegen das äußerste Roth, das Indigblau und Violet hindurchlassen.

Man mache eine enge Öffnung in einen dunklen Schirm, befestige hinter derselben ein gefärbtes Glas von der erwähnten Art, und stelle ein Licht

¹ L. MATTHIESSEN, *Comptes rendus*. T. XXIV. p. 874.

dahinter, dessen Strahlen durch das Glas und die Öffnung in das Auge des Beobachters fallen. Die Öffnung im Schirme können wir unter diesen Umständen als einen leuchtenden Punkt, der rothe und violette Strahlen aussendet, betrachten. Dem Beobachter erscheint dieser Punkt in verschiedener Weise, je nach der Entfernung, für welche sein Auge accommodirt ist. Ist es für die rothen Strahlen accommodirt, so geben die violetten einen Zerstreungskreis, und es erscheint ein rother Punkt mit violetterm Lichthofe; ¹²⁸ oder das Auge ist für die violetten Strahlen accommodirt, dann geben die rothen einen Zerstreungskreis, und es erscheint ein violetter Punkt mit rothem Hofe. Auch ist ein Refraktionszustand des Auges möglich, wobei der Vereinigungspunkt der violetten Strahlen vor, der der rothen hinter der Netzhaut liegt, und beide gleich große Zerstreungskreise geben. Nur in diesem Falle erscheint der Lichtpunkt einfarbig. Bei diesem Refraktionszustande des Auges würden diejenigen einfachen Strahlen auf der Netzhaut vereinigt werden, deren Brechbarkeit die Mitte zwischen der der rothen und violetten hält, also die grünen.

Deshalb geben diese Gläser ein Mittel von ziemlich großer Empfindlichkeit ab, um die Entfernungen zu bestimmen, innerhalb welcher das Auge sich für die mittleren Strahlen des Spectrum accommodiren kann. Das sind nämlich die Entfernungen, innerhalb welcher das Auge das gemischte rothviolette Licht einfarbig sehen kann. Die Farbendifferenz der Ränder wird sehr leicht bemerkt, auch von einem Ungeübten, viel leichter als die Ungenauigkeit eines weissen Bildes. Ist das Auge für Licht jeder Brechbarkeit auf grössere Entfernungen als die des leuchtenden Punktes accommodirt, so geben die rothen Strahlen einen grösseren Zerstreungskreis als die violetten, es erscheint also eine violette Scheibe mit rothem Saum. Ist das Auge für beide Farben auf kleinere Entfernungen als die des leuchtenden Punktes eingestellt, so erscheint umgekehrt ein rother Zerstreungskreis mit blauem Saume.

Ähnliche Erscheinungen wie die der roth-violetten Gläser treten überall ein, wo ein Gegenstand zweierlei Arten verschiedenfarbigen Lichts von sehr unterschiedener Brechbarkeit aussendet. Sehr auffallend zeigen sie sich zum Beispiel auch bei den Versuchen über Mischung von Spectralfarben, welche ich später bei der Lehre von der Farbenmischung beschreiben werde.

Bei weisser Beleuchtung tritt natürlich ebenfalls eine Zerlegung des zusammengesetzten einfachen Lichts ein, aber sie ist unter gewöhnlichen Umständen wenig merklich. Die Beobachtung lehrt in dieser Beziehung, dass weisse Flächen, welche weiter entfernt als der Accommodationspunkt des Auges liegen, mit einem schwachen blauen Rande umgeben erscheinen, weisse Flächen, welche näher als der Accommodationspunkt liegen, mit einem schwachen rothgelben Rande, weisse Flächen dagegen, für welche das Auge genau accommodirt ist, lassen keine farbigen Ränder sehen, so lange die Pupille vollständig frei ist, zeigen aber solche Ränder, sobald man dicht

vor das Auge den Rand eines undurchsichtigen Blattes schiebt, und dadurch der einen Hälfte der Pupille das Licht abschneidet. Und zwar erscheint die Grenze zwischen einem weissen und schwarzen Felde gelb gesäumt, wenn man das Blatt von der Seite her vor die Pupille schiebt, wo das schwarze Feld liegt, blau gesäumt dagegen, wenn man es von der Seite des weissen Feldes her vorschiebt.

Die eben beschriebenen Farbenzerstreuungserscheinungen im menschlichen Auge erklären sich sehr leicht aus dem Umstande, daß der hintere Brennpunkt der violetten Strahlen vor dem der rothen liegt.

Es sei *Fig. 77 A* der leuchtende Punkt, $b_1 b_2$ die vordere Hauptebene des Auges, v der Vereinigungspunkt der violetten, r der der rothen Strahlen, cc die Ebene, in welcher sich die äußersten rothen Strahlen des gebrochenen Strahlenkegels $b_1 b_2 v$ schneiden. Der Anblick der Figur ergibt sogleich,

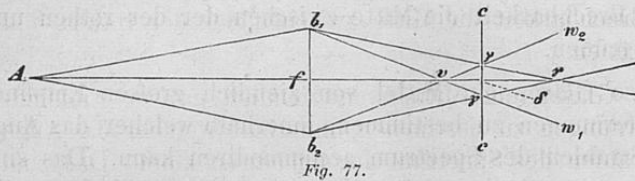


Fig. 77.

daß, wenn die Netzhaut vor der Ebene cc sich befindet, d. h. wenn das Auge für fernere Gegenstände als A accommodirt ist, sie am Rande

des Strahlenkegels nur von rothem Lichte, in der Axe aber von gemischtem getroffen werde. Steht sie in der Ebene cc , ist das Auge also für das Licht mittlerer Brechbarkeit von A accommodirt, so wird sie überall von gleichmäßig gemischtem Lichte getroffen. Endlich, wenn die Netzhaut sich hinter der Ebene cc befindet, das Auge also für nähere Gegenstände als A accommodirt ist, so trifft sie am Rande des Strahlenbündels nur violettes, in der Mitte gemischtes Licht.

Ist das Auge für A accommodirt, befindet sich die Netzhaut also in der Ebene cc , und wird der untere Theil der Apertur $b_1 b_2$, durch welche der Strahlenkegel einfällt, bis f hin verdeckt, so fallen die violetten Strahlen zwischen $b_2 v$ und $f v$ sowie deren Verlängerungen zwischen $v w_2$ und $v r$ fort, und die rothen zwischen $b_1 r$ und $f r$. Es verschwindet dann also in der Ebene cc oberhalb der Axe das violette, unterhalb der Axe das rothe Licht, und es wird sich auf der Retina statt des Bildes des Punktes A ein kleiner oben rother, unten violetter Zerstreungskreis bilden.

Befindet sich in A statt eines einzelnen leuchtenden Punktes eine gleichmäßig rothes und violettes Licht aussendende Fläche, deren Bild auf der Retina entworfen wird, so wird gleichzeitig ein rothes und ein violettes Bild der Fläche entworfen werden, von denen mindestens eines ein Zerstreungsbild sein muß. Zerstreungsbilder in Flächen haben, wie in § 11 auseinandergesetzt ist, in ihrer Mitte, wo die Zerstreungskreise der Punkte des Randes nicht hinreichen, dieselbe Helligkeit wie ein scharfesehenes Bild. Ihre Ränder sind dagegen verwachsen und fließen so weit über das Bild der Umgebung über, als die Zerstreungskreise der Randpunkte reichen.

Wenn sich nun ein rothes und ein violettes Bild einer Fläche decken, so wird sich in der Mitte, soweit beide die normale Helligkeit haben, die Mischfarbe zeigen, an den Rändern aber diejenige Farbe allein erscheinen, deren Zerstreungskreise die grössten sind, für welche also der Rand des Bildes am weitesten über die Umgebung greift.

Wird das Bild der Fläche in der Ebene *cc* aufgefangen, wo die rothen und violetten Zerstreungskreise gleich groß sind, so werden die Farben bis zum Rande gleichmäÙig gemischt sein. Zerstreungsbilder verschieben sich aber scheinbar, wie wir aus § 11 wissen, wenn man einen Schirm vor die Pupille schiebt, und zwar nach entgegengesetzten Richtungen, wenn sie, wie in unserem Falle das rothe und violette, das eine durch zu nahe, das andere durch zu weite Accommodation entstehen. Daher hört die Congruenz der farbigen Bilder auf und es werden farbige Ränder sichtbar.

Für das rothe Licht verhält sich die Fläche wie ein Gegenstand, der ¹³⁰ dem Auge zu nahe ist; ein solcher bewegt sich dem die Pupille verdeckenden Schirme scheinbar entgegen. Für das violette Licht verhält es sich umgekehrt. Verdeckt man also z. B. von unten her die Pupille, so verschiebt sich die rothe Fläche scheinbar nach unten, die violette nach oben; unten wird ein rother, oben ein violetter Rand sichtbar. Betrachtet man eine schmale roth-violette Linie durch einen schmalen Spalt, den man vor der Pupille hin und her bewegt, so gelingt es auch leicht, das rothe von dem violetten Bilde ganz getrennt sichtbar zu machen.

Wenn von dem leuchtenden Punkte *A* Fig. 77 nicht bloß rothes und violettes Licht, sondern aus allen Farben zusammengesetztes weißes Licht ausgeht, so schaltet sich das der übrigen Farben zwischen dem Roth und Violet ein, und die Wirkungen der Farbenzerstreuung sind weniger auffallend als wenn zwei Farben allein da sind. Wo wir in diesem Falle einen violetten Saum um ein purpurnes Feld hatten, erscheint jetzt das weiÙe Feld gesäumt mit weißlichem Blau, Indigblau, Violet, und da die weißlichen Töne des inneren Randes dieses Saumes sich nicht merklich vom Weiß der Mitte unterscheiden, erscheint der farbige Saum überhaupt schmaler. Wo bei dem Versuche mit den zwei Farben ein rother Saum um das purpurne Feld erschien, haben wir jetzt um das weiÙe Feld herum zuerst weißliches Gelb, Orange, Roth, und wieder unterscheidet sich das weißliche Gelb fast gar nicht von dem Weiß des Grundes.

Eine besondere Betrachtung verdient die Dispersion des weiÙen Lichts noch für den Fall, wo die Netzhaut sich in der Ebene *cc* befindet, wo das Strahlenbündel seinen kleinsten Durchmesser hat. Roth und Violet bilden hier gleich große Zerstreungskreise. Das mittlere Grün ist ganz in der Axe concentrirt, die übrigen Farben bilden kleinere Zerstreungskreise. Der Zerstreungskreis auf der Retina würde also am Rande gemischt aus Roth und Violet, d. h. purpurroth, in der Mitte grünlich erscheinen müssen. Indessen ist davon im Auge nichts zu sehen. Es sind nämlich gerade die lichtstärksten Farben Gelb und Grün bei dieser Stellung der Retina fast

genau in einen Punkt vereinigt, und der purpurne Rand ist zu schmal und verhältnißmäfsig zu lichtschwach, um wahrgenommen zu werden.

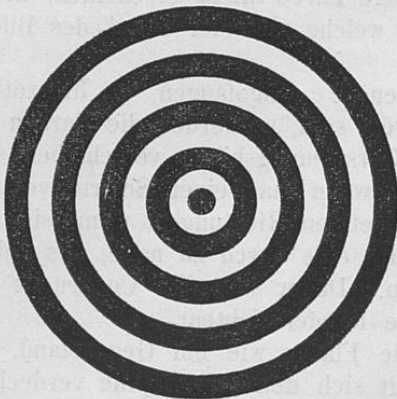


Fig. 78.

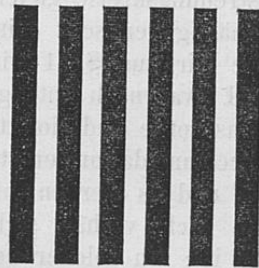


Fig. 79.



Fig. 80.

Nach einer Bemerkung von Herrn W. v. BEZOLD¹ sieht man die Wirkungen der Farbenzerstreuung im Auge außerordentlich auffallend an Bildern wie Fig. 78 und 79 zeigen, wenn man diese aus etwas zu großer Entfernung, oder Fig. 80 aus zu geringer Entfernung für die Möglichkeit genauer Accommodation betrachtet. Die Erscheinungen vermischen sich übrigens mit denen des irregulären Astigmatismus, von denen im nächsten Paragraphen die Rede sein wird. Wenn man aus der Entfernung des Fernpunkts allmählig weiter abgeht, so werden zunächst die weissen Streifen röthlich, während die dunklen von den bläulichen Zerstreungskreisen übergossen werden. Dann kommt eine Entfernung, wo auf den schwarzen Streifen sich die blauen Zerstreungskreise der beiden benachbarten weissen Streifen decken, und deshalb auffallend hell werden. Später beginnt auch das Roth sich auszubreiten, und es kommt eine Entfernung, wo die dunklen Streifen auffallend roth erscheinen im Gegensatz zu dem stark verwaschenen bläulichen Weiss. Das geschieht offenbar dann, wenn die Zerstreungsbilder des Roth von beiden Seiten auf dem Schwarz zusammentreffen, während die des bläulichen Weiss dann schon über dem nächsten weissen Streifen sich decken, und diesen mit seinem geschwächten Roth wieder weiss machen.

Übrigens kann man alle die beschriebenen Erscheinungen ganz ebenso wie bei dem Auge, nur noch augenfälliger, an einem nicht achromatisirten Fernrohr wahrnehmen, wenn man eine stärkere Vergrößerung mit demselben erzeugt, als mit der Deutlichkeit des Bildes verträglich ist. In einem solchen Fernrohre wird das von der Objectivlinse entworfene Bild nicht auf einem Schirme aufgefangen, wie im Auge auf der Netzhaut, sondern durch die vergrößernden Ocularlinsen vom Beschauer betrachtet. Eine Vergrößerung des

¹ W. v. BEZOLD, *Graefe's Archiv für Ophthalm.* XIV. (2). S. 1—29. Dort ist auch eine eingehende Theorie der Erscheinungen gegeben.

vom Objectivglase entworfenen Bildes muß man aber anwenden, weil sonst die Farbensäume meist zu schmal sind, um deutlich gesehen zu werden. Auch hier sieht man, wenn das Fernrohr für einen entferneren Gesichtspunkt eingerichtet ist, weiße Flächen roth und gelb gesäumt; ist es dagegen für einen näheren eingestellt, blau gesäumt. Bei der Einstellung, welche die schärfsten Bilder giebt, erscheinen sehr schmale purpurne Ränder. Verdeckt man eine Hälfte des Objectivs, so erscheinen an gegenüberliegenden Rändern der weißen Flächen blaue und gelbe Ränder u. s. w., ganz wie unter analogen Verhältnissen im Auge. 131

Um die GröÙe der durch Dispersion im Auge erzeugten Zerstreungskreise zu berechnen, können wir LISTING's reducirtes Auge und darin Wasser als brechende Flüssigkeit zu Grunde legen, da nach FRAUNHOFER's Messungen die farbenzerstreuende Kraft eines solchen Auges von der des menschlichen wenig abweichen würde. Es verhält sich (*Fig.* 77)

$$\frac{\gamma\gamma}{b_1 b_2} = \frac{\delta r}{fr} = \frac{\delta v}{fv}, \text{ also ist}$$

$$\gamma\gamma \cdot fr = b_1 b_2 \cdot \delta r$$

$$\gamma\gamma \cdot fv = b_1 b_2 \cdot \delta v. \text{ Beides addirt giebt}$$

$$\frac{\gamma\gamma \cdot [fr + fv]}{b_1 b_2} = \frac{b_1 b_2 \cdot [\delta r + \delta v]}{b_1 b_2}$$

$$= b_1 b_2 \cdot [fr - fv]$$

$$\gamma\gamma = b_1 b_2 \cdot \frac{fr - fv}{fr + fv}.$$

Setzen wir $b_1 b_2$, entsprechend dem mittleren Durchmesser der Pupille normaler Augen, gleich 4 mm, und weiter, wie oben gefunden ist,

$$fr = 20,574 \text{ mm,}$$

$$fv = 20,140 \text{ mm,}$$

$$\text{so wird } \gamma\gamma = 0,0426 \text{ mm.}$$

Nach der in § 11 gegebenen Tafel für die GröÙe der Zerstreungskreise von Objecten, für welche das Auge nicht accommodirt ist, würde daher der Durchmesser $\gamma\gamma$ der durch die Dispersion bedingten Zerstreungskreise ebenso groß sein, wie der, den ein leuchtender Punkt 1,5 m ($4\frac{3}{4}$ Fufs) Entfernung in einem für unendliche Entfernung accommodirten Auge giebt. Eine solche Abweichung der Accommodation giebt bei der Betrachtung feinerer Gegenstände schon eine recht merkhche Ungenauigkeit des Bildes, wie man bei Anstellung eines entsprechenden Versuches leicht erkennt. Um zu erklären, warum die Dispersion des weissen Lichts im Auge trotz der gleichen GröÙe der Zerstreungskreise keine merkhche Ungenauigkeit des Bildes hervorbringt, muß man nicht bloß die GröÙe der Zerstreungskreise, sondern auch die Vertheilung des Lichts in denselben berücksichtigen,

Wenn ein Lichtkegel von einem einfarbig leuchtenden Punkte in das Auge fällt, und die Netzhaut sich vor oder hinter dem Vereinigungspunkte der Strahlen befindet, so wird ein Zerstreungskreis gebildet, der in allen seinen Theilen gleiche Helligkeit hat.

Wenn dagegen das Auge von einem Kegel weissen Lichts getroffen wird, und sich die Netzhaut im Vereinigungspunkte der grüngelben Strahlen, welche die lichtstärksten sind,

befindet, so werden diese auf einen Punkt der Netzhaut vereinigt, während die übrigen Strahlen Zerstreungskreise bilden, welche um so größer werden, je mehr ihre Brechbarkeit von der der mittleren Strahlen abweicht.

Während also der Mittelpunkt des beleuchteten Kreises von Strahlen aller Art gleichzeitig getroffen wird, und namentlich auch von den lichtstärksten und am meisten concentrirten Strahlen, fallen auf die dem Rande näher liegenden Theile des Kreises nur Strahlen von den äußersten Farben des Spectrum, welche erstens an und für sich schon lichtschwächer sind als die mittleren, und zweitens dadurch, daß sie ihr Licht über größere Zerstreungskreise vertheilen, noch mehr geschwächt sind. Die Rechnung ergibt, daß unter diesen Umständen die Helligkeit im Mittelpunkte des Zerstreungskreises unendlich groß sein muß gegen alle anderen Punkte des Kreises.

132

Da wir für das Gesetz der Helligkeit der einzelnen Farben des Spectrum noch keinen mathematischen Ausdruck angeben können, wollen wir die Rechnung unter der Annahme durchführen, daß alle Farben des Spectrum gleiche Helligkeit haben. Dabei werden wir allerdings die Helligkeit der Ränder der Zerstreungskreise größer finden, als sie in Wahrheit ist, aber es wird sich auch unter dieser für unseren Zweck ungünstigen Annahme zeigen, warum die durch Farbenzerstreuung bedingten Zerstreungskreise eine weit geringere Undeutlichkeit des Bildes geben, als die durch mangelnde Accommodation bedingten von gleicher Größe.

Berechnung der Helligkeit in einem durch Dispersion erzeugten Zerstreungskreise eines einzelnen leuchtenden Punktes.

Es sei in *Fig. 81* *bb* die Hauptebene des reducirten Auges vom Radius *R*; in ihr möge, wie das beim Auge nahehin der Fall ist, die Blending liegen, welche das Strahlenbündel begrenzt, so daß *bb* ein Durchmesser der Blending ist, deren Halbmesser wir in der Rechnung mit *b* bezeichnen wollen. Die Strahlen, welche in das Auge fallen, mögen parallel sein. Es sei ferner *v* der Brennpunkt für die äußersten violetten, *w* der für die äußersten rothen Strahlen. Diese äußersten Strahlen schneiden sich in *g*, so daß *gg* der Durchmesser des ganzen Zerstreungskreises und *h* sein Mittelpunkt ist. Die Netzhaut muß sich in der Ebene *gg*

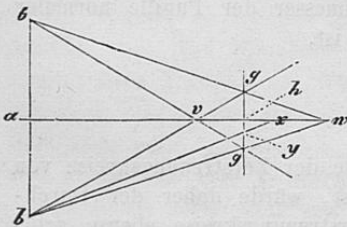


Fig. 81.

finden, wenn sie das deutlichste Bild aufnehmen soll. Das Brechungsverhältniß der mittleren Strahlen, die sich in *h* vereinigen, nennen wir *N*, ihre Brennweite *a h* sei *F'*. Dann ist nach § 9 Gleichung 3a)

$$F' = \frac{N \cdot R}{N - 1} \dots \dots \dots 1a).$$

Das Brechungsverhältniß irgend einer anderen Art von Strahlen, welche ihren Brennpunkt in *x* haben, sei *n*, die zugehörige Brennweite *a x* gleich *f*. Dann ist

$$f = \frac{n \cdot R}{n - 1} \dots \dots \dots 1b).$$

Den Radius des Zerstreungskreises, den diese Strahlen geben, *h y*, nennen wir *q*. Er ist gegeben durch die Gleichung

$$\frac{q}{b} = \frac{f - F'}{f},$$

wenn $f > F$, also $n < N$, oder durch

$$\frac{e}{b} = \frac{F-f}{f},$$

wenn $f < F$, also $n > N$. Setzen wir hierin aus 1a) und 1b) die Werthe von F und f , so erhalten wir

$$\frac{e}{b} = \frac{N-n}{n \cdot (N-1)} \dots \dots \dots 2a),$$

wenn $n < N$, und

$$\frac{e}{b} = \frac{n-N}{n \cdot (N-1)} \dots \dots \dots 2b),$$

wenn $n > N$.

Die Helligkeit H nun, mit welcher die Farbe von dem Brechungsverhältniß n die Netzhaut beleuchtet, ist

$$H = A \cdot \frac{b^2}{e^2} \dots \dots \dots 3),$$

wenn wir die Helligkeit mit A bezeichnen, mit welcher das betreffende Licht die Fläche b beleuchtet. Setzen wir in 3) statt $\frac{b}{e}$ aus 2a) oder 2b) seinen Werth, so erhalten wir übereinstimmend:

$$H = A \cdot \frac{n^2 \cdot (N-1)^2}{(n-N)^2} \dots \dots \dots 3a).$$

Die Helligkeit J irgend eines Punktes im Zerstreungskreise wird nun werden

$$J = \int H \cdot dn \dots \dots \dots 4),$$

wobei wir das Integral über alle diejenigen Werthe von n auszudehnen haben, deren zugehörige Farben auf jenen Punkt fallen.

In dem Ausdrücke für H ist der Factor A in Wirklichkeit eine Function von n , deren mathematischen Ausdruck wir aber nicht kennen. Der Factor n^2 verändert in der ganzen Ausdehnung des Spectrum seinen Werth sehr wenig. Wir wollen deshalb setzen

$$A \cdot n^2 \cdot (N-1)^2 = B$$

und B als constant ansehen, d. h. annehmen, daß die Helligkeit der Spectralfarben durch die ganze Ausdehnung des Spectrums nahehin constant sei, und nur wenig vom rothen zum violetten Ende hin abnehme. Diese Annahme ist für unseren Zweck jedenfalls ungünstiger als die Wirklichkeit. Dann wird nach 4)

$$J = \int \frac{B \cdot dn}{(N-n)^2} \dots \dots \dots 4a)$$

zwischen den gehörigen Grenzen genommen. Es fallen aber auf jeden Punkt des Zerstreungskreises erstens Strahlen aus dem rothen, und zweitens Strahlen aus dem violetten Theile des Spectrums. Die Grenzen der Brechbarkeit für die ersteren seien n_1 und n_2 , so daß

$$N > n_2 > n_1,$$

die Grenzen für die letzteren seien n_3 und n_4 , so daß

$$n_4 > n_3 > N$$

Dann wird die Gleichung 4a)

$$J = B \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{(N-n)^2} + B \int_{n_3}^{n_4} \frac{dn}{(N-n)^2}$$

$$= B \left\{ \frac{1}{N-n_2} - \frac{1}{N-n_1} + \frac{1}{N-n_4} - \frac{1}{N-n_3} \right\} \dots 4b).$$

Ist nun ϱ_0 die Entfernung des Punktes, dessen Helligkeit wir bestimmen wollen, vom Mittelpunkte des Zerstreungskreises, so wird dieser Punkt von allen denjenigen Farben getroffen, für welche die Radien der Zerstreungskreise größer sind als ϱ_0 , also zwischen ϱ_0 und $r = \frac{1}{2} gg$ liegen. Nun ist für die weniger brechbaren Farben, wenn wir aus Gleichung 2a) den Werth von $N-n$ bestimmen,

$$\frac{1}{N-n} = \frac{1}{N} + \frac{1}{N \cdot (N-1)} \cdot \frac{b}{\varrho}$$

134 Für $n = n_1$ ist $\varrho = r$, für $n = n_2$ ist $\varrho = \varrho_0$, also

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{N-n_1} &= \frac{1}{N} + \frac{1}{(N-1) \cdot N} \cdot \frac{b}{r} \\ \frac{1}{N-n_2} &= \frac{1}{N} + \frac{1}{(N-1) \cdot N} \cdot \frac{b}{\varrho_0} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 4c).$$

Für die Bestimmung von n_3 und n_4 müssen wir den Werth von $N-n$ aus Gleichung 2b) entnehmen.

$$\frac{1}{N-n} = \frac{1}{N} - \frac{1}{N \cdot (N-1)} \cdot \frac{b}{\varrho}$$

Für $n = n_4$ wird $\varrho = r$, und für $n = n_3$ wird $\varrho = \varrho_0$, also

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{N-n_4} &= \frac{1}{N} - \frac{1}{N \cdot (N-1)} \cdot \frac{b}{r} \\ \frac{1}{N-n_3} &= \frac{1}{N} - \frac{1}{N \cdot (N-1)} \cdot \frac{b}{\varrho_0} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 4d).$$

Setzen wir die Werthe aus 4c) und 4d) in 4b), so erhalten wir endlich

$$J = \frac{2B}{N \cdot (N-1)} \left\{ \frac{b}{\varrho_0} - \frac{b}{r} \right\} \dots \dots \dots 5).$$

Dieser Werth von J wird in der Mitte des Zerstreungskreises für $\varrho_0 = 0$ unendlich groß, am Rande, wo $\varrho_0 = r$, gleich 0.

Berechnung der Helligkeit am Rande einer gleichmäßig erleuchteten Fläche. Es sei in *Fig. 82* AB die Grenzlinie einer links von ihr liegenden leuchtenden Fläche, und angenommen, daß jeder Punkt derselben als Zerstreungskreis erscheine. Es sei ferner p der Punkt, dessen Helligkeit bestimmt werden soll, und $pq=r$ der Radius der Zerstreungskreise. Es wird auf p Licht gelangen aus allen denjenigen Punkten der Fläche, welche innerhalb des mit dem Radius r um p geschlagenen Kreises liegen. Wenn s einer dieser Punkte ist, und wir die Länge sp mit ϱ ,

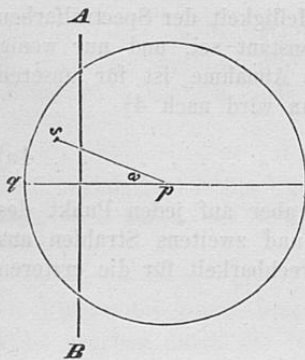


Fig. 82.

Kreises liegen. Wenn s einer dieser Punkte ist, und wir die Länge sp mit ϱ ,

den Winkel spq mit ω , und die Helligkeit des Zerstreungskreises eines einzelnen Punktes in der Entfernung ρ vom Centrum mit J bezeichnen, so wird die Helligkeit H im Punkte p werden:

$$H = \iint J \cdot \rho \cdot d\omega \cdot d\rho, \dots \dots \dots 6),$$

dieses Integral ausgedehnt über alle Theile der Fläche, welche innerhalb des um p geschlagenen Kreises liegen.

Wenn der Rand der Fläche eine gerade Linie und der Abstand des Punktes s von diesem Rande gleich x ist, so ist für die am Rande gelegenen Punkte der Fläche

$$\rho \cdot \cos \omega = x$$

und wenn wir den Ausdruck für H zuerst nach ω integriren, und aus der letzten Gleichung den Werth für die Grenzen von ω entnehmen,

$$H = \int_x^r 2 J \cdot \rho \cdot \text{arc. cos} \left(\frac{x}{\rho} \right) \cdot d\rho, \dots \dots \dots 6a).$$

Wenn die Zerstreungskreise durch unpassende Accommodation entstehen, 135 können wir J als unabhängig von ρ betrachten und erhalten dann:

$$H = J \left[r^2 \cdot \text{arc. cos} \left(\frac{x}{r} \right) - x \cdot \sqrt{r^2 - x^2} \right], \dots \dots \dots 7),$$

welche Gleichung für diesen Fall die Helligkeit in der Nähe des Randes der Fläche als Function des Abstandes vom Rande giebt. Für $x=r$ wird $H=0$, für $x=-r$ wird $H=Jr^2\pi$ und geht hier in die constante Helligkeit der Fläche über.

Wenn die Zerstreungskreise durch Dispersion entstanden sind, können wir in Gleichung 6a) den Werth von J aus Gleichung 5) setzen, und erhalten durch Ausführung der Integration:

$$H = \frac{2 B \cdot b}{N \cdot (N-1)} \left\{ r \cdot \text{arc. cos} \left(\frac{x}{r} \right) + \frac{x}{r} \sqrt{r^2 - x^2} + x \cdot \log. \text{nat.} \left(\frac{r - \sqrt{r^2 - x^2}}{r + \sqrt{r^2 - x^2}} \right) \right\} 8).$$

Für $x=r$ wird $H=0$, für $x=-r$ wird

$$H = \frac{2 B \cdot b \cdot r \cdot \pi}{N \cdot (N-1)}$$

und geht hier in die constante Helligkeit des mittleren Theils der Fläche über.

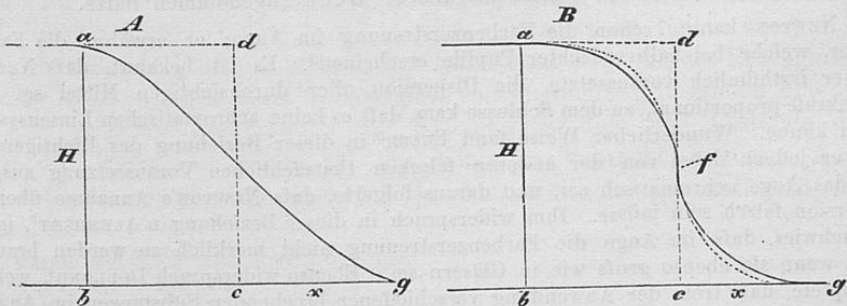


Fig. 83.

Um den Gang dieser Functionen übersichtlicher darzustellen, habe ich in Fig. 83 die beiden Curven construirt. A entspricht der Gleichung 7), B der Gleichung 8).

In beiden sind die Werthe von x in horizontaler, die Werthe der Helligkeit H in verticaler Richtung aufgetragen. Die Ordinate ab entspricht der Helligkeit in der Mitte der Fläche, c bezeichnet den Ort des Randes, so daß die Linie adc die Helligkeit eines ganz scharfen Bildes bezeichnen würde. Die Grenzen des Zerstreungskreises von c sind a und g . Die Curve B zeichnet sich dadurch vor der anderen aus, daß sie in ihrer Mitte bei f , entsprechend dem wirklichen Orte des Randes, ganz senkrecht abfällt. Es wird hier für $x=0$ nämlich der Differentialquotient

$$\frac{dH}{db} = \frac{2B \cdot b}{N \cdot (N-1)} \cdot \left\{ \frac{2}{r} \cdot \sqrt{r^2 - x^2} + \log. \text{ nat.} \left[\frac{r - \sqrt{r^2 - x^2}}{r + \sqrt{r^2 - x^2}} \right] \right\} \dots 9)$$

unendlich groß. Dieser plötzliche Abfall der Helligkeit am Rande der Fläche macht für das Auge die Lage des Randes scharf erkennbar, wenn auch eine gewisse Menge Licht sich noch weiter verbreitet, während in der Curve A die Abnahme der Helligkeit ziemlich gleichmäßig stattfindet, und der Ort des Randes durch kein besonderes Kennzeichen ausgezeichnet ist.

136 Wenn man die nach den Enden des Spectrum abnehmende Helligkeit der Farben in Rechnung ziehen könnte, so würde die Curve B etwa die Form der punktirten Linie bekommen müssen. Die Helligkeit innerhalb der Grenzen der Fläche würde sich der normalen noch mehr nähern, und außerhalb dieser Grenzen würde sie noch geringer werden.

Aus diesen Verhältnissen erklärt es sich, warum die Farbenzerstreuung der Bilder im Auge der Schärfe des Sehens so wenig Eintrag thut. Ich habe mir Linsen zusammengestellt, welche im Stande waren, das Auge achromatisch zu machen, aber nicht gefunden, daß die Schärfe des Gesichts dadurch merklich erhöht wurde. Ich fand zu dem Ende eine concave Flintglaslinse von 15,4 mm Brennweite, von einem Objectivglase eines Mikroskops genommen, passend. Diese setzte ich zusammen mit convexen Crown Glaslinsen, so daß dadurch ein System von etwa $2\frac{1}{2}$ Fufs negativer Brennweite entstand, wie es für mein Auge paßte, um ferne Gegenstände gut zu erkennen. Wenn ich durch dieses System sah, und die halbe Pupille verdeckte, entstanden keine farbigen Ränder an der Grenze dunkler und heller Gegenstände mehr. Ebenso wenig entstanden dergleichen bei unpassender Accommodation des Auges, so daß das Auge durch dieses Linsensystem wirklich achromatisch gemacht war. Ich konnte aber nicht finden, daß die Schärfe des Sehens in irgend merkbarer Weise zugenommen hätte.

NEWTON kannte schon die Farbenzerstreuung im Auge; er erwähnt die Farbränder, welche bei halbverdeckter Pupille erscheinen¹. Es ist bekannt, daß NEWTON, weil er irrthümlich voraussetzte, die Dispersion aller durchsichtigen Mittel sei ihrer Brechkraft proportional, zu dem Schlusse kam, daß es keine achromatischen Linsensysteme geben könne. Wunderlicher Weise fand EULER² in dieser Beziehung das Richtigere, indem er jedoch dabei von der anderen falschen thatsächlichen Voraussetzung ausging, daß das Auge achromatisch sei, und daraus folgerte, daß NEWTON's Annahme über die Dispersion falsch sein müsse. Ihm widersprach in dieser Beziehung D'ALEMBERT³, indem er nachwies, daß im Auge die Farbenzerstreuung nicht merklich zu werden brauche, selbst wenn sie ebenso groß wie in Gläsern sei. Ebenso widersprach DOLLOND⁴, welcher behauptete, daß trotz der Anwendung verschiedener brechender Substanzen im Auge es

¹ J. NEWTON, *Optics*. Lib. I. P. II. Prop. VIII.

² L. EULER, *Journal Encyclop.* 1767. II. p. 146. — *Mém. de l'Acad. de Berlin*. 1747.

³ J. L. D'ALEMBERT, *Mém. de l'Acad. de Paris*. 1767. p. 81.

⁴ J. DOLLOND, *Philos. Trans.* T. LXXIX. p. 256.

nicht achromatisch sein könne, da alle einzelnen Brechungen der Lichtstrahlen nach der Axe zu gingen. Wenn wir das für farblos durchsichtige Mittel bisher stets bestätigte Gesetz als allgemeingültig ansehen, daß bei jeder Brechung des Lichts an der Grenzfläche von zwei ungefärbt durchsichtigen Substanzen die violetten Strahlen stärker gebrochen werden als die rothen, so ist DOLLOND's Beweisführung gültig. Dann muß nämlich im Auge jedenfalls bei jeder Brechung das violette Licht sich der Axe mehr nähern als das rothe. MASKELYNE¹ hat auch Messungen der Farbenzerstreuung gemacht und gefunden, daß das Intervall der Brennpunkte 0,02 Zoll (0,61 mm) betrage, was einem Gesichtswinkel von 25 Sec. entspreche, während man in Fernröhren sie noch bis zu einem Gesichtswinkel von 57 Sec. zulässig finde. JURIN² hat die farbigen Ränder unbestimmt gesehener Objecte bemerkt. WOLLASTON³ machte auf das eigenthümliche Aussehen des prismatischen Spectrum aufmerksam, welches von der Unfähigkeit des Auges, sich für alle Farben gleichzeitig zu accommodiren, herrührt. Eine vollständige Theorie der Erscheinungen bei halbverdeckter Pupille gab MOLLWEIDE⁴, eine vollständige Bearbeitung sämtlicher hierher gehörigen Erscheinungen TOURNAU. Die ersten genauen Messungen der Farbenzerstreuung des Auges stellte FRAUNHOFER⁵ an, mit Berücksichtigung der von WOLLASTON und ihm entdeckten festen Linien im Spectrum, spätere MATTHIESSEN⁶.

Trotz aller dieser Untersuchungen hielten manche Naturforscher doch die Idee¹³⁷ von der absoluten Vollkommenheit des Auges und somit auch seiner mehr oder weniger vollkommenen Achromasie fest, wie FORBES⁷, VALLÉE⁸.

§ 14. Astigmatismus.

Ausser der Ungenauigkeit des Bildchens, welche durch die ungleiche Brechung verschiedenfarbiger Lichtstrahlen bedingt ist, kommt bei den optischen Instrumenten, welche Glaslinsen mit sphärischen Flächen enthalten, noch eine zweite Art der Abweichung vor, die Abweichung wegen der Kugelgestalt oder sphärische Aberration, welche darin besteht, daß auch Lichtstrahlen von gleicher Farbe, die von einem Punkte ausgehen, von krummen Flächen im Allgemeinen nicht genau, sondern nur annähernd in einen Punkt wieder vereinigt werden. Wir wollen diese monochromatische Abweichungen nennen. Es giebt allerdings gewisse krumme Flächen, welche die Lichtstrahlen, die von einem bestimmten leuchtenden Punkte ausgehen, ganz genau in einen Punkt wieder vereinigen (aplanatische Flächen). Es sind dies Rotationsflächen, deren Erzeugungscurve im Allgemeinen durch eine Gleichung vierten Grades gegeben wird. In gewissen Fällen aber, z. B. wenn der leuchtende Punkt in unendlicher Entfernung liegt, ist die Erzeugungscurve eine Ellipse. Auch kann in Systemen von kugeligen brechenden Flächen durch eine passende Combination der Krümmungsradien und Abstände der Flächen die Kugelabweichung auf ein Minimum gebracht werden. Auch solche Systeme nennt man aplanatisch. Übrigens ist natürlich der

¹ N. MASKELYNE, *Philos. Trans.* LXXIX. 258. 1789.

² J. JURIN, *Smith's Optics.* 96.

³ WOLLASTON, *Philos. Trans.* 1801. P. I. p. 50.

⁴ K. B. MOLLWEIDE, *Gilbert's Annalen.* XVII. 328. 1804 und XXX. 220. 1808.

⁵ J. FRAUNHOFER, *Gilbert's Annalen.* LVI. 304. — *Schuhmacher's astronom. Abhandlgn.* Heft II. S. 39.

⁶ MATTHIESSEN, *Comptes rendus.* XXIV. 875.

⁷ J. D. FORBES, *Roy. Edinb. Soc.* XVI. 1849. p. 251.

⁸ L. L. VALLÉE, *Comptes rendus.* XXIV. 1096. XXXIV. 321.

Zerstreuungskreis, den das Bild eines in der optischen Axe eines solchen Systems liegenden leuchtenden Punktes bildet, rings um die Axe symmetrisch. Er bildet einen hellen Fleck, dessen Helligkeit in der Axe am stärksten ist, und von da nach allen Seiten hin schnell abnimmt.

Die im Auge vorkommenden monochromatischen Abweichungen sind nicht, wie die sphärische Aberration der Glaslinsen, symmetrisch um eine Axe, sie sind vielmehr unsymmetrisch und von einer Art, wie sie bei gut gearbeiteten optischen Instrumenten nicht vorkommen darf.

Die Erscheinungen sind folgende: 1) Man wähle zuerst als Object einen sehr kleinen leuchtenden Punkt (ein mit einer Nadel gestochenes Löchelchen in schwarzem, undurchsichtigem Papier, durch welches Licht fällt) und bringe ihn, nöthigenfalls unter Anwendung eines convexen Brillenglases, in eine etwas gröfsere Entfernung als die gröfste Accommodationsdistanz, so dafs auf der Netzhaut ein kleiner Zerstreuungskreis entsteht. Man sieht alsdann statt des hellen Punktes nicht, wie es in einem schlecht eingestellten Fernrohre der Fall ist, eine kreisförmige Fläche, sondern eine strahlige Figur von vier bis acht unregelmäfsigen Strahlen, welche in beiden Augen verschieden zu sein pflegt und auch für verschiedene Menschen verschieden ist. Ich habe in *Fig. 84 a* die aus meinem rechten, in *b* die aus

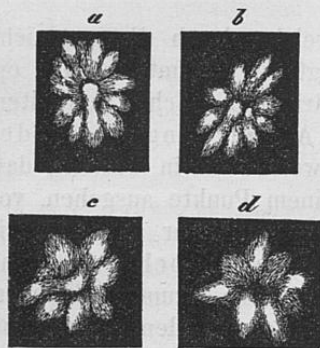


Fig. 84.

meinem linken Auge abgebildet. Die nach der Peripherie gekehrten Ränder der hellen Partien eines von weißem Lichte entworfenen Zerstreuungsbildes dieser Art sind blau gesäumt, die dem Centrum zugekehrten rothgelb. Die Figur scheint bei den meisten Menschen in der Richtung von oben nach unten länger zu sein als von rechts nach links. Ist das Licht schwach, so kommen nur die hellsten Stellen der Strahlenfigur zur Wahrnehmung, und man sieht mehrere Bilder des hellen Punktes, von denen gewöhnlich eines heller ist als die anderen. Ist das Licht dagegen sehr stark, läßt man z. B. directes Sonnenlicht durch eine feine Öffnung fallen, so fließen die Strahlen des Sterns in einander, rings umher entsteht außerdem ein aus unzähligen, äußerst feinen und bunt gefärbten Linien bestehender Strahlenkranz von viel gröfserer Ausdehnung, den wir unter dem Namen des Haarstrahlenkranzes von dem sternförmigen Zerstreuungsbilde unterscheiden wollen.

Hat man die sternförmige Figur oder bei schwächerem Lichte die mehrfachen Bilder des leuchtenden Punktes vor sich, und schiebt ein undurchsichtiges Blatt von unten her vor das Auge, so schwindet zuerst der scheinbar untere Theil des Zerstreuungsbildes, also der obere Theil des entsprechenden Netzhautbildchens. Schiebt man das Blatt von oben, von rechts oder links vor das Auge, so schwindet dem entsprechend immer der obere, rechte oder linke Theil des Zerstreuungsbildes.

Anders verhält sich der ausgedehntere Haarstrahlenkranz, den sehr intensives Licht erregt. Wenn man die Pupille von unten her verdeckt, verschwindet keineswegs der untere Theil dieses Kranzes, sondern nur der untere Theil des centralen hellen Sterns. Die Erscheinung wird aber da-¹³⁹ durch gestört und verändert, daß sehr lebhaftes Diffractionsbilder sich entwickeln, welche von der verengerten und veränderten Gestalt der Pupille bedingt sind.

Die strahlige Gestalt der Sterne und ferner Laternen gehört mit zu diesen Erscheinungen.

2) Ist umgekehrt das Auge für eine größere Entfernung als die des leuchtenden Punktes accommodirt (zu welchem Zwecke man bei fernen leuchtenden Punkten eine schwache Concavlinse vor das Auge bringen kann), so erscheint eine andere strahlenförmige Figur (*Fig. 84 c* aus meinem rechten, *d* aus meinem linken Auge), deren größere Ausdehnung meist horizontal ist. Verdeckt man die Pupille von einer Seite her, so schwindet die entgegengesetzte Seite des vom Beobachter gesehenen Zerstreuungsbildes, d. h. die der verdeckten Hälfte der Pupille gleichseitigen Theile des Netzhautbildes. Diese Figur wird also von Strahlen gebildet, welche die Axe des Auges noch nicht geschnitten haben. Wenn sich Thränenflüssigkeit über das Auge verbreitet hat, oder durch häufiges Blinzeln mit den Lidern Fetttropfen aus den MEIBOM'schen Drüsen auf die Hornhaut gekommen sind, ist die Strahlenfigur meist größer, unregelmäßiger, wird durch Blinzeln bedeutend verändert, und wenn man die Pupille von der Seite her verdeckt, verschwindet dadurch nicht bloß eine Seite der Strahlenfigur.

3) Bringt man den leuchtenden Punkt in eine solche Entfernung, daß man das Auge für sie accommodiren kann, so sieht man bei mäßigem Lichte einen kleinen rundlichen hellen Fleck ohne Unregelmäßigkeiten. Bei stärkerem Lichte dagegen bleibt sein Bild bei jeder Weise der Accommodation strahlig, und man findet bei allmählichen Accommodationsänderungen nur, daß die vertical verlängerte Strahlenfigur, welche bei kürzerer Sehweite vorhanden ist, sich verkleinert, rundlicher wird und dann in die horizontal verlängerte Strahlenfigur übergeht, die einer größeren Sehweite angehört.

4) Wenn man eine feine Lichtlinie betrachtet, kann man sich die Erscheinungen, welche entstehen, leicht dadurch im Voraus entwickeln, daß man die strahligen Zerstreuungsbilder für alle einzelnen Punkte der Linie construirt denkt, die sich nun zum Theile decken. Die helleren Theile der Zerstreuungsbilder fließen dann zu Lichtlinien zusammen, welche als mehrfache Bilder der hellen Linie erscheinen. Die meisten Augen sehen zwei, manche in gewissen Lagen fünf oder sechs solche Doppelbilder.

Um den Zusammenhang der Doppelbilder von Linien mit den strahligen Bildern von Punkten gleich durch den Versuch anschaulich zu machen, schneide man in ein dunkles Papierblatt eine feine gerade Spalte, und ein wenig von deren Ende entfernt, in der Richtung ihrer Verlängerung, steche man ein rundes Löffelchen ein, wie *Fig. 85 a*. Von Ferne sehend, be-

merkt man dann, daß die Doppelbilder der Linie genau denselben Abstand von einander haben, wie die hellsten Stellen der strahlenförmigen Zerstreuungsfur des Punktes, und daß letztere in der Verlängerung der ersteren liegen, wie in *Fig. 85 b*, wo in der Zerstreuungsfur des hellen Punktes nur die hellsten Theile des Sterns, *Fig. 84 a*, sichtbar sind.

140

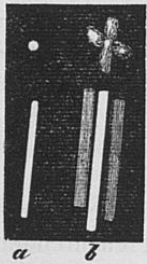


Fig. 85.

Hierher gehören die mehrfachen Bilder, welche die meisten Augen von den Hörnern der Mondsichel sehen. Diese Erscheinung wird *Polyopia monocularis* (oder *monophthalmica*) genannt.

An den Grenzen heller Flächen, für welche das Auge nicht ganz vollkommen *accommodirt* ist, machen sich die Doppelbilder auch mitunter dadurch bemerklich, daß am Rande der hellen Fläche der Übergang von Helligkeit zu Dunkel in zwei oder

drei Absätzen geschieht.

Weitere hierher gehörige Erscheinungen folgen unten bei der Lehre von der *Irradiation*.

Daß die beschriebenen Erscheinungen von einer *Asymmetrie* des Auges herrühren, ist zunächst klar. Ein optisches Instrument, welches um seine *Axe* ringsum symmetrisch gebaut ist, kann für einen in der *Axe* liegenden Lichtpunkt allerdings Zerstreuungsfiguren entwerfen, die aber selbst symmetrisch gegen die *Axe* und kreisförmig gebildet sein müssen.

141

Was zunächst die strahlige Bildung der kleineren Zerstreuungskreise betrifft, so müssen wir trennen, was davon dauernd ist und jeder Zeit bei reiner Hornhaut wieder erscheint, und andererseits den Theil der Erscheinung, der durch Thränenfluß und Blinzeln der Augenlider verändert wird. Der letztere Theil rührt offenbar her von Tropfen wässriger oder fetter Flüssigkeit, oder von Unreinigkeiten, die sich auf der Hornhaut angesammelt haben. Man kann diese Erscheinungen nachahmen, wie *A. Fick* gezeigt hat, wenn man mit einer Glaslinse, auf deren Oberfläche man Wassertropfen ausbreitet hat, das Bild eines hellen Punktes entwirft.

Dergleichen vergängliche Erscheinungen kommen in den Strahlenfiguren meiner eigenen Augen seltener vor, vielmehr sehe ich gewöhnlich immer dieselben Figuren wieder, welche ich oben in *Fig. 84 a* bis *b* abgebildet habe, und welche durch ihre strahlige Form wohl zunächst an den strahligen Bau¹ der Linse erinnern. In der That konnte ich mich überzeugen, daß die wesentlichsten Züge dieser Strahlenfiguren von Unregelmäßigkeiten der Linse herrühren, indem ich die feine Öffnung, durch welche das Licht fiel, sehr nahe an das Auge brachte; dann sieht man in dem Zerstreuungskreise die sogenannten entoptischen Erscheinungen, welche im nächsten Paragraphen beschrieben werden sollen. Dort wird auch gezeigt werden, in welcher Weise man eine sichere Kenntniß von dem Orte der Objecte im Auge erhalten kann, welche diese Erscheinungen veranlassen. Es fand sich nun, daß gewisse helle und dunkle Streifen, welche dem entoptischen Bilde der

¹ S. oben Seite 39. Fig. 28.

Linse angehört, bei allmählig steigender Entfernung der Öffnung vom Auge übergangen in die hellen und dunklen Flecken und Streifen der in *Fig. 84 c* und *d* abgebildeten Sternfiguren. Abbildungen dieses Übergangs hat schon TH. YOUNG¹ gegeben.

Neuere Untersuchungen an Augen, deren Linse durch Staaroperation² entfernt worden ist, zeigen, daß diese Augen in der That die sternförmige Bildung der kleinen Zerstreuungskreise nicht zeigen, sondern nur die später zu beschreibenden elliptischen Formen derselben. Ausnahmsweise aber trägt auch die Hornhaut zu diesen Unregelmäßigkeiten bei, wenn sie kegelförmige Erhebungen oder Geschwürsnarben hat.

DONDERS² hat die Erscheinungen, welche jeder einzelne Sector der Krystalllinse hervorbringt, dadurch zu isoliren gesucht, daß er einen Schirm mit sehr kleiner Öffnung vor dem Auge herumführte, so daß das Licht bald durch den einen, bald durch den andern Sector der Linse einfiel. Es zeigte sich, daß jeder einzelne Sector die Strahlen nahehin in einen Punkt vereinigt, daß aber die Brennpunkte der verschiedenen Strahlen nicht zusammenfallen. Dabei ist aber auch die Vereinigung der Strahlen durch jeden einzelnen Sector nicht ganz genau, sondern die der Augenaxe näheren scheinen einen entfernteren Vereinigungspunkt zu haben, als die peripherisch einfallenden Strahlen. Daher drängen sich in dem Zerstreuungskreis jedes Sectors die Strahlen gegen die Peripherie hin zusammen, ehe der Ort der engsten Vereinigung erreicht ist, und nachher an der centralen Seite des Zerstreuungskreises.

Optische Systeme, welche solche Abweichungen zeigen, wie wir sie hier für das Auge beschrieben haben, können überhaupt an keiner Stelle homocentrische Strahlen wieder in einen Brennpunkt vereinigen. WHEWELL hat dafür den Namen des Astigmatismus vorgeschlagen (α privativum und $\sigma\tau\acute{\iota}\gamma\mu\alpha$, von $\sigma\tau\acute{\iota}\zeta\omega$, pingo, d. h. „ohne Brennpunkt“). Die bisher beschriebene Bildung unregelmäßig sternförmiger Zerstreuungskreise, wie sie sich bei stärkeren Abweichungen der Accommodation zeigen, bezeichnete DONDERS als den irregulären Astigmatismus. Theoretisch sind diese Erscheinungen wichtig, weil sie am deutlichsten die Art des Vorgangs erkennen lassen. Für das Sehen wichtiger sind dagegen diejenigen Unregelmäßigkeiten, welche bei möglichst guter Accommodation stehen bleiben. In diesen spricht sich meist nur noch die schon in den *Figuren 84 a—d* hervortretende Verlängerung der Zerstreuungskreise bald in der einen, bald in der andern Richtung aus. Es sind dies die Erscheinungen, die von DONDERS mit dem Namen des regulären Astigmatismus belegt worden sind.

Dieselben können auch an andern gekrümmten brechenden Flächen beobachtet werden, wenn entweder die Strahlen zwar nahehin senkrecht auf die brechende Fläche fallen, diese aber nicht kugelig gekrümmt ist, sondern

¹ TH. YOUNG, *Philos. Transact.* 1801. I. pl. VI.

² F. C. DONDERS, *Arch. f. Ophthalm.* VII. (1.) S. 185—241. 1861; ebenda X. (2.) S. 83—108. 1864. Derselbe. *Astigmatismus und cylindrische Gläser.* Berlin 1862. — *Anomalies of accommodation and refraction.* London 1864. p. 449—556.

in verschiedenen durch das Einfallslöth gelegten Schnittebenen verschieden gekrümmte Schnittlinien bildet; oder wenn die Fläche zwar kugelig gekrümmt ist, aber die Strahlen unter großen Einfallswinkeln auffallen. Selbst ebene Flächen können dünne Strahlenbündel, welche sehr schräg hindurchgehen und stark divergiren, astigmatisch machen. Überhaupt ist Astigmatismus der gebrochenen und gespiegelten Strahlen eigentlich der allgemeinere Fall, und die Homocentricität derselben nur als die unter besonderen Bedingungen eintretende Ausnahme zu betrachten.

Die Eigenthümlichkeit eines dünnen astigmatischen Strahlenbündels besteht darin, daß es nicht in einem einzigen Punkte, sondern in zwei verschieden weit vom Ursprunge der Strahlen entfernten, gegen die Axe des Bündels und gegen einander senkrechten kleinen Brennlinien vereinigt wird. Der deutlicheren Beschreibung wegen wollen wir annehmen, daß die Strahlen in horizontaler Richtung fortgehen, eine kreisförmige Öffnung passieren, welche das Bündel abgrenzt, und daß die erste und nähere Brennlinie horizontal, die andere vertical liege. In *Fig. 86* sei cd die Richtung, in der sich das Strahlenbündel fortpflanzt. Die darunter gesetzten dunklen Flecke zeigen die Form der Querschnitte, welche es in den darüber stehenden Punkten von cd annimmt. In c sei das kreisförmige Diaphragma; die

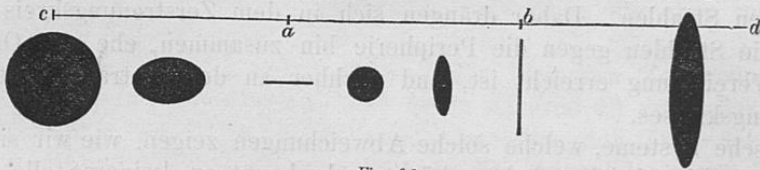


Fig. 86.

Strahlen convergiren, aber sie convergiren von oben nach unten schneller als von rechts nach links. Die Querschnitte werden quer verlängerte Ellipsen, endlich bei a eine begrenzte gerade Linie. Dort schneiden sich die Strahlen von oben nach unten; in Folge dessen verlängert sich die kürzere Verticalaxe der Ellipse wieder, während die Horizontalaxe noch fortfährt abzunehmen. Der Querschnitt wird also wieder eine quer verlängerte Ellipse, dann ein Kreis, dann eine senkrecht verlängerte Ellipse, endlich eine verticale begrenzte gerade Linie, in der der Querdurchmesser der Ellipse ganz geschwunden ist, und die Strahlen sich nun auch von rechts nach links schneiden. Von da ab erweitern sich beide Axen der Ellipse wieder; die horizontale ist zunächst immer noch die kleinere; in großer Entfernung aber nähert sich der Querschnitt wieder einem Kreise mehr und mehr.

In einem solchen Bündel geschieht also die Durchkreuzung der Strahlen von oben nach unten nicht an derselben Stelle, wie von rechts nach links.

Wenn das leuchtende Objekt nicht ein einzelner leuchtender Punkt, sondern eine feine Horizontallinie ist, so würde dieselbe an der Stelle a in *Fig. 86* noch vollkommen scharf gesehen werden können, da die Zerstreuung des Lichts jedes einzelnen leuchtenden Punktes nur in Richtung der Lichtlinie geschieht. Dagegen müsste eine solche in b undeutlich erscheinen, und ein

lichtes Band von einer gewissen Breite bilden. Umgekehrt würde eine lichte Verticallinie in *b* deutlich, in *a* undeutlich erscheinen. Ein astigmatisches Auge ist also im Allgemeinen nicht gleichzeitig für horizontale und verticale Linien, welche sich in gleicher Entfernung von ihm befinden, accommodirt. Man betrachte aufmerksam eine Anzahl gerader Linien, die sich in einem Punkte schneiden, wie *Fig. 87* in einer Entfernung, für welche man gut accommodiren kann. Man wird bemerken, daß man sie nach einander alle scharf begrenzt und dunkel schwarz sehen kann, während man aber eine von ihnen scharf sieht, sind im Allgemeinen die anderen nicht scharf. Ist man darin geübt, sich der Accommodationsänderungen seines Auges bewußt zu werden, so bemerkt man in der Regel, daß das Auge eine gröfsere Sehweite annimmt, um die seinem horizontalen Durchmesser parallelen Linien deutlich zu sehen, mehr für die Nähe dagegen accommodirt, um die senkrechten zu sehen.

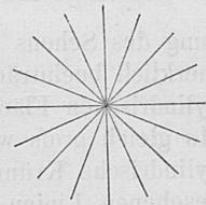


Fig. 87.

Man muß deshalb eine verticale Linie weiter vom Auge entfernen als eine horizontale, wenn man sie beide zu gleicher Zeit deutlich sehen will. AD. FICK sah verticale Linien in 4,6 Mt. Entfernung deutlich, und zugleich horizontale in 3 Mt., ich selbst zu verticalen in 0,65 Mt., horizontale in 0,54 Mt. Entfernung.

Zeichnet man eine große Zahl feiner concentrischer Kreislinien in gleichen Abständen von einander auf Papier, wie in *Taf. I. Fig. 1*, und betrachtet sie in einer Entfernung, für die man gut accommodiren kann, so erscheinen eigenthümliche strahlige Scheine auf der Figur. Bei genauerer Betrachtung erkennt man, daß in den lichterem Radien die schwarzen und weißen Linien scharf von einander geschieden sind, dazwischen aber liegen hellgraue wolkige Stellen, in denen die schwarzen Linien mehr verwaschen erscheinen. Läßt man die Accommodation des Auges oder die Entfernung der Figur vom Auge etwas wechseln, so werden andere Stellen der Figur klar, und es entsteht dadurch der Anschein, als ob die klaren Strahlen sich sehr schnell hin und her bewegten. Richtet man das Auge für eine beträchtlich weitere Entfernung ein, als in der die Figur liegt, so sieht man 8 bis 10 Sektoren mit deutlichen Linien; wo diese an einander stoßen, sind sie nebelig, aber man erkennt, daß die schwarzen Linien des einen Sectors nicht mit denen des nächsten zusammenpassen. Die innersten Kreise bekommen dadurch ein seltsam verzerrtes Ansehen.

Der reguläre Astigmatismus zeigt sich in fast allen menschlichen Augen in geringem Grade. Seine Größe kann nach demselben Principe, wie die Breite der Accommodation gemessen werden. Astigmatische Augen haben, wie oben angeführt wurde, verschiedene Sehweite für Linien von verschiedener Richtung im Gesichtsfelde. Wenn die größte dieser Sehweiten in Pariser Zoll gemessen *P* ist und bei demselben unveränderten Accommodations-

zustande die kleinste für eine andere Linienrichtung gleich p , so brauchen wir als Maafs des Astigmatismus

$$As = \frac{1}{p} - \frac{1}{P}.$$

So lange As kleiner ist als $\frac{1}{40}$, bringt es noch keine erhebliche Störung des Sehens hervor; wenn es aber gröfser ist, wird die Gesichtsschärfe merklich beeinträchtigt, und es kann solchen Augen durch Brillengläser mit cylindrischen Flächen¹ geholfen werden, deren Brennweite man der Gröfse As gleich grofs wählt, und deren geradlinige Cylinderkanten man, wenn die cylindrische Krümmung convex ist, der Richtung der entferntesten deutlich gesehenen Linien parallel macht. Ist die cylindrische Krümmung concav, so stellt man die Cylinderkanten im Gegentheil senkrecht zu jener Richtung. Die zweite Fläche der Cylinderlinsen kann man sphärisch schleifen, so dafs die gleichzeitig etwa vorhandene Myopie oder Hypermetropie corrigirt wird.

Ein System cylindrischer Linsen ist auch das beste Mittel schnell herauszufinden, ob und wie grofser Astigmatismus vorhanden sei und welches die Richtungen des Meridians gröfster und kleinster Sehweite sind. Astigmatische Linsen mit veränderlichem Grade von Astigmatismus kann man sich nach einem Vorschlage von STOKES zusammensetzen aus zwei gleichen Cylinderlinsen, die man aufeinander legt. Stellt man sie so, dafs ihre Cylinderkanten sich rechtwinkelig schneiden, so sind sie nicht astigmatisch, sondern wirken zusammen wie eine sphärische Linse. Dreht man sie unter einem kleineren oder gröfseren Winkel, so kann man ihnen beliebig wachsende Gröfse des Astigmatismus geben.

Einen zweckmäfsigen Apparat zur schnellen Messung des Astigmatismus hat E. JAVAL² durch Herrn NACHET in Paris construiren lassen. Zwei Sterne von je 24 Linien werden durch Convexlinsen mit parallelen Gesichtslinien betrachtet. Man entfernt die Zeichnungen so weit, bis nur noch eine der Linien scharf gesehen wird. Dann werden Cylinderlinsen, die in zwei drehbaren kreuzförmigen Fassungen sitzen, entweder einzeln oder zu zweien combinirt vorgeschoben, bis man eine Stärke gefunden hat, bei der alle Linien 836 des Sterns gleich deutlich erscheinen. Das Centrum der beiden drehbaren Kreuze ist selbst an einem beweglichen Arme befestigt, der um die optische Axe der Convexlinse gedreht werden kann, um der Krümmung des cylindrischen Glases die richtige Richtung geben zu können.

n Besser noch unterscheidet man die verschiedene Deutlichkeit an den Liniensystemen von Herrn O. BECKER³, wo je vier parallele Linien in jeder Gruppe nebeneinander stehen, die verschiedenen Gruppen verschieden gerichtet sind.

¹ TH. YOUNG hat für sein Auge eine schief gestellte sphärische Linse gebraucht, was leicht nachzumachen ist.

² E. JAVAL, *Ann. oculistique*. LV. p. 5—29. 1866.

O. BECKER, *Vier Tafeln zur Bestimmung des Astigmatismus*. Wien 1868.

Herr E. JAVAL¹ hat auch ein dem Ophthalmometer ähnlich wirkendes Instrument construirt, um die verschiedene Krümmung der Hornhaut in verschiedenen Meridianen leicht und schnell zu constatiren und zu messen. Die Doppelbilder werden durch ein doppelt brechendes Prisma hervorgebracht, welches man gleichzeitig mit den hellen Flächen, die als Object der Hornhautbilder dienen, um die Axe des Instruments rotiren lassen kann.

Noch einfacher ist ein von Herrn PLACIDO² vorgeschlagenes Verfahren. Man läßt eine hell beleuchtete Scheibe mit concentrischen schwarzen und weißen Ringen, wie *Fig. 78* (S. 162), von der Hornhaut spiegeln, wobei der Beobachter durch ein dem mittleren schwarzen Kreise entsprechendes Loch blickt. Abweichungen der Hornhaut von der Kugelgestalt verrathen sich durch entsprechende Verzerrungen des Hornhautbildes.

Die von DONDERS und KNAPP³ ausgeführten Messungen der Hornhaut astigmatischer Augen haben ergeben, daßs mit wenigen Ausnahmen die Hornhaut den regelmässigen Astigmatismus bedingt, und daßs er bei höheren Graden häufig ein wenig vermindert wird durch einen entgegengesetzten Astigmatismus der Krystalllinse. 836

Die Richtung der Linien, für welche die Sehweite am größten ist, ist wie in den oben angegebenen Fällen von A. FICK und mir selbst in der Regel der verticalen Richtung näher als der horizontalen; doch kommt auch, wie bei TH. YOUNG, in nicht allzu seltenen Fällen das Umgekehrte vor.

Erscheinungen der angegebenen Art werden im Auge oder in optischen Instrumenten im Allgemeinen eintreten, so oft Licht an krummen Flächen gebrochen wird, deren Krümmung nach verschiedenen Richtungen hin verschieden ist, oder auch an Kugelflächen, so oft es schief auf die Fläche fällt. An beiderlei Ursachen kann man im Auge denken. Horizontale und verticale Meridianschnitte der brechenden Flächen des Auges haben nachweisbar nicht dieselben Krümmungsradien; und wir wissen außerdem, daßs das menschliche Auge nicht ganz genau centrirt ist, und daßs der Ort des directen Sehens nicht in der Linie liegt, welche dem Begriffe einer Augenaxe am nächsten kommt. 141

Wie die verschiedene Krümmung der Hornhautmeridiane mit dem Ophthalmometer nachzuweisen ist, ist in § 2, S. 20—22, erörtert.

Anzuführen ist, daßs TH. YOUNG⁴, in dessen Auge die beiden Vereinigungsweiten ziemlich beträchtlich differirten, durch einen Versuch ermittelt hat, daßs seine Hornhaut diese Differenz nicht bewirke. Er brachte nämlich das Auge unter Wasser, wobei die Brechung in der Hornhaut fast vollständig aufgehoben ward, und fand, daßs die Differenz der Vereinigungsweiten noch in gleichem Maafse fortbestand.

Schließlich ist noch die unvollkommene Klarheit der Augenmedien als Grund monochromatischer Abweichungen anzuführen. Die Fasern der Horn- 142

¹ E. JAVAL et SCHTÖTZ. *Ann. d'oculist.* Juillet 1881. JAVAL ebenda. Mai 1882. Juillet 1882. Janvier 1883.

² PLACIDO in *Period. di oftalm. pratica.* Anno 2. No. 5 u. 6. 1880.

³ H. KNAPP, *Gräfe's Archiv f. Ophthalm.* VIII. 2. S. 185—241. 1862.

⁴ TH. YOUNG. *Philos. Transact.* 1801. P. I. p. 40.

haut und Linse scheinen allerdings durch eine Zwischensubstanz von ziemlich gleichem Brechungsvermögen verbunden zu sein, so daß bei mäßiger Lichtstärke diese Theile vollkommen homogen und klar erscheinen. Wenn man aber starkes Licht durch eine Brennlinse auf sie concentrirt, wird das an den Grenzen ihrer Elementarbestandtheile reflectirte Licht stark genug, um sie weißlich trübe erscheinen zu lassen. Von dem durch sie gehenden Lichte wird also, wie dieser Versuch zeigt, ein Theil diffus zerstreut, und muß auch andere Theile der Netzhaut treffen, auf welche das regelmäsig gebrochene Licht nicht fällt. In der That bemerkt man, wenn man ein intensives Licht vor einem ganz dunklen Grunde betrachtet, den Grund mit einem nebeligen weißen Scheine übergossen, der in der Nähe des Lichts am hellsten ist. Sowie man das Licht verdeckt, erscheint der umgebende Grund in seiner natürlichen Schwärze. Ich glaube diese Erscheinung durch zerstreutes Licht erklären zu müssen¹.

Ich will die Theorie der Brechung an nicht kugeligen Flächen und der Brechung bei schiefem Einfall an Kugelflächen hier nicht vollständig entwickeln, weil sie vorläufig für die Untersuchung der Brechung im Auge nur von geringem Nutzen sein würde, solange wir nicht genauere Bestimmungen für die Form der brechenden Flächen haben. Es genüge hier, eine derartige Brechung in zwei einfachen Fällen zu betrachten, aus denen die betreffenden Verhältnisse anschaulich werden.

Wir betrachten zuerst die Brechung im Scheitel eines ungleichaxigen Ellipsoides. Es sei in *Fig. 88* die Linie *gb* eine Axe des Ellipsoides, in

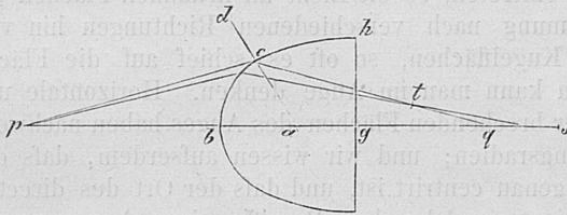


Fig. 88.

deren Verlängerung bei *p* der leuchtende Punkt liegt. Die Ebene der Zeichnung sei ein Hauptschnitt des Ellipsoides, so daß auch noch eine zweite Axe des Ellipsoides *gh* in dieser Ebene liegt. Da nun die Normalen solcher Punkte der ellipsoidischen Fläche, welche in einem Hauptschnitte

liegen, auch in demselben Hauptschnitte liegen, so liegen die Normalen der Curve *bch* in diesem Falle in der Ebene der Zeichnung. Wenn von *p* aus ein Strahl auf den Punkt *c* fällt, so liegt der gebrochene Strahl in der durch den leuchtenden Punkt und das Einfallslot gelegten Ebene, d. h. in der Ebene der Zeichnung, und schneidet also die Axe *bg* in irgend einem ihrer Punkte *g*. Dies würde nicht der Fall sein, wenn die Ebene der Zeichnung nicht eben ein Hauptschnitt des Ellipsoides wäre.

Ist *ad* die Normale im Punkte *c*, so wird die Lage des gebrochenen Strahls nun weiter durch die Bedingung bestimmt, daß

$$\sin \angle ped = n \cdot \sin \angle acq$$

143 sein muß, wenn *n* das Brechungsverhältniß bezeichnet. Diese Bedingung ist also dann ganz dieselbe wie für Rotationsflächen. Die nahe senkrecht bei *b* auffallen-

¹ H. HELMHOLTZ, *Pogg. Ann.* LXXXVI. S. 509. 1852.

den Strahlen werden dann also einen gemeinschaftlichen Vereinigungspunkt in der Axe haben, dessen Entfernung von dem Krümmungsradius r , der Curve bch in b abhängt. Ist p unendlich entfernt, so ist die Vereinigungsweite der Strahlen,

d. h. die Brennweite in dem vorliegenden Hauptschnitte gleich $\frac{n \cdot r}{n-1}$.

Für die Strahlen von p , welche in dem anderen Hauptschnitte verlaufen, der durch bq und die dritte Axe gelegt ist, verhält sich wieder Alles ebenso, nur hat der Krümmungsradius im Scheitel der Fläche einen anderen Werth r'' , und die

Brennweite der Strahlen in diesem zweiten Hauptschnitte ist gleich $\frac{n \cdot r''}{n-1}$.

Der Strahl pq wird also von den Strahlen, die in der Ebene der Zeichnung unmittelbar neben ihm liegen, in einem Punkte, etwa q , geschnitten; von den Strahlen dagegen, die in einer durch ihn senkrecht zur Ebene der Zeichnung gelegten Ebene ihm unmittelbar benachbart sind, nicht in demselben Punkte q , sondern in einem anderen Punkte, etwa in s .

Läfst man unter diesen Umständen die Strahlen von p durch eine kleine kreisförmige Öffnung, deren Mittelpunkt sich in der Axe bei b befindet, auf die brechende Fläche fallen, so ist der Querschnitt des Strahlenbündels unmittelbar bei b ein Kreis, zwischen b und q eine Ellipse, deren senkrecht zur Ebene der Zeichnung gestellte Axe gröfser ist als die in der Ebene liegende. Die Ellipse wird immer kleiner und zugleich gestreckter, je mehr wir uns dem Punkte q nähern. In q ist der Querschnitt des Strahlenbündels eine zur Ebene der Zeichnung senkrechte Linie. Weiterhin wird er wieder eine Ellipse, deren gröfsere Axe senkrecht zur Ebene der Zeichnung steht, die schnell einem Kreise ähnlicher wird, ungefähr in der Mitte zwischen q und s wirklich ein Kreis wird und sich dann in eine Ellipse verwandelt, deren längere Axe in der Ebene der Zeichnung liegt, die sich gegen s hin immer mehr streckt, in s selbst sich in eine gerade Linie zusammenzieht und jenseits s allmählig wieder breiter wird und sich immer mehr der Kreisform nähert, wie dies in *Fig. 86*, (S. 174) dargestellt ist.

Ähnlich verhält es sich mit Strahlenbündeln, welche schief auf eine kugelige Fläche fallen. Nehmen wir an, in *Fig. 88* sei bch eine Kugelfläche und pc ein solcher schief auffallender Strahl. Wir wissen¹, dafs die Strahlen, welche in der Ebene der Zeichnung unmittelbar neben c auf die Fläche fallen, sich mit dem Strahle pc nach der Brechung nicht im Brennpunkte und in der Centrallinie pq , sondern in einem seitwärts von der Axe liegenden Punkte der kaustischen Fläche schneiden. Es sei dieser Punkt t . Denken wir uns dagegen die ganze Figur um die Linie ap gedreht, so tritt der Strahl pc allmählig an die Stelle anderer Strahlen, welche mit ihm gleich weit von dem Punkte b entfernt auf die Fläche fallen, und der gebrochene Strahl cq tritt an die Stelle der dazu gehörigen gebrochenen Strahlen. Diese Strahlen schneiden sich also alle nur im Punkte q .

Während also die in der Ebene der Zeichnung dem Strahle pc unmittelbar benachbarten Strahlen ihn in t schneiden, schneiden ihn diejenigen benachbarten Strahlen, die vor und hinter der Ebene der Zeichnung in gleicher Entfernung von b einfallen, in q , und endlich können wir hinzusetzen, dafs ihn diejenigen Strahlen, welche weder in der Ebene der Zeichnung noch in gleicher Entfernung von b , wie $b c$ ist, auffallen, gar nicht schneiden.

¹ s. oben S. 62. Fig. 40.

Es ist noch zu erörtern, inwiefern die Diffraction des Lichts in der Pupille von Einfluß auf die monochromatischen Abweichungen des Auges sein kann. 144 Zunächst dürfte wohl die Frage aufgeworfen werden, ob die strahlige Form der kleinen Zerstreuungsgestalten nicht von den kleinen Einschnitten des Pupillarrandes veranlaßt sei. In der That sieht man eine ausgedehntere strahlige Figur, wenn man nach einem sehr hellen Lichtpunkte durch eine Öffnung sieht, welche kleiner als die Pupille ist, und deren Ränder nicht ganz feinspaltig sind; doch besteht eine solche Strahlenfigur in der Regel aus sehr feinen, mehr haarförmigen Strahlen mit lebhaften Farben, ähnlich dem schon oben beschriebenen Haarstrahlenkranz des Auges, der sehr helle Lichtpunkte umgiebt, auch wenn man sie nicht durch eine künstliche Öffnung betrachtet. Dreht man die Öffnung dann um ihren Mittelpunkt, so dreht sich der ganze Strahlenkranz mit ihr, woraus sich eben ergibt, daß dieser Strahlenkranz von den Rändern der Öffnung herrührt.

Von dem Vorhandensein einer Diffraction des Lichts, welche durch die feine Faserung der Krystalllinse veranlaßt wäre, konnte ich mich an meinem eigenen Auge nicht überzeugen. Wenn ich durch eine glatt gebohrte Öffnung einer Metallscheibe nach einem kleinen hellen Punkte sehe, so dreht sich immer die ganze Diffractionsfigur, wenn ich die Scheibe drehe. Gehörten einzelne Züge der Diffractionsfigur den Fasern der Hornhaut oder Linse an, so müßten diese stehen bleiben. Dagegen beschreibt BEER¹ aus seinem Auge Diffractionserscheinungen, welche er von einer Faserung der Augenmedien herleitet.

n Auch TYNDALL² beschreibt einen Fall, wo Interferenzringe erschienen, ähnlich denen, welche ein mit Lycopodiumsamen bepulvertes Glas zeigt.

144 Diese Diffractionsphänomene unterscheiden sich aber von denen der kleinen Zerstreuungskreise wesentlich durch den Umstand, daß letztere beim Verdecken der Pupille von einer Seite her auch von einer Seite her verschwinden, während die andere Seite ungestört bleibt. Wenn ein feines Fäserchen oder ein feiner Einschnitt dagegen Diffractionsstrahlen bildet, so erstrecken sich diese niemals bloß nach einer Richtung, sondern stets auch nach der entgegengesetzten, weil jede Unterbrechung einer Lichtwelle stets nach entgegengesetzten, meist nach allen Seiten hin ihren Einfluß ausübt. Die Haarstrahlenfiguren zeigen nun wirklich diesen Charakter; sobald man die Pupille anfängt zu bedecken, werden mehr oder weniger alle Theile der Figur gestört und verändert.

Außer der Diffraction, welche Unregelmäßigkeiten des Randes der Pupille bewirken, kommt aber auch noch in Betracht, daß die ganze Pupille als enge kreisförmige Öffnung Diffraction hervorrufen kann. Jedes Mal, wo Strahlen eines leuchtenden Punktes durch eine oder mehrere brechende Flächen von begrenzter Apertur, die übrigens vollkommen achromatisch und aplanatisch sein mögen, gebrochen werden, entsteht im Vereinigungspunkte der Lichtstrahlen kein punktförmiges Bild, sondern wegen der Diffraction am Rande der Apertur eine kleine helle Figur, die abwechselnd helle und dunkle Stellen zeigt, deren Form und Lage im Allgemeinen von der Größe und Gestalt der Öffnung abhängig sind. Ist die letztere kreisförmig, was bei den optischen Instrumenten und im Auge gewöhnlich der Fall ist, so besteht die Diffractionsfigur aus einer hellen Kreisscheibe, umgeben von mehreren dunklen und hellen Ringen von schnell abnehmender Helligkeit. Ist d der Durchmesser der Apertur des brechenden Systems, r der Abstand des Bildes von der-

¹ E. BEER. *Poggendorff's Ann.* LXXXIV. 518. 1853.

² J. TYNDALL in *Phil. Magaz.* (4) XI. 332.

selben, l die Wellenlänge des Lichts, so ist der Durchmesser δ der mittleren Kreisscheibe nach der durch die Versuche bestätigten Theorie dieser Erscheinungen

$$\delta = 2,440 \cdot \frac{l \cdot r}{d}.$$

Setzen wir für mittleres Licht $l = \frac{1}{2000}$ mm und r für das Auge gleich 20 mm, so wird, wenn δ und d in Millimetern ausgedrückt werden,

$$\delta = 0,0244 \cdot \frac{1}{d}.$$

Bei der kleinsten Pupillenweite, die wir gleich 2 mm setzen wollen, würde δ gleich 0,0122 mm werden. Diese Größe des Zerstreungskreises entspricht einem Gesichtswinkel von 2 Min. 6 Sec., und ist gleich der Größe des Zerstreungskreises, den in einem für unendliche Entfernung adaptirten Auge ein 25 m entfernter Lichtpunkt entwirft. Da der Gesichtswinkel der kleinsten wahrnehmbaren Distanzen etwa 1 Min. beträgt, so muß bei engerer Pupille die Diffraction eben anfangen, die Genauigkeit des Sehens zu beeinträchtigen.

Zu den monochromatischen Abweichungen gehören auch noch die Lichtstreifen, welche nach oben und unten von einem lichten Körper ausgehen, wenn man die Augenlider halb schließt. Sie rühren von der Brechung des Lichts in dem concaven Flüssigkeitsrande her, der sich an den Lidern erhebt. Dieser Rand wirkt wie ein kleines Prisma oder eine Reihe kleiner Prismen von veränderlichem Winkel, und lenkt das ihn treffende Licht stark von seinem Wege ab.

Die Messungen, welche von älteren Physikern über die Ungleichheit der Brennweite horizontal und vertical divergirender Strahlen ausgeführt worden sind, haben nur noch historisches Interesse. Bei einigen fehlen diese Abweichungen ganz und gar, wie z. B. bei BRÜCKE¹, und wo sie vorkommen, zeigen sie sich in entgegengesetztem Sinne.

TH. YOUNG giebt an, daß sein Auge zu einem Focus sammle vertical divergirende Strahlen eines 10 engl. Zoll (304 mm) entfernten leuchtenden Punktes, und horizontal divergirende eines 7 Zoll (213 mm) entfernten. Um die Größe dieses Unterschieds unabhängig von den Sehweiten seines Auges auszudrücken, berechnet er die Brennweite eines Glases, welches im Stande wäre, als Brille gebraucht, die eine Entfernung auf die andere zu reduciren, und findet 23 engl. Zoll (700 mm). Um den Fehler seines Auges zu corrigiren, würde er ein Brillenglas mit einer convexen Cylinderfläche von horizontaler Axe oder ein solches mit einer concaven Cylinderfläche und verticaler Axe von der angegebenen Größe der Brennweite gebraucht haben. A. FICK fand, daß er 4,6 m entfernte Verticallinien und 3 m entfernte Horizontallinien gleichzeitig deutlich gesehen habe. Ich selbst sehe gleichzeitig deutlich 0,65 m entfernte Verticallinien und 0,54 m entfernte Horizontallinien. Der Sinn der Abweichung ist in diesen beiden Fällen der entgegengesetzte wie bei TH. YOUNG, die Größe eine viel geringere. Durch die Focallänge einer cylindrischen Linse ausgedrückt, entspricht die Abweichung in FICK'S Auge einer Brennweite von 8,6 m und in meinem Auge 3,19 m. Dergleichen Messungen sind leicht auszuführen, indem man etwa $\frac{1}{2}$ Zoll über einem horizontalen, hinreichend langen Brettchen eine feine Nähnadel horizontal befestigt, und indem man sie vom Ende des Brettchens her betrachtet, eine verticale Nadel vor ihr oder hinter ihr in solcher Entfernung einstellt, daß beide gleich deutlich erscheinen.

A. FICK fand, daß ein unbefangenes blickendes Auge sich meist für Verticallinien accommodirt. Um annähernd die Entfernung der beiden Brennebenen berechnen zu können, wollen wir annehmen, daß LISTING'S schematisches Auge für Verticallinien accommodirt sei. Machen wir die Abweichung der horizontal und vertical divergirenden

¹ E. BRÜCKE, Fortschritte der Physik im Jahre 1845. S. 211. Berlin 1847.

Strahlen darin ebenso groß wie bei den genannten drei Beobachtern, so würde liegen der Brennpunkt für horizontale Strahlen nach den Angaben von

Th. YOUNG . . .	0,422 mm	vor dem anderen,	
A. FICK	0,035 mm	} hinter dem anderen.	
H. HELMHOLTZ	0,094 mm		

Diese Abweichungen sind, wie man sieht, kleiner als die des rothen und violetten Brennpunktes (0,6 mm). Sie beeinträchtigen die Schärfe des Sehens auch so lange nicht sehr wesentlich, als es darauf ankommt, Linien von einander zu unterscheiden, die irgend einer Hauptrichtung folgen. Nur wo gekreuzte Linien gleichzeitig scharf gesehen werden sollen, treten sie hindernd auf. Die sehr ausgedehnte neuere Literatur über diesen Gegenstand ist theils schon gegeben, theils wird dies am Schluss des Werkes geschehen.

146

Die mehrfachen Bilder eines Punktes oder einer Linie bei ungenauer Accommodation haben schon DE LA HIRE¹ und JURIN² erwähnt, ohne aber die richtige Erklärung zu finden. Später beschrieb und bildete TH. YOUNG³ die Form der Zerstreuungsfiguren ab bei verschiedener Entfernung des leuchtenden Punktes, und spricht die Vermuthung aus, daß die Strahlen von leichten Ungleichförmigkeiten der vorderen Linsenfläche herrühren möchten. Später erwähnt sie HASSENFRATZ⁴, welcher denselben Grund voraussetzt und sie als Schnittlinien von zwei kaustischen Flächen bezeichnet. PURKINJE⁵ beschreibt die Erscheinungen der mehrfachen Bilder, ferner die, welche beim Anschauen feiner paralleler Linien eintreten, und bildet die Sternfigur ab; er glaubt sie am besten von Hornhautfacetten ableiten zu können. Mehrfache Bilder einer hellen Linie hat auch PÉCLET⁶ gesehen und erkannt, daß sie durch eine besondere Structur der brechenden Flächen veranlaßt sein müßten. Ebenso NIEDT⁷, GUÉRARD⁸, FLIEDNER⁹. Letzterer hat die hierher gehörigen Erscheinungen ausführlich in ihrem Zusammenhange beschrieben. TROUSSART¹⁰ glaubt einen netzförmigen dunklen Schirm hinter den brechenden Flächen des Auges annehmen zu müssen, deren mehrfache Öffnungen nach dem Principe des SCHEINER'schen Versuchs die mehrfachen Bilder veranlassen. Die Ansicht über ihre Entstehung von A. FICK¹¹ ist oben schon erwähnt. Erwähnt werden hierher gehörige Erscheinungen noch von AIMÉE¹² und CRANMORE¹³. Eine ganz eigenthümliche Ansicht über den Ursprung der mehrfachen Bilder, die *Polyopia monophthalmica* der Augenärzte, hat STELLWAG VON CARION¹⁴ aufgestellt. Er glaubte beobachtet zu haben, daß die verschiedenen Bilder nach verschiedenen Richtungen polarisirtes Licht erhalten. Indessen ist dies nicht richtig; Herr CARION ist bei seinen Versuchen wahrscheinlich durch eine schlecht geschliffene Turmalinplatte mit schwach gewölbten Flächen oder Streifen im Innern getäuscht worden. Eine schwach cylindrische Fläche einer solchen Platte würde, vor das Auge gehalten, bald in horizontaler, bald in verticaler Richtung die Strahlen zur Vereinigung bringen und dadurch einzelne der Doppelbilder beseitigen können. Um den Einfluß solcher Mängel der Platte aufzuheben, stelle man sie zwischen das Licht und einen Schirm mit enger Öffnung, so daß polarisirtes Licht durch die Öffnung fällt, während der Beobachter diese Öffnung aus hinreichender Entfernung betrachtet, um sie

¹ Ph. DE LA HIRE, *Accidens de la vue*. p. 400.

² J. JURIN, *Smith's Optics. Essay on distinct and indistinct vision*. p. 156.

³ TH. YOUNG, *Philos. Transactions*. 1801. I. p. 43. Pl. VI.

⁴ J. H. HASSENFRATZ, *Ann. de Chimie*. 1809. T. LXXII. p. 5.

⁵ J. E. PURKINJE, *Beiträge zur Kenntniß des Sehens*. Prag 1819. S. 113--119. *Neue Beiträge zur Kenntniß des Sehens*. S. 139--146. 173.

⁶ J. C. E. PÉCLET, *Ann. d. Chimie et d. Phys.* LIV. 379. -- *Poggendorff's Ann.* XXXIV. S. 557.

⁷ NIEDT, *De dioptrici oculi coloribus ejusque Polyopia*. Dissert. Berolini 1842.

⁸ GUÉRARD, *Institut*. 1845. No. 581. p. 64.

⁹ C. FLIEDNER, *Poggendorff's Ann.* LXXXV. S. 321. 460. LXXXVI. 336. *Cosmos*, I. 333.

¹⁰ TROUSSART, *C. R. de l'Acad. d. sciences*. XXXV. 134--136. 398. *Archiv de Genève*. XX. 305. *Institut*. 1852. p. 304.

¹¹ A. FICK, *Henle u. Pfeuffer Zeitschrift*. N. Folge V. S. 277.

¹² AIMÉE, *Ann. d. Chimie et d. Physique*. LVI. 108. *Poggendorff's Ann.* XXXIII. S. 479.

¹³ CRANMORE, *Philos. Magazine*. (3) XXXVI. 485.

¹⁴ STELLWAG VON CARION, *Wiener Sitzungsberichte*. VIII. 82. *Denkschriften d. k. k. Akad.* V. 2. p. 172.

sternförmig zu sehen. Man lasse nun die polarisirende Platte herumdrehen, so daß die Polarisationsrichtung des Lichts wechselt. Dann ist nicht der geringste Einfluss der Polarisationsrichtung auf die Doppelbilder zu erkennen. Übrigens lassen sich die von CARION angeblich gewonnenen Resultate auch nicht mit den bekannten Gesetzen der Doppelbrechung vereinigen. Widerlegt worden ist er durch GUT¹. Die medicinische Literatur über das pathologische Vorkommen auffallender *Diplopia monophthalmica* findet sich in dem Aufsätze von CARION zusammengestellt.

Über Diffractionerscheinungen des Auges sind Beobachtungen gemacht von BOUDRIMONT², WALLMARK³, BEER⁴. Die Lichtstreifen, welche bei halb vorgeschobenen Augenlidern durch den concaven Thränenrand an ihren Rändern entstehen, hat MEYER⁵ (in Leipzig) besprochen.

Die Asymmetrie des Auges in seinen verschiedenen Meridianebenen finde ich zuerst von TH. YOUNG⁶ besprochen, welcher dabei anführt, daß ein Herr CARY ihm als Thatsache angeführt habe, daß viele Personen ihre Brillengläser schief gegen das Auge halten müßten, um gut durch sie zu sehen. Weitere darauf bezügliche Beobachtungen finden sich von AIRY⁷, FISCHER⁸, CHALLIS⁹, HEINEKEN¹⁰, HAMILTON¹¹, SCHUYDER¹², welcher Letztere 147
Zusammenstellung der älteren Beobachtungen findet sich in FECHNER's Centralblatt (Jahrgang 1853. p. 73—85. 96—99. 374—370. 558—564). Seitdem DONDERS¹⁴ auf die 11
durch Astigmatismus bedingten Sehstörungen hinwies, bildet die Bestimmung des Astigmatismus einen regelmässigen Theil der augenärztlichen Untersuchungen.

Die Frage nach der sphärischen Abweichung des Auges in dem Sinne, wie dieser 147
Ausdruck für künstliche Instrumente gebraucht wird, verliert neben den beschriebenen viel größeren Abweichungen, die im Auge vorkommen, ihre Wichtigkeit. Ausser der im vorigen Paragraphen schon erwähnten Beobachtung von TH. YOUNG mit seinem Optometer, wonach dessen Faden, durch vier Öffnungen gesehen, vierfach erschien und sich die vier scheinbar vorhandenen Fäden bei der Accommodation für die Nähe nicht in einem Punkte kreuzten, hat auch VOLKMANN¹⁵ sich bemüht, durch Versuche über die Frage zu entscheiden, ob das Auge sphärische Aberration besitze. Er und einige andere Personen blickten durch einen Schirm mit vier Öffnungen, die in einem Bogen standen, nach einer Nadel, die in verschiedene Entfernungen vom Auge gebracht wurde. Wenn das Auge die mittleren Strahlen eher vereinigt als die Randstrahlen, werden sich bei dem Versuche, indem man die Nadel vom Auge entfernt und dem Punkte des deutlichen Sehens nähert, die Bilder der Nadel, welche den mittleren Öffnungen angehören, eher vereinigen als die der seitlichen Öffnungen. Werden die Randstrahlen eher vereinigt als die Centralstrahlen, so wird es umgekehrt sein. VOLKMANN fand bei verschiedenen Individuen in dieser Beziehung ein entgegengesetztes Verhalten. Bei regelmässig gebildeten brechenden Rotationsflächen würden die angegebenen Versuche von YOUNG und VOLKMANN in der That über die Art und Gröfse der sphärischen Abweichung des Auges Aufschluss geben.

¹ GUT. *Über Diplopia monophthalmica*. Dissert. Zürich 1854.

² BAUDRIMONT, C. R. d. l'Acad. d. sc. XXXIII. 496; Institut. No. 931; Phil. Magaz. (4) II. 575.

³ WALLMARK, Poggendorff's Ann. LXXXII. 129.

⁴ E. BEER, Poggendorff's Ann. LXXXIV. 518. 1853.

⁵ M. H. MEYER, Poggendorff's Ann. LXXXIX. 429. 1853.

⁶ MEYER, Phil. Transact. 1801. I. p. 39.

⁷ G. B. AIRY, Edinb. Journal of Sc. XIV. p. 322.

⁸ E. G. FISCHER, Berl. Denkschriften 1818 u. 1819. S. 46.

⁹ J. CHALLIS, Transact. of the Cambridge Phil. Soc. II.; Phil. Magaz. (3) XXX. 366.

¹⁰ HEINEKEN, Phil. Magaz. XXII. 318.

¹¹ HAMILTON, Froriep's Notizen. VII. 219.

¹² SCHUYDER, Verhandl. d. schweizer. naturf. Ges. 1848. p. 15; Froriep's Notizen. X. 346; Archiv de Genève. X. 302.

¹³ A. FICK, De errore quodam optico asymmetria bulbi effecto. Marburgi 1851; Hente u. Pfeuffer Zeit-schrift. N. Folge. Bd. II. S. 83.

¹⁴ F. C. DONDERS, Anomalies of Accommodation and Refraction. London 1864. Chapter VIII.

¹⁵ VOLKMANN, R. Wagner's Handwörterbuch für Physiol. Artikel: Sehen.

Indessen werden in den meisten Meridianebenen der meisten Augen die Punkte, wo die gebrochenen Strahlen den Centralstrahl treffen, gar keine continuirliche Reihe bilden, so dafs der Begriff der sphärischen Abweichung hier gar nicht paßt.

§ 15. Die entoptischen Erscheinungen.

Das in das Auge einfallende Licht macht unter gewissen Bedingungen eine Reihe von Gegenständen sichtbar, welche sich im Auge selbst befinden. Solche Wahrnehmungen nennt man entoptische. Unter gewöhnlichen Umständen werfen kleine dunkle Körper, die im Glaskörper oder der Linse und wässerigen Feuchtigkeit schweben, keinen sichtbaren Schatten, und werden deshalb nicht bemerkt. Der Grund davon ist, dafs durch jeden Theil der Pupille meist gleichmäfsig Licht eindringt, und somit für die Beleuchtung der hinteren Augenkammer die ganze Pupille gleichsam die leuchtende Fläche bildet. Es ist aber bekannt, dafs, wenn Licht von einer sehr breiten Fläche ausgeht, nur breite Gegenstände, oder solche Gegenstände, welche der den Schatten auffangenden Fläche sehr nahe sind, einen sichtbaren Schatten werfen.

Nun gibt es im Auge allerdings Gegenstände, nämlich die Gefäße der Netzhaut, welche sehr nahe vor der lichtempfindenden Fläche des Auges sich befinden, und daher immer einen Schatten auf die dahinter liegenden Theile der Netzhaut werfen. Aber eben weil diese Theile der Netzhaut hinter den Gefäßen immer beschattet sind, und der beschattete Zustand für sie der normale ist, nehmen sie ihn nur unter besonderen Umständen wahr, welche wir weiter unten näher besprechen wollen.

Zunächst wende ich mich zu den in den durchsichtigen Mitteln des Auges enthaltenen kleinen schattengebenden Körpern. Um sie wahrzunehmen, muß man Licht von einer sehr kleinen leuchtenden Stelle, welche sich sehr nahe vor dem Auge befindet, in das Auge fallen lassen. Zu dem Zwecke kann man entweder das im Focus einer kleinen Sammellinse entworfene Bild einer fernen Lichtflamme nahe vor das Auge bringen, oder ein kleines

gut polirtes metallisches Knöpfchen, welches von der Sonne oder einer Lampe beschienen wird, oder einen Schirm von dunklem Papier, welcher Licht durch eine sehr kleine Öffnung fallen läßt. Am zweckmäfsigsten ist es, eine Sammellinse von großer Apertur und kleiner Brennweite *a* *Fig. 89* aufzustellen; vor ihr in einiger Entfernung eine Lichtflamme *b*, von der die Linse in ihrem Brennpunkte ein verkleinertes Bild entwirft. Dann stellt

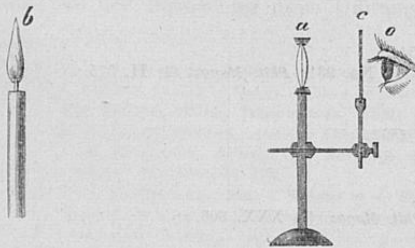


Fig. 89.

man hier einen undurchsichtigen dunklen Schirm *c* mit kleiner Öffnung so auf, dafs das Bild der Flamme auf diese Öffnung fällt. Durch die Öffnung

dringt dann ein breiter Kegel divergirender Strahlen. Ein Auge o , welches der Öffnung sehr genähert wird, erblickt durch sie hindurch die breite, gleichmäßig erleuchtete Fläche der Linse, auf welcher sich nun mit großer Deutlichkeit die entoptisch wahrzunehmenden Gegenstände darstellen. Wenn wie in *Fig. 90* der leuchtende Punkt a zwischen dem Auge und seinem vorderen Brennpunkte f liegt, entwerfen die Augenmedien ein entfernteres, vor dem Auge liegendes Bild α von a , und die Strahlen durchdringen den Glaskörper in Richtungen, welche von α aus divergieren. Unter diesen Umständen wird von einem im Glaskörper befindlichen dunklen Körper b ein Schatten β auf der Netzhaut entworfen, welcher größer ist als b .

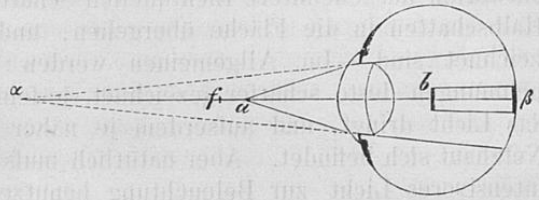


Fig. 90.

Wenn wie in *Fig. 91* der leuchtende Punkt a im vorderen Brennpunkte des Auges liegt, werden die von a ausgehenden Strahlen im Glaskörper parallel sein, und von einem im Glaskörper befindlichen dunklen Körperchen b wird ein Schatten β von gleicher Größe entworfen. Liegt endlich der leuchtende Punkt vom Auge weiter entfernt als der vordere Brennpunkt des Auges f , wie in *Fig.*

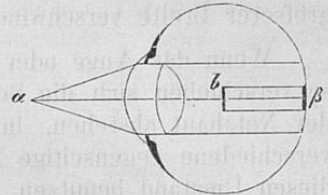


Fig. 91.

92, so fällt das Bild von a hinter das Auge nach α , und die Strahlen convergieren im Glaskörper nach α hin. Der Schatten β von b ist dann kleiner als b .

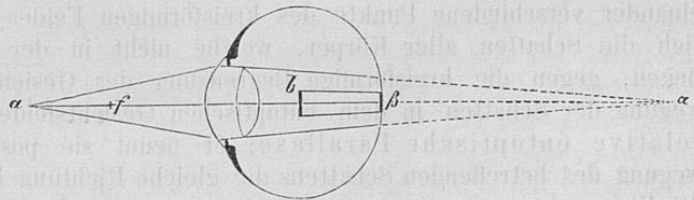


Fig. 92.

Dem entsprechend bemerkt man, daß die entoptisch sichtbar gewordenen Gegenstände sich scheinbar vergrößern, wenn man das Auge dem leuchtenden Punkte nähert; sich verkleinern, wenn man es von ihm entfernt.

Die bei diesen Versuchen beleuchtete Stelle der Netzhaut ist der Zerstreuungskreis des leuchtenden Punktes. Auf diesem werden die Schatten der entoptisch wahrgenommenen Gegenstände entworfen. Diese Schatten sind zwar scharf genug, daß man die Gestalt der Objekte ziemlich gut erkennen kann, wenn die Lichtquelle klein genug ist, aber sie bilden doch niemals ganz vollkommen scharfe Bilder, weil das Licht in Wirklichkeit doch nicht von einem einzigen Punkte, sondern stets von einer, wenn auch kleinen, leuchtenden Fläche kommt. Das von den Augenmedien entworfenene Bild

dieser Fläche ist für die auf der Netzhaut zu entwerfenden Schatten die Lichtquelle, welche natürlich stets einige Ausdehnung haben wird. Während punktförmige Lichtquellen scharf gezeichnete Schatten entwerfen würden, entwerfen ausgedehntere Lichtquellen Schatten, deren Umrisse allmähig durch Halbschatten in die Fläche übergehen, und die deshalb minder scharf gezeichnet sind. Im Allgemeinen werden deshalb die entoptischen Wahrnehmungen desto schärfer gezeichnet, je feiner die Öffnung ist, durch welche das Licht dringt, und außerdem je näher der schattengebende Körper der Netzhaut sich befindet. Aber natürlich muß man bei engeren Öffnungen auch intensiveres Licht zur Beleuchtung benutzen. Außerdem kommt bei sehr engen Öffnungen noch eine andere Erscheinung zum Vorschein, welche die Deutlichkeit der Zeichnung beeinträchtigt. Es bilden sich nämlich durch Diffraction am Rande des schattengebenden Körpers Diffractionsfransen, helle und dunkle Linien, welche dem Umriss des Schattens folgen. Dergleichen Diffractionsfransen entstehen überall, wo punktförmige, hinreichend intensive Lichtquellen Schatten werfen. Bei den gewöhnlichen Lichtquellen von größerer Breite verschwinden diese Franssen im Halbschatten.

Wenn das Auge oder der leuchtende Punkt seine Stellung verändert, so verschieben sich die Schatten der Körper, welche verschieden weit von der Netzhaut abstehen, in verschiedener Weise, und nehmen dadurch eine verschiedene gegenseitige Lage an. Man kann, wie LISTING gezeigt hat, diesen Umstand benutzen, um den Ort im Auge ungefähr zu bestimmen, wo sich die schattengebenden Körperchen befinden. Das entoptische Gesichtsfeld ist begrenzt durch den kreisförmigen Schatten der Iris. Wenn wir nach einander verschiedene Punkte des kreisförmigen Feldes fixiren, verschieben sich die Schatten aller Körper, welche nicht in der Ebene der Pupille liegen, gegen die kreisförmige Begrenzung des Gesichtsfeldes. Diese Bewegung der Schatten in dem entoptischen Gesichtsfelde nennt LISTING die relative entoptische Parallaxe; er nennt sie positiv, wenn die Bewegung des betreffenden Schattens die gleiche Richtung hat mit der Richtung des Visirpunktes, negativ, wenn sie entgegengesetzte Richtung hat. Die relative entoptische Parallaxe ist Null für Objecte, welche in der Ebene der Pupille liegen, positiv für Objecte hinter der Pupille, negativ für Objecte vor der Pupille. Für Objecte, welche der Netzhaut sehr nahe liegen, ist die Verschiebung der Schatten fast ebenso groß wie die des Visirpunktes, so daß diese den Visirpunkt bei seinen Bewegungen überall hin begleiten, wenn sie nicht durch wirkliche Bewegungen in der Flüssigkeit des Glaskörpers aus der Gesichtslinie entfernt werden.

Der Schatten auf der Netzhaut ist ebenso gerichtet wie der schattenwerfende Körper; da aber, was auf der Netzhaut oben ist, im Gesichtsfelde unten erscheint, so erscheinen die entoptisch gesehenen Gegenstände im Gesichtsfelde stets verkehrt.

Was man entoptisch wahrnehmen kann, ist Folgendes:

1) Begrenzt ist das helle Feld durch den Schatten der Iris; es ist deshalb nahe kreisrund, entsprechend der Form der Pupille. Hat der Pupillarrand der Iris Einschnitte, Falten oder Vorsprünge, wie dies in vielen Augen der Fall ist, so sind dergleichen auch in dem entoptischen Bilde zu erkennen. Auch die Erweiterung und Verengung der Pupille kann man entoptisch beobachten, am leichtesten, wenn man das andere Auge abwechselnd mit der Hand verdeckt und wieder frei läßt. Sobald Licht in dieses Auge fällt, verengern sich die Pupillen beider Augen, und man erkennt diese Verengung leicht im entoptischen Bilde.

2) Von den Flüssigkeiten herrührend, welche die Hornhaut überziehen (Thänenfeuchtigkeit, Secret der Augenliderdrüsen), nimmt man oft im entoptischen Gesichtsfelde Streifen wahr, wolkig-helle oder lichtere Stellen, tropfenähnliche Kreise mit heller Mitte, welche durch Blinzen mit den Augenlidern schnell verwischt und verändert werden. Dergleichen sind dargestellt in *Taf. I. Fig. 2*. Sie sind meist in schnellem Zerfließen begriffen und haben eine selbständige Bewegung von oben nach unten. Die Streifen sind am stärksten ausgeprägt dicht am Rande der Augenlider, wenn man die Lider vor die Pupille treten läßt, und sind der Ausdruck der capillaren concaven Flüssigkeitsschicht, welche sich von der Hornhaut auf den Rand der Augenlider herüberzieht. Die Tropfen entstehen wohl durch capilläre Anhäufungen der feuchten Schicht um Schleimklümpchen, Staubtheile u. dgl. Die helle Stelle in der Mitte der Tropfen bildet oft ein unvollkommenes optisches Bild von der Lichtquelle, ist z. B. dreieckig, wenn das Licht durch eine dreieckige Öffnung in das Auge fällt. Dies Bild der Lichtquelle steht scheinbar aufrecht im entoptischen Gesichtsfelde, während es auf der Netzhaut verkehrt sein muss. Die Ansammlungen von Flüssigkeit auf der Hornhaut bilden hierbei kleine Convexlinsen, welche hinter sich ein umgekehrtes Bild der vor ihnen liegenden Gegenständen entwerfen. Der Bewegung dieser Gebilde im Gesichtsfelde von oben nach unten entspricht eine wirkliche Bewegung nach oben, welche wohl dadurch bedingt wird, daß das obere Augenlid, während es gehoben wird, die zähen Schleimtheile nachzieht. 151

3) Die kraus gewordene Vorderfläche der Hornhaut, nachdem man eine Zeit lang das geschlossene Auge mit den Fingern gedrückt oder gerieben hat. Man sieht ziemlich gleichförmig vertheilt gröfsere, unbestimmt begrenzte, wellige oder netzartig geordnete Linien und getigerte Flecken, die sich eine Viertelstunde bis zu einigen Stunden halten. Es sind dergleichen dargestellt in *Taf. I. Fig. 3*. Zuweilen bleiben auch in dem Netze dieser Linien einzelne unveränderte glatte Stellen stehen, welche darauf schliessen lassen, daß hier die Hornhaut eine andere Art der Consistenz habe.

Außerdem finden sich, von der Hornhaut herrührend, zuweilen constante dunkle Flecken und Linien vor, welche sich nicht ändern und wohl meist Reste von Entzündungen und Verletzungen sind.

4) Von der Linse, namentlich der vorderen Kapselwand, und dem vorderen Theile des Krystallkörpers rühren mannigfache Erscheinungen her. LISTING beschreibt folgende vier Formen:

a) Perlflecken, runde oder rundliche Scheibchen, innen hell, mit scharfem, dunklem Rande. Sie sehen bald Luftbläschen, bald Öltropfen, bald Krystallchen ähnlich, welche man durch das Mikroskop sieht (s. *Taf. I. Fig. 4*); LISTING hält sie für Schleimmassen in der MORGAGNI'schen Feuchtigkeit.

b) Dunkle Flecken, unterscheiden sich von den vorigen durch den Mangel eines hellen Kerns und auch durch gröfsere Mannigfaltigkeit der Gestalt. Sie scheinen partielle Verdunkelungen der Kapsel oder Linse zu sein (s. *Taf. I. Fig. 5*).

c) Helle Streifen, meist einen unregelmäßigen Stern mit wenig Ausläufern in der Mitte des Gesichtsfeldes darstellend (*Taf. I. Fig. 6*). LISTING hält sie für das Bild eines nabelförmigen Gebildes mit naht- oder wulstähnlichen Zweigen in der vorderen Kapselmembran, herrührend von der im Fötalzustande erfolgenden Trennung dieses Kapseltheils von der Innenseite der Hornhaut.

d) Dunkle radiale Linien (*Taf. I. Fig. 7*), welche wohl Andeutungen des strahligen Baues der Linse sind.

Einzelne von den genannten Formen scheinen fast in jedem Auge sichtbar zu sein, wenige Augen sind ganz frei davon.

5) Bewegliche Gebilde im Glaskörper, die sogenannten fliegenden Mücken (*Mouches volantes*), welche theils als Perlenschnüre, theils als vereinzelte oder zusammengruppirte Kreise mit hellem Centrum, theils als unregelmäßige Gruppen sehr feiner Kügelchen, theils als blasse Streifen, ähnlich den Falten einer sehr durchsichtigen Membran, erscheinen. Da viele von ihnen sehr nahe vor der Netzhaut sich befinden, sieht man sie oft ohne weitere Hülfsmittel, indem man nach einer breiten, gleichmäßig erleuchteten Fläche, z. B. dem hellen Himmel, blickt. Dafs sie sich nicht bloß scheinbar, sondern wirklich bewegen, bemerkt man leicht, wenn man bei aufrechter Haltung des Kopfes, z. B. durch eine Fensterscheibe, nach dem Himmel blickt, und einen mit einem Merkzeichen versehenen Punkt des Glases fixirt. Dann sieht man die entoptischen Erscheinungen meistens langsam im Gesichtsfelde herabsinken. Senkt man den Blick und hebt ihn wieder, so folgen die Mücken dieser Bewegung des Visirpunktes, schiefsen aber gewöhnlich etwas über das Ziel hinaus und sinken dann wieder. Nach einer Bewegung des Auges dagegen, welche von oben nach unten gerichtet ist, tritt ein solches Schwanken über das Ziel hinaus nicht ein, auch nicht bei seitlichen Bewegungen. Beobachtet man dagegen bei senkrecht nach unten oder oben gerichteter Gesichtslinie, so liegen die Mücken ziemlich ruhig. Sehr leicht läßt man sich aber bei diesen Beobachtungen verleiten, den Blick nach einer solchen dem Gesichtspunkt naheliegenden Mücke richten zu wollen, um sie durch direkte Fixation deutlicher zu sehen. Dann fliegt die entoptische Erscheinung vor dem Visirpunkte einher, ohne natürlich je

von ihm erreicht werden zu können. Gerade auf diese Eigenthümlichkeit der Erscheinung bezieht sich wohl der Name der *Mouches volantes*. Man verwechsle diese scheinbare Bewegung nicht mit einer wirklichen, und achte bei den Beobachtungen der letzteren darauf, einen äußeren Gesichtspunkt ganz fest zu fixiren.

Um solche bewegliche Objecte mit Ruhe betrachten zu können, wählt man am besten eine Lage des Kopfes, wo das Auge vertical nach unten oder nach oben sieht, weil dann die Bewegungen der schwimmenden Körperchen aufhören. Übrigens kann man Mücken, welche seitlich im Gesichtsfelde liegen, zwingen, nach der Stelle des deutlichsten Sehens heranzuschwimmen, wenn man das Auge erst recht schnell in der Richtung bewegt, nach welcher sie vom Visirpunkt aus liegen und dann langsam zurückbewegt.

DONDERS und DONCAN¹ unterscheiden folgende Formen dieser Objecte:

a) Größere isolirte Kreise, bald mit dunkleren, bald mit blasseren Umrissen, in der Mitte heller, meist noch mit einem schmalen Lichtkreis umgeben. Sie haben zwischen $\frac{1}{28}$ und $\frac{1}{120}$ mm Durchmesser und sind $\frac{1}{3}$ bis 3 oder 4 mm von der Netzhaut entfernt, kommen aber auch in der Linse vor. Ist das Auge lange ruhig gewesen, so zeigen sich nur wenige; sie kommen namentlich, und zwar scheinbar von unten her, zum Vorschein durch eine schnelle Bewegung des Auges von unten nach oben, der plötzlicher Stillstand folgt, und senken sich dann wieder langsam nach unten. Ihre Bewegung kann für die dunkelsten in einer Ausdehnung von $1\frac{1}{2}$ mm direct beobachtet werden und ist wahrscheinlich viel ausgedehnter. Ihre seitlichen Bewegungen bei seitlichen Bewegungen des Auges findet DONCAN beschränkt. In meinen eigenen Augen kann ich einen solchen Unterschied nicht wahrnehmen. Wenn ich den Kopf auf die Seite lege, so finde ich, daß die Mücken jetzt ebenso schnell und weit scheinbar nach dem Erdboden hin sinken, in Wirklichkeit nach dem aufwärts gewendeten Augenwinkel emporsteigen, wie bei aufrechter Haltung des Kopfes. Bei der letzteren Haltung erscheinen die seitlichen Bewegungen der Mücken allerdings beschränkter als die absteigenden, weil sie seitlich eben nur die Bewegungen des Visirpunktes mitmachen. Eine Bewegung derselben parallel der Gesichtslinie gelang nicht zu constatiren. Viele, obgleich scheinbar von einander getrennt, scheinen sich immer in gleichem Abstände zu begleiten, oder bleiben in derselben Beziehung zu andern Formen, so daß man berechtigt ist, auf einen unsichtbaren Zusammenhang zu schließsen. Ihnen entsprechend fand DONCAN bei mikroskopischer Untersuchung des freigelegten und unverletzten Glaskörpers von seiner Oberfläche aus darin blasse Zellen, welche in der Verwandlung in Schleimstoff begriffen zu sein schienen, wie in *Fig. 93*. abgebildet sind.

¹ A. DONCAN *Dissert. de corporis vitrei struct. Trajecti ad Rhenum 1854.* — *Onderzoekingen gedaan in het physiologisch Laborat. der Utrechtsche Hoogeschool. Jaar VI. 171.*

b) Perlschnüre kommen in den meisten Augen vor; DONCAN konnte jedoch keine sehen. Ihre Breite beträgt $\frac{1}{33}$ bis $\frac{1}{190}$ mm, ihre Länge 1 bis 4 mm. Die schmalsten liegen gewöhnlich dichter bei, die breiteren und dunkleren entfernter von der Netzhaut, in $\frac{1}{4}$ bis 3 mm Abstand. Ihre Bewegungsart ist meist dieselbe wie der vorher beschriebenen Kreise, doch sind sie zuweilen auch befestigt. Einzelne sind isolirt, andere hängen mit anderen Gebilden zusammen. Sie entsprechen Fasern, die mit Körnern besetzt sind (Fig. 94), welche durch das Mikroskop im Glaskörper gefunden werden.



Fig. 93.

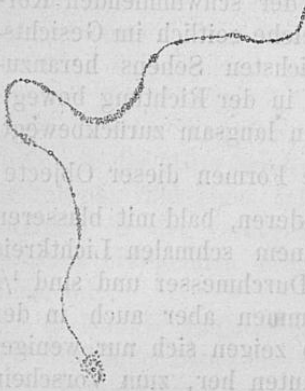


Fig. 94.



Fig. 95.

c) Die zusammenhängenden Gruppen von größeren und kleineren, theils blassen, theils dunkeln Kreisen, welche den mikroskopisch gefundenen Körnerhaufen (Fig. 95) entsprechen, sind meist undurchscheinender als die übrigen Formen, weil mehrere Körner in der Richtung der Gesichtsxaxe hinter einander liegen. Diese sind es, die am häufigsten beim gewöhnlichen Sehen als *Mouches volantes* wahrgenommen werden. Nicht selten scheinen einige von ihnen in der Nähe der Gesichtslinie einen Gleichgewichtszustand einzunehmen; aber sie kommen doch auch bei Bewegungen des Auges auf gleiche Weise und in gleicher Richtung, mit denselben Bewegungen wie die Perlschnüre, in größerer Menge zum Vorschein, um das Gesichtsfeld in der Folge wieder zu verlassen.

d) Die Falten zeigen sich in Gestalt hellerer Bänder, von zwei dunkleren, nicht scharf gezeichneten Linien begrenzt. DONCAN unterscheidet davon noch wieder zwei Formen. Einige zeigen sich nämlich entweder ähnlich einer stark gefalteten Faser, oder wie verschiedene kleine Bänder, einander sehr nahe, auf unsichtbare Weise mit einander verbunden, oder als ein unregelmäßig aufgerolltes, in den verschiedensten Richtungen gefaltetes Häutchen, das seine Form constant behält, wie das nach einer mikroskopischen Beobachtung in Fig. 96 dargestellte. Diese bewegen sich wie die Perlschnüre und liegen nur $2\frac{1}{2}$ bis 4 mm von der Netzhaut entfernt. —



Fig. 96.

Davon unterscheiden sich sehr ausgedehnte Häute, die theils dicht hinter der Linse liegen, theils nur 2

155 bis 4 mm von der Netzhaut entfernt, während zwischen 4 und 10 mm

Entfernung von der Netzhaut keine getroffen werden. In den ersteren zeigen sich Falten von nicht weniger als $\frac{1}{23}$ mm Breite, in den letzteren haben sie selten mehr als $\frac{1}{60}$ mm. Sie kommen zum Vorschein, wenn die Gesichtslinie seitwärts bewegt wird, aber namentlich auch durch eine kräftige, plötzlich abgebrochene Bewegung von oben nach unten. Scheinbar steigen hierbei die dicht hinter der Linse gelegenen Falten nach oben, während umgekehrt die in der Nähe der Netzhaut gelegenen nach unten sinken, so daß sie sich in der Gesichtslinie an einander vorbei schieben. Meist sieht man nun die gefalteten Häute mehr und mehr undeutlich werden, ohne daß sie doch aus dem Gesichtsfelde sich entfernten, und doch kommen sie durch Wiederholung der Bewegung aufs neue deutlicher zum Vorschein. DONCAN schließt daraus, daß diese Häute nur scheinbar eine so ausgebreitete Bewegung haben, und daß nicht die Häute sich fortbewegen, sondern nur Faltungen sich fortpflanzen, welche sich bei der plötzlich unterbrochenen Bewegung des Auges an der Peripherie formen und sich bis an das andere Ende der Häute ausstrecken, wobei sie ihre Schärfe verlieren und minder sichtbar werden. Die Ursache der verschiedenen Richtung, worin die Bewegung dieser Häute und die Fortpflanzung der Falten stattfindet, ist darin zu suchen, daß die einen vor, die anderen hinter dem Drehpunkte des Auges liegen. Wenn man die Pupille durch Atropin erweitert, oder den leuchtenden Punkt sehr nahe an das Auge bringt, so daß man ziemlich weit zur Seite der Gesichtslinie sehen kann, so bemerkt man, daß namentlich bei kräftigen, plötzlich unterbrochenen seitlichen Bewegungen des Auges noch mehr Häute dicht hinter der Linse zum Vorschein kommen, die selten bis an die Gesichtslinie reichen, und mit einem unregelmäßigen, zuweilen zerfetzten Rande hier endigen.

Die Bewegungsart der frei beweglichen Objecte des Glaskörpers läßt wohl kaum einen Zweifel, daß sie kleine Körper sind, welche in einem vollkommen flüssigen Medium schwimmen und specifisch leichter sind als die Flüssigkeit. Da man sie oft durch das ganze entoptische Gesichtsfeld schwimmen sieht, und sie in meinem Auge wenigstens das Gesichtsfeld ebenso gut von oben nach unten, wie von rechts nach links durchschwimmen, dieses aber bei divergirend einfallendem Lichte einen größeren Theil der Netzhaut umfaßt, als die Pupille beträgt, so muß das Bassin, in welchem sie sich bewegen, längs der Netzhaut gemessen, jedenfalls größer sein als die Pupille. Dagegen scheinen die schwimmenden Körper sich nicht von der Netzhaut entfernen zu können, denn auch bei aufwärts gerichteter Gesichtslinie, wo die Objecte wegen ihrer specifischen Leichtigkeit streben müssen nach der Linsenseite des Glaskörpers hin zu schwimmen, sieht man dieselben Objecte sich längs der Netzhaut hin bewegen, aber nicht von ihr fort. Das Hinderniß mögen wohl die Membranen sein, deren Falten man im entoptischen Gesichtsfelde sieht und welche der Netzhaut parallel zu sein scheinen. Einige solche Körperchen scheinen auch an der Glashaut befestigt zu sein, wie denn DONDERS mittheilt, daß er in der Gesichtslinie

156 seines linken Auges eines vorfinde, welches dort seinen Gleichgewichtsstand habe, und von dort wohl sich senken (scheinbar steigen), aber nicht wirklich steigen könne, so dafs es von unten her durch eine fadenähnliche Verbindung mit der Glashaut festgehalten zu werden scheint.

Übrigens lernt man nach einer Reihe entoptischer Beobachtungen die Gebilde des eigenen Auges einzeln kennen, und bemerkt man, dafs immer dieselbe Reihe von Formen wiederkehrt, welche sich nach DONDERS' Beobachtungen viele Jahre unverändert erhalten. Aus der mikroskopischen Untersuchung des Glaskörpers scheint hervorzugehen, dafs diese Gebilde Reste des embryonalen Baues des Glaskörpers sind. Bei Embryonen besteht er aus Zellen, welche nachher meistens in Schleim zerfliessen, während ein Theil von ihren Membranen und Kernen, oder den Fasern, zu denen sie ausgewachsen sind, bestehen bleibt.

Wir kommen jetzt zur Wahrnehmung der Netzhautgefäße, für welche aber etwas andere Verfahrungsweisen nothwendig sind, als für die Wahrnehmung der bisher beschriebenen entoptischen Objecte. Das Gemeinsame dieser Methoden besteht darin, dafs die Lage oder Breite des Schattens, den die Netzhautgefäße auf die hintere Fläche der Netzhaut werfen, eine ungewöhnliche werden, und dafs außerdem eine stete Bewegung dieses Schattens unterhalten werden mufs. Man kann die Netzhautgefäße nach folgenden drei Hauptmethoden wahrnehmen:

1) Man concentrirte starkes Licht, am besten Sonnenlicht, durch eine Sammellinse von kurzer Brennweite auf einen Punkt der äufseren Fläche der Sclerotica möglichst entfernt von der Hornhaut, so dafs ein kleines, aber sehr lichtstarkes Bildchen der Lichtquelle auf der Sclerotica entworfen wird. Wenn dabei das Auge auf ein dunkles Gesichtsfeld blickt, wird dieses ihm jetzt rothgelb erleuchtet scheinen und darin ein Netz baumförmig verästelter dunkler Gefäße erscheinen, entsprechend den in *Fig. 97* nach einem Injectionspräparate abgebildeten Netzhautgefäßen. Wenn der Brennpunkt auf der Sclerotica hin und her bewegt wird, bewegt sich auch der Gefäfsbaum hin und her, und zwar bewegen sich beide gleichzeitig nach oben, oder beide gleichzeitig nach unten, oder beide nach rechts oder links. Bei

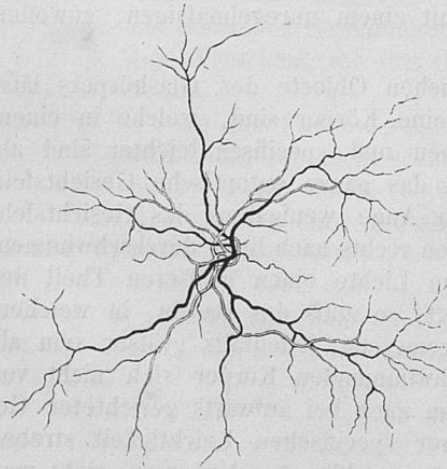


Fig. 97.

solchen Bewegungen ist der Gefäfsbaum deutlicher zu sehen, als wenn man längere Zeit den Brennpunkt der Linse auf einer Stelle beharren läßt; ja im letzteren Falle verschwindet er zuletzt ganz. Doch ist bei der jetzt be-

schriebenen Methode der Beobachtung anhaltende Bewegung weniger nöthig als bei den anderen Methoden. Je kleiner übrigens der helle Fleck auf der Sclerotica ist, desto stärker sind auch die kleineren Zweige der Gefäßverästelung ausgeprägt, so daß man bei richtiger Ausführung des Versuchs das feinste Capillargefäßnetz zur Anschauung bringen kann. In der Mitte des Gesichtsfeldes, dem Fixationspunkte entsprechend, findet sich eine gefäßlose Stelle, gegen welche verschiedene größere Aeste hinlaufen, deren Capillargefäße einen Ring mit langgezogenen Maschen um die genannte Stelle bilden. Die Stelle selbst hat in H. MÜLLER'S, sowie in meinen beiden Augen ein eigenthümliches Aussehen, wodurch sie sich von dem übrigen Grunde des Auges unterscheidet. Der letztere ist gleichmäßig erleuchtet, mit Ausnahme der dunklen Gefäßfigur, die Stelle des directen Sehens hat einen stärkeren Glanz und sieht dabei wie chagriniertes Leder aus. Zu bemerken ist übrigens noch, daß, wenn man während der Beobachtung dieser Stelle einen äußeren Gegenstand fest fixirt, und nun den Brennpunkt der Linse auf der Sclerotica nach oben bewegt, der Gefäßbaum, wie vorher erwähnt ist, sich ebenfalls nach oben bewegt, der chagrinierte Glanz sich dagegen ein wenig in entgegengesetzter Richtung nach unten gegen den Fixationspunkt des Auges verschiebt. MEISSNER hat diese Stelle ebenfalls bei dieser Beobachtungsmethode heller gesehen, schreibt ihr aber einen dunklen halbmondförmigen Schatten am Rande zu, ähnlich wie er bei der zweiten Beobachtungsmethode sichtbar wird. Einen solchen sehe ich nicht, wenn das Licht durch die Sclerotica einfällt.

Bei diesem Versuche dringt das Licht durch die Sehnen- und Aderhaut in das Auge. Die erstere ist durchscheinend, die letztere im hinteren Theile des Auges nicht so stark pigmentirt, daß sie alles Licht abhalten könnte. Vorn auf den Ciliarfortsätzen ist die Pigmentschicht stärker, daher auch bei unserem Versuche die Erleuchtung der Netzhaut ziemlich schwach ausfällt, wenn man den Brennpunkt auf den vorderen Theil der Sclerotica nahe der Hornhaut fallen läßt. Die erleuchtete Stelle der Augenhäute bildet nun die Lichtquelle für das Innere des Auges; von ihr gehen nach allen Seiten hin gleichmäßig Strahlen aus, da das Licht in der nur durchscheinenden Sehnenhaut nicht regelmäßig gebrochen, sondern nach allen möglichen Richtungen zerstreut wird.

Während gewöhnlich das Licht nur von der Pupille her auf die Netzhaut fällt, kommt es jetzt von einem weit seitlich gelegenen Punkte und wirft deshalb die Schatten der in den vorderen Schichten der Netzhaut gelegenen Gefäße auf ganz andere Theile der hinteren Netzhautfläche als sonst.

Daß der Gefäßbaum sich scheinbar in gleichem Sinne wie der Brennpunkt der Linse bewegen muß, ist aus *Fig. 98* deutlich. Es sei v der Durchschnitt eines Netzhautgefäßes, k der Knotenpunkt des Auges. Wenn der Brennpunkt des einfallenden Lichts bei a auf der Sclerotica liegt, fällt der Schatten des Gefäßes nach α , das Auge projecirt demgemäß einen

dunklen Streifen in der Richtung αA in das Gesichtsfeld. Liegt der Brennpunkt in b , so fällt der Schatten nach β , und es wird der dunkle Streifen in das Gesichtsfeld nach B verlegt. Während sich also die Lichtquelle von a nach b bewegt, wird der scheinbare Gefäßstamm im Gesichtsfelde von A nach B in gleicher Richtung wandern. Die chagrinierte Fläche um den Visirpunkt herum zeigt die entgegengesetzte Bewegungsart; sie entsteht also jedenfalls nicht in derselben Weise, wie die Gefäßschatten entstehen. Im Gesichtsfelde greift auf der dem Lichte abgekehrten Seite der Gefäßbaum etwas über den Rand der chagrinierten Stelle, oben und unten scheint er den Rand nur zu berühren, dem Lichte zugekehrt ist ein Zwischenraum zwischen beiden, gleichviel ob das Licht vom innern oder äußern Augenwinkel einfällt. Es ist dies wohl dadurch bedingt, daß die Gefäßverzweigungen mehr nach vorn liegen als die Schicht, welche durch Brechung oder Zurückwerfung des Lichts das chagrinierte Aussehen erzeugt, und daher bei schief einfallendem Lichte der Schatten der Gefäßfigur

158

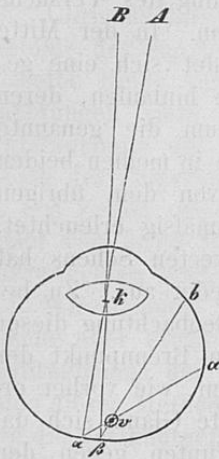


Fig. 98.

auf der Hinterfläche der Netzhaut nicht senkrecht unter den Gefäßen liegt. Diejenige Structur, welche das chagrinierte Aussehen hervorruft, scheint demnach ziemlich genau dieselbe Ausdehnung zu haben, wie die gefäßlose Stelle der Netzhaut.

n Dieselbe Erscheinung wird auch nach der unter 3) angeführten Methode sichtbar, nach welcher unter Andern Herr L. WOLFFBERG¹ sie beobachtet und zu Messungen benutzt hat. Derselbe hat die Feinheit der Granulierung mit der von Körnern und Glasperlen zu vergleichen gesucht, und findet, daß dieselben der Größe nach den Zapfen der Netzhautgrube entsprechen. Zu der gleichen Meinung ist auch J. P. NUEL² gekommen, obgleich seine Größenschätzungen weniger gut zur Größe der Zapfen stimmen.

Andere Erscheinungen, die bei intermittirendem Licht gesehen werden, deren Beziehung auf Netzhautelemente aber noch sehr zweifelhaft ist, werde ich in § 23 erwähnen.

158 2) Die zweite Methode zur Beobachtung der Netzhautgefäße ist folgende: Man blicke auf einen dunklen Hintergrund hin und bewege dabei unterhalb oder seitlich vom Auge ein brennendes Licht hin und her. Man sieht dann den dunklen Hintergrund von einem matten weißlichen Scheine überzogen, in welchem sich der dunkle Gefäßbaum abzeichnet. Die Figur bleibt nur so lange deutlich, als man das Licht bewegt. Wenn man das Licht nur von rechts nach links bewegt, erscheinen hauptsächlich die von oben nach

¹ L. WOLFFBERG, *Die entoptische Wahrnehmung der Fovea centralis und ihrer Zapfenmosaik*. *Archiv für Augenheilkunde*. XVI. 1886.

² J. P. NUEL, *De la vision entoptique de la fovea centralis*. *Archives de Biologie par VAN BENEDEN et VAN BAMBEKE*. T. IV. 1883. *Annales d'Oculistique*. T. XCI. p. 95.

unten verlaufenden Gefäße, wenn man es von oben nach unten bewegt, die horizontal verlaufenden. Bei den Bewegungen des Lichts bewegt sich gleichzeitig der ganze Gefäßbaum, aber nicht in allen seinen Theilen gleichmäfsig. MEISSNER vergleicht sehr passend die Art der Bewegung des Gefäßbaums hierbei mit dem Ansehen eines vom Wasser entworfenen Spiegelbildes, wenn Wellen darüber fortlaufen. Bei näherer Untersuchung der Erscheinung zeigt sich, dafs wenn abwechselnd das Licht gegen die Gesichtslinie hin und von ihr wegbewegt wird, der Gefäßbaum im Gesichtsfelde sich in gleicher Richtung wie das Licht verschiebt. Wenn aber das Licht in Richtung eines Kreisbogens bewegt wird, dessen Mittelpunkt in der Gesichtslinie liegt, verschiebt sich der Gefäßbaum in entgegengesetzter Richtung. Wird also z. B. das Licht unter dem Auge gehalten und vertical nach oben und unten bewegt, so bewegt sich auch der Gefäßbaum im Gesichtsfelde mit dem Lichte zugleich nach oben und nach unten; wird es horizontal unter dem Auge von rechts nach links bewegt, so geht der Gefäßbaum nach rechts, wenn das Licht nach links, und umgekehrt.

Die inneren Äste des Gefäßbaums erscheinen nicht in so grofser Feinheit der Zeichnung wie bei den beiden anderen Methoden.

In der Mitte, dem Visirpunkte entsprechend, beschreiben mehrere Beobachter eine helle kreisförmige oder elliptische Scheibe. *Fig. 99.* ist die 159

Abbildung, welche BUROW davon gegeben hat. Sie ist an dem der Flamme zugewendeten Rande durch einen dunklen halbmondförmigen Schatten gesäumt, in der Mitte am hellsten. H. MÜLLER sieht diese Scheibe gar nicht, und ich selbst sehe immer nur den halbmondförmigen Schatten, welcher die dem Lichte zugekehrte Seite ihrer Peripherie bildet, während die andere Seite keine entschiedene Begrenzung darbietet. Auch diese centrale Scheibe bewegt sich bei Bewegungen des Lichts. Man überzeugt sich davon, wenn man, während man die Erscheinungen wahrnimmt, einen äufseren Punkt fixirt. Bei mir liegt der Fixationspunkt immer an dem dem

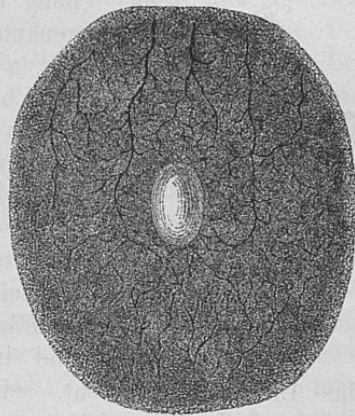


Fig. 99.

Lichte zugewendeten Theile des Randes der hellen Scheibe, wenn ich den halbmondförmigen Schatten meines Auges zur Scheibe ergänzt denke.

Die vollständige Theorie dieser Erscheinungen ist von H. MÜLLER gefunden worden, und ist folgende: Die Lichtquelle für die Beleuchtung des inneren Auges ist in diesem Falle das Netzhautbildchen der Lichtflamme, welches, da das Licht weit vom Centrum des Gesichtsfeldes absteht, auf dem Seitentheile der Netzhaut entworfen wird. Da das Licht sich übrigens dem Auge sehr nahe befindet, kann sein Netzhautbild ziemlich grofs sein und genügend viel Licht in den Glaskörper hinein zurückwerfen, um eine

merkliche Lichtperception in der ganzen Netzhaut anzuregen. Die Art der Beleuchtung ist also ähnlich derjenigen der ersten Methode, nur dadurch unterschieden, daß die Licht aussendende Stelle der Augenhaut ihr Licht nicht von außen durch die Sclerotica, sondern von vorn durch die Pupille empfängt. Da die Bilder auf den Seitentheilen der Netzhaut nicht scharf sind, das Bildchen der Flamme in diesem Falle, um hinreichend Licht zu geben, auch ziemlich ausgedehnt sein muß, so erklärt es sich leicht, daß man die Einzelheiten der feineren Gefäßverzweigungen nicht so gut wahrnimmt wie bei der ersten Methode. Die Art der Bewegung des Gefäßbaums erklärt sich vollständig aus H. MÜLLER'S Theorie. Es sei in *Fig. 100* k

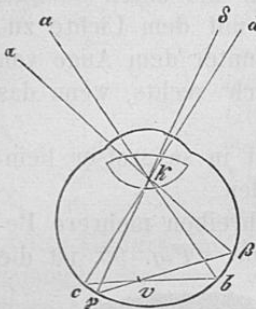


Fig. 100.

der Knotenpunkt des Auges und v ein Netzhautgefäß. Wenn die Lichtquelle in a sich befindet, fällt ihr Netzhautbild nach b , das von b ausgehende Licht wirft den Schatten des Gefäßes v nach c , und wenn wir ck ziehen und verlängern, ist diese Verlängerung kd die Richtung, in welcher der Schatten des Gefäßes v im Gesichtsfelde erscheint. Bewegen wir den Lichtpunkt von a nach α , so rückt b nach β , c nach γ , d nach δ ; es verschiebt sich also d in gleichem Sinne wie a . Wenn hingegen a sich senkrecht gegen die Ebene der Zeichnung bewegt, ist es umgekehrt. Wenn a vor der genannten Ebene steht, liegt b dahinter, c wieder davor, d dahinter. Wenn also a sich nach vorn (vor die Ebene der Zeichnung) bewegt, bewegt sich d nach hinten, und umgekehrt, ganz wie es den Beobachtungen entspricht.

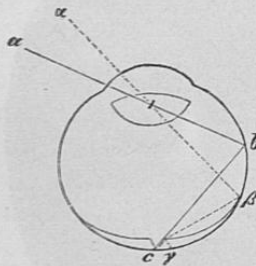


Fig. 101.

Die Erscheinung der hellen Scheibe in der Mitte des Gesichtsfeldes mit dem halbmondförmigen Schatten erklärt H. MÜLLER nicht ohne Wahrscheinlichkeit für den Schatten der Netzhautgrube. Wenn in *Fig. 101* bei c die Netzhautgrube sich befindet, und in ihrer Tiefe die Stelle des directen Sehens,

160

das Licht bei a steht, sein Netzhautbild bei b , so wird der Schatten des nach b hingewendeten erhabenen Randes der Netzhautgrube gerade auf den Visirpunkt fallen, und der ganze Schatten der Netzhautgrube auf der Netzhaut selbst vom Visirpunkte aus dem hellen Bilde b , und entsprechend im Gesichtsfelde dem Lichte a zugewendet sein, wie dies die Beobachtung lehrt. Wenn man das Licht a mehr der Gesichtslinie nähert, und infolge davon b näher nach c rückt, bemerke ich in meinem Auge einen hellen Streifen an der Außenseite des halbmondförmigen Schattens, der wohl von Licht herrührt, welches von hinten, von der Netzhautseite her, auf die Oberfläche der Netzhautgrube gefallen und dort reflectirt ist, wie es in *Fig. 101* durch den punktierten Strahl $\alpha\beta\gamma$ angedeutet ist. Bei Personen, deren Netzhautgrube weniger steil ansteigende Seiten hat, kann dagegen ein solcher Schatten ganz fehlen.

3) Die dritte Methode zur Beobachtung der Netzhautgefäße besteht darin, daß man durch eine enge Öffnung nach einem breiten lichten Felde, z. B. dem hellen Himmel blickt und die Öffnung vor der Pupille schnell hin und her bewegt. Die Netzhautgefäße erscheinen sehr fein gezeichnet, dunkel auf dem hellen Grunde, und bewegen sich im Gesichtsfelde gleichsinnig mit der Öffnung. In der Mitte, entsprechend dem Visirpunkte, sieht man die gefäßlose Stelle, die mir ein fein granulirtes Ansehen zu haben scheint, und in welcher sich ein runder Schatten bei den Bewegungen der Öffnung herumbewegt. Bei horizontalen Bewegungen der Öffnung sieht man nur die verticalen Gefäße, bei verticalen Bewegungen die horizontal verlaufenden. Dieselbe Gefäßfigur sieht man auch, wenn man in ein zusammengesetztes Mikroskop hineinsieht, ohne ein Object unterzulegen, so daß man nur den gleichmäßig hellen Kreis der Blendung sieht. Wenn man das Auge über dem Mikroskope etwas hin und her bewegt, erscheinen in der Blendung des Mikroskops die Gefäße der Netzhaut sehr fein und scharf gezeichnet, und zwar besonders deutlich immer die Gefäße, welche senkrecht gegen die Richtung der Bewegung verlaufen, während diejenigen verschwinden, welche der Richtung der Bewegung parallel sind.

Nach den beiden ersten Methoden fiel das Licht aus einer ungewöhnlichen Richtung her auf die Netzhaut, und es fiel deshalb auch der Schatten der Netzhautgefäße auf Theile der Netzhaut, welche bei dem gewöhnlichen Sehen von diesem Schatten nicht getroffen werden, und von denen die Beschattung daher als ein ungewöhnlicher Zustand leicht empfunden wird. Bei der beschriebenen dritten Methode dagegen fällt das Licht auf dem gewöhnlichen Wege, nämlich durch die Pupille, in das Auge. Ist die ganze Pupille frei und das Auge nach dem hellen Himmel gewendet, so gehen von jedem Punkte der Pupillarebene nach jeder Richtung in den Hintergrund des Auges hinein Lichtstrahlen aus, ganz so als wäre die Pupille selbst die leuchtende Fläche. Unter dem Einflusse dieser Beleuchtung müssen die Netzhautgefäße einen breiten verwaschenen Schatten auf die hinter ihnen liegenden Netzhautpartien werfen, wobei der Kernschatten etwa nur vier bis fünf mal so lang sein wird, als der Durchmesser des Gefäßes. Da nach E. H. WEBER der dickste Ast der *Vena centralis* 0,017 Par. Linien (0,038 mm) im Durchmesser hat, und die Netzhaut nach KÖLLIKER im Hintergrunde des Auges 0,22 mm dick ist, läßt sich annehmen, daß der Kernschatten der Gefäße nicht bis zur hinteren Fläche der Netzhaut reichen wird. Wenn wir aber eine enge Öffnung vor die Pupille bringen, wird der Schatten der Gefäße nothwendig schmaler, schärfer begrenzt, der Kernschatten länger, so daß Theile der Netzhaut, die sonst im Halbschatten lagen, theils in den Kernschatten kommen, theils mit den unbeschatteten Theilen gleich stark erleuchtet werden.

Daß wir beim gewöhnlichen Sehen die Gefäßschatten nicht wahrnehmen, erklärt sich wohl daraus, daß die Empfindlichkeit der beschatteten Stellen der Netzhaut größer, ihre Reizbarkeit weniger erschöpft ist als die der

übrigen Theile der Netzhaut. Sobald wir aber den Ort des Schattens oder seine Ausbreitung verändern, wird derselbe wahrnehmbar, weil die schwache Beleuchtung nun auf ermüdete, weniger reizbare Netzhautelemente fällt. Der reizbarere, früher beschattete Theil der Netzhautelemente dagegen wird nun zum Theil von vollem Lichte getroffen, und empfindet dies stärker. Daher erklärt sich, daß zuweilen, namentlich im Anfange der Versuche, der Gefäßbaum für Augenblicke auch wohl hell auf dunklerem Grunde erscheint, und überhaupt bei manchen Personen der helle Theil der Erscheinung die Aufmerksamkeit mehr auf sich lenken kann, als der dunkle. Sobald der Schatten der Gefäße indessen bei unseren Versuchen seine neue Stelle dauernd behauptet, werden die neu beschatteten Stellen allmählig reizbarer, die früher beschatteten scheinen dagegen ihre erhöhte Reizbarkeit schnell zu verlieren, und die Erscheinung verschwindet wieder. Um sie dauernd zu sehen, ist es also nöthig, den Ort des Schattens stets wechseln zu lassen, und bei geradlinigen Bewegungen der Lichtquelle bleiben nur die Gefäße sichtbar, deren Schatten den Platz wechselt. Auf diese Veränderungen der Reizbarkeit kommen wir in § 24 unten noch näher zurück.

837 VIERORDT¹ hat auf hellen Flächen bei intermittirender Beleuchtung — er bewegte vor den Augen die Hand mit gespreizten Fingern hin und her — eine strömende Bewegung gesehen, die er für die Blutbewegung in den Netzhautgefäßen erklärte; MEISSNER und ich selbst haben diese Bewegung nur in Form uferloser Strömchen gesehen, denen ich VIERORDT's Deutung nicht zu geben wagte. Doch folgt daraus nicht, daß VIERORDT die Erscheinung nicht deutlicher und bestimmter gesehen haben kann, und daß es nicht wirklich bei ihm ein Ausdruck des Blutlaufs war.

Außerdem hatten PURKINJE² und J. MÜLLER³, wenn sie nach einer ausgedehnten hellen Fläche blickten, helle Punkte im Gesichtsfelde erscheinen und eine Strecke fortlaufen sehen, so daß dieselben nach unregelmäßigen Pausen immer wieder an denselben Stellen auftauchen und immer wieder denselben Weg mit derselben ziemlich großen Geschwindigkeit zurücklegen. Diese Erscheinung sieht man nun nach einer Bemerkung von O. N. ROOD sehr viel besser, wenn man durch ein dunkles blaues Glas nach dem Himmel sieht. Ich fixire dabei einen Punkt der Fensterscheibe, um die bewegten Körperchen immer wieder an derselben Stelle zu sehen und die Lage ihrer Bahnen mit der auf dieselbe Fensterscheibe projecirten Gefäßfigur zu vergleichen.

Nachdem ich diese Beobachtungen wiederholt habe, glaube ich nun ebenfalls nicht mehr zweifeln zu können, daß sie von der Blutbewegung herrühren, und zwar so, daß ein einzelnes größeres Körperchen sich in einem der engeren Gefäße klemmt. Dann pflegt vor einem solchen das Gefäß relativ leer zu werden, hinter ihm dagegen stauen sich die Blut-

¹ K. VIERORDT *im Archiv für physiol. Heilkunde*. 1856. Heft II.

² J. E. PURKINJE, *Beobachtungen und Versuche*. I. 127.

³ J. MÜLLER, *Physiologie*. II. 390.

körperchen in gröfserer Menge an. Sobald das Hemmnifs sich löst, strömt der ganze Haufen schnell davon. Es sind dies Vorgänge, die man bei Beobachtung des Capillarkreislaufes mit dem Mikroskope oft sieht. Bei dem genannten Versuche geht im Sehfelde voran ein hellerer länglicher Streifen, entsprechend der leeren Stelle des Gefäßes vor dem Hemmnifs; diesem folgt ein dunklerer Schatten, der, wie ich glaube, den zusammengedrängten Blutkörperchen entspricht.

In meinem rechten Auge sehe ich diese Erscheinung in zwei parallelen Gefäßchen links neben dem Fixationspunkt sehr deutlich und oft sich wiederholen, zuweilen in beiden gleichzeitig; die Bewegung ist scheinbar nach oben gerichtet und das bewegte Gebilde verschwindet, indem es sich mit beträchtlich gesteigerter Geschwindigkeit durch eine S-förmige Krümmung hindurchwindet. Nun finde ich im entoptischen Bilde des Gefäßbaums sowohl die beiden parallelen Gefäße an der angegebenen Stelle, als auch die S-förmige Krümmung ihrer Vereinigungsstelle, welche in ein größeres Venenstämmchen hinüberführt, so dafs beide Beobachtungsmethoden sich vollständig entsprechen. Übrigens sind die genannten Gefäße nicht die einzigen, in denen eine solche Bewegung sichtbar wird, sondern es giebt noch viele andere Stellen in dem Sehfelde desselben Auges, die aber weiter vom Fixationspunkte abliegen und nicht so charakteristische Formen haben.

Danach würde die genannte Erscheinung also als der optische Ausdruck kleiner Hemmungen des Blutlaufs zu betrachten sein, die nur in gewissen Engpässen des Gefäßbaums und nur beim Vorübergang etwas gröfserer Körperchen aufzutreten pflegen.

Um zu entscheiden, ob die entoptisch gesehenen Objecte vor oder hinter der Pupille oder etwa nahe der Netzhaut liegen, dazu ist die Beachtung der Parallaxe nach LISTING'S Vorschlag ausreichend. Es sei a *Fig. 102* das von den Augenmedien entworfene Bild des leuchtenden Punktes *c* der Punkt des directen Sehens auf der Netzhaut, *f* *e* die Ebene der Pupille oder vielmehr deren von der Linse entworfenes Bild, welches indessen nur wenig von seinem Objecte abweicht. Endlich sei *d* ein dunkles Object hinter der Pupille. Wenn die Linie *ac* die Pupille in *g* schneidet, so fällt der Schatten des Punktes *g* auf den Punkt des directen Sehens *e*, also *g* entspricht dem direct gesehenen Punkte des entoptischen Bildes der Pupille. Ziehen wir die gerade Linie *ad*, und verlängern sie, bis sie die Netzhaut in *b* schneidet, so ist *b* der Ort des Schattens von *d*. Nennen wir den Durchschnittspunkt der Linie *ad* mit der Pupillarebene *h*, so fällt die Projection des Punktes *h* der Pupille gleichzeitig auf *b*; *d* und *h* decken sich im entoptischen Gesichtsfelde. Wenn in der Linie *ab* auch noch vor der Pupille ein Object *i* liegt, so deckt sich dieses ebenfalls mit *h* im entoptischen Gesichtsfelde.

Wenn nun aber das Auge oder der leuchtende Punkt so bewegt wird, dafs ein anderer Punkt der Pupille, etwa *f*, entoptisch direct gesehen wird, der leuchtende Punkt etwa nach *a* in die Verlängerung der Linie *cf* rückt, so verändert sich auch die Lage des Schattens von *d* und *i* gegen den der Pupille. Ziehen wir *ad* und *ai*. Ersteres schneide die Ebene der Pupille in *m*, letzteres verlängert in *e*, so sind *m* und *e* die

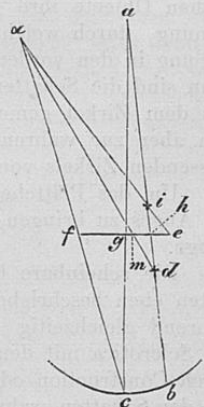


Fig. 102.

162 Punkte der Pupille, deren entoptische Bilder sich mit denen der Objecte d und i jetzt decken. Während also der Visirpunkt in dem entoptischen Bilde von g nach f gerückt ist, hat das Bild des hinter der Pupille gelegenen Objectes d eine Bewegung in gleichem Sinne von h nach m , das Bild des vor der Pupille gelegenen Objectes in entgegengesetztem Sinne von h nach e ausgeführt. Nach der Bezeichnungswaise von LISTING hat also d eine positive Parallaxe, und i eine negative. Es ist bei geringer Übung immer leicht zu entscheiden, ob die entoptisch gesehenen Objecte sich im Verhältniß zu der kreisförmigen Begrenzung des Gesichtsfeldes in gleichem oder entgegengesetztem Sinne wie der Visirpunkt verschieben, und danach entscheidet man leicht, ob sie vor oder hinter der Pupille liegen.

Um die Entfernung der im Glaskörper schwebenden Objecte genauer messen zu können, hat D. BREWSTER zuerst eine Methode eingeschlagen, bei welcher er zwei Bündel homocentrischer Strahlen in das Auge dringen liefs, und dadurch zwei Schatten eines jeden Objectes erzeugte. Aus der Entfernung der Schatten von einander kann dann die Entfernung des Objectes von der Netzhaut gefunden werden. BREWSTER sah zu dem Ende durch eine vor dem Auge stehende Linse nach zwei neben einander gestellten Flammen hin. DONDERS hat diese Methode geändert, indem er vor das Auge ein Metallplättchen mit zwei kleinen, $1\frac{1}{2}$ mm von einander entfernten Öffnungen bringt. Durch diese sieht er nach einem weifsen, stark erleuchteten Papiere hin, auf welchem die entoptischen Erscheinungen projicirt erscheinen. Er mißt nun den Abstand der Mittelpunkte der beiden sich gegenseitig bedeckenden kreisförmigen Bilder der Pupille, welcher einfach dadurch gefunden wird, dafs man den Durchmesser des unbedeckten Theiles dieser Kreise mißt. Ferner mißt er den Abstand der Doppelbilder des betreffenden entoptischen Objectes. Der letztere verhält sich zum Abstände der beiden Kreise wie der Abstand des Objectes von der Netzhaut, welcher gefunden werden soll, zum scheinbaren Abstände der Pupille von der Netzhaut (18 mm). So kann der Abstand der Objecte von der Netzhaut leicht berechnet werden.

DONCAN hat die Methode von DONDERS insofern geändert, dafs er seine Messungen nach dem Principe der mikroskopischen Messung *à double vue* ausführt. Das eine Auge blickte durch eine oder zwei feine Öffnungen nach einem kleinen Hohlspiegel, der das Licht des Himmels reflectirte, das andere auf eine in der Entfernung des deutlichen Sehens gelegene Tafel, und der Beobachter mißt mit dem Zirkel auf dieser Tafel die Gröfse der entoptischen Objecte und den Abstand ihrer Doppelbilder, sowie den Abstand entsprechender Punkte am Rande der Iris. Um aus der scheinbaren Gröfse der entoptischen Objecte ihre wahre Gröfse zu berechnen, mufs man noch den Abstand der Öffnung, durch welche man sieht, von der Hornhaut kennen. Am besten ist es, diese Öffnung in den vorderen Brennpunkt des Auges (12 mm vor der Hornhaut) anzubringen, dann sind die Schatten der entoptischen Objecte so grofs wie die Objecte selbst. Die mit dem Zirkel gemessene scheinbare Gröfse dieser Objecte im Gesichtsfelde verhält sich aber zur wahren Gröfse des Schattens auf der Netzhaut wie die Entfernung des messenden Zirkels vom Auge zur kleineren Hauptbrennweite des Auges (15 mm).

Um das Plättchen mit der Öffnung wenigstens nahehin in die vordere Brennebene des Auges zu bringen, befestigt man es am Ende eines kurzen Röhrchens von passender Länge.

Die scheinbare Gröfse der Bewegung des Gefäfsbaums im Gesichtsfelde bei der ersten eben beschriebenen Methode, ihn sichtbar zu machen, hat H. MÜLLER gemessen, während gleichzeitig die Gröfse der Verschiebung des leuchtenden Brennpunktes auf der Sclerotica mit dem Zirkel gemessen wurde. Es kann daraus, wenigstens annähernd, durch Construction oder Rechnung die Entfernung der Schatten werfenden Gefäfsse von der den Schatten wahrnehmenden Schicht der Netzhaut bestimmt werden. Man zeichne, wie in *Fig. 103*, den Querschnitt des Auges in natürlicher Gröfse. Der Brennpunkt auf der Sclerotica sei zwischen den Punkten a und b hin und her bewegt. Es sei a der Schatten eines in der Nähe des gelben Flecks gelegenen Gefäfses v , dessen scheinbare 163 Bewegung man gemessen hat, für die Lage des Lichtpunktes in a , so mufs dies Gefäfs

in der geraden Linie αa liegen. Es sei $\alpha \beta$ die aus der scheinbaren Verschiebung des Gefäßes im Gesichtsfelde berechnete wahre Verschiebung auf der Netzhaut, also β der Ort des Gefäßschattens für den Fall, wo sich der Brennpunkt in b befindet. Man ziehe die gerade Linie $b\beta$. Der Punkt v , wo $b\beta$ und αa sich schneiden, muß dann der Ort des Gefäßes sein, dessen Entfernung von der Netzhaut durch Messung oder Rechnung gefunden werden kann. H. MÜLLER erhielt auf diese Weise in mehreren Versuchen für die Entfernung der Gefäße von der empfindenden Schicht 0,17; 0,19 bis 0,21; 0,22; 0,25 bis 0,29; 0,29 bis 0,32 mm. Bei drei anderen Beobachtern 0,19; 0,26; 0,36 mm. Da nach den anatomischen Messungen desselben Beobachters die Entfernung der Gefäße von den Stäbchen und Zapfen in der Gegend des gelben Flecks zwischen 0,2 und 0,3 mm beträgt, so wird es daraus wahrscheinlich, daß die Zapfen die den Schatten empfindenden Gebilde seien, worauf auch andere Verhältnisse hindeuten, welche ich in § 18 auseinandersetzen werde.

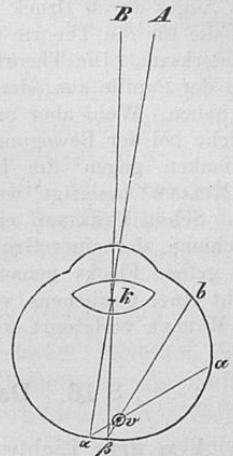


Fig. 103.

DECHALES¹, ein Jesuit des 17. Jahrhunderts, stellte zuerst eine Ansicht über die Entstehung der fliegenden Mücken auf, und zwar die richtige, daß es Schatten seien von Körperchen, die in der Nähe der Netzhaut schwimmen. PITCAIRN² verlegte sie dagegen auf die Netzhaut selbst, und MORGAGNI³ in alle Augenmedien, obgleich die weiter nach vorn liegenden ohne die Anwendung schmalere Lichtquellen nicht wohl gesehen sein können. Ebenso irrt auch DE LA HIRE⁴, wenn er die festen Mücken ausschließlich auf die Netzhaut verlegt, die beweglichen in die wässrige Feuchtigkeit. LE CAT⁵ beschreibt einen Versuch, der dem Principe nach die Methode der entoptischen Untersuchung vollständig enthält, indem er das umgekehrte Schattenbild einer dicht vor das Auge gehaltenen Nadel im Zerstreuungskreise eines kleinen Lichtpunktes wahrgenommen hat. Auch AEPINUS⁶ hat etwa zu derselben Zeit den Schatten der Iris, die Erweiterung und Verengung der Pupille entoptisch wahrgenommen und richtig verstanden. Aber erst seit 1760⁷ hat man angefangen, kleine Öffnungen und starke Linsen anzuwenden, um die fliegenden Mücken deutlicher zu sehen, welches Verfahren übrigens auch dem DECHALES nicht ganz unbekannt gewesen war.

Eine strengere Theorie der Erscheinungen, und die Methoden den Ort der Körperchen im Auge zu beurtheilen, wurden erst viel später durch LISTING⁸ und BREWSTER⁹ festgestellt, denen später DONDERS¹⁰ folgte. Des Letzteren Schüler DONCAN¹¹ wies dann die Übereinstimmung der entoptisch gesehenen Gegenstände mit mikroskopischen Structuren des Glaskörpers nach; dasselbe versuchte JAMES JAGO¹². Beschreibungen der verschiedenen Formen entoptischer Objecte gaben aufer den eben Genannten auch STEIFENSAND¹³, MACKENZIE¹⁴, APPIA¹⁵.

¹ DECHALES, *Cursus seu mundus mathematicus*. Lugduni 1690. T. III. p. 402.

² PITCAIRN, *Pitcairni opera*. Lugd. Bat. p. 203. 206.

³ MORGAGNI, *Adversaria anatomica* VI. Anim. LXXV. p. 94. Lugd. Bat. 1722.

⁴ Ph. DE LA HIRE, *Accidens de la vue*. p. 358.

⁵ LE CAT, *Traité des sens*. Rouen 1740. p. 298.

⁶ AEPINUS, *Novi Comment.* Petropol. Vol. VII. p. 303.

⁷ *Histoire de l'Acad. d. sciences*. 1760. p. 57. Paris 1766.

⁸ J. LISTING, *Beitrag zur physiologischen Optik*. Göttingen 1845.

⁹ D. BREWSTER, *Transactions of the Roy. Soc. of Edinb.* XV. 377.

¹⁰ F. C. DONDERS, *Nederl. Lancet*. 1846—47. 2te Serie. D. II. bl. 345. 432. 537.

¹¹ A. DONCAN, *De corporis vitrei structura*. Diss. Utrecht 1854; *Onderzoekingen ged. in het Physiol. Laborat. d. Utrechtsche Hoogeschool*. Jaar VI. p. 171.

¹² J. JAGO, *Proceed. Roy. Soc.* 18. Jan. 1855.

¹³ K. A. STEIFENSAND, *Poggendorff's Ann.* LV. p. 134; v. *Ammon's Monatschrift f. Med.* I. 203.

¹⁴ MACKENZIE, *Edinburgh Medical and Surgical Journal*. July 1845.

¹⁵ APPIA, *De l'oeil vu par lui même*. Genève 1853.

Die subjective Erscheinung der Centralgefäße hat PURKINJE¹ zuerst entdeckt und sie nach den drei oben beschriebenen Methoden sichtbar gemacht. Auch bei Erregung des Auges durch Druck und Blutandrang hat er sie wahrgenommen. GUDDEN² machte auf die für die Theorie der Erscheinung wichtige Bedeutung der Bewegung des Schattens aufmerksam. Die Theorie der Erscheinung bei der Anwendung homocentrischen Lichts von der Pupille aus oder eines Brennpunktes auf der Sclerotica schien keine Schwierigkeit zu haben. Wohl aber machte MEISSNER³ auf die abweichenden Verhältnisse aufmerksam, 164 welche bei der Bewegung eines Lichts unterhalb des Auges eintreten, und leitete daraus Bedenken gegen die bisherige Erklärungsweise überhaupt ab. Diese wurden von H. MÜLLER⁴ beseitigt, welcher die oben hingestellte Theorie dieser Art des Versuchs fand.

Schon PURKINJE erwähnt, daß in der Mitte des Gesichtsfeldes ein heller Fleck erschiene, der einer Grube ähnlich sehe; BUROW⁵ beschrieb die entoptische Erscheinung des gelben Flecks genauer, deutete sie aber als die Erscheinung einer Hervorragung, nicht eines Grübchens, vermöge der unrichtigen älteren Theorie des Versuchs, die durch H. MÜLLER verbessert wurde.

§ 16. Das Augenleuchten und der Augenspiegel.

Von dem Lichte, welches auf die Netzhaut gefallen ist, wird ein Theil absorbirt, namentlich durch das schwarze Pigment der Aderhaut, ein anderer Theil wird diffus reflectirt, und kehrt durch die Pupille nach außen zurück.

Unter gewöhnlichen Verhältnissen nehmen wir nichts von dem Lichte wahr, welches aus der Pupille eines anderen Auges zurückkehrt, diese erscheint uns vielmehr ganz dunkelschwarz. Der Grund hiervon ist hauptsächlich in den eigenthümlichen Brechungsverhältnissen des Auges zu suchen, zum Theil auch darin, daß von den meisten Stellen des Augenhintergrundes wegen des schwarzen Pigments verhältnismäßig wenig Licht zurückgeworfen wird.

Bei allen Systemen brechender Flächen, welche ein genaues Bild eines leuchtenden Punktes entwerfen, können die Lichtstrahlen genau auf denselben Wegen, auf denen sie von dem leuchtenden Punkte zu dessen Bilde gegangen sind, auch rückwärts von dem Bilde zu dem leuchtenden Punkte zurückgehen. Oder wenn man den leuchtenden Punkt an den Ort des Bildes bringt, wird nun das Bild an dem früheren Orte des leuchtenden Punktes entworfen.

Daraus folgt: Wenn das menschliche Auge genau für einen leuchtenden Körper accommodirt ist, und von diesem ein genaues Bild auf seiner Netzhaut entwirft, und wir betrachten nun die erleuchtete Stelle der Netzhaut als ein zweites leuchtendes Object, so wird deren von den Augenmedien 165 entworfenen Bild genau mit dem ursprünglich leuchtenden Körper zusammenfallen, d. h. alles Licht, welches von der Netzhaut aus dem Auge zurückkehrt, wird außerhalb des Auges direct zu dem leuchtenden Körper zurückgehen, und nicht neben ihm vorbei. Das Auge des Beobachters würde

¹ J. E. PURKINJE, *Beiträge zur Kenntnifs des Sehens*. 1819. S. 89. *Neue Beiträge*. 1825. S. 115. 117.

² GUDDEN, *J. Müller's Archiv für Anat. u. Physiol.* 1849. S. 522.

³ MEISSNER, *Beiträge zur Physiologie des Sehorgans*. 1854.

⁴ H. MÜLLER, *Verhandl. der med.-physik. Ges. zu Würzburg*. IV. 100. V. Lief. 3.

⁵ A. BUROW, *J. Müller's Arch.* 1854. S. 166.

sich, um etwas von diesem Lichte aufzufangen, zwischen den leuchtenden Körper und das beleuchtete Auge einschieben müssen, was ohne weitere Hilfsmittel natürlich nicht angeht, ohne dem beleuchteten Auge das Licht abzuschneiden.

Ebenso wenig kann der Beobachter Licht aus dem Auge eines Anderen zurückkehren sehen, wenn dies letztere für die Pupille des Beobachters genau accommodirt ist. Unter diesen Umständen wird nämlich ein genaues dunkles Bild der Pupille des Beobachters auf der Netzhaut des beobachteten Auges entworfen werden. Rückwärts werden die Augenmedien ein Bild dieser dunklen Stelle der Netzhaut gerade auf die Pupille des Beobachters werfen, und somit wird dieser gerade nur den Widerschein seiner eigenen schwarzen Pupille in der fremden sehen.

Daher kommt es, dafs man unter gewöhnlichen Umständen auch die stärker Licht reflectirenden Theile im Hintergrunde eines fremden Auges nicht sieht, wie z. B. die weifse Eintrittsstelle des Sehnerven, die Gefäfse. Auch bei Albinos, Personen, denen das Pigment der Chorioidea fehlt, erscheint die Pupille schwarz, sobald man durch einen dunklen, vor ihr Auge gehaltenen Schirm, der nur eine Öffnung von der Gröfse der Pupille zum Durchsehen hat, verhindert, dafs Licht durch ihre Sclerotica in das Innere des Auges dringt.¹ Letzteres ist es, welches das gewöhnliche rothe Ansehen der albinotischen Pupille bewirkt. Ebenso erscheint das Objectglas einer *Camera obscura* von vorn gesehen schwarz, wenn der Beobachter sie aus der Entfernung solcher Gegenstände, für die sie eingestellt ist, betrachtet; selbst dann, wenn man als Schirm zum Auffangen des Bildes ein weifses Blatt Papier angebracht hat.

Ist dagegen das beleuchtete Auge weder für den leuchtenden Gegenstand, noch für die Pupille des Beobachters genau accommodirt, so ist es möglich, dafs der Beobachter einiges von dem aus der Pupille zurückkehrenden Lichte wahrnimmt; die Pupille erscheint ihm dann leuchtend.

Es ist leicht einzusehen, dafs der Beobachter von allen denjenigen Punkten der Netzhaut des beobachteten Auges Licht empfangen kann, auf welche das Zerstreuungsbild seiner eigenen Pupille fällt. Supponiren wir einen Augenblick statt der Pupille des Beobachters eine leuchtende Scheibe, deren Zerstreuungsbild in dem beobachteten Auge genau mit dem Zerstreuungsbilde jener Pupille zusammentreffen würde, so gehen Lichtstrahlen von einem oder mehreren Punkten dieser leuchtenden Scheiben nach jedem Punkte ihres Zerstreuungsbildes hin, es können also auch rückwärts Lichtstrahlen von jedem Punkte der Netzhaut, der dem Zerstreuungskreise angehört, nach einem oder mehreren Punkten der leuchtenden Scheibe, d. h. an den Ort der Pupille des Beobachters gelangen. Der Beobachter wird also das beobachtete Auge leuchten sehen, so oft in dem beobachteten Auge das Zerstreuungsbild seiner eigenen Pupille theilweise zusammenfällt mit dem Zerstreuungsbilde eines leuchtenden Gegenstandes.

¹ F. C. DONDEERS, *Onderzoekingen gedaan in het Physiologisch Laborat. der Utrechtsche Hoogeschool*. Jaar VI. p. 153. — VAN TRIGT, *Nederlandsch Lancet*. 3te Ser. D. II. bl. 419.

Blickt daher der Beobachter dicht am Rande eines Lichtes vorbei, dessen Strahlen er durch einen dunklen Schirm von seinem eigenen Auge abhält, um nicht geblendet zu werden, nach dem Auge eines Anderen, und ist dieses Auge für eine nähere oder viel weitere Entfernung accommodirt,

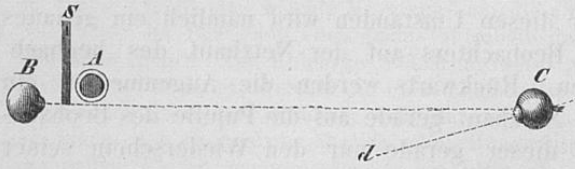


Fig. 104.

so erscheint ihm die Pupille roth leuchtend. Diese Anordnung des Versuchs ist schematisch in Fig. 104 dargestellt. *B* ist das Auge des Beobachters, *S* der Schirm, welcher es vor den directen Lichtstrahlen schützt, *A* der Grundriß einer Lampenflamme, *C* das beobachtete Auge, *BC* die Gesichtslinie des Beobachters, *Cd* die des beobachteten Auges, welche beliebig gerichtet sein kann. Der Versuch gelingt auch meist, ohne daß man die Accommodation des beobachteten Auges berücksichtigt, wenn der Beobachter weit entfernt ist, weil die meisten menschlichen Augen nicht absolute genaue Bilder geben, namentlich wenn der Beobachtete, wie in Fig. 104, seitwärts sieht. Großer Abstand des Lichtes ist vortheilhaft, weil das Gesicht des Beobachteten dann wenig beleuchtet ist, während das Netzhautbild gleich hell bleibt. Am hellsten ist das Leuchten, wenn das einfallende Licht auf die Eintrittsstelle des Sehnerven trifft, weil dessen weiße Substanz das Licht stark reflectirt und wegen ihrer durchscheinenden Beschaffenheit keine hinreichend bestimmte Grenzfläche darbietet, auf der sich das Bild scharf projectiren könnte.

Zu bemerken ist hierbei, daß bei hinreichend starker Beleuchtung auch Licht genug durch die Aderhaut zur Sclerotica dringt, und hier diffus reflectirt wieder zurückkehrt, um wahrgenommen zu werden. Dies Licht verhält sich wie das der Zerstreuungskreise. Daher kann bei starker Beleuchtung auch bei genauer Accommodation des beobachteten Auges für die Pupille des Beobachters ein schwacher Grad von Leuchten stattfinden, namentlich bei schwach pigmentirten Augen, der sich in der angegebenen Weise erklärt.

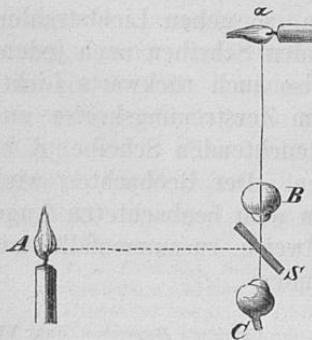


Fig. 105.

Noch besser kann das Augenleuchten beobachtet werden, wenn man nicht direct das Licht der Flamme in das Auge fallen läßt, sondern von einem Spiegel reflectirt, und der Beobachter durch diesen Spiegel hindurchsieht. *A* in Fig. 105 sei das Licht, *S* der Spiegel, welcher aus einer unbelegten Glasplatte bestehen kann. Diese wirft das auffallende Licht so zurück, als käme es von einem Spiegelbilde α der Flamme. *C* sei das beobachtete Auge, auf dessen Hintergrunde ein kleines Netzhautbildchen

des Lichts entworfen wird. Das von der Netzhaut zurückkehrende Licht geht nun, wenn es das Auge verlassen hat, zunächst in der Richtung des Spiegelbildes a zurück, trifft wieder auf die spiegelnde Platte, wo ein Theil nach dem wirklichen Lichte hin zurückgeworfen wird, während ein anderer durch die Platte geht und seinen Weg nach dem Orte des Spiegelbildes hin fortsetzt. Hier kann es nun von dem Auge des Beobachters B aufgefasst werden. Dieser sieht bei der beschriebenen Anordnung das beobachtete Auge leuchten.

Statt der unbelegten Glasplatte kann auch ein belegter Glasspiegel oder Metallspiegel gebraucht werden, mit einer engen Öffnung, durch welche der Beobachter sieht.

Wenn der Beobachter unter diesen Umständen nun auch den Hintergrund des beobachteten Auges erleuchtet sieht, so kann er doch in der Regel nichts im Hintergrunde dieses Auges erkennen, weil er sein Auge für das Bild, welches die Augenmedien vom Hintergrunde des Auges entwerfen, nicht accommodiren kann. Zu dem Ende müssen noch passende Glaslinsen hinzugenommen werden. Die Zusammenstellung eines Beleuchtungsapparates mit solchen Glaslinsen giebt ein Instrument, Augenspiegel genannt, mittels dessen man die Bilder auf der Netzhaut und die Theile der Netzhaut eines fremden Auges deutlich sehen und untersuchen kann.

BRÜCKE hat auf einen eigenthümlichen Nutzen aufmerksam gemacht, den die Schicht der stabförmigen Körperchen bei der Zurückwerfung des Lichts an der Netzhaut haben dürfte. Die Aufgliederer dieser Körperchen sind kleine Cylinder, 0,030 mm lang, 0,0018 mm dick, von einer stark lichtbrechenden Substanz gebildet, welche palissadenartig neben einander gestellt, aber durch die Fortsätze der Pigmentzellen von einander getrennt, die der Aderhaut zugekehrte letzte Schicht der Netzhaut bilden. Die Axe derer, welche im Hintergrunde des Auges die Netzhaut bedecken, ist gegen die Pupille hin gerichtet, und alles einfallende Licht tritt deshalb in diese Körperchen nahelin ihrer Axe parallel ein. Da nun Licht, welches innerhalb eines dichteren Mittels fortschreitend unter einem sehr großen Einfallswinkel auf die Grenze eines weniger lichtbrechenden Mediums trifft, total reflectirt wird, so können wir schliessen, daß das Licht, welches in ein stabförmiges Körperchen einmal eingetreten ist, dieses meist nicht wieder verläßt, sondern, wenn es irgendwo auf die cylindrische Begrenzungsfläche des Körperchens treffen sollte, hier gröfstentheils nach innen reflectirt wird. Wenn wir die Brechkraft der stabförmigen Körperchen beispielsweise gleich der des Öls (1,47), die ihrer Zwischensubstanz gleich der des Wassers setzen (1,33), so werden Strahlen, die unter einem Winkel kleiner als 25° gegen ihre Fläche fallen, total reflectirt, während die von der Pupille etwa nur unter einem Winkel von 8° auffallen. Ist das Licht endlich an dem äußeren Ende des Körperchens angekommen, und wird hier ein Theil von der Aderhaut diffus zurückgeworfen, so wird dieser wieder hauptsächlich durch dasselbe Körperchen zurückkehren müssen. Was von dem Lichte dann unter einem gröfseren Winkel gegen die Axe des Körperchens verläuft, wird allerdings theilweise das Körperchen verlassen können, und dann der Absorption durch die Fortsätze der Pigmentzellen verfallen. Was in den Körperchen bleibt, wird aber nur nach oft wiederholten schwächenden Reflexionen an

den Grenzen der nächsten Körperchen bis in den Glaskörper dringen können. Solches Licht dagegen, welches nahe parallel der Axe der Körperchen zurückgeht, wird nur eine oder wenige totale Reflexionen erleiden, daher wenig geschwächt sein, wenn es das Körperchen verläßt, dann aber auch die Richtung nach der Pupille haben und durch diese austreten. Diese Function der Körperchen scheint namentlich bei denjenigen Thieren, welche statt der Schicht schwarzer Pigmentzellen auf der Aderhaut eine stark reflectirende Fläche (Tapetum) haben, von 168 Wichtigkeit zu sein. Einmal wird dadurch bewirkt, daß das Licht die empfindenden Netzhautelemente, welche es beim Einfallen getroffen hatte, bei seiner Rückkehr noch einmal trifft und erregt. Zweitens kann es rückkehrend nur dieselben oder höchstens theilweise die nächsten Netzhautelemente treffen, und sich nur zu einem kleinen Theile im Auge diffus zerstreuen, was die Genauigkeit des Sehens erheblich beeinträchtigen würde. Daß solches diffus zerstreutes Licht bei hinreichend hellen Netzhautbildern im Gesichtsfelde merkbar werden kann, zeigt die im vorigen Paragraphen beschriebene Beobachtungsweise der Aderfigur mittels eines unter dem Auge hin und her bewegten Lichts.

Ich lasse nun hier eine Reihe allgemeiner Sätze zur Begründung der mathematischen Theorie des Augenleuchtens und der Augenspiegel folgen, durch deren Aufstellung die Betrachtung der einzelnen Fälle später außerordentlich vereinfacht wird.

Satz I.

Wenn zwei Lichtstrahlen in entgegengesetzter Richtung durch beliebig viele einfach brechende Mittel gehen, und in einem dieser Medien in eine gerade Linie zusammenfallen, so fallen sie in allen zusammen.

Es sei AB Fig. 106 der Theil der beiden Strahlen, von denen wir wissen, daß er beiden gemeinschaftlich angehört. Der erste Strahl sei von E längs der Linie EB gekommen, in B gebrochen und nach A gegangen. Der zweite Strahl kommt von A längs der Linie AB nach B , wird hier gebrochen, und gehe nach E_1 . Zunächst ist zu beweisen, daß E, B mit $E_1 B$ zusammenfällt. DBC sei das Einfallslot, m das Brechungsverhältniß des Mittels, in welchem E und E_1 , der Winkel EBD gleich α und der Winkel $E_1 B D = \alpha$, liegen; n dagegen das Brechungsverhältniß des Mittels, in welchem A und der Winkel $ABC = \beta$ liegt. Für den ersten Strahl muß nach dem Brechungsgesetz AB in der durch DB und EB gelegten Ebene liegen, und ferner sein

$$m \cdot \sin \alpha = n \cdot \sin \beta.$$

Ébenso muß für den zweiten Strahl $E_1 B$ in der durch DB und AB gelegten Ebene liegen, also in derselben, in welcher auch EB liegt, und es muß sein

$$m \cdot \sin \alpha = n \cdot \sin \alpha.$$

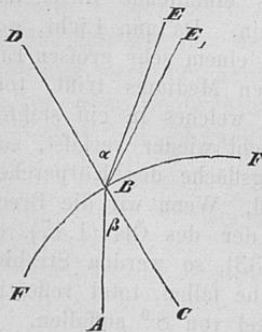


Fig. 106.

Daraus folgt

$$\begin{aligned} \sin \alpha &= \sin \alpha, \text{ oder} \\ \alpha &= \alpha, \end{aligned}$$

da beide Winkel nur im ersten Quadranten liegen können.

Daraus folgt, daß E, B mit EB zusammenfällt. Somit congruiren die beiden Strahlen auch in dem Mittel, in welchem E liegt, soweit dieses reicht.

Bei der nächsten brechenden Fläche läßt sich ihre Congruenz dann wieder für das dritte Medium folgern u. s. w.

Zusätze. 1) Auch sieht man leicht ein, daß bei Reflexionen an spiegelnden Flächen die Congruenz nicht gestört wird.

2) Für das Auge folgt, daß ein Strahl, der auf seinem Wege von der Netzhaut zur Linse mit einem anderen zusammenfällt, der von einem leuchtenden Punkte in das Auge und auf die Netzhaut fällt, auch außerhalb des Auges mit diesem congruirt.

3) Stellt man den Satz so allgemein hin, wie es hier geschehen ist, so muß man daran denken, daß bei gewissen Polarisationsrichtungen und Einfallswinkeln die Strahlen bei einer Brechung oder Reflexion ganz verlöschen könnten. Bei unseren Anwendungen auf die Beleuchtung des Auges treten solche Umstände nicht ein. Das Licht fällt auf die brechenden Flächen des Auges fast senkrecht ein, wobei seine etwa vorhandene Polarisation so gut wie keinen Einfluß auf die Stärke des gebrochenen und reflectirten Antheils hat. Uebrigens können wir die Schwächung der Strahlen durch Reflexion und Absorption an und in den Augenmedien vernachlässigen. Nur wenn man schräg gestellte Glasplatten als Reflector benutzt, muss man an die Schwächung des Lichts durch Reflexion denken.

Für die Intensität des hin und zurück gehenden Lichtstrahls läßt sich übrigens ebenfalls eine ganz entsprechende Regel von sehr ausgehnter Gültigkeit aufstellen, die ausgesprochen zu haben hier genügen mag, da wir bei gegenwärtiger Anwendung das Princip in seiner allgemeineren Form nicht brauchen. Den Beweis kann sich übrigens Jeder, der die Gesetze der Optik kennt, leicht selbst führen. Man kann diese allgemeinere Regel folgendermaßen aussprechen.

Ein Lichtstrahl gelange von dem Punkte A nach beliebig vielen Brechungen, Reflexionen u. s. w. nach dem Punkte B . In A lege man durch seine Richtung zwei beliebige, auf einander senkrechte Ebenen a_1 und a_2 , nach welchen seine Schwingungen zerlegt gedacht werden. Zwei eben solche Ebenen b_1 und b_2 werden durch den Strahl in B gelegt. Alsdann läßt sich folgendes beweisen: Wenn die Quantität J nach der Ebene a_1 polarisirten Lichts von A in der Richtung des besprochenen Strahls ausgeht, und davon die Quantität K nach der Ebene b_1 polarisirten Lichts in B ankommt, so wird auf demselben Wege rückwärts, wenn die Quantität J nach b_1 polarisirten Lichts von B ausgeht, dieselbe Quantität K nach a_1 polarisirten Lichts in A ankommen.

Soviel ich sehe, kann hierbei das Licht auf seinem Wege der einfachen und doppelten Brechung, Reflexion, Absorption, gewöhnlichen Dispersion und Diffraction unterworfen sein, ohne daß das Gesetz seine Anwendbarkeit verliert, nur darf keine Änderung seiner Brechbarkeit stattfinden, und es darf nicht durch Körper gehen, in denen der Magnetismus nach FARADAY'S Entdeckung auf die Lage der Polarisations Ebene einwirkt.

Satz II.

Wenn die Pupille des beobachteten Auges leuchtend erscheinen soll, so muß sich auf seiner Netzhaut das Bild der Lichtquelle ganz oder theilweise mit dem Bilde der Pupille des Beobachters decken.

Wenn von irgend einer Stelle der Netzhaut des beobachteten Auges Licht in das Auge des Beobachters dringen soll, so muß diese Stelle erstens von der Lichtquelle erleuchtet sein, also dem Bilde der Lichtquelle angehören. Zweitens, wenn wir die Fiction machen, daß Licht von der Pupille des Beobachters ausgeht, so müßte nach dem vorigen Satze ebenso gut Licht von der Pupille des Beobachters zur betreffenden Stelle der Netzhaut des beobachteten Auges wie umgekehrt gehen können. Die Netzhautstelle muß also gleichzeitig dem Netzhautbilde der Pupille des Beobachters angehören, mag dieses Bild nun scharf oder ein Zerstreuungsbild sein.

Zusätze. 1) Dieser Satz gilt nicht nur für den Fall, wo die Strahlen auf geradem Wege von der Lichtquelle zum beobachteten Auge und von diesem zum Auge des Beobachters gehen, sondern auch wenn beliebig viele Linsen und Spiegel dazwischen geschoben sind. Dadurch erhält man ein bequemes Mittel, sich experimentell die Wirkung jedes Augenspiegels am eigenen Auge deutlich zu machen. Man stelle das zur Erleuchtung dienende Licht auf und bringe das Instrument vor sein Auge in dieselbe Lage, wie es sonst vor dem Auge des Beobachters steht; der Theil des Gesichtsfeldes, welcher alsdann hell erscheint, entspricht dem Theile der Netzhaut, welcher beleuchtet ist. Man kann erkennen, ob das helle Feld groß oder klein, ob es gleichmäßig erleuchtet ist, oder ob sich dunkle Stellen darin befinden, und wie dunkel diese sind. Alsdann nehme man die Flamme von der Stelle weg, wo sie zur Erleuchtung des Auges dient, und bringe sie hinter das Instrument, da wo sich sonst das Auge des Beobachters befindet, so daß das Licht durch die Öffnung scheint, welche dem Beobachter zum Durchsehen dient. Was jetzt im Gesichtsfelde erleuchtet ist, ist der Kreis, den der Beobachter von der Netzhaut übersehen kann.

Ich empfehle diesen Weg, um bei den verschiedenen Combinationen ebener und gekrümmter Spiegel, convexer und concaver Linsen in den Augenspiegeln sich die Wirkungen klar zu machen, ohne daß man sich auf verwickelte geometrische Constructionen einzulassen braucht, die den Ungeübten leicht mehr verwirren als aufklären.

2) Was die Wirkung der in diesem Paragraphen beschriebenen Beleuchtungsweisen betrifft, so ordnet sich deren Wirkung leicht unter die hier aufgestellte Regel. Man erinnere sich daran, daß, wie die tägliche Erfahrung lehrt und eine einfache Construction des Ganges der Lichtstrahlen bestätigt, das Zerstreuungsbild eines fernen Gegenstandes nicht das scharfe Bild eines deutlich gesehenen näheren Gegenstandes bedecken kann, wohl aber das Zerstreuungsbild eines näheren Gegenstandes das scharfe Bild eines fernen. Bei dem Versuche mit dem durchbohrten Spiegel bedeckt das Zerstreuungsbild der Öffnung, durch welche der Beobachter blickt und welche sich möglichst nahe vor dem beobachtenden Auge befinden muß, das entferntere, vielleicht deutlich gesehene Bild der Lichtflamme. Wenn man keinen Spiegel anwendet, sondern der Beobachter dicht an der Flamme vorbei nach dem beobachteten Auge sieht, erscheinen diesem Auge die Flamme und das Auge des Beobachters nahe neben einander, und sobald das beobachtete Auge nicht scharf für sie accommodirt ist, fließen ihre Zerstreuungskreise in einander. Bei der Beleuchtung mit einer unbelegten Glasplatte können beide Bilder scharf sein, sowohl das des Lichts, wie das der Pupille des Beobachters. Ersteres wird von der Platte gespiegelt, letzteres durch die Platte gesehen, so daß beide auf einander fallen. Der Beobachtete kann deshalb selbst am leichtesten die Glasplatte so stellen, daß dem Beobachter sein Auge leuchtend erscheint. Er muß nur darauf achten, daß ihm das Auge des Beobachters von dem Spiegelbilde der Flamme gedeckt erscheine.

Ein solches Reprocitätsgesetz, wie wir es eben dafür aufgestellt haben, daß überhaupt Licht von einem leuchtenden zu einem zu beleuchtenden Punkte hin und her gehe; läßt sich auch für die Helligkeit des hin und zurück gelangenden Lichts aufstellen. Wir erinnern in dieser Beziehung zunächst an folgendes

Allgemeines Gesetz der Beleuchtung.

Wenn sich in einem durchsichtigen Medium zwei verschwindend kleine Flächenelemente von der GröÙe a und b in der gegenseitigen Entfernung r befinden, ihre Normalen mit der sie verbindenden geraden Linie beziehlich die Winkel α und β bilden, und a mit der Helligkeit H Licht aussendet, so ist die Lichtmenge L , welche von a auf b fällt,

$$L = \frac{H \cdot ab \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta}{r^2} \dots \dots \dots 1).$$

Ebenso groß ist auch die Lichtmenge, welche von b auf a fallen würde, wenn b mit der Helligkeit H Licht aussendete.

Satz III.

In einem centrirten Systeme von brechenden Kugelflächen sei n_1 das Brechungsverhältniß des ersten, n_2 das des letzten brechenden Mittels. In dem ersten befinde sich senkrecht gegen die Axe des Systems gerichtet und der Axe nahe ein Flächenelement α , in dem letzten ein eben solches β . Wenn α die Helligkeit $n_1^2 \cdot H$ hat, und β die Helligkeit $n_2^2 \cdot H$, so fällt ebenso viel Licht von α auf β , wie von β auf α .

Um den Beweis nicht complicirter zu machen, als unsere beabsichtigten Anwendungen verlangen, vernachlässigen wir dabei die Schwächungen, welche die Strahlen an den brechenden Flächen durch Reflexion erleiden, und nehmen an, daß die Einfallswinkel der Strahlen an den brechenden Flächen immer klein genug sind, um ihre Cosinus gleich 1 setzen zu können, obgleich der Satz sich auch in 171 allgemeinerer Form beweisen läßt.

1) Wenn β nicht am Orte des Bildes von α liegt.

Es sei AC die optische Axe des brechenden Systems, F sein erster, G sein zweiter Hauptpunkt, α das erste Flächenelement, welches wir, da es verschwindend klein sein soll, nur durch einen Punkt in

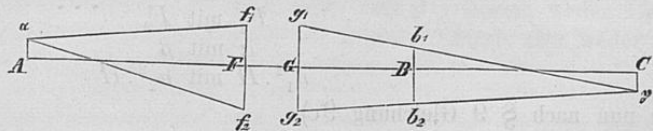


Fig. 107.

der Zeichnung dargestellt haben, γ sein Bild, $f_1 f_2$ der Durchschnitt des einfallenden Strahlenbündels in der ersten Hauptebene, $g_1 g_2$ derselbe in der zweiten. Die Grundfläche des Strahlenbündels in der ersten Hauptebene ist congruent derselben in der zweiten; ihre gemeinsame GröÙe sei Φ . Das zweite Flächenelement β liege in der Ebene, welche in B senkrecht gegen die optische Axe steht, und $b_1 b_2$ sei der Durchschnitt des Strahlenbündels in dieser Ebene. Die Fußspunkte der von α und γ auf die optische Axe gefällten Lothe seien A und C .

Die Lichtmenge, welche von α auf die Grundfläche des Strahlenkegels $f_1 f_2$ fällt, ist nach Gleichung 1) gleich

$$\frac{n_1^2 \cdot H \cdot \alpha \cdot \Phi}{AF^2}$$

wenn $n_1^2 \cdot H$ die Helligkeit von α ist. Dieselbe Lichtmenge fällt auch auf die weiteren Querschnitte des Strahlenkegels in $g_1 g_2$ und $b_1 b_2$. Die Lichtmenge nun, welche in der letzteren Ebene auf das Elächenelement β fällt, verhält sich zu der ganzen Lichtmenge, welche die Fläche $b_1 b_2$ trifft, wie die Oberfläche von β zu dem Querschnitt des Strahlenkegels in $b_1 b_2$, den wir mit Ξ bezeichnen wollen. Es ist also die ganze Lichtmenge X , welche von α auf β fällt, gleich

$$X = \frac{\Phi}{\Xi} \cdot \frac{n_1^2 \cdot H \cdot \alpha \cdot \beta}{AF^2} \dots \dots \dots 2).$$

Nun ist aber ferner

$$\frac{\Phi}{\Xi} = \frac{(g_1 g_2)^2}{(b_1 b_2)^2} = \frac{CG^2}{BC^2}.$$

Dieser Werth in die Gleichung 2) gesetzt, giebt

$$X = n_1^2 \cdot H \cdot \alpha \cdot \beta \frac{CG^2}{BC^2 \cdot AF^2}.$$

Da nun nach § 9 Gleichung 8a)

$$\frac{GC}{AF} = \frac{F_2}{AF - F_1},$$

wo F_1 und F_2 die beiden Brennweiten des Systems sind, so ist

$$X = H \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \frac{n_1^2 \cdot F_2^2}{[AF \cdot F_2 + BG \cdot F_1 - AF \cdot BG]^2} \dots \dots 2a).$$

Ebenso bekommt man nun für die Lichtmenge Y , welche von β , wenn es mit der Helligkeit $n_2^2 \cdot H$ leuchtet, auf α fällt, den Ausdruck

$$Y = H \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \frac{n_2^2 \cdot F_1^2}{[AF \cdot F_2 + BG \cdot F_1 - AF \cdot BG]^2} \dots \dots 2b).$$

172 Da auf beiden Seiten Alles symmetrisch ist, braucht man, um dies zu erhalten, in dem Ausdrücke für X nur zu vertauschen

- AF mit BG
- F_1 mit F_2
- α mit β
- $n_1^2 \cdot H$ mit $n_2^2 \cdot H$

Da nun nach § 9 Gleichung 9c)

$$n_1 \cdot F_2 = n_2 \cdot F_1$$

so folgt aus 2a) und 2b)

$$X = Y,$$

was zu beweisen war.

2) Wenn β an den Ort des Bildes von α fällt.

Wir nehmen zuerst an, dafs β in Größe und Lage dem Bilde von α genau entspreche, dann entspricht auch α genau dem Bilde von β . Alles Licht also, was von α aus durch die brechenden Flächen dringt, fällt auf β , umgekehrt, alles, was von β durch die brechenden Flächen dringt, fällt auf α .

Wir behalten die Bezeichnungen der Figur 107 bei, nur dafs wir uns das Element β jetzt in γ liegend denken.

Es ist dies von α bei der Helligkeit $n_1^2 \cdot H$ auf die brechenden Flächen und also auch auf β fallende Lichtmenge X wiederum

$$X = n_1^2 \cdot H \cdot \frac{\alpha \cdot \Phi}{A F^2} \dots \dots \dots 3a),$$

und die von β bei der Helligkeit $n_2^2 \cdot H$ auf die brechenden Flächen und also auch auf α fallende Menge Y

$$Y = n_2^2 \cdot H \cdot \frac{\beta \cdot \Phi}{G C^2} \dots \dots \dots 3b),$$

Da nun β das Bild von α sein soll, so ist nach § 9 Gleichung 8b), indem man berücksichtigt, daß α und β ähnliche Flächen, also dem Quadrate ihrer entsprechenden Lineardimensionen proportional sind,

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{F_2^2}{(G C - F_2)^2},$$

und da ferner nach § 9 Gleichung 8a)

$$G C - F_2 = \frac{G C \cdot F_1}{A F},$$

so folgt

$$\frac{\alpha \cdot F_1^2}{A F^2} = \frac{\beta \cdot F_2^2}{G C^2},$$

und da $F_1 : F_2 = n_1 : n_2$, so folgt

$$\frac{\alpha \cdot n_1^2}{A F^2} = \frac{\beta \cdot n_2^2}{G C^2} \dots \dots \dots 3c).$$

Aus 3a), 3b) und 3c) zusammen folgt endlich

$$X = Y,$$

was zu beweisen war.

Sollte eines der beiden Elemente, z. B. α , größer sein als das Bild von β , so würden die Theile von α , welche nicht zum Bilde von β gehören, weder Licht auf β werfen, noch von β empfangen können, es würde dadurch also weder X noch Y geändert werden und unser Satz richtig bleiben.

Zusätze. 1) Die ganze Beweisführung läßt sich ebenso gut auf centrirte Systeme 173 brechender und spiegelnder Kugelflächen anwenden.

2) Die leuchtende und beleuchtete Fläche brauchen auch nicht verschwindend klein zu sein, wenn sie nur klein genug sind, daß die Cosinus der Einfallswinkel der Strahlen an den brechenden Flächen sich nicht merklich von 1 unterscheiden. Denn da für jedes Paar verschwindend kleiner Flächenelemente der beiden Flächen der Satz gilt, so gilt er auch für die ganzen Flächen.

Wenn wir den eben bewiesenen Satz auf die Verhältnisse des Augenleuchtens anwenden und das eine Flächenelement in die Netzhaut des beobachteten Auges verlegen, statt des anderen die Pupille des Beobachters setzen, übrigens den Unterschied der Brechung zwischen wässriger und gläserner Feuchtigkeit vernachlässigen und zwischen den beiden Augen ein beliebiges System centrirter brechender oder spiegelnder kugeligter Flächen angebracht denken, so können wir den Satz folgendermaßen aussprechen:

Satz IIIa.

Die Menge Licht, welche von einem Flächenelemente der Netzhaut des beobachteten Auges in das Auge des Beobachters fällt, gleich der Helligkeit, mit der das Netzhautelement von der Lichtquelle erleuchtet wird, multiplicirt mit der Menge Licht, welche von der Pupille des Beobachters, wenn sie die Helligkeit = 1 hätte auf das Netzhautelement fallen würde.

H sei die Helligkeit, mit der das Netzhautelement von der Lichtquelle erleuchtet wird, und k die Lichtmenge, welche von der Pupille des Beobachters wenn diese mit der Helligkeit 1 leuchtet, auf das Netzhautelement fällt, so wird nach dem eben bewiesenen Satze k auch gleich der Lichtmenge sein, welche dem Netzhautelemente, wenn dieses die Helligkeit 1 hätte, in die Pupille des Beobachters gelangte. Da dieses nun aber die Helligkeit H hat, so ist die Lichtmenge, welche von diesem Elemente wirklich in die Pupille des Beobachters gelangt, $H \cdot k$, wie es unser Satz ausspricht.

Es ist dieser Satz gleichsam die weitere Ausführung des Satzes II, in dem hier die quantitativen Bestimmungen gegeben werden, welche dort fehlten. Zunächst ist er nur erwiesen für Augenspiegel, an deren brechenden und spiegelnden Flächen die Lichtstrahlen nahe senkrecht einfallen und keinen erheblichen Verlust erleiden. Es ist aber leicht einzusehen, daß er auch für die Beleuchtung des Auges mit schiefgestellten spiegelnden Glasplatten gilt, da unpolarisirtes Licht, vom Beobachtenden zum beobachteten Auge durch eine solche Platte gehend, eben so stark geschwächt wird, als wenn es den umgekehrten Weg verfolgte.

Satz IV.

Wenn ein Beobachter durch ein centrirtes System brechender und spiegelnder Kugelflächen ein scharfes Bild eines leuchtenden Gegenstandes erblickt und wir den Verlust von Licht an den brechenden und spiegelnden Flächen vernachlässigen können, so erscheint jede Stelle des Bildes dem Beobachter ebenso hell, wie ihm die entsprechende Stelle des Gegenstandes ohne optische Instrumente gesehen erscheinen würde, so oft die ganze Pupille des Beobachters von den Strahlen getroffen wird, die von einem einzelnen Punkte jener Stelle ausgehen. Ist diese letztere Bedingung nicht erfüllt, so verhält sich die Helligkeit des optischen Bildes zu der Helligkeit des frei gesehenen Gegenstandes, wie der von Strahlen jenes leuchtenden Punktes getroffene Flächenraum der Pupille des Beobachters zur ganzen Pupille.

Wenn das Auge direct oder durch ein centrirtes optisches System ein scharfes Bild eines Gegenstandes sieht, so können wir das Auge mit dem vorgesetzten optischen Systeme zusammen wiederum als ein optisches System betrachten, welches ein Bild des Gegenstandes auf der Netzhaut entwirft. Es sei a ein Flächenelement des Gegenstandes, b sein Bild auf der Netzhaut. So viel Licht von a nachgeht, würde auch nach Satz III dieses Paragraphen von b nach a gehen, wenn die Netzhautelemente b die Helligkeit $\frac{(n_2)^2}{(n_1)^2} \cdot H$ ertheilt würde. In diesem Ausdruck

ist H die Helligkeit des Elements a , n_1 das Brechungsverhältniß des Mediums, in dem sich a befindet, n_2 das des Glaskörpers. Es läßt sich aber leicht berechnen, wie viel Licht von b nach a unter diesen Umständen gehen würde. Ist q der Querschnitt des von einem Punkte von b nach einem Punkte von a gehenden Strahlenbündels in der Pupille, so ist die von b nach a gehende Lichtmenge M gleich der von b nach q gehenden, und diese ist

$$M = \frac{n_2^2}{n_1^2} \cdot H \cdot \frac{q b}{R^2},$$

worin R den Abstand der Pupille von der Netzhaut bedeutet. Streng genommen würde hier unter q der Querschnitt des Strahlenbündels in dem von der Linse entworfenen Bilde der Pupille, und unter R die Entfernung dieses Bildes von der Netzhaut zu verstehen sein. In diesem Ausdrücke für die Lichtmenge, welche von dem leuchtenden Flächenelemente H in das Auge fällt, sind zwei Größen, welche von der Beschaffenheit des dem Auge vorgesetzten optischen Systems abhängen, nämlich q der Querschnitt des Strahlenbündels in der Pupille und b die Größe des Bildes auf der Netzhaut.

Die Helligkeit dieses Bildchens hängt nun aber nicht nur von der einfallenden Lichtmenge ab, sondern auch von der Größe der Fläche b , über welche die Lichtmenge ausgebreitet wird, und ist der letzteren umgekehrt proportional. Setzen wir als Einheit der Beleuchtungsstärke die Lichtmenge, welche die Einheit der Fläche trifft, so ist die Beleuchtungsstärke J des Netzhautelements b

$$J = \frac{M}{b} = \frac{n_2^2}{n_1^2} \cdot H \cdot \frac{q}{R^2},$$

in welchem Ausdrücke nur noch q von der Beschaffenheit des optischen Systems abhängig ist. Sieht das Auge frei den Gegenstand an, so füllt das Strahlenbündel die ganze Pupille, deren Querschnitt Q sei, und die Beleuchtungsstärke wird

$$J = \frac{(n_1)^2}{(n_2)^2} \cdot H \cdot \frac{Q}{R}.$$

Größer als Q kann q niemals werden; dieser letztere Ausdruck ist also das Maximum der Helligkeit; er stellt die natürliche Helligkeit des Bildes dar. Die Helligkeit ausgedehnter Flächen kann durch optische Instrumente nie größer, nur kleiner werden, wenn q kleiner als Q , und verhält sich dann zur natürlichen Helligkeit wie q zu Q .

Zusätze. 1) Nur wenn wir verschwindend kleine leuchtende Punkte durch optische Instrumente betrachten, deren Bild auch bei den stärksten Vergrößerungen nur die Ausdehnung der kleinsten Zerstreungskreise auf der Netzhaut bedeckt, also immer dieselbe Flächenausdehnung behält, können optische Instrumente die Helligkeit vergrößern. Dies geschieht z. B. für die Fixsterne, und deshalb können auch Fixsterne durch stark vergrößernde Fernrohre mit großen Aperturen bei Tage sichtbar gemacht werden. Die scheinbare Helligkeit des Fixsterns steigt proportional der Lichtmenge, welche das Instrument in seinen Focus vereinigt, während die Helligkeit des Himmelsgewölbes im Fernrohre nicht vermehrt wird

2) Auch wenn Zerstreungsbilder einer leuchtenden Fläche von gleichmäßiger Helligkeit im Auge entworfen werden, kann die Helligkeit des Netzhautbildes nur gleich, nie größer werden als die Helligkeit bei freier Betrachtung der Fläche. Der Beweis läßt sich ganz so führen wie für scharf gesehene Bilder, da Satz III für scharfe Bilder und

für Zerstreungsbilder gleichmäfsig gilt. Auch hier ist die Helligkeit proportional dem Querschnitt des Strahlenbündels in der Pupille, welches von dem entsprechenden Punkte der Netzhaut bis nach der leuchtenden Fläche gelangen kann.

Ich erlaube mir zu bemerken, dafs gegen die hier entwickelten Grundsätze der Helligkeit dioptrischer und katoptrischer Apparate noch oft gesündigt wird. Man findet noch oft die irrige Meinung ausgesprochen, dafs, wenn man Licht durch Sammellinsen oder Hohlspiegel in das Auge, u. s. w. fallen läfst, man dadurch nicht blos die scheinbare Gröfse der leuchtenden Fläche, sondern auch ihre scheinbare Helligkeit vermehren könne. Der Vermehrung des in das Auge fallenden Lichts, welche durch solche Mittel erreicht werden kann, entspricht stets eine entsprechende Vergrößerung des Bildes, so dafs das Bild eben nur gröfser, nicht heller wird. Durch kein optisches Instrument kann man die Helligkeit einer leuchtenden Fläche von erkennbaren Dimensionen für das Auge gröfser machen, als sie dem blofsen Auge erscheint. Ebenso wenig kann eine beleuchtete Fläche jemals eine gröfsere Helligkeit bekommen, als die leuchtende hat.

Satz V.

Allgemeines Verfahren, die Helligkeit zu bestimmen, mit welcher dem Beobachter durch einen Augenspiegel eine Stelle der Netzhaut des beobachteten Auges erscheint.

a) Wenn der Verlust, den die einzelnen Strahlen an den brechenden und reflectirenden Flächen erleiden, vernachlässigt werden kann. Es sei x ein Punkt an der betreffenden Stelle der Netzhaut; wir haben zu untersuchen, wie das Strahlenbündel verläuft, welches von x nach der Pupille desselben Auges geht. Nach Satz I und II muß ein Theil dieses Strahlenbündels zum leuchtenden Körper, ein anderer zur Pupille des Beobachters gehen. Es sei P der Querschnitt der Pupille des beobachteten Auges, p in dieser Pupille der Querschnitt desjenigen Theils des Strahlenbündels, welches zum leuchtenden Körper zurückgelangt, H die Helligkeit, welche der betreffenden Netzhautstelle zukommen würde, wenn das beobachtete Auge, frei nach dem leuchtenden Körper blickend, auf ihr ein Bild dieses Körpers entwürfe. Wir können diese die normale Helligkeit nennen. Sie hängt natürlich wesentlich von der Structur der Netzhaut ab, ferner von der Helligkeit des leuchtenden Körpers und der Weite der Pupille P . Bei Anwendung des Augenspiegels muß nothwendig die wirkliche Helligkeit der Netzhautstelle kleiner werden, nämlich

$$\frac{p}{P} \cdot H.$$

Weiter ermittle man den Querschnitt q , den der Theil des von x ausgegangenen Strahlenbündels, welcher in die Pupille des Beobachters gelangt, in dieser Pupille hat, deren ganzer Flächeninhalt Q sei, so ergibt sich schliefslich für die Helligkeit der Netzhautstelle, wie sie dem Beobachter erscheint,

$$\frac{q \cdot p}{Q \cdot P} \cdot H.$$

b) Wenn die Strahlen durch Spiegelung oder Brechung einen merklichen Verlust erleiden. Unter den bisher construirten Formen der Augenspiegel kommt ein solcher nur bei dem von mir angegebenen mit unbelegten spiegelnden Platten vor. Das vom Auge zum leuchtenden Körper gehende Strahlenbündel wird in diesem Falle und allen ähnlichen ebenso viel verlieren als die vom Lichte wirklich zum Auge gehenden Strahlen. Man braucht also auch nur den

Verlust des ersteren zu berechnen. Es möge von einem Strahl, der vom Licht zum beobachteten Auge geht, und dessen Intensität 1 ist, α im Auge ankommen, und von einem eben solchen Strahle, der vom beobachteten Auge ausgeht, β in dem des Beobachters ankommen, dann müssen wir den obigen Ausdruck für die Helligkeit noch mit α und β multipliciren; er wird also

$$\frac{\alpha \cdot \beta \cdot p \cdot q}{P \cdot Q} H.$$

Durch die in den vorstehenden Sätzen vollzogene Umkehr des Problems von der Beleuchtung des Auges haben wir die Untersuchung der Helligkeit der Bilder für jeden Fall auf die Bestimmung des Ganges eines einzigen Strahlenbündels reducirt, während es sonst nöthig war, die Helligkeit einer einzelnen Netzhautstelle aus der Helligkeit aller über einander gelagerten Zerstreungskreise, welche den einzelnen Punkten der Lichtquelle entsprechen, durch Summation zu bestimmen. Auch glaube ich, daß die Sache dadurch der Anschauung zugänglicher wird. Den Gang der Strahlen von einem Netzhautpunkte durch die verhältnißmäßig einfachen optischen Systeme der Augenspiegel, von denen eines zur Beleuchtung, eines zur Beobachtung dient, einzeln genommen kann man sich leicht veranschaulichen, während die ganze Übersicht des Ganges der Lichtstrahlen von der Lichtquelle bis zum Auge des Beobachters meist deshalb schwierig wird, weil auf der Netzhaut eine unendliche Zahl in einander greifender Zerstreungskreise der Punkte der Lichtquelle und der Pupille des Beobachters entstehen.

Satz VI.

Die Mittel, ein deutliches Bild des Augenhintergrundes zu erhalten.

A Fig. 108 sei das beobachtete Auge, *a* ein Punkt seiner Netzhaut, dessen Bild von den Augenmedien in *b* entworfen wird, in der Entfernung, wo das beobachtete Auge

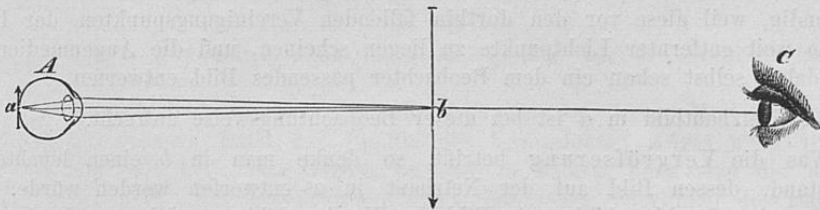


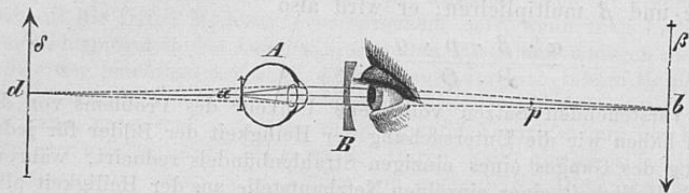
Fig. 108.

deutlich sieht. Die beiden Pfeile, welche bei *a* und *b* gezeichnet sind, entsprechen der Größe der zusammengehörigen Bilder. Das Bild der Netzhautstelle ist vergrößert und umgekehrt. Ein Beobachter, welcher ohne weitere Hülfsmittel dies Bild der Netzhaut in *b* sehen wollte, müßte also noch weiter entfernt vom Auge *A*, etwa in *C* sich befinden, so daß die Entfernung *Cb* wieder gleich der Sehweite des Beobachters würde. Hierbei würde aber das von der Pupille des beobachteten Auges begrenzte Gesichtsfeld des Beobachters so klein sein, daß er schwerlich etwas erkennen könnte.

Es sind bisher zwei Hauptmethoden angewendet worden, um die Lage des Bildes *b* dem Beobachter bequemer zu machen. Bei der einen wird ein virtuelles aufrechtes Bild der Netzhaut, bei der anderen ein reelles umgekehrtes entworfen.

A. Darstellung der Netzhaut im virtuellen aufrechten Bilde.

Man wendet dazu eine Concavlinse B in *Fig. 109* an, deren Brennweite Bp kleiner ist als die Entfernung des Punktes b von ihr. Eine solche macht die von



177

Fig. 109.

A nach b hin convergirenden Lichtstrahlen wieder divergent, so daß sie von einem scheinbar bei d im Rücken des beobachteten Auges gelegenen Punkte zu kommen scheinen. Die Pfeile bezeichnen wieder Lage und GröÙe der Netzhautstelle und ihrer Bilder.

Nennen wir p die (negative) Brennweite der Concavlinse, α die Entfernung Bb , γ die Entfernung dB , so ist nach § 10 Gleichung 14)

$$\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{p};$$

γ muß gleich der Sehweite des Beobachters sein, wenn er das bei d entworfene Bild der Netzhaut deutlich sehen soll; α hängt von der Accommodationsweite Ab des beobachteten Auges und der Entfernung A von B ab. Hat man den Werth beider GröÙen festgestellt, so kann man aus der gegebenen Gleichung den Werth von p berechnen, welcher gewählt werden muß, um deutliche Bilder zu geben.

Wären beide Augen für unendliche Ferne accommodirt, also $\alpha = \gamma = \infty$, so würde auch $p = \infty$ werden müssen, d. h. es wäre gar keine Linse nothwendig.

Auch für die seitlich gelegenen Theile der Netzhaut ist gewöhnlich keine Linse nothwendig, weil diese vor den dorthin fallenden Vereinigungspunkten der Lichtstrahlen weit entfernter Lichtpunkte zu liegen scheinen, und die Augenmedien von ihnen daher selbst schon ein dem Beobachter passendes Bild entwerfen.

Das Netzhautbild in d ist bei dieser Beobachtungsweise aufrecht.

Was die Vergrößerung betrifft, so denke man in b einen leuchtenden Gegenstand, dessen Bild auf der Netzhaut in a entworfen werden würde. Die rückkehrenden Strahlen bilden ein Bild des Netzhautbildes, welches nach den vorher auseinandergesetzten Grundsätzen des Augenleuchtens dem leuchtenden Gegenstande in b congruent ist. Nennt man β die GröÙe des leuchtenden Gegenstandes und des ihm gleichen Bildes in b , δ die des vom Beobachter gesehenen Bildes in d , so ist

$$\frac{\beta}{\delta} = \frac{\alpha}{\gamma}.$$

Als Maß für die scheinbare GröÙe des gesehenen Bildes können wir seine GröÙe dividirt durch seine Entfernung von dem sehenden Auge gebrauchen. Befindet sich das Auge des Beobachters dicht hinter dem Concavglase, so wäre die scheinbare GröÙe des Bildes

$$\frac{\delta}{\gamma} = \frac{\beta}{\alpha}.$$

Nennen wir die Entfernung AB nun q , so ist die scheinbare Gröfse des Objects b für das Auge A

$$\frac{\beta}{\alpha + q},$$

also etwas kleiner als die des Bildes δ für den Beobachter. Ist die Sehweite des Auges A sehr viel gröfser als q , so kann man q gegen α vernachlässigen, und findet auch für das beobachtete Auge die scheinbare Gröfse des leuchtenden Gegenstandes gleich $\frac{\beta}{\alpha}$.

Die Netzhautbilder des beobachteten Auges erscheinen also bei dieser Anordnung dem Beobachter unter gleichem oder etwas größerem Gesichtswinkel als die entsprechenden Gegenstände dem beobachteten Auge.

Daraus ergibt sich nun leicht die Vergrößerung der Netzhauttheile des beobachteten Auges. Ist x die Gröfse des auf der Netzhaut in a entworfenen Bildes von β , und y der Abstand der Netzhaut vom hinteren Knotenpunkte des Auges, so verhält sich

$$\frac{x}{\beta} = \frac{y}{\alpha + q}$$

$$\frac{\beta}{\delta} = \frac{\alpha}{\gamma}. \quad \text{Beides multiplicirt giebt:}$$

$$\frac{x}{\delta} = \frac{y \cdot \alpha}{\gamma \cdot (\alpha + q)}.$$

y ist in LISTING's schematischem Auge gleich 15,0072 mm (oder 6,694 Par. Lin.), γ ist hier nach der bei der Berechnung von Vergrößerungen angenommenen Norm der Sehweite gleich 8 Zoll zu setzen. Daraus ergibt sich die Vergrößerung

$$\frac{\delta}{x} = 14,34 \frac{\alpha + q}{\alpha}.$$

Da q gegen α gewöhnlich sehr klein ist, können wir die Vergrößerung gleich $14\frac{1}{3}$ mal annehmen.

Das Gesichtsfeld, welches man übersieht, ist bei dieser Methode durch den undeutlich gesehenen Rand der Pupille des beobachteten Auges nicht scharf begrenzt. Um eine bestimmte Grenze passend zu wählen, kann man die nach dem Rande der Pupille des beobachteten Auges gezogenen Visirlinien des Beobachters nehmen, deren Kreuzungspunkt¹ im Mittelpunkt der Pupille des Beobachters liegt. Wenn man diese Visirlinien wie Lichtstrahlen behandelt, die von dem Mittelpunkte der Pupille des Beobachters ausgehen, findet man, daß das Gesichtsfeld des Beobachters auf der Netzhaut des beobachteten Auges dem Zerstreungsbilde entspricht, in welchem der Mittelpunkt der Pupille des Beobachters dort erscheint. Liegt dieser Mittelpunkt oder vielmehr sein durch die Concavlinse gesehenes Bild im ersten Brennpunkte des beobachteten Auges, so ist der Zerstreungskreis, wie im vorigen Paragraphen bei den entoptischen Erscheinungen nachgewiesen ist, ebenso groß wie die Pupille des beobachteten Auges. Meist wird aber das Auge des Beobachters sich dem beobachteten Auge nicht so weit nähern können, und dann wird der dem Gesichtsfelde gleiche Zerstreungskreis kleiner als die Pupille des beobachteten Auges werden, um so kleiner, je weiter der Beobachter sich entfernt.

¹ S. § 11, S. 115.

B. Darstellung der Netzhaut im reellen umgekehrten Bilde.

Die zweite Methode, das Bild der Netzhaut dem Beobachter bequem sichtbar zu machen, besteht darin, daß man nahe vor das beobachtete Auge eine Convex-

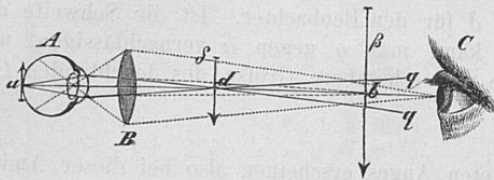


Fig. 110.

linse von kurzer Brennweite, 1 bis 3 Zoll, hält. Es sei wieder in Fig. 110 a ein beleuchteter Punkt der Netzhaut, b sein Bild außerhalb des beobachteten Auges A, B eine Convexlinse, auf welche die Strahlen fallen, ehe sie sich zum Bilde vereinigen. Diese entwirft ein kleineres und näheres

Bild, als b ist, in d, ebenfalls in umgekehrter Stellung, wie das in b. Das Auge des Beobachters befindet sich in C, so weit entfernt, als es zur Accommodation dieses Auges für das Bild nothwendig ist.

Ist p die positive Brennweite der Linse B, und wird die Entfernung Bb wieder mit α , Bd mit γ bezeichnet, so ist (Gleichung 14 auf S. 84)

$$\frac{\alpha}{\gamma} = \frac{\alpha + p}{p}.$$

179 Da α meist sehr viel größer ist als p , so wird γ nahehin gleich p , bleibt aber stets etwas kleiner.

Die Größe eines Netzhauttheiles im Punkte a sei x , die seines Bildes in b sei β , die des letzteren Bildes in d sei δ , und die Entfernung der Netzhaut vom hinteren Knotenpunkte des Auges sei y , die Entfernung des ersten Hauptpunktes der Linse B vom vorderen Knotenpunkte des Auges A sei q , so ist nach Gleichung 6 S. 67

$$\frac{x}{\beta} = \frac{y}{\alpha + q}$$

$$\frac{\beta}{\delta} = \frac{\alpha}{\gamma}. \quad \text{Beides multiplicirt giebt}$$

$$\frac{x}{\delta} = \frac{y \cdot \alpha}{\gamma \cdot (\alpha + q)} = \frac{y \cdot (\alpha + p)}{p \cdot (\alpha + q)}.$$

In der Regel stellt man die Linse B so, daß die Pupille von A in ihrem einen Hauptbrennpunkte liegt, dann wird also p nahehin gleich q , und die Vergrößerung

$$\frac{\delta}{x} = \frac{p}{y}.$$

Nehmen wir für y den Werth aus LISTING's schematischem Auge, so ergibt sich daß das Bild δ

2 mal vergrößert ist, wenn $p = 30$ mm (13,4''')

3 mal wenn $p = 45$ mm (20,1''')

4 mal wenn $p = 60$ mm (26,8''').

Dies ist die wirkliche Vergrößerung des objectiven Bildes. Die Vergrößerung für den Beobachter, wenn die Entfernung Cd gleich c gesetzt wird, ist

$$\frac{p}{yc} \times 8 \text{ Zoll.}$$

Das Gesichtsfeld sieht der Beobachter bei dieser Methode begrenzt durch die Pupille des beobachteten Auges, so lange die Convexlinse diesem Auge sehr nahe steht. Je weiter man die Convexlinse aber entfernt, desto stärker vergrößert erscheint die Pupille, bis sie endlich in die Nähe des Brennpunktes der Glaslinse kommt, dann verschwindet der Pupillarrand ganz aus dem Gesichtsfelde, und die Ausdehnung des letzteren wird nur noch von der Apertur dieser Linse bestimmt. Um die Größe des Gesichtsfeldes zu bestimmen, können wir wieder, wie in dem vorigen Falle, die Visirlinien des Beobachters wie Lichtstrahlen behandeln. Zunächst entwirft die Linse *B* ein Bild vom Kreuzungspunkt der Visirlinien in der Nähe ihres Brennpunktes, also nahehin in die Ebene der Pupille des beobachteten Auges. Von da divergiren die Visirlinien nach dem Hintergrund des beobachteten Auges hin. Da ihr Vereinigungspunkt in der Nähe des vorderen Knotenpunktes des beobachteten Auges liegen wird, oder vielleicht auch, je nach der Stellung der Linse *B*, ganz mit diesem Knotenpunkte zusammenfallen wird, so gehen die Visirlinien des Beobachters fast ungebrochen in das beobachtete Auge hinein. Ihr Gang ist in *Fig. 110* durch die punktirten Linien angedeutet. Ist die Apertur der Linse *B* gleich *u*, der Durchmesser des Gesichtsfeldes auf der Netzhaut gleich *v*, so ist

$$\frac{v}{y} = \frac{u}{p}.$$

Da man bei so kleinen Linsen recht gut die Apertur gleich der halben Brennweite machen kann, also $u = \frac{1}{2}p$, so wird alsdann

$$v = \frac{1}{2}y = 7\frac{1}{2} \text{ mm.}$$

Man übersieht also in diesem Falle ein größeres Gesichtsfeld, als es ohne künstliche Erweiterung der Pupille durch Atropin bei der Beobachtung mit Concavgläsern möglich ist.

VII.

Beleuchtungsapparate der Augenspiegel.

Nach den drei oben angeführten Methoden kann die Beleuchtung direct mit einem Lichte geschehen, oder mit einem durchbohrten undurchsichtigen Spiegel, oder mit unbelegten, also durchsichtigen Glasplatten als Spiegel.

Beleuchtung ohne allen Spiegel läßt sich nur für das umgekehrte Bild der Netzhaut anwenden, erfordert eine beträchtliche Geschicklichkeit, und wäre etwa nur da zu empfehlen, wo gerade kein anderes Instrument als eine einfache Convexlinse von kurzer Brennweite zur Hand ist. Die Ausführung der Beobachtung ist folgende. Der Beobachter sieht dicht neben einem Lichte vorbei und, durch einen Schirm gegen dessen directe Strahlen geschützt, wie es in *Fig. 104* abgebildet ist, nach dem beobachteten Auge hin, und bringt eine Convexlinse von 2 bis 4 Zoll Brennweite vor dieses Auge, wie in *Fig. 110*. Um die richtige Stellung zu finden, bringt man diese Linse zuerst ganz dicht vor das beobachtete Auge, und entfernt sie allmähig so weit, bis man die Pupille so stark vergrößert erblickt, daß ihre Ränder hinter denen der Linse verschwinden. Man erblickt dann ein umgekehrtes reelles Bild der Netzhaut bei *d* *Fig. 110*. Um die Helligkeit dieses Bildes zu bestimmen, verfolgen wir nach den Vorschriften von Nr. V dieses Paragraphen das Strahlenbündel, welches vom Netzhautpunkte *a* ausgeht; es wird von den brechenden

Flächen des Auges nach b hin, darauf von der Linse B nach d hin convergent gemacht, divergirt hinter d , und ist bei qq am Auge des Beobachters jedenfalls breit genug, das die Pupille des Beobachters ganz hineintauchen und also die Netzhautstelle mit ihrer ganzen wirklichen Helligkeit sehen kann. Diese wirkliche Helligkeit verhält sich zur normalen oder größtmöglichen Helligkeit nach V wie der Theil des Strahlenkegels qq , der die Flamme trifft, zum ganzen Strahlenkegel. Wenn nun die Flamme hinreichend groß und passend gestellt ist, so brauchen nur sehr wenig Strahlen des Kegels qq bei der Flamme vorbei zu gehen, um die Pupille des Beobachters auszufüllen. Dann wird die wirkliche Helligkeit der Netzhautstelle a sehr wenig kleiner sein als die normale Helligkeit, und die scheinbare Helligkeit für den Beobachter gleich der wirklichen.

Sehr viel bequemer wird die Beobachtung, wenn der Beobachter einen durchbohrten undurchsichtigen Spiegel anwendet, um das Auge A zu erleuchten. Es sei in *Fig. 111* wieder A das beobachtete, B das beobachtende Auge, C die

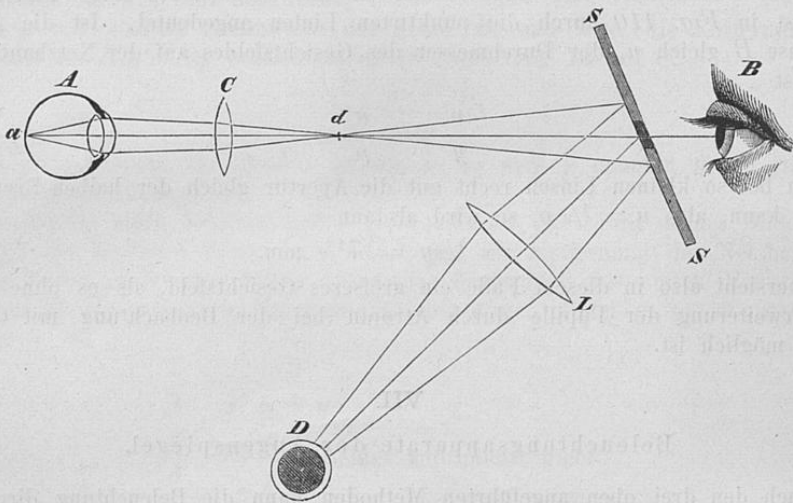


Fig. 111.

Convexlinse, und SS ein durchbohrter Spiegel. Von dem Netzhautpunkte a wird ein Bild bei d entworfen, welches der Beobachter durch die Öffnung des Spiegels hin betrachtet. Von dem ganzen von a kommenden Strahlenkegel geht nur der schmale Theil für die Beleuchtung verloren, welcher durch die Öffnung des Spiegels fällt, der ganze übrige Theil wird reflectirt und kann dem leuchtenden Körper zugelenkt werden. Zu dem letzteren Ende ist entweder der Spiegel SS ein Hohlspiegel (RUETE), oder aber ein Planspiegel (COCCIUS) oder Concavspiegel (ZEHENDER), neben dem man eine Linse L angebracht hat, welche die Strahlen auf den leuchtenden Körper vereinigt. Aus dieser Darstellung folgt schon nach Nr. V, das die Helligkeit der Erleuchtung nahezu die normale sein kann.

Das Gesichtsfeld für den Beobachter fanden wir bedingt durch die Größe der Linse C , wenn die Pupille im Brennpunkte dieser Linse steht. Es fragt sich, ein wie großer Theil der Netzhaut erleuchtet werden kann. Da alles Licht durch die Linse C in das Auge des Beobachters fällt, kann natürlich das beleuchtete Feld der Netzhaut nicht größer als das Zerstreungsbild der Linse C sein, welches selbe

Zerstreuungsbild auch, wie wir in VI gezeigt haben, dem Gesichtsfelde des Beobachters entspricht. Dies Zerstreuungsbild wird in allen Theilen sein Maximum der Helligkeit haben, wenn von jedem Theil der Linse C Licht auf jeden Theil der Pupille fällt. Diese Bedingung wird erfüllt sein, wenn die Pupille des beobachteten Auges gleich oder kleiner als das Bild ist, welches die Linse C in der Nähe der Pupille von dem Spiegel SS (oder der Linse L) entwirft, und von jedem Punkte dieses Spiegels, mit nothwendiger Ausnahme der mittleren Durchbohrung, Licht auf jeden Theil der Linse C fällt. Das Letztere wird aber wiederum geschehen, wenn die Linse C an dem Orte steht, wo der Spiegel das Bild der Lampenflamme D entwirft, und die Linse gleich oder kleiner als dieses Bild ist.

Um ein Beispiel solcher Construction zu geben, wollen wir annehmen, man verlange von dem Augenspiegel eine viermalige Vergrößerung und gebe dem entsprechend der Linse C eine Brennweite von 60 mm und eine Apertur von 30 mm. Der Spiegel, welcher ein durchbohrter Concavspiegel ohne Linse sein möge, muß soweit von dem Orte des Bildes d entfernt sein, daß der Beobachter sein Auge für das Bild accommodiren kann, also etwa 150 mm. Dann steht der Spiegel S von der Linse C 210 mm ab. Nach der Gleichung § 9 Nr. 14 b) wird sein von der Linse entworfenes Bild $= \frac{60}{150} = \frac{2}{5}$ seiner eigenen Größe sein. Da nun sein Bild der Pupille des beobachteten Auges gleich sein soll, und diese bei künstlicher Erweiterung bis auf 10 mm Durchmesser kommen kann, so brauchen wir dem Spiegel nur 25 mm Durchmesser zu geben.

Die Brennweite, welche wir dem Spiegel geben müssen, bestimmt sich nun durch die Bedingung, daß er ein Bild der Lampenflamme entwerfen muß, welches die Linse C deckt. Die Flamme größerer ARGAND'scher Brenner hat etwa 15 mm Durchmesser. Setzen wir in § 9 Gleichung 14 b) für β_1 den Durchmesser der Linse C 30 mm, für β_2 den Durchmesser der Lampenflamme 15 mm, für f_1 die Entfernung CS gleich 210 mm, so wird die Brennweite des Spiegels gefunden gleich 70 mm, und die Lampenflamme muß 105 mm vom Spiegel entfernt sein.

Wenn man nicht einen Concavspiegel, sondern einen ebenen Spiegel und eine convexe Glaslinse wie in *Fig. 111* anwenden will, muß man statt der Entfernung des Spiegels von der Linse C in der Rechnung die Summe der Entfernungen der beiden Linsen L und C von der Mitte des Spiegels nehmen.

Wenn der Beobachter den Spiegel und die Linse frei in der Hand hält, wird es natürlich nicht möglich sein, die Entfernungen dieser Theile, die der Rechnung zu Grunde gelegt sind, genau einzuhalten, und man wird auch bei ziemlich großen Abweichungen davon noch gute Bilder erhalten; dennoch ist es aber wohl für den Beobachter vortheilhaft, die besten Bedingungen für die Haltung seines Instruments zu kennen.

Wenn mit einem durchbohrten Spiegel und einem Concavglase beobachtet werden soll, sind die Verhältnisse ungünstiger. In *Fig. 112* ist wieder A das beobachtete, B das beobachtende Auge, S der Spiegel. Soll der Netzhautpunkt a beobachtet werden, so muß ein Theil des von ihm ausgehenden Strahlenkegels in das Auge des Beobachters fallen; wir wollen diesen Theil α nennen; ein anderer Theil $(1-\alpha)$ von dem Spiegel nach dem Lichte reflectirt werden. Ist also H die normale Helligkeit der Netzhautstelle a , so wird unter diesen Umständen nach Nr. V dieses Paragraphen $H \cdot (1-\alpha)$

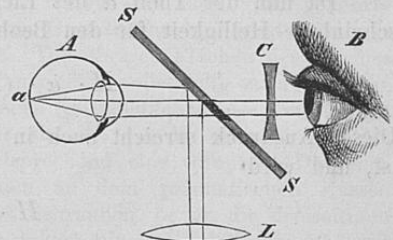


Fig. 112.

ihre wirkliche Helligkeit sein. Es sei wie früher J der Flächeninhalt der scheinbaren Pupille des beobachteten Auges A , R ebenderselbe von B , g die Entfernung

der beiden scheinbaren Pupillen von einander, und h die Accommodationsdistanz des Auges A , so ist der Querschnitt des Theils des Strahlenbündels, der in das Auge des Beobachters fällt,

$$\alpha \cdot J \cdot \frac{(h-g)^2}{h^2}.$$

Dieser Querschnitt wird in der Regel kleiner sein als R . Die scheinbare Helligkeit für den Beobachter wird dann

$$H \cdot \alpha \cdot (1-\alpha) \cdot \frac{J \cdot (h-g)^2}{R h^2}.$$

Die Größe $\alpha \cdot (1-\alpha)$ erreicht ihr Maximum, wenn $\alpha = 1/2$, sie wird alsdann gleich $1/4$. Die vortheilhafteste Anordnung in Bezug auf Helligkeit wird also die sein, wo die Hälfte des Strahlenkegels in das Auge des Beobachters fällt, die Hälfte zurückgeworfen wird. Man erreicht dann die Helligkeit

$$H \cdot \frac{J \cdot (h-g)^2}{4 R \cdot h^2}.$$

Um ein möglichst großes Feld in dem beobachteten Auge zu beleuchten, wende man eine große und nahestehende Lampenflamme an, oder wenn dies nicht zureicht, kann man bei L eine Sammellinse anbringen. Entwirft diese ein Bild der Flamme, welches die Pupille ganz deckt, so wird im Auge A das ganze Zerstreuungsbild der Linse L beleuchtet.

Für die Beobachtung mit Convexlinsen würde die Beleuchtung mit unbelegten Glasplatten nur $1/4$ der Helligkeit geben, welche man mit durchbohrten undurchsichtigen Spiegeln erreichen kann. Dagegen kann diese Beleuchtung bei der Beobachtung mit Concavlinen unter Umständen mit Vortheil angewendet werden.

Man stelle sich nämlich in *Fig. 112* den Spiegel SS vor als nicht durchbohrt und unbelegt, bestehend aus einer oder mehreren über einander gelegten Glasplatten. Es werde von jedem Lichtstrahl, der auf den Spiegel fällt, der Theil α durchgelassen, der Theil $(1-\alpha)$ zurückgeworfen. Ist H die normale Helligkeit der Netzhautstelle a , bei direct einfallendem Lichte, so giebt das von dem Spiegel reflectirte Licht nur die Helligkeit $H \cdot (1-\alpha)$. Der Querschnitt des Strahlenbündels, welches von a ausgeht, ist, da wo es auf B fällt, jetzt

$$J \cdot \frac{(h-g)^2}{h^2}.$$

Da nun der Theil α des Lichts durch die Platten hindurchgeht, so wird die scheinbare Helligkeit für den Beobachter:

$$H \cdot \alpha \cdot (1-\alpha) \cdot \frac{J \cdot (h-g)^2}{R \cdot h^2}.$$

Dieser Ausdruck erreicht auch in diesem Falle ein Maximum, wenn α gleich $1/2$ ist, und wird

$$H \cdot \frac{J \cdot (h-g)^2}{4 R \cdot h^2},$$

so lange

$$R < \frac{J \cdot (h-g)^2}{h^2}.$$

Diese Bedingung wird bei normalen Augen in der Regel erfüllt sein, da die Pupille J des von einer großen Lichtmenge getroffenen Auges A in der Regel enger sein wird als die Pupille R des Beobachters. Nur bei der künstlichen Erweiterung der Pupille J durch Atropin wird es nicht der Fall sein, und dann wird die scheinbare Helligkeit einfach gleich $\frac{1}{4}H$. Im letzteren Falle ist die Beobachtung mit einem durchbohrten Spiegel vortheilhafter, denn dort gilt der gegebene Ausdruck für die Helligkeit, so lange

$$R < \alpha \cdot \frac{J \cdot (h-g)^2}{h^2} \text{ und} \\ \alpha = \frac{1}{2}.$$

Wenn man normale Augen ohne Anwendung von Atropin untersucht, so würde man mittels beider Arten der Beleuchtung dieselbe Helligkeit erhalten können, wenn die Pupillen unbeweglich wären. Der belegte Spiegel wirft aber im Ganzen mehr Licht in das beobachtete Auge, blendet es stärker, und die Pupille verengt sich mehr, so daß unter diesen Umständen der unbelegte Spiegel ein größeres Gesichtsfeld und eine größere Helligkeit geben kann. Außerdem beleuchtet er die gesehene Netzhautfläche gleichmäßig, während beim durchbohrten Spiegel das Zerstreuungsbild der Durchbohrung die Beleuchtung ungleichmäßig macht. Endlich ist der Hornhautreflex bei dem unbelegten Spiegel weniger störend, weil das vom Spiegel reflectirte Licht mehr oder weniger polarisirt ist, und von der Hornhaut ohne Änderung seiner Polarisation zurückgeworfen nur zu einem sehr kleinen Theil durch die Platten zurückgeht,

Damit der unbelegte Spiegel die Hälfte des auffallenden Lichts zurückwerfe, kann man ihn entweder aus einer Glasplatte bestehen lassen, oder aus mehreren übereinandergelegten, muß aber den Einfallswinkel der reflectirten Lichtstrahlen dann passend wählen. Der passende Einfallswinkel für

eine Platte	ist	70°
drei Platten	„	60°
vier Platten	„	56°.

Formen der Augenspiegel.

1) Augenspiegel von HELMHOLTZ¹, mit reflectirenden Glasplatten und Concavlinen. Es ist dieser Augenspiegel auf *Fig. 113* im Querschnitt und natürlicher Größe, und in *Fig. 114* von vorn gesehen in halber Größe dargestellt, mit einer Modification der ursprünglichen Form, welche von dem Mechaniker REKOSS angebracht ist, nämlich mit zwei beweglichen Scheiben, welche die nöthigen Concavlinen enthalten. Die drei reflectirenden Glasplatten sind mit aa bezeichnet, sie bilden die nach vorn gekehrte Hypotenusenfläche eines prismatischen Kastens, dessen Grundfläche ein rechtwinkeliges Dreieck ist, wie man im Querschnitte *Fig. 113* sieht. Die übrigen Flächen des Prismas sind aus Metallplatten gebildet und, um das Licht möglichst vollständig zu absorbiren, innen mit schwarzem Sammet ausgelegt. Die kleinere Kathetenfläche des Prismas ist an dem Gestell des Augenspiegels so befestigt, daß sie sich um die optische Axe des Instruments drehen kann, und hat dieser Axe entsprechend eine Öffnung. Die Glasplatten werden durch einen rechtwinkligen Rahmen an dem prismatischen Kasten zurückgehalten; der Rahmen selbst ist durch zwei Schrauben ee an die dreiseitigen Grundflächen des Prismas befestigt. Die Glasplatten bilden einen Winkel von 56° mit der optischen Axe des Instruments.

¹ H. HELMHOLTZ, *Beschreibung eines Augenspiegels zur Untersuchung der Netzhaut im lebenden Auge*, Berlin 1852.

In das metallene Gestell des Instruments *gg* ist ferner eine Axe *dd* eingelassen, um welche sich zwei Scheiben *bb* und *cc* drehen. Jede dieser Scheiben hat fünf Öffnungen. In je vieren sind Concavgläser von 6 bis 13 Zoll Brennweite eingesetzt, die fünfte ist leer. Diese Öffnungen können nach einander in die optische Axe des Instruments gebracht werden, so daß der Beobachter, welcher sein Auge an das beckenförmige Ocularstück *B* anlegt, durch sie und die Glasplatten *aa* hindurchsieht. In *Fig. 113* ist die leere Öffnung der Scheibe *bb* und eine mit einer Linse versehene der Scheibe *cc* vorgeschoben. So kann der Beobachter eine beliebige von den acht Linsen oder zwei von ihnen gleichzeitig vor sein Auge bringen. Damit die Scheiben ihre Stellung nicht ohne Willen des Beobachters verändern, sind an ihrem Rande Grübchen angebracht, in welche sich die Enden zweier Federn *h* einlegen.

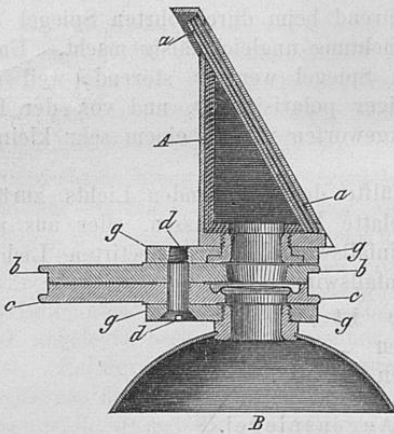


Fig. 113.

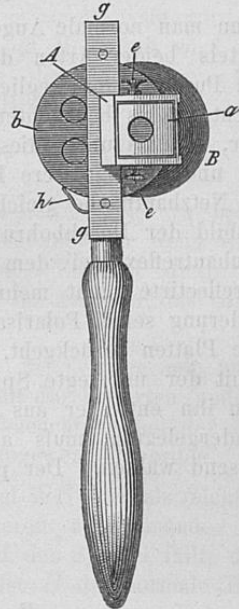


Fig. 114.

Für Beobachtungen mit Concavgläsern, also bei starker Vergrößerung, an Personen, deren Pupille nicht künstlich erweitert ist, und bei großer Empfindlichkeit des beobachteten Auges gegen Licht, finde ich unter den beweglichen Spiegeln diese erste Form des Augenspiegels aus den Gründen, welche ich oben bei der Theorie der Beleuchtung durch unbelegte Glasplatten angeführt habe, noch immer am vortheilhaftesten. Wenn ein gesundes Auge durch diesen Spiegel beobachtet wird, kann es die Erleuchtung Stunden lang, ohne geblendet zu werden, ertragen. Ich selbst habe oft 20 Studirenden hinter einander meine Netzhaut mit diesem Instrumente ohne Unbequemlichkeit gezeigt, während die Beleuchtung mit belegten Spiegeln nicht 5 Minuten ohne starke Blendung des Auges ertragen wird. Ich ziehe deshalb diesen Spiegel zu den meisten physiologischen Versuchen den anderen Formen vor. Für die augenärztlichen Untersuchungen dagegen wird ein größeres Gesichtsfeld und größere Helligkeit bei geringerer Vergrößerung meist vortheilhafter sein, und deshalb werden für dergleichen Beobachtungen meist belegte durchbohrte Spiegel mit Convexlinsen angewendet.

Will man den Spiegel gebrauchen, so setzt sich der Beobachter dicht vor den Beobachteten, und stellt an seiner Seite eine hell brennende Lampe auf. Ein undurchsichtiger Schirm wird so aufgestellt, daß er das Gesicht des Beobachteten beschattet.

Der Beobachter bringt zuerst den Spiegel, ohne hindurchzusehen, ungefähr in die richtige Stellung vor das Gesicht des Beobachteten, und dreht ihn so, daß die Glasplatten ihren hellen Reflex auf das zu beobachtende Auge werfen. Dann blickt er hindurch und erblickt nun die Netzhaut roth erleuchtet. Wenn er nicht sogleich sein Auge für die feineren Theile der Netzhaut accommodiren kann, dreht er mit dem Zeigefinger der Hand, welche das Instrument hält, eine der Scheiben, welche die Linsen enthält, bis er die passende Concavlinse gefunden hat.

Wenn die Beleuchtung der Netzhaut verschwindet, achte man nur auf den hellen Reflex der Glasplatten im Gesichte des Beobachteten und führe diesen wieder auf das Auge zurück.

2) Augenspiegel von RUETE¹, mit durchbohrtem Concavspiegel, auf Stativ dargestellt in *Fig. 115*. Auf einem runden Fusse von Holz ruht eine hohle Säule *a*, in deren Axenkanale sich ein runder Stab *b* von Holz befindet, der hoch und niedrig geschoben und durch eine Feder, die sich am unteren Ende desselben befindet, in jeder beliebigen Höhe festgestellt werden kann. Auf diesem Stabe sitzt ein Halbkreis von Messing *c*, der sich mit dem Stabe hoch und niedrig, rechts und links stellen läßt. In diesem Halbkreise ist ein in der Mitte durchbohrter Hohlspiegel *d* von etwa 3 Par. Zoll

Durchmesser und von einer Brennweite von etwa 10 Par. Zoll durch Schrauben, die je nach dem Bedürfnisse gelüftet oder stärker angezogen werden können, so befestigt, daß er um seine Horizontalaxe gedreht werden kann. In der Mitte der Säule *a* befinden sich zwei hölzerne Ringe *e* und *f*, welche sich um die Säule drehen lassen. Jeder Ring trägt einen horizontal auslaufenden Arm *g* und *h*; der Arm *g* trägt einen geschwärzten Schirm, der einestheils dazu dient, um das Licht der Lampe vom Beobachter abzuhalten, andernteils auch dazu, um, wenn es nöthig ist, das vom Spiegel in das beobachtete

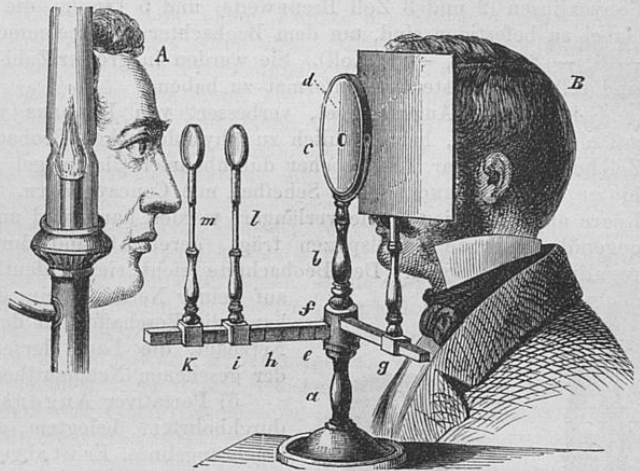


Fig. 115.

Augen fallende Licht abzuschwächen, was man dadurch bewirkt, daß man einen Theil des Spiegels durch den Schirm beschattet. Der Arm *h*, welcher in 12 Zolle eingetheilt ist, trägt zwei verticale Säulen, *i* und *k*, die rück- und vorwärts geschoben werden können; in jeder verticalen Säule steckt ein am unteren Ende mit einer Feder versehener Stift von Messing *l* und *m*, den man auf- und abwärts schieben kann, und der durch die Feder in jeder Höhe, die man ihm giebt, festgehalten wird. Auf diese Stifte steckt man je nach den Umständen concave oder convexe Gläser, welche die aus dem beobachteten Auge zurückkehrenden Lichtstrahlen zu einem deutlichen Bilde für den Beobachter vereinigen. *A* ist der Beobachtete, *B* der Beobachter. Die Zeichnung ergibt leicht das Übrige.

Für die Beobachtungen mit Concavlinen, die in der augenärztlichen Praxis allerdings wohl eine seltenere Anwendung finden, ist das Instrument nicht gut geeignet, weil sich die beiden Augen nicht hinreichend nähern können, und deshalb das Gesichtsfeld sehr klein wird. Für Beobachtungen mit Convexlinen dagegen, die ungeübten Beobachtern

¹ TH. RUETE, *Der Augenspiegel und das Optometer*. Göttingen 1852.

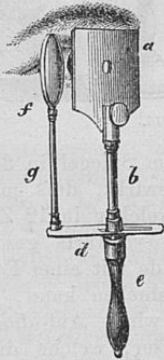
demonstrirt werden sollen, erscheint das Instrument bequem, namentlich, wenn man durch einen Assistenten den Kopf des Beobachteten so dirigiren läßt, daß seine Pupille in den Focus der Lichtstrahlen kommt; auch kann durch Anbringung einer zweiten convexen Ocularlinse (die dann aber wohl besser hinter dem Spiegel anzubringen wäre) eine Art kleinen Fernrohrs zusammengesetzt und eine stärkere Vergrößerung erreicht werden. Die Helligkeit des Instruments ist sehr groß. Gelegenheit, die Netzhautbilder zu beobachten, ist nicht gegeben.

n 3) In praktischem Gebrauche geblieben ist schliesslich von diesem Instrumente nur der Concavspiegel *d*, an einem kleinen Handgriff befestigt, den der Beobachter in der rechten Hand hält, und die Convexlinse *m*, die er zwischen Daumen und Zeigefinger der linken Hand nimmt, während er den kleinen Finger der linken Hand auf das Gesicht des Patienten stützt. Die Linse braucht er, wie S. 219 unten beschrieben ist. Den Convexspiegel hält er vor sein eigenes Auge, blickt durch die mittlere Öffnung und wendet ihn so, daß der Reflex des Lichtes auf die Linse und durch dieselbe auf das beobachtete Auge fällt

Von dieser Art ist der in der GRAEFESchen Klinik üblich gewordene kleinere LIEBREICHSche Augenspiegel mit durchbohrtem belegtem Concavspiegel, mit zwei Convexlinsen (2 und 3 Zoll Brennweite) und 5 Linsen, die hinter dem Spiegel in einer Gabel zu befestigen sind, um dem Beobachter die Accommodation zu erleichtern (+ 10, - 6, - 8, - 10, - 12 Zoll). Sie werden in großer Zahl fabrikmäßig dargestellt, und sind selbst in Westentaschenformat zu haben.

4) EPKENS' Augenspiegel, verbessert von DONDERS und VAN TRIGT¹, feststehend auf einem Gestell, hauptsächlich zu physiologischen Beobachtungen der Bilder und zum Zeichnen brauchbar. Ein ebener durchbohrter Glasspiegel reflectirt das Licht, und hat hinter sich die REKOS'schen Scheiben mit Concavgläsern. Das Licht scheint durch eine Röhre auf den Spiegel, die verlängert werden kann und an ihrem Ende zwei einander gegenüberstehende Metallspitzen trägt, deren Abstand durch eine Mikrometerschraube regulirt werden kann. Der Beobachtete sieht sie in deutlichem Spiegelbilde, und hat auf seiner Netzhaut ein deutliches Bild derselben. So kann die Beschaffenheit der optischen Bilder auf seiner Netzhaut, die Lage derselben und auch die Größe der gesehenen Netzhauttheile ermittelt werden.

186



187

Fig. 116.

5) Portativer Augenspiegel von COCCIUS,² mit durchbohrtem, belegtem, ebenem Spiegel mit einer Beleuchtungslinse. Er ist abgebildet in Fig. 116. Das Instrument besteht aus einem viereckigen Planspiegel *a* von 14 Par. Lin. Seite. Die Öffnung hat 2 Par. Lin. Durchmesser, und ihr vorderer, dem beobachteten Auge zugekehrter Rand ist etwas abgeschliffen. Der Spiegel ist in eine dünne Messingplatte gefaßt, welche an ihrem untern Ende in einen kleinen Fortsatz übergeht, der an der Stange *b* befestigt ist. Die Beleuchtungslinse hat 5 Zoll Brennweite; um sie aber auch mit anderen vertauschen zu können, ist sie in einen geschlitzten federnden Ring *f* eingesetzt, von der Stange *g* und dem geschlitzten Querbalken *d* getragen. Der letztere wird durch festes Anschrauben des Griffes *e* festgeklammert, um die Stellung der Linse gegen den Spiegel zu sichern, welche man gewählt hat. Auseinander genommen kann das Instrument in ein kleines Etui gelegt werden.

¹ VAN TRIGT, *Dissertatio de Speculo oculi*. Utrecht 1853. *Nederlandsch Lancet*. Ser. 3. Dl. II. 430. — Deutsch von SCHAUBURG, Lahr 1854.

² A. COCCIUS, *Über die Anwendung des Augenspiegels, nebst Angabe eines neuen Instruments*. Leipzig 1854.

Coccius bringt, wie Ruete, die Concavgläser wie die Convexgläser zwischen Spiegel und Licht an. Da das Erstere wegen der Reflexe unvortheilhaft ist, hat man später mehrere Hohlgläser in einem Schieberchen oder einzeln in Ringen an der Rückseite des Spiegels angebracht.

Wegen seiner Beweglichkeit ist dieser Spiegel für ärztliche Zwecke wohl brauchbarer, als der von Ruete, aber jedenfalls schwerer zu richten, als der Concavspiegel ohne Linse.

6) Portativer Spiegel von Zehender,¹ mit durchbohrtem convexen Metallspiegel und Beleuchtungslinse, mit ähnlicher Fassung, wie der von Coccius. Im Wesentlichen unterscheidet sich das Instrument von dem letzteren nur dadurch, dafs statt des ebenen Glasspiegels ein convexer Metallspiegel von 6 Zoll Radius angebracht ist. Indem man die convexe Linse dem convexen Spiegel näher oder ferner stellt, erhält man ein reflectirendes System von veränderlicher Brennweite, was man den Umständen anpassen kann. Ein wesentlicher Vortheil scheint mir noch in dem Umstande zu liegen, dafs der Spiegel von Metall gefertigt ist, und daher der Rand des Schlochs dünn, gut geschwärzt und ohne Licht reflectirende Unebenheiten ist. Vorher habe ich nachgewiesen, dafs bei den Beobachtungen mit dem durchbohrten Spiegel und der Concavlinse zur Erlangung der größten Helligkeit nur die Hälfte des von einem Punkte der Netzhaut ausgehenden Strahlenbündels in das Auge des Beobachters fallen darf, falls nicht die Pupille des beobachteten Auges den mehr als doppelten Flächeninhalt von der des Beobachters hat. Der Beobachter wird daher in der Regel sich einen Theil seiner Pupille mit dem Rande der Öffnung des Spiegels verdecken müssen, und einen Theil dieses Randes gerade vor dem Auge haben. Es ist daher vortheilhaft, an diesem Rande Alles zu vermeiden, was Licht reflectiren könnte, und das ist bei Zehenders Metallspiegeln viel besser erreicht als bei Coccius' Glasspiegeln.

7) Neuerdings ist von Loring-Wadsworth, Cohn, v. Wecker, Knapp, Landolt das System der Rekos'schen Scheiben sehr ausgebildet worden, indem bis zu 29 kleine Linsen von verschiedener Brennweite, theils in einer, theils in zwei hinter einander liegenden Scheiben sich vereinigen. Sie werden Refractions-Ophthalmoskope genannt, und dienen hauptsächlich dazu, die Sehweiten des beobachteten Auges zu kontrolliren.

Von den Beobachtungen, welche mit dem Augenspiegel an normalen Augen an zustellen sind, erwähne ich Folgendes. Der Grund des Auges erscheint bei starker Beleuchtung (mit belegten Spiegeln und Convexlinsen) roth, nur die Eintrittsstelle des Sehnerven zeichnet sich hellweifs ab. Man sieht auf dem rothen Grunde zunächst die Netzhautgefäße verlaufen, deren Stämme aus der Mitte des weissen Sehnerven hervortreten. Die Arterien sind durch ihre lichtere rothe Farbe und durch einen stärkeren Lichtreflex an ihrer Oberfläche zu erkennen. Zwischen den Netzhautgefäßen erscheint der Grund des Auges je nach der Menge des Pigments bald hellroth, bald braun, und man erkennt, namentlich an den mehr zur Seite gelegenen Theilen sehr häufig die Gefäße der Aderhaut, wie es in *Taf. II Fig. 1* dargestellt ist. Man sieht in der Mitte die Eintrittsstelle des Sehnerven; *aaa* sind Äste der Netzhautarterie, *bbb* der Netzhautvene, dazwischen sieht man die viel weiteren Gefäße der Aderhaut. Letztere sind nicht immer gleich deutlich; in den meisten Augen ist die Pigmentschicht über diesen Gefäßen so dünn, dafs sie sich dadurch von den stärker pigmentirten Zwischenräumen abheben.

Bei starker Beleuchtung zeigt der Augengrund keine auffallenden Unterschiede in der Helligkeit, mit Ausnahme der Eintrittsstelle der Sehnerven. Es scheint, dafs dabei verhältnismäfsig viel Licht durch die Pigmentschicht dringt, von den Gefäßen der Aderhaut und der Sclerotica reflectirt wird und wieder zurückkehrt. Dafs bei den meisten Augen ziemlich viel Licht durch die Augenhäute dringen kann, zeigt uns der Versuch (§ 10, S. 86), bei welchem das Netzhautbildchen im inneren Augenwinkel sichtbar wird, und ferner die entoptische Erscheinung der Aderfigur der Netzhaut mittels Lichts, welches die Sclerotica

¹ W. Zehender, *Gräfe's Archiv für Ophthalm.* 1854. I. S. 121.

durchdringt (s. S. 193). Dieser Theil des zurückkehrenden Lichts, welcher von der Reflexion in der Aderhaut und Sehhaut herrührt, bleibt nun wohl ziemlich gleich auf allen Stellen des Augengrundes, auch wenn die Helligkeit der Netzhaut selbst variiert.

Bei schwacher Beleuchtung (mit reflectirenden Glasplatten) erscheinen dagegen die Theile des Augengrundes in der Nähe des Sehnerven besonders hell, und die Helligkeit nimmt von hier aus im Allgemeinen nach den Rändern der Netzhaut hin gleichmäßig ab, nur die Stelle des directen Sehens zeichnet sich besonders durch geringe Helligkeit und eine mehr gelbliche Farbe vor ihrer Nachbarschaft aus, was bei der stärkeren Beleuchtung nicht der Fall ist. Der Grund davon ist wohl darin zu suchen, daß bei schwacher Beleuchtung nicht merklich viel Licht durch die Pigmentschicht hin und zurück geht, daher der wahrnehmbare Lichtreflex hauptsächlich von den Theilen der Netzhaut, namentlich ihren Gefäßen herrührt. Letztere fehlen an der Stelle des directen Sehens.

Die letztere Stelle zeigt bei beiden Beobachtungsweisen ein kleines liches Fleckchen von querovaler Form, welches COCCIUS, der es zunächst bemerkte, als den Reflex der Netzhautgrube bezeichnet, während DONDERS später direct nachwies, daß dieser kleine Lichtreflex die Stelle des directen Sehens einnimmt.

Man muß zu diesem Versuche einen ebenen Spiegel anwenden, hinter welchem eine Concavlinse steht (DONDERS-EPKENS oder HELMHOLTZ). Als Gesichtsubject benutze man eine Lichtflamme oder das Mikrometer an DONDERS' Instrumente. Das beobachtete Auge sieht das gewählte Object im Spiegelbilde; man Sorge, daß es sich gehörig dafür accommodiren könne, und lasse es einen bestimmten Punkt des Objects fixiren. Der Beobachter erblickt dann ein ganz scharf gezeichnetes umgekehrtes Bild des Objects auf der Netzhaut des beobachteten Auges und an der direct fixirten Stelle den Reflex der Netzhautgrube. Sollte dieser zu schwach sein, um von Anfang her wahrgenommen zu werden, so geschieht dies leichter, wenn der Beobachter den Beobachteten bald auf diesen, bald auf jenen Theil des Gesichtsubjects seinen Blick zu richten heißt. Der kleine Reflex wandert dann dem entsprechend auf dem Netzhautbilde umher.

Um die Genauigkeit des Netzhautbildes zu prüfen, ist das von DONDERS an dem Augenspiegel von EPKENS angebrachte Mikrometer zweckmäßig zu gebrauchen. Für meinen Spiegel wähle ich zu dem gleichen Zwecke als Gesichtsubject einen vor einem Lichte in horizontaler Richtung ausgespannten Faden. Von verticalen feinen Linien giebt mein Instrument nämlich wegen der mehrfachen reflectirenden Flächen mehrfache Bilder. Sobald das beobachtete Auge sich scharf für das betreffende Object accommodirt, erscheint es auch im Netzhautbilde ganz scharf. Sowie sich die Accommodation ändert, wird es verwaschen. Übrigens braucht man gar nicht so feine Objecte, um die Veränderung des Bildes bei der Accommodation zu sehen. Es genügt, wenn das beobachtete Auge nicht kurzsichtig ist, in der Ferne ein Licht aufzustellen, dessen Netzhautbild im beobachteten Auge man betrachtet, während dieses Auge abwechselnd nach einem fernen oder nahen Gesichtspunkte, die in gleicher Richtung liegen, hinblickt. Bei der Accommodation für die Ferne erscheint auch das Bild des fernen Lichts deutlich, bei der Accommodation für die Nähe wird es verwaschen. Meistens verschwinden dem Beobachter dabei auch die Netzhauttheile des beobachteten Auges, wenn er mit der Accommodation seines Auges der neuen Lage des Bildes nicht folgen kann, und er muß dann ein anderes Concavglas gebrauchen, um sich zu überzeugen, daß auf der deutlich gesehenen Netzhaut des beobachteten Auges ein undeutliches Bild des fernen Lichts entworfen sei. Der Versuch kann auch so abgeändert werden, daß das beobachtete Auge fortdauernd in die Ferne sieht, das Licht aber in die Nähe gebracht wird, damit sich der Beobachter überzeuge, daß von dem nahen Lichte ein undeutliches Bild entworfen werde.

Historisch. Das Augenleuchten ist seit ältester Zeit bekannt an den Augen von Hunden, Katzen und anderen Thieren, welche im Hintergrunde ihres Auges ein Tapetum, d. h. eine pigmentlose, mit stark reflectirenden dünnen Fasern oder Lamellen belegte Stelle haben. Bei diesen ist der Lichtreflex so stark, daß er unter einigermassen günstigen

Umständen leicht gesehen wird. Eine sehr allgemein verbreitete alte Meinung war es, daß die sogenannten leuchtenden Thieraugen Licht entwickeln sollten, namentlich wenn die Thiere gereizt würden, daher man denn geneigt war, diese angeblich vorhandene Lichtentwicklung dem Einflusse des Nervensystems zuzuschreiben. Man sieht das Leuchten der Thieraugen in dunklen Räumen am auffallendsten, wenn Licht von der Rückseite des Beobachters dicht neben seinem Kopfe vorbei in das Auge des Thieres fällt, und eben deshalb konnte den Beobachtern oft das wirklich einfallende Licht verborgen bleiben. Ebenso sollten die pigmentlosen Augen weißer Kaninchen und albinotischer Menschen durch eigene Lichtentwicklung leuchten. PREVOST¹ zeigte zuerst, daß das sogenannte Leuchten der Thieraugen niemals in vollkommener Dunkelheit und weder willkürlich noch durch Affecte hervorgebracht wird, sondern stets nur durch Reflexion von einfallendem Lichte entstehen kann. GRUTHUISEN² hat unabhängig hiervon dasselbe gefunden; er weist nach, daß das Tapetum daran Schuld sei, verbunden mit einer „außerordentlichen Brechung“ der Linse. Auch in den Augen todter Thiere sah er das Leuchten. Diese Thatsachen bestätigten RUDOLPHI³, J. MÜLLER⁴, ESSEN⁵, TIEDEMANN⁶, HASSENSTEIN⁷. RUDOLPHI macht darauf aufmerksam, daß man in einer bestimmten Richtung in das Auge sehen müsse, um das Leuchten wahrzunehmen. ESSER erklärt richtig den Wechsel der Farbe daraus, daß verschiedene gefärbte Theile der Netzhaut durch die Pupille erblickt würden, HASSENSTEIN endlich findet, daß das Leuchten hervortritt, wenn die Augen in Richtung ihrer Axe comprimirt werden, und vermuthete, daß auch beim lebende Thiere das Leuchten willkürlich erregt werde, indem durch den Druck der Muskeln die Augenaxe verkürzt werde. Man erkannte also das Leuchten als ein Reflexphänomen an, ohne sich aber klar zu machen, von welchen Bedingungen das Leuchten oder Nichtleuchten abhinge.

An menschlichen Augen war das Leuchten früher nur bei seltenen Krankheitszuständen beobachtet worden, namentlich bei Geschwülsten im Hintergrunde des Auges. Auch bei Mangel der Iris hat BEHR⁸ es gesehen und gefunden, daß die Augen des Beobachters fast ganz parallel mit den einfallenden Strahlen nach den Augen der Kranken blicken mußten, welches die Grundbedingung von BRÜCKES Methode, das Augenleuchten zu beobachten, ist. Das Leuchten ist in solchen Fällen von Irismangel auffallender, weil die Beleuchtung der Netzhaut viel stärker ist; außerdem fehlt die Accommodationsfähigkeit des Auges.

Endlich fanden W. CUMMING⁹ und BRÜCKE¹⁰ unabhängig von einander das Verfahren, gesunde menschliche Augen leuchtend erscheinen zu machen, indem der Beobachter den einfallenden Lichtstrahlen nahe parallel hineinblickt. Letzterer hat dieselbe Methode schon vorher auf die mit einem Tapetum versehenen Thieraugen angewendet. Endlich erwähnt WHARTON JONES¹¹, das BABBAGE ungefähr zu derselben Zeit ihm einen belegten Glasspiegel gezeigt habe, von dessen Belegung eine kleine Stelle weggenommen war, um Licht in das Auge zu werfen und durch die Öffnung hineinzusehen. Dies erinnert schon sehr an den Augenspiegel von COCCIUS; aber da BABBAGE keine Linsen mit seinem Spiegel verbunden zu haben scheint, so hat er höchstens ausnahmsweise von den Theilen der Netzhaut etwas erkennen können, und hat deshalb wohl seine Erfindung damals nicht veröffentlicht.

¹ PREVOST, *Biblioth. britannique*. 1810. T. 45.

² F. GRUTHUISEN, *Beiträge zur Physiognosie und Eautognosie*. S. 199.

³ RUDOLPHI, *Lehrbuch der Physiologie*. I. 197.

⁴ J. MÜLLER, *Zur vergleichenden Physiologie d. Gesichtsinns*. Leipzig 1826. S. 49. — *Handbuch der Physiologie*. 4. Aufl. I. 89.

⁵ ESSER, *Kastners Archiv für die gesammte Naturlehre*. Bd. VIII. S. 399.

⁶ F. TIEDEMANN, *Lehrbuch der Physiologie*. S. 509.

⁷ HASSENSTEIN, *De luce ex quorundam animalium oculis prodeunte atque de tapeto lucido*. Jenae 1836.

⁸ BEHR, *Heckers Annalen*. 1839. I. S. 373.

⁹ W. GUMMING, *Medico-chirurgical Transactions*. XXIX. p. 284.

¹⁰ E. BRÜCKE, *J. Müllers Archiv für Anat. u. Physiologie*. 1847. S. 225.

¹¹ WHARTON JONES, *Archives générales de Médecine*. 1854. II.

Die andere Seite der Frage, warum nämlich die Theile der Netzhaut, auch wenn sie beleuchtet sind, z. B. in Thieraugen mit Tapetum, in Augen von Albinos, dem Beobachter nicht erkennbar sind, ist öfter besprochen worden. Ihre Lösung lag mehr auf der Hand. Schon im Anfange des 18. Jahrhunderts hatte MÉRY¹ beobachtet, daß er bei einer Katze, die er unter Wasser getaucht hatte, in den Augen, welche stark leuchtend erschienen, die Netzhautgefäße erkennen konnte. LA HIRE² gab von diesem letzteren Umstande die richtige Erklärung. Daß eine veränderte Brechung der Strahlen nothwendig sei, um das Auge leuchtend erscheinen zu machen, sah er ein, aber eine nähere Erklärung weiß er nicht zu geben. Ebenso KUSSMAUL³. Letzterer zeigt, daß die Netzhaut hell und erkennbar werde, wenn man entweder vorn vom Auge die Hornhaut und Linse entfernt, oder etwas vom Glaskörper herausnimmt und dadurch die Augenhaxe verkürzt.

Ich selbst⁴ bin, so viel ich finde, der Erste gewesen, welcher sich den Zusammenhang zwischen den Richtungen der einfallenden und ausgehenden Strahlen klar machte, den wahren Grund für die Schwärze der Pupille und dadurch auch das Princip für die Construction der Augenspiegel fand. Zur Beleuchtung wendete ich ebene unbelegte Glasplatten an, zur Erkennung der Netzhaut Concavgläser. TH. RUEDE war dagegen der Erste, welcher einen durchbohrten Spiegel anwandte, und die Beobachtung durch Convexlinsen. Da das neue Instrument in kurzer Zeit eine außerordentliche Wichtigkeit in der Augenheilkunde erreichte, sind nachher noch eine große Zahl verschiedener Formen von Augenspiegeln construirt worden, von denen ich oben die wichtigsten aufgeführt habe. Wesentlich neue Principien für die Erleuchtung oder Erkennung der Netzhaut sind dabei aber nicht mehr gefunden worden.

Die von mir aufgestellte Theorie des Augenleuchtens und der Augenspiegel hat keine wesentlichen Veränderungen erfahren. Die Verbesserungen, welche STELLWAG VON CARION daran anzubringen gesucht hat, kann ich nicht als solche anerkennen. Dieser übrigens um die Einführung physikalischer Kenntnisse in seine Wissenschaft eifrig bemühte Augenarzt ist bei den hierher gehörigen Arbeiten durch falsche Grundprinzipien über die Stärke der Beleuchtung und Helligkeit durchaus irre geführt worden.

¹ J. MÉRY, *Annales de l'Acad. d. sc.* 1704.

² PH. DE LA HIRE, ebenda. 1709.

³ KUSSMAUL, *Die Farbenerscheinungen im Grunde des menschlichen Auges.* Heidelberg 1845.

⁴ H. HELMHOLTZ, *Beschreibung eines Augenspiegels zur Beobachtung der Netzhaut im lebenden Auge.* Berlin 1851. — Ferner in *Vierordt's Archiv für physiol. Heilkunde.* II. 827.