

# Beiträge zur Dioptrik des Auges.

Von

M. TSCHERNING,

Directeur adjoint du laboratoire d'ophtalmologie à la Sorbonne, Paris.

## Einleitung.

Dringt ein Lichtstrahl aus einem durchsichtigen Medium in ein anderes, so wird er bekanntlich an der Trennungsfläche dieser Medien zum Teil reflektiert. Die reflektierten Strahlen, welche auf diese Weise in jedem optischen Instrumente entstehen und wieder rückwärts entweichen, werde ich, zum Unterschiede von dem zur Hervorrufung des Bildes dienenden nützlichen Lichte, als nutzloses oder verlorenes Licht bezeichnen. — Ein Teil des Lichtes dieser verlorenen Strahlen wird aber, bevor dasselbe das Instrument verlassen kann, von den Trennungsflächen der verschiedenen Medien, die es auf seinem Wege trifft, von neuem reflektiert und kann so durch das Okular in das Auge des Beobachters gelangen. Da diese Strahlen nicht zur Entstehung des „nützlichen“ Bildes beitragen, sondern vielmehr die genaue Beobachtung desselben stören, so will ich diesen Teil des Lichtes als schädliches Licht bezeichnen. Bei jedem dioptrischen Instrumente, selbst einer einfachen Linse, lassen sich daher neben dem „nützlichen“, durch einfache Brechung entstandenen Bilde des Gegenstandes, z. B. einer in einiger Entfernung aufgestellten Flamme, noch eine Reihe von Bildern beobachten, von welchen ein Teil den verlorenen, ein anderer Teil den schädlichen Strahlen seinen Ursprung verdankt. So sieht man z. B. an einer Konvexlinse aus dem verlorenen Lichte an der der Flamme zugewandten Seite zwei Spiegelbilder entstehen, während aus dem schädlichen Lichte an der von der Flamme

abgewandten Seite, folglich neben dem eigentlichen („nützlichen“) Bilde, ein kleines lichtschwaches Bild hervorgeht, welches von Strahlen erzeugt wird, die zuerst an der hinteren und dann an der vorderen Fläche der Linse reflektiert worden sind.

Die Helligkeit dieser verschiedenen Bilder ist natürlich eine sehr ungleiche. Im allgemeinen läßt sich dieselbe für das nützliche Bild als Helligkeit erster Ordnung, für die verlorenen Bilder als Helligkeit zweiter Ordnung und für die schädlichen Bilder als Helligkeit dritter Ordnung bezeichnen.

Mit Hülfe der Theorie von FRESNEL läßt sich die Helligkeit der Bilder leicht berechnen. Ist die Intensität des einfallenden Strahles gleich 1 und sein Einfallswinkel genügend klein, um vernachlässigt werden zu können, so ist die Intensität  $A$  des an der Trennungsfläche zweier Medien reflektierten Strahles in dem Ausdruck

$$A = \left( \frac{n - 1}{n + 1} \right)^2$$

enthalten, wobei unter  $n$  der relative Brechungskoeffizient der beiden Medien zu verstehen ist. Hiernach bewahrt das nützliche Bild einer einfachen Linse, wenn wir als Brechungskoeffizient des Glases 1,5 annehmen, noch 92% des einfallenden Lichtes, während das verlorene Licht nur 8% und das schädliche sogar nur 1/6% des einfallenden beträgt. In zusammengesetzten Instrumenten ist der Verlust an Licht viel größer und kann selbst ein Drittel des einfallenden Lichtes erreichen.

Die Bilder, welche man außerdem noch, besonders an schwachen Konvexlinsen, beobachtet, und welche ihre Entstehung einer wiederholten Reflexion verdanken, will ich hier nicht näher berücksichtigen, weil im menschlichen Auge dergleichen nicht vorkommt. Ich will hier nur bemerken, daß eine Kerzenflamme noch nach vier Reflexionen an Glasflächen wahrnehmbar ist. Dieses läßt sich experimentell leicht feststellen. Wenn man eine Flamme mit einem sehr schwachen Prisma betrachtet, so erblickt man zwei sekundäre Bilder, von denen das letztere von Strahlen gebildet wird, welche nur  $(0,04)^4 = 0,00000256$  von der Lichtstärke der einfallenden Strahlen besitzen und für ein nicht an völlige Dunkelheit adaptiertes Auge wohl an der Grenze des Wahrnehmbaren liegt.

Die Betrachtungen, welche wir soeben über die in dioptrischen Instrumenten wahrnehmbaren Bilder angestellt haben, lassen sich auch auf das menschliche Auge übertragen. Doch sind selbstverständlich die Bilder, die von den verlorenen und von den schädlichen Strahlen gebildet werden, nur sichtbar, wenn der beobachtete Gegenstand eine bedeutende Lichtstärke besitzt. In Fig. 1. habe ich den Verlauf der Strahlen dargestellt, deren Intensität die soeben erwähnte Grenze des Sichtbaren nicht überschreitet.

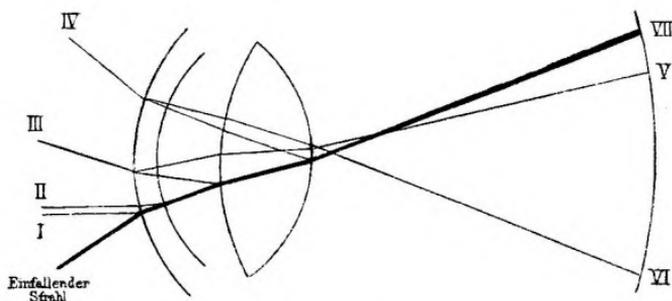


Fig. 1.

Man sieht, daß der einfallende Lichtstrahl sich allmählich in 7 Strahlen auflöst, von denen 4 das Auge wieder verlassen und nur 3 die Retina erreichen. Diesen 7 Strahlen entsprechend haben wir im menschlichen Auge 7 Bilder näher kennen zu lernen, nämlich:

1. Vier Bilder, welche von den verlorenen Strahlen (Fig. 1., I. II. III. IV.) gebildet werden, und als PURKINJESCHE Bilder bekannt sind. Sie sind das Resultat der Reflexionen, welche an den Grenzflächen der Cornea und der Linse stattfinden. Ich werde in der Folge die beiden Cornealbilder als erstes und zweites PURKINJESCHES und die beiden Linsenbilder als drittes und viertes PURKINJESCHES Bild bezeichnen.

2. Zwei Bilder, welche von den schädlichen Strahlen v und VI herkommen. Das eine, von mir als fünftes Bild bezeichnet, wird aus Strahlen gebildet, die zuerst von der vorderen Fläche der Linse und darauf von der Konkavität der Vorderfläche der Hornhaut reflektiert worden sind; das andere, sechste Bild geht in gleicher Weise aus den Strahlen hervor, welche zuerst eine Reflexion an der hinteren Fläche der Linse und dann an der vorderen Fläche der Cornea erlitten haben.

3. Das eigentliche oder nützliche Bild, durch Brechung aus den Strahlen VII Fig. 1 entstanden.

Man kann die Intensität der verschiedenen Strahlen in der oben angeführten Weise berechnen, indem man die Intensität des einfallenden Strahles mit dem Faktor  $A$  für jede Reflexion und dem Faktor  $1 - A$  für jede Refraktion, der er unterliegt, multipliziert. Leicht ersichtlich ist es aber, daß die Helligkeit aller dieser Bilder eine so geringe ist und  $A$  so klein wird, daß man  $1 - A = 1$  setzen kann. Es ist also die Intensität des einfallenden Strahles, welche wir gleich 1 setzen, mit dem Faktor  $A$  für jede Reflexion, welcher der Strahl unterworfen ist, zu multiplizieren, wobei jedoch zu bemerken ist, daß dieser Faktor für die verschiedenen Flächen verschiedene Werte annimmt, weil  $n$  eine variable Größe ist. Bezeichnet man den Wert von  $A$  für die Vorderfläche der Cornea mit  $a$ , für die Hinterfläche der Cornea mit  $b$  und für die Linsenflächen mit  $c$ , und setzt man den Brechungskoeffizienten der Cornea gleich 1,377, denjenigen des Kammerwassers und des Glaskörpers gleich 1,3365 und endlich denjenigen der äußersten Schichten der Linse gleich 1,397, so ist

$$a = 0,0251550$$

$$b = 0,0002213$$

$$c = 0,0004885$$

Die Intensität der Strahlen, aus welchen die verschiedenen Bilder hervorgehen, wird dann:

Erstes Bild . . . . .	$a = 0,0251550$
Zweites Bild . . . . .	$b = 0,0002213$
Drittes Bild . . . . .	$c = 0,0004885$
Viertes Bild . . . . .	$c = 0,0004885$
Verlorenes Licht, im Ganzen . . . . .	<u>0,0263533</u>
Fünftes Bild . . . . .	$ac = 0,0000123$
Sechstes Bild . . . . .	$ac = 0,0000123$
Schädliches Licht, im Ganzen . . . . .	<u>0,0000246</u>
Nützliches Licht (Siebentes Bild) . . . . .	0,9736221

Man entnimmt aus diesen Zahlen, daß das Auge, was die Verteilung des Lichtes anlangt, allen dioptrischen Instrumenten und selbst einer einfachen Linse überlegen ist, indem nur etwas mehr als 2,5% des einfallenden Lichtes verloren geht, und das

schädliche Licht ebenfalls auf ein Minimum reduziert ist. So schwach dieses letztere auch ist, so überschreitet es doch, wie wir weiter sehen werden, die Grenze des Sichtbaren.<sup>1</sup>

Theoretisch müßten außer den bereits angeführten noch vier Bilder zweiter Ordnung oder, wie ich sie nenne, vier schädliche Bilder vorhanden sein. Zwei derselben, zu lichtschwach um wahrgenommen zu werden, müssen durch eine doppelte Reflexion an einer der Linsenflächen und an der hinteren Fläche der Cornea entstehen. Das dritte dieser Bilder würde aus zwei einander folgenden Reflexionen an den beiden Cornealflächen und das vierte aus zwei gleichen Reflexionen an den beiden Linsenflächen hervorgehen. Die Intensität der diese Bilder erzeugenden Strahlen würde sein

$$ab = 0,0000053 \text{ und}$$

$$c^2 = 0,0000002.$$

Die Lichtstärke des zweiten Bildes ist also zu schwach, als daß dasselbe gesehen werden könne; das erste Bild sollte aber noch sichtbar sein und ist es auch in einem künstlichen Auge. Ich habe jedoch keine Spur dieses Bildes im menschlichen Auge auffinden können, wahrscheinlich aus dem Grunde, weil es von dem lichtstarken nützlichen Bilde verdeckt wird.

Alle diese verschiedenen Bilder können sehr gut an einem künstlichen Auge zur Anschauung gebracht werden. Ein solches kann man sich leicht aus einem im Innern geschwärzten Hohlcyylinder, der vorne von einem Uhrglase und hinten von einer flachen Glasplatte abgeschlossen wird, herstellen. Im Innern dieses Hohlcyinders, der mit ausgekochtem destillierten Wasser gefüllt wird, ist eine bikonvexe Glaslinse angebracht. Die Dimensionen aller dieser Teile des künstlichen Auges müssen die Dimensionen der denselben entsprechenden Teile des natürlichen menschlichen Auges mehrfach übertreffen, weil man sonst sich einer Lupe bedienen müßte, um die lichtschwachen und kleinen schädlichen Bilder sehen zu können. Stellt man eine Flamme nicht allzuweit von einem solchen künstlichen Auge auf, so ist es leicht, in demselben die sieben

<sup>1</sup> Wenn man eine Kerzenflamme oder eine noch stärkere Lichtquelle als Objekt benutzt.

oben angeführten Bilder zu erblicken. Um die schädlichen Bilder deutlicher sehen zu können, ist es vorteilhaft, die Flamme etwas seitlich von der *Axe* des Auges aufzustellen, so daß das nützliche Bild desselben nicht auf der planen Glasplatte, welche die *Retina* ersetzen soll, sondern auf den Wänden des *Cylinders* erscheint. Abgesehen davon, daß bei einer solchen Anordnung das helle nützliche Bild nicht die Beobachtung der lichtschwachen schädlichen Bilder stört, erscheinen auch diese viel leuchtender, indem die Lichtstärke des zurückgeworfenen Strahles mit dem Einfallswinkel wächst.

Unter den Bildern, welche von einem dioptrischen Instrumente erzeugt werden, hat für den Beobachter natürlich nur das nützliche Bild ein Interesse. Die übrigen Bilder sind der Beobachtung eher hinderlich. Für den Optiker aber sind die verlorenen Bilder bei der Konstruktion von Instrumenten von großem Nutzen. Er bedient sich derselben zur Centrierung der Linsensysteme, um den Grad des Schleifens zu beurteilen etc. Auch die schädlichen Bilder können zu ähnlichen Zwecken benutzt werden.<sup>1</sup>

Dieselben Betrachtungen können auch am menschlichen Auge gemacht werden. Für den Besitzer selbst ist nur das nützliche Bild von Bedeutung, die übrigen sind als nutzlose oder selbst schädliche anzusehen; für die Physiologie des Auges sind sie aber bekanntlich von großer Wichtigkeit. Man hat sich nur die Arbeiten von v. HELMHOLTZ über die Gestalt der brechenden Flächen und die von CRAMER und v. HELMHOLTZ über die im Auge während der *Accommodation* stattfindenden Veränderungen ins Gedächtnis zurückzurufen. Ich habe mich nun bemüht, durch neue eingehendere Untersuchungen dieser Bilder unsere Kenntnis der Dioptrik des Auges zu fördern.

<sup>1</sup> Ich will nur ein Beispiel anführen. Wenn man durch ein schwaches Prisma, wie es die Augenärzte brauchen, eine Flamme anblickt, sieht man, wie ich schon bemerkt habe, aufer der Flamme selbst zwei sekundäre Bilder. Alle drei befinden sich in einer Geraden, die mit größter Genauigkeit die Richtung der Ablenkung des Prismas anzeigt. Man kann sich in dieser Weise oft davon überzeugen, daß der Strich, durch welchen der Optiker diese Richtung andeutet, falsch angebracht ist. Ich habe durch diesen Versuch Fehler von mehr als 20° aufgefunden. Ebenso läßt sich die Ausführung von planparallelen Gläsern, von Doppelprismen, von doppelbrechenden Prismen etc. beurteilen.

Bevor ich jedoch zur Beschreibung meiner Versuche übergehe, glaube ich zunächst in Abschnitt I die Theorie dieser Bilder auseinandersetzen zu müssen, indem ich das neue schematische Auge v. HELMHOLTZ' zu Grunde lege. Dasselbst findet sich dann auch die Beschreibung der besten Methoden, diese Bilder zu beobachten. Der Abschnitt II wird die Beschreibung und die Anwendungsweise des Instruments enthalten, dessen ich mich bei dieser Untersuchung bedient habe. In Abschnitt III will ich meine Beobachtungen und die aus denselben gezogenen Schlüsse geben. Abschnitt IV enthält dann eine vollständige Zusammenstellung der Resultate, während Abschnitt V einer besonderen eigentümlichen Beobachtung gewidmet ist.

## I.

**Theorie der im Auge entstehenden optischen Bilder.**

Mit Ausnahme des ersten PURKINJESchen Bildes sind alle übrigen Bilder, welche man im Auge beobachtet, das Resultat wiederholter Refraktionen oder Reflexionen. Mehrere derselben sind selbst von sehr komplizierten optischen Systemen gebildet. Bekanntlich ist es zur Erleichterung des Studiums ratsam, zusammengesetzte optische Systeme durch einfache, den ersteren äquivalente, brechende oder zurückwerfende Systeme zu ersetzen. Diese Systeme kann man nach bekannten Formeln<sup>1</sup> berechnen. Auf diese Weise erhält man für die sieben Bilder des Auges sieben optische Systeme. Die Tabelle I. giebt u. a. die Örter der Kardinalpunkte dieser Systeme, d. h. ihre Entfernung von dem Hornhautscheitel, sowie ihre Brennweiten an.

Nachdem wir nunmehr im allgemeinen die Lage und Natur der verschiedenen Bilder kennen gelernt haben, wollen wir uns mit einem jeden derselben eingehender beschäftigen.

Das erste PURKINJESche Bild kommt durch einfache Reflexion zu stande und ist so lichtstark, dafs es selbst von sehr schwach leuchtenden Gegenständen noch ohne Schwierigkeit beobachtet werden kann.

Die drei folgenden Bilder entstehen sämtlich durch Reflexion von einer Fläche, vor der sich ein System von brechenden Medien befindet, welche die Strahlen ein Mal vor und ein

<sup>1</sup> HELMHOLTZ, *Physiol. Optik.* § 9. Formel 11*d*, 11*e* und 11*f*. Erste Aufl. S. 57 und 58 — zweite Aufl. S. 79.

anderes Mal nach ihrer Zurückwerfung durchlaufen müssen. Ein so beschaffenes optisches System ist einer einzigen spiegelnden Fläche gleichwertig, welche wir zum Unterschied von der in Wahrheit reflektierenden Fläche als die scheinbar reflektierende bezeichnen wollen. Letztere ist das Bild der in Wahrheit reflektierenden und durch das brechende System gesehenen Fläche. Ebenso ist das Centrum der scheinbar reflektierenden Fläche das Bild des Centrums der in Wahrheit reflektierenden.<sup>1</sup>

Tabelle I.

	PURKINJESCHE BILDER				SCHÄDLICHE BILDER		Nützliches Bild VII
	I	II	III	IV	V	VI	
Erster Hauptpunkt ...	0 mm		3,05 mm	6,82 mm	6,481 mm	-15,84 mm	1,753 mm
Zweiter Hauptpunkt...	0 "		3,05 "	6,82 "	2,150 "	+36,51 "	2,106 "
Erster Knotenpunkt...	7,829 "		18,09 "	1,11 "	7,637 "	+19,48 "	6,968 "
Zweiter Knotenpunkt .	7,829 "		18,09 "	1,11 "	3,306 "	+32,87 "	7,321 "
Vorderer Brennpunkt .	3,914 "		10,57 "	3,96 "	3,046 "	+ 5,08 "	-13,745 "
Hinterer Brennpunkt ..	3,914 "		10,57 "	3,96 "	6,741 "	+22,06 "	+22,819 "
Vordere Brennweite ...	-3,914 "		- 7,52 "	+ 2,85 "	+3,435 "	-10,81 "	15,498 "
Hinterer Brennweite...	+3,914 "		+ 7,52 "	- 2,85 "	+4,591 "	-14,45 "	20,713 "
Richtung des Bildes...	aufrecht	aufrecht	aufrecht	umgekehrt	umgekehrt	aufrecht	umgekehrt
Relative lineare GröÙe des Bildes <sup>2</sup> .....	3,914		7,52	2,85	3,435	10,81	15,498
Relativer Flächeninhalt des Bildes.....	15,32		56,55	8,122	11,80	116,8	240,2
Intensität der Strahlen <sup>3</sup>	0,0251550		0,0004737	0,0004737	0,0000119	0,0000119	0,9736625
Helligkeit des Bildes..	16420		84	583	10	1	40540

<sup>1</sup> Ich bediene mich des Ausdruckes Centrum, um die Knotenpunkte zu bezeichnen, welche in diesem Falle zusammenfallen. Da die scheinbar brechende Fläche im allgemeinen keine sphärische Form besitzt, so sollte man hier eigentlich nicht von einem Centrum derselben sprechen. Der in Rede stehende Punkt ist vielmehr das Centrum des der Axe benachbarten Teiles dieser Fläche.

<sup>2</sup> Die lineare GröÙe des Bildes ist der vorderen Brennweite des Systemes proportional, wenn das Objekt sich in unendlicher Entfernung befindet, was wir hier annehmen.

<sup>3</sup> Der wenn auch geringe Unterschied in den hier und auf S. 432 für die Intensität der Lichtstrahlen angegebenen Zahlen hat seinen Grund darin, das der gleichfalls geringe Unterschied im Brechungskoeffizienten der Cornea und des Kammerwassers von HELMHOLTZ in seinem schematischen Auge, welches wir hier zu Grunde gelegt haben, vernachlässigt worden ist.

Dieses ist eine Folge der Theorie der konjugierten Punkte. Ein Lichtstrahl, welcher in der Luft auf das Bild eines Punktes gerichtet ist, ist nach der Brechung auf den Punkt selbst gerichtet, und umgekehrt. Ein Lichtstrahl, welcher in der Luft auf das Centrum der scheinbar reflektierenden Fläche gerichtet ist, ist folglich nach der Brechung auch auf das Centrum der wirklich reflektierenden Fläche gerichtet. Auf diese letztere stossend, wird er in sich selbst zurückgeworfen und verläßt das System auf demselben Wege, auf welchem er in dasselbe gelangt ist. Der Punkt, welchen wir als das scheinbare Centrum bezeichnet haben, hat mithin ebenso wie das Centrum einer spiegelnde Fläche die Eigenschaft, daß Strahlen, welche gegen dasselbe gerichtet sind, das System in sich selbst zurückgeworfen, wieder verlassen.

Auf ähnliche Weise läßt sich zeigen, daß ein Strahl, welcher in der Luft auf einen Punkt der scheinbar reflektierenden Fläche gerichtet ist, das System so verläßt, als käme er von diesem Punkte selbst, mithin ganz so, als ob er eine wirklich reflektierende Fläche auf seinem Wege angetroffen hätte. Die scheinbar reflektierende Fläche vereinigt also in sich die beiden Hauptflächen, ebenso wie das Centrum derselben die beiden Knotenpunkte in sich vereinigt. Es ist ferner bekannt, daß man sich die Reflexion als eine Refraktion vorstellen kann, wenn man den Brechungskoeffizienten gleich  $-1$  setzt. Da das Verhältniß der Fokaldistanzen gleich sein muß dem der Refraktionskoeffizienten, so müssen auch diese stets unter einander gleich sein und stets dieselbe Richtung haben. Es giebt daher nur einen Brennpunkt, der sich in der Mitte zwischen der scheinbar reflektierenden Fläche und ihrem Centrum befinden muss, weil der Abstand des ersten Hauptpunktes vom ersten Brennpunkte gleich sein muß dem Abstände des zweiten Knotenpunktes vom zweiten Brennpunkte. Die scheinbar reflektierende Fläche wirkt also ganz so wie eine wirklich reflektierende Fläche.

Um sich Rechenschaft von der Wirkung unseres kombinierten Systemes zu geben, hat man nur nötig, die Bilder des Scheitels und des Centrums der spiegelnden Fläche zu bestimmen, welche durch die im brechenden System stattfindende Brechung zu stande kommen. Man kann zu diesem Zwecke

sich des allgemeinen Ausdruckes  $\frac{F_1}{f_1} + \frac{F_2}{f_2} = 1$  bedienen, in welchem  $F_1$  und  $F_2$  die Brennweite des brechenden Systems,  $f_2$  den Abstand des Scheitels (oder Centrums) der spiegelnden Fläche von der zweiten Hauptebene des brechenden Systems und  $f_1$  den Abstand des Bildes von der ersten Hauptebene bezeichnet. Auf diesem Wege wollen wir hier die Stellung der Bilder im schematischen Auge bestimmen, in Abschnitt III hingegen den entgegengesetzten Weg einschlagen, d. h. zunächst auf experimentellem Wege die scheinbaren Flächen bestimmen und mit Hilfe der gefundenen Zahlen alsdann die wirklichen Flächen berechnen.

Treten wir nunmehr in die nähere Betrachtung eines jeden dieser drei Bilder ein.

Das zweite PURKINJESCHE Bild ist nur wenig bekannt. Ich habe dasselbe von PURKINJE<sup>1</sup> selbst erwähnt und zusammen mit den drei anderen Bildern gezeichnet gefunden. Derselbe giebt daselbst folgende treffende Beschreibung: „*Imago flammae ab externa simul et interna superficie (corneae) reflexa duplicata apparebit.*“ Ebenso spricht BLIX<sup>2</sup> von diesem Bilde.

Dasselbe ist leicht zu sehen, wenn man sich der zu beobachtenden Person gegenüber setzt und die Spiegelung einer seitwärts aufgestellten Flamme beobachtet. Prüft man eingehend das Cornealbild der Flamme mit Hilfe einer Lupe von ungefähr 10 Dioptrien, so sieht man, sobald dieses Bild sich dem Irisrande nähert, und noch besser, wenn dasselbe diesen Rand überschreitet, daß es von einem anderen kleinen, sehr lichtschwachen Bilde begleitet wird, welches stets

<sup>1</sup> J. E. PURKINJE, *Commentatio de examine physiologico organi visus et systematis cutanei*. Vratislaviae 1823. pag. 21 und Figur 1.

<sup>2</sup> M. BLIX, *Oftalmometriska Studier*. Upsala 1880. Seite 63. BLIX hat ein sehr sinnreiches Ophthalmometer konstruiert, dessen Handhabung aber, wie diejenige aller Instrumente, welche auf der Benutzung von Mikroskopen zu Messungen am lebenden Auge beruhen, sehr schwer zu sein scheint. Das Prinzip des Apparates ist das folgende:

Denken wir uns, daß man die Hornhaut mittelst eines Mikroskopes mit Fadenkreuz und positivem Okular betrachtet; nehmen wir ferner an, daß das Fadenkreuz leuchtend sei, so wird von diesem ein Bild *A* an dem Orte entstehen, auf welchen das Mikroskop eingestellt ist; hiervon wird durch Spiegelung an der Hornhaut ein zweites Bild *B* erzeugt, welches, durch das Mikroskop betrachtet, aber nur dann scharf

zwischen dem grösseren Bilde und der Pupillenmitte liegt. Je mehr sich die beiden Bilder dem Hornhautrande nähern, desto mehr entfernen sie sich voneinander, so daß sie um einen Millimeter oder mehr voneinander abstehen können. Das kleine Bild ist häufig noch sichtbar, wenn das grössere, dem unregelmässigen Reflex auf der Sklera Platz machend, bereits verschwunden ist. Das Bild kann, wie wir weiter unten sehen werden, noch besser mit dem Ophthalmophakometer beobachtet werden. Im schematischen Auge von HELMHOLTZ ist die hintere Fläche der Cornea wegen des geringen Einflusses, welchen diese Membran auf die Refraktion des Auges ausübt, nicht berücksichtigt.

Der Radius der hinteren Hornhautfläche ist nach meinen Messungen (siehe S. 467) 6,22 mm und die Dicke der Hornhaut 1,15 mm. Setzt man den Brechungskoeffizienten der Cornea = 1,377, so findet man 0,87 mm für den Ort der scheinbaren Fläche und 6,30 mm für den Radius derselben. Ihr Brennpunkt befindet sich folglich bei 4,02 mm und fällt fast mit dem Brennpunkte der vorderen Cornealfläche zusammen. Es ist daher verständlich, weshalb es unmöglich ist, die beiden Bilder voneinander zu trennen, so lange dieselben sich in der Mitte der Pupille befinden.

Das dritte PURKINJESCHE Bild entsteht aus Strahlen, welche aufser der Reflexion an der vorderen Fläche der Linse noch zwei Refraktionen an der vorderen Fläche der Cornea erfahren haben. (Dem Beispiele VON HELMHOLTZ folgend, wollen wir hier und im folgenden die Differenz der Brechungskoeffizienten der Cornea und des Humor aq. vernachlässigen.)

---

ist, wenn es mit *A* zusammenfällt; das ist aber nur der Fall, wenn das Mikroskop auf die spiegelnde Fläche oder auf deren Krümmungsmittelpunkt eingestellt ist. Die Verschiebung zwischen den beiden Einstellungen, in denen man das Bild deutlich sieht, giebt also die Grösse des Krümmungsradius an. — In Wirklichkeit benutzt nun BLIX nicht ein leuchtendes Fadenkreuz, sondern nimmt zwei Mikroskope, deren Axen einen sehr spitzen Winkel mit einander bilden und welche auf denselben Punkt eingestellt sind. In einem der Mikroskope ist das Okular entfernt und das Fadenkreuz durch einen beleuchteten Spalt ersetzt.

Mit diesem Instrument konnte BLIX das zweite PURKINJESCHE Bild beobachten und Messungen über die Dicke der Hornhaut ausführen; die Werte, welche er dafür erhält, sind sehr gering; sie schwanken zwischen 0,482 und 0,668 mm.

Der vordere Scheitel der Krystallinse, welcher 3,6 mm hinter dem Scheitel der Cornea gelegen ist, erscheint auf 3,05 mm vorgeückt, das Centrum dieser Fläche hingegen von 13,6 auf 18,09 mm zurückgeschoben zu sein. Der scheinbare Krümmungsradius ist also anderthalb Mal gröfser als der wahre (15,04 anstatt 10.)<sup>1</sup>

Der Brennpunkt befindet sich ungefähr 10 mm hinter dem Scheitel der Cornea oder 7 mm hinter der Pupille. Dieses Bild ist mithin viel weiter nach hinten gelegen als die drei anderen PURKINJESCHEN Bilder, welche annähernd in der Pupillarebene erscheinen.

Wegen seiner tiefen Lage mufs dieses Bild auch leicht hinter dem Pupillarrande verschwinden, sobald der Beobachtete die Blickrichtung ändert. Damit es sichtbar bleibe, mufs die Pupille des Beobachters in der Verlängerung des Kegels liegen, der das Bild zur Spitze und die Pupille des Beobachteten zur Basis hat.

Die Lichtstärke des Bildes ist übrigens, wie aus unserer Tabelle hervorgeht, selbst wenn man sehr starke Lichtquellen gebraucht, immer noch recht schwach. Man kann das Bild jedoch recht leuchtend machen, wenn man den Einfallswinkel vergröfsert. Befindet sich eine sehr peripherisch gestellte Lichtquelle auf der einen und das Auge des Beobachters in gleicher Entfernung auf der entgegengesetzten Seite, so wird das Bild zwar sehr leuchtend, behält jedoch immer noch diffuse Konturen. Es nimmt unter diesen Umständen eine längliche Form an und wird sehr grofs. Ich will noch hinzufügen, dafs die Veränderungen der Gröfse des Bildes während der Accommodation sich hier sehr gut beobachten lassen. Das Bild wird um ein Drittel seiner Gröfse oder auch mehr kleiner.

Das dritte Bild ist das gröfste der katoptrischen Bilder. Man überzeugt sich leicht davon, wenn man 2 Lichtquellen anwendet und den zwischen diesen liegenden Raum als Objekt gebraucht. Um sich über die Lage der Bilder Rechenschaft zu geben, ist es übrigens vorteilhaft, 2 Lichtquellen zu ge-

---

<sup>1</sup> Ist die Cornea astigmatisch, so ist diese Vergröfserung stärker in dem am stärksten brechenden Meridian. Die scheinbare Fläche wird in diesem Falle astigmatisch, selbst wenn die wirkliche sphärisch ist; ihr Astigmatismus ist dem der Cornea entgegengesetzt.

brauchen, welche eine bestimmte Lage zu einander besitzen, z. B. sich auf derselben Horizontalen befinden.

Das Bild ist nie sehr scharf, was wohl daran liegt, daß man mehrere Bilder übereinander sieht, die durch Reflexion an den verschiedenen Schichten der Linse entstanden sind. Das vierte Bild läßt jedoch nichts an Schärfe zu wünschen übrig, obgleich es ebenfalls aus mehreren übereinander liegenden Bildern bestehen muß. Diese sind aber auch mehr auf einen Punkt zusammengedrängt, da der scheinbare Krümmungsradius der hinteren Fläche viel kleiner ist als derjenige der vorderen Fläche.

Wenn das leuchtende Objekt eine runde Form besitzt, so ist das Bild ebenfalls rund, und zwar besonders dann, wenn es sich in der Mitte der Pupille befindet. Nähert es sich aber dem Rande der Linse, was natürlich eine stark erweiterte Pupille voraussetzt, so verlängert es sich in der radiären Richtung, was andeutet, daß die Krümmung der reflektierenden Fläche in dieser Richtung geringer ist als in der darauf senkrechten. Dieses könnte auf eine Abflachung der vorderen Linsenfläche gegen die Peripherie hin deuten. Es ist aber wahrscheinlich, daß diese Abflachung, wenigstens zum Teil, nur eine scheinbare ist.

Wir werden weiter unten erfahren, wie man dieses Bild zur Bestimmung der Lage der scheinbaren Fläche und ihres Centrums benutzen kann. Um sich dieser Werte zur Bestimmung der wahren Fläche zu bedienen, muß man das vor derselben gelegene Brechungssystem kennen. Hierzu hat man nur den Krümmungsradius der Hornhaut und den Brechungskoeffizienten des Humor aqueus nöthig. Der erstere ist vermitteltst eines Ophthalmometers zu messen und der letztere ist mehrfach und mit so geringen Abweichungen bestimmt worden, daß man denselben als hinreichend bekannt betrachten kann.

Das vierte, durch Reflexion an der hinteren Linsenfläche entstandene PURKINJESche Bild ist im Gegensatz zu den drei anderen ein umgekehrtes.

Wir wollen mit HELMHOLTZ annehmen, daß die hintere Linsenfläche von der Linse durch eine feine Schicht von Glaskörper getrennt wird. Das Brechungssystem, welches mit der reflektierenden Fläche vereinigt wird, ist folglich

nichts anderes als das ganze optische System des Auges. Die Rechnung zeigt, daß das Centrum der scheinbaren Fläche nur um 0,10 mm (von 1,20 mm auf 1,10 mm), die Fläche selbst aber um 0,38 mm vorgerückt erscheint (von 7,20 mm auf 6,82 mm). Der Radius ist mithin nur um 0,28 (von 6 mm auf 5,72 mm) verkürzt. Die Veränderung ist also sehr klein. Dieser Umstand erleichtert die Messung der hinteren Fläche. Man müßte eigentlich, um die reelle Fläche aus den Werten der scheinbaren Fläche zu berechnen, alle optischen Konstanten des Auges kennen. Da indessen der Unterschied zwischen der reellen und scheinbaren Fläche kein großer ist, so begeht man keinen großen Fehler, wenn man dieselben als identisch betrachtet.

Um eine größere Genauigkeit zu erzielen, kann man die gewonnenen scheinbaren Größen mit Hilfe der optischen Konstanten des schematischen Auges reduzieren. So erhält man Werte, welche nur wenig von der Wahrheit abweichen und welche auf dem Wege der allmählichen Annäherung noch genauer berechnet werden können. Wir werden uns aber im folgenden einer etwas abweichenden Methode bedienen.

Das in Frage stehende Bild ist klein aber scharf; seine Helligkeit ist größer als die des dritten Bildes. Fast in der Pupillarebene gelegen, ist es gewöhnlich leicht zu beobachten. Strahlen, welche von einem entfernten Objekte ausgehen, treffen auf der hinteren Fläche einen Fleck von der Ausdehnung der Pupille. Die hiervon zurückgeworfenen Strahlen kommen im Brennpunkt zur Vereinigung und bilden, indem sie aus dem Auge treten, einen Kegel, in welchem das Auge des Beobachters sich befinden muß, um das Bild wahrnehmen zu können. Da der Brennpunkt sich nahe der Pupillenebene befindet, so ist die Öffnung des Kegels (das Feld der Sichtbarkeit des Bildes) auch viel größer als die des dritten Bildes. Bewegt man das leuchtende Objekt, so sieht man häufig das vierte Bild verschwinden, ehe es den Irisrand erreicht hat, wenn der Lichtkegel nämlich seine Lage derart verändert hat, daß in ihn nicht mehr die Pupille des Beobachters hineinfällt.

Das fünfte und das sechste Bild entstehen durch zwei aufeinander folgende Zurückwerfungen. Die Strahlen, an einer der Linsenflächen reflektiert, werden darauf von neuem

von der konkaven Seite der vorderen Hornhautfläche zurückgeworfen. Die Strahlen, welche das sechste Bild erzeugen, durchdringen auf diese Weise zweimal das brechende System des Auges. Die optischen Systeme, welche diesen Bildern entsprechen, sind recht zusammengesetzt. Man kann sie jedoch durch einfachere ersetzen.<sup>1</sup>

Da die Berechnung durchaus keine Schwierigkeit hat, so will ich mich der Kürze wegen darauf beschränken, hier nur die Endresultate derselben, wie sie sich in der Tabelle I angeben finden, anzuführen. Es zeigt sich, daß man auf diese Weise vollständige Brechungssysteme entdeckt, in welchen die zu einander gehörenden Kardinalpunkte sich nicht in einem Punkte vereinigen.

Aus der Tabelle geht hervor, daß der hintere Brennpunkt des fünften Systems sich 6,7 mm hinter dem Scheitel der Cornea, d. h. nahe der hinteren Linsenfläche, befindet, diese letztere liegt aber noch weit von der Retina entfernt. Das muß auch der Grund sein, weshalb sich dieses Bild an einem künstlichen Auge sehr gut beobachten läßt, während es am lebenden Auge unsichtbar bleibt. Es ist mir wenigstens nicht gelungen, dasselbe zu erblicken.<sup>2</sup>

Freilich müssen auch die Strahlen, welche von einem in dieser Gegend gelegenen Bilde kommen, bevor sie die Retina erreichen, so sehr zerstreut werden, daß es unmöglich ist, dasselbe noch wahrzunehmen. Bewegt man in einem dunkeln Zimmer, nicht weit vom Auge entfernt, eine Kerze von außen nach innen, so sieht man sogleich, wenn dieselbe in das Gesichtsfeld tritt, dieses sich in der Weise

<sup>1</sup> Die Formel dazu findet sich in HELMHOLTZ, *Physiol. Optik.* 2. Aufl. S. 78—79.

<sup>2</sup> HEUSE bemerkt in seiner Mitteilung über das sechste Bild (*Gräfes Arch.* Bd. 18. (2)), daß er einen Schein neben dem nützlichen Bilde gesehen zu haben glaubt. Ähnliches hat Herr HJALMAR SCHJÖTZ bei Wiederholung des Experimentes beobachtet, als er auf meine Veranlassung den eben beschriebenen Versuch ausführte. — Ein mir bekanntes myopisches Auge von sechs Dioptrien erblickt in der Nähe des Fixationspunktes einen recht scharf begrenzten Lichtschein, wenn sich eine Kerzenflamme in etwa 30 cm Abstand und stark nasalwärts befindet. Ändert man die Stellung der Flamme, so bewegt sich jener Lichtschein in derselben Richtung. Sollte dieser Lichtschein etwa unser fünftes Bild sein?

verdunkeln, daß die Gegenstände, welche sich im Grunde des Zimmers befinden und nur schwach von der Kerze beleuchtet werden, wahrscheinlich infolge der Blendung des Auges verschwinden. Indem man nun fortfährt die Kerze gegen die Gesichtslinie zu bewegen, bemerkt man, wie sich in einem bestimmten Augenblicke das Gesichtsfeld mit einem leuchtenden, leicht rötlich gefärbten Nebel erfüllt, in welchem das sechste sogleich zur Sprache kommende Bild erscheint. Der leuchtende Nebel hat verschiedene Ursachen. Er ist zum Teil Licht, welches, von dem Retinabilde kommend, diffus zurückgeworfen, die übrigen Teile der Retina trifft. Außerdem ist es aber auch Licht, welches, von demselben Bilde kommend, von der Cornea aufs neue zur Retina reflektiert wird. Das diffuse Licht des fünften Bildes wird diesem leuchtenden Nebel hinzugefügt. Ich habe auf verschiedene Weise, aber vergeblich versucht, dieses Bild trotzdem sichtbar zu machen. Durch Rechnung weiß man, daß von einem leuchtenden Punkte, welcher sich in geringer Entfernung hinter der Cornea befindet, das fünfte Bild auf der Retina entsteht. Versucht man aber, auf optischem Wege einen leuchtenden Punkt in dieser Gegend zu entwerfen, so erscheint sein nützliches Bild in Zerstreuungskreisen von solcher Größe, daß es unmöglich wird, andere Dinge zu unterscheiden. Auch der Versuch, das Bild dadurch sichtbar zu machen, daß ich auf eine sehr stark leuchtende Lichtquelle durch ein kleines Diaphragma blickte, war von demselben Mißerfolge begleitet. Es ist zu berücksichtigen, daß es in der Nachbarschaft des nützlichen Bildes erscheinen müßte, was die Beobachtung noch schwieriger macht als sie ohnedies ist.

Der Brennpunkt des sechsten Systems befindet sich dagegen nahe der Retina, wodurch das Bild leicht zu beobachten ist. Ungeachtet dessen ist es immer noch wenig bekannt. Ich habe es als neu entdeckt vor Kurzem beschrieben.<sup>1</sup> Von Herrn Prof. KÖNIG bin ich aber auf eine frühere Abhandlung von O. BECKER<sup>2</sup> aufmerksam gemacht worden, aus der hervorgeht, daß COCCIUS zuerst dieses Bild beobachtet hat. Dieser

<sup>1</sup> M. TSCHERNING, *Théorie des images de PURKINJE et description d'une nouvelle image. Arch. de Physiologie.* avril. 1891. p. 357.

<sup>2</sup> O. BECKER, *Über Wahrnehmung eines Reflexbildes im eigenen Auge. Wiener med. Wochenschrift* 1860. S. 670—672 und 684—688.

führte es auf eine Doppelreflexion an der Hyaloidea zurück. Das würde also das Retinalbild selbst sein, welches sich in der Hyaloidea widerspiegelt und so auf einem anderen Punkt der Retina sichtbar wird. BECKER zeigte in seiner Arbeit die Unhaltbarkeit dieser Erklärung und giebt die richtige und ausführliche Theorie des Phänomens. HEUSE<sup>1</sup> beschreibt es 1872 von neuem und giebt eine der COCCIUSSCHEN ähnliche Erklärung von demselben, sowie die leichteste Methode, dasselbe zu beobachten.

Entfernt man nach diesem Autor in einem dunklen Zimmer eine Kerze von der Sehlinie, so sieht man ein lichtschwaches Bild der Flamme erscheinen, das stets eine in Bezug auf die Sehlinie zur Kerzenflamme annähernd symmetrische Stellung einnimmt. Es ist hinreichend lichtstark, um sich davon überzeugen zu können, daß es ein umgekehrtes Bild der Flamme darzustellen scheint. (Durch Projektion nach außen erscheint das Bild umgekehrt, ist aber in Wirklichkeit ein aufrechtes.) Nicht allen Beobachtern erscheint dieses Bild in derselben Schärfe. Es giebt selbst sehr erfahrene Beobachter, welche dasselbe nicht sehen können, wobei wahrscheinlich Unterschiede in der Tiefe der vorderen Kammer sowie in der Refraktion des Auges eine Rolle spielen.

Zum genaueren Studium dieses Bildes ist es vorteilhafter, sich meines Ophthalmophakometers zu bedienen, durch welches ich dasselbe auch entdeckt habe. Wir werden weiter unten näher darauf eingehen; hier will ich nur die Aufmerksamkeit auf die verschiedene Form lenken, welche das Bild je nach der seitlichen Entfernung der Lichtquelle vom fixierten Punkte annimmt. Bei einer Entfernung von ungefähr  $10^0$  ist das von einem runden Objekt z. B. einer Glühlampe, die sich im Brennpunkte einer starken Linse befindet, herrührende Bild rund. Vergrößert man diese Entfernung, so wird das Bild sehr scharf und nimmt die Gestalt eines vertikalen Bandes an, wenn die Lampe sich in derselben Horizontalebene wie der Fixationspunkt befindet; durch eine Accommodationsanstrengung wird es in ein horizontales Band verwandelt. Befindet sich die Lampe noch näher der Peri-

---

<sup>1</sup> HEUSE, Über die Beobachtung einer neuen entoptischen Erscheinung. *Gräfers Archiv*. Bd. 18. Abtl. 2. S. 236.

pherie, so erscheint das Bild in Gestalt eines horizontalen diffusen Bandes, welches durch eine Accomodationsanstrengung schärfer gemacht werden kann. Diese verschiedenen Formen hängen wahrscheinlich von der astigmatischen Deformation ab, welche die Strahlenbündel infolge der verschiedenen Refractionen und Reflexionen mit sehr schrägem Einfallswinkel erleiden. Sie sind auch zu beobachten, wenn man sich der Sonne als Lichtquelle bedient.

Man kann das Bild auch mit Hilfe der Methode zu Gesicht bekommen, welcher man sich bei Beobachtung entoptischer Erscheinungen bedient. Konzentriert man vermittels einer Linse das Licht einer Lampe auf eine kleine Öffnung und nähert das Auge derselben, so erscheint sie in Gestalt einer leuchtenden Scheibe. Fixiert man den Rand dieser Scheibe, so sieht man das sechste Bild auf schwarzem Grunde erscheinen. Um es scharf sehen zu können, muß man eine bedeutende Accomodationsanstrengung machen.<sup>1</sup>

Wir haben anfangs bemerkt, das Auge sei darin allen dioptrischen Instrumenten überlegen, daß der Betrag des verlorenen und des schädlichen Lichtes so ungemein gering sei. Würde das sechste Bild nicht eine so schwache Leuchtkraft besitzen, so könnte es der Nähe der Retina wegen leicht eine Störung verursachen.

Auf die Eigenschaften des siebenten (nützlichen) Bildes gehen wir nicht ein, weil dieselben für die Fragen, welche wir in dieser Abhandlung besprechen nur von nebensächlichem Interesse sind.

---

<sup>1</sup> Bei Anstellung dieser Experimente war ich erstaunt, mit welcher Schärfe man die *Processus ciliares iridis* zu Gesicht bekommt. Man sieht die leuchtende Scheibe umgeben von einem Kranz schwarzer Stäbe, deren Anzahl 60 bis 80 zu sein scheint und welche voneinander durch leuchtende Zwischenräume von bräunlicher Farbe getrennt werden. Die Teile der Iris, welche den zwischen den Ciliarfortsätzen liegenden Räumen entsprechen, lassen nämlich einen Teil des Lichtes durch. Dieses Phänomen kann vielleicht auch, wenn man der sphärischen Aberration des Auges Rechnung trägt, das unter dem Namen „Haarstrahlenkranz“ von HELMHOLTZ beschriebene Phänomen erklären. Wenn die kleine leuchtende Öffnung soweit entfernt wird, daß die Scheibe zu einem Punkte sich zusammenzieht, nähern sich die Zwischenräume einander so sehr, daß das Licht interferieren kann. Hierdurch entsteht die unendliche Anzahl von sehr feinen Strahlen, welche man im Haarstrahlenkranz beobachtet.

Die nebenstehende Fig. 2 zeigt die Lage dieser sieben besprochenen Bilder im menschlichen Auge, und zwar von einem Objekte, welches sich in der Unendlichkeit  $20^{\circ}$  nach unten von der Augenaxe entfernt befindet.

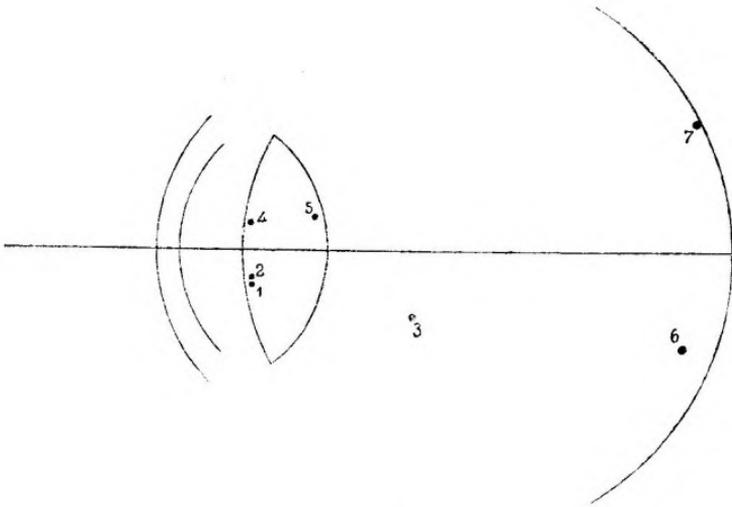


Fig. 2.

## II.

**Beschreibung und Gebrauch des Ophthalmophakometers.**

Ich habe dem Instrument, welches mir zu der vorliegenden Untersuchung gedient hat, den Namen Ophthalmophakometer gegeben, weil es zur Messung der Krümmungsradien der Linsenflächen bestimmt ist. Das Instrument (Fig. 3) besteht aus einem Dreifuß, der ein kleines Fernrohr trägt. An diesem Fernrohr ist ein um seine Axe beweglicher Messingbogen von 86 cm Radius befestigt. Das Centrum des Bogens ist zu gleicher Zeit der Ort für das zu untersuchende Auge und der Punkt, auf welchen das Fernrohr eingestellt werden muß. Diese sinnreiche Einrichtung ist dem Ophthalmometer von JAVAL und SCHJÖTZ entlehnt. Der Kopf der zu beobachtenden Person wird von einem Kopfhalter getragen, dessen Kinntheil derart gehoben und gesenkt werden kann, daß man stets im stande ist, dem beobachteten Auge die geeignete Stellung zu geben. Die Schraube des Dreifußes erlaubt, die Fernrohraxe genau auf das Auge zu richten, so daß dieses in der Mitte des Gesichtsfeldes erscheint.

Der Bogen ist so eingerichtet, daß man auf ihm unabhängig voneinander drei Schieber gleiten lassen kann, und zwar:

1. einen Schieber *A*, welcher eine elektrische Glühlampe trägt,

2. einen Schieber *B*, welcher einen senkrecht zur Ebene des Bogens gerichteten Stab trägt, an dessen beiden Enden je eine Glühlampe angebracht ist,

3. einen Schieber *C*, welcher gleichfalls einen senkrechten Stab trägt, auf welchem eine als Fixationsmarke dienende glänzende kleine Kugel gleitet. Mitunter ist es der Blendung des beobachteten Auges wegen notwendig, diese Kugel durch eine kleine Glühlampe zu ersetzen.

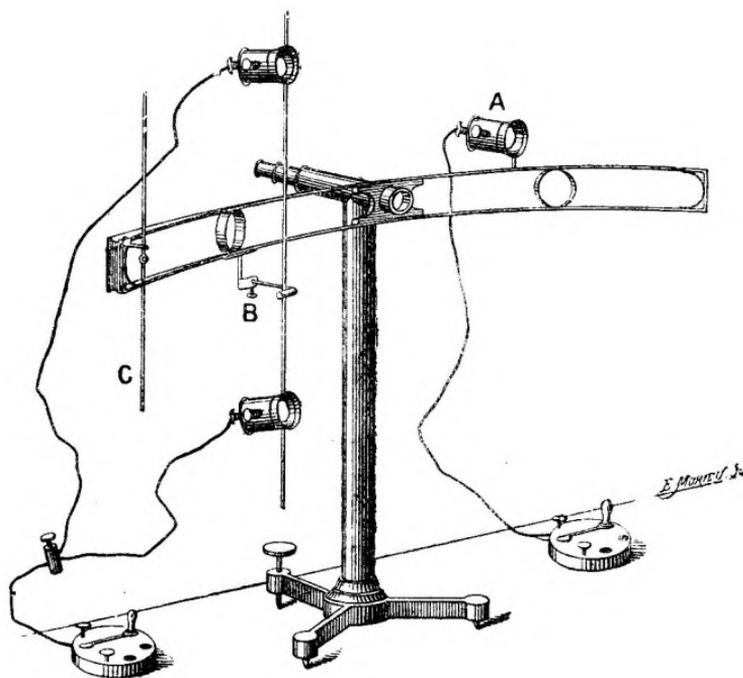


Fig. 3.

Jede Lampe ist in eine kleine, an einem Ende verschlossene messingene Röhre eingeschlossen. Die nach vorn gekehrte Öffnung enthält eine plankonvexe Linse, deren plane Fläche gegen die Lampe gekehrt ist. Indem man dieselbe vor- oder zurückschiebt, kann man die austretenden Strahlen nach Wunsch parallel oder konvergierend machen. — Die Lampen, welcher ich mich bediene, sind recht klein, bedürfen 6 oder 8 Volt Spannung

und eine Stromstärke von ein oder zwei Ampère. Durch Ein- und Ausschalten von Widerständen ist es möglich, ihre Leuchtkraft zu verändern.

Jedem dieser Schieber kann man jede beliebige Stellung an dem Bogen geben. Letzterer ist in Zehntel-Grade geteilt, deren Nullpunkt der Axe des Fernrohres entspricht. Jeder Grad hat eine lineare Länge von 15 mm.

Man beobachtet mittelst des kleinen astronomischen Fernrohres. Das Fadenkreuz hat die Gestalt eines rechtwinkligen Doppelkreuzes. Die Arme werden gebildet von je zwei parallelen Fäden, von denen das eine Paar dem Bogen parallel, das andere aber senkrecht zu dieser Richtung gestellt ist. Das Objektiv hat eine Öffnung von 22 mm ( $1^{\circ},5$  vom beobachteten Auge). Die Vergrößerung ist eine ungefähr 12malige. Das Gesichtsfeld beträgt 35 mm ( $2^{\circ},35$ ), enthält mithin ungefähr 3mal den Durchmesser der Cornea.

Ich habe, wie man sieht, die Entfernung des Instrumentes vom beobachteten Auge aus zwei Gründen recht groß gewählt. Wir haben zunächst gesehen, daß das dritte Bild bedeutend hinter den drei übrigen zurücksteht, welche annähernd in der Pupillarebene gelegen sind. Ist das Fernrohr in geringer Entfernung vom untersuchten Auge aufgestellt, so kann man nicht alle drei Bilder auf einmal scharf einstellen, ein Übelstand, welchen man fast vollständig dadurch beseitigen kann, daß man sich weiter absetzt. Die große Entfernung hat aber auch noch einen anderen Vorteil. Die Messungen, welche ich mit dem Instrumente mache, sind in erster Linie Winkelmessungen. Bei hinreichend großem Abstände, kann man das ganze Auge als Centrum des Bogens ansehen und hat sich nicht um den Ort zu kümmern, wo sich die verschiedenen Linien im Auge begegnen. Die Scheitel der verschiedenen Winkel sind auf diese Weise in einem Punkte vereinigt. Das ist um so wichtiger, als die Gesichtslinie als Ausgangspunkt für die meisten Messungen dient, und die Richtung dieser sich nicht genau bestimmen läßt. Sie wird gewöhnlich als die Gerade bezeichnet, welche den Fixationspunkt mit dem ersten Knotenpunkt verbindet. Letzterer kann aber experimentell nicht bestimmt werden.

Ogleich die Methoden, deren wir uns bedienen, untereinander mehr oder weniger differieren, so haben sie doch einige gemeinsame Prinzipien, welche wir beständig anwenden.

Um unsere späteren Auseinandersetzungen abzukürzen, wollen wir sie hier beschreiben.<sup>1</sup>

#### A. Methode, um die Normale zu einer Fläche zu suchen.

Angenommen, wir beobachten die Fläche durch ein Fernrohr, dessen Objektivmittelpunkt leuchtend sei, die Fläche erzeuge ein katoptrisches Bild; dieses letztere erzeugt dann wiederum ein anderes in der Ebene des Fadenkreuzes, welches wir durch das Okular beobachten. Die Gerade, welche dieses letztere Bild mit dem Mittelpunkt des Objektivs verbindet, ist senkrecht auf der Fläche. Indem man auf geeignete Weise so lange die Stellung des Fernrohrs oder der Fläche verändert, bis man das Bild in der Mitte des Gesichtsfeldes erblickt, gelangt man dazu, die Fernrohraxe zur Fläche senkrecht zu stellen. Es ist nun nicht praktisch, einen leuchtenden Punkt in der Mitte des Objektivs zu befestigen, aber man kann, wenn man die Methode ein wenig verändert, sehr gut die Normale bestimmen. Zunächst gebe ich an unserem Instrument dem Bogen eine horizontale Lage. Nachdem der Schieber *A* auf Null gestellt und die Lampe angezündet worden ist, verändere ich die Stellung des Instrumentes so lange, bis ich das Bild im vertikalen Meridian des Gesichtsfeldes zu sehen bekomme. Das Einfallslot befindet sich jetzt mit der Axe des Fernrohres in derselben Ebene und bildet mit ihr einen sehr kleinen Winkel ( $1^\circ$  bis  $2^\circ$ ), da die Lampe sich nahe am Fernrohr befindet. Will man die beiden Linien genau zusammenfallen lassen, so muß man den Bogen um  $90^\circ$  drehen und das Fernrohr so lange in der vertikalen Ebene verrücken, bis das Bild der Lampe im horizontalen Meridian des Gesichtsfeldes erscheint. Die Axe des Fernrohres ist nunmehr senkrecht auf der Fläche.

#### B. Methode zur Bestimmung des gemeinsamen Lotes zweier hintereinander liegenden durchsichtigen und reflektierenden Flächen.

Wir bezeichnen die erste Fläche mit  $S_1$ , die zweite mit  $S_2$ , ihre Radien mit  $R_1$  und  $R_2$  und nehmen an, die erste Fläche

<sup>1</sup> Ich werde im Folgenden annehmen, daß die Flächen sphärische seien, oder daß wenigstens die Teile derselben, mit denen man arbeitet, als solche betrachtet werden können. Wenn die Cornea astigmatisch ist, muß man die Mafse in den Hauptmeridianen nehmen.

habe keinen Einfluß auf die durchgehenden Strahlen oder, wie wir uns ausdrücken, die zweite Fläche sei eine scheinbare.

Wird vorausgesetzt, daß die Mitte des Fernrohrobjectivs leuchtend ist, so hat die Lösung der Aufgabe, wie aus dem bereits Gesagten hervorgeht, keine Schwierigkeiten. Man würde nur die beiden katoptrischen Bilder des leuchtenden Punktes in der Mitte des Feldes miteinander zusammenfallen lassen müssen, um der Axe des Fernrohres die Richtung der auf beiden Flächen senkrechten Linie zu geben.

Die Methode sei angewandt auf zwei beliebige optisch wirksame Flächen des Auges. Ich mache dann die Bestimmung, indem ich die rechtwinkligen Koordinaten des Fixationspunktes im Verhältnis zur gemeinsamen Senkrechten feststelle. Nachdem der Schieber *B* auf Null gestellt und die Lampen angezündet worden sind, stelle ich den Bogen horizontal. Hierauf wird der Schieber *C*, welchen der Beobachtete fixieren muß, so lange verschoben, bis man die vier Bilder untereinander im vertikalen Meridian erblickt. Die Winkelentfernung  $x$ , von *C* bis Null, bezeichnet dann den Winkel zwischen der Gesichtslinie und einer vertikalen Ebene, die das gemeinsame Lot enthält. Dann wird der Bogen vertikal gestellt, und ich verschiebe aufs neue den Schieber *C*, bis die vier Bilder in einer Linie erscheinen. Durch eine geringe Verschiebung im vertikalen Meridian komme ich dazu, dieselben in den horizontalen Meridian des Gesichtsfeldes zu verlegen, wenn sie sich nicht schon in demselben befinden sollten. Die Winkelentfernung  $y$ , von *C* bis Null, bezeichnet den Winkel, den die Gesichtslinie mit der horizontalen Ebene bildet, in welcher das gemeinsame Lot liegt. Wenn man die beobachtete Person einen Punkt fixieren läßt, welcher vom Bogen unabhängig ist, und welcher so gelegen ist, daß seine Koordinaten, bezogen auf den Nullpunkt des Instrumentes,  $x$  und  $y$  sind, so fällt die Axe des Fernrohres mit dem gemeinsamen Lote zusammen, und die vier katoptrischen Bilder verbleiben in einer Linie, welche Stellung man auch dem Bogen giebt.

#### C. Zweite Methode, das gemeinsame Lot auf zwei Flächen zu bestimmen.

Es giebt noch eine andere Methode, auf indirektem Wege die Richtung des zweien Flächen gemeinsamen Lotes zu bestimmen,

die aber voraussetzt, daß die Bilder der zwei Flächen, wenigstens annähernd in demselben Abstand vom Scheitel der ersten Fläche sich befinden, wie es zum Beispiel mit den Bildern der beiden Hornhautflächen der Fall ist. Angenommen die Ebene, welche die Gesichtslinie und das beiden Flächen gemeinsame Lot enthält, sei bekannt; ich stelle dann den Bogen in diese Ebene, den Beobachteten ersuchend, in die Mitte des Fernrohr-Objektivs zu blicken. Der Schieber  $A$  befindet sich in einer gewissen Entfernung von dem Fernrohr. Sein Ort sei mit  $A_1$ , seine Entfernung vom Nullpunkte mit  $a_1$  bezeichnet. Nachdem die Lampen angezündet worden sind, wird der Schieber  $B$  so lange verschoben, bis die Bilder von  $B$ , welche von der Fläche  $S_1$  gebildet werden, sich auf derselben Geraden mit dem Bilde von  $A$ , welches von der Fläche  $S_2$  entsteht, befinden. Ich bezeichne diesen Ort von  $B$  mit  $B_1$  und seine Winkelentfernung vom Nullpunkt mit  $b_1$ . Ich wiederhole nunmehr dasselbe Experiment, die Schieber auf die andere Seite stellend. Ihre neuen Orte seien mit  $A_2$  und  $B_2$  und ihre Winkelentfernungen vom Nullpunkt mit  $a_2$  und  $b_2$  bezeichnet. Nimmt man den Raum zwischen den beiden Orten eines jeden Schiebers als Objekt, so sieht man, daß das Bild von  $A_1 A_2$ , von der Fläche  $S_2$  gebildet, gleich ist dem Bilde von  $B_1 B_2$ , von der Fläche  $S_1$  gebildet. Die Radien der beiden Flächen müssen folglich umgekehrt proportional den Objekten sein, und man wird erhalten:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{A_1 A_2}{B_1 B_2} = \frac{a_1 + a_2}{b_1 + b_2} \dots \dots \dots (1).$$

Bezeichnen wir nunmehr mit  $X$  die Stelle, wo das gemeinsame Lot den Bogen trifft, und mit  $x$  seine Winkelentfernung vom Nullpunkt, so ist es klar, daß, wenn man eine Lampe in  $X$  aufstellt, die beiden Bilder zusammenfallen werden. Man kann daher  $A_1 X$  als Objekt für die Fläche  $S_2$  und  $B_1 X$  als Objekt für die Fläche  $S_1$  betrachten. Da die beiden Bilder gleich sind, so hat man:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{A_1 X}{B_1 X} = \frac{a_1 + x}{b_1 + x} \dots \dots \dots (2).$$

Diese beiden Gleichungen, miteinander vereinigt, geben

$$\frac{a_1 + x}{b_1 + x} = \frac{a_1 + a_2}{b_1 + b_2} \text{ und}$$

$$x = \frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{a_1 + a_2 - (b_1 + b_2)}.$$

Im allgemeinen kann man die der Gesichtslinie und der gesuchten Linie gemeinsame Ebene nicht als bekannt annehmen. Ist dieses nicht der Fall, so muß man auf die angedeutete Weise noch eine andere Ebene, z. B. die horizontale, bestimmen, welche ebenfalls die gesuchte Linie enthält.

Die Methode empfiehlt sich als Kontrolle der ersten Methode und ist besonders da wichtig, wo aus irgend einem Grunde die erste Methode schwer oder unmöglich anzuwenden ist. Weiter unten werden wir übrigens (S. 479) eine andere Anwendung desselben Prinzipes kennen lernen.

D. Bestimmung des Einfallswinkels, welchen ein Strahl mit einer der Flächen bildet, wenn derselbe auf der anderen senkrecht ist.

Nehmen wir zunächst wiederum an, daß der Mittelpunkt des Objektivs leuchtend sei, so entstehen zwei katoptrische Bilder. Wir wollen aber nur das von der Fläche  $S_2$  erzeugte berücksichtigen und dasselbe in die Mitte des Gesichtsfeldes bringen. Wenn ich nun einen zweiten leuchtenden Punkt so lange bewege, bis sein von der Fläche  $S_1$  erzeugtes Bild mit dem von  $S_2$  erzeugten Bilde des Centrums des Objektivs zusammenfällt, so ist die Winkelentfernung zwischen den beiden leuchtenden Punkten gleich dem Doppelten des gesuchten Winkels.

Man führt das Experiment so aus, daß man den Schieber  $A$  auf Null stellt und den Schieber  $B$  so lange verrückt, bis das von  $S_2$  erzeugte Bild von  $A$  in einer Linie mit den von  $S_1$  erzeugten Bildern der Lampen des Schiebers  $B$  erscheint.

Um ein möglichst genaues Resultat zu erzielen, würde es natürlich notwendig sein, der Fixationsmarke eine solche Stellung zu geben, daß die gemeinsame Senkrechte sich in der Ebene des Bogens befindet. Ebenso muß die Axe des Fernrohrs nach der Methode  $A$  senkrecht auf  $S_2$  gestellt werden. Im allgemeinen begeht man nur einen geringen Fehler, wenn man diese Bedingungen vernachlässigt.

### E. Bestimmung des Krümmungsmittelpunktes einer Fläche.

Alle Mafse, welche wir mit einem Instrumente wie dem Ophthalmophakometer erhalten, sind stets Winkelmafse. Sie reichen aus zur Feststellung einer gewissen Anzahl von Zahlen, welche notwendig sind, um eine richtige Vorstellung von der Dioptrik des Auges zu erhalten, wie z. B. die Richtung der Centrierungslinie im Verhältnis zur Gesichtslinie,

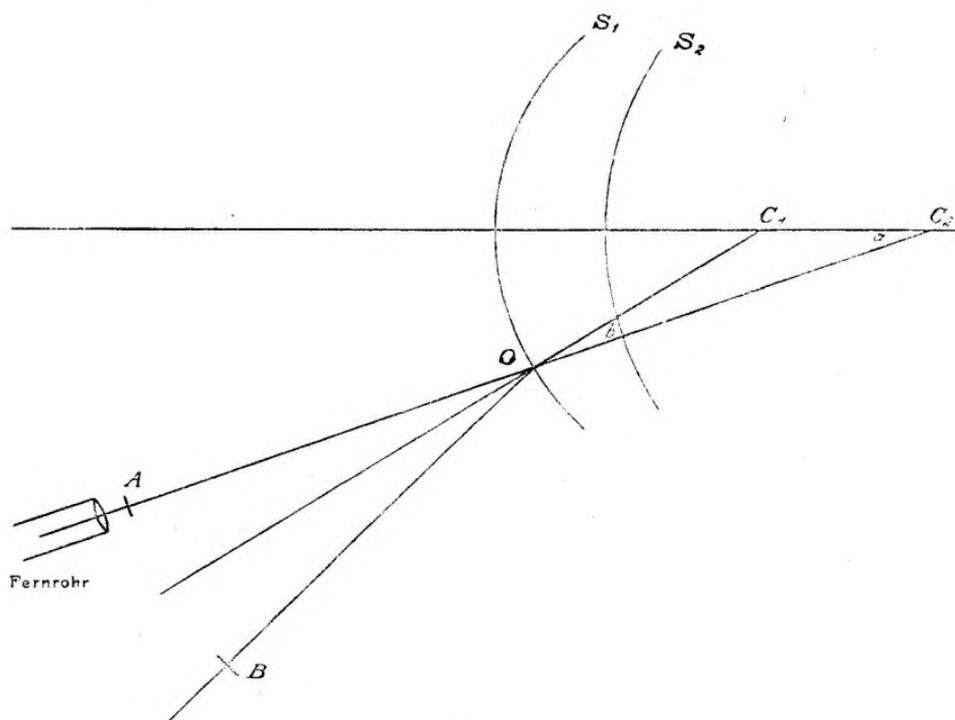


Fig. 4.

die Öffnungswinkel der brechenden Flächen u. s. w. Um aber die Lage und die Krümmung der Flächen bestimmen zu können, muß uns wenigstens eine lineare Gröfse bekannt sein. Dieses gilt auch für die Ophthalmometrie der Cornea, bei welcher die lineare Gröfse der Verdoppelung zum Ausgangspunkte dient. Für unsere Messungen wollen wir hierzu den Krümmungsradius der vorderen Fläche der Cornea benutzen, welchen wir mit Hülfe eines Ophthalmometers messen wollen. Will man nicht sehr genaue Messungen vornehmen, so kann man sich, besonders wenn es sich nicht um sehr große Öffnungswinkel handelt, auf den Krümmungsradius im Mittelpunkt der Cornea

beschränken. Verlangt man aber möglichst genaue Messungen, so muß man diese Radien von  $5^{\circ}$  zu  $5^{\circ}$  auf der ganzen Länge des Meridians bestimmen, in welchem man arbeitet.

Man bestimmt zunächst nach den Methoden B oder C die zugleich auf der vorderen Hornhautfläche und der in Frage stehenden Fläche Senkrechten, verstellt darauf die Fixationsmarke  $C$ , bis die gemeinsame Senkrechte sich in der Ebene des Bogens befindet und einen willkürlichen Winkel  $a$  mit der Fernrohraxe bildet. Die Lage des Bogens ist je nach dem Meridian, den man zu messen wünscht, ebenfalls willkürlich. Man stellt  $A$  auf Null ein, zündet die Lampen an und bestimmt nach der Methode D den Einfallswinkel der Fernrohraxe  $b$ . Wir kennen nunmehr im Dreieck  $C_1 O C_2$  (Fig. 4) die Winkel  $a$  und  $b$  und die Seite  $C_1 O = R_1$ . Dieses erlaubt uns, die anderen Teile des Dreiecks zu finden.

$$C_1 C_2 = R_1 \frac{\sin b}{\sin a}, \quad C_2 O = R_1 \frac{\sin(a + b)}{\sin a}.$$

#### F. Die Bestimmung der Lage des Scheitels einer Fläche.

Nachdem wir die gemeinsame Senkrechte in die Ebene des Bogens gebracht haben, stellen wir die Fixationsmarke so, daß sie (Fig. 5) einen willkürlichen Winkel  $c$  mit der Fernrohraxe bildet. Der Schieber  $A$  wird auf der anderen Seite ebenfalls um  $c$  von der gemeinsamen Normalen entfernt. Hierauf bringt man das von  $S_2$  ausgehende Bild von  $A$  in die Mitte des Gesichtsfeldes und bestimmt nach der Methode D den Einfallswinkel der Fernrohraxe  $d$ .

Wir erhalten also die Gleichungen:

$$C_1 O_2 = R_1 \frac{\sin d}{\sin c} \text{ und}$$

$$O_1 O_2 = R_1 - R_1 \frac{\sin d}{\sin c}.$$

Diese beiden soeben ausgeführten Bestimmungen reichen hin, um die Fläche kennen zu lernen, wenn dieselbe als sphärisch

betrachtet werden kann. Würde die Fläche astigmatisch sein, so hätte man die unter E beschriebene Messung in anderen Meridianen zu wiederholen.

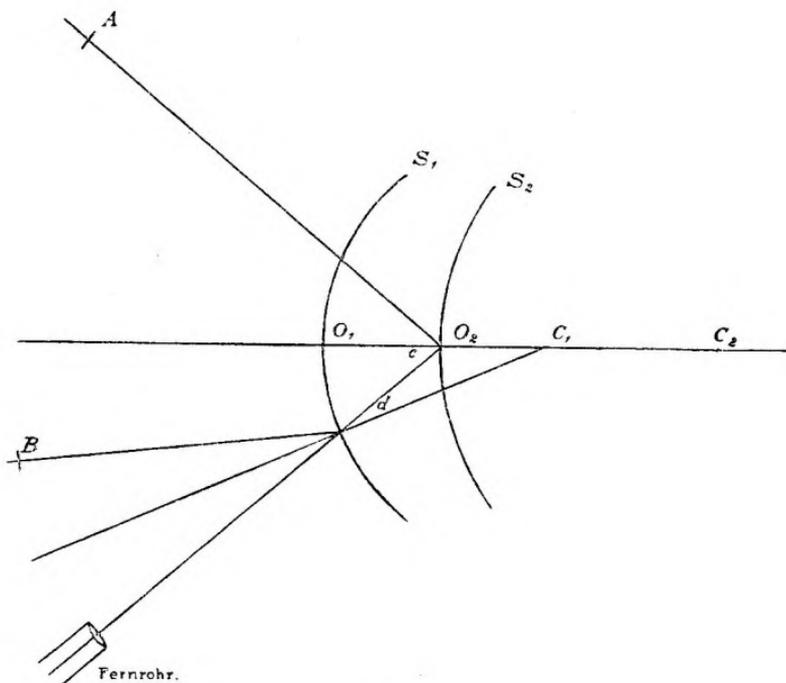


Fig. 5.

### G. Bestimmung der Lage des katoptrischen Brennpunktes einer Fläche.

Zuweilen erscheint es nützlich, zur Kontrolle der von uns ausgeführten Messungen die Lage des Brennpunktes zu bestimmen. Zu diesem Zwecke muß man der Lampe des Schiebers A eine solche Lage geben, daß die heraustretenden Strahlen untereinander parallel sind, wobei die Lampe sich in der verlängerten gemeinsamen Normalen und in einer willkürlichen Winkelentfernung  $e$  (Fig. 6) von der Fernrohraxe befinden muß. Man richtet das Fernrohr auf das von  $S_2$  gebildete katoptrische Bild der Lampe von A und bestimmt nach der Methode D den Einfallswinkel der Fernrohraxe auf die Cornea. Man erhält ebenso wie vorher die Gleichungen:

$$OF = R_1 \frac{\sin(e + f)}{\sin e},$$

$$C_1 F = R_1 \frac{\sin f}{\sin e}.$$

Diese letzten Messungen sind zuweilen ein wenig schwierig zu machen, weil die Fixationsmarke sich häufig so nahe der Lampe von *A* befindet, dafs es dem Beobachteten der Blendung wegen schwer fällt, die Fixationsmarke zu sehen.

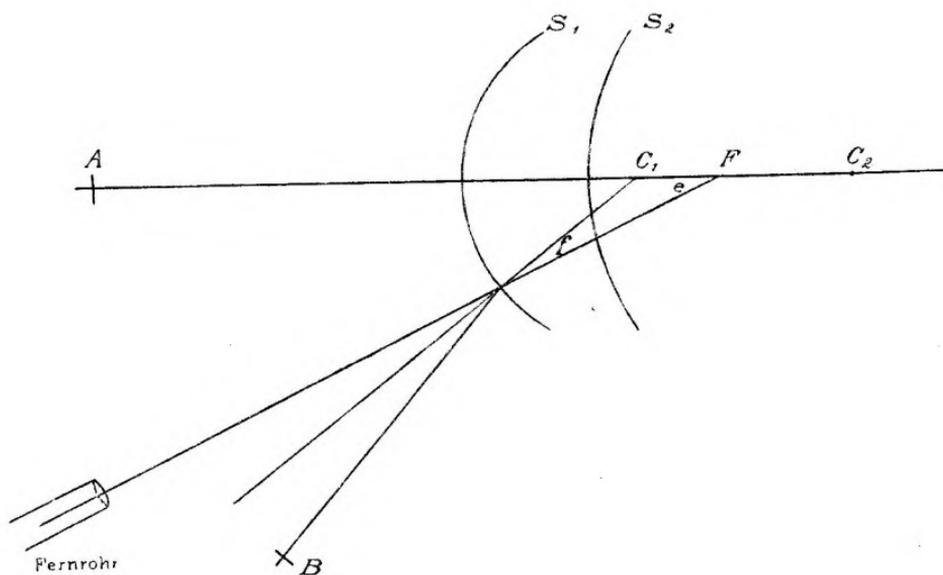


Fig. 6.

Mit Hülfe der hier beschriebenen Methoden ist es, wie wir im folgenden Abschnitt sehen werden, möglich, alle optischen Konstanten des Auges mit Ausnahme der Indices zu bestimmen.

### III.

#### Beobachtungsergebnisse.

Ich werde in diesem Abschnitt die Ergebnisse einer gewissen Anzahl von Messungen geben, welche ich nach den soeben erwähnten Grundsätzen angestellt habe. Da die Zahl der von mir untersuchten Augen keine sehr große ist, so will ich hier nur die Maße eines einzigen, und zwar des rechten Auges meines Gehülfen, anführen. Wenn daher auch diese Ergebnisse keine allgemeine Geltung haben können, so bestätigen oder verbessern

sie doch die auf anderem Wege gefundenen Zahlen und enthalten eine Anzahl von Messungen, welche bisher am lebenden Auge nicht ausgeführt worden sind, wie z. B. die Bestimmung der Form der hinteren Fläche der Hornhaut, Centrierungsfehler etc. In Fällen von größerem Interesse werde ich auch Maße anderer Augen geben.

Im Folgenden werden die Radien der vier brechenden Flächen des Auges in ihrer natürlichen Reihenfolge mit  $R_1, R_2, R_3$ , und  $R_4$ , die Krümmungsmittelpunkte mit  $C_1, C_2, C_3$  und  $C_4$  und die Scheitel mit  $S_1, S_2, S_3$  und  $S_4$  bezeichnet werden. Zur Bezeichnung der Radien, Krümmungsmittelpunkte und Scheitel der scheinbaren Flächen wollen wir uns derselben Buchstaben bedienen, dieselben aber zum Unterschiede mit der Marke ' versehen, so bezeichnet z. B.  $C_3'$  den Krümmungsmittelpunkt der scheinbaren Vorderfläche der Linse.

Man erhält als direktes Ergebnis der Beobachtung die den scheinbaren Flächen entsprechenden Werte. Um die wahren Werte zu finden, bediene ich mich des folgenden Verfahrens: Nachdem ich zunächst mit irgend einem Ophthalmometer den Krümmungsradius der vorderen Hornhautfläche gemessen habe, berechne ich die Brennweite dieser Fläche.<sup>1</sup> Hierauf folgt die experimentelle Bestimmung der zweiten Hornhautfläche nach einer später anzugebenden Methode. Die auf diese Weise gefundenen scheinbaren Werte werden darauf durch die Formel<sup>2</sup>

$$\frac{F_1}{f_1} + \frac{F_2}{f_2} = 1,$$

in der  $F_1$  und  $F_2$  die Brennweiten der ersten Fläche, durch welche die zweite gesehen wird, bezeichnen, reduziert. Nachdem ich so die wahren Werte der zweiten Fläche gefunden habe, berechne ich das brechende System derselben<sup>3</sup> und verbinde dieses System mit demjenigen der vorderen Fläche.<sup>4</sup> Auf diese Weise erhalte ich das brechende System, durch welches die dritte Fläche gesehen wird und welches mir zur Reduktion der scheinbaren Werte dieser dient, und so weiter.

<sup>1</sup> Mit Hülfe der Formeln 3a und 3b in § 9 des *Handb. d. physiol. Optik* von HELMHOLTZ.

<sup>2</sup> HELMHOLTZ, *Handb. d. physiol. Optik.* § 9. Formel 3c.

<sup>3</sup> HELMHOLTZ, *Handb. d. physiol. Optik.* § 9. Formel 3a und 3b.

<sup>4</sup> HELMHOLTZ, *Handb. d. physiol. Optik.* § 9. Formel 11d, e u. f.

A. Die Hornhaut.

a. Die vordere Fläche.

Wenngleich manche Fragen besonders über die Form der peripherischen Teile der vorderen Hornhautfläche noch nicht hinreichend aufgeklärt sind, so soll doch auf die Form dieser Fläche hier nicht näher eingegangen werden. Wir werden uns daher darauf beschränken, in der folgenden Tabelle II die Maße des rechten Auges meines Gehülfen anzuführen. Sie enthält die Krümmungsradien in Millimetern, mit dem Ophthalmometer von JAVAL und SCHJÖTZ von  $5^{\circ}$  zu  $5^{\circ}$  gemessen. Das Fernrohr des neuen Modells dieses Ophthalmometers trägt eine große Scheibe, auf der sich Teilstriche befinden, welche in Graden die Entfernung vom Fernrohr angeben. Der Beobachtete fixierte der Reihe nach diese Teilstriche, während der Beobachter sich bemühte, immer die Hornhautbilder, welche zur Messung dienten, genau in die Mitte des Gesichtsfeldes zu verlegen, so daß die Ophthalmometeraxe stets senkrecht zur Fläche gestellt war.

Tabelle II.

		Winkel, den der Krümmungsradius mit der Gesichtslinie bildete						Winkel, den die auf dem Hornhautrande Senkrechte mit der Gesichtslinie bildete	
		0°	5°	10°	15°	20°	25°		30°
Horizontaler Meridian	Nasaler Teil	7,98	7,98	8,13	8,25	8,74	9,45	9,67	43°
	Temporaler Teil	7,98	7,92	7,98	8,07	8,27	8,59	13,2	44°
Vertikaler Meridian	Oberer Teil	7,60	7,81	7,96	8,25	9,27	9,93	—	—
	Unterer Teil	7,60	7,60	7,64	7,79	8,07	9,27	—	—

Die starken schwarzen Linien bezeichnen den Ort des Pupillenrandes, und zwar die erste unter gewöhnlichen Umständen, die zweite hingegen nach Einträufelung von Atropin; sie sind, wie wir später sehen werden, mit dem Ophthalmophakometer gemessen worden. Die letzte Kolonne bezeichnet den Winkel, welchen die auf der Cornea Senkrechte bei ihrem Durchtritt durch den Hornhautrand mit der Gesichtslinie bildet. Dieselbe wird auf ähnliche Weise wie die Pupillenweite gefunden (S. 468). Man

sieht, die vollständige Öffnung der Hornhaut ist beinahe 90°, und die Gesichtslinie trifft diese fast in der Mitte.

Wenn wir nur den centralen Teil der Hornhaut berücksichtigen und als Index 1.377 annehmen, so finden wir für diese Fläche folgende Brennweiten:

Tabelle III.

	Vordere Brennweite	Hintere Brennweite	Vordere Brennweite in Dioptrien <sup>1</sup>
Horizontaler Meridian	21,17 mm	29,15 mm	47,24
Vertikaler „	20,16 „	27,76 „	49,60

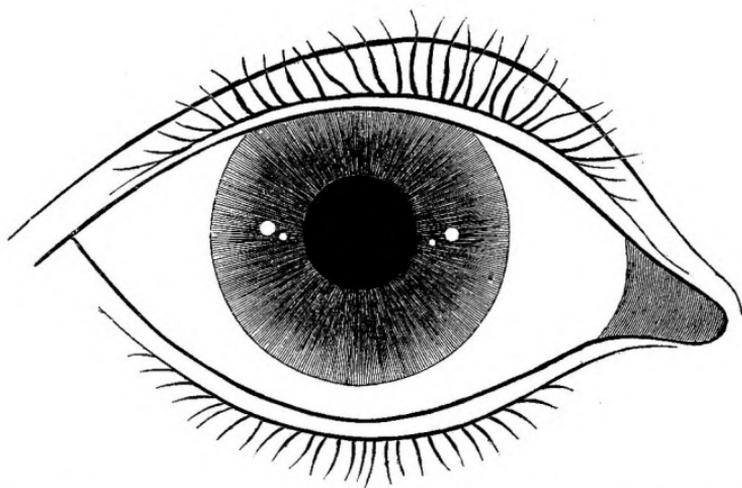
b. Die Centrierlinie der beiden Hornhautflächen.

Um den Ausdruck *Axe* zu vermeiden, welchen man in der physiologischen Optik häufig gebraucht, um die *Axe* des Ellipsoids zu bezeichnen, mit dem man die vordere Fläche dieser Membran vergleicht, bediene ich mich zur Bezeichnung der den beiden Hornhautflächen gemeinsamen Normalen des Ausdruckes *Centrierlinie*. Die Richtung der *Centrierlinie* läßt sich direkt durch die Methode B bestimmen. Diese Bestimmung ist übrigens weniger sicher als in anderen Fällen, bei welchen ich diese Methode benutze; und man muß die Ausführung etwas verändern. Da das Bild der hinteren Hornhautfläche in den centralen Teilen der Cornea unsichtbar bleibt, so ist der Abstand der beiden Lampen des Schiebers B voneinander nicht groß genug. Ich stelle daher in gleicher Höhe mit dem Fernrohr an beiden Enden des Bogens je eine Lampe auf. Zuweilen muß man den Bogen selbst ein wenig verlängern, um den beiden Lampen eine hinreichend peripherische Lage geben zu können, was notwendig ist, um durch die Reflexion an der hinteren Hornhautfläche ein scharfes Bild zu erhalten. Giebt man nunmehr dem Bogen eine horizontale Lage und

<sup>1</sup> Wir haben hier in Frankreich die Gewohnheit, die Brechkraft der Cornea (vordere Fläche) in Dioptrien durch den reziproken Wert der vorderen Fokaldistanz auszudrücken. Ich bediene mich im Folgenden für die anderen Oberflächen eines ähnlichen Ausdruckes, welcher eine bessere obwohl nur annähernde Vorstellung von dem Anteil einer jeden derselben an der Refraktion des Auges giebt.

ersucht den Beobachteten, die Mitte des Objektivs zu fixieren, so sieht man an der inneren Seite eines jeden der grossen von der vorderen Fläche herrührenden Bilder ein kleines blasses Bild erscheinen, welches seinen Ursprung einer Reflexion an der hinteren Fläche verdankt. In den Augen, welche ich untersucht habe, lagen diese kleineren Bilder immer näher dem Centrum der Pupille als die grösseren und befanden sich mit letzteren gewöhnlich auch nicht auf derselben Horizontalen. Im rechten Auge meines Gehülfen waren dieselben augenscheinlich ein wenig nach unten gelegen (Fig. 7), und

Fig. 7.



Rechtes Auge. — Die Lampen befinden sich mit dem Fernrohr auf derselben Horizontalen. Der Beobachtete fixiert die Mitte des Fernrohrobjektivs. Die (kleinen) Bilder der hinteren Hornhautfläche liegen etwas unter den (grossen) Bildern der vorderen Hornhautfläche. Die Centrierungslinie der Hornhaut ist also von der Gesichtslinie nach unten gerichtet.

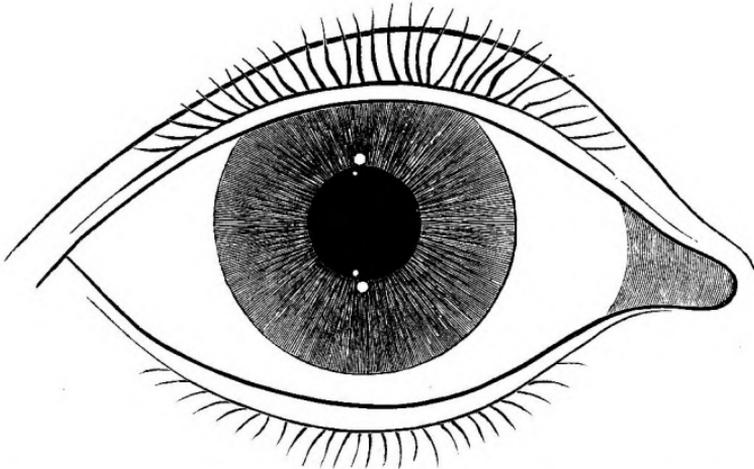
es mußte der Blick um  $3.05$  gehoben werden, um die vier Bilder auf derselben Horizontalen zu vereinigen. Diese Erfahrung zeigt also, daß die Centrierlinie mehr nach unten als die Gesichtslinie gerichtet ist, und daß dieselbe mit letzterer oder vielmehr mit ihrer Projektion auf die durch die Centrierlinie gehende vertikale Ebene einen Winkel von  $3.05$  bildet.

Um die vier Bilder bei vertikal stehendem Bogen auf einer vertikalen Geraden zu vereinigen, muß man den Blick  $5.06$  nasalwärts vom Mittelpunkt des Fernrohrobjektivs richten. (Fig. 8.)

Die Centrierlinie der Cornea ist also in diesem Auge 5.<sup>06</sup> nach außen und 3.<sup>05</sup> nach unten von der Gesichtslinie gelegen.

Da diese Bestimmung wegen der sehr peripheren Lage der Bilder nicht sehr genau ist, so wollen wir dieselbe sogleich nach der Methode C wiederholen.

Fig. 8.



Rechtes Auge. — Die Lampen befinden sich mit dem Fernrohr auf derselben Vertikalen. — Der Beobachtete fixiert die Mitte des Fernrohrobjektivs. Die Lage der (kleinen) Bilder der hinteren Hornhautfläche zeigt an, daß die Centrierungslinie der Hornhaut von der Gesichtslinie nach außen gerichtet ist.

### c. Die hintere Hornhautfläche.

Man kann mit Hilfe der Methode E die Lage des Krümmungscentrums der peripheren Teile dieser Fläche bestimmen. In der folgenden Tabelle IV gebe ich einige im horizontalen Meridian gemachte Messungen.

Die Bedeutung dieser Tabelle ist leicht zu verstehen. Bei dem Experimente I z. B. war der Schieber *A* auf Null gestellt, und der Blick war 20° nasalwärts gegen den Schieber *C* gerichtet. Sogleich konnte man mit Leichtigkeit die beiden Hornhautbilder der Lampe bei *A* unterscheiden, und es war notwendig, den Schieber *B* auf 3°<sub>42</sub> nasal einzustellen, damit das an der hinteren Fläche entstandene Bild von *A* mit den an der vorderen Fläche entstandenen Bildern der Lampen von *B* in einer Linie stand. In dem Maße, als der Blick eine immer mehr peripherische Richtung annahm, mußte auch der Schieber *B*

immer mehr zur Peripherie verschoben werden. Bei einer Blickrichtung von  $42^\circ$  nach aufsen und  $48^\circ$  nach innen verschwand das Bild der hinteren Fläche. Vergleicht man diese Zahlen mit den letzten der Tabelle II (S. 459), so bemerkt man, daß dieses vor dem Bilde der vorderen Fläche verschwindet, wenn der Blick sich mehr und mehr nach aufsen richtet, während dasselbe bei der Blickrichtung nach innen noch einige Zeit nach Verschwinden des Bildes der vorderen Fläche vorhanden ist.

Tabelle IV.

I			II		
A	B	C	A	B	C
1. $0^\circ$	$3^\circ,42$ nasalwärts	$20^\circ$ nasalwärts	$0^\circ$	$5^\circ,41$ temporalw.	$20^\circ$ temporalw.
2. $0^\circ$	$3^\circ,90$ „	$25^\circ$ „	$0^\circ$	$6^\circ,50$ „	$25^\circ$ „
3. $0^\circ$	$5^\circ,10$ „	$30^\circ$ „	$0^\circ$	$8^\circ,25$ „	$30^\circ$ „
4. $0^\circ$	$6^\circ,70$ „	$35^\circ$ „	$0^\circ$	$9^\circ,47$ „	$35^\circ$ „
5. $0^\circ$	$9^\circ,58$ „	$40^\circ$ „	$0^\circ$	Das Bild der hinteren Fläche bildet ein horizontales Band	$40^\circ$ „
6. $0^\circ$	$13^\circ,54$ „	$45^\circ$ „	$0^\circ$	Grenze der Sichtbarkeit des Bildes der hinteren Fläche	$42^\circ$ „
7. $0^\circ$	Grenze der Sichtbarkeit des Bildes der hinteren Fläche	$48^\circ$ „			

Die Zahlen der Tabelle IV gestatten zunächst mit Hülfe der Methode C die Richtung der den beiden Flächen gemeinsamen Normalen zu bestimmen und so die soeben gemachte direkte Bestimmung zu kontrollieren. Verbinden wir z. B. die Messungen I. 1. und II. 1., so haben wir in die Formel

$$x = \frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{a_1 + a_2 - (b_1 + b_2)}$$

folgende Werte einzusetzen

$$a_1 = 20^\circ, \quad b_1 = 20^\circ - 3^\circ,42 = 16^\circ,58$$

$$a_2 = 20^\circ, \quad b_2 = 20^\circ - 5^\circ,41 = 14^\circ,59;$$

daraus ergibt sich  $x = 4^\circ,5$ .

Verbindet man in ähnlicher Weise die drei übrigen Paare von entsprechenden Messungen, welche in beiden Serien vorkommen, und nimmt aus allen das Mittel, so erhält man

$$x = 6,02$$

Der Wert ist ein wenig größer als derjenige, welchen wir auf direktem Wege gefunden haben ( $5^0,6$ ). Wir wollen den Wert für die folgenden Rechnungen zu  $6^0$  annehmen.<sup>1</sup>

Man kann nunmehr mit Hilfe der Formel (S. 455.)

$$C_2'O = \frac{\sin(a+b)}{\sin a} R_1$$

den Mittelpunkt der Krümmung der hinteren scheinbaren Fläche bestimmen.

In dem Versuch I. 1. z. B. hat man

$$a = 20^0 - 6^0 = 14^0; b = \frac{3,42}{2} = 1,71 \text{ und nach der Tabelle II}$$

$R_1 = 8,27 \text{ mm}$ , woraus folgt, daß  $C_2'O = 7,27 \text{ mm}$  ist.

Die Tabelle V giebt die Resultate für die drei ersten Messungen jeder Serie; der anderen konnte ich mich nicht bedienen, da ich die Krümmungsradien der vorderen Fläche für die betreffenden peripheren Teile nicht bestimmt hatte.

Tabelle V.

Winkelfernung der Gesichtslinie	$a$	$b$	$R_1$	$C_2'O$	
Temporaler Teil der Cornea	20°	14°	1° 71	8,27 mm	7,27 mm
	25°	19°	1° 95	8,59 „	7,74 „
	30°	24°	2° 55	13,18 „	11,85 „
Nasaler Teil der Cornea	20°	26°	2° 70	8,47 „	7,64 „
	25°	31°	3° 25	9,45 „	8,54 „
	30°	36°	4° 12	9,67 „	8,69 „

<sup>1</sup> Zu bemerken ist, daß die Richtung des Blickes sich bei jedem Versuche änderte, während die benutzte Methode Unbeweglichkeit des Auges fordert. Da aber die katoptrischen Bilder der beiden Flächen sich annähernd in gleicher Entfernung vom Scheitel befinden, so ist diese Änderung von keinem Einflusse auf die Resultate der Versuche.

Um den scheinbaren Krümmungsradius der in Frage stehenden Fläche zu bestimmen, wäre es nötig, aufer dem Orte des Krümmungscentrums den scheinbaren Ort der Fläche selbst, mit anderen Worten die scheinbare Dicke der Cornea zu kennen. Es war mir nicht möglich, diesen Wert mit Hülfe der Methode F zu bestimmen, weil das Bild der hinteren Fläche in der Mitte der Pupille nicht sichtbar war. Ich versuchte dasselbe, jedoch ohne Erfolg, sichtbar zu machen, indem ich die Lampe auf der einen, das Fernrohr auf der anderen Seite der Gesichtslinie, und zwar beide in großer Winkelentfernung, aufstellte. Es giebt aber ein anderes Mittel, den Ort der in Frage stehenden Fläche zu bestimmen. Bekanntlich sind die Krümmungsradien zweier katoptrischen Flächen, welche von zwei verschiedenen Gegenständen Bilder derselben Größe erzeugen, den Gegenständen umgekehrt proportional. Dieses findet nun in unserem letzten Versuche statt. Stellen wir uns in der That im Versuch I. 1. eine Lampe  $L$   $6^\circ$  nach aufsen von der Fixationsmarke aufgestellt vor, d. h. da, wo die gemeinsame Normale den Bogen trifft, so müssen die beiden Bilder der Lampe notwendigerweise zusammenfallen. Das durch die hintere Fläche von  $A$  hervorbrachte Bild fällt mit dem durch die vordere Fläche von  $B$  erzeugten Bilde zusammen. Es ist daher, wenn man  $LA$  und  $LB$  als Gegenstände betrachtet, das Bild von  $LA$ , welches von der hinteren Fläche erzeugt wird, gleich dem Bilde von  $LB$ , das von der vorderen Fläche herrührt. Da aber  $LA = 14^\circ$  und  $LB = 10^\circ,68$ , so erhält man folgende Gleichungen:

$$\frac{R_1}{R'_2} = \frac{14}{10,68} \text{ und } R'_2 = 0,76 R_1.$$

Man kann so den scheinbaren Radius der hinteren Fläche finden und erhält durch Kombination seines Wertes mit dem von  $C'_2O$ , der in Tabelle V angegeben ist, die scheinbare Dicke der Cornea. Diese Resultate sind in den drei ersten Kolonnen der Tabelle VI verzeichnet.

Die 4. und 5. Kolonne geben die wahren Werte für den Radius der hinteren Fläche und für die Dicke der Cornea, nach den scheinbaren Werten mit Hülfe der Formel  $\frac{F_1}{f_1} + \frac{F_2}{f_2} = 1$  ausgerechnet. Die beiden letzten Kolonnen geben die Lage des

Brennpunktes, um die Orte der Bilder weit entfernter Gegenstände anzudeuten.

Tabelle VI.

Winkelentfernung der Gesichtslinie	$\frac{R'_2}{R'_1}$	$R'_2$	Scheinbare Dicke der Cornea	$R_2$	Wirkliche Dicke der Cornea	$F'_1$	$F'_2$	
Temperaler Teil der Cornea	20°	0,76	6,25 mm	1,02 mm	6,18 mm	1,34 mm	4,13 mm	4,14 mm
	25°	0,79	6,83 „	0,91 „	6,75 „	1,21 „	4,30 „	4,32 „
	30°	0,79	10,38 „	1,47 „	10,25 „	1,94 „	6,59 „	6,66 „
Nasaler Teil der Cornea	20°	0,79	6,71 „	0,93 „	6,62 „	1,23 „	4,23 „	4,28 „
	25°	0,79	7,47 „	1,07 „	7,36 „	1,41 „	4,72 „	4,80 „
	30°	0,77	7,45 „	1,24 „	7,32 „	1,63 „	4,83 „	4,96 „

Man sieht, daß der Radius der hinteren Fläche ungefähr 2 Millimeter kleiner ist als derjenige der vorderen Fläche, und daß erstere in ähnlicher Weise wie die letztere sich gegen die Peripherie hin abplattet. Die von uns gefundenen Werte für die Dicke der Cornea stehen den von HELMHOLTZ für tote Augen gefundenen (1,37 mm in der Mitte, 1,39 mm in gleicher Entfernung von der Mitte und der Peripherie und 1,58 mm am Rande) um ein Geringes nach. Wenn anderweitige Messungen meine Zahlen bestätigen, so wird man die Ursache wohl in einer postmortalen Imbibition der Membran suchen müssen. Die beiden letzten Kolonnen zeigen, daß die Bilder der beiden Flächen sich beinahe in derselben Entfernung hinter der vorderen Fläche befinden.

Da das Bild für die Mitte der Cornea, wenigstens an den von mir untersuchten Augen, nicht sichtbar ist, so sind wir genötigt, uns mit Schlüssen zu begnügen, welche wir aus unseren Messungen an den peripheren Teilen ableiten können, wie man es übrigens auch für die vordere Hornhautfläche thut. Wir wissen ja durch die Messungen von HELMHOLTZ, daß die Dicke des centralen Teiles der Cornea sich gegen die Mitte hin wenig ändert. Setzen wir also als wahre Dicke 1,15 mm, so wird die scheinbare 0,87 mm sein.

Die Tabelle VI zeigt außerdem, daß das Verhältnis des scheinbaren Radius der hinteren Fläche zu dem Radius der

vorderen Fläche beinahe konstant gleich 0,79 ist. Nehmen wir dasselbe für die Mitte der Cornea an, so wird der scheinbare Radius hier 6,30 mm und der wahre 6,22 mm sein. Der scheinbare Brennpunkt wird sich in  $3,15 \text{ mm} + 0,87 \text{ mm} = 4,02 \text{ mm}$  befinden, während derjenige der vorderen Fläche sich in 3,99 mm befinden wird. Diese Werte erklären hinreichend die Unmöglichkeit, die beiden Bilder voneinander zu sondern.

Indem ich mich nunmehr nur mit dem centralen Teile beschäftige, finde ich für die hintere Fläche, die also zwischen Hornhautsubstanz und Humor aqueus liegt, folgende Werte:

Ort des Scheitels	1,15 mm	
Radius	6,22	"
Vordere Brennweite	= - 211,47	" (- 4,73 Dioptr.)
Hintere Brennweite	= - 205,25	"

Kombiniert man die beiden Hornhautflächen, so erhält man ein System, dessen Kardinalpunkte folgende sind:

Ort des ersten Hauptpunktes	- 0,1327 mm	
Ort des zweiten Hauptpunktes	- 0,1366	"
Vordere Brennweite	= 24,40	" (40,99 Dioptr.)
Hintere Brennweite	= 32,61	"

Vernachlässigt man die Verschiedenheit, welche zwischen den Indices der Hornhautsubstanz und dem Humor aqueus besteht, so fallen die beiden Hauptpunkte im Scheitel der Cornea zusammen, und die Brennweiten werden unter dieser Bedingung 23,71 mm (42,11 Dioptrien) und 31,69 mm sein. Durch diese Vereinfachung begeht man daher nur einen sehr kleinen Fehler.

## B. Die Pupille.

Um ein dioptrisches Instrument beurteilen zu können, muß man die Form und die Stellung der brechenden Flächen, sowie die Indices der brechenden Medien kennen. Es ist aber außerdem notwendig, die Größe der Öffnung des Instrumentes zu kennen und ihre Lage zur Axe desselben. Da bekanntlich die Pupillaröffnung sehr veränderlich ist, so haben die folgenden Werte nur eine sehr relative Bedeutung. Im allgemeinen muß man den Umstand in Betracht ziehen, daß das Auge während der Messung immer stark beleuchtet ist, um die mittlere Pupillenweite nicht, wie das gewöhnlich zu geschehen pflegt, kleiner zu nehmen, als sie in Wirklichkeit ist. Die von mir gefundenen Zahlen sind bedeutend kleiner als die-

jenigen, welche man unter gewöhnlichen Lebensbedingungen für die Weite der Pupille anzutreffen pflegt.

Zur Bestimmung des horizontalen Durchmessers der Pupille stelle ich den Schieber *A* bei horizontal gestelltem Bogen auf Null und verändere die Lage des Schiebers *C*, welchen der Beobachtete zu fixieren hat, so lange, bis das Hornhautbild von *A* mit dem inneren Pupillarrande zusammenfällt. Die Winkelentfernung *AC* zeigt den Winkel zwischen Gesichtslinie und der Linie an, welche auf der Cornea senkrecht steht und den Pupillarrand berührt. Da die Axe des Fernrohres auf der Cornea senkrecht steht, so fällt der scheinbare Pupillarrand mit dem wahren zusammen. Ich wiederhole darauf den Versuch für den äußeren Pupillarrand und bei vertikal gestelltem Bogen auch für den oberen und unteren Pupillarrand. Die Ergebnisse dieser Messungen sind folgende:

Äußerer Rand	19 <sup>0</sup> ,6	nach Kokaineinträufelung	28 <sup>0</sup> ,3
Innerer	" 17 <sup>0</sup> ,8	" " "	26 <sup>0</sup> ,2
Oberer	" —	" " "	28 <sup>0</sup> ,4
Unterer	" —	" " "	28 <sup>0</sup> ,1

Die Tiefe der vorderen Kammer war, wie wir weiterhin sehen werden, 3,53 mm, der Abstand der Pupillarebene von dem Krümmungsmittelpunkt der Hornhaut war also im horizontalen Durchmesser 7,98 mm — 3,53 mm = 4,45 mm und im vertikalen 4,07 mm, was für die Pupillenweite folgende Werte ergibt.

Horizontal . . . . .	1,49 mm + 1,36 mm = 2,85 mm
Horizontal bei erweiterter Pupille	2,11 " + 1,97 " = 4,08 "
Vertikal bei erweiterter Pupille	2,20 " + 2,17 " = 4,37 "

Die auf der Cornea Senkrechte, welche durch die Mitte der Pupille geht, war mit der Gesichtslinie in einer Horizontalebene, aber ein wenig nach außen von jener, gelegen. Die Gesichtslinie bildet also mit dieser Senkrechten einen Winkel von ungefähr 1<sup>0</sup>, wobei zu bemerken ist, daß die Richtung der letzteren bei Erweiterung der Pupille keine Veränderung erleidet.

Die Pupillaröffnung, vom Krümmungsmittelpunkt der Cornea aus gesehen, war 37<sup>0</sup>,4 (54<sup>0</sup>,5) im horizontalen und (56<sup>0</sup>,5) im vertikalen Meridian.

Ich habe endlich diese Versuche genau in derselben Weise wiederholt, indem ich mich dabei aber anstatt des Hornhautbildes des vorderen Linsenbildes von *A* bediente, und gefunden:

Außerer Rand	9 <sup>o</sup> ,5	bei erweiterter Pupille	12 <sup>o</sup> ,9
Innerer	" 2 <sup>o</sup> ,5	" "	" 5 <sup>o</sup> ,8
Oberer	" "	" "	" 4 <sup>o</sup>
Unterer	" "	" "	" 10 <sup>o</sup> ,36.

Die Pupillaröffnung ist daher, vom Krümmungsmittelpunkt der vorderen Linsenfläche aus gesehen, nur 12°. Dieser letztere muß sich folglich ungefähr 3 mal weiter nach hinten von der Pupillarebene als der Krümmungsmittelpunkt der Cornea befinden, d. h. ungefähr 17 mm hinter dem Hornhautscheitel. Die Linie, welche auf der vorderen Linsenfläche senkrecht steht und durch die Mitte der Pupille geht, verläuft 3<sup>o</sup>,5 nach aufsen und 3<sup>o</sup>,2 nach unten von der Gesichtslinie. Diese Zahlen geben uns schon annähernd eine Vorstellung von der Krümmung und der Lage der vorderen Linsenfläche.

### C. Die Linse.

#### a. Richtung der Axe.<sup>1</sup>

Ich verstehe unter Axe der Linse die den beiden Oberflächen derselben gemeinsame Senkrechte, welche aber nicht senkrecht auf der Cornea zu stehen braucht. Ein Lichtstrahl, welcher im Innern des Auges der Linsenaxe folgt, wird also, sobald er die Cornea trifft, gebrochen werden. Diesen gebrochenen, nach hinten verlängerten Strahl bezeichne ich als scheinbare Linsenaxe, denn jeder Punkt dieser Linie ist das durch Brechung in der Cornea entstandene Bild eines Punktes der wahren Axe. Die Lage des Bildes eines solchen Punktes läßt sich bestimmen, wenn man die Linie, welche ihn mit dem Krümmungsmittelpunkt der Cornea verbindet, zieht. Da, wo sich diese Linie mit der scheinbaren Axe schneidet, befindet sich der gesuchte Punkt. Wir wollen nunmehr an die Bestimmung der Richtung der scheinbaren Axe einerseits, im Verhältnis zu der Gesichtslinie (siehe den Abschnitt über die Schiefstellung der Linse), andererseits zum Centrum der Cornea (siehe den Abschnitt über die Centrierung des Auges) gehen. In letzterem wollen wir auch die Mittel angeben, mit welchen es gelingt, die wahre Axe der Linse zu bestimmen. Hier wollen wir übrigens gleich bemerken, daß der Unterschied zwischen dieser und der

<sup>1</sup> Ich vernachlässige hier und im Folgenden den Unterschied zwischen den Indices der Cornea und des Humor aqueus.

scheinbaren Axe so gering ist, daß er ohne erheblichen Fehler vernachlässigt werden kann.

### 1. Die Schiefstellung der Linse gegen die Gesichtslinie.

TH. YOUNG sagt in seiner berühmten Abhandlung „On the mechanism of the eye“<sup>1</sup>, daß seine Linse schief gegen die Gesichtslinie gestellt wäre. Er schätzt diese Schiefstellung an der vorderen Fläche auf  $10^{\circ}$  und glaubt, daß diejenige der hinteren Fläche noch bedeutender sei ( $13^{\circ}$ ).<sup>2</sup>

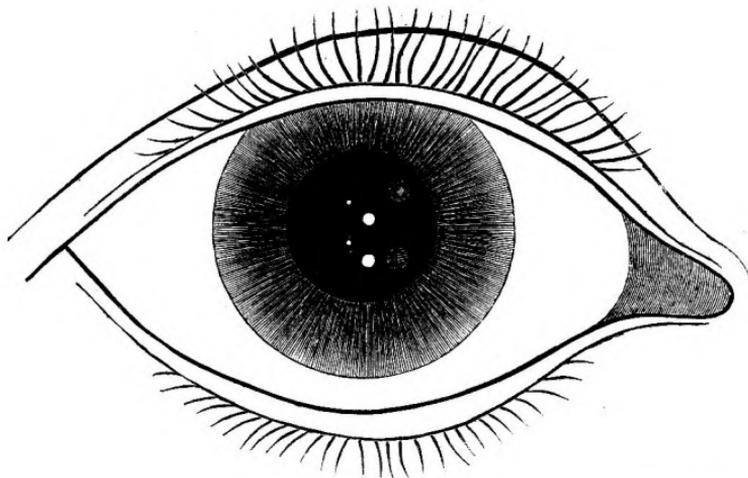
YOUNG glaubte, die Schiefstellung der Linse wäre die Ursache seines Astigmatismus. Es ist bekannt, daß er zuerst diesen verbreiteten Fehler des menschlichen Auges gefunden und nachgewiesen hat, daß derselbe seinen Sitz nicht in der Cornea haben könne, indem der Grad seines Astigmatismus sich dann nicht änderte, wenn er sein Auge in Wasser tauchte. Obgleich auch HELMHOLTZ auf den Winkel, welchen die optische Axe des Auges mit der Gesichtslinie bildet, hingewiesen hat, wird doch die Schiefstellung der Linse oft übersehen. Es genügt ein Blick in das Ophthalmophakometer, um dieselbe außer Zweifel zu setzen. Gewöhnlich richtet man mehr seine Aufmerksamkeit auf den Winkel  $\alpha$ , d. h. den Winkel, welchen die Gesichtslinie mit der Axe desjenigen Ellipsoids bildet, welches sich am besten der vorderen Hornhautfläche anpaßt. Dieser Winkel verdient indessen weniger Aufmerksamkeit, da der centrale Teil der Cornea sich nur sehr wenig von der sphärischen Form entfernt, wie bereits AUBERT nachgewiesen hat, und wie auch aus der Tabelle II hervorgeht. Ich bestimme die Schiefstellung nach der Methode B; zu diesem Zwecke stelle ich zunächst den Bogen des Ophthalmophakometers horizontal und zünde die in Null fixierten Lampen des Schiebers *B* an. Der Beobachtete blickt

<sup>1</sup> TH. YOUNG, *Philos. Trans. for 1801.*

<sup>2</sup> Die Zahlen zeigen die Einfallswinkel der Gesichtslinie an den Linsenflächen an. Nach den von HELMHOLTZ für das schematische Auge angegebenen Daten würde eine Schiefstellung der vorderen Fläche von  $10^{\circ}$  einer solchen der hinteren Fläche von ungefähr  $14^{\circ}$  entsprechen. Der Winkel zwischen Gesichtslinie und Linsenaxe würde ungefähr  $15^{\circ}$  betragen. Ich habe aber nie so hohe Grade der Schiefstellung beobachtet.

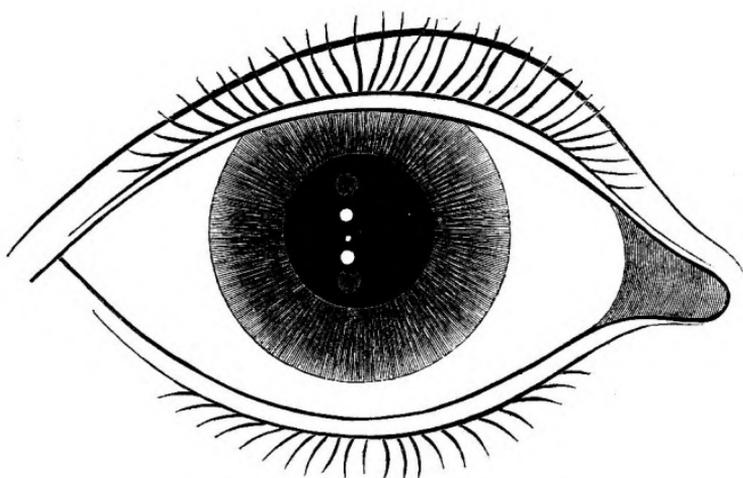
auf die Mitte des Fernrohrobjektivs. Wenn die drei Flächen zur Gesichtslinie centriert wären, so müßte man die sechs Bilder auf derselben Vertikalen erblicken. Dieses ist jedoch nicht der Fall, wie aus der Lage der Bilder in Fig. 9 ersichtlich

Fig. 9.



Rechtes Auge (nach Kokaineinträufelung). — Der Beobachtete fixiert die Mitte des Fernrohrobjektivs. Die beiden Lampen befinden sich in einer durch die Axe des Fernrohres gehenden Vertikalen, sind aber nicht symmetrisch gegen diese Axe gestellt, weil sonst einige von den Bildern hinter der Iris verschwinden würden.

Fig. 10.

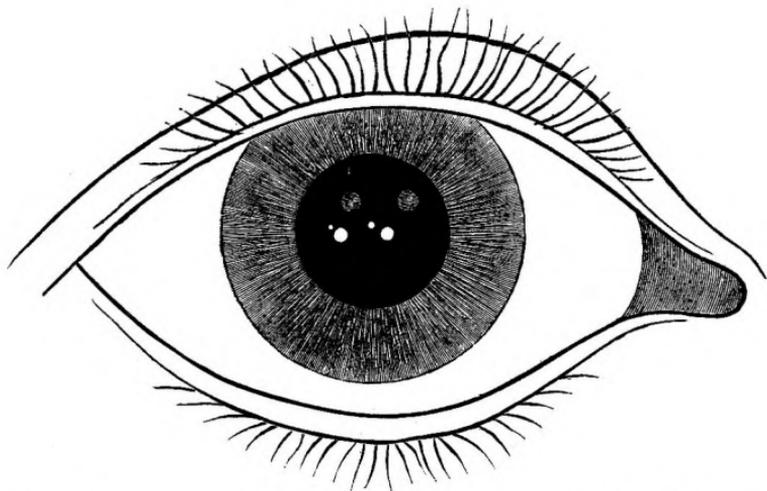


Rechtes Auge (nach Kokaineinträufelung). — Der Beobachtete blickt  $5^{\circ},7$  nasalwärts. Die Linsenaxe fällt in die Fernrohraxe. Die beiden Lampen befinden sich in einer durch die Axe des Fernrohres gehenden Vertikalen. — Das obere Bild von der Hinterfläche der Linse ist durch das obere Bild von der Vorderfläche der Hornhaut verdeckt.

ist. Dieses Bild ist nach dem rechten Auge meines Gehülfen gezeichnet worden und zeigt in der Mitte die Corneabilder in einer Vertikalen gelegen, diejenigen der vorderen Linsenfläche ebenfalls in einer Vertikalen, aber nach rechts und endlich diejenigen der hinteren Linsenfläche auf einer anderen Vertikalen, aber nach links. Ich lasse jetzt den Beobachteten den Schieber *C* fixieren und verstelle diesen so lange, bis ich die vier Linsenbilder auf derselben Vertikalen erblicke. (Fig. 10.) Die Winkeldistanz  $x$  von *C* bis Null zeigt die seitliche Abweichung der Linsenaxe von der Gesichtslinie an. Für das in Frage stehende Auge war  $x = 5^{\circ},7$ .

Ein ähnlicher Versuch im vertikalen Meridian ergab die vertikale Abweichung  $y$ , in unserem Falle gleich  $+2,6$  (die Axe nach unten abgewichen). (Fig. 11 und 12.) Bei Anstellung dieses letzteren Versuches bemerkte ich, daß die Hornhautbilder unter der horizontalen Linie gelegen sind, auf welcher sich die Linsenbilder befinden. Weiter unten werden wir die Bedeutung dieses Phänomens kennen lernen.

Fig. 11.



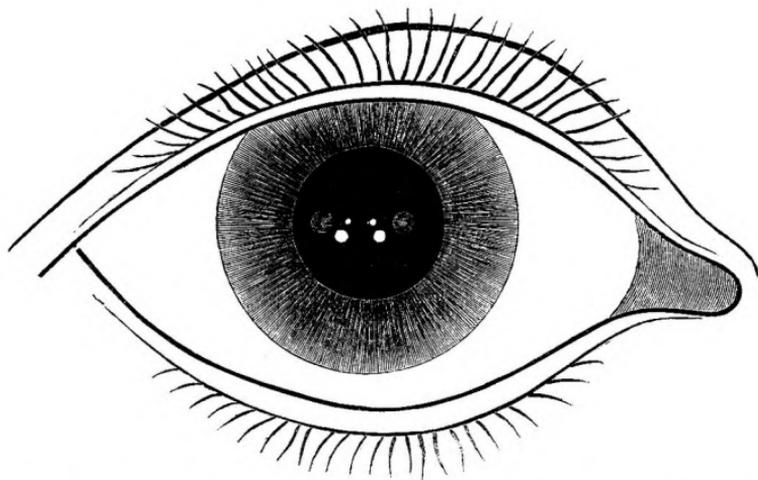
Rechtes Auge (nach Kokaineinträufelung). — Der Beobachtete fixiert die Mitte des Fernrohrobjektivs. Die beiden Lampen befinden sich auf einer durch die Fernrohraxe gehenden Horizontalen.

Man prüft dieses Resultat, indem man eine Fixationsmarke ein wenig nach vorne vom Bogen und unabhängig von diesem aufstellt: Die Lage dieser Marke muß eine solche sein, daß ihre Koordinaten im Verhältnis zur Mitte des Objektivs gleich

$x$  und  $y$  sind; wenn der Beobachtete die Marke fixiert, müssen die Linsenbilder bei jeder Stellung des Bogens auf einer Linie bleiben.

Die Messungen können mit großer Genauigkeit gemacht werden. Man irrt sich nicht leicht um mehr als ein oder zwei Zehntel Grad.

Fig. 12.



Rechtes Auge (nach Kokaineinträufelung). — Der Beobachtete blickt  $29,6$  nach oben. Die beiden Lampen befinden sich auf einer durch die Fernrohraxe gehenden Horizontalen. Die Linsenaxe fällt mit der Fernrohraxe zusammen. — Die Lage der Corneabilder unter den Linsenbildern zeigt an, daß das Centrum der Cornea sich unter der Linsenaxe befindet.

Einen viel bequemeren Ausdruck erhält man für die Stellung der Linse bei Anwendung von Polarkoordinaten, indem man erstens die Neigung  $v$  einer durch die Linsenaxe und die Gesichtslinie gelegten Ebene gegen den Horizont und zweitens den Winkel  $z$ , welchen diese beiden Linien miteinander bilden, anwendet. Kennt man  $x$  und  $y$ , so kann man die Winkel  $v$  und  $z$  nach den Formeln

$$\begin{aligned} \cotg v &= \sin x \cdot \cotg y \\ \cos z &= \cos x \cdot \cos y \text{ berechnen.} \end{aligned}$$

Man kann übrigens diese Winkel auch direkt finden, indem man den Schieber  $B$  auf Null stellt und den Beobachteten ersucht, auf die Mitte des Objektivs zu blicken. Dreht man nun den Bogen bis die vier Linsenbilder in einer Linie erscheinen, so be-

finden sich die Lampen des Schiebers *B* in einer Ebene mit der Gesichtslinie und der Linsenaxe, wodurch der Winkel *v* bestimmt werden kann. Hierauf dreht man den Bogen um  $90^\circ$  und verrückt die Fixationsmarke *C* so lange, bis man von neuem die Linsenbilder in einer Linie sieht. Die Lage von *C* giebt uns den Winkel *z*.

In der Tabelle VII sind die Resultate einiger von mir an verschiedenen Personen gemachten Messungen verzeichnet.

Tabelle VII.

Name	Alter		<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>v</i>
Mein Gehülfe	24 Jahre	Rechtes Auge	+ 5 <sup>0</sup> ,7	+ 2 <sup>0</sup> ,6		
		Linkes Auge	+ 5 <sup>0</sup> ,—	+ 2 <sup>0</sup> ,9	5 <sup>0</sup> ,8	20 <sup>0</sup>
M. B.	40 „	Rechtes Auge	+ 3 <sup>0</sup> ,8	+ 2 <sup>0</sup> ,9	4 <sup>0</sup> ,8	27 <sup>0</sup>
M. N.	17 „	Rechtes Auge	+ 3 <sup>0</sup> ,7	0 <sup>0</sup>	3 <sup>0</sup> ,7	0 <sup>0</sup>
		Linkes Auge	+ 4 <sup>0</sup> ,3	0 <sup>0</sup>	4 <sup>0</sup> ,3	0 <sup>0</sup>
M. M.	14 „	Rechtes Auge	+ 7 <sup>0</sup> ,—	0 <sup>0</sup>	7 <sup>0</sup> ,—	0 <sup>0</sup>
		Linkes Auge	+ 5 <sup>0</sup> ,—	0 <sup>0</sup>	5 <sup>0</sup> ,—	0 <sup>0</sup>
M. B.	15 „	Rechtes Auge	+ 4 <sup>0</sup> ,—	— 1 <sup>0</sup> ,5	4 <sup>0</sup> ,3	— 21 <sup>0</sup>
M. M.	43 „	Rechtes Auge	+ 4 <sup>0</sup> ,6	+ 0 <sup>0</sup> ,5	4 <sup>0</sup> ,6	6 <sup>0</sup>
		Linkes Auge	+ 4 <sup>0</sup> ,3	0 <sup>0</sup>	4 <sup>0</sup> ,3	0 <sup>0</sup>

Die Linsen waren also ohne Ausnahme schief gegen die Gesichtslinie gestellt. Die hauptsächlichste Abweichung in der Stellung der Linse macht den Eindruck, als wenn diese sich um eine vertikale Axe mit ihrer äußeren Kante nach hinten gedreht hätte. In den von mir untersuchten Augen variierte diese Abweichung zwischen  $3^\circ$  und  $7^\circ$ . Häufig aber befindet sich die Linsenaxe auch nicht in derselben Horizontalebene mit der Gesichtslinie, und es macht den Eindruck, als ob sich die Linse um eine horizontale und transversale Axe zugleich gedreht hätte. Am häufigsten ist es der obere Teil, welcher nach vorne gekehrt ist. Diese Abweichung ist geringer als die zuerst beschriebene und variiert zwischen  $0^\circ$  und  $3^\circ$ . Nur einmal habe ich

eine Drehung der Linse im entgegengesetzten Sinne angetroffen.

Die Schiefstellung der Linse muß Astigmatismus hervorbringen; es sei denn, daß dieselbe durch ihre Struktur vollkommen periskopisch sei, was kaum anzunehmen ist. Der am stärksten brechende Meridian ist derjenige, welcher die Axe und die Gesichtslinie enthält und daher wenigstens annähernd horizontal sein muß. Unsere Beobachtungen bestätigen somit zwei durch die klinische Erfahrung festgestellte That- sachen: DONDERS fand vor längerer Zeit bereits, daß Astig- matismus der Linse häufig denjenigen der Cornea, deren ver- tikaler Meridian in der Regel der am stärksten brechende ist, aufhebe. JAVAL hat andererseits die Beobachtung gemacht, daß Augen, welche frei von Hornhautastigmatismus sind, häufig einen Astigmatismus gegen die Regel besitzen. — Der Grad des von der Schiefstellung der Linse bedingten Astig- matismus ist nur ein sehr geringer. Ein Winkel von  $7^{\circ}$ , der größte, den ich beobachtet habe, würde 0,25 Dioptrien Astig- matismus entsprechen, wenn die Linse unendlich dünn wäre. Ihre Dicke jedoch und die ihr eigene Struktur müssen hier einen Einfluß ausüben, welcher schwer zu bestimmen ist.<sup>1</sup>

## 2. Die Centrierung des Auges.

In seiner physiologischen Optik giebt v. HELMHOLTZ bereits einen Versuch an, durch den man sich davon überzeugen kann, daß das menschliche Auge nicht vollkommen centriert ist.

Eine vollkommene Centrierung verlangt nämlich, daß die Linsenaxe senkrecht auf der Fläche der Hornhaut steht, was

---

<sup>1</sup> Die Wirkung der Schiefstellung der Linse ist in der That viel zu schwach, um die klinische Beobachtung vollkommen zu erklären. Ich habe aber gefunden, daß die hintere Fläche der Cornea häufig eine Asymmetrie aufweist, welche, ähnlich wie die ihrer vorderen Fläche, darin besteht, daß der vertikale Meridian der am stärksten brechende ist. Da diese Fläche die Wirkung einer Konkavlinse hat und diese Asym- metrie also einen Astigmatismus gegen die Regel nach sich ziehen muß, so sind die im Text aufgeführten Bemerkungen der Autoren leicht ver- ständlich. Ungeachtet des geringen Unterschiedes der Brechungskoeffi- zienten der Cornea und des Humor aqueus kann dieser Astigmatismus wegen der starken Krümmung der Fläche Grade erreichen, welche doch nicht ganz vernachlässigt werden sollten.

gewöhnlich nicht der Fall ist. Diesen Mangel an Centrierung messe ich, indem ich zunächst den Winkel  $\varepsilon$ , welchen eine durch die Axe der Linse und den Krümmungsmittelpunkt der Cornea gelegte Ebene mit dem Horizont bildet, und dann den Winkel  $\delta$ , der durch die Linsenaxe und der in ihrem Schnittpunkte mit der Cornea auf dieser errichteten Normalen gebildet wird, bestimme.

Die Messung wird in folgender Weise angestellt:

Ich nehme den letzthin beschriebenen Versuch wieder auf. Der Schieber  $B$  steht auf Null, während der Beobachtete auf eine vom Instrumente unabhängige Fixationsmarke blickt, welche so aufgestellt ist, daß die scheinbare Axe der Linse mit der Axe des Fernrohrs zusammenfällt. Wie bemerkt, bleiben unter solchen Bedingungen die vier Linsenbilder der Lampen von  $B$  in einer Linie, welches auch die Stellung des Bogens sei. Es kann nun der Fall eintreten, daß die Hornhautbilder ebenfalls bei jeder Stellung des Bogens auf dieser Linie sichtbar werden. Alsdann ist das Auge centriert, weil die Linsenaxe senkrecht auf der Cornea steht. Es giebt indessen eine Bogenstellung, welche auch im entgegengesetzten Falle alle sechs Bilder auf einer Geraden erscheinen läßt; nämlich, wenn die beiden Lampen des Schiebers  $B$  sich in derjenigen Ebene befinden, welche die Linsenaxe und das Hornhautcentrum enthält. Die Neigung dieser letzteren gegen den Horizont ist der Winkel  $\varepsilon$ . Ist diese Stellung gefunden, so dreht man den Bogen um  $90^\circ$ . Die vier Linsenbilder bleiben stets auf einer Geraden, während die Hornhautbilder auf eine andere dieser Geraden parallele Linie verlegt sind. Nachdem ich nunmehr die Lampe des Schiebers  $A$ , welche für diesen Versuch nur sehr schwach leuchten darf, angezündet habe, verrücke ich diesen Schieber so lange, bis sein Hornhautbild sich mit den vier Linsenbildern in einer Linie befindet. Die Winkelentfernung von  $A$  bis Null ist dann also das Doppelte des Winkels  $\delta'$ , welcher bei Kreuzung der scheinbaren Linsenaxe mit der im Kreuzungspunkte auf der Cornea errichteten Senkrechten entsteht. Der Winkel  $\delta$  kann aus  $\delta'$  mittelst der Formel  $\sin \delta = \frac{\sin \delta'}{n}$  berechnet werden, wo  $n$  den Brechungskoeffizienten des Kammerwassers bezeichnet. (Fig. 13.)

Im rechten Auge meines Gehülfen war die Ebene, welche die Linsenaxe und den Krümmungsmittelpunkt der Hornhaut enthält, fast vertikal, der Winkel  $\varepsilon$  also gleich  $90^\circ$ , der Winkel  $\delta' = 2^\circ,2$  und der Winkel  $\delta = 1^\circ,65$ . Der Krümmungsmittelpunkt der Hornhaut befand sich unter der Linsenaxe.

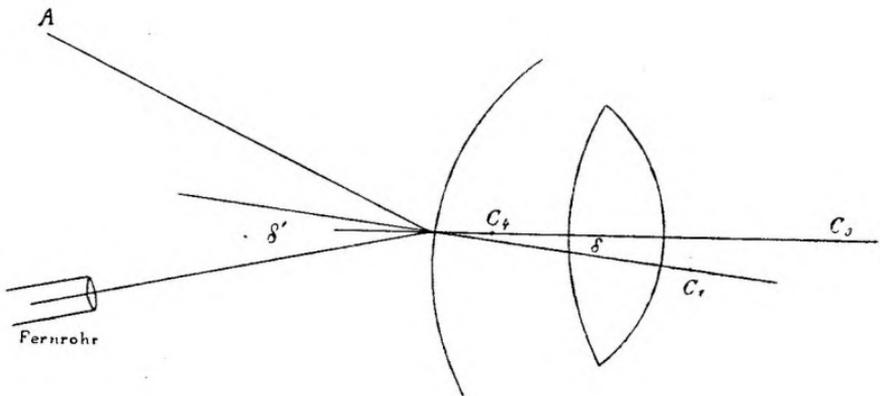


Fig. 13.

Der Winkel  $\delta - \delta' = 0^\circ,55$  ist der von der scheinbaren und wahren Axe der Linse gebildete sehr kleine Winkel. Wie wir vorhin bereits gefunden haben, war die vertikale Abweichung der scheinbaren Linsenaxe von der Gesichtslinie  $2^\circ,67$ , woraus der Winkel, welchen letztere mit der wahren Linsenaxe bildet, sich auf  $2^\circ,12$  bestimmen läßt.

Gleich HELMHOLTZ habe ich das menschliche Auge niemals völlig centriert gefunden, wenn auch der Fehler oft ein sehr geringer war. Unter der kleinen Zahl von Augen, welche ich zu untersuchen Gelegenheit hatte, befanden sich mehrere, die dem Typus des Auges meines Gehülfen annähernd gleich kamen: d. h., der Krümmungsmittelpunkt der Hornhaut lag in derselben vertikalen Ebene mit der Linsenaxe, jedoch unter dieser; der Winkel  $\delta'$  variierte zwischen  $2^\circ$  und  $3^\circ$ , so daß die Entfernung des Krümmungsmittelpunktes der Hornhaut von der Linsenaxe ungefähr ein Viertel Millimeter betrug. In anderen Augen befand sich der Krümmungsmittelpunkt der Hornhaut

in derselben Horizontalebene mit der Gesichtslinie, nur ein wenig nach aufsen oder innen von dieser.<sup>1</sup>

#### b. Die Gestalt der Linse.

Zu den folgenden Bestimmungen haben wir den Brechungskoeffizienten der Linse nötig, diejenige Konstante des Auges, welche am wenigsten bekannt ist. Wir wissen, daß derselbe gegen den Kern der Linse sich allmählig vergrößert. Da es schwierig ist, mit dem variablen Index zu rechnen, ersetzt man die menschliche Linse gewöhnlich in der Rechnung durch eine imaginäre, aber gleichmäßige Linse von gleicher Gestalt und derselben Brennweite wie jene. Obgleich diese Methode notwendigerweise kleine Fehler nach sich zieht, so haben wir uns hier derselben doch in Ermangelung einer besseren bedient. YOUNG bestimmte diesen totalen Brechungskoeffizienten der Linse zu 1,4359, LISTING zu 1,4545 ( $= \frac{1}{11}$ ); v. HELMHOLTZ entschied sich nach seinen an toten Augen angestellten Messungen zunächst für die letztere Zahl, änderte diese aber später auf 1,4371 ab, also eine Zahl, welche sich derjenigen YOUNGS nähert, und welche jetzt für das schematische Auge üblich ist. Wie MAUTHNER und mehrere andere Augenärzte bemerkt haben, ist auch diese Zahl noch zu hoch gegriffen, da ein emmetropisches Auge nach Entfernung der Linse ein Korrekturglas von 12 oder 13 Dioptrieen nötig hätte, während in der Praxis nur 10 oder 11 Dioptrieen gefordert werden. Im folgenden wollen wir uns daher der Zahl 1,42 für den Totalindex der Linse bedienen.

In letzter Zeit haben AUBERT und MATTHIESSEN<sup>2</sup> die Indices der verschiedenen Linsenschichten bestimmt, wonach

<sup>1</sup> Die hier aufgeführten Messungen wurden angestellt, bevor ich die Möglichkeit erkannt hatte, die Richtung der Centrierungslinie der Cornea zu bestimmen. Will man die hintere Hornhautfläche nicht übersehen, so fordert eine exakte Centrierung, daß die Centrierungslinie der Hornhaut mit der Linsenaxe zusammenfalle. Das war aber nicht der Fall. Die beiden Linien befanden sich in einer vertikalen Ebene, welche ungefähr einen Winkel von 6° mit der Gesichtslinie bildete, wobei die Centrierungslinie der Cornea jedoch um 1°,5 mehr nach unten gerichtet war als die Linsenaxe, welche ihrerseits wieder um 2° nach unten von der Gesichtslinie verlief. Man kann übrigens das Instrument mit Vorteil zur Prüfung der Centrierung kleiner optischer Instrumente und ihrer Teile, wie zusammengesetzter Objektive, Okulare etc., verwenden.

<sup>2</sup> v. HELMHOLTZ, *Physiol. Optik.* 2. Aufl. S. 99.

MATTHIESSEN eine empirische Formel aufgestellt hat, nach welcher man annähernd den Totalindex der Linse finden soll, indem man zum Index der oberflächlichen Schichten das Doppelte des Unterschiedes zwischen diesem und dem Index des Linsenkerns hinzufügt. Berechnet man nach dieser Regel den Totalindex der Linse für die beiden Augen, an denen AUBERT und MATTHIESSEN ihre Messungen ausgeführt haben, so findet man die Zahlen 1,4285 und 1,4219, welche sich der von uns angenommenen Zahl nähern. Wenn gleich diese Messungen mit großer Sorgfalt und den besten Instrumenten ausgeführt worden sind, scheinen dieselben doch nicht hinreichend sicher zu sein, weshalb es vielleicht vorzuziehen wäre, die Brennweite einiger Linsen von toten Augen direkt zu messen.

### 1. Die vordere Fläche der Linse.

Ich beginne mit der Bestimmung der Richtung der auf der vorderen Fläche der Linse und der vorderen Fläche der Cornea zugleich senkrecht stehenden Linie, indem ich den Bogen horizontal, den Schieber *B* aber auf Null stelle und nun die Stellung der Fixationsmarke *C* suche, welche die Hornhautbilder und die Bilder der vorderen Linsenfläche auf einer Verticalen vereinigt. Die dreimal wiederholte Messung ergab jedesmal eine Abweichung von  $5^{\circ},1$  nach außen von der Gesichtslinie.

Ich bestimme hierauf den Ort des Krümmungsmittelpunktes der vorderen scheinbaren Fläche durch die Methode E, indem ich den Schieber *A* auf Null stelle, der Fixationsmarke *C* eine beliebige Stellung gebe, die aber noch das an der vorderen Linsenfläche entstehende Bild von *A* scharf zu unterscheiden erlaubt, und endlich den Schieber *B* so lange verschiebe, bis man die Hornhautbilder von *B* mit dem Linsenbilde von *A* in einer Linie stehen sieht. Die Pupille war durch Cocain erweitert.

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	$C_1 C_s' = R_1 \frac{\sin b}{\sin a}$
I	$0^{\circ}$	$12^{\circ},4$ temporal	$9^{\circ},9$ nasal	$4^{\circ},8$	$6^{\circ},2$	10,30 mm
II	$0^{\circ}$	$16^{\circ},8$ „	$11^{\circ},2$ „	$6^{\circ},1$	$8^{\circ},4$	10,97 „
III	$0^{\circ}$	$19^{\circ},1$ nasal	$3^{\circ},7$ temporal	$8^{\circ},8$	$9^{\circ},55$	8,65 „
						Mittel 9,97 mm
						31*

Der Krümmungsmittelpunkt der scheinbaren vorderen Linsenfläche befindet sich also 9,97 mm hinter demjenigen der Cornea, oder 17,95 mm hinter ihrem Scheitel.

Es folgt jetzt die Bestimmung des Ortes des Scheitels der scheinbaren Fläche nach der Methode F. Nachdem das Fernrohr und der Schieber *A* in eine zur gemeinsamen Normalen symmetrische Stellung gebracht sind, verändere ich die Lage des Schiebers *B*, bis die drei Bilder auf einer Linie erscheinen.

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	$C_1 S_3' = R_1 \frac{\sin d}{\sin c}$
I	28° nasal	16°,8 nasal	19°,1 nasal	14°	8°,4	4,82 mm
II	24° „	15° „	17°,1 „	12°	7°,5	5,01 „
III	28° temporal	18°,6 temp.	8°,9 temp.	14°	9°,3	5,33 „
IV	24° „	14°,6 „	6°,9 „	12°	7°,3	4,88 „
Mittel						5,01 mm

Der Scheitel der scheinbaren Fläche befindet sich also 5,01 mm vor dem Krümmungsmittelpunkt der Cornea oder 2,97 mm hinter dem Scheitel derselben.

Kombiniert man diese Mafse mit den vorhergehenden, so finden wir den scheinbaren Radius

$$R'_3 = 14,98 \text{ mm.}$$

Da wir die optischen Konstanten der Cornea kennen (S. 467) so lassen sich die scheinbaren Werte leicht auf die wahren zurückführen.<sup>1</sup>

Diese Reduktion giebt folgende Werte:

Ort des Scheitels	3,54 mm
Radius	10,20 mm
Vordere Brennweite	163,26 mm (6,13 Dioptr.)
Hintere Brennweite	173,46 mm.

Für die Kardinalpunkte des kombinierten Systems der Cornea und der vorderen Linsenfläche findet man:

Ort des ersten Hauptpunktes	0,33 mm
Ort des zweiten Hauptpunktes	0,22 mm
Vordere Brennweite	20,72 mm (48,25 D.)
Hintere Brennweite	29,43 mm.

<sup>1</sup> HELMHOLTZ, *Physiol. Optik.* § 9. Formel 3.

## 2. Hintere Fläche der Linse.

In gleicher Weise wie die vordere wird auch die hintere Linsenfläche gemessen. Zunächst wird der Winkel bestimmt, den die der Cornea und der hinteren Linsenfläche gemeinsame Normale mit der Gesichtslinie bildet. Derselbe war  $5^{\circ},9$ , mithin ein wenig größer als derselbe Winkel an der vorderen Fläche, was darauf hindeutet, daß der Krümmungsmittelpunkt der Cornea sich nicht genau in derselben vertikalen Ebene mit der Linsenaxe befand, sondern ein wenig nasalwärts.

Vier Bestimmungen des Krümmungsmittelpunktes gaben die folgenden Resultate:

	A	B	C	a	b	$C_1 C_4'$
I	$0^{\circ}$	$19^{\circ},05$ temporal	$17^{\circ},3$ temporal	$11^{\circ},4$	$9^{\circ},52$	6,68 mm
II	$0^{\circ}$	$28^{\circ},1$ „	$22^{\circ},8$ „	$16^{\circ},9$	$14^{\circ},05$	6,66 „
III	$0^{\circ}$	$21^{\circ},5$ nasal	$6^{\circ},8$ nasal	$12^{\circ},7$	$10^{\circ},75$	6,77 „
IV	$0^{\circ}$	$25^{\circ},8$ „	$9^{\circ},01$ „	$14^{\circ},91$	$12^{\circ},9$	6,92 „
Mittel						6,76 mm

Der Krümmungsmittelpunkt der scheinbaren hinteren Linsenfläche liegt also 6,76 mm vor dem Krümmungsmittelpunkte der Hornhaut und 1,22 mm hinter dem Scheitel derselben.

Die Bestimmung des Ortes des Scheitels ergab folgende Resultate:

	A	B	C	c	d	$C_1 S_4'$
I	$24^{\circ}$ temporal	$2^{\circ},9$ temporal	$6^{\circ},1$ temporal	$12^{\circ}$	$1^{\circ},45$	0,97 mm
II	$28^{\circ}$ „	$3^{\circ}$ „	$8^{\circ},1$ „	$14^{\circ}$	$1^{\circ},50$	0,86 „
III	$28^{\circ}$ nasal	$1^{\circ},9$ nasal	$19^{\circ},9$ nasal	$14^{\circ}$	$0^{\circ},95$	0,56 „
IV	$24^{\circ}$ „	$1,33$ „	$17,9$ „	$12^{\circ}$	$0^{\circ},67$	0,45 „
Mittel						0,71 mm

Der Scheitel der hinteren Linsenfläche befindet sich also 0,71 mm vor dem Krümmungsmittelpunkt der Hornhaut oder

7,27 mm hinter ihrem Scheitel. Ihr scheinbarer Krümmungsradius war 6,05 mm.

Diese Werte, auf die wahre Fläche reduziert, ergeben:

Ort des Scheitels	7,60 mm
Krümmungsradius	6,17 mm
Vordere Brennweite	104,98 mm (9,53 D.)
Hintere Brennweite	98,81 mm.

Diese Werte, kombiniert mit denjenigen des oben gefundenen Systems ergeben die Kardinalpunkte des vollständigen Systems des Auges.

Ort des ersten Hauptpunktes	1,54 mm
Ort des zweiten Hauptpunktes	1,86 mm
Vordere Brennweite	17,13 mm (58,40 D.)
Hintere Brennweite	22,89 mm.

#### IV.

#### Zusammenstellung der Resultate und Prüfung der Messungen.

Wir wollen nunmehr einen Überblick über die erhaltenen Resultate geben. In Tabelle VIII finden sich die Winkelmessungen. Ich bezeichne den Winkel als positiv, sobald die erste der beiden Linien außerhalb des Auges nach innen (oben) gerichtet ist.

Wir ziehen demnach für den horizontalen Meridian folgende Schlüsse. Das Auge ist fast centriert und zwar gleichviel, ob man die hintere Fläche der Cornea vernachlässigt oder nicht. Die Axe ist  $6^{\circ}$  nach außen von der Gesichtslinie gerichtet und durchdringt die Cornea am Orte der stärksten Krümmung. Die Gesichtslinie verläuft annähernd durch die Mitte der Cornea und der Pupille, fällt also fast mit der Visierlinie zusammen.

Im vertikalen Meridian ist das Auge lange nicht vollständig centriert. Die Linsenaxe befindet sich über dem Krümmungsmittelpunkte der vorderen Fläche der Cornea und bildet mit der Centrierungslinie der Cornea einen Winkel von  $1^{\circ},5$ . Die Gesichtslinie ist um  $2^{\circ}$  nach oben von der Linsenaxe gerichtet und  $3^{\circ},5$  höher als die Centrierungslinie der Cornea.

Ich habe nach der von LEROY und GULLSTRAND empfohlenen Methode den Einfallswinkel der Gesichtslinie an der Hornhaut zu bestimmen versucht; infolge der kleinen Kopfbewegungen des Beobachteten konnte ich jedoch mit dieser Methode zu

keinem Erfolge gelangen. Man kann diesen Winkel aber auch auf indirektem Wege bestimmen. Wir wissen, daß die Gesichtslinie durch den ersten Knotenpunkt geht, dessen Lage uns bekannt ist (siehe die folgende Tabelle IX). Ebenso kennen wir den Winkel, der von der Gesichtslinie und der Augenaxe gebildet wird, sowie den Krümmungsradius der vorderen Fläche der Cornea. Daraus läßt sich der in Frage stehende Winkel leicht berechnen. Er übersteigt kaum einen halben Grad.

Tabelle VIII.

	Horizontaler Meridian	Vertikaler Meridian
Winkel gebildet von:		
Gesichtslinie und Centrierungslinie der Cornea . . . . .	+ 6°	+ 3°,5
Gesichtslinie und Linsenaxe . . . . .	+ 5°,7	+ 2°,1
Centrierungslinie der Cornea und Linsenaxe . . . . .	+ 0°,3	— 1°,3
Gesichtslinie und Gerade, welche auf der Cornea senkrecht steht und durch die Mitte der Pupille geht . . . . .	+ 0°,9	—
Derselbe Winkel bei erweiterter Pupille . .	+ 1°,0	0°,1
Gesichtslinie und Gerade, welche auf der Cornea senkrecht steht und durch den Pupillenrand geht . . . . .	{ — 17°,8 + 19°,6	{ — —
Derselbe Winkel bei erweiterter Pupille . .	{ + 28°,3 — 26°,2	{ + 28°,1 — 28°,4
Gesichtslinie und Senkrechte, welche auf der vorderen Corneafäche am Rande errichtet ist . . . . .	{ — 43° + 44°	{ — —
Gesichtslinie und Senkrechte, die auf der hinteren Corneafäche am Rande errichtet ist . . . . .	{ + 48° — 42°	{ — —
Linsenaxe und Senkrechte, welche in dem Punkte, wo diese die vordere Corneafäche durchschneidet, auf letzterer errichtet ist . . . . .	0°	— 1°,6

Unter den gegebenen Bedingungen war die Gröfse der Pupille 2,85 mm und ihre scheinbare Gröfse 3,12 mm.

Die folgende Tabelle enthält die optischen Konstanten des untersuchten Auges, verglichen mit denen des schematischen Auges.

Überblickt man diese Tabelle, so ist man erstaunt, eine so grofse Übereinstimmung zwischen beiden Augen anzutreffen. Aufser den Unterschieden, welche vom Index der Linse herühren, giebt es nur zwei Unterschiede von einiger Bedeutung; der eine betrifft die von mir hinzugefügten Konstanten der hinteren Fläche der Cornea, der andere die Dicke der Linse, welche nach HELMHOLTZ 3,6 mm beträgt, während wir für dieselbe in dem von uns beobachteten Auge 4,05 mm gefunden haben. Obgleich man aus dem Mafse eines Auges keine allgemeinen Schlüsse ziehen kann, so möchte ich doch die Aufmerksamkeit auf den Umstand lenken, dafs diese Mafse mit denjenigen von HELMHOLTZ für tote Augen angegebenen übereinstimmen, während sie erheblich von den Mafsen sich unterscheiden, welche derselbe Autor für das lebende Auge angiebt.

Es haben einige Autoren aus diesen Messungen toter Linsen einen Beweis für die von HELMHOLTZ aufgestellte Accommodationshypothese ableiten wollen. Mir scheinen diese Messungen vielmehr gegen diese Hypothese zu sprechen. Nach HELMHOLTZ müfsten aus dem Auge entfernte tote Linsen sich im Maximum der Accommodation befinden, da dieselben doch keinem Zuge mehr ausgesetzt sein können. Wenn man jedoch von der Dicke der Linse absieht, stimmt die Gestalt der toten Linse, wie HELMHOLTZ selbst bemerkt, sehr wohl mit derjenigen der lebenden Linse im Zustande der Ruhe überein. Der Radius der vorderen Linsenfläche betrug an zwei toten Augen 10,162 mm und 8,805 mm und an drei lebenden 11,9 mm, 8,8 mm und 10,4 mm.

Setzt man für die Brechkraft des Auges den umgekehrten Wert der vorderen Brennweite ein, so ist aus der vorhergehenden Tabelle ersichtlich, dafs dieser Wert sich auf 58 Dioptrien stellt, von welchen 47 Dioptrien auf die Cornea kommen. Benutzt man einen ähnlichen Ausdruck für die übrigen Flächen des Auges, was übrigens nur dazu dienen kann, sich eine annähernde Vorstellung zu bilden, so hat die hintere Linsenfläche einen Wert von 10 Dioptrien, die vordere

Tabelle IX.

	Schematisches Auge	Beobachtetes Auge
Brechungskoeffizient der Cornea . . . . .	—	1,377
„ „ der wässerigen Feuchtigkeit und des Glaskörpers	1,3365	1,3365
Totaler Brechungskoeffizient der Linse . .	1,4371	1,42
—————		
Radius der vorderen Hornhautfläche . . . .	7,829 mm	7,98 mm
„ „ hinteren „ . . . . .	—	6,22 „
„ „ vorderen Linsenfläche . . . . .	10,— „	10,20 „
„ „ hinteren „ . . . . .	6,— „	6,17 „
—————		
Ort der vorderen Hornhautfläche . . . . .	0 „	0 „
„ „ hinteren „ . . . . .	—	1,15 „
„ „ vorderen Linsenfläche . . . . .	3,6 „	3,54 „
„ „ hinteren „ . . . . .	7,2 „	7,60 „
—————		
Vordere Brennweite der Cornea . . . . .	23,266 „	24,40 „
Hintere „ „ „ . . . . .	31,095 „	32,61 „
Ort des vorderen Hauptpunktes der Cornea .	0 „	— 0,1327 „
„ „ hinteren „ „ „ . . . . .	0 „	— 0,1365 „
—————		
Brennweite der Linse . . . . .	50,617 „	62,46 „
Entfernung des ersten Hauptpunktes der Linse von der vorderen Linsenfläche . . . . .	2,126 „	2,42 „
Entfernung des zweiten Hauptpunktes der Linse von der hinteren Linsenfläche . . .	— 1,276 „	— 1,46 „
Abstand der beiden Hauptpunkte . . . . .	0,198 „	0,18 „
—————		
Hintere Brennweite des Auges . . . . .	20,713 „	22,89 „
Vordere „ „ „ . . . . .	15,498 „	17,13 „
—————		
Ort des ersten Hauptpunktes . . . . .	1,753 „	1,54 „
„ „ zweiten „ . . . . .	2,106 „	1,86 „
„ „ ersten Knotenpunktes . . . . .	6,968 „	7,30 „
„ „ zweiten „ . . . . .	7,321 „	7,62 „
„ „ vorderen Brennpunktes . . . . .	—13,745 „	—15,59 „
„ „ hinteren „ . . . . .	22,819 „	24,75 „
—————		
Fernpunkt des aphakischen Auges . . . . .	—63,49 „	—73,94 „
Korrektionsglas des aphakischen Auges, 15 mm vor der Cornea . . . . .	12,74 Diop.	11,24 Diop.

von ungefähr 6 Dioptrieen und endlich die hintere Hornhautfläche von ungefähr — 5 Dioptrien. Die Wirkungen der beiden letzteren Flächen gleichen sich also beinahe aus.

Zwei Mittel besitzen wir, die von uns gefundenen Mafse der optischen Konstanten des Auges zu prüfen. Das eine ist der Vergleich mit aphakischen Augen, ein Mittel, dessen wir uns zur Correction des Brechungsindex der Linse bedient haben; das andere Mittel ist uns durch das von mir als sechstes bezeichnete Bild gegeben. Dieses ist jedoch nur brauchbar in Augen, in welchen es scharf erscheint, was in dem von uns beobachteten Auge nicht der Fall war. Mein Gehülfe, Myop von circa 6 Dioptrieen, sah dieses Bild nur mit Mühe und sehr verschwommen. Berechnet man das System des sechsten Bildes nach den von uns für sein Auge gefundenen Werten, so findet man, daß das Bild eines in der Unendlichkeit gelegenen Gegenstandes sich 20,5 mm hinter der Cornea befindet. Da aber die Retina ungefähr 25 mm hinter der Cornea liegt, so ist es kaum zu verwundern, wenn auf derselben ein sehr unscharfes Bild zu stande kommt.

Die Rechnung weist allerdings darauf hin, daß das sechste Bild auf der Retina entworfen werden muß, wenn der Gegenstand ungefähr 2 cm vor der Cornea gelegen ist. Mein Gehülfe sah das Bild in der That scharf, wenn man das Licht auf einen nahe am Auge gelegenen Punkt konvergieren liefs. Das Phänomen ist aber nicht hinreichend scharf ausgesprochen, um durch einen exakten Versuch den Ort bestimmen zu können, an welchem das Bild scharf wird. Deswegen muß man sich hier einer anderen Methode bedienen, welche indes ohne Schwierigkeiten nur bei Augen anzuwenden ist, die das sechste Bild eines in großer Entfernung befindlichen Gegenstandes scharf zu sehen im stande sind. Da dieses mit meinen Augen möglich ist, so will ich sogleich auseinandersetzen, wie ich diese Messungen an meinem rechten Auge angestellt habe.

Ich nahm an Stelle des Beobachteten Platz, so daß sich mein rechtes Auge im Centrum des Bogens befand, und fixierte die Mitte des Objektivs (Null). Nachdem mein Gehülfe die Lampe des Schiebers *A* angezündet und diesen in eine bestimmte Entfernung von Null gebracht hatte, verschob er den Schieber *B*, bis ich diesen mit dem sechsten Bilde zusammenfallen sah.

Ich irrte mich kaum um einen, höchstens zwei Grad. Die von mir bei horizontal gestelltem Bogen gefundenen Mafse sind folgende:

Lampe	Bild	Lampe	Bild
35° temporal	25° nasal	25° nasal	24° temporal
28° „	19° „	20° „	20° „
20° „	13° „	15° „	15° „
15° „	9° „		

Man kann aus diesen Mafsen mindestens zwei Werte ableiten, welche für die Optik des Auges von Bedeutung sind: den Winkel, welchen die Gesichtslinie mit der Augenaxe bildet, und das Größenverhältnis zwischen dem nützlichen (siebenten) und dem sechsten Bilde. Den ersteren findet man nach Methode C. Die Axe meines rechten Auges würde diesem Mafse zufolge auf 1°,67 nach aufsen von der Gesichtslinie gerichtet sein.<sup>1</sup>

Zur Bestimmung des Größenverhältnisses beider Bilder muß man sich zwei dieser Versuche zu gleicher Zeit angestellt vorstellen. Man kann dann die Entfernung, welche die beiden Stellungen der Lampe A voneinander trennen, als Objekt (oder als Projektion seines nützlichen Bildes) betrachten. Die Entfernung zwischen den beobachteten Bildern würde das sechste Bild dieses Objektes sein. Indem man in dieser Weise die ersten Messungen der beiden Serien kombiniert, findet man das Verhältnis  $\frac{31 + 25}{25 + 24} = 1,2$ .

Die Größe eines Retinalbildes hängt bei unendlich entferntem Objekte allein von der Entfernung des hinteren Knoten-

<sup>1</sup> Es ist hierbei angenommen, daß es, was freilich nicht immer der Fall ist, eine wahre optische Axe gebe. Man würde also die Richtung der Geraden finden, welche sich derselben am meisten nähert. — Der Winkel ist viel kleiner, als man ihn durch direkte Messungen findet, was wohl daran liegt, daß der nasale und temporale Teil der Cornea nicht dieselbe Krümmung haben. Übrigens scheint die Schiefstellung meiner Linse nicht bedeutend zu sein.

punktes seines Systems von der Retina ab. Hat man einmal die Konstanten des beobachteten Auges festgestellt, so kann man die Lage des Knotenpunktes der beiden in Frage kommenden Systeme berechnen. Da ferner die Lage der Retina durch die Refraktion des Auges gegeben ist, so läßt sich leicht das Gröfsenverhältnis bestimmen, welches zwischen den beiden Bildern besteht. Die so gefundenen Zahlen müssen denen entsprechen, welche wir auf dem oben erwähnten Wege gefunden haben. Da die Konstanten meines Auges nicht bestimmt waren, so konnte die Prüfung nicht vorgenommen werden. Wir können nur sagen, dafs es anders gebaut ist, als das schematische Auge, weil in demselben das in Frage kommende Verhältnis  $\frac{15,50}{10,05} = 1,54$  oder  $1,55$  ist, wenn man meiner Myopie von 0,5 Dioptrien Rechnung tragen will.

## V.

### Über eine bisher unbekannte Veränderung der Linse bei der Accommodation.

Man kann das accommodierte Auge in derselben Art messen, wie das in Ruhe befindliche. Da ich noch nicht Gelegenheit hatte, diese Messungen auszuführen, so will ich mich darauf beschränken, einige Phänomene zu erwähnen, welche man während der Accommodation beobachten kann und welche, wie ich glaube, bisher unbemerkt geblieben sind.

Stelle ich den Bogen horizontal und den Schieber *A* auf Null, während der Beobachtete die Mitte des Objectivs fixiert, so sind die drei Bilder wie auf Fig. 14 verteilt.<sup>1</sup> In dem Augenblicke, in welchem der Beobachtete eine Accommodationsanstrengung macht, sinkt mit einer recht schnellen Bewegung das grofse Bild der vorderen Linsenfläche, indem es kleiner wird, herab und verschwindet hinter dem Corneabilde. Das Auge hat jetzt das Aussehen wie in Fig. 15. Die Zusammenziehung der Pupille beginnt gegen Ende dieser Phase.

Das Bild der hinteren Fläche beginnt seinerseits jetzt mit langsamen und ruckweisen Bewegungen zu sinken, um die in Fig. 16 angedeutete Lage einzunehmen. Während dieser Phase vollzieht die Pupille ihre Kontraktion.

<sup>1</sup> In meinem Fernrohr erscheint natürlich die Anordnung der Bilder und die Richtung der sogleich beschriebenen Bewegungen umgekehrt.

Wenn der Beobachtete seine Accommodation entspannt, sieht man das kleine Bild mit einer schnellen Bewegung herauf-schnellen. Erst wenn es seinen früheren Platz wieder eingenommen (Fig. 15), sieht man das Bild der vorderen Fläche mit einer langsamen Bewegung seinerseits heraufsteigen.

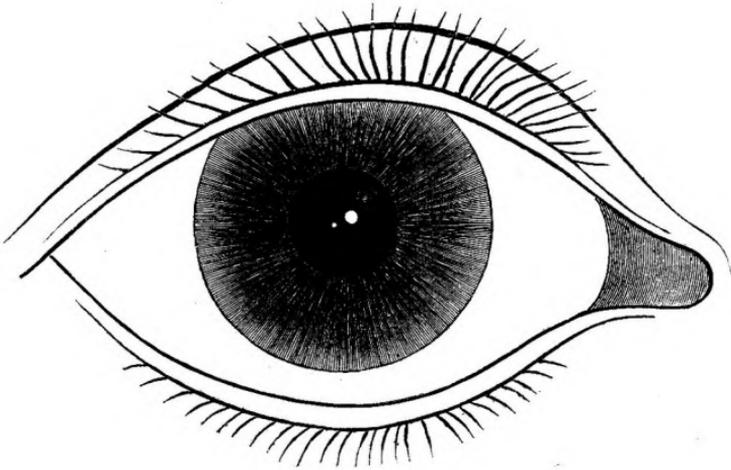


Fig. 14.

Die Ortsveränderung des kleinen Bildes ist erst sichtbar, wenn die Accommodationsanstrengung eine gewisse Gröfse erreicht. Wenn die Anstrengung sehr schwach ist, sieht man nur die Ortsveränderung des grofsen Bildes.

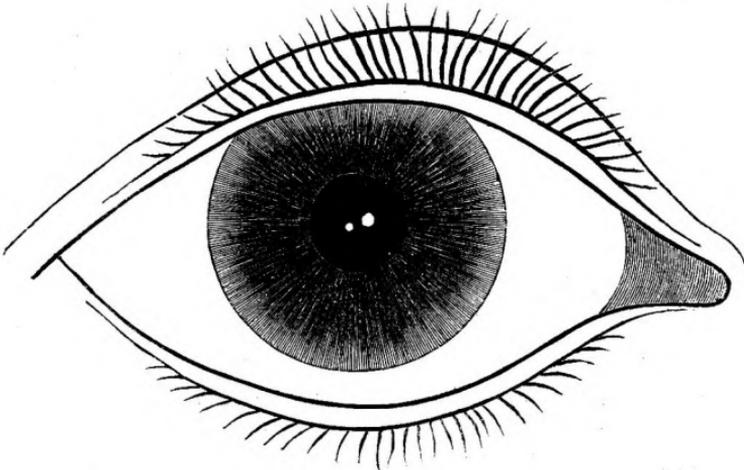


Fig. 15.

Der Weg, den dieses letztere durchläuft, ist geradlinig, derjenige des kleinen Bildes zeigt dagegen eine leichte Konkavität nach links.

Die Abbildungen sind nach dem rechten Auge meines Gehülfen ausgeführt. Ich füge noch hinzu, daß Herr Dr. ANTONELLI ohne sie vorher gesehen zu haben, andere nach meinem rechten Auge gezeichnet hat, welche ihnen völlig gleich waren.

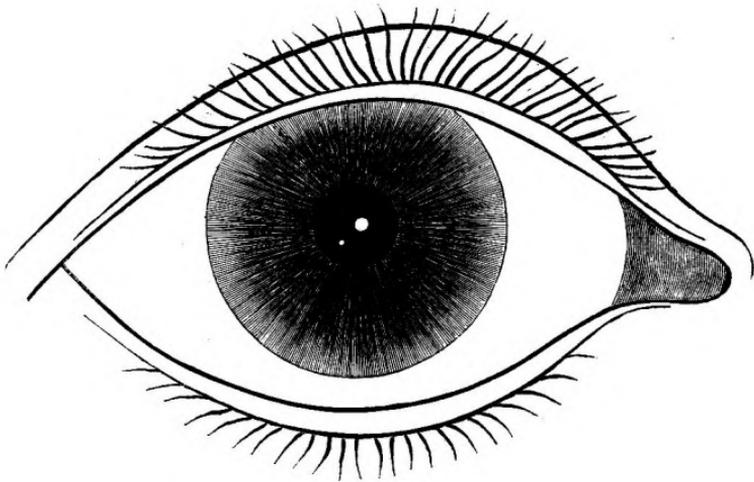


Fig. 16.

Giebt der Beobachtete seinem Blick eine andere Richtung, so ändert die Verschiebung des kleinen Bildes ihren Charakter und scheint sich aus zwei Verschiebungen zusammzusetzen: einer gegen die Mitte der Pupille hin, und einer zweiten, welche immer absteigend ist, welches auch die Richtung des Blickes sei. Blickt der Beobachtete nach unten, so sieht man während der Accommodation das kleine Bild anfangs etwas heraufsteigen, darauf aber wieder herabsteigen. Beim Blick nach oben vereinigen sich die beiden Verschiebungen zu einer längeren, stets nach unten gerichteten Verschiebung. Für die Seitenlage schlägt das Bild zuerst eine horizontale Richtung gegen die Pupillenmitte ein, um später herabzusteigen.

Es ist klar, daß die Ortsveränderung des großen Bildes von der Vergrößerung der Krümmung der vorderen Fläche herrührt, wie bereits CRAMER und HELMHOLTZ nachgewiesen haben. Was bedeutet aber die Ortsveränderung des kleinen Bildes,

die fast ebenso groß scheint, wie die des großen Bildes und die dieser folgt?

Die Analyse dieser Phänomene ist recht schwierig, und es hat mir viel Mühe gemacht, dieselben aufzuklären. Die Schwierigkeit liegt darin, daß man nicht leicht dazu gelangt, die beiden Linsenbilder während der ganzen Dauer der Accommodation zu beobachten. Wenn der Beobachter auf die Mitte des Objektivs blickt, so ist das große Bild von dem Hornhautbilde verdeckt, während das kleine seinen Ort verändert. In anderen Fällen hindert die Pupillarzusammenziehung.

Es ist zunächst klar, daß eine Ortsveränderung des Bildes, die immer in derselben Richtung erfolgt, welches auch die Blickrichtung sei, weder von einer Änderung der Krümmung, noch von einer Verschiebung der ganzen Linse nach hinten oder nach vorne verursacht sein kann, weil hierbei stets eine Lageveränderung des Bildes entweder in centripetaler oder centrifugaler Richtung eintreten müßte.

Es bleibt daher nur die Möglichkeit von zwei Veränderungen: eine Neigung der Linse, welche, um die beobachtete Erscheinung erklären zu können, in ihrem oberen Teile nach vorne statthaben müßte, oder eine Verschiebung nach unten.

Die Lageveränderungen des großen Bildes während der Accommodation lassen sich nach HELMHOLTZ in der Art beobachten, daß die Winkelentfernung zwischen Fernrohr und Lampe durch die Gesichtslinie halbiert wird. Gewöhnlich verschwindet aber das kleine Bild unter diesen Umständen während der Accommodation infolge der Pupillarkontraktion. Um es beobachten zu können, ist es hingegen vorteilhaft, die Lampe nahe an das Fernrohr zu stellen. Nützlich ist es daher, zwei Lampen, für jedes Bild eine, zu benutzen. Ich gab dem Bogen eine vertikale Stellung und stellte den Schieber *A* auf Null, wodurch die eine Lampe 4 bis 5° nasalwärts in die Höhe des Fernrohres zu liegen kam; eine zweite Lampe brachte ich ebenfalls in gleiche Höhe mit dem Fernrohr und zwar etwa 45° temporalwärts, während die Fixationsmarke sich 4 bis 5° höher als das Fernrohr, 20° temporalwärts befand. Bei dieser Lage sah man das große Linsenbild der zweiten Lampe genau in der Höhe der Corneabilder. Während der Accommodation verschob sich das große Linsenbild zunächst in horizontaler Richtung gegen das Corneabild, wandte sich aber,

ehe es letzteres erreicht hatte, plötzlich nach unten. Während dieser Zeit rückte das kleine Linsenbild der zweiten Lampe ein wenig in horizontaler Richtung gegen die Mitte der Pupille vor, um darauf eine absteigende Richtung ebenso wie das große einzuschlagen. Hieraus ergibt sich, daß die Linse gegen Ende der Accommodation sich nach unten verschiebt. Der horizontale Teil des vom kleinen Bilde zurückgelegten Weges entspricht einer wahren Vergrößerung der Krümmung der Fläche.

Ich stelle jetzt die Fixationsmarke 2,5 Grad über dem Horizont des Fernrohres auf, eine Lage, in welcher sich die Linsenaxe in einer der Fernrohraxe parallelen Ebene befindet. Man hat dann die vier Linsenbilder (angenommen, sie seien alle sichtbar) auf derselben Horizontalen und die beiden Hornhautbilder auf einer anderen niedriger gelegenen Geraden. (Fig. 12.) Während der Accommodation senken sich die Linsenbilder, um auf die Horizontale zu gelangen, auf der sich die Hornhautbilder befinden. Wie wir gesehen haben, befindet sich im Ruhezustande die Linsenaxe 0,25—0,50 mm über dem Krümmungsmittelpunkt der Hornhaut; während der Accommodation steigt nun die Linse derart herab, daß der Krümmungsmittelpunkt der Cornea auf ihre Axe zu liegen kommt. Gegen Ende der Accommodation war also das Auge nahezu centriert, die Gesichtslinie aber bildete immer noch einen Winkel von ungefähr zwei Grad mit der Axe.

---