

Die Parallaxe des indirecten Sehens und die spaltförmigen Pupillen der Katze.

Von

August Kirschmann,
University of Toronto, Can.

Mit 7 Figuren im Text.

I.

Die reflectorisch erfolgende Aenderung der Pupillenweite im Auge des Menschen und der höheren Wirbelthiere dient ähnlichen Zwecken wie die Regulirung der Blende in einem photographischen Apparat. Die Blende des Auges und die der photographischen Camera haben zunächst die Aufgabe, durch Abhaltung der Randstrahlen die allen Systemen brechender Medien mehr oder minder anhaftenden Fehler der sphärischen und chromatischen Aberration auf ein Minimum zu reduciren. Da aber der Erfolg einer Lichteinwirkung, sowohl bei der photographischen Platte wie bei der Netzhaut, nicht nur von der Schärfe des Bildes, sondern auch von der Lichtstärke desselben abhängig ist, so kann die Blendevorrichtung nur insofern den an sie gestellten Anforderungen gerecht werden, als sie gestattet, im gegebenen Falle diejenige Diaphragmaöffnung zu benutzen, bei welcher von allen möglichen Bildern das brauchbarste geliefert wird. Die zusammenziehbare Pupille des Auges erfüllt dabei noch die Nebenaufgabe, die nachtheiligen Wirkungen allzu intensiven Lichtes und jähen Helligkeitswechsels erheblich zu mildern. Außer den genannten Aufgaben scheint jedoch dem Pupillarmechanismus noch eine andere Function zuzufallen,

welche in engster Beziehung zur monocularen Tiefenwahrnehmung steht und welche bisher gänzlich übersehen worden ist.

Gewisse Eigenschaften unseres Sehorgans machen auf den ersten Blick den Eindruck von Mängeln und unvermeidlichen Uebelständen, entpuppen sich aber bei genauerer Betrachtung als höchst sinnreiche und zweckmäßige Einrichtungen. Hierher gehören die »Unvollkommenheit« des indirecten Sehens und die »Zerstreuungskreise«¹⁾.

Das indirecte Sehen ist nicht weniger vollkommen, sondern nur anders als das directe. Hat letzteres den Vorzug einer größeren Schärfe in der Wahrnehmung distincter Punkte und einer größeren Mannigfaltigkeit der Qualitätenreihe, so besitzt ersteres dafür denjenigen einer größeren Lichtempfindlichkeit und einer empfindlicheren Wahrnehmung von Bewegungen. Ueberall in der belebten Natur finden wir das Gesetz: je höher ein Organismus steht, desto weiter ist in seinen Theilen das Princip der qualitativen Arbeitstheilung zur Anwendung gebracht. Eine außerordentlich detaillirte qualitative Arbeitstheilung besteht zwischen den Elementen der Netzhaut; ihre Folgen sind das überaus wichtige Gesetz der Correspondenz von Apperception und Fixation²⁾ und die außerordentliche Empfindlichkeit und Präcision, welche das Auge des Menschen und der höheren Thiere als Bewegungsmechanismus erreicht hat.

1) Auch die Abweichung der Gestalt des Auges (d. h. des Augapfels abgesehen von der Corneaeconvexität) von derjenigen einer vollkommenen Kugel ist eine solche scheinbar unwesentliche Unregelmäßigkeit, die sich bei genauer Erwägung der Sachlage als eine sehr zweckmäßige Schutzeinrichtung gegen nachtheilige Druckwirkungen erweist. Der Augapfel ist bei seinen Bewegungen vielfach dem von den umgebenden Muskeln und Schädeltheilen ausgeübten Drucke, besonders in äquatorialer Richtung, ausgesetzt. Wäre nun der Bulbus eine genaue Kugel, so müsste sich dieser Druck in höchst störender Weise bemerkbar machen. Da die sphärische Fläche für einen gegebenen Rauminhalt die kleinstmögliche Oberfläche ist, so müsste erstlich jeder auf den Augapfel ausgeübte Druck eine schädliche, unter Umständen verhängnißvolle Spannung sowohl der Flüssigkeiten im Innern als auch der einhüllenden Membranen hervorrufen. Zweitens würden durch die mit der Verkleinerung des Raumgehaltes nothwendig verbundene Verdichtung der brechenden Medien die Brechungsindices geändert werden, was natürlich eine außerordentliche Störung herbeiführen würde. Die thatsächlich bestehende sphäroidische Gestalt aber hat zur Folge, dass das Auge die durch Druck bedingten Gestaltsveränderungen und localen Deformationen seiner Oberfläche ertragen kann, ohne mit vermehrter Spannung und Aenderung des Brechungsvermögens reagiren zu müssen.

2) Wundt, *Physiol. Psychol.* 4. Aufl. II. Bd. S. 122 u. 217.

So wie wir der vom Centrum nach der Peripherie hin stetig zunehmenden Ungenauigkeit der Netzhautbilder, der eine Zunahme der Licht- und Bewegungsempfindlichkeit parallel geht, die Beweglichkeit des Auges und damit die Möglichkeit einer Ausmessung des zweidimensionalen Sehfeldes verdanken, so sind auch die sogenannten »Zerstreuungskreise« nicht etwa nur ein unvermeidliches Uebel, sondern sie werden von unserem Gesichtssinne als wichtige Daten zur Ausmessung des Sehraumes nach der Tiefendimension verwandt. Dass mit der Eliminirung der Zerstreuungskreise auch die Nothwendigkeit der Accommodation und damit ein wichtiges primäres Hilfsmittel der monocularen Tiefenwahrnehmung in Wegfall käme, ist ohne weiteres klar. Wir werden aber im Folgenden nachzuweisen versuchen, dass die Zerstreuungskreise des indirecten Sehens auch noch in anderer Hinsicht für die Tiefenvorstellung von Bedeutung sind.

Die Theorie der Zerstreuungskreise ist von Helmholtz in seiner physiologischen Optik § 11—13 ausführlich behandelt, jedoch ohne auf die Verhältnisse des indirecten Sehens näher einzugehen¹⁾. Wundt erörtert die Frage nach Lage und Deckung der Zerstreuungskreise bei der Betrachtung des Netzhautbildes im ruhenden Auge²⁾. Auch Aubert widmet den Zerstreuungskreisen eine kurze Betrachtung und betont ihre Bedeutung für die Visirrichtungen³⁾. In Hermann's Handbuch der Physiologie sind die Zerstreuungskreise in den Capiteln über die Sehschärfe und über das emmetropische Auge behandelt⁴⁾. Im Anschluss an die Darstellungen der genannten Autoren wollen wir die Eigenschaften der Zerstreuungskreise im indirecten Sehen einer kurzen Betrachtung unterziehen, und wir halten es für zweckmäßig, uns die Verhältnisse durch eine einfache Figur zu veranschaulichen. Es sei in Fig. 1 d der Mittelpunkt (Drehpunkt) und k der (mittlere) Knotenpunkt des Auges, p p' die Pupille. Das Auge, dessen Achse und Fixationsrichtung,

1) Helmholtz, Physiolog. Optik. 2. Aufl. S. 112 ff. Auf die Behandlung, welche Helmholtz an anderer Stelle (S. 586 und 587 der alten Auflage der Physiolog. Optik) diesem Gegenstande widmet, werden wir später zurückkommen.

2) Wundt, Physiol. Psychol. 4. Aufl. II. Bd. S. 106 ff.

3) Aubert, Grundzüge der physiolog. Optik, § 17. S. 457—461.

4) Hermann, Handbuch der Physiologie. Bd. III. S. 65 ff.

die wir bei ihrer geringen Abweichung als zusammenfallend annehmen wollen, die durch d und k gehende punktirte Linie angibt. sei für eine dem Kreise A entsprechende Entfernung accommodirt. Es ist für die folgenden Betrachtungen irrelevant, welche Gestalt

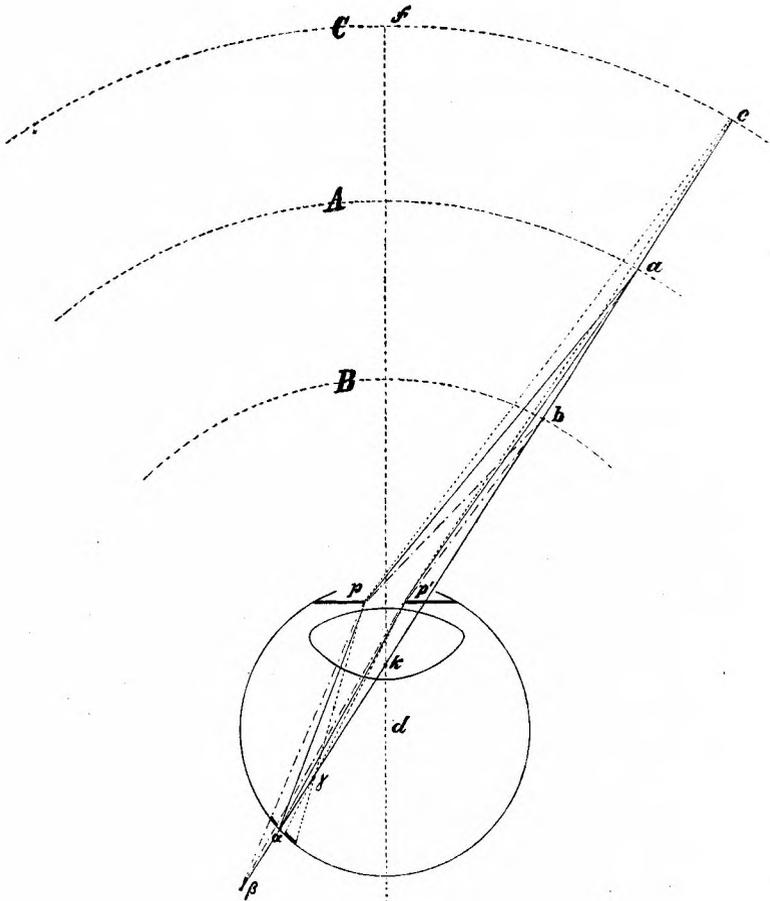


Fig. 1.

die Flächen einheitlicher Accommodation (d. h. die Flächen im Raum, für welche die ganze Netzhaut auf einmal accommodirt ist) besitzen. Wir haben, lediglich der Einfachheit der Darstellung wegen, bei unserer Figur angenommen, dass dieselben Kugelflächen seien, deren Mittelpunkt im Knotenpunkt des Auges liege. Ist das Auge für

die Sphäre A accommodirt, so werden Strahlen, die von dem Objectpunkte a ausgehen, so gebrochen, dass sie in dem Punkte α der Netzhaut zu einem scharfen Bildpunkt zusammentreffen. Der geometrische Ort für die Bildpunkte aller anderen innerhalb desselben Richtungsstrahles gelegenen Objectpunkte ist natürlich der Richtungsstrahl selber und seine Verlängerung, und zwar der ganze Verlauf dieser Linie mit Ausnahme des Punktes α . Dem Objectpunkte b , welcher dem Auge näher gelegen als a , entspricht beispielsweise ein hinter der Netzhaut gelegener Bildpunkt β ; und da im gegebenen Fall die Eintrittsöffnung des Strahlenbündels, die Pupille, seitlich und getrennt vom Richtungsstrahle liegt, so wird auch das auf der Netzhaut aufgefangene undeutliche Bild von b , ein Zerstreungskreis in Form einer elliptischen Projection der Pupille, seitlich (in unserer Figur links) und getrennt von dem Punkte α liegen. Ein entfernterer Objectpunkt c dagegen hat einen vor der Netzhaut gelegenen Bildpunkt γ . In diesem Punkte schneidet der von c ausgehende und durch die Pupille beschränkte Strahlenkegel den Richtungsstrahl (dem hier natürlich kein wirklicher Strahl entspricht) und tritt ganz und endgültig auf die andere (in der Figur rechte) Seite desselben, so dass der von der Netzhaut aufgefangene, dem Objectpunkte c entsprechende Zerstreungskreis ebenfalls seitlich und getrennt von α , und zwar dem Zerstreungskreis von b gegenüber liegt. Den drei in einem Richtungsstrahle gelegenen Punkten a , b und c entsprechen somit drei räumlich getrennte Projectionen auf der Netzhaut. Wir haben in unserer Figur den Fall angenommen, wo der durch die Pupille eindringende Strahlenkegel ganz außerhalb des Richtungsstrahles liegt. Gehören die Objectpunkte dagegen der Augennachse näher gelegenen Theilen des Sehraumes an, und liegt der Richtungsstrahl nicht mehr außerhalb des durch die Pupille bedingten wirksamen Strahlenkegels, aber doch noch excentrisch zu demselben, so werden sich die Netzhautprojectionen theilweise decken. Eine centrische Deckung der Zerstreungskreise aber kann nur dann stattfinden, wenn sich die Objectpunkte in demjenigen Richtungsstrahle befinden, welcher durch den Mittelpunkt der Pupille geht, also in der Hauptvisirlinie. Mit anderen Worten: der geometrische Ort für die Mittelpunkte der Zerstreungskreise aller in einem Richtungsstrahle gelegener Object-

punkte ist nur in dem einzigen Falle ein Punkt, wenn der Richtungsstrahl durch den Mittelpunkt der Pupille geht; in allen anderen Fällen ist er eine Linie, und zwar eine Strecke eines Netzhautmeridians.

Was geschieht nun in dem in unserer Figur dargestellten Falle, wenn unter Constanz aller übrigen Umstände die Accommodation geändert wird? Wird das Auge beispielsweise auf die Accommodationssphäre C eingestellt, so fällt der Bildpunkt von c in den Punkt α , und die Zerstreungskreise von a und b kommen beide links von α zu liegen. Bei der Verlegung der Accommodationsfläche in die Entfernung B dagegen wird ein scharfes Netzhautbild von b in α entworfen, während die den Punkten a und c entsprechenden Zerstreungskreise beide rechts von α liegen. Man sieht somit: Wenn bei unveränderter Lage und Fixation das Auge seinen Accommodationszustand ändert, so tritt eine Verschiebung der Bilder bez. Zerstreungskreise aller indirect gesehenen Punkte ein, und zwar entfernen sich dieselben vom Netzhautcentrum beim Fernsehen und nähern sich demselben bei der Accommodation für die Nähe. Da die Richtung, in welcher wir die Dinge sehen, von der Lage der Bilder auf der Netzhaut abhängig ist, so muss der bei der Accommodationsänderung stattfindenden Verschiebung der Bilder und Zerstreungskreise eine scheinbare Ortsveränderung der gesehenen Punkte entsprechen. Diese letztere kann man bei aufmerksamer Beobachtung auch ganz deutlich wahrnehmen. Hier nur ein Beispiel: Die den Rand eines in der Mitte des Sehfeldes gelegenen Gegenstandes bildenden Objectpunkte entwerfen ihre Bildpunkte resp. Zerstreungskreise auf mehr oder minder excentrische Netzhautstellen. Verlegt nun das Auge den Blickpunkt in größere Ferne, so müssen nach den obigen Darlegungen die Projectionen jener Objectpunkte weiter aus einander liegen, d. h. der (im übrigen undeutlich gesehene) Gegenstand wird größer erscheinen. Umgekehrt müssen bei der Verlegung der Accommodationssphäre in größere Nähe die Netzhautbilder der Randpunkte sich dem Netzhautcentrum nähern; sie treten enger zusammen und der Gegenstand muss kleiner erscheinen. Dies findet sich in der Erfahrung thatsächlich auch bestätigt; denn es ist bekannt, dass bei der Accommodation für die Ferne die in der Nähe befindlichen, un-

deutlich gesehenen Gegenstände etwas vergrößert erscheinen, während bei der Einstellung des Auges für die Nähe die entfernten Gegenstände etwas kleiner zu werden scheinen. Dass nahe vor das Auge gehaltene Gegenstände durch ein enges Loch in einem Schirme betrachtet sehr stark vergrößert erscheinen¹⁾, beruht ganz auf denselben Ursachen; nur ist hier die natürliche Pupille des Auges durch eine künstliche ersetzt, die sehr viel enger und beträchtlich weiter vom Knotenpunkt des Auges entfernt ist, weshalb der Effect der excentrischen Lage des zur Wirkung kommenden Strahlenbündels noch viel überraschender ausfällt.

Aus unserer Figur ist ferner leicht zu ersehen, dass bei jeder Annäherung des in Frage kommenden Richtungsstrahles kc an die Gesichtslinie, also bei Verkleinerung des Winkels fkc ein Zusammenrücken der Netzhautprojectionen von a , b und c unter einander stattfinden muss, während dieselben beim Wachsen des genannten Winkels aus einander treten werden. Mit andern Worten: Wenn das Auge, ohne seinen Ort im Raum und seinen Accommodationszustand zu ändern, sich um seinen Mittelpunkt dreht, so findet nicht bloß eine Ortsverschiebung des Gesamtbildes auf der Netzhaut, sondern auch eine, wenn auch geringe, Veränderung der relativen Lage der einzelnen Theile des Bildes zu einander statt. Auf Grund der Relativität der Bewegung hat natürlich eine entsprechende Bewegung des ganzen Sehraumes denselben Erfolg wie die Drehung des Auges; und was für den ganzen Sehraum gilt, das muss auch hier, wie leicht ersichtlich, für jeden Tiefenausdehnung besitzenden Theil desselben gelten. D. h. wenn sich ein Gegenstand, dessen für das Auge sichtbare Oberfläche nicht in einer und derselben Accommodationssphäre liegt, unter vollständiger Erhaltung der räumlichen Beziehungen seiner Theile zu einander und zu dem Drehpunkt des Auges fortbewegt, so bleibt sein Bild auf der Netzhaut sich nicht congruent, sondern es erleidet gewisse Aenderungen. Diese Aenderungen sind durch die Verschiebungen der Zerstreungskreise der indirect gesehenen, in verschiedenen Entfernungen vom Auge befindlichen Punkte bedingt.

1) Helmholtz, Physiolog. Optik. 2. Aufl. S. 119.

Wir haben in der vorstehenden Darstellung drei einem Richtungsstrahle angehörende Punkte betrachtet, weil sich an ihnen die Verhältnisse am einfachsten geometrisch demonstrieren ließen. Der Einfachheit halber haben wir ferner von der Berücksichtigung der vor der Pupille gelegenen brechenden Medien des Auges, sowie der Existenz zweier Knotenpunkte anstatt eines mittleren, Abstand genommen, da die Einführung dieser die Darstellung complicirender Factoren an dem aufgezeigten Thatbestand nichts Wesentliches zu ändern vermag. Nun haben aber die Richtungsstrahlen, da sie nur für Objectpunkte in der jeweiligen Accommodationsfläche den Ort der Netzhautprojection bestimmen, für die Ausmessung des Sehfeldes nur eine beschränkte Bedeutung. Gemäß der Wundtschen Theorie der complexen Localzeichen sind vielmehr zwei andere Punkte von größerer Wichtigkeit: der Drehpunkt des Auges und der Mittelpunkt der Pupille, von welchen ersterer in constanter Beziehung zu den intensiven, letzterer aber zu den qualitativen Localzeichen steht.

Alles, was an der Hand der Fig. 1 für die einem Richtungsstrahle angehörenden Punkte dargethan wurde, gilt selbstverständlich auch für Objectpunkte, die in irgend einer anderen die Hauptvisirlinie schneidenden Geraden liegen, z. B. in der durch den Drehpunkt des Auges gehenden.

In Figur 2 ist d der Drehpunkt des Auges und m der Mittelpunkt der Pupille. Nehmen wir (aus später zu erörternden Gründen) die Oeffnung der Pupille als sehr klein, nahezu punktförmig an, so müssen sich die mit m in einer geraden Linie liegenden Punkte a , b und c , da das von ihnen ins Auge gelangende Licht in einen einzigen Strahl zusammenfällt, auf einen und denselben Netzhautpunkt projeciren, in unserm Falle auf den Punkt x ¹⁾. Die drei Punkte a , b und c haben somit in unserem Falle dasselbe

1) Um dem leicht zu begehenden Irrthume vorzubeugen, als ob der Punkt x auch der optische Bildpunkt der drei Objectpunkte sein müsse, habe ich in der Figur auch den Gang der Richtungslinien punkirt angegeben, so dass man leicht erkennt, dass die den Objectpunkten a , b und c zugehörenden conjugirten Punkte in a' , b' und c' liegen, während in dem Punkte x nur die auf eine sehr geringe Größe reducirten Zerstreuungskreise zusammenfallen. Siehe auch Wundt, Physiol. Psychol. II. Bd. S. 106 und Helmholtz, Physiol. Optik. 2. Aufl. S. 127.

qualitative Localzeichen. Es kann ihnen aber nicht auch das gleiche intensive Localzeichen zukommen, denn das Auge muss, um diese Punkte nach dem Fixationspunkt überzuführen, Bewegungen von sehr verschiedenem Winkelwerthe ausführen, deren Größe den aus der Figur zu ersiehenden Winkeln mda , mdb und mdc entspricht. Den Unterschied zwischen dem Gesichtswinkel (d. h. dem Richtungsunterschied zweier Visirlinien) und dem

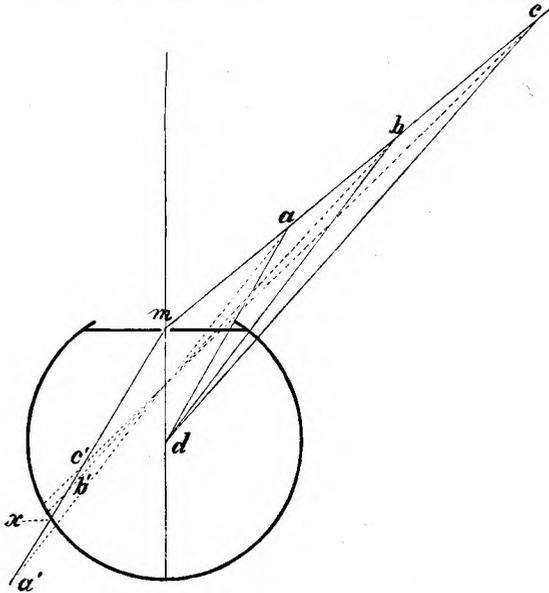


Fig. 2.

Drehungswinkel kann man auch die »Parallaxe des indirecten Sehens« nennen, eine ganz passende Bezeichnung, die übrigens in ähnlicher Form schon von Listing und Helmholtz angewandt wurde. Listing¹⁾ versteht jedoch unter »Parallaxe zwischen dem scheinbaren Ort der Objecte im directen und indirecten Sehen« den Unterschied zwischen dem Drehungswinkel und dem durch die von den betreffenden Punkten nach dem Knotenpunkt des Auges gezogenen Linien, also die Richtungsstrahlen, gebildeten Winkel.

1) Listing, Beiträge zur physiol. Optik. 1845. S. 14—16 (ich citire hier nach Helmholtz, da mir das Listing'sche Buch nicht zur Hand ist).

Helmholtz¹⁾ dagegen schlägt in einer längeren Besprechung dieses Gegenstandes die Benutzung des Gesichtswinkels vor, spricht aber der Parallaxe jede weitere Bedeutung ab und zwar aus Gründen, deren Widerlegung uns an anderer Stelle beschäftigen wird. Zu einem und demselben qualitativen Localzeichen können somit sehr verschiedene intensive Localzeichen gehören, je nachdem der in Frage kommende Objectpunkt näher oder ferner liegt; und umgekehrt kann dasselbe intensive Localzeichen verschiedenen qualitativen zugeordnet sein. Alle Punkte der Linie *dc* in Fig. 2 haben beispielsweise dasselbe intensive Localzeichen, während sie dagegen sehr verschiedene qualitative haben müssen, da ihre Bilder auf verschiedene Netzhautstellen fallen.

Die Zuordnung der intensiven und qualitativen Localzeichen zu einander ist somit eine innerhalb gewisser Grenzen wechselnde. Aber die Variabilität dieser Zuordnung ist keine gesetzlose, sondern sie steht in ganz gesetzmäßiger Beziehung zur Tiefenausdehnung. Je einer Combination eines intensiven und eines qualitativen Localzeichens entspricht nur ein Punkt im dreidimensionalen Sehraume. und umgekehrt, ja einem Punkte im Raum correspondirt bei gegebener Stellung und Accommodation des Auges eine einzige, ganz bestimmte Combination der Localzeichen. Wir sehen somit, dass der wechselnden Localzeichen-Zuordnung im Doppelauge, wie sie von Wundt eingehend dargelegt ist²⁾, beim monocularen Sehen ein ähnlicher Vorgang entspricht, der sich hier nur innerhalb weit bescheidenerer Grenzen hält. Wenn man will, kann man den Wechsel in der Zuordnung der quantitativen und qualitativen Localzeichen als ein drittes Localzeichensystem ansehen, dessen Function an die Tiefendimension gebunden ist. Es war daher eben so berechtigt als weitschauend, wenn Wundt den ursprünglich für seine Theorie gewählten Terminus der »doppelten« später durch den der »complexen« Localzeichen ersetzte. Die Incongruenz der beiden für die Ausmessung des Sehraumes maßgebenden Größen, des Gesichtswinkels (quantitative Localzeichen) und des Drehungswinkels (intensive Localzeichen), sowie die damit zusammenhängenden relativen

1) Helmholtz, *Physiol. Optik.* 1. Aufl. S. 585 f.

2) Wundt, *Physiol. Psychol.* 4. Aufl. II. Bd. S. 164 und 218 ff.

Ortsveränderungen der Netzhautbilder bei der Accommodationsänderung, der Drehung des Auges oder den derselben äquivalenten Bewegungen der Objecte ist eine unumgängliche Eigenschaft eines jeden nach dem Princip der Dunkelkammer gebauten Auges¹⁾. Sie ist eine spezifische Eigenschaft des indirecten Sehens, und ihr Einfluss nimmt mit der Annäherung an das Netzhautcentrum ab und erreicht in diesem Punkte den Werth Null. Es müsste nun wunderlich zugehen, wenn in einem Organ, welches, wie das Auge des Menschen und der höheren Wirbelthiere, sowohl als Unterscheidungs- wie als Bewegungsapparat ein Präcisionsinstrument allerersten Ranges darstellt, die aufgeführten optisch unvermeidlichen Eigenschaften, die überdies einen ganz gesetzmäßigen Gang einhalten, nur als »Uebelstände« bestehen sollten. Es ist vielmehr mit Sicherheit anzunehmen, dass der Gesichtssinn die erwähnten, in gesetzmäßiger Beziehung zur Tiefendimension stehenden Abweichungen als Daten zur Gewinnung einer Tiefenwahrnehmung verwendet, so dass das monoculare Sehen in dieser Hinsicht nicht lediglich auf die die Accommodationsänderungen begleitenden Muskelempfindungen angewiesen ist.

Dass das monoculare Sehen in hohem Grade einer Tiefenwahrnehmung bedarf, wird gewöhnlich übersehen, weil man nicht beachtet, dass in gewissen Theilen des Gesichtsfeldes, und zwar gerade in solchen, die für unsere Bewegungen und Hantierungen besonders wichtig sind, nur einäugig gesehen wird. Ich sitze beispielsweise an meinem Schreibtisch, halte mit der linken Hand einen Bogen Briefpapier fest, während die rechte schreibend die Feder führt und die Augen (ohne Brille) sich in einer Entfernung von 25—30 cm von der Mitte des Papiers befinden. Hierbei wird die linke Hand nur vom linken Auge, die rechte größtentheils nur vom rechten Auge gesehen. Nur die Fingerspitzen der rechten Hand befinden sich im gemeinsamen Gesichtsfeld, und wenn ich in der Nähe des unteren rechten Endes des Bogens angelangt bin, ist selbst dies nicht mehr der Fall. Dabei ist aber die Tiefen-

1) Die einzige Ausnahme würde der Fall bilden, wo der Drehpunkt des Auges in die Ebene der Pupille fiel; ich weiß nicht, ob in irgend einem Thierauge eine Annäherung an diese Möglichkeit existirt.

wahrnehmung in Bezug auf diese indirect und einäugig gesehenen Gegenstände nicht allein vorhanden, sondern sogar so lebhaft, dass ich, falls ich mich nicht durch Schließen des rechten oder linken Auges davon überzeugen könnte, gar nicht glauben würde, dass nur monoculares Sehen vorliegt.

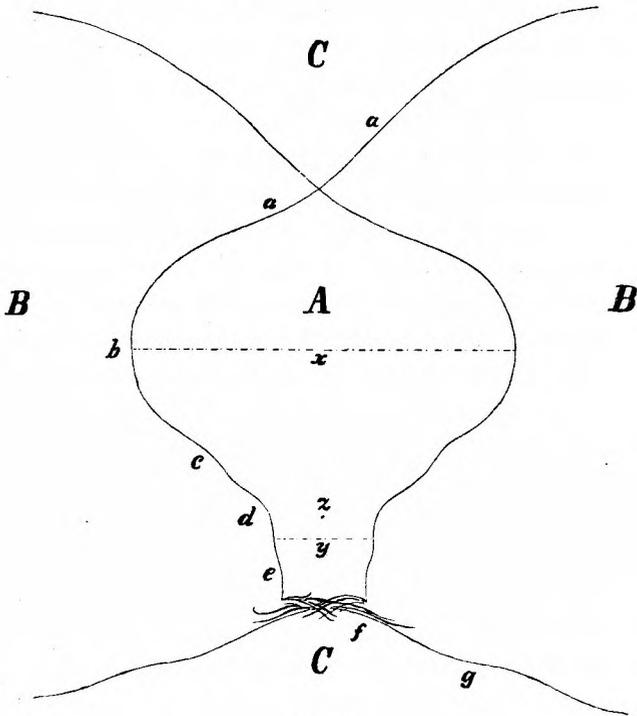


Fig. 3.

Wenn man eine Projection des gemeinschaftlichen Gesichtsfeldes auf eine senkrecht zur mittleren Sehrichtung gelegte Ebene entwirft, so erhält man eine mit der Figur 3 mehr oder minder übereinstimmende Zeichnung¹⁾. Nur der mittlere geschlossene Theil

1) Die Figur stimmt ziemlich mit der von Helmholtz (Physiol. Optik. S. 484 [627]) gegebenen Darstellung des gemeinschaftlichen Sehfeldes überein; ich verstehe jedoch nicht, wie er die monocularen Gesichtsfelder, trotzdem er auf eine Ebene projicirt, auch an der Außenseite geschlossen darstellen kann. Ich selber sehe noch Gegenstände, die sich in einer Winkelentfernung von nahezu 100° vom Fixationspunkt befinden. Daraus geht hervor, dass auch Strahlen, die senkrecht zur Augenachse oder gar unter einem spitzen Winkel zu

(*A* in der Figur) ist gemeinsames Gesichtsfeld, bei dessen Begrenzungslinien die mit *a* bezeichnete Stelle den Augenbrauen, *b* der Nasenwurzel, *c* dem Nasenbein, *d* der Nasenspitze, *e* den Nasenflügeln und *f* den Schnurrbarthaaren entspricht. Die äußere, in der Figur mit *B* bezeichneten Felder sind die sich nicht deckenden Theile der monocularen Sehfelder, die in der Projection auf eine Ebene sich nach außen natürlich unbegrenzt darstellen müssen, da das gesammte Gesichtsfeld einen Winkelwerth von über 180° besitzt. Die Stelle *g* entspricht der Wange. Die mit *C* bezeichneten Stellen gehören weder zum monocularen noch zum binocularen Gesichtsfeld.

Die Form des binocularen Gesichtsfeldes ist übrigens keineswegs constant; sie ändert sich vielmehr mit jeder Veränderung des zwischen den beiden Augenaxen bestehenden Richtungsunterschiedes. Je größer die Convergenz der beiden Hauptvisirlinien, desto mehr rücken die Grenzen des gemeinschaftlichen Gesichtsfeldes in horizontaler Richtung zusammen. Für den oberen, weiteren Theil will das zwar nicht viel bedeuten; der untere durch die Nase eingeengte Theil dagegen wird dabei immer schmaler und verschwindet endlich ganz, wenn der Schnittpunkt der Hauptvisirlinien in dem Punkte angelangt ist, wo die von den Mittelpunkten der Pupillen aus an die, die sogenannte Nasenspitze begrenzende, krumme Fläche gelegten Tangenten sich schneiden¹⁾. Ich habe durch einige rohere Messungen für verschiedene Convergenzstellungen die Winkelwerthe

derselben, d. h. von hinten, das Auge treffen, von der Hornhaut noch so gebrochen werden, dass sie durch die Pupille gehen, eine Thatsache, die Helmholtz an anderer Stelle (Physiol. Optik, S. 67 der deutschen, S. 89 der französischen Ausgabe, welche letztere mir hier nur zur Hand ist) zuzugeben scheint. Auch die von Aubert (Grundzüge der physiologischen Optik, S. 609) erwähnte Bestimmung der Sehfelder von Förster und Möser begeht denselben Fehler. Etwas anderes ist es natürlich mit dem binocularen und monocularen Blickfeld; indessen auch das monoculare Blickfeld ist in den Darstellungen von Hering (Binoculares Sehen, S. 43; siehe auch Aubert, Grundzüge der physiologischen Optik, S. 664) viel zu beschränkt angenommen.

1) Bei mir liegt der Punkt etwa 2 bis $2\frac{1}{2}$ cm vor der Nasenspitze, und sein Abstand von der Verbindungslinie der Augenmittelpunkte beträgt etwa 8 cm. Meine Nase hält sich übrigens ziemlich in normalen Formen. Bei Leuten mit hervorragenderem und umfangreicherem Gesichtsvorsprung liegen die Verhältnisse noch ungünstiger, besonders wenn gleichzeitig eine stärkere Kurzsichtigkeit vorhanden ist.

(auf den Mittelpunkt der Verbindungslinie der Augendrehpunkte bezogen) des gemeinschaftlichen Sehfeldes zu ermitteln gesucht. Bei einer Einstellung der Augen auf einen 150 cm entfernten Punkt fand sich für den oberen Theil des gemeinschaftlichen Gesichtsfeldes an der der punktirten Linie x entsprechenden Stelle in der Horizontalen ein Winkelwerth von 105 bis 110°, für den untern engeren Theil dagegen, etwa an der Stelle der Linie y , nur ein solcher von 44°. Bei stärkerer Convergenz reducirte sich dieser Werth noch ganz erheblich, wie nachstehende kleine Tabelle zeigt.

Entfernung des binocularen Blickpunkts:	Winkelwerth des untern Theils des gemeinschaftl. Gesichtsfeldes:
150 cm	44°
50 »	33°
25 »	27°
15 »	17°

Wenn man das Auge dreht, ohne den Kopf zu bewegen, so verändert man zwar die Lage des Blickpunktes, nicht aber diejenige des gemeinschaftlichen Gesichtsfeldes. Man kann daher jeden Punkt des gemeinsamen Gesichtsfeldes fixiren und eventuell auch den Fixationspunkt über die Grenzen dieses Bezirks hinaus verlegen, obgleich das letztere nur in den unteren Partien häufiger eintritt. Bei unseren wichtigsten Arbeiten liegt der Fixationspunkt meist in der Gegend, wo der weitere und der engere Theil des gemeinsamen Gesichtsfeldes in einander übergehen, manchmal sogar ganz in dem engern Theil. Ich pflege beispielsweise beim Schreiben den Kopf mäßig zu senken, und der Fixationspunkt liegt dann in der Nähe der Linie y , etwa bei dem Punkte z . Ein Klavierspieler von mittlerer Körpergröße und gerader Haltung, mag er nun auf die Noten oder auf die Tasten sehen, sieht höchstens zwei Octaven binocular, und der Handwerker, der an seiner Hobelbank oder sonstigem Werkisch arbeitet, sieht nur beschränkte Theile seines Werkzeugs und des zu bearbeitenden Stückes mit beiden Augen zugleich. Wir sehen somit, dass der untere Theil des Gesamtgesichtsfeldes am binocularen Sehen nur einen beschränkten Antheil nimmt, während jedoch gerade dieser Theil die meisten und wichtigsten Objecte enthält, deren möglichst genaue Localisirung in Richtung und Tiefen-

dimension unerlässlich ist. Nun findet sich aber, dass die Tiefenvorstellungen, welche durch die am binocularen Sehen nicht theilnehmenden Regionen des indirecten Sehens ausgelöst werden, gegenüber den entsprechend excentrisch gelegenen Stellen des beiden Augen gemeinschaftlichen Sehfeldes durchaus nicht minderwerthig sind. Bei unseren Bewegungen, wie beim Gehen, Laufen, Treppensteigen etc., bei den meisten Verrichtungen des Handwerkers und Künstlers spielen die Tiefenwahrnehmungen des indirecten Sehens und speciell in der unteren Hälfte des Sehraumes sicherlich eine nicht zu unterschätzende Rolle. Ein Unterschied zwischen dem gemeinsamen Gesichtsfeld und den nur einäugig gesehenen Partien wird aber dabei nicht bemerkt. Im Gegentheil, die Tiefenvorstellungen sind im untern Gesichtsfeld so vorzüglich eingeübt, dass wir nach einem im Gebiete des nur einäugigen Sehens befindlichen Gegenstand hier sicherer und fehlerfreier greifen als im oberen Sehraume selbst auf den beiden Augen gemeinsamen Partien. Wenn somit die Tiefenvorstellung des indirecten Sehens in jenen Gebieten des Gesichtsfeldes, welche am binocularen Sehen nicht theilnehmen, so wenig hinter derjenigen des gemeinschaftlichen Gesichtsfeldes zurücksteht, dass man keinen Unterschied zwischen beiden wahrnimmt, und dass die meisten Menschen gar nicht bemerken, ein wie geringer Theil des unteren Sehraumes unter der Herrschaft des Doppelauges steht, so müssen für das monoculare Sehen Einrichtungen bestehen, welche einen gewissen Ersatz bilden für die hier fehlenden Doppelbilder. Diese ersatzleistenden Einrichtungen bestehen nach meiner Ansicht in der Verwerthung der in gesetzmäßiger Beziehung zur Tiefendimension stehenden Aenderungen in der Configuration der Netzhautprojectionen, wie sie oben als unausbleibliche Begleiterscheinungen bei der Drehbewegung des Auges (resp. der Objecte) und bei Accommodationsänderungen nachgewiesen wurden. Diese gesetzmäßige Variabilität der Zuordnung zwischen qualitativen und intensiven Localzeichen ist eine specifische Function des indirecten Sehens und unterstützt die mehr dem directen Sehen angehörende der Accommodationsänderung adhärirende Muskelempfindung bei der Hervorrufung der monocularen Tiefenwahrnehmung.

Man könnte nun den Einwand erheben, dass diese Function

des indirecten Sehens, sofern sie wirklich bestände, sich auch direct in der Wahrnehmung bemerkbar machen müsse. Dem aber steht das Gesetz der Correspondenz von Apperception und Fixation¹⁾ entgegen. Wir haben oben schon darauf hingewiesen, dass bei den unserm Gesichtssinne unterstellten Organen das Princip der qualitativen Arbeitstheilung bis ins Aeüßerste durchgeführt ist. Das indirecte Sehen hat nicht den Zweck, scharfe Bilder zu liefern. exacte Wahrnehmungen der Form und Größe zu vermitteln, denn diese wären dem für die volle Bethätigung der psychischen Leistungsfähigkeit so außerordentlich wichtigen Gesetz der Concentration der Aufmerksamkeit, dem Apperceptionsgesetz, geradezu hinderlich. Diejenige Aufgabe, welche das indirecte Sehen mit Präcision zu erfüllen hat, ist die Auslösung von nach Richtung und Größe scharf bestimmten Bewegungsimpulsen. Wir nehmen daher, da scharfe Gesichtswahrnehmung an die Fixation gebunden ist, die Lichtindrücke des indirecten Sehens bei weitem nicht mit derjenigen Genauigkeit wahr, mit welcher sie von den optischen Apparaten des Auges geliefert²⁾ und von dem Bewegungsmechanismus verarbeitet und verwerthet werden³⁾. Man könnte mit demselben Rechte, mit dem man den obigen Einwurf erhebt, auch die Behauptung aufstellen, dass da, wo keine Doppelbilder wahrgenommen werden, auch keine vorhanden und wirksam seien. Nun haben aber die Menschen Jahrtausende von dem Vorhandensein der Doppelbilder und von der Verschiedenheit der Bilder in beiden Augen keine Ahnung gehabt; es wäre aber lächerlich, daraus schließen zu wollen, dass ihnen auch die diesbezüglichen Hilfsmittel der Tiefenwahrnehmung gefehlt haben. Die Verschiedenheit der Bilder des rechten und linken Auges, die Doppelbilder, werden, obwohl meist selbst nicht wahrgenommen, dennoch zum Zwecke anderer Wahrnehmungen vortrefflich verwerthet⁴⁾. Ebenso werden auch beim monocularen Sehen die Verschiebungen der Zerstreungskreise etc., die eine auf der physischen Beschaffenheit des optischen Apparates beruhende mathematische Nothwendigkeit sind, zwar nicht selber

1) Wundt, *Physiol. Psychol.* II. Bd. S. 122.

2) Ebenda, S. 104; Helmholtz, *Physiol. Optik.* 2. Aufl. S. 257.

3) Wundt, Ebenda, S. 216.

4) Wundt, *Vorlesungen über Menschen- und Thierseele.* 2. Aufl. S. 204.

direct wahrgenommen, wohl aber zur Ermöglichung einer monoculareren Tiefenwahrnehmung von unserem Gesichtssinne systematisch ausgenutzt. Dass diese Ansicht, welche übrigens in engem Zusammenhang mit dem steht, was Wundt über die retinalen Localzeichen der indirect gesehenen Punkte¹⁾ bemerkt, die Annahme involvirt, dass motorische und sensorische Effecte der Lichteinwirkung an verschiedene Endorgane in der Retina geknüpft sein können, spricht eher für als gegen die Theorie der complexen Localzeichen.

Ein weiterer Einwand wäre der, dass die in Rede stehenden Verschiebungen der Bildpunkte resp. Zerstreungskreise zwar vorhanden, aber so klein und geringfügig seien, dass sie unmöglich die ihnen in obiger Darstellung zuge dachte Rolle zu spielen im Stande seien. Dies ist auch die Ansicht, welche Helmholtz an der weiter oben citirten Stelle vertritt²⁾. Er beweist an der Hand einer schematischen, die (im zweiten Theil der vorliegenden Arbeit zu erörternden) Abweichungen der Zerstreungskreise von der Kreisform und ihre unvollkommene Deckung nicht berücksichtigenden Figur mittelst Rechnung, dass bei kleinster Pupille (3 mm) das Bild eines unendlich entfernten Punktes, sofern derselbe nicht weiter als $8^{\circ}40'$ vom Blickpunkt entfernt ist, nicht über die Grenzen des Zerstreungskreises eines in der Entfernung des Nahepunktes befindlichen Objectpunktes hinausfallen kann. Ebenso ergibt sich für eine Pupillenweite von 6 mm ein Excentricitätswinkel von $17^{\circ}33'$, der nicht überschritten werden darf, wenn die parallaktische Verschiebung des Fernpunktes nicht einen größeren Spielraum haben soll als der Zerstreungskreis des Nahepunktes. Wenn man nun aber bedenkt, dass der Durchmesser eines Zerstreungskreises auf der Netzhautmitte bei einer Pupillenweite von 4 mm nach den von Helmholtz citirten Angaben Listing's eine Größe von $\frac{2}{3}$ mm erreichen kann, so wird man mir wohl beipflichten, wenn ich die von Helmholtz gegebene Berechnung geradezu als eine Bestätigung dessen ansehe, was ich über die Beträchtlichkeit der parallaktischen Verschiebungen des indirecten Sehens vorbringe. Eine Größe von

1) Wundt, *Physiol. Psychol.* 4. Aufl. II. Bd. S. 216.

2) Helmholtz, *Physiol. Optik.* 1. Aufl. S. 586.

$\frac{2}{3}$ mm auf der Netzhaut entspricht ungefähr 5 Vollmondbreiten im Sehfeld, und wenn nach der Helmholtz'schen Berechnung die parallaktischen Verschiebungen des indirecten Sehens so viel betragen können bei den verhältnissmäßig geringen Winkeln von $8\frac{2}{3}$ resp. $17\frac{1}{2}^\circ$, so beweist das die Richtigkeit unserer Darlegungen, und zwar um so mehr, als Helmholtz den Spielraum der Variation der Pupillenweite (3 bis 6 mm) viel zu beschränkt annimmt¹⁾. Von der Irrthümlichkeit des obigen Einwandes kann man sich ferner auch überzeugen, wenn man auf dem Wege der Rechnung oder der Construction die wirkliche Größe der betreffenden Verschiebungen bestimmt. Ich habe in Fig. 4 den Durchschnitt eines menschlichen Auges in doppelter Größe construirt und zwar unter Zugrundelegung der von Helmholtz angegebenen Maße²⁾. Die begrenzenden Flächen des Auges sind dabei als Kugelflächen angenommen, und ferner ist die Thatsache, dass Augenachse und Hauptvisirlinie nicht genau zusammenfallen und dass die einzelnen Theile des optischen Apparates nicht ganz genau centrirt sind, unberücksichtigt gelassen. Diese beiden Vernachlässigungen haben auf Art und Größe der darzustellenden Erscheinungen keinen wesentlichen Einfluss. In Figur 4 ist m der Mittelpunkt des Hornhautbildes der Pupille, m' derjenige des Linsenbildes, k der vordere, k' der hintere Knotenpunkt und d der Drehpunkt des Auges. Ist das Auge für die Nähe accommodirt, so giebt die Basis der kleinen schwarzen Dreiecke bei a und b den Durchmesser der Netzhautbezirke an, auf welchen sich die Mittelpunkte der Zerstreuungskreise aller einem und demselben Richtungsstrahl angehörenden Objectpunkte vertheilen, und zwar bei a für einen Richtungsstrahl, der 30° , bei b für einen solchen, der 60° vom Blickpunkt entfernt ist. Die geschwärtzten Winkel v und w repräsentiren die Maximalwerthe der Variabilität der Drehungswinkel, welche zu den Punkten einer und derselben Visirlinie gehören, und zwar der Winkel v für eine Entfernung von 20° , der Winkel w für eine solche von 45° von der Stelle des deutlichsten Sehens. D. h. wenn das Auge die sich auf

1) Nach den von Aubert (Physiol. Optik. S. 454) angeführten Untersuchungen Lambert's variirt der Pupillendurchmesser selbst bei ziemlich bescheidenem Wechsel der Lichtquantität zwischen 2,4 und 6,8 mm.

2) Helmholtz, Physiol. Optik. 2. Aufl. S. 9, 29 und 140.

einen und denselben Netzhautpunkt projicirenden Objectpunkte einer Visirlinie von 20 bzw. 45° Neigung zur Hauptvisirlinie durch Drehung nach dem Fixationspunkt überführen will, so hat es dazu Bewegungen auszuführen, deren Größe um das Maß der Winkel v bzw. w differiren kann. Der Winkel v beträgt ungefähr $1\frac{1}{2}$, der

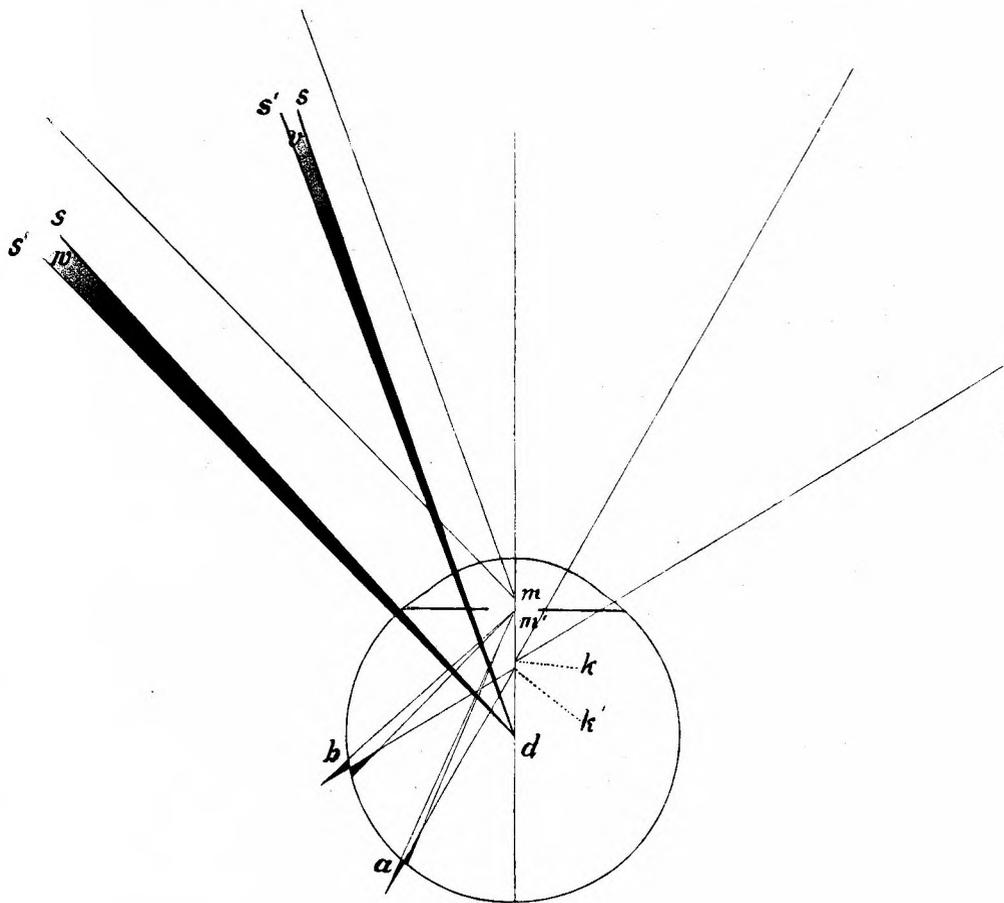


Fig. 4.

Winkel w annähernd $2\frac{1}{4}^\circ$; dem entsprechen, aufs Gesichtsfeld übertragen, Strecken von 3 bez. $4\frac{1}{2}$ Vollmondbreiten¹⁾. Da unsere Figur in doppelter natürlicher Größe gezeichnet ist, so sind die

1) Vergl. hierzu die Tabelle im Nachtrag.

Werthe der Netzhautstrecken bei a und b in Wirklichkeit auf die Hälfte zu reduciren, während jedoch die Winkel v und w ihre Größe behalten. Im Uebrigen bedarf die Figur, wie ich glaube, keiner näheren Erläuterung, da das zum Verständniß derselben Nöthige bereits bei der Behandlung von Fig. 1 und 2 dargelegt wurde. Die Schnittpunkte der rechtsseitigen Schenkel (s) der Winkel v und w mit ihren resp. Visirlinien können in der Figur natürlich nicht mehr zur Darstellung gelangen; sie liegen in einer Entfernung von 30 cm von d , einem Durchschnittswerthe des Nahepunktes im normalen Auge (15 cm) entsprechend. Der andere Schenkel (s') ist natürlich der zugehörigen Visirlinie parallel, so dass die Winkel (v und w) somit das Gebiet der Drehungsparallaxe repräsentiren für alle zwischen dem Nahepunkt und unendlicher Ferne gelegenen Orte derselben Visirlinie. Es sei hier ferner noch darauf aufmerksam gemacht, dass zur Gewinnung der Netzhautstrecken bei a und b die den Fernpunkten der betreffenden Richtungsstrahlen conjugirten Punkte (die Spitzen der schwarzen Dreiecke) nicht willkürlich angenommen wurden, sondern dass auch hier die von Helmholtz angegebenen Maße für die Lage des hinteren Brennpunktes im Zustande der Accommodation für Nähe und Ferne zu Grunde gelegt sind.

Wir haben dargethan, dass einem einzigen qualitativen Localzeichen intensive Localzeichen von so verschiedenem Werth der Bewegungsgröße zugeordnet sein können, dass die dadurch geschaffenen Variationsgebiete Winkelwerthe von mehreren Graden erreichen und im Sehfelde somit Flächen von 4 und mehr Vollmondbreiten repräsentiren. Ich glaube, es wird in Anbetracht dieses Umstandes Niemand mehr behaupten wollen, die Incongruenz zwischen Gesichtswinkel und Drehungswinkel sei zu geringfügig, um zur Geltung zu gelangen. Ja selbst für den Fall, dass sich bei der Construction der Fig. 4 oder in die Berechnung der zu Grunde gelegten Maßzahlen so große Fehler eingeschlichen hätten, dass der wirkliche Werth der Abweichungen nur $\frac{1}{5}$ von dem construirten betrüge, so wäre dieses Fünftel immer noch reichlich groß genug, um Berücksichtigung bei der Theorie der Tiefenwahrnehmung zu beanspruchen. Von der Erheblichkeit der Größenverhältnisse der dargelegten Erscheinungen kann man sich auch durch eine Modi-

fication des von Helmholtz bei seiner Behandlung der Größe der Zerstreuungskreise und der Farbenzerstreuung angeführten Versuches¹⁾ überzeugen. Was für Strahlen aus verschiedener Entfernung gilt, das muss auch für Strahlen gelten, die von einem Punkte ausgehen, aber verschiedene Brechbarkeit besitzen. Wenn man in einen schwarzen Carton ein feines Loch sticht und hinter dasselbe ein paar Blättchen violettes Gelatinepapier klebt, welches rothes und blaues Licht durchlässt, so sieht man bekanntlich, wenn man den Carton in geeignete Entfernung vom Auge vor den hellen Himmel, die Sonne oder eine Flamme hält, je nach dem Zustand der Accommodation, einen blauen Punkt mit rothem Saume oder umgekehrt. Lässt man aber das Bild des leuchtenden Punktes auf die peripherische Netzhaut fallen und accommodirt für eine von dem Abstand des Cartons verschiedene Entfernung, so sieht man bei einiger Uebung im indirecten Sehen zwei benachbarte oder auch ganz getrennte Punkte, einen rothen und einen blauen. Man kann die Erscheinung deutlicher machen, wenn man ein zweites sehr enges Diaphragma direct vors Auge hält, oder, wie es Helmholtz unter Fixation des Punktes thut²⁾, die Pupille durch seitliches Verschieben eines Schirmes theilweise verdeckt. Durch beide Procedures wird die wirkliche Pupille durch eine künstliche ersetzt, welche kleiner bzw. excentrischer ist als jene und außerdem einen größeren Abstand vom Knotenpunkt und vom Drehpunkt des Auges hat.

Wenn wir nunmehr unter Anlehnung an die von Wundt³⁾ angewandte Terminologie als »secundäre« Hilfsmittel der Tiefenvorstellung diejenigen Hilfsmittel bezeichnen, welche auf einer »eine große Menge individueller Erfahrung voraussetzenden«⁴⁾ Beurtheilung der Dinge beruhen, unter »primären« dagegen diejenigen verstehen, welche ihre Grundlage direct in den Einrichtungen des Sinnesorgans haben, so lassen sich die primären Hilfsmittel der monocularen und binocularen Tiefenwahrnehmung wie folgt classificiren:

1) Helmholtz, *Physiol. Optik.* 2. Aufl. S. 158 ff.

2) Ebenda, S. 161.

3) Wundt, *Physiol. Psychol.* 4. Aufl. II. Bd. S. 197 ff.

4) Ebenda, S. 216.

Primäre Hilfsmittel der Tiefenvorstellung

A.

für das monoculare Sehen:

- 1) Die die Accommodationsthätigkeit begleitenden Muskelempfindungen.
- 2) Die Incongruenz zwischen Gesichtswinkel und Drehungswinkel und die darauf beruhenden relativen Lageänderungen:
 - a) bei Veränderungen des Accommodationszustandes,
 - b) bei der Drehung des Auges,
 - c) bei den Bewegungen der Objecte.

B.

für das binoculare Sehen:

- 1) Die der Convergenzthätigkeit des Doppelauges entsprechenden Muskelempfindungen.
- 2) Die Incongruenz der Bilder in beiden Augen und die darauf beruhenden Aenderungen in der Configuration der Doppelbilder:
 - a) bei Aenderungen der Convergenz,
 - b) bei der gemeinschaftlichen Drehung des Doppelauges.
 - c) bei der Bewegung der Objecte.

Es entspricht so jedem primären Hilfsmittel des Doppelauges ein ebensolches beim monocularen Sehen; und das ist nicht etwa nur eine zufällige Uebereinstimmung oder ein künstlich ausgeklügeltes Schema, sondern das liegt in der Natur der Sache, da die Möglichkeiten der Bewegung für das Einzelauge dieselben sind wie für das Doppelauge. Diese Bewegungen können zweierlei Art sein, nämlich:

- erstens: Lageänderung der Theile des Organs zu einander,
- d. i. beim Einzelauge: Accommodationsänderung,
beim Doppelauge: Convergenzänderung;
- zweitens: Lageänderung des Organs im Ganzen,
- d. i. beim monocularen Sehen: Drehung des Auges,
beim binocularen Sehen: Drehung des Doppelauges.

Die in der oben aufgestellten Tabelle unter 1 aufgeführten primären Hilfsmittel der Tiefenvorstellung, die an die Accommodations- und Convergenz-Aenderung geknüpften Muskelempfindungen gehören vorzugsweise dem directen Sehen an; die unter 2 rubricirten dagegen sind Functionen des indirecten Sehens.

Es ist nun eine eigenthümliche Thatsache, dass die Hilfsmittel des Einzelauges bei der binocularen Tiefenwahrnehmung im selben Sinne wirken wie die des Doppelauges und dieses letztere damit bei der Erfüllung seiner Aufgabe wesentlich unterstützen. Dass Accommodation und Convergenz im gleichen Sinne wirken, ist ohne weiteres klar. Dass aber auch die Incongruenz zwischen Gesichtswinkel und Drehungswinkel das ihr entsprechende Hilfsmittel des Doppelauges unterstützt und verstärkt, wollen wir noch in Kürze zeigen.

In Figur 5 sind pp die (der Einfachheit wegen punktförmig gedachten) Pupillen, kk die Knotenpunkte, ff die Punkte des deutlichsten Sehens. Bei der Einstellung der Convergenz und Accommodation auf den Punkt F fallen dessen Bildpunkte auf die Punkte ff und verschmelzen daher zu einem einfachen Bild. Die

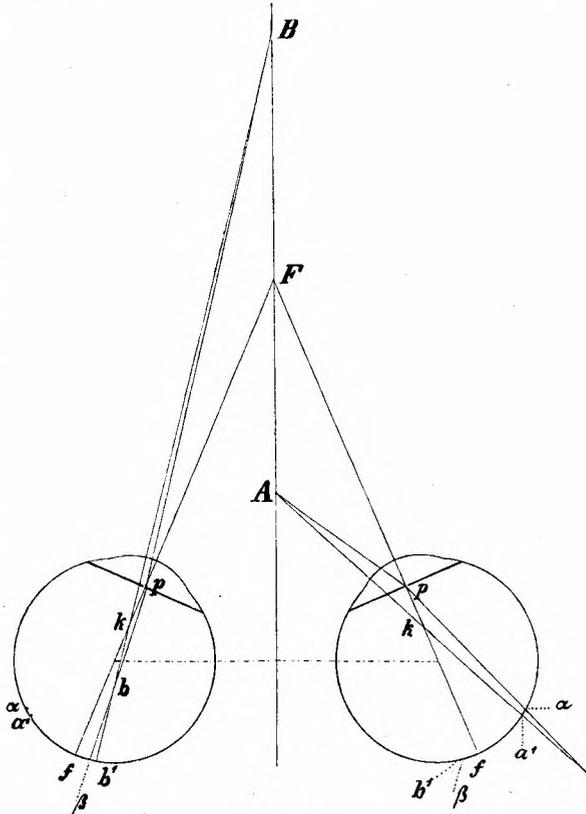


Fig. 5.

Objectpunkte A und B dagegen liefern Doppelbilder und zwar A gekreuzte und B gleichseitige¹⁾. Dem Lauf der Richtungsstrahlen gemäß müssten die Mittelpunkte der Zerstreungskreise dieser Punkte

1) Wundt, *Physiol. Psychol.* 4. Aufl. II. Bd. S. 178.

in a^1 und b^1 liegen. Wegen der excentrischen Lage der Objectpunkte aber fallen die Netzhautprojectionen nach α und β . (In der Figur sind, um Verwirrung zu vermeiden, nur für je eine Seite die Richtungsstrahlen und Visirlinien angegeben.) So wird durch die dargethanen Verhältnisse des indirecten Sehens im Einzelauge bei einem gegebenen Accommodationszustand für näher gelegene Objectpunkte die Bildung der Doppelbilder begünstigt und der Grad ihres Auseinandertretens verstärkt, während für entferntere Objecte eine Hemmung bezw. Verminderung des Effectes stattfindet. In unserer Figur liegen die Netzhautprojectionen α weiter vom Centrum entfernt als die den zu A optisch conjugirten Punkten entsprechenden Netzhautstellen a^1 . Für den entfernteren Punkt B dagegen tritt das Umgekehrte ein: die ihn repräsentirende thatsächliche Netzhautprojection β liegt dem Centrum näher als die durch Richtungsstrahl und conjugirten Punkt b bestimmte Netzhautstelle b^1 .

Ferner: wenn das Doppelauge seinen Convergenzpunkt in größere Ferne verlegt, so treten die Doppelbilder der nahe gelegenen Objecte weiter auseinander, während die der entfernteren Punkte ihren Abstand vom Fixationspunkt vermindern. Bei der Annäherung des Convergenzpunktes tritt das Entgegengesetzte ein. Eine einfache Ueberlegung an der Hand unserer Figur belehrt aber, dass der Effect der Näherung und Entfernung der Accommodationssphäre beim monocularen Sehen ganz im gleichen Sinne verläuft, so dass auch in dieser Beziehung zwischen den primären Hilfsmitteln der Tiefenwahrnehmung im Einzel- und Doppelauge nicht allein kein Widerspruch besteht, sondern vielmehr eine Einrichtung der gegenseitigen Unterstützung und Ergänzung getroffen ist, deren specieller Werth für die Verschmelzung zu einfachen Bildern nicht unterschätzt werden darf.

An dieser Stelle sei mir gestattet, noch zwei Einwänden zu begegnen, die man geneigt sein wird, den obigen Ausführungen entgegenzuhalten. Wenn die dargethanen Verhältnisse des monocularen Sehens für die Tiefenvorstellung von so großer Wichtigkeit sind — so wird man urtheilen —, so müssten wir doch bei dem Betrachten einer Stereoskopie, wo jene Bedingungen für das Einzelaug nicht erfüllt sind, etwas Wesentliches vermissen. Darauf aber ist zu erwidern, dass mit Hülfe der gebräuchlichen zu stereo-

skopischen Zwecken verwandten photographischen Apparate und unter Anwendung des üblichen Prismenstereoskopes nur solche Bilder hergestellt und dem Doppelauge unterbreitet werden können, deren excentrischste Punkte einer Entfernung von 10 bis höchstens 15° vom Fixationspunkt entsprechen, so dass die ganzen Flächen in das gemeinschaftliche Gesichtsfeld fallen, wo die primären Hilfsmittel des Einzelauges doch nur eine untergeordnete und unterstützende Rolle spielen. Uebrigens vermisst der aufmerksame Beobachter allerdings Verschiedenes beim Betrachten selbst der besten stereoskopischen Photographie. Zunächst empfindet man es als einen ungewohnten Zustand, dass das Auge bei dem mit mannigfachen Convergenzänderungen verknüpften Umherblicken der Accommodationsänderung nicht bedarf. Der Zwang, bei den verschiedenen Convergenzstellungen der Augen die Accommodation annähernd constant zu halten, verursacht vielen Leuten, besonders solchen, die selten stereoskopische Bilder betrachten, die unangenehme Empfindung einer großen Anstrengung und raschen Ermüdung des Auges, über deren Ursache sie sich dabei nicht klar zu sein brauchen. Weiter bemerkt man leicht, dass die plastische Wirkung eines stereoskopischen Bildes nicht so weit in die Tiefe reicht als die körperliche Wahrnehmung in der Natur. Das ist aber sehr klar: der photographische Apparat kann zwar das Doppelauge imitiren, nicht aber den Accommodationsmechanismus. Die Doppelbilder allein können natürlich das nicht leisten, was bei der Bethätigung des Gesichtssinnes den räumlichen Objecten gegenüber die Doppelbilder im Verein mit den primären Hilfsmitteln der monocularen Tiefenwahrnehmung vermögen. Uebrigens ist der Schluss, dass etwas nicht vorhanden sei, weil es nicht direct wahrgenommen wird, von vornherein abzuweisen. Sehr viele Menschen mit normaler Tiefenwahrnehmung sind nicht im Stande, ein wirklich stereoskopisches Bild von einer Pseudostereoskopie zu unterscheiden. Solche Pseudostereoskopien erhält man beispielsweise, wenn man zwei ganz gleiche Diapositive wie Stereoskopien, wemöglich etwas ungleich ausgeschnitten, neben einander setzt, durch Bemalen auf der Rückseite oder durch in einer kleinen Entfernung dahinter angebrachte farbige Blenden colorirt und dann unter ungleicher Beleuchtung (d. h. das rechte stärker erhellt als das linke

oder umgekehrt) und im durchfallenden Lichte mittelst des Stereoskops betrachtet. Außerdem kennt Jedermann die oft überraschende Wirkung großer Rundgemälde, bei welchen doch gar keine Bedingungen des stereoskopischen Sehens erfüllt sind.

Der andere Einwand, der erhoben werden könnte, besteht in der Ansicht, dass die Doppelbilder nur in nächster Umgebung des Fixationspunktes einen Werth hätten, im übrigen indirecten Sehen aber nur die schon ohnehin bedeutende Undeutlichkeit vergrößerten. Wo aber die Doppelbilder wirkungslos sind, werden die viel kleineren Abweichungen zwischen Gesichts- und Drehungswinkel erst recht nicht in Betracht kommen. Dieser Einwand ist eigentlich weiter oben schon abgewiesen worden mit der Constatirung der Thatsache, dass auch in peripherischen Theilen des nicht mehr gemeinschaftlichen unteren Gesichtsfeldes noch stereoskopisches Sehen stattfindet. Daneben sei aber noch darauf aufmerksam gemacht, dass die plastische Wirkung einer Stereoskopie nicht verschwindet, wenn man von beiden Bildern umfangreiche Partien an correspondirenden Stellen verdeckt und bei dem Betrachten den Mittelpunkt des verdeckten Bezirks fixirt, so dass nur indirect gesehene Theile zur Geltung gelangen. Lege ich z. B. auf die beiden Theile eines stereoskopischen Straßenbildes (es sind Rechtecke von $7 \times 7\frac{1}{2}$ cm) quadratische Papierstücke von 5 cm Seite, so habe ich beim Fixiren der Mittelpunkte dieser verdeckenden Quadrate und beim Verschmelzen der Bilder in den nicht verdeckten Theilen einen deutlichen stereoskopischen Effect.

Zu der oben aufgestellten Tafel der primären Hilfsmittel der Tiefenvorstellung haben wir noch einige Worte der Erläuterung hinzuzufügen. Es könnte befremden, dass wir unter 2 nicht das Bestehen der Parallaxe selbst als primäres Hilfsmittel aufführen, sondern die auf derselben beruhenden Aenderungen in der Configuration der Netzhautprojectionen, welche an die Veränderungen der räumlichen Beziehungen zwischen dem Einzel- und Doppelpol und den Objecten gebunden sind. Dies aber geschah im Einklang mit der Wundt'schen Lehre von der Bedeutung der Augenbewegungen für die Ausmessung des Sehfeldes¹⁾. Das völlig ruhende

1) Wundt, *Physiol. Psychol.* 4. Aufl. II. Bd. S. 124 ff. und 215 ff.

Doppelauge, welches sich räumlich unveränderlichen Objecten gegenüber befände, hätte absolut keine Veranlassung, die Doppelbilder auf einen Gegenstand zu beziehen. Ebenso wenig bestände für ein in starrer Umgebung befindliches völlig ruhendes Einzelauge der geringste Grund, das durch die Parallaxe zwischen Gesichts- und Drehungswinkel bedingte Nebeneinandersein von Punkten von dem Nebeneinandersein der Punkte einer ophthalmocentrischen Fläche zu unterscheiden. Erst durch die Bewegungen des Auges (Accommodations- und Convergänzänderungen natürlich eingeschlossen) bezw. der Objecte wird eine Handhabe gewonnen zur Unterscheidung der Doppelbilder von den Bildern doppelt vorhandener Gegenstände und des parallaktischen Nebeneinanderseins von dem flächenhaften der Netzhautprojectionen. Das auf die Bewegungen eingeübte Auge benutzt die gewonnenen intensiven Localzeichen dann auch im Zustande der Ruhe¹⁾, so dass selbst bei instantaner Beleuchtung durch den elektrischen Funken²⁾ der stereoskopische Effect wenigstens zum Theil noch erreicht wird. Ob man diese, nur auf Grund vorhergegangener Bewegungen mögliche Benutzung der von der Parallaxe des indirecten Sehens und den Doppelbildern gelieferten Daten seitens des ruhenden Auges streng genommen noch als primäres Hilfsmittel der Tiefenvorstellung aufzufassen hat oder nicht, das ist eine ziemlich bedeutungslose Frage, wenn man bedenkt, dass das »ruhende« Auge praktisch so gut wie gar nicht vorkommt³⁾.

Auf unserer Tafel der primären Hilfsmittel sind unter c auch die Bewegungen der Objecte aufgeführt. Jede Bewegung eines Objectes kann in Bezug auf unsere Gesichtswahrnehmung in zwei Componenten zerlegt werden, eine sphärische und eine polare, von denen selbstverständlich jede auch den Werth Null annehmen kann. Die sphärische, die Verschiebung innerhalb derselben Accommodationssphäre, verursacht die Aenderung der Richtung, in der wir

1) Ebenda, S. 215, und Vorles. über Menschen- und Thierseele. S. 206.

2) Dove, Monatsber. der Berl. Acad. 1841, Helmholtz, Physiol. Optik. S. 739 und C. du Bois-Reymond, Zeitschr. f. Psychol. und Physiol. d. Sinnesorgane Bd. II. Heft 6.

3) C. du Bois-Reymond, a. a. O.

das Object sehen, die polare Componente aber ist die Aenderung der Entfernung vom Auge. Jede Bewegung eines Objectes wird daher, wenn wir das weiter oben über die Relativität zwischen Augen- und Objectbewegungen Gesagte in Betracht ziehen, eine parallaktische Verschiebung der Netzhautprojectionen zur Folge haben, und zwar auch dann, wenn eine der Bewegungscomponenten gleich Null ist. Der Fall, wo von einem bewegten Object und seiner ruhenden Umgebung nur solche Flächen sichtbar sind, welche in derselben Accommodationssphäre liegen, macht, wenn diese letztere eine Kugeloberfläche ist, eine Ausnahme. Auch die sehr weit entfernten Gegenstände, wie die Himmelskörper, sehr entfernte hohe Berge u. s. w. nehmen an dem körperlichen Sehen keinen Antheil mehr, weshalb wir sie auch in der Anschauung trotz bessern Wissens in dieselbe Fläche verlegen. Die Ortsveränderungen des Auges bei der Fortbewegung des eigenen Körpers oder bei der Drehung des Kopfes bilden nur einen speciellen Fall von Objectbewegung, da jede Körperbewegung durch eine entsprechende Bewegung der Umgebung ersetzt gedacht werden kann. Übrigens darf hier nicht vergessen werden, dass sowohl die Bewegungen der Objecte als auch die Augenbewegungen (beispielsweise das Verfolgen der Begrenzungslinien und der für die Linearperspective im gegebenen Falle maßgebenden Richtungen), welche letzteren Brücke sogar die Hauptbedeutung beilegt, auch als secundäre Hilfsmittel der Tiefenvorstellung in Betracht kommen¹⁾.

II.

Fragen wir uns jetzt, welchen Einfluss die Weite und Gestalt der Pupille auf die dargelegten Verhältnisse hat. Wir haben in Figur 4 und 5 schon die Pupille als annähernd punktförmig vorausgesetzt; dies geschah, um einen Fehler zu vermeiden, der in den geläufigen Darstellungen dieses Gegenstandes fast ausnahmslos begangen wird. Es handelt sich dabei um die Visirlinien und die Mitten der Zerstreuungskreise. Die sogen. Zerstreuungskreise sind

1) Wundt, *Physiol. Psychol.* 4. Aufl. II. Bd. S. 200.

nur dann wirkliche Kreise, wenn sie centrisch um die Netzhautmitte zu liegen kommen; in allen anderen Fällen sind sie ellipsenähnliche Projectionen der Pupille auf die von der Netzhaut gebildete krumme Fläche, und ihre Mittelpunkte sind durchaus nicht immer die Projection des Pupillencentrums. In Fig. 6 sind die in Frage kommenden Verhältnisse veranschaulicht, und zwar der Deutlichkeit halber übertrieben. Sind A und B zwei indirect gesehene Punkte, deren Verbindungslinie durch den Mittelpunkt des Hornhautbildes

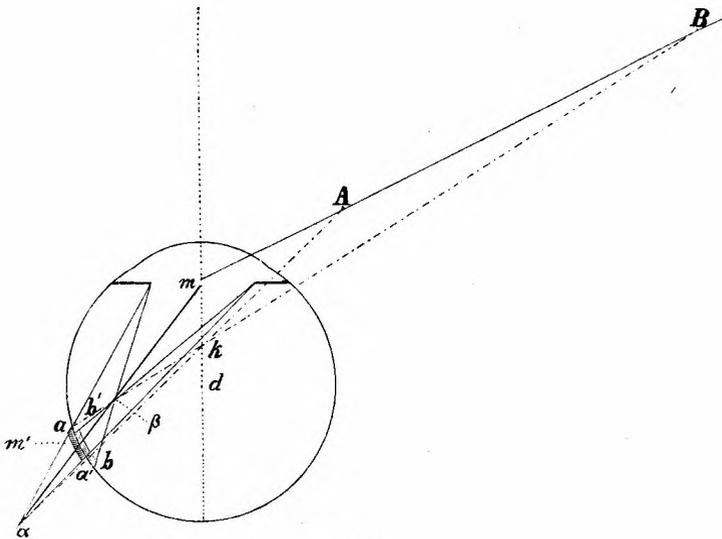


Fig. 6.

der Pupille geht, und ist das Auge für eine Entfernung accommodirt, welche einem zwischen A und B gelegenen Punkt entspricht, so fallen die zu A und B conjugirten Punkte nicht in die Fläche der Netzhaut, sondern der von A hinter dieselbe, etwa nach α , der von B vor die Netzhaut nach β . Jeder dieser Bildpunkte liegt natürlich in dem seinem Objectpunkte zugehörigen Richtungsstrahl. Durch die Größe der Pupille ist die Ausdehnung der Zerstreuungskreise $a a'$ und $b b'$ bestimmt, welche letztere, wie man sieht, sich keineswegs centrisch decken. Wohl aber decken sich die in beiden Zerstreuungskreisen excentrisch gelegenen Projectionen des

Mittelpunktes der Pupille im Punkte m^1 . Diese Deckung ist von der Größe der Pupillenöffnung unabhängig; und daraus folgt, dass sich die Zerstreungskreise der mit dem Pupillarcentrum in einer Geraden (Visirlinie) liegenden Objectpunkte um so vollständiger decken, je kleiner die Pupille ist. Die von Helmholtz¹⁾ über die Deckung der Zerstreungskreise und ihrer Mittelpunkte aufgestellten Sätze sind daher nur für die Hauptvisirlinie richtig. Für das indirecte Sehen dagegen gelten sie nur unter der Voraussetzung einer unendlich kleinen Pupille. Der wirkliche Sachverhalt ist demnach der folgende: Im directen Sehen, d. h. in der Hauptvisirlinie, decken sich alle Zerstreungskreise concentrisch. Im indirecten Sehen dagegen wächst die Abweichung von der centrischen Deckung mit der Ausdehnung der Pupille. Mit anderen Worten: Je enger die Pupille, desto schärfer und exacter werden für das indirecte Sehen die Visirrichtungen. Haben dieselben für die Tiefenwahrnehmung eine Bedeutung, so wird diese bei möglichst kleiner Pupille am besten zur Geltung kommen²⁾.

In Bezug auf die Visirlinien begegnet man häufig einem anderen Irrthume, dessen Klarstellung mir an dieser Stelle angezeigt erscheint. Die von Helmholtz gegebene, weiter oben citirte Darstellung der die Visirlinien und Gesichtswinkel betreffenden Verhältnisse ist vollständig correct, wenn man überall statt »Mittelpunkte der Zerstreungskreise« Projectionen des Pupillencentrums setzt. Die Fassung, die Helmholtz seinem Satze über den Gang eines nach dem Mittelpunkte des Hornhautbildes der Pupille gerichteten Strahles gibt, verleitet jedoch sehr leicht zu dem Irrthume, dass dieser

1) Physiol. Optik. 2. Aufl. S. 127.

2) Man muss sich davor hüten, die Zerstreungskreise und ihre Verschiebungen für so klein zu halten, dass man die erörterten Raumverhältnisse vernachlässigen könne. Die Größe des einem leuchtenden Punkte zugehörigen Zerstreungskreises kann nach Listing (siehe Helmholtz, Physiol. Optik. S. 128) bis auf $\frac{2}{3}$ mm steigen, was im Sehfelde einer Winkelgröße von über $2\frac{1}{2}^\circ$ entspricht. Die Verschiebung eines Punktes auf der Netzhaut um 0,004 mm hat im Sehfelde eine Verschiebung von 1 Bogenminute zur Folge, eine Größe, die noch wahrgenommen werden kann (Wundt, Physiol. Psychol. 3. Aufl. II. Bd. S. 86). Dabei ist noch zu bedenken, dass die Verwerthung der Eindrücke für den Bewegungsmechanismus wahrscheinlich eine genauere ist, als bei der directen Wahrnehmung.

Strahl in seiner ganzen Ausdehnung vom Objectpunkt bis zum Bildpunkt resp. zum Netzhautbild eine gerade Linie sei. (Helmholtz unterstützt diesen Irrthum durch seine Figur 63¹⁾); wenn der Knotenpunkt in der Figur doch einmal angebracht wurde, so hätte auch die Bestimmung der optisch conjugirten Punkte mit Hülfe der Richtungslinien geschehen müssen.)

Betrachten wir die Sachlage etwas genauer. Acceptiren wir zunächst den Satz, dass jedes homocentrische Strahlenbündel, welches in ein centrirtes System brechender Medien mit sphärischen Oberflächen eintritt, auch als homocentrisches Bündel wieder austritt, d. h. dass jedem Objectpunkt in genügender Entfernung vor dem System ein Bildpunkt hinter demselben conjugirt ist. Nun kann man von jedem Objectpunkte nach seinem Bildpunkte durch das System hindurch eine gerade Linie legen. Wenn sich diese Geraden alle in einem Punkte schneiden, so könnte man diesen Punkt den Knotenpunkt nennen. Doch gibt es bekanntlich einen solchen Punkt nicht; wohl aber gibt es in jedem centrirten System zwei Punkte, welche nach der Helmholtz'schen Definition²⁾ so gelegen sind, »dass jeder Strahl, welcher vor der Brechung durch den ersten geht, nach der Brechung durch den zweiten geht und dabei seiner ersten Richtung parallel bleibt«. Diese beiden in der Achse gelegenen Punkte heißen die Knotenpunkte. Wie eine einfache Ueberlegung zeigt, muss die Gerade, welche Object- und Bildpunkt verbindet, die Achse zwischen den beiden Knotenpunkten schneiden. Diese Gerade aber ist der sog. Richtungsstrahl. Alle Richtungsstrahlen schneiden somit die optische Achse zwar nicht in einem Punkte, wohl aber innerhalb der zwischen den Knotenpunkten gelegenen Strecke, welche im menschlichen Auge 0,353 bis 0,399 mm lang ist³⁾. Alle Richtungsstrahlen von Objectpunkten, welche gleiche Winkelentfernung vom Blickpunkt besitzen, schneiden die Achse in demselben Punkte, den wir den dieser Winkelentfernung zugehörigen mittleren Knotenpunkt nennen wollen. Jeder anderen Winkelentfernung

1) *Physiol. Optik.* 2. Aufl. S. 119.

2) Helmholtz, *Ebenda*, S. 68.

3) *Ebenda*, S. 140.

entspricht ein anderer mittlerer Knotenpunkt. Wenn wir in unseren früheren Auseinandersetzungen die Lageunterschiede der mittleren Knotenpunkte vernachlässigten, so geschah dies, wie hier ausdrücklich hervorgehoben werden muss, nicht, weil sie sehr klein sind, sondern weil sie auf die dargelegten Verhältnisse keinen ändernden Einfluss auszuüben vermögen. In Figur 1, welche wir allen Betrachtungen zu Grunde gelegt haben, ist es ganz gleichgültig, ob k ein fester Knotenpunkt ist oder nicht; ja die Figur bleibt auch dann noch richtig, wenn es überhaupt keinen Knotenpunkt gibt. Ist α der conjugirte Punkt von a , so ist die durch beide gelegte Gerade der Richtungsstrahl, und die optischen Bildpunkte anderer dieser Geraden angehörenden Punkte müssen ebenfalls in dieser Linie liegen (sofern wir das Gesetz der Homocentricität des ein- und austretenden Strahlenbündels auf den dioptrischen Apparat des Auges anwenden dürfen; und dazu sind wir im vollsten Maße berechtigt nach den Erfahrungen über die optische Schärfe der Netzhautbilder, die selbst in den peripherischsten Regionen sehr viel schärfer sind, als sie auf Grund der Vertheilung der empfindenden Elemente wahrgenommen werden können). Ob durch den Schnittpunkt k dieses Richtungsstrahles mit der Achse auch noch andere Richtungsstrahlen gehen oder nicht, hat für das Verhalten der Netzhautprojectionen von a , b und c keine Bedeutung.

Wir haben gesehen, dass die Gerade zwischen zwei conjugirten Punkten die Achse des Systemes zwischen den beiden Knotenpunkten schneiden muss. Ein Strahl, der vom Objectpunkt zum Bildpunkt gelangt, ohne den Raum zwischen den beiden Knotenpunkten zu passiren, kann daher unmöglich in seinem ganzen Verlauf eine gerade Linie bilden; er muss eine krumme oder eine gebrochene Linie darstellen. Ein solcher Strahl ist der durch das Centrum der Pupille gehende. Er wird an beiden Begrenzungsflächen der Hornhaut und an beiden Linsenflächen gebrochen und nimmt innerhalb der Linse, wegen der ungleichen Dichte der verschiedenen Schichten¹⁾ derselben, sogar einen gekrümmten Verlauf. Man darf daher die mehrere Male ihre Richtung ändernden, durch den Mittelpunkt der Pupille gehenden Strahlen

1) Helmholtz, Physiol. Optik. 2. Aufl. S. 94.

nicht in ihrem ganzen Verlauf als Visirlinien bezeichnen, sondern vom Objectpunkte aus nur so weit sie gerade sind, d. h. bis zur Hornhaut. Wenn man die Richtungen, die die Strahlen in der Luft haben müssen, um nach ihrer Brechung in der Hornhaut durch die Mitte der wirklichen Pupille zu gehen, hinter der Hornhaut fortsetzt, so schneiden sich dieselben alle in einem Punkte, welcher aus Gründen, deren Erörterung nicht hierher gehört, der Mittelpunkt des Hornhautbildes der Pupille genannt wird. Dieser Punkt ist somit der geometrische (virtuelle) Vereinigungspunkt der Visirlinien, gewöhnlich Kreuzungspunkt der Visirlinien genannt. Dieser letztere Ausdruck sollte jedoch vermieden werden, da er zu leicht die falsche Vorstellung erweckt, dass man die Visirlinien auch hinter jenem Punkte als gerade Linien fortsetzen dürfe. Wir haben in unseren obigen Darlegungen sowohl das Hornhautbild, wie das Linsenbild der Pupille meist nicht berücksichtigt, da die Einführung dieser Factoren die Darstellung erschwert hätte, ohne an dem Wesen der Sache etwas zu ändern¹⁾.

Der Vereinigungspunkt der Visirlinien hat die Eigenschaft, dass alle Winkel, die in ihm ihren Scheitel haben, in constanter Beziehung zu den Bogen der Netzhautmeridiane stehen, d. h. jeder Visirlinie entspricht ein bestimmter Punkt der Netzhautoberfläche und jedem Richtungsunterschied zwischen zwei Visirlinien ein nach Lage und Größe eindeutig bestimmter Bogen eines Netzhautmeridians. Da aber die Richtung, in welcher wir die Dinge im Raume sehen, mit dem Orte der Netzhautbilder ihrer Lage nach gegeben (nicht gemessen) ist, so kann man die Richtungsunterschiede der Visirlinie, die sogen. Seh- oder Gesichtswinkel, ebenso gut als Maßstab für die scheinbare Größe und gegenseitige Winkelentfernung der Objecte nehmen wie die Netzhautbogen. Praktisch weiß das Bewusstsein natürlich weder von Gesichtswinkeln noch von

1) Das Hornhautbild der Pupille ist für das Auge das, was man bei optischen Apparaten die Eintrittspupille des Systems zu nennen pflegt. Das Linsenbild dagegen ist nicht die Austrittspupille des ganzen Systems, sondern nur diejenige des vor dem Glaskörper liegenden Theils. Das Linsenbild liegt nach Listing 0,055 mm, nach Helmholtz 0,113 mm hinter, das Hornhautbild 0,573 mm vor der wirklichen Pupille.

Netzhautbildern etwas bei der Beurtheilung der Größe und Entfernung der Dinge.

Dass die Auffassung des scheinbaren Orts auf Grund der Gesichtswinkel mit der aus den Bewegungen des Auges resultirenden im Widerspruch steht, haben wir oben an der Hand der Figuren 2, 4 und 5 nachgewiesen. Diese Incongruenz zwischen Gesichts- und Drehungswinkel oder, was dasselbe ist, die auf den Vereinigungspunkt der Visirlinien und den Drehungspunkt des Auges bezogene Parallaxe des indirecten Sehens führt einerseits zur Hervorrufung bez. Verstärkung gewisser optischer Täuschungen, anderseits aber, wie wir schon oben zeigten, zu einer gesetzmäßigen Variation der Zuordnung der qualitativen und intensiven Localzeichen. Dieser in gesetzmäßiger Beziehung zur Tiefendimension stehende Wechsel der Zuordnung aber dient unserem Gesichtsinne als Hilfsmittel für die monoculare Tiefenwahrnehmung. Wir wollen nun darzuthun versuchen, dass dieses Hilfsmittel um so exacter functionirt, je kleiner die Pupillenöffnung ist.

Wenn wir bei den durch Fig. 1 veranschaulichten Verhältnissen eine sehr kleine Pupille annehmen, so projiciren sich die Punkte b und c nahezu punktförmig und daher in allen Fällen getrennt von a zu beiden Seiten dieses Punktes auf die Netzhaut. Wenn das Auseinanderfallen dieser Projectionen als Hilfsmittel zur Gewinnung einer Vorstellung über die verschiedenen Tiefenentfernungen der Punkte a , b und c verwandt wird, so kann das natürlich am besten geschehen, wenn die Projectionen möglichst scharf, d. h. punktförmig sind. Diese Bedingung ist aber, wie wir sahen, annähernd nur bei sehr kleiner Pupille erfüllt. Darum werden auch die bei der Aenderung der Accommodation und bei der Drehung des Auges stattfindenden Verschiebungen in der Configuration der Bildpunkte und Zerstreungskreise die schärfsten Daten zur Gewinnung einer Tiefenvorstellung bei möglichst geringer Ausdehnung der Pupille liefern. Ebenso werden im binocularen Sehen die Doppelbilder um so schärfer und ihre Ortsveränderungen bei der Aenderung der Convergence und bei der Drehung des Doppelauges um so distincter ausfallen, je kleiner die Pupille ist. Da nun aber die Verengerung der Pupille nothwendig eine Verminderung der Lichtstärke der Netzhautbilder zur Folge hat, so sind der Mitwirkung der Pupillar-

contraction Grenzen geboten, und es ist die Aufgabe des Contractions- und Dilatationsmechanismus, in jedem gegebenen Falle diejenige Combination von Lichtstärke und Schärfe der Bilder des indirecten Sehens zu wählen, welche von allen möglichen Combinationen die zur Erreichung der jeweiligen Zwecke günstigste ist.

Demnach lassen sich die Wirkungen der Verengung der Pupille folgendermaßen zusammenfassen:

- 1) Abschwächung der Lichtstärke,
- 2) Verminderung der Ausdehnung der Zerstreuungskreise,
- 3) Verminderung der Ungenauigkeit in der Deckung der derselben Visirlinie angehörigen Netzhautprojectionen; d. i. schärfere Ausprägung der Visirlinien des indirecten Sehens.
- 4) Verminderte Möglichkeit der 'partiellen Deckung der zu verschiedenen Visirlinien gehörenden Zerstreuungskreise.
- 5) Größere Deutlichkeit der bei Accommodationsänderungen und Drehungen des Auges stattfindenden Veränderungen in den gegenseitigen Lageverhältnissen der Netzhautprojectionen.
- 6) Größere Deutlichkeit der Doppelbilder und der bei Convergencbewegungen und Drehungen des Doppelauges stattfindenden Aenderungen der Lageverhältnisse derselben.

Aus diesen Wirkungen der Pupillarcontraction erklärt es sich dann auch, warum beim Nahesehen stets eine Verengung, beim Fernsehen eine Erweiterung der Pupille eintritt¹⁾. Wenn es sich hierbei bloß um Regulirung der Lichtzufuhr handelte, so wäre dieses Verhalten des Pupillarmechanismus ganz unverständlich; ja, man sollte, da mit dem Fernsehen naturgemäß meist eine Hebung der Gesichtslinie²⁾ und damit in den meisten Fällen eine Vermehrung der Summe des in das Auge gelangenden Lichtes verbunden ist, eher das Gegentheil, also beim Nahesehen eine Erweiterung, beim Fernsehen eine Contraction, erwarten. Geschieht aber der Pupillarreflex im Interesse der Tiefenwahrnehmung, so erklären sich die Dinge ganz ungezwungen. Beim Nahesehen ist ein deutliches stereoskopisches Sehen und damit eine möglichst genaue Beurtheilung der Entfernung, und zwar auch im indirecten Sehen,

1) Helmholtz, Physiol. Optik. 2. Aufl. S. 130.

2) Wundt, Physiol. Psychol. 4. Aufl. II. Bd. S. 141.

gefordert. Je größer die Genauigkeit in der Auffassung der Richtung und Entfernung indirect gesehener Gegenstände, desto exacter auch die Ausführung unserer in irgend einem Zusammenhang mit diesen Gegenständen stehenden Körperbewegungen. Die Leistungsfähigkeit der primären Hülfsmittel der monocularen und binocularen Tiefenwahrnehmung (erstere wegen der geringen Ausdehnung des unteren Theils des gemeinschaftlichen Gesichtsfeldes bei der Accommodation für größere Nähe besonders wichtig) wird aber durch Verengerung der Pupille, wie wir sahen, wesentlich verstärkt. Auch die übrigen, die Accommodation für die Nähe begleitenden Aenderungen in der Beschaffenheit des dioptrischen Apparates¹⁾, wie das Verschieben des Pupillarrandes der Iris, stärkere Wölbung der Linsenflächen, tragen, indem dadurch die Entfernung zwischen Knotenpunkt und Pupillarcentrum vergrößert wird, dazu bei, die Daten für die Gewinnung einer monocularen Tiefenwahrnehmung schärfer zu gestalten. Bei der Accommodation für die Ferne dagegen ist das Auge für alle hinter dem Fernpunkt gelegenen Gegenstände gleich scharf eingestellt, und die Möglichkeit eines stereoskopischen Sehens fällt für die größeren Entfernungen weg. Von den Dingen, deren Betrachtung uns beim Fernsehen obliegt, gibt es keine Zerstreungskreise, und die Parallaxe des indirecten Sehens ist annähernd gleich Null. Die uns näher gelegenen Gegenstände des indirecten Sehens werden uns dabei am wenigsten stören, am wenigsten unsere Aufmerksamkeit ablenken, wenn sie hinsichtlich der Lageverhältnisse ihrer Doppelbilder und Zerstreungskreise möglichst undeutlich gesehen werden. Dies aber wird erreicht durch Erweiterung der Pupille.

An dieser Stelle sei noch bemerkt, dass unsere Theorie mit anderen Zwecken dienenden experimentellen Untersuchungen anderer Autoren in bestem Einklang steht. So erklärt sich z. B. die von Aubert und Förster gemachte Beobachtung, dass kleine Objecte auf der seitlichen Netzhaut deutlicher erkannt werden, als entsprechend entfernte größere von gleichem Gesichtswinkel²⁾, ganz einfach aus der größeren Deutlichkeit des indirecten Sehens, die beim

1) Helmholtz, *Physiol. Optik.* 2. Aufl. S. 131 ff.

2) Aubert, *Grundzüge der physiol. Optik.* S. 587 f.

Nahesehen durch die Verengerung der Pupille hervorgerufen wird. (Aubert hält eine Verrückung in der Lage der Stäbchen und Zapfen, welche durch eine mit der Accommodation verbundene Verschiebung der Chorioidea herbeigeführt werde, für die Ursache der Erscheinung.) Götz Martius¹⁾ hat in seiner Abhandlung über die scheinbare Größe der Gegenstände und ihre Beziehung zur Größe der Netzhautbilder experimentell dargethan, dass von zwei ungleich entfernten Größen innerhalb einer Entfernung von $5\frac{1}{4}$ m vom Auge die entferntere im Vergleich zur näheren stets etwas unterschätzt wird. Dieses Resultat aber entspricht vollkommen den Consequenzen, die man aus den parallaktischen Verhältnissen des indirecten Sehens zu ziehen hat. Die Richtung, in welche wir die Objectpunkte verlegen, ist abhängig von der Größe des Gesichtswinkels; die scheinbare Distanz der Punkte aber von der Größe des Drehungswinkels, welcher vom Auge zurückgelegt werden muss, um die Punkte nach einander nach dem Blickpunkt überzuführen. Besteht nun zwischen diesen beiden Winkelgrößen ein Widerspruch, so muss sich derselbe in einer veränderten Größenauffassung äußern. Nun ist aber dieser Widerspruch für Entfernungen, wie sie Götz Martius seinen Experimenten zu Grunde legte, ein ganz beträchtlicher. Ich habe für seine Hauptversuchsreihe²⁾, in welcher die Entfernung des Normalstabes 50 cm, die des Vergleichsstabes 5,25 m und die Länge des Normalstabes 20, bez. 50 und 100 cm betrug, die Größe der Abweichung zwischen Gesichtswinkel und Drehungswinkel trigonometrisch berechnet, wobei die Distanz zwischen Drehpunkt des Auges und Hornhautbild der Pupille zu 9 mm angenommen wurde. Die nachstehende kleine Tabelle enthält die berechneten Winkelgrößen.

Größe des Normalstabes	Größe der Abweichung zwischen Drehungswinkel und Gesichtswinkel		Differenz zwischen a) und b)
	a) für den Normalstab	b) für den Vergleichstab	
20 cm	0° 23' 24"	0° 0' 13 $\frac{1}{3}$ "	0° 23' 10 $\frac{2}{3}$ "
50 cm	0° 48' 48"	0° 0' 34"	0° 48' 14"
100 cm	1° 2' 26"	0° 1' 8"	1° 1' 18"

1) Phil. Stud. V, S. 601 ff.

2) Siehe die oben citirte Arbeit, S. 607.

Man sieht, die Differenzen der Parallaxen für Normal- und Vergleichsstab sinken in unserem Falle nur wenig unter $\frac{1}{2}^{\circ}$ (= eine Vollmondbreite im Sehfeld) und steigen andererseits bis über 1° (zwei Vollmondbreiten). Das sind aber Größen, welche in einem Organ, das noch Ortsdifferenzen im Sehfelde von $\frac{1}{2}$ Winkelminute¹⁾ und weniger²⁾ wahrzunehmen im Stande ist, unmöglich unberücksichtigt bleiben können. Von Objecten, die denselben Drehungswinkel erfordern, hat aber das entferntere den kleineren Gesichtswinkel. Da nun der Gesichtswinkel, wenn auch nicht der einzige, so doch der wichtigste maßgebende Factor bei der Größenauffassung ist, so muss das entferntere Object nothwendig unterschätzt werden. Die Resultate der Martius'schen Versuche sind daher wenigstens zum Theil auf den Einfluss der Parallaxe des indirecten Sehens zurückzuführen.

Wenn nun unsere Theorie richtig ist, so haben die beiden Formen der Pupillarreaction, diejenige auf Veränderung der Lichtstärke und die bei Aenderung der Accommodation und Convergenz, ursprünglich nichts mit einander zu schaffen. Die erstere ist, soweit sie als Schutzmittel gegen überflüssige Lichtstärke dient, ein angeborener Reflexmechanismus; die letztere dagegen muss als eine auf dem Wege der individuellen Anpassung erworbene, übrigens ebenfalls reflectorisch arbeitende Function des Gesichtssinnes betrachtet werden. Es ist daher zu vermuthen, dass die Reaction auf Convergenz und Accommodationsänderungen in der ersten Zeit der Bethätigung des Gesichtssinnes (wo diese Änderungen nur zufällige sein können) noch nicht ausgebildet ist. Thatsächlich ist von Professor Raehlmann in Dorpat nachgewiesen worden³⁾, dass bei Neugeborenen die Pupille sofort auf Veränderung der Lichtstärke reagirt, dass aber in den ersten Lebenswochen, wo noch keine geregelte Bethätigung des Bewegungsmechanismus des Auges stattfindet, die Verengerung der Pupille bei den zufällig vorkommenden Convergenzbewegungen nicht eintritt. Ebenso constatirt der ge-

1) Wundt, *Physiol. Psychol.* 4. Aufl. II. Bd. S. 100.

2) Aubert, *Grundzüge d. physiol. Optik.* S. 580. Tab. XXIII.

3) E. Raehlmann, *Physiol.-psychol. Studien über die Entwicklung der Gesichtswahrnehmungen bei Kindern und bei operirten Blindgeborenen.* *Zeitschr. für Psychol. und Physiol. der Sinnesorgane.* Bd. II. S. 61.

nannte Autor, dass bei einem beiderseits mit Katarakt behafteten Blindgeborenen¹⁾, welcher jedoch Licht und Farben wahrnimmt, auch die Richtung, aus der sie kommen, annähernd erkennt, die Pupillen auf Licht, nicht aber auf Convergenzbewegungen reagiren.

III.

Hinsichtlich der Form der Pupille erhellt aus den obigen Betrachtungen, dass für ein Auge, welches der Aufgabe, neben der deutlichen Wahrnehmung der Gestalt der Gegenstände auch eine möglichst brauchbare und genaue Tiefenvorstellung zu vermitteln, für alle Meridiane des Sehfeldes in gleicher Weise gerecht werden soll, unbedingt die kreisförmige Pupille geboten ist, da jede Abweichung von derselben Verzerrungen in der Configuration der Netzhautbilder und eine ungleichmäßige Verwerthung der primären Hilfsmittel der Tiefenwahrnehmung zur Folge haben muss. Für ein Auge dagegen, welches aus irgend einem Grunde eine bestimmte Meridianrichtung bevorzugt, d. h. in ihr eine besonders genaue Tiefenauffassung verlangt, während die übrigen Meridiane in dieser Beziehung an Wichtigkeit zurücktreten, so dass für diese Richtungen kleine Ungenauigkeiten in der Wahrnehmung von Formen und Entfernungen mehr oder minder belanglos sind, ist der in allen Fällen erhalten bleibende Kreis nicht mehr die günstigste Form der Pupille. Für ein solches Auge würde, da die durch Verkleinerung der Pupille angestrebten Vortheile stets nur auf Kosten der Helligkeit erreicht werden können, eine kreisförmig contractile Pupille eine unnütze Lichtvergeudung bedeuten. Da Deutlichkeit der Doppelbilder, geringe Ausdehnung der Zerstreungskreise und scharfe Distinction der Visirlinien in dem angenommenen Falle nur für eine Richtung besonderen Werth haben, für die übrigen Meridiane dagegen mehr oder minder irrelevant sind, so werden die gestellten Anforderungen für jene besonders in Betracht kommende Richtung dann am genauesten und unter geringstem Helligkeitsverlust erfüllt sein, wenn die Contraction der bei größter Oeffnung kreisförmigen

1) Zeitschr. für Psychol. und Physiol. der Sinnesorgane. Bd. II. S. 73.

Pupille nur in der Richtung des bevorzugten Meridianes selbst erfolgt. Ist die bezüglich der Tiefenwahrnehmung bevorzugte Meridianebene die Horizontalebene des Auges, so ist eine senkrechte spaltförmige Pupille die leistungsfähigste.

Ein solches Auge, in welchem hinsichtlich der geforderten Leistungsfähigkeit der Sehschärfe und Tiefenwahrnehmung die verschiedenen Meridiane keineswegs gleichwerthig sind, ist nun das Auge der Katze. Die Katze erhascht ihre Beute im Sprunge; die Thiere, die sie jagt, sind meist hurtige kleine Wesen, die sich beim Laufen und Springen nur wenige Centimeter über den Boden erheben¹⁾. Da sie beim Lauern den Kopf ganz auf den Boden zu ducken pflegt, so liegen die Augen annähernd in derselben Ebene mit den Dingen, deren Bewegungen sie verfolgen. Das indirecte Sehen ist dabei von besonderer Wichtigkeit, da das Auge auch die geringsten Ortsveränderungen der Dinge der Umgebung wahrnehmen muss, auch wenn sie nicht in der unmittelbaren Nähe des Blickpunktes vor sich gehen. Der Sprung auf die Beute muss häufig auf die leiseste Bewegung im indirecten Gesichtsfeld hin geschehen; eine möglichst genaue Auffassung der Richtung und Entfernung muss auch ohne Ueberführung des Eindrucks in den Blickpunkt stattfinden können. Ob dabei die oberhalb und unterhalb der Horizontalebene gesehenen Dinge hinsichtlich Gestalt und verticaler Entfernung vom Blickpunkt (die horizontale Entfernung wird natürlich auch an diesen genau erkannt) undeutlich wahrgenommen werden, ist, da der Sprung stets in der verticalen Richtung erfolgt, ganz belanglos. Es concentrirt sich somit bei der Katze das Hauptinteresse an einer deutlichen Wahrnehmung und einer eindeutigen, möglichst exacten räumlichen Localisirung auf die Horizontalebene des Auges. Durch die spaltförmige Pupille aber wird erreicht, dass unter Erhaltung der relativ größtmöglichen Lichtintensität der Netzhautbilder für die Orts- und Tiefenwahrnehmung in der Richtung des bevorzugten Meridians die exactesten Daten geliefert werden. Mit anderen Worten: die die Richtung und Entfernung, in welcher das Object gesehen wird,

1) Auch wenn die Katze einen Vogel jagt, sucht sie ihn meistens am Boden zu erhaschen; ihre Bemühungen, den Vogel beim Vorbeifliegen oder beim Auf-fliegen noch zu fangen, fallen meist sehr ungeschickt und erfolglos aus.

betreffenden möglichen Fehler der Auffassung, welche bei der Ausführung der entsprechenden Bewegung einen Fehlgriff veranlassen könnten, sind durch die Einrichtung der spaltförmigen Pupille für den Horizontalmeridian des Auges und die ihm parallelen Richtungen auf ein Minimum reducirt. Jeder Punkt im Sehfeld kann auf Grund der durch Größe und Gestalt der Pupille bedingten Ungenauigkeit der Ortsverhältnisse der Zerstreungskreise eine fehlerhafte Localisation erfahren. Dieser Localisationsfehler besteht aus zwei Theilen, dem Fehler in der Schätzung der Entfernung, welchen wir den polaren, und dem in der Auffassung der Richtung, den wir den sphärischen Fehler nennen wollen. Letzterer kann wieder in zwei (übrigens ganz willkürlich gewählte) Componenten zerlegt werden, eine verticale und eine horizontale. Die Einrichtung des Katzenauges ist nun eine solche, dass bei linearer Pupille der polare Fehler überhaupt, von dem sphärischen aber die horizontale Componente gleich Null wird; und dies gilt für alle Punkte des Sehfeldes. Das sind aber gerade diejenigen Theile des Fehlers, die für die Bewegungen der Katze hauptsächlich in Betracht kommen. Hierbei ist noch besonders zu beachten, dass bei der Katze wegen der weiter vorspringenden unteren Gesichtstheile das gemeinschaftliche Gesichtsfeld in seinen unteren Partien noch mehr eingeschränkt ist als beim Menschen, so dass hier die monoculare Tiefenwahrnehmung noch in höherem Maße in Betracht kommt.

Ferner ist zu beachten, dass die große Beweglichkeit des Halses der Katze gestattet, in den Fällen, wo die Bewegung des verfolgten Thieres in einer ungünstigen Richtung geschieht, diese letztere durch Drehung des Kopfes mit der Richtung der günstigsten Tiefenwahrnehmung in Einklang zu bringen. Als ich auf dem Lande lebte, hatte ich eine Katze, welche großes Vergnügen daran fand, auf dem Fenster zu sitzen und den Flug der Tauben, Schwalben und Sperlinge zu verfolgen. Dabei konnte ich unzählige Male beobachten, dass sie, wenn die Bewegung des vorbeifliegenden Vogels nicht in horizontaler Richtung geschah, den Kopf schief hielt, und zwar so, dass die Flugrichtung annähernd in die Hauptvisirebene fallen und sich daher senkrecht zum Pupillenspalt projeciren musste. Dasselbe konnte ich übrigens beobachten, wenn ich das Thier mit einem an einem Faden aufgehängten und in weiten Schwingungen

pendelnden Gegenstand spielen ließ. Ich wusste damals keine Erklärung für dieses Verhalten, über dessen Bedeutung nach den obigen Ausführungen wohl kaum ein Zweifel bestehen kann.

Dass die Tiefenvorstellung bei den Gesichtswahrnehmungen der Katze eine bedeutende Rolle spielt, lässt sich auch daraus erkennen, dass diese Thiere gemalten Bildern gar keine Beachtung schenken. Die erwähnte Katze, übrigens ein besonders intelligentes Thier, würdigte das Bild einer Katze, sowie andere ihr vorgehaltene Thierbilder (Farbendruck auf dunklem Grund) keines Blickes, während sie ein kleines Kätzchen aus Papier maché und einen Tintenschwamm in Form eines schwarzen Pudels, mit zwei Glasperlen als Augen, zuerst offenbar für Thiere ansah, wie aus der Art, wie sie dieselben betrachtete, anfasste und wie sie damit spielte, zu erkennen war. Interessant war ihr Benehmen, als ihr zum ersten Male ein Spiegel vorgehalten wurde. Nach einigen vergeblichen Versuchen in spielender Weise nach der vermeintlichen Katze zu schlagen und sie zu beißen, mochte sie sich wohl auf das ihr bekannte Verhalten der Dinge hinter einer Fensterscheibe erinnern haben; sie machte einen raschen Sprung hinter den Spiegel und war sichtlich verwirrt, als sie dort nichts fand¹⁾. Als ich den Spiegel vor ihr her fortbewegte, verfolgte sie die scheinbar rückwärts entfliehende Katze eifrigst, wobei ihr das Mitbewegen der übrigen im Spiegel gesehenen Dinge anscheinend sehr überraschend war. Es bedurfte vieler übrigens sehr spaßhafter Versuche, bis sie gelernt hatte, dass ihr Bild im Spiegel kein wirkliches Thier war, und dass sich dasselbe nur dann bewegte, wenn sie es selber that. Warum hat nun die Katze den gemalten Thierbildern auch nicht die geringste Beachtung geschenkt? Warum erweckten in ihr die gemalten Thierbilder nicht die Vorstellung der wirklichen Thiere? Einfach deshalb, weil zu der Vorstellung der wirklichen Thiere für das Seelenleben der Katze nothwendigerweise die Tiefenwahrnehmung gehört. Das flächenhafte Bild hat, obgleich seine Umrisse und Einzelheiten percipirt werden, wegen der mangelnden Tiefenausdehnung keine

1) Ein Verhalten, welches demjenigen des operirten Blindgeborenen, von dem Raehlmann berichtet, sehr ähnlich ist. Siehe E. Raehlmann, a. a. O. S. 84.

Aehnlichkeit mit dem entsprechenden körperlichen Dinge. Wir Menschen sind durch eine Jahrtausende bestehende Cultur und Kunsttradition geradezu darauf abgerichtet, aus ebenen Projectionen auf die körperlichen Formen der dargestellten Dinge zu schließen und dabei die Abweichungen dieser Darstellungen von der Wirklichkeit zu ignoriren. Bei der Katze besteht dieses Symbolsystem der geradlinigen und krummlinigen Figuren, der hellen und dunklen, colorirten und farblosen Flächen nicht. Dies mag einen Mangel der associativen Verwerthung der Gesichtswahrnehmung bedeuten; aber ein directer Fehler des Gesichtssinnes ist es nicht. Im Gegentheil, es ist zu vermuthen, dass die Tiefenwahrnehmung (besonders für die nächste Umgebung) bei der Katze mindestens ebenso scharf entwickelt ist, wie bei uns, dass aber wegen der verminderten Associationsfähigkeit der Mangel der Tiefenwahrnehmung (bei flächenhaften Bildern und bei den in großer Ferne befindlichen Gegenständen) weit störender ins Gewicht fällt.

An dieser Stelle sei bemerkt, dass die vorstehenden Erörterungen einer die Psychologie des Gesichtssinnes betreffenden Frage mit dem philosophischen Problem der Raumschauung und dem Werthe der Tiefendimension für dieselbe nichts zu schaffen haben. Im Bezug auf die psychologische Entstehung der Raumschauung des Gesichtssinnes stehen die vorliegenden Darlegungen ganz und gar auf dem Boden der Wundt'schen Ansicht¹⁾, dass das subjective Gesichtsfeld, auch das binoculare, jederzeit ein flächenhaftes sei, obgleich diese Fläche die wechselndste und complicirteste Gestaltung besitzen kann. Die Tiefenauffassung resultirt aus dem Widerspruch zwischen den, den verschiedenen Zeitpunkten entsprechenden, verschiedenen Gestaltungen des Gesichtsfeldes (auch des monocularen, wie wir nachzuweisen versucht haben).

Man hat vielfach behauptet, die spaltförmigen Pupillen seien eine Einrichtung zu dem Zwecke, um den Nachtraubthieren in der Dunkelheit möglichst weitgehende Benutzung des Lichtes, in der Tageshelle dagegen Ausschluss bis auf ein Minimum zu gestatten. Dieser Zweck wird aber nur nebenbei erreicht und ist nicht maßgebend für die Gestalt der Pupille. Es ist gar nicht einzusehen,

1) Wundt, *Physiol. Psychol.* 4. Aufl. II. Bd. S. 199.

warum eine große kreisförmige und unter Erhaltung dieser Form bis auf eine minimale Oeffnung zusammenziehbare Pupille nicht eben so gute Dienste leisten sollte, oder gar bessere, da ein Spalt von geringer Oeffnung immer noch mehr Licht durchlässt als ein kreisförmiges Loch von gleichem Durchmesser. Und falls man bewiesen hätte, dass der Spaltform bei der Regulirung der Lichtzufuhr der Vorzug zuzuerkennen sei, so bliebe doch immer noch zu erklären, warum der Spalt gerade eine senkrechte Richtung hat. Außerdem drängen sich die Fragen auf: Ist denn die Katze wirklich ein ausschließlich nächtliches Raubthier und haben auch alle andern Nachtraubthiere spaltförmige Pupillen?

Wenn aber die spaltförmige Pupille das Resultat einer Anpassung an die durch die Lebensbedingungen der betreffenden Thiere dem Gesichtssinne derselben gestellten Aufgaben ist, dann wird man im Voraus vermuthen dürfen, dass diese Eigenschaft kein constantes Merkmal der Klasse, ja nicht einmal der Familie sein wird. Weiter wird man, falls die in dieser Abhandlung dargelegte Theorie richtig ist, folgern können, dass nur verhältnissmäßig kleine Thiere, und solche, die beim Lauern auf Beute und beim Verfolgen derselben den Kopf auf den Boden ducken, spaltförmige Pupillen besitzen. Für große Thiere oder solche, die den Kopf hoch tragen, ebenso für solche, die auf Bäumen leben und dort ihre Nahrung suchen, haben spaltförmige Pupillen keinen Werth. Thatsächlich finden wir diese eigenthümliche Einrichtung des optischen Apparates nicht einmal bei sämtlichen Arten der Katzenfamilie. Der erhobenen Hauptes einherschreitende Löwe, der übrigens genau so gut wie die Hauskatze ein Nachtthier ist, hat große runde Pupillen; der Tiger, der nächste und mächtige Verwandte unseres zierlichen Hauskätzchens, hat, wenn ich recht gesehen habe, ein Zwischending zwischen runden und spaltförmigen, nämlich ovale Pupillen. Spaltförmige Pupillen finden wir ferner beim Fuchs und, wenn ich mich nicht irre, bei einigen Nagern, deren Lebensweise ihnen ein Verlassen des Bodens oder der Wasseroberfläche verbietet, wie z. B. dem Bieher, dessen nächste Verwandte, die auf Bäumen lebenden Eichhörnchen, wieder runde Pupillen besitzen. Meine mangelhafte Kenntniss der speciellen Zoologie gestattet mir nicht, weitere Beispiele anzuführen. Ebenso ist mir nicht bekannt, in wie

weit andere von der Kreisform abweichende oder auch spaltförmige aber nicht senkrechte Pupillen in der Thierwelt vorkommen.

In den vorstehenden Darlegungen über die primären Hilfsmittel der monocularen Tiefenwahrnehmung wurden gewisse Eigenthümlichkeiten, die unserem Sehorgane, wie jedem optischen Apparat, in mehr oder minder beträchtlichem Grade anhaften werden, nicht berücksichtigt. Es bleibt mir noch übrig, dieselben namhaft zu machen und die Gründe für ihre Vernachlässigung anzugeben.

- 1) Die Abweichung der Gestalt der Netzhaut von einer Kugelfläche. Es ist klar, dass die erörterten Verhältnisse der Netzhautprojectionen von der Gestalt der Auffangefläche unabhängig sind; so dass selbst eine bei der Accommodationsänderung etwa eintretende Aenderung in der Krümmung der Netzhautfläche keinen wesentlichen Einfluss haben könnte.
- 2) Die Ungenauigkeiten in der Centrirung der dioptrischen Apparate des Auges (Linse, Diaphragma etc.), in Folge deren die Knotenpunkte, der Drehpunkt, der Mittelpunkt der Pupille und der Hornhautscheitel nicht ganz genau in eine gerade Linie fallen. Dieser Fehler kann in so fern einen Einfluss haben, als er eine ungleichmäßige Betheiligung der verschiedenen Meridiane an den Aufgaben der Gewinnung einer Tiefenauffassung herbeizuführen im Stande ist. Eine solche Ungleichmäßigkeit, wie sie z. B. durch die nicht ganz übereinstimmende Richtung der Hornhaut- und Linsenaxe ¹⁾ herbeigeführt werden mag, muss aber nicht nothwendig als ein Mangel betrachtet werden; sie kann eben so gut einem bestimmten Zwecke dienen, d. h. in einem bestimmten Sinne als Hilfsmittel der Tiefenwahrnehmung verwendet werden.
- 3) Die Abweichung der brechenden Flächen des Auges von denjenigen eines aplanatischen Systems.
 - a) Die Abweichung der Begrenzungsflächen der brechenden Medien von den speciellen Rotationsflächen, welche Bedingungen sind für die Gültigkeit des Gesetzes der Erhaltung der Homocentricität ²⁾;

1) Helmholtz, Physiol. Optik, 2. Aufl. S. 104.

2) Ebenda, S. 169.

b) Die Abweichung der Begrenzungsflächen der brechenden Medien von Rotationsflächen überhaupt.

Der unter a) aufgeführte Fehler muss, wie man aus der Schärfe der Gesichtswahrnehmung und der objectiven Genauigkeit der Netzhautbilder schließen darf, außerordentlich gering sein. Es ist dies, wie Fick¹⁾ gezeigt hat, der sehr zweckmäßigen Anordnung der Krümmung, Schichtung und Lage der Linse zu danken, in Folge deren die Netzhautfläche stets annähernd mit der hinteren Brennlinie zusammenfällt. Da die letztere um so weniger störend wirkt, je weiter der Objectpunkt vom Fixationspunkt entfernt ist, so kann man das Auge als annähernd »periskopisch« betrachten. Es sei hier noch darauf aufmerksam gemacht, dass die Annäherung an die vollkommene Homocentricität um so größer wird, je geringer die Ausdehnung der Pupille ist, und dass bei spaltförmiger Pupille der Fehler, soweit es die horizontale Richtung anbelangt, auf ein Minimum reducirt ist.

Auch die unter b) genannte Abweichung ist sicherlich nicht ohne Bedeutung. Der auf ihr beruhende Astigmatismus ist gewiss im Stande, die primären Hilfsmittel der monocularen Tiefenwahrnehmung in der einen oder anderen Meridianrichtung hemmend oder fördernd zu beeinflussen, und mag auch in einzelnen Fällen als constanter Factor in das System der Hilfsmittel eingeordnet sein. Die Bedeutung jedoch, die ihm Löb²⁾ für das monoculare Tiefensehen beilegt, kann dem Astigmatismus auf keinen Fall zuerkannt werden.

Die Resultate der vorstehenden Untersuchung lassen sich in folgende Sätze zusammenfassen:

1) Die Parallaxe des indirecten Sehens, d. h. die Incongruenz zwischen Gesichts- und Drehungswinkel des Auges, ist von erheblicher Größe und bewirkt bei Accommodationsänderungen und Bewegungen des Auges (bezw. der Objecte) Veränderungen in den relativen Lageverhältnissen der Netzhautprojectionen.

2) Diese Verschiebungen in der Lage der Netzhautbilder und

1) Fick in Hermann's Handbuch der Physiologie. Bd. III. S. 77 ff.

2) Pflüger's Archiv, Bd. 41 (1887), S. 371 und 372. Wenn die Auffassung Löb's richtig wäre, müsste die Correctur der astigmatischen Fehler durch entsprechende Gläser der Tiefenwahrnehmung hinderlich sein.

Zerstreuungskreise stehen in eindeutiger und ganz gesetzmäßiger Beziehung zur Tiefendimension und werden wahrscheinlich vom Gesichtssinne als Hilfsmittel zur Gewinnung einer monocularen Tiefenwahrnehmung verwandt.

3) Vom Standpunkt der Theorie der complexen Localzeichen aus betrachtet, bedeutet das einen Wechsel in der Zuordnung der qualitativen und intensiven Localzeichen zu einander, welche Variation man eventuell als ein drittes, an die Tiefendimension gebundenes Localzeichensystem ansehen kann.

4) Die monoculare Tiefenwahrnehmung hat wegen der beschränkten Ausdehnung des gemeinschaftlichen Gesichtsfeldes in den unteren Theilen des Gesamtsehraums eine hohe Bedeutung.

5) Die Parallaxe des indirecten Sehens wirkt im selben Sinne wie die Parallaxe des Doppelauges und unterstützt daher dieses letztere bei der Erfüllung seiner Aufgabe.

6) Die den Punkten einer Visirlinie entsprechenden Zerstreuungskreise sind nur für die Hauptvisirlinie wirkliche, concentrisch sich deckende Kreise. Für alle übrigen Visirlinien bilden sie linear angeordnete Systeme von nur theilweise sich deckenden ellipsenartigen Flächen.

7) Die Abweichung von der concentrischen Deckung der einer Visirlinie des indirecten Sehens zugehörigen Zerstreuungskreise wird um so geringer, je kleiner die Pupille ist. Bei unendlich kleiner Pupille projeciren sich alle Visirlinien als Punkte auf die Netzhaut. Bei Verengerung der Pupille findet daher eine Erhöhung des Werthes der Visirrichtungen für das indirecte Sehen statt.

8) Bei der Verengerung der Pupille werden, wegen des schärferen Auseandertretens der Netzhautprojectionen, die parallaktischen Verhältnisse sowohl des indirecten Sehens wie des Doppelauges deutlicher. Es unterstützt somit die Contraction der Pupille die genannten primären Hilfsmittel der monocularen und binocularen Tiefenwahrnehmung.

9) Von diesen Gesichtspunkten aus erklären sich zwei Erscheinungen leicht und ungezwungen:

- a) die Pupillarreaction bei Accommodations- und Convergänzänderungen;
- b) die Einrichtung der spaltförmigen Pupillen in den Augen gewisser Thiere.

Nachtrag zu S. 465.

Die Berechnung der Parallaxe des indirecten Sehens geschieht am besten an der Hand der beistehenden Figur 7. Es sei D der Drehpunkt des Auges, M der Mittelpunkt des Hornhautbildes der Pupille. Die durch MN gehende Gerade ist eine Visirlinie des indirecten Sehens und φ ist der Winkelabstand derselben von der Fixations- oder Hauptvisirlinie. Ist N der Nahepunkt des Auges und $DN = DN'$, so ist ε , der Winkel zwischen DN' und der durch den Drehpunkt parallel zu MN' gezogenen Geraden, das Maximum der Parallaxe für die Visirlinie MN' , oder was dasselbe ist, der Spielraum, innerhalb dessen sich der Unterschied zwischen Gesichtswinkel und Drehungswinkel bei dem Winkelabstand φ vom Fixationspunkt bewegt. Da nun Winkel $\varepsilon = MN'D$ und $DMN' = 180^\circ - \varphi$ ist, so ist nach dem Sinussatz

$$\sin \varepsilon = \frac{MD \cdot \sin (180^\circ - \varphi)}{DN'}$$

oder, wenn wir MD mit d , DN mit n bezeichnen, und berücksichtigen, dass $\sin (180^\circ - \varphi) = \sin \varphi$ ist.

$$\sin \varepsilon = \frac{d \cdot \sin \varphi}{n}$$

Ich habe in der nachstehenden kleinen Tabelle einige Maximalwerthe der Parallaxe zusammengestellt, und zwar für verschiedene Excentricität des indirecten Sehens (1° bis 60°) und für verschiedene Accommodationsbreiten.

Der der Rechnung zu Grunde gelegte Werth für d ist in folgender Weise ermittelt: Der Drehpunkt des Auges liegt nach Donders und Doyer¹⁾ 13,6 mm hinter dem Hornhautscheitel.

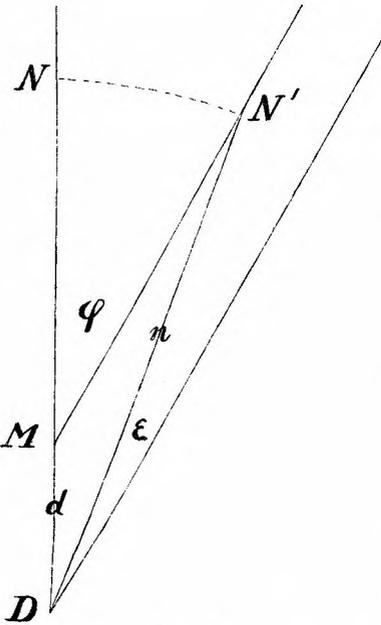


Fig. 7.

1) Aubert, Physiol. Optik. S. 635.

Das Mittel aus den drei von Helmholtz¹⁾ angegebenen Werthen für den Abstand der Pupille von dem Hornhautscheitel beträgt 3,753 mm; das Hornhautbild der Pupille liegt nach Listing und Helmholtz²⁾ 0,578 mm vor der Pupille, also in einer Entfernung von 3,175 mm vom Hornhautscheitel. Der Abstand zwischen Hornhautbild der Pupille und Drehpunkt des Auges beträgt demnach 13,6—3,175 mm = 10,425 mm.

Winkel- entfernung von der Fixationslinie	Maximalwerth der Parallaxe			
	Nahepunkt 10 cm; Accommod.-Breite 10 Dioptrien	Nahepunkt 15 cm; Accommod.-Breite 6 $\frac{2}{3}$ Dioptrien	Nahepunkt 25 cm; Accommod.-Breite 4 Dioptrien	Nahepunkt 40 cm; Accommod.-Breite 2,5 Dioptrien
1°	6' 17"	4' 10"	2' 30"	1' 34"
5°	31' 14"	20' 49"	12' 30"	7' 49"
10°	1° 2' 14"	41' 29"	24' 54"	15' 34"
20°	2° 2' 36"	1° 21' 44"	49' 2"	30' 39"
30°	2° 59' 16"	1° 59' 29"	1° 11' 41"	44' 48"
45°	4° 13' 39"	2° 49' 1"	1° 41' 23"	1° 3' 22"
60°	5° 9' 22"	3° 26' 5"	2° 3' 36"	1° 17' 15"

Man ersieht aus der vorstehenden Tabelle, welche beträchtliche Werthe die Parallaxe des indirecten Sehens annehmen kann. Selbst im Falle einer sehr beschränkten Accommodationsbreite (Nahepunkt 40 cm; 2,5 Dioptrien) erreicht sie in einer Winkelentfernung von nur 1° vom Fixationspunkt noch einen Werth von 1' 34", eine Größe, welche die Minimaldistanz distinct wahrzunehmender Punkte noch übertrifft. Wir haben übrigens, um einen Anhaltspunkt für die Rechnung zu haben, stillschweigend angenommen, dass die Parallaxe diesseits der Accommodationsnähe keine Bedeutung mehr habe; wenn man diese, in gewissem Sinne willkürliche Annahme fallen lässt, werden die den Spielraum der Parallaxe repräsentirenden Winkel natürlich noch größer.

1) Helmholtz, Physiol. Optik. 2. Aufl. S. 105.

2) Ebenda.