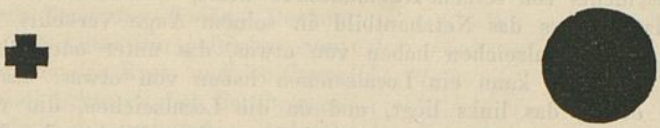
trittsstelle nicht sehen, ist begreiflich. Wir sehen nämlich mit dieser Stelle nicht, weil hier keine Zapfen- und Stäbchenschicht vorhanden ist, sondern das Licht, das hier auffällt, nur die austretenden Fasern des N. opticus trifft. Mariotte bemerkte zuerst, dass man diesen blinden Fleck im Sehfelde sich subjectiv bemerklich machen kann. Man macht zwei Zeichen auf einem Papier, ein Kreuz und eine Kreisscheibe (siehe Figur 35); man

Fig. 35.



schliesst dann das eine Auge und fixirt dasjenige Zeichen, welches nach der Nasenseite hin liegt, und nun nähert und entfernt man das Papier. Dann kommt man auf eine Stellung, wo bei fester Fixation das äussere Bild, das an der Schläfenseite, verschwindet. Nähert man das Bild wieder oder entfernt es, so kommt es wieder zum Vorschein. Dieser blinde Fleck im Sehfelde heisst nach Mariotte der Mariotte'sche Fleck. Er liegt etwa 15° nach auswärts vom Centrum des Sehfeldes, das heisst von dem fixirten Punkte oder von der in sich selbst projicirten Gesichtslinie. Auf der Netzhaut liegt er also etwa 15° nach innen vom Centrum retinae. Er erstreckt sich nämlich von 13° bis 19°, indem er einen Durchmesser von beiläufig 6° oder etwas darüber hat. Will man deshalb die beistehende Figur zum Versuche benutzen, so bringt man das Buch, um eins der Zeichen verschwinden zu lassen, in eine Entfernung von 26 bis 28 Centimeter, gemessen vom oberen Augenlide zum fixirten Zeichen.

Helmholtz hat an seinem Auge den blinden Fleck abgetastet und hat in seinem Handbuche der physiologischen Optik eine Abbildung davon gegeben, in der man nicht nur die Eintrittsstelle des Sehnerven deutlich wieder erkennt, sondern auch den Anfang der grossen Blutgefässe der Netzhaut.

Dioptrik des Auges.

Nachdem wir uns so mit der Art beschäftigt haben, wie sich die Retina gegen Eindrücke verhält, müssen wir uns mit der Art und Weise beschäftigen, wie ihr die Gesichtseindrücke zugeführt werden, wir müssen zu der Dioptrik des Auges übergehen. Man sagt, das Auge sei gebaut nach dem Principe der Camera obscura, weil durch einen Apparat, der im Wesentlichen eine Sammellinse ist, also dem Objectiv der Camera obscura entspricht, auf dem auffangenden Schirme, auf der Netzhaut, ein umgekehrtes Bild entworfen wird, wie ein solches auf dem auffangenden Schirme der Camera obscura zu Stande kommt. Das umgekehrte Bild auf der Netzhaut lässt sich am leichtesten an einem pigmentlosen Kaninchenauge zeigen. Wenn man dasselbe herauspräparirt und es aufhängt, so sieht man die Gegenstände, die demselben gegenüberliegen, auf der Netzhaut in umgekehrtem Bilde durch die hinreichend durchscheinende Sclerotica. In Bezug auf dieses umgekehrte Netzhautbild hat man sich oft die Frage gestellt, wie es denn möglich sei, dass wir die Dinge aufrecht sehen,

während sie doch auf der Netzhaut umgekehrt abgebildet werden. Es gibt eine grosse Menge von Theorien, die sich theils damit beschäftigen, zu beweisen, dass das umgekehrte Netzhautbild doch eigentlich nicht verkehrt, sondern aufrecht sei, und andere, die sich damit beschäftigten, durch welche Processe dieses umgekehrte Netzhautbild noch einmal im Gehirn umgekehrt werde und nun aufrecht zum Bewusstsein komme. Alle diese Dinge braucht man begreiflicher Weise nicht: denn da der Mensch überhaupt nichts von seinem Netzhautbilde weiss, so kann er auch nichts davon wissen, dass das Netzhautbild in seinem Auge verkehrt ist. Er kann nur ein Localzeichen haben von etwas, das unter oder über dem Horizont liegt, er kann ein Localzeichen haben von etwas, das rechts, und von etwas, das links liegt, und da die Localzeichen, die von derselben Oertlichkeit ausgehen, immer wieder analoge Punkte der Netzhaut treffen, so orientirt er sich natürlicher Weise ganz consequent und ganz unbekümmert um sein umgekehrtes Netzhautbild in der Räumlichkeit der Aussendinge. Johannes Müller pflegte schon zu sagen, er begreife nicht, wie man von verkehrt sprechen könne da, wo einmal Alles umgekehrt sei, da doch dann das Kriterium für das Aufrechte abhanden gekommen sei.

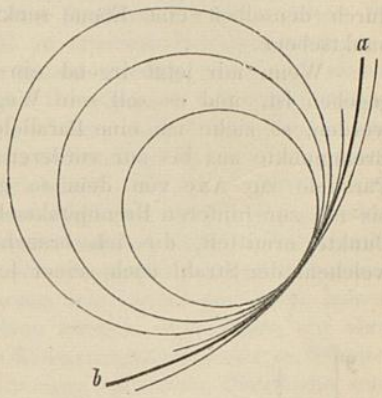
Es fragt sich nun, wie kommt dieses umgekehrte Netzhautbild zu Stande? Es kommt durch Brechung zu Stande. Die Strahlen treffen erst die Oberfläche der Hornhaut; hier werden sie am stärksten gebrochen, weil sie aus einem sehr dünnen Medium, aus Luft, in ein verhältnissmässig dichtes Medium, in die Substanz der Hornhaut übergehen. Dann werden sie ein zweites Mal gebrochen, indem sie aus der Hornhaut in den Humor aqueus übergehen, der einen niedrigeren Brechungsindex hat als die Hornhaut. Dann werden sie zum Einfallslothe gebrochen, wenn sie in die Linse übergehen, so lange sie in dichtere Linsenschichten übergehen, dann aber vom Einfallslothe, wenn sie wieder in die dünneren Schichten derselben gelangen und endlich aus der Linse herauskommen. Der Glaskörper hat in seiner Dichtigkeit nur geringe Aenderungen, so dass man den Gang der Strahlen durch denselben als geradlinig betrachten kann.

Wie soll man diese verschiedenen Brechungen der Rechnung unterziehen? Wir haben gewisse hergebrachte Formeln, welche uns erlauben, mit ziemlicher Leichtigkeit die Brennweite, die Ausdehnung der Bilder und die Eigenschaften der Bilder bei sphärischen Linsen zu untersuchen. Nun haben wir aber im Auge nicht mit sphärischen Linsen zu thun, sondern mit lauter Rotationsoberflächen und, wie wir später sehen werden, nicht einmal ganz reinen Rotationsoberflächen, von Curven, die sich am meisten Curven zweiten Grades anschliessen. Wir können uns aber die Sache einigermassen vereinfachen, wenn wir nur Strahlen berücksichtigen, die ganz nahe der Axe einfallen, um welche wir uns die optischen Medien des Auges centrirt denken.

Zu jeder Curve lässt sich ein Kreis finden, der sie an irgend einer Stelle berührt und sich an dieser Stelle möglichst langsam von ihr entfernt. Denken Sie sich, ich hätte an die betreffende Stelle einen berührenden Kreis an eine Curve *a b* (Figur 36) angelegt, und dieser Kreis wachse fortwährend, bleibe aber dabei immer mit der Curve in Berührung (Figur 36), so wird er eine Zeit lang bei seinem Wachsen sich noch

immer nach innen von ihr entfernen, aber später, wenn sein Radius immer grösser wird, wird ein Punkt kommen, wo der Kreis nach aussen von der Curve liegt. Dazwischen muss aber irgend ein Kreis sein, der länger als alle übrigen mit der Curve in unmittelbarer Berührung ist. Von diesem Kreise sagt man, dass er mit der Curve an dieser Stelle die Osculation der höchsten Ordnung habe. Dieser Kreis lässt sich durch Rechnung finden. Denken Sie sich, ich hätte ihn gefunden, und ich drehe nun den Kreis und die Curve um die Senkrechte in dem Berührungspunkte als Axe, so werden dadurch eine Kugel und ein Rotationskörper entstehen, die sich berühren und da, wo sie sich berühren, was hier in einiger Ausdehnung stattfindet, identisch sind. Ich kann also für eine solche Oberfläche, die nicht nach einem Kreise gekrümmt ist, eine sphärische substituiren, die durch die Rotation des Kreises erzeugt wird, der an dieser Stelle mit der Curve die Osculation von der höchsten Ordnung hat.

Fig. 36.

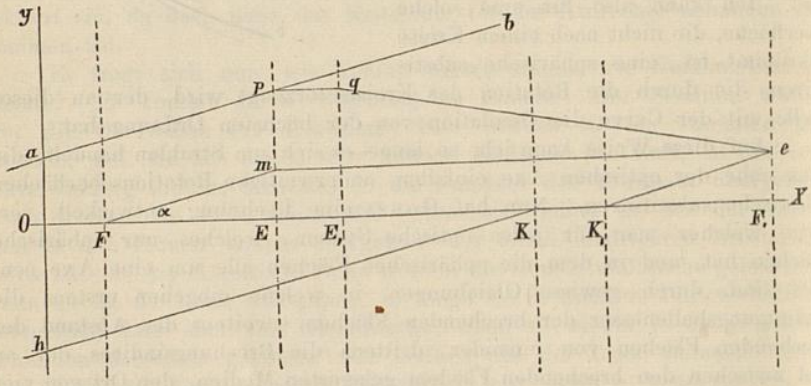


Auf diese Weise kann ich, so lange es sich um Strahlen handelt, die ganz nahe der optischen Axe einfallen, anderweitigen Rotationsoberflächen sphärische substituiren. Nun hat Gauss eine Rechnung entwickelt, vermöge welcher man für jedes optische System, welches nur sphärische Flächen hat, und in dem die sphärischen Flächen alle um eine Axe centrirt sind, durch gewisse Gleichungen, in welche eingehen erstens die Krümmungshalbmesser der brechenden Flächen, zweitens der Abstand der brechenden Flächen von einander, drittens die Brechungsindices der an und zwischen den brechenden Flächen gelagerten Medien, den Ort von vier Punkten finden kann, die als der vordere und der hintere Brennpunkt und als der vordere und der hintere Hauptpunkt bezeichnet werden. Wenn man diese vier Punkte berechnet hat, so kann man durch eine einfache Construction den Weg eines jeden Strahles nach seiner letzten Brechung finden, wenn man den Weg dieses Strahles vor seiner ersten Brechung kennt. Diese Rechnung, die also im Wesentlichen die Lösung unseres Problems gibt, ist später von Helmholtz und dann noch von Victor v. Lang modificirt und vereinfacht worden. Nehmen wir an, wir hätten ein beliebiges dioptrisches System von n sphärischen Flächen, welche alle um die Axe OX centrirt sind, und wir hätten die vier Punkte gefunden. Der hintere Brennpunkt ist derjenige Punkt, in welchem sich alle Strahlen vereinigen, die mit der Axe OX parallel von links nach rechts einfallen; wir bezeichnen ihn mit $F_{,}$. Ich lege mir nun durch denselben eine Ebene senkrecht auf die Axe und nenne sie die hintere Brennpunktsebene. Nun kann ich mir aber auch denken, dass von der andern Seite des dioptrischen Systems, von rechts nach links Strahlen parallel mit der Axe einfielen, dann werden sich diese in einem andern Punkte vereinigen, in dem vorderen Brennpunkte, den ich mit F bezeichne. Durch ihn lege ich mir eine Ebene senkrecht auf die Axe und nenne diese Ebene die vordere

Brennpunktsebene. Dann denke ich mir, ich hätte aus den Gleichungen die beiden Punkte gefunden, die Gauss mit dem Namen des vorderen und hinteren Hauptpunktes bezeichnet. Den vorderen Hauptpunkt bezeichne ich mit E und lege durch denselben eine Ebene senkrecht auf die Axe, die vordere Hauptpunktsebene, den hinteren bezeichne ich mit $E_{,}$ und lege durch denselben eine Ebene senkrecht auf die Axe, die hintere Hauptpunktsebene.

Wenn mir jetzt irgend ein einfallender Strahl, z. B. der Strahl ab gegeben ist, und es soll sein Weg nach der letzten Brechung gefunden werden, so ziehe ich eine Parallele Fm mit diesem Strahle vom vorderen Brennpunkte aus bis zur vorderen Hauptpunktsebene, dann ziehe ich eine Parallele zur Axe von dem so gewonnenen Durchschnittspunkte m aus, bis ich zur hinteren Brennpunktsebene gelange. Damit habe ich einen der Punkte ermittelt, die ich brauche, ich habe den Punkt e gefunden, in welchem der Strahl nach seiner letzten Brechung die hintere Brennpunkts-

Fig. 37.



ebene schneiden wird. Um den Weg des Strahles nach seiner letzten Brechung zu finden, ziehe ich von dem Durchschnittspunkte p, den er mit der vorderen Hauptpunktsebene hat, eine Parallele mit der Axe zur hinteren Hauptpunktsebene, bezeichne den hier erhaltenen Durchschnittspunkt mit q und verbinde ihn mit dem früher gefundenen Durchschnittspunkte e durch eine gerade Linie: dann habe ich in ihr den Weg, welchen der Strahl nach seiner letzten Brechung nimmt.

Ein jedes solches dioptrisches System hat nun aber noch zwei Punkte, welche eben so weit von einander entfernt sind wie die beiden Hauptpunkte, und dabei ebenso weit vom hinteren Brennpunkte entfernt sind, wie die beiden Hauptpunkte vom vorderen Brennpunkte. Diese beiden Punkte bezeichnen wir mit K und $K_{,}$ und nennen sie den vorderen und den hinteren Knotenpunkt. Wir legen durch jeden eine Ebene senkrecht auf die Axe, die vordere und die hintere Knotenpunktsebene. Diese beiden Punkte haben eine merkwürdige Eigenschaft, nämlich die, dass ein Strahl, der auf den ersten Knotenpunkt zielt, durch alle Brechungen, die er nach einander erleidet, schliesslich seine Richtung nicht geändert hat, sondern seiner ursprünglichen Richtung parallel ist, aber um ein Stück längs der

Axe verschoben, und dieses Stück ist nichts Anderes als die Entfernung der beiden Knotenpunkte von einander. Ich nehme also einen Strahl, der auf den vorderen Knotenpunkt zielt, ich will beispielsweise denjenigen nehmen, welcher dem früher betrachteten einfallenden Strahle ab parallel ist, hk; so finde ich den Weg desselben nach der letzten Brechung, wenn ich vom hinteren Knotenpunkte $K_{,}$ aus eine Parallele mit ihm ziehe. Da $EF = K_{,}F_{,}$ ist, so muss dieser Strahl in unserem Beispiele auch in e ankommen, wie wir dies auch gefunden haben würden, wenn wir seinen Weg nach der letzten Brechung mittelst der Hauptpunkte aufgesucht hätten. Alle Strahlen, welche unter sich parallel einfallen, müssen irgendwo in der hinteren Brennpunktsebene mit einander zur Vereinigung kommen, ebenso wie alle Strahlen, die der Axe parallel einfallen, sich im hinteren Brennpunkte vereinigen. Wenn wir also im menschlichen Auge die Hauptpunkte oder die Knotenpunkte, ferner den vorderen und den hinteren Brennpunkt bestimmt hätten, so würden wir daraus eine Construction ableiten können, vermöge welcher wir mit Leichtigkeit, wenn wir irgend ein Object haben, das Netzhautbild dieses Objectes construiren können. Nun haben wir aber da noch bedeutende Schwierigkeiten. Den Krümmungshalbmesser im Scheitel der Hornhaut können wir messen und ihr eine sphärische Oberfläche substituiren. Ebenso am vorderen und hinteren Linsenpol. In der Tiefe der Linse aber kommen immer neue Curven, so dass wir den Krümmungshalbmesser der Scheitel nicht mehr mit Genauigkeit messen können. Wir können auch die mittlere Dichtigkeit der Linse bestimmen, aber wir kennen nicht das Gesetz, nach dem von Schicht zu Schicht die Dichtigkeit zunimmt. Zudem ist die Anzahl der Schichten so gross, dass, wenn alle diese Schichten als einzelne Flächen in Berechnung gezogen werden sollten, man eine im höchsten Grade complicirte Rechnung erhalten würde.

Um diese Schwierigkeiten zu überwinden, hat Listing dem wirklichen Auge ein schematisches substituirt, an dem man die Rechnung ausführt. Dies schematische Auge erhält er folgendermassen. Er nimmt vorn eine sphärische Oberfläche an, welche den Krümmungshalbmesser mit dem Corneascheitel gemein hat. Da die Hornhaut nahezu wie ein in eine concave Form gedrücktes Planglas wirkt, so vernachlässigt er ihre Substanz ganz und nimmt an, dass hinter dieser brechenden Fläche ein Medium von dem Brechungsindex des Humor aqueus gelagert sei. In dem Abstande des vorderen Poles der Linse vom Corneascheitel nimmt er eine zweite, sphärische, brechende Fläche an, deren Krümmungshalbmesser dem des vorderen Poles der Linse entspricht, und am Orte der hinteren Linsenoberfläche nimmt er eine sphärische Fläche an, deren Krümmungshalbmesser dem des hinteren Poles der Linse entspricht. Darauf folgt ein Medium von der Dichtigkeit des Glaskörpers. Das Normalauge ist im Zustande der Ruhe für die unendliche Ferne eingestellt; Listing muss also seine hintere Brennpunktsebene in der Ebene der Retina annehmen. Er muss aber schliesslich durch seine Rechnung herausbringen, dass die Strahlen, welche parallel unter sich einfallen, sich in dieser hinteren Brennpunktsebene vereinigen. Das kann er nur, indem er, wenn er dem Glaskörper seinen wirklichen Brechungsindex zuschreibt, der Linse einen höheren Brechungsindex gibt, als selbst ihr Kern hat. Auf Grundlage dieser Voraussetzungen fand Listing den vorderen Brennpunkt etwa einen halben Augendurchmesser vor dem Corneascheitel. Er fand die Hauptpunkte wenige Zehn-

theile eines Millimeters von einander entfernt im Humor aqueus. Er fand endlich die Knotenpunkte gleichfalls nur wenige Zehntheile eines Millimeters von einander entfernt in der Linse, und zwar nahe dem hinteren Pole derselben. Wir haben uns diese Punkte auf eine Linie aufgetragen, von der wir uns denken, dass die optischen Medien des Auges um diese Linie als Axe centrirt seien, und die wir deshalb die Augenaxe nennen. Wir werden später sehen, dass im strengen Sinne des Wortes diese Linie nicht existirt, weil das menschliche Auge thatsächlich nicht richtig centrirt ist. Diese Linie nun, die nur näherungsweise Richtigkeit beansprucht, fällt auch nicht genau zusammen mit der Gesichtslinie, das heisst mit der geraden Linie, welche den fixirten Punkt mit dem Centrum der Fovea centralis retinae verbindet. Die Gesichtslinie weicht nämlich gegen die Nasenseite hin um einen bei manchen Augen grösseren, bei anderen geringeren Winkel von dieser Axe ab.

Es handelt sich also nun darum, ob diese so auf der Augenaxe gefundenen Punkte der Wirklichkeit entsprechen, ob man sie benützen kann, um Netzhautbilder zu construiren. Ueber die hintere Brennpunktsebene ist kein Zweifel da, wo es sich eben um das Normalauge handelt. Theoretische Betrachtungen lehren ausserdem, dass die Veränderungen, welche Listing an seinem schematischen Auge vorgenommen, kaum einen wesentlichen Einfluss auf die Lage des vorderen Brennpunktes ausüben. Es ist ferner auch nach dem ganzen Baue des Auges und nach den Brechungsindices, die darin vorkommen, zu erwarten, dass in der That die beiden Knotenpunkte und die beiden Hauptpunkte, jeder nur um ein Geringes von einander entfernt sein werden. Aber was sichergestellt werden muss, das ist die Lage der Knotenpunkte, weil diese uns immer als Anhaltspunkte dienen bei der Construction der Netzhautbilder. Es handelt sich darum: liegen die Knotenpunkte wirklich nahe dem hinteren Pole der Linse? Dies ist nun durch einen Versuch von Volkmann sichergestellt worden. Wenn man bei jugendlichen, schwach pigmentirten Individuen das Auge stärker nach aussen wenden lässt, und bringt dann in einem dunklen Zimmer eine Kerzenflamme nach der Schläfenseite hin, so rückt, wenn man diese von der Gesichtslinie immer weiter entfernt, das Netzhautbild natürlich entsprechend immer weiter nach vorwärts, und wenn das Auge stark nach aussen gewendet ist, kommt das Netzhautbild endlich in der Lidspalte zum Vorschein, indem es durch die schwach pigmentirte Chorioidea und durch die Sclerotica hindurchscheint. Wenn man diesen Versuch macht, so hat man folgende Stücke: Erstens die Gesichtslinie, in der man den Punkt hat, der fixirt wird, und ausserdem den Drehpunkt des Auges oder Mittelpunkt des Auges, was man hier als gleichbedeutend ansehen kann. Man hat zweitens den Ort der Kerzenflamme: diesen hat man willkürlich gewählt. Man hat ferner den Ort des Netzhautbildes als Gegenstand directer Beobachtung. Verbindet man Bild und Object mit einander durch eine gerade Linie, so findet man den Punkt, an dem diese Gerade die Gesichtslinie schneidet. Dieser Punkt aber muss zwischen den beiden Knotenpunkten des Auges liegen, er muss also den Ort der Knotenpunkte angeben. Dieser Versuch von Volkmann hat in der That gezeigt, dass Listing den Ort der Knotenpunkte richtig bestimmt hat. Listing hat seine Untersuchungen zuerst in den „Göttinger Studien“ publicirt, dann hat er sie später noch einmal ausführlich und mit den ganzen dazu gehörigen

Rechnungen, die jetzt die Grundlage aller dioptrischen Rechnungen sind, die sich auf das menschliche Auge beziehen, in dem Artikel „Dioptrik des Auges“ in Rudolf Wagner's Handwörterbuch der Physiologie niedergelegt.

Wenn wir also die Grösse des Netzhautbildes von einem Objecte bestimmen wollen, so ziehen wir von dessen Endpunkten nach dem vorderen Knotenpunkte gerade Linien, und mit diesen parallel ziehen wir gerade Linien vom hinteren Knotenpunkte zur Netzhaut, dann erhalten wir das Netzhautbild in seiner umgekehrten Lage und in seiner Grösse. Es verhält sich also jeder Durchmesser des Netzhautbildes zu dem entsprechenden des Objectes, wie sich verhält die Entfernung des Netzhautbildes vom hinteren Knotenpunkte zur Entfernung des Objectes vom vorderen Knotenpunkte. Das ist der Satz, auf dem die ganze malerische Perspective beruht.

Da nun diese beiden Knotenpunkte nur sehr wenig von einander entfernt liegen, so kann man für eine Menge praktischer Fragen ihre Entfernung von einander vernachlässigen und sie als in einen Punkt zusammenfallend ansehen. Diesen Punkt bezeichnet man mit dem Namen des Kreuzungspunktes der Sehstrahlen, weil man ihn als Durchschnittspunkt erhält, wenn man zwei oder mehrere Punkte des Objectes mit correspondirenden Punkten des Bildes durch gerade Linien verbindet.

Scheinbare Grösse.

Es fragt sich nun: Was ist die scheinbare Grösse, Magnitudo apparens, der Gesichtsobjecte? Die scheinbare Grösse wächst natürlich mit dem Netzhautbilde. Je grösser das Netzhautbild wird, um so grösser erscheint uns ein Gegenstand. Die Grösse des Netzhautbildes ist aber abhängig von der Entfernung desselben vom hinteren Knotenpunkte und von der Grösse des Winkels, den ich erhalte, wenn ich von gegenüberliegenden Endpunkten des Bildes gerade Linien zum hinteren Knotenpunkte ziehe: dieser Winkel ist aber kein anderer als der Winkel, welchen ich erhalte, wenn ich von den entsprechenden gegenüberliegenden Punkten des Objectes gerade Linien zum vorderen Knotenpunkte hinziehe. Da nun beim Sehen mit unbewaffnetem Auge die Knotenpunkte nur wenig ihren Ort verändern — sie verändern ihren Ort bei der Accommodation, aber in verhältnissmässig engen Grenzen — so ist im Grossen und Ganzen die scheinbare Grösse von diesem Winkel abhängig, welchen man mit dem Namen des Sehwinkels bezeichnet.

Nun ist aber die Grösse des Netzhautbildes nicht das einzige Mittel, wonach wir die Grösse der Gegenstände beurtheilen. Wir begnügen uns damit nur bei kleinen Gegenständen, die wir mit einem Blicke übersehen. Wenn wir es aber mit grösseren Gegenständen zu thun haben, so durchmessen wir sie mit unseren Augen in ähnlicher Weise, wie der Astronom die Grössen am Himmel mit seinem Fernrohre durchmisst und ihre Abstände nach den Lagen bestimmt, die er demselben geben muss, um ein Object nach dem andern einzustellen. Hiebei dreht sich das Auge, indem es aus der Fixation des einen Endes des Gegenstandes in die des andern Endes des Gegenstandes übergeht, um eine Axe, und bei einer andern Bewegung wieder um eine andere Axe. Alle diese Axen schneiden sich