waffnetem Auge im Brennpunkte G der Lupe, kann uns also nur eine Vergrößerung zum Bewußtsein kommen:

$$w = \frac{y''}{y'} = \frac{l \cdot \operatorname{tg} \psi}{l \cdot \operatorname{tg} \varphi} = \frac{GG'}{f} : \frac{BG''}{a_1} = \frac{a_1}{f}.$$

Setzen wir hierin noch für $\frac{1}{f}$ die Brechkraft D der Lupe in Dioptrien ein, so erhält man

$$w = a_1 \cdot D.$$

Die Vergrößerung ist das Produkt aus dem Abstande des Gegenstandes bei Betrachtung ohne Lupe und der Brechkraft der Lupe.

Hierin ist a_1 in m zu rechnen, wenn D in Dioptrien gezählt wird. Die Vergrößerung hat ihren größtmöglichen Wert, wenn ohne Lupe der Gegenstand im Nahepunkte mit dem Abstande d von K betrachtet wurde. Dann ist $w = \frac{d}{f} = d \cdot D$.

Bemerkung. Die Betrachtung oben unter 2. würde bei den Voraussetzungen, die wir soeben über die Stellungen des Gegenstandes machten, eine unendlich große Vergrößerung ergeben. Das entspricht offenbar nicht der Empfindung und liegt in der für diesen Fall unzweckmäßigen Begriffsbestimmung für die Vergrößerung begründet. — Die unter 3. behandelte Vergrößerung ist unabhängig vom Abstande der Lupe vom Auge.

In dem unter 3. festgestellten Ausdrucke $w = a_1 \cdot D$ ist der Faktor a_1 eine ganz willkürliche Größe und hängt davon ab, in welchem Abstande vom Auge der Gegenstand vor Benutzung der Lupe beobachtet wurde, oder in anderer Ausdrucksweise, welches Vergleichsbild zur Beurteilung der Vergrößerung zugrunde gelegt wurde. (Individuelle Vergrößerung). Es ist herkömmlich, für a_1 die „deutliche Sehweite" im Betrage von 25 cm, oder $a_1 = \frac{1}{4}$ m zu setzen. Hält man das ein für allemal fest, so hätte man: $w = \frac{D}{4}$; die Vergrößerung wäre also immer gleich dem vierten Teile der Brechkraft der Lupe. — Wollte man sich von dem willkürlichen Faktor ganz frei machen, so könnte man zur Angabe der Vergrößerung einfach den Wert D selbst wählen, d. h. $a_1 = 1$ m setzen. Da D die Dimension einer reziproken Länge hat, man aber gewohnt ist, die Vergrößerung als (dimensionslose) Verhältniszahl zweier Strecken zu behandeln, so hat sich eine solche Angabe für die Vergrößerung einer Lupe bisher nicht einbürgern können.

4. **Einfache Mikroskope.** Es wurde bisher angenommen, daß die Lupe bei ruhendem Auge benutzt wird. Das gilt bei stark vergrößernden Lupen, die man auch **einfache Mikroskope** nennt. Sie lassen sich nur für achsennahe Gebiete korrigieren und bilden nur diese scharf ab. Daher blickt man unwillkürlich nur in der Richtung der Achse durch die Lupe hindurch; will man einen anderen Punkt des Bildes scharf sehen, so richtet man dorthin Auge und Lupe, ohne ihre gegenseitige Stellung zu ändern. In diesem Falle schneiden sich die Hauptstrahlen in der Mitte der Augenpupille.

5. **Verantlupen.** Sowie die Lupe aber ein ausgedehnteres Bildfeld liefern soll, was allerdings nur bei kleineren Vergrößerungen erreichbar ist, genügt diese Voraussetzung nicht mehr. Beim Durchmustern des Bildfeldes dreht sich dann das Auge in seiner Höhle um den Augendrehpunkt. Die Hauptstrahlen müssen sich also in diesem Punkte schneiden. Die sphärischen und chromatischen Fehler (S. 838) einer so benutzten Lupe sind daher derart zu beheben, daß das Auge in jeder Drehstellung verzeichnungs- und astigmatismusfreie Bündel empfängt und daß diese Bündel auch die richtige Neigung besitzen. Auf die Forderung einer solchen Korrektur in bezug auf den Augendrehpunkt hat zuerst A. Gullstrand hingewiesen. In den optischen Werkstätten von C. Zeiß in Jena wurden dann diesen Forderungen entsprechende Lupen durch M. v. Rohr berechnet und unter dem Namen *Verantlupen* in den Handel gebracht.

6. **Perspektivitätszentrum von Photographien.** Da das für unsere räumliche Anschauung maßgebende Perspektivitätszentrum der Augendrehpunkt ist (S. 846), so erhalten wir von einem Bilde nur dann den richtigen räumlichen Eindruck, wenn beim Betrachten des Bildes die Hauptstrahlen von dem Bilde her sich in dem Augendrehpunkte schneiden und gegenseitig dieselben Neigungen besitzen wie beim unmittelbaren Betrachten des abgebildeten Gegenstandes. Im anderen Falle erscheint das Bild verzerrt oder von falschen Größenverhältnissen. Ein (weit entfernter) Gegenstand wird durch ein photographisches Objektiv in der Brennebene abgebildet. Das Perspektivitätszentrum der Abbildung ist der vordere Brennpunkt; denn ein Auge, dessen Augendrehpunkt im vorderen Brennpunkte der Objektivlinse liegt, sieht einen jeden Bildpunkt der hinteren Brennebene durch die Objektivlinse hindurch genau in derselben Entfernung und unter demselben Winkel gegen die Achse hinter der Linse, als der ursprüngliche photographierte Gegenstand vor der Linse lag. Will man daher von einer photographischen Aufnahme einen richtigen natürlichen Eindruck empfangen, so muß das Bild in entsprechender Weise durch eine Lupe von der Brennweite des aufnehmenden Objektivs betrachtet werden. Alle anderen Betrachtungsweisen mit unbewaffnetem Auge würden nur dann das Bild richtig empfinden lassen, wenn wir die Linse durch entsprechende Augenakkommodation ersetzen könnten; im anderen Falle müssen immer unrichtige Größenverhältnisse den Eindruck stören. Es ist nun in der Tat überraschend, in welchem Maße bei Unterstützung des Auges schon durch eine gewöhnliche Lupe die Körperlichkeit einer Photographie hervortritt, trotzdem die Beobachtung nur einäugig ist (§ 378). Für Zwecke der Bildbetrachtung werden Verantlupen entsprechender Brennweiten besonders hergestellt; bei ihrem Gebrauche muß das Bild in der einen, der Augendrehpunkt in der anderen Brennweite sich befinden.

§ 291. Die Fernrohre.

Die Fernrohre oder teleskopischen[1]) Systeme (s. dazu § 278, 2f.) haben den Zweck, das Netzhautbild eines fernen Gegenstandes, also den Sehwinkel, unter dem der ferne Gegenstand erscheint, zu vergrößern, ohne daß die Akkommodation des Auges verändert wird. Da ein unendlich ferner Gegenstand in unser Auge parallele Strahlen sendet, so betrachtet ein rechtsichtiges Auge

1) tēle (griech.) = fern, skopein (griech.) = spähen

den fernen Gegenstand sowohl mit als ohne Fernrohr ohne Akkommodation (Akkommodation auf unendlich). Hieraus folgt, daß die parallel in ein Fernrohr eintretenden Lichtstrahlen das Fernrohr auch wieder parallel verlassen müssen.

Die beiden Hauptvertreter der teleskopischen Systeme sind 1. das aus einem sammelnden Objektive (mit positiver Brennweite) und einem zerstreuenden Okulare (mit negativer Brennweite) bestehende **holländische** oder **Galileische Fernrohr**, 2. das aus einem sammelnden Objektive und einem sammelnden Okulare bestehende **astronomische** oder **Keplersche Fernrohr**.

§ 292. Das holländische (Galileische)[1]) Fernrohr.

1. **Zusammensetzung.** Beim holländischen Fernrohre (Fig. 872) sind ein sammelndes Objektiv und ein zerstreuendes Okular so angebracht, daß der zweite Brennpunkt des Objektivs mit dem zweiten Brennpunkte des Okulars zusammenfällt.

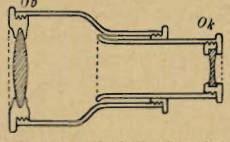

Fig. 872. Holländisches Fernrohr (schematisch).

Das sammelnde Objektiv L_1 in Fig. 873[2]) hat den Brennpunkt F. Die parallel mit der Hauptachse in das Objektiv eintretenden Lichtstrahlen werden so gebrochen, daß sie zum Brennpunkte F hin zusammenlaufen. Das zerstreuende Okular L_2, das die Strahlen wieder parallel machen soll, hat seinen Brennpunkt auch in F. Hieraus folgt, daß der Abstand des Okulars vom Objektive, also die Länge l des holländischen Fernrohres gleich der Differenz der Brennweiten von Objektiv und Okular sein muß:

$$l = f_1 - f_2 .$$

2. **Strahlengang.** Der Strahlengang im holländischen Fernrohre für beliebige (nicht achsenparallele) Strahlen geht aus Fig. 874 hervor. Auf der

1) Das besonders früher nach Galilei benannte Fernrohr ist nicht von diesem zuerst hergestellt worden. Die Erfindung wird einem der holländischen Brillenmacher Zacharias Jansen 1604 oder Franz Lippershey in Middelburg zugeschrieben. Der letztere suchte am 2. Oktober 1608 um einen niederländischen Schutzbrief nach. Von der Erfindung hatte Galilei gehört, und er machte darauf selbst Versuche mit der Zusammenstellung zweier Linsen; es gelang ihm, im Mai 1609 ein Fernrohr zusammenzusetzen. Galileis Hauptverdienst besteht in der Verbesserung des Fernrohres. Die von ihm gebauten Rohre übertrafen an Güte weit die andern seiner Zeit. Sie gestatteten feinere astronomische Beobachtungen, die damals gewaltiges Aufsehen erregten und zu außerordentlich wichtigen Aufschlüssen über die Himmelskörper geführt haben.

2) Fig. 873 ist durch eine photographische Aufnahme des Strahlenganges in der Weise entstanden, daß zuerst der Strahlengang photographiert worden ist, den das Objektiv L_1 allein, also ohne das Okular L_2 erzeugt; dann ist auf derselben Platte eine Aufnahme gemacht worden, nachdem das Okular L_2 eingesetzt worden war, das nun die im ersten Teile der Aufnahme zu F konvergierenden Strahlen wieder parallel macht.

Hauptachse CC' sind die beiden Linsen, das sammelnde Objektiv und das zerstreuende Okular zentrisch angebracht. Die den beiden Linsen gemeinsame Brennebene ist F_1F_1.

Wenn ein Beobachter durch das holländische Fernrohr bei ruhendem Auge hindurchsieht, so kommen für die Entstehung des Bildes nur diejenigen Strahlen in Betracht, die in die Pupille $A.P.$ des beobachtenden Auges ein-

Fig. 873. Brennpunkte im holländischen Fernrohr.

treten, das sich unmittelbar hinter dem Okulare befindet. Nur Strahlen, die nach der Brechung durch A hindurchgehen, können Hauptstrahlen sein. Ein solcher Strahl sei DA. Da er durch die Mitte des Okulars geht, so erfährt er hier keine Richtungsveränderung. Der Strahl DA würde, wenn er unverändert weiterginge, die Brennebene F_1F_1 in C treffen. Zeichnen wir die durch C gehende Nebenachse NN durch die Mitte O des Objektivs, so wissen wir, daß der Strahl DA vor Eintritt in das Objektiv mit dieser Nebenachse parallel gehen muß (da sein Schnittpunkt C mit der Nebenachse NN nach der Brechung in der Brennebene F_1F_1 liegt). Wir finden also die Richtung des einfallenden Strahles S, indem wir $SD \parallel NN$ ziehen. SD würde nun, wenn das Objektiv nicht vorhanden wäre, in der geradlinigen Verlängerung weitergehen und die Hauptachse CC' in E treffen, folglich muß in E die Eintrittspupille $E.P.$ liegen. Wir fassen das dahin zusammen:

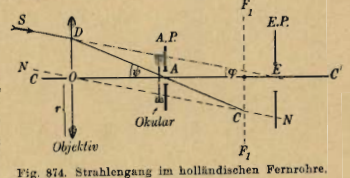

Fig. 874. Strahlengang im holländischen Fernrohre.

Die Verlängerung des auf das Objektiv treffenden Strahles S schneidet die Fernrohrachse in der Eintrittspupille E unter dem Winkel φ. Unter diesem Sehwinkel würde uns der unendlich ferne Gegenstand, der uns den Strahl S zusendet, ohne Fernrohr erscheinen. Der im Fernrohre verlaufende und in das Auge eintretende Strahl DA schneidet die Fernrohrachse in der Austrittspupille A unter dem Winkel ψ; unter diesem Sehwinkel erscheint derselbe Gegenstand, wenn er durch das Fernrohr beobachtet wird.[1])

1) Diese Betrachtungen ändern sich für ein bewegtes, „blickendes" Auge; es schneiden sich dann die Hauptstrahlen nicht in der Pupillenmitte A, sondern im Augendrehpunkte.

3. **Vergrößerung.** Die Vergrößerung des Sehwinkels ist die subjektive Vergrößerung (S. 807) $w = \frac{\operatorname{tg}\psi}{\operatorname{tg}\varphi} = \frac{\frac{DO}{OA}}{\frac{DO}{OE}} = \frac{OE}{OA}$. OA ist die Länge $l = f_1 - f_2$ des Fernrohres. Da E die Mitte der Eintrittspupille ist, so ist E das vom Objektive erzeugte virtuelle Bild der Austrittspupille, folglich besteht die Gleichung $\frac{1}{OA} = \frac{1}{OE} + \frac{1}{f_1}$. Hieraus berechnet sich $\frac{OE}{OA} = \frac{f_1}{f_1 - OA}$, und da $OA = f_1 - f_2$, also $f_1 - OA = f_2$ ist, so folgt

$$w = \frac{\operatorname{tg}\psi}{\operatorname{tg}\varphi} = \frac{f_1}{f_2}.$$

Beim holländischen Fernrohre ist die Vergrößerung gleich dem Quotienten aus den beiden Brennweiten von Objektiv und Okular.

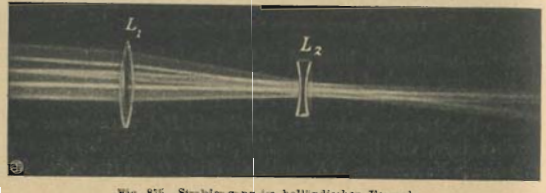

Fig. 875. Strahlengang im holländischen Fernrohr.

4. **Das Gesichtsfeld.** Das bildseitige Gesichtsfeld ist für ein *ruhendes Auge* durch die Strahlen begrenzt, die durch den äußersten Rand des Objektivs eintreten und durch die Mitte A der Augenpupille $A.P.$ gehen. In Fig. 875 ist der Strahlengang eines axialen parallelen Strahlenbündels und eines parallelen Strahlenbündels, das durch den Rand des Objektivs geht, nach einer photographischen Aufnahme abgebildet. *Das Objektiv ist die Gesichtsfeldblende des holländischen Fernrohres.*

Ist der Halbmesser der Objektivfassung r, so ist nach Fig. 874 der bildseitige Gesichtsfeldwinkel bestimmt durch $\operatorname{tg}\psi = \frac{r}{f_1 - f_2}$. Da $\operatorname{tg}\varphi = \frac{\operatorname{tg}\psi}{w}$ ist, so ist der gegenstandseitige Gesichtsfeldwinkel φ bestimmt durch

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{1}{w} \cdot \frac{r}{f_1 - f_2} = \frac{f_2}{f_1} \cdot \frac{r}{f_1 - f_2}.$$

Aus dem ersten Quotienten geht hervor:

Das gegenstandseitige Gesichtsfeld nimmt (bei gleicher Länge des Fernrohres) in demselben Maße ab, in dem die Vergrößerung zunimmt.

In der Tat kann das berechnete Gesichtsfeld nicht voll ausgenutzt werden. Beim Blicken mit *bewegtem Auge*, zu dessen Unterstützung das Fernrohr dient, schneiden sich die Hauptstrahlen, welche das Gesichtsfeld begrenzen, nicht in der Mitte der Augenpupille, sondern dahinter im Augendrehpunkte.

Dadurch wird der bildseitige Gesichtsfeldwinkel ψ in Fig. 874 eingeschränkt und damit auch der gegenstandseitige Gesichtsfeldwinkel φ verkleinert.

5. **Die Helligkeit.** Für die Abbildung irgendeines Punktes kommt nur das Lichtbündel in Betracht, das nach der Brechung als Lichtkegel in die Augenpupille $A.P.$ (Fig. 876) eintritt. Wenn das Fernrohr nicht vorhanden wäre, so würde dieses Lichtbündel als paralleles Strahlenbündel durch die Eintrittspupille $E.P.$ gehen. Die Größe der Eintrittspupille ist daher für die Helligkeit der Abbildung eines einzelnen Punktes maßgebend. Zwischen dem Halbmesser ϱ der Eintrittspupille und dem Halbmesser p der Augenpupille besteht die Proportion $\varrho : p = CD : CA = f_1 : f_2$. Da nun $f_1 : f_2 = w$ ist, so folgt

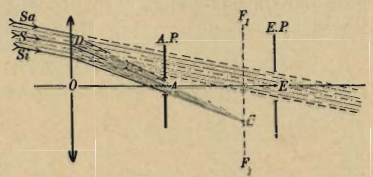

Fig. 876. Eintrittspupille E. P. und die Austrittspupille A. P. des holländischen Fernrohres.

$$\varrho = p \cdot w.$$

Die Helligkeit H, mit der ein einzelner Punkt durch das Fernrohr abgebildet wird, ist dem vom Gegenstandspunkte her ins Auge gelangenden Lichtstrome und damit dem Flächeninhalte der Eintrittspupille $E.P.$, also $\pi\varrho^2$, proportional, folglich ist die Helligkeit des Bildes bedingt durch den Ausdruck

$$H = \pi p^2 w^2.$$

Die Augenpupille ist Aperturblende.

Die Helligkeit des durch ein holländisches Fernrohr erzeugten Bildes eines Punktes ist dem Quadrate des Pupillenhalbmessers und dem Quadrate der Vergrößerung des Fernrohres proportional.

Das holländische Fernrohr vergrößert gleichzeitig den Sehwinkel und die Helligkeit der einzelnen Bildpunkte. Blickt man mit einem Opernglase, das aus zwei miteinander verbundenen holländischen Fernrohren besteht, abends nach dem Sternenhimmel, so sieht man eine bedeutend größere Anzahl von Fixsternen als mit dem bloßen Auge. Das ist nicht die Folge der Vergrößerung des Sehwinkels eines Sternes, der auch jetzt noch unmeßbar klein ist, sondern die Folge der vergrößerten Helligkeit.

Da infolge der Vergrößerung des Sehwinkels die einzelnen Punkte weiter auseinandergerückt erscheinen, so findet eine Erhöhung der *Flächenhelligkeit* des Gesichtsfeldes oder flächenhafter Gegenstände nicht statt. Die geringen Lichtverluste im Fernrohre beim Durchgange durch die Linsen sind ohne größere Bedeutung. Die Lichtstärke des holländischen Fernrohres ist daher einer seiner Hauptvorzüge. Es wird deshalb gern dort gewählt, wo man lichtschwache Gegenstände beobachten will, wie bei der Seefahrt als Nachtglas, im täglichen Leben als Theaterglas.

§ 293. Das Keplersche[1]) oder astronomische Fernrohr.

1. **Zusammensetzung.** Beim Keplerschen Fernrohre (Fig. 877) sind auf der Hauptachse die beiden Sammellinsen: das Objektiv und das Okular so angebracht, daß der zweite Brennpunkt des Objektivs mit dem ersten Brennpunkte des Okulars zusammenfällt.

Dadurch wird erreicht, daß die der Hauptachse parallelen Strahlen SS (Fig. 878) nach ihrer Brechung im Objektive nach F zusammenlaufen und von F aus auseinanderlaufend das Okular treffen. Hier werden sie wieder so gebrochen, daß sie das Okular parallel zur Hauptachse verlassen.

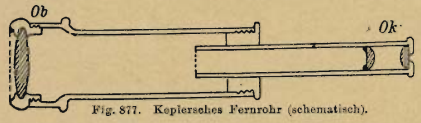

Fig. 877. Keplersches Fernrohr (schematisch).

Das Objektiv hat die Aufgabe, von einem fernen Gegenstande ein reelles Bild in seiner Brennebene zu entwerfen. Dieses Bild wird durch das Okular als Lupe betrachtet. Wird also das auf der Mattscheibe eines photographischen Apparates entworfene Bild durch eine Lupe betrachtet, so ist diese Verbindung beider optischen Instrumente im Wesen ein Keplersches Fernrohr.

Beim Keplerschen Fernrohre ist der Abstand des Okulars vom Objektive, also die Länge l des Fernrohres gleich der Summe der beiden Brennweiten f_1 und f_2

$$l = f_1 + f_2.$$

2. **Aperturblende.** Bei der Ausführung des Keplerschen Fernrohres verwendet man stets Objektive von großer und Okulare von kleiner Brennweite; daher soll eine entsprechende Voraussetzung auch hier gemacht werden. Aus Fig. 878 ist unmittelbar ersichtlich, daß der Durchmesser des auftreffenden parallelen Strahlenbündels SS zum Durchmesser des das Keplersche Fernrohr verlassenden Strahlenbündels in demselben Verhältnisse steht, wie die Brennweite des Objektivs zu der des Okulars. Werden die Öffnungen der Linsen voll ausgenutzt, so müssen sich die Durchmesser von Objektiv und Okular eines richtig gebauten Fernrohres daher wie die Brennweiten verhalten. Dabei darf die

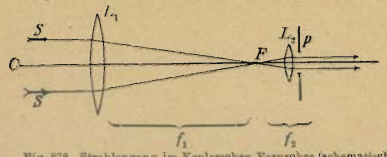

Fig. 878. Strahlengang im Keplerschen Fernrohre (schematisch).

1) Das nach Kepler benannte Fernrohr aus zwei Konvexlinsen ist von Kepler in einer 1611 erschienenen Schrift über Optik beschrieben, aber von Kepler selbst nie hergestellt und gebraucht worden. Es wurde zuerst von dem Jesuitenpater Christian Scheiner 1615 ausgeführt. Scheiner gibt auch schon an, daß man aus drei Linsen ein Fernrohr zusammensetzen kann, das sich zur Beobachtung irdischer Gegenstände deshalb gut eigne, weil man damit die Gegenstände aufrecht sieht. „Terrestrisches Fernrohr."

Okularöffnung nicht wesentlich größer als der Durchmesser der Augenpupille sein, weil sonst ein Teil der Lichtstrahlen nicht ins Auge gelangen würde. Nehmen wir z. B. an, daß die Brennweite des Objektivs 10mal so groß ist wie die des Okulars, so ist der Durchmesser des austretenden Strahlenbündels nur $^1/_{10}$ von dem des eintretenden Strahlenbündels. Der Durchmesser p der Augenpupille betrage 6 mm. Dann muß der Durchmesser des Objektivs 6 cm sein, wenn die Pupille und die Fassung des Objektivs in gleicher Weise das eintretende Strahlenbündel begrenzen. Tatsächlich richtet man das Fernrohr meist so ein, daß der Durchmesser der Objektivfassung kleiner ist, als dem angegebenen Verhältnisse entspricht. Daraus folgt, daß in diesem Falle die Fassung des Objektivs allein bestimmend ist für die Menge des in das Keplersche Fernrohr eintretenden Lichtes:

Die Objektivfassung ist meist die Aperturblende des Keplerschen Fernrohres.

3. **Austrittspupille.** In diesem praktisch meist in Frage kommenden Falle gehen (Fig. 879) die Hauptstrahlen aller Gegenstandspunkte, also auch der seitlich gelegenen, durch den Mittelpunkt des Objektivs; sie erfahren durch das Okular eine Brechung nach der Hauptachse hin und schneiden diese dort, wo das durch das Okular erzeugte Bild des Objektivs liegt.

Das optische Bild des Objektivs ist daher die eigentliche Austrittspupille des Fernrohres.

Bei einigen besonders lichtstarken Keplerschen Fernrohren (Nachtgläsern) kann diese Austrittspupille größer als die Augenpupille sein. In diesem Falle ist die Augenpupille Aperturblende. Bei ruhendem Auge, also indirektem Sehen, würde ein Fernrohr beim Gebrauche gerade voll ausgenutzt werden, wenn das durch das Okular erzeugte Bild der Objektivöffnung in die Augenpupille fällt. Sowie aber das Auge das Gesichtsfeld durchmustert, wird es in seiner Höhlung gedreht. Es kommen daher beim Blicken nur dann alle Hauptstrahlen ins Auge, wenn die Austrittspupille des Fernrohres im Augendrehpunkte liegt; die Austrittspupille muß dann größer sein als die Augenpupille.

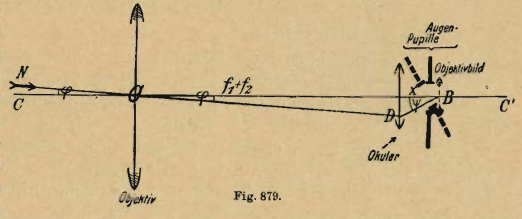

Fig. 879.

4. **Vergrößerung.** In Fig. 879 sind diese Verhältnisse dargestellt. NO ist der von einem seitlich gelegenen Gegenstandspunkte durch die Mitte des Objektivs gehende Hauptstrahl (gleichzeitig eine Nebenachse des Objektivs). Die Verlängerung von NO trifft das Okular in D und wird hier zum Punkte B der Hauptachse gebrochen. B (der Augendrehpunkt) möge vom Okulare den Abstand x haben. Die eintretenden Strahlen bilden mit der Fernrohrachse

den Sehwinkel $\sphericalangle NOC = \varphi$; durch das Fernrohr betrachtet, erscheint derselbe Gegenstandspunkt unter dem Sehwinkel $\sphericalangle DBO = \psi$. Das Verhältnis der Netzhautbilder mit und ohne Benutzung des Fernrohres, also auch das Verhältnis der Tangenten der Sehwinkel, ist die subjektive Vergrößerung (S. 807) w des Keplerschen Fernrohres.

Aus Fig. 879 folgt unmittelbar $w = \frac{\operatorname{tg}\psi}{\operatorname{tg}\varphi} = -\frac{f_1 + f_2}{x}$.

Da B das optische reelle Bild des Objektivs ist, das durch das Okular mit der Brennweite f_2 erzeugt wird, so gilt die Linsengleichung (S. 795)

$$\frac{1}{x} = -\frac{1}{f_1 + f_2} + \frac{1}{f_2},$$

woraus folgt

$$\frac{f_1 + f_2}{x} = \frac{f_1}{f_2};$$

folglich ist auch

$$w = -\frac{f_1}{f_2}.$$

Die Vergrößerung des Keplerschen Fernrohres ist gleich dem Quotienten der beiden Brennweiten von Objektiv und Okular.

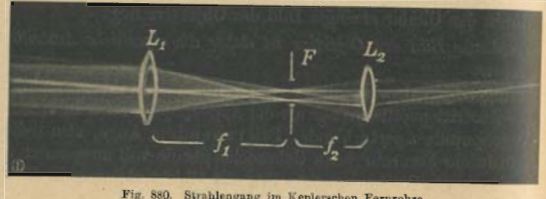

Fig. 880. Strahlengang im Keplerschen Fernrohre.

5. **Gesichtsfeldblende.** In Fig. 880 ist nach einer photographischen Aufnahme ein Strahlenbündel dargestellt, das die Entstehung des Bildes eines unendlich fernen Achsenpunktes bewirkt. Ferner zeigt die Figur den Verlauf eines parallelen Strahlenbündels, das von einem seitlichen, oberhalb der Achse liegenden Punkte ausgeht. Als paralleles Strahlenbündel trifft es auf das Objektiv, vereinigt sich in der gemeinsamen Brennebene der beiden Linsen, geht von hier aus auseinanderlaufend weiter und wird durch das Okular gleichzeitig parallel gemacht und der Hauptachse zu gebrochen.

In der gemeinsamen Brennebene bringt man eine körperliche Blende an, die nur die mittleren Strahlen durchläßt, die Randstrahlen dagegen und die etwa durch Reflexionen an den Linsenflächen und Linsenfassungen zerstreuten und daher störenden Lichtstrahlen abblendet. Da in der gemeinsamen Brennebene ein reelles Bild des unendlich fernen Gegenstandes entsteht, so begrenzt die hier angebrachte Blende das Gesichtsfeld; sie ist die eigentliche Gesichtsfeldblende des Keplerschen Fernrohres.

Das gegenstandseitige Gesichtsfeld ist durch dasjenige Strahlenbündel bestimmt, dessen Achse S (Fig. 881) durch die Mitte O des Objektivs L_1 geht

und den Rand der Blende Bl berührt. Hat die Blendenöffnung den Halbmesser d, so folgt für den gegenstandseitigen Gesichtswinkel die Gleichung

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{d}{f_1}.$$

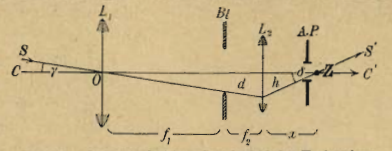

Fig. 881. Gegenstandseitiges Gesichtsfeld des Keplerschen Fernrohres.

Das Gesichtsfeld ist dem Quadrate dieses Ausdruckes proportional. Hieraus folgt:

Das gegenstandseitige Gesichtsfeld des Keplerschen Fernrohres ist der Blendenöffnung direkt, dem Quadrate der Brennweite des Objektivs umgekehrt proportional; es ist von der Brennweite des Okulars und von der Öffnung des Objektivs unabhängig.

Der bildseitige Gesichtsfeldwinkel δ (Fig. 881) ist durch die Vergrößerung bestimmt

$$\frac{\operatorname{tg}\delta}{\operatorname{tg}\gamma} = w = -\frac{f_1}{f_2}$$

$$\operatorname{tg}\delta = -\frac{f_1}{f_2}\cdot\operatorname{tg}\gamma = -\frac{d}{f_2}.$$

Hieraus folgt:

Das bildseitige Gesichtsfeld des Keplerschen Fernrohres ist der Blendenöffnung direkt und dem Quadrate der Brennweite des Okulars umgekehrt proportional.

(Beim holländischen Fernrohre (§ 292) war gerade der Durchmesser des Objektivs für das Gesichtsfeld maßgebend.)

6. **Schlüssellochbeobachtung.** Wenn beim Keplerschen Fernrohre die Austrittspupille in den Augendrehpunkt Z (Fig. 881) gebracht werden kann, so läßt sich auch beim Blicken das Gesichtsfeld voll ausnützen, während beim holländischen Fernrohre der Gesichtsfeldwinkel durch das *Blicken* beschränkt wird. Nicht immer gestattet aber die Einrichtung des Instrumentes, das Auge nahe an das reelle Bildchen, welches das Okular von der Objektivfassung erzeugt, heranzubringen; die Austrittspupille liegt dann vor dem Augendrehpunkte. Das Gesichtsfeld des Fernrohres kann in diesem Falle nur durch diesen kleinen Kreis als Fenster hindurch betrachtet werden. Er schränkt das Gesichtsfeld in ähnlicher Weise ein, wie etwa das Schlüsselloch, durch das hindurch man das Innere eines Zimmers zu überblicken bestrebt ist, das Blickfeld begrenzt. Um dabei ein möglichst großes Gesichtsfeld zu überblicken, nützt es nichts, das Auge in der Höhlung zu drehen, vielmehr muß man seitliche Kopf- und Augenbewegungen zu Hilfe nehmen, um noch Strahlen aufzufangen, die schräg durch das Loch hindurchkommen. Die Mitte des Schlüsselloches, bei uns die Mitte der Austrittspupille, ist dann Perspektivitätszentrum, denn in ihr schneiden sich die Hauptstrahlen unabhängig vom Auge. Beim holländischen Fernrohre ist das von dem Okulare erzeugte Bild des Objektivs virtuell und liegt daher immer zwischen Okular und Objektiv, also weiter von dem Drehpunkte des Auges entfernt. Die Betrachtungen über

die „Schlüssellochbeobachtung“ des Blickfeldes gelten daher sinngemäß auch für das holländische Fernrohr; sie spielen hier aber eine geringere Rolle, da der Abstand der Austrittspupille vom Auge größer ist als beim Keplerschen Fernrohre.

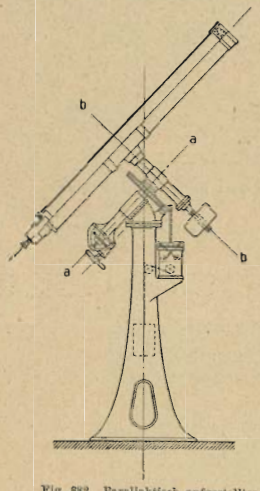

Fig. 882. Parallaktisch aufgestelltes Fernrohr.

7. **Lage des Bildes.** Die unmittelbare Anschauung von Fig. 879 belehrt uns, daß die Sehwinkel φ und ψ zur Achse entgegengesetzt liegen; hieraus folgt, daß der durch das Keplersche Fernrohr beobachtete Gegenstand umgekehrt erscheint. Das stört den wissenschaftlichen Beobachter nicht, besonders dann nicht, wenn er das Fernrohr zur Meßzwecken verwendet. Wenn man aber eine Landschaft oder Personengruppen im umgekehrten Bilde sieht, so ist der Eindruck durchaus nicht derselbe wie bei der Betrachtung in aufrechter Lage. Daher zieht man zur Beobachtung eines Vorganges oder einer Landschaft das holländische Fernrohr vor oder verwendet das im folgenden Paragraphen beschriebene terrestrische Fernrohr.

8. **Parallaktisch aufgestelltes Fernrohr.** Die Fernrohre werden in den Sternwarten meist in der in Fig. 882 dargestellten Weise aufgestellt. Das Fernrohr ist um die Achse aa und die Achse bb drehbar, kann daher in alle Richtungen (nach Stundenwinklung und Abweichung) eingestellt werden. Die Achse aa steht der Erdachse parallel, sie heißt die Polarachse des Fernrohres. An dieser Achse greift ein Uhrwerk an, das sie in 24 Stunden einmal entgegen dem Drehungssinne der Erde, also mit der Bewegungsrichtung der Sterne dreht. Hat man nun einen Stern im Fernrohre eingestellt, so folgt das Fernrohr ohne unser Zutun dem Laufe des Sternes, der Stern bleibt also im Fernrohre dauernd sichtbar. Man nennt diese Art der Aufstellung die **parallaktische Aufstellung** eines Fernrohres.

§ 294. Das terrestrische Fernrohr.

Um die beim Keplerschen Fernrohre störende Umkehrung des Bildes zu beseitigen, bringt man (beschrieben von Kepler um 1611, von Schyrl zu Rheita um 1645) zwischen Objektiv und Okular noch eine Sammellinse (die Umkehrungslinse) an (Fig. 883).

Die in das Fernrohr eintretenden parallelen Strahlen SSS werden durch das Objektiv in der durch den Brennpunkt F_1 des Objektivs gehenden Brennebene im Punkte A zur Vereinigung gebracht. Von hier aus gehen sie auseinanderlaufend weiter und werden darauf durch die Umkehrlinse wieder hinter dieser Linse in B zur Vereinigung gebracht. Ist die Entfernung des Objektiv-

brennpunktes F_1 von der Umkehrlinse gleich der doppelten Brennweite der Umkehrlinse, so liegt (und das ist in der Figur angenommen) auch der Vereinigungspunkt B in der doppelten Brennweite der Umkehrlinse auf der anderen Seite der Fernrohrachse. Von hier aus laufen die Strahlen wieder auseinander und treffen auf das Okular. Liegt B in der ersten Brennebene des Okulars, so verlassen die Strahlen das Okular parallel und treten parallel in die Augenpupille ein. Jetzt treten die Strahlen von derselben Seite der Fernrohrachse in das Auge ein, wie bei der Beobachtung ohne das Fernrohr; der Gegenstand erscheint, auch durch das Fernrohr betrachtet, aufrecht.

In dem hier besonders behandelten Falle, daß der Vereinigungspunkt B von der Umkehrlinse ebensoweit entfernt ist wie der Vereinigungspunkt A, ist der Abstand der Brennebene des Objektivs von der Brennebene des Okulars gleich der vierfachen Brennweite der Umkehrlinse. Um diese Strecke muß also das Keplersche Fernrohr verlängert werden, wenn es durch Zwischenschaltung einer Konvexlinse zu einem terrestrischen Fernrohre umgestaltet werden soll.

Wenn f die Brennweite des Objektivs, f' die Brennweite der Umkehrungs-

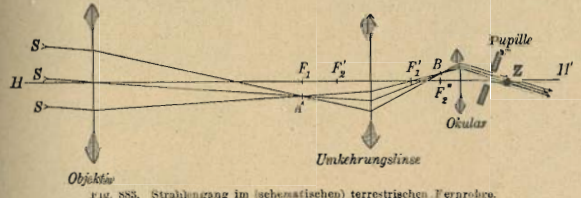

Fig. 883. Strahlengang im (schematischen) terrestrischen Fernrohre.

linse und f'' die Brennweite des Okulars ist, so ist die Länge l des terrestrischen Fernrohres

$$l = f + 4f' + f''.$$

Ein terrestrisches Fernrohr hat immer eine unbequeme Länge.

Dazu kommt noch ein weiterer Übelstand: Die durch das Objektiv zentral hindurchgehenden Strahlen gehen durch die Umkehrlinse nicht zentral hindurch; daher kann die Umkehrlinse selbst als Gesichtsfeldblende wirken und das Gesichtsfeld verkleinern. Endlich bewirken die als Randstrahlen gebrochenen Strahlen eine Vergrößerung der sphärischen Aberration und der Verzeichnung.

Anmerkung: Die obige Darstellung der Bauart eines terrestrischen Fernrohres ist schematisch; wirkliche Ausführungen zeigen davon nach mehrfacher Hinsicht Abweichungen. Wenn man zwei astronomische Fernrohre hintereinanderschaltet und dabei zweckmäßigerweise so verfährt, daß die Austrittspupille des ersten mit der Eintrittspupille des zweiten zusammenfällt, so stellt diese Zusammenstellung auch ein Fernrohr dar, welches aufrechte Bilder liefert. Das Okular des ersten der beiden gedachten Teilfernrohre und das Objektiv des zweiten besorgen dann die Bildumkehr an Stelle der einen in der obigen Darstellung angenommenen Umkehrlinse. In Über-

einstimmung mit dieser Auffassung enthalten die Ausführungen der terrestrischen Fernrohre meist zwei Linsen, denen die Aufgabe der Bildumkehr zukommt. Es ist nicht notwendig, sich die Wirkungsweise eines solchen Fernrohres mit 2 Umkehrlinsen in der angedeuteten Weise vorzustellen; bei manchen Ausführungen ist es zweckmäßiger, die beiden Linsen als Teile eines bildumkehrenden, terrestrischen Okularsystemes (§ 300), an Stelle der einen Okularlinse der schematischen Betrachtung, anzusehen. Dann besteht das terrestrische Fernrohr auch nur aus Objektiv und Okular wie die anderen Gattungen der Fernrohre.

§ 295. Das Prismenfernrohr.

Die beim terrestrischen Fernrohre erwähnten Übelstände sind beim **Zeißschen Prismenfernrohre**[1]) (Fig. 884) vermieden. Die in der Pfeilrichtung in das Objektiv eintretenden Lichtstrahlen werden an den beiden Kathetenflächen eines total reflektierenden, rechtwinkligen Prismas total reflektiert; sie kehren in entgegengesetzter Richtung und parallel zu den einfallenden Strahlen verschoben wieder zurück, fallen nun auf ein zweites total reflektierendes Prisma, dessen Kante rechtwinklig zur Kante des ersten Prismas ist. Hier werden die Strahlen noch einmal durch zweimalige Reflexion in ihrer Richtung umgekehrt und gehen dann in ursprünglicher Richtung, aber parallel verschoben durch das Okular des Fernrohres.

Fig. 884. Strahlengang im Prismenfernrohre.

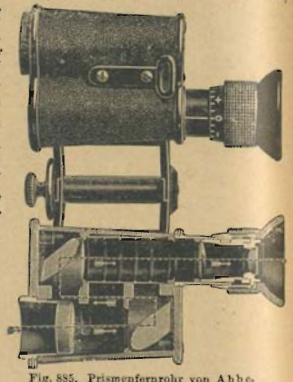

Fig. 885. Prismenfernrohr von Abbe.

Bei den beiden Reflexionen im ersten Prisma werden die Strahlen in ihrer Lage zueinander so vertauscht, daß die oberhalb der Hauptachse und parallel zu ihr eintretenden Strahlen nach unten zu liegen kommen. Infolge der Reflexionen im zweiten Prisma findet in derselben Weise eine Vertauschung

1) Die Verwendung der Umkehrungsprismen ist schon 1850 von dem italienischen Ingenieur Ignazio Porro (meist in Paris lebend) entdeckt worden, und bald darauf hat man in Paris die Herstellung von Prismenfernrohren versucht, aber infolge der durch mangelhafte Glasschmelzen und ungenügende Genauigkeit des Schliffes verursachten Mißerfolge wieder aufgegeben. So ist diese Erfindung bald gänzlich in Vergessenheit geraten. 1893 hat E. Abbe das Prismenfernrohr aufs neue erfunden, und in den Zeißschen Werkstätten sind dann die ersten brauchbaren Prismenfernrohre hergestellt worden. Von den Porroschen Versuchen erfuhr Abbe erst durch das deutsche Patentamt, das sie wieder ans Licht zog und ihretwegen eine Patenterteilung ablehnte.

der Lagen links-rechts statt. Durch die zweifache Vertauschung wird die Anordnung der Strahlen vollkommen vertauscht; daher kommt das ohne die beiden totalreflektierenden Prismen in umgekehrter Lage erscheinende Bild des Gegenstandes sowohl in wagerechter als auch in lotrechter Anordnung in eine Lage, die mit der des Gegenstandes übereinstimmt. Die beiden Prismen ersetzen in ihrer umkehrenden Wirkung die Umkehrungslinse im terrestrischen Fernrohre, ohne die Übelstände der Linse zu haben; denn Randstrahlen im Sinne der Randstrahlen bei Linsen gibt es bei den Prismen nicht, weil alle Teile der ebenen Flächen gleichwertig sind.

Außerdem erreicht man noch den Vorteil, daß wegen des zweifach geknickten Strahlenganges im Fernrohre eine Verkürzung des Fernrohres gegenüber dem Keplerschen Fernrohre möglich ist.

Das Prismenfernrohr wird wegen seiner Kürze oft als zweifaches Fernrohr zum gleichzeitigen Gebrauche mit beiden Augen (binokular) gebaut, wird also als Operuglas oder Feldstecher (Fig. 885) verwandt.

Da die in das Fernrohr eintretenden Strahlen eine seitliche Verschiebung erfahren, so kann man es so einrichten, daß die Objektive weiter auseinanderstehen als die Okulare. Die Folge davon ist, daß ein durch das binokulare Prismenfernrohr schauender Beobachter eine Landschaft so betrachtet, als wären seine Augen weiter auseinander gerückt. Dieser Umstand begünstigt eine Erhöhung der Plastik der betrachteten Landschaft (§ 379).

Anmerkung. Statt zweier Prismen ist in anderen Ausführungen des Grundgedankens nur ein einziges „Umkehrprisma" besonderer Gestalt angewendet worden; Prismenfernrohre mancher Werkstätten enthalten sogar statt total reflektierender Prismenflächen Silberspiegel.

§ 296. Punktförmige Gegenstände.

Um die Wirkungsweise eines Fernrohres beim Betrachten eines fernen Gegenstandes zu verstehen, muß man unterscheiden, ob der Gegenstand trotz der großen Entfernung noch unter einem meßbaren Sehwinkel erscheint, oder ob der Sehwinkel infolge der großen Entfernung unter jedes Maß herabsinkt, der Gegenstand also punktförmig erscheint. Der letztere Fall tritt z. B. bei der Beobachtung eines Fixsternes durch ein Fernrohr ein (S. 861). Ein Fixstern erscheint mit unbewaffnetem Auge, wie auch durch ein Fernrohr betrachtet, punktförmig; daher kann auch von einer eigentlichen Vergrößerung eines einzelnen Fixsternes nicht die Rede sein. Trotzdem verwendet man auch zur Beobachtung des Fixsternhimmels die Fernrohre.

Der Nutzen besteht darin, daß 1. die Abstände zweier Fixsterne voneinander vergrößert erscheinen und daß 2. die Fixsterne heller erscheinen.

Während bei der Betrachtung eines Fixsternes mit unbewaffnetem Auge nur dasjenige Strahlenbündel in das Auge dringt, das die Pupillenöffnung zum Querschnitt hat (die Pupille ist Aperturblende), wird bei Benutzung eines richtig gebauten Keplerschen Fernrohres das Netzhautbild von dem ganzen Strahlen-

bündel erzeugt, das das Objektiv zum Querschnitt hat (das Objektiv ist Aperturblende). Infolgedessen sind punktförmige Objekte in demjenigen Verhältnisse heller, in dem die Größe des Objektivs zur Pupillengröße steht; das ist aber für ein richtig gebautes Fernrohr das Quadrat der Vergrößerung. Der gleichmäßig helle Hintergrund oder flächenhafte Gegenstände können höchstens ihre natürliche Helligkeit erreichen (S. 861). Man sieht daher mit dem Fernrohre auch noch Fixsterne (aber auch nur punktförmig), die wegen ihrer geringen Lichtstärke dem unbewaffneten Auge nicht mehr wahrnehmbar sind.

Aus diesem Grunde verwendet man auf den größeren Sternwarten Fernrohre mit Objektiven von sehr großen Durchmessern. Damit die am Rande des Objektivs eintretenden Lichtstrahlen keine zu große sphärische Aberration erzeugen, muß das Objektiv nicht zu stark gekrümmt sein, also eine sehr große Brennweite haben. Beide Gründe sind die Ursache für die riesenhaften Abmessungen der Fernrohre neuzeitlicher Sternwarten. Es besitzen die Objektive der vier größten Fernrohre, nämlich des Yerks-Observatoriums in Williams Bay Wisc. einen Durchmesser von 102 cm und 19 m Brennweite, der Lick-Sternwarte auf dem Mount Hamilton in Kalifornien 91 cm Durchmesser und 18 m Brennweite, der Sternwarte von Meudon bei Paris 83 cm Durchmesser und 16 m Brennweite, des astrophysikalischen Observatoriums in Paris 80 cm Durchmesser und 12 m Brennweite.

Neben der Helligkeit nimmt auch das **Auflösungsvermögen** (§ 330) der Fernrohre mit wachsendem Objektivdurchmesser zu. Die beiden Teilsterne eines Doppelsternsystemes können also desto leichter voneinander getrennt beobachtet werden, je größer der Objektivdurchmesser d ist. Erfahrungsmäßig ist der kleinste Winkelabstand zweier Sterne, die noch eben getrennt gesehen werden, $\varphi = \frac{116''}{d}$, wenn d in mm gemessen wird. Den Kehrwert $\frac{d}{116''}$ nimmt man als Maß für das Auflösungsvermögen. — Um in einem ausgedehnten Gegenstande viele Einzelheiten zu erkennen, ist es in ähnlicher Weise notwendig, nahe beieinanderliegende Punkte und Linien noch getrennt zur Empfindung zu bringen. Doch liegen hierbei die Verhältnisse nicht so günstig wie bei Doppelsternen; von einem bestimmten Objektivdurchmesser ab trägt eine weitere Vergrößerung des Durchmessers nicht mehr zu einer Vergrößerung des Auflösungsvermögens bei. Für die Erkennung von Einzelheiten auf Planetenscheiben werden Objektivdurchmesser von mehr als $d = 300$ mm kaum ausgenutzt werden können; eine mit größeren Objektiven erzielte stärkere Vergrößerung ist also vielleicht bequem aber an sich nutzlos, da sie nicht mehr Einzelheiten zeigt. — Für die Beobachtung von irdischen fernen Gegenständen ist die Ausnutzung stärkerer Vergrößerungen noch mehr beschränkt. Der Grund ist wesentlich in der Unruhe der Luft, in der unregelmäßigen Durchmischung warmer und kalter Strömungen zu suchen, wodurch der Lichtstrahl unregelmäßig hin- und her abgelenkt wird, so daß die beobachteten Dinge nicht ruhig zu stehen scheinen. Das unregelmäßige Funkeln der Fixsterne am nächtlichen Himmel, das schon mit bloßem Auge zu beobachten und unter dem Namen Szintillation bekannt ist, hat dieselbe Ursache und ist ein Beispiel dieser Störung.

§ 297. Gegenstände, die im Endlichen liegen.

Bisher hatten wir vorausgesetzt, die durch ein Fernrohr beobachteten Gegenstände seien so weit entfernt, daß die von einem Gegenstandspunkte in das Fernrohr eintretenden Strahlen als parallel angesehen werden können. Nun finden die Fernrohre aber auch zur Beobachtung von Gegenständen, die im Endlichen liegen, Anwendung. In diesem Falle muß der Abstand zwischen Okular und Objektiv so vergrößert werden, daß das vom Objektive erzeugte reelle Bild des Gegenstandes mit dem ersten Brennpunkte des Okulars zusammenfällt, wenn das beobachtende Auge auf unendlich eingestellt ist, also ohne Akkommodation beobachtet. Häufig wird allerdings von den Beobachtern so eingestellt, daß sie ihre Akkommodation $1\frac{1}{2}$—2 Diopt. anspannen.

Man muß dann das Fernrohr um so weiter ausziehen, je näher der Gegenstand liegt.

§ 298. Fadenkreuz, Okularmikrometer.

An der Stelle, wo das reelle Bild des Gegenstandes liegt (§ 293, 5.), bringt man bei Fernrohren, die zu Messungen dienen, ein sog. **Fadenkreuz** an, das man mit dem Bilde des Gegenstandes zusammenfallend sieht. Das Fadenkreuz besteht entweder aus einem lotrechten und einem wagerechten feinen Faden (Spinnwebfäden)[1]), deren Schnittpunkt genau in der Achse des Fernrohres liegt, oder aus einem Systeme mehrerer wagerechter und lotrechter Fäden. Endlich ersetzt man das Fakenkreuz auch wohl durch einen auf Glas mit einer feinen Diamantspitze gerissenen, geätzten oder photographierten Maßstab, mit Hilfe dessen man dann sofort die Größe des Sehwinkels ablesen kann, unter dem einzelne Teile des Gegenstandes erscheinen. Solche Maßstäbe heißen **Okularmikrometer**.

§ 299. Das Mikroskop.

1. **Zusammensetzung.** Das zusammengesetzte Mikroskop besteht wie das Keplersche Fernrohr aus einem sammelnden Objektive und einem sammelnden Okulare. Der wesentliche Unterschied besteht darin, daß die in das Objektiv eintretenden Strahlen nicht von einem unendlich fernen Gegenstande ausgehen, also nicht parallel eintreten. Der Gegenstand liegt in der Nähe des ersten Brennpunktes des Objektivs außerhalb der Brennweite. Der hintere Brennpunkt des Objektivs und der vordere des Okulars fallen nicht wie beim Keplerschen Fernrohre zusammen, sondern haben einen bestimmten Abstand δ (optisches Intervall oder Tubuslänge (§ 278, 1.)) voneinander.

Das Objektiv hat die Aufgabe, von einem seinem Brennpunkte sehr nahen Gegenstande ein reelles, stark vergrößertes Bild zu entwerfen. Dieses Bild wird durch das Okular als Lupe betrachtet. Wird also das von einem Projektionsapparate auf einer Mattscheibe entworfene Bild von rückwärts durch eine Lupe betrachtet, so ist die Zusammenstellung des Projektionsobjektivs und der Lupe im Wesen ein zusammengesetztes Mikroskop.

1) Aus dem Eierkokon der Kreuzspinne.