

E 914

NATURWISSENSCHAFTLICHE
MONOGRAPHIEN UND LEHRBÜCHER
FÜNFTER BAND

Biblioteka Główna i OINT
Politechniki Wrocławskiej



100100088977

DIE FERNROHRE UND ENTFERNUNGSMESSER

VON

A. KÖNIG

MIT 254 ABBILDUNGEN



BERLIN
VERLAG VON JULIUS SPRINGER

1923

NATURWISSENSCHAFTLICHE MONOGRAPHIEN UND LEHRBÜCHER

HERAUSGEGEBEN VON
DER SCHRIFTFLEITUNG DER „NATURWISSENSCHAFTEN“

FÜNFTER BAND
DIE FERNROHRE
UND ENTFERNUNGSMESSER

VON
A. KÖNIG



BERLIN
VERLAG VON JULIUS SPRINGER

1923

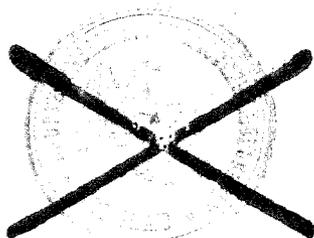
DIE FERNROHRE UND ENTFERNUNGSMESSER

VON

A. KÖNIG

DR. PHIL., BEAMTEN
DES ZEISS-WERKES

MIT 254 ABBILDUNGEN

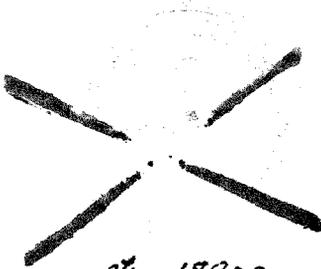


BERLIN

VERLAG VON JULIUS SPRINGER

1923

1022.1025



No. 18920.

ALLE RECHTE, INSBESONDERE DAS DER ÜBERSETZUNG IN FREMDE
SPRACHEN, VORBEHALTEN.

COPYRIGHT 1923 BY JULIUS SPRINGER IN BERLIN.



Vorwort.

Das Fernrohr dient neben der Beobachtung entfernter Gegenstände besonders der feineren Winkelmessung. Seine Anwendung in der Astronomie und Geodäsie zu verfolgen, lag daher nahe. Ich habe statt dessen seine Anwendung für die Entfernungsmessung gewählt, weil dies ein Beispiel genügend Gelegenheit bietet, auf die verschiedensten Hilfsmittel und Bedingungen einer feineren Winkelmessung einzugehen. Die Ausbildung des Entfernungsmessers in den letzten Jahrzehnten war zwar vorwiegend durch die Bedürfnisse des Kriegs bestimmt; sie ist aber schon dadurch lehrreich, daß sie nur durch volles Ausnutzen der heutigen Hilfsmittel der Technik erreicht werden konnte, und möchte auch dem Anregung bieten, der sich mit anderen optischen Aufgaben beschäftigt. Die aussichtsreiche Stereophotogrammetrie ist hier aus Mangel an Raum nicht behandelt; zudem liegen gute Darstellungen, wie die von ihrem Begründer, meinem Kollegen PULFRICH, vor.

Bei der Darstellung habe ich mit möglichst wenigen und einfachen mathematischen Hilfsmitteln auszukommen gesucht, außer in den kleingedruckten Abschnitten, die beim ersten, weniger eingehenden Lesen des Buchs überschlagen werden können. Der beschränkte Umfang des Buchs verbot die Anführung der Quellen und die Schilderung der geschichtlichen Entwicklung; es sind nur die wichtigeren Namen und Jahreszahlen ohne strenge Grundsätze für die Auswahl genannt.

Jena, im September 1922.

A. König.

Inhaltsverzeichnis.

A. Die Fernrohre.

Seite

I. Die Abbildung durch das Fernrohr.

1. Die Abbildungsgesetze	I
2. Die Strahlenbegrenzung	8
3. Das Auge und sein Gebrauch beim Sehen	13
4. Das Sehen durch das Fernrohr	18
5. Die Bildfehler	22
6. Die Bilderzeugung vom Standpunkt der Beugungslehre	34

II. Der Bau des Fernrohrs.

1. Die astronomischen Okulare	39
2. Das holländische (GALILEISCHE) Fernrohr	43
3. Das astronomische (KEPLERSCHE) Fernrohr. (Der Refraktor)	47
4. Das Prismenfernrohr (PORROSCHES Fernrohr)	52
5. Das terrestrische Fernrohr (Erdfernrohr)	58
6. Die Fernrohre mit Vergrößerungswechsel	60
7. Die Periskope. (Ausblickrohre, Sehrohre)	62
8. Die Spiegelfernrohre (Reflektoren)	70
9. Die Montierungen	81
10. Das beidängige Sehen	85
11. Die Doppelfernrohre	92
12. Die Doppelblickfernrohre	100
13. Die Prüfung der Fernrohre	102
14. Die Bildlage bei Spiegelgruppen und ihre Abhängigkeit von Drehungen der Gruppe	108

III. Die Richtfernrohre.

1. Die Wirkungsweise der Richtfernrohre	111
2. Die Gewehrzielfernrohre	117
3. Die Geschützzielfernrohre	121
4. Die Prüfung der Parallelität von Visierlinie und Seelenachse des Ge- schützes	123
5. Die Genauigkeit des Zielens	125

B. Die Mikrometer.

1. Die Fadenmikrometer	129
2. Der Strahlengang sowie die Abbildungs- und Auffassungsfehler bei Messungen	132
3. Die Bilderpaarmikrometer	134

C. Die Entfernungsmesser.

	Seite
I. Einteilung und Genauigkeitsgrundlagen	141
II. Die Zielwinkelentfernungsmesser.	
1. Militärische Entfernungsmesser	143
2. Geodätische Entfernungsmesser	145
III. Die Zweistandentfernungsmesser	151
IV. Die Einstandentfernungsmesser.	
1. Die Fadenentfernungsmesser	154
2. Die Halbbilderentfernungsmesser	157
3. Die Raumbilderentfernungsmesser (Stereotelemeter)	167
V. Die Justiereinrichtungen der Einstandentfernungsmesser.	
1. Die Justierverfahren mit einfacher Messung	175
2. Die Justierverfahren mit Doppelmessung	181
VI. Die Genauigkeit der Einstandentfernungsmesser	190
VII. Die Hochstandentfernungsmesser	192
VIII. Besondere Einrichtungen und Bauarten der Entfernungsmesser	198
Namenverzeichnis	201
Sachverzeichnis	203

A. Die Fernrohre.

I. Die Abbildung durch das Fernrohr.

1. Die Abbildungsgesetze.

Das Fernrohr dient dazu, dem Auge von entfernten Gegenständen ein Bild in gewünschter Lage und Größe zu bieten. Nun kommt der Eindruck auf das Auge dadurch zustande, daß von den Punkten des Gegenstandes bzw. Bildes Lichtstrahlenbüschel ausgehen und vom Auge aufgenommen werden. Es sollen also die vom Gegenstand ausgehenden Büschel so gebrochen bzw. gespiegelt werden, daß die Strahlen jedes einzelnen Büschels nachher wieder von einem entsprechenden Punkt, dem Bildpunkt, ausgehen, deren geordnete Gesamtheit dann in dem Auge den Eindruck des Bildes des Gegenstandes hervorruft. Dazu dient gewöhnlich ein System von brechenden oder spiegelnden Kugelflächen, die zum Teil auch Ebenen sein können. Wir nehmen weiter an, daß dies System zentriert ist, d. h. die Kugelmittelpunkte auf einer Achse, der Systemachse, liegen, und daß es vorn und hinten an das gleiche Mittel, meist Luft, grenzt. Ein durch zwei Kugelflächen abgeschlossenes Glasstück bezeichnet man als Linse; als Ersatz für Glas können gelegentlich andere durchsichtige Stoffe, wie Kristalle und Flüssigkeiten, dienen. Enthält das System Spiegel, die nicht senkrecht zur Achse stehen, so stellt die Achse eine gebrochene Linie dar, die der Weg des Lichtstrahls ist, der durch sämtliche Kugelmittelpunkte geht; auf solche Systeme wird erst S. 52 eingegangen. Sieht man zunächst von den Unvollkommenheiten der Abbildung, den Bildfehlern (S. 22), eines solchen Systems ab, so gehorcht eine ideale Abbildung folgenden einfachen Gesetzen. Jedem Punkt und damit vermöge der Bilderzeugung durch geradlinige Strahlen auch jeder Geraden und jeder Ebene im Dingraum, der alle Schnittpunkte der in das System einfallenden Strahlen umfaßt, entspricht ein und nur ein Punkt, eine Gerade, eine Ebene im Bildraum, der alle Schnittpunkte der aus dem System austretenden Strahlen umfaßt; insbesondere entspricht infolge der Achsensymmetrie des Systems der Achse im Dingraum die Achse im Bildraum, einer achsen-senkrechten Ebene eine ebensolche, und Ebenen durch die Achse ebensolche, die die gleichen Winkel miteinander bilden. In Abb. 1 ist ein

allgemeines System durch zwei Kugelflächen abgeschlossen dargestellt. Die Lichtstrahlen sollen, wie im folgenden immer, wenn nichts anderes bemerkt, von links nach rechts verlaufen. Der unendlich fernen Ebene im Dingraum entspricht die in F' , dem hinteren Brennpunkt, senkrecht zur Achse stehende Ebene (hintere Brennebene) im Bildraum, ebenso entspricht bei entgegengesetzter Lichtbewegung der unendlich fernen Ebene die vordere Brennebene durch den vorderen Brennpunkt F . Da nun die Lichtwege umkehrbar sind, entspricht der vorderen Brennebene im Dingraum die unendlich ferne Ebene im Bildraum. Es entspricht also einem im Abstände y von der Achse parallel zu ihr einfallenden Strahl AG im Dingraum ein Strahl $G'F'$ im Bildraum und einem Strahl FG ein Strahl $G'A'$, der parallel zur Achse im Abstand y verläuft. G' ist der Bildpunkt von G , und die achsensenkrechte Ebene durch G' das Bild der durch G . man bezeichnet diese Ebenen als vordere und hintere Hauptebene und ihre Schnittpunkte H und H'

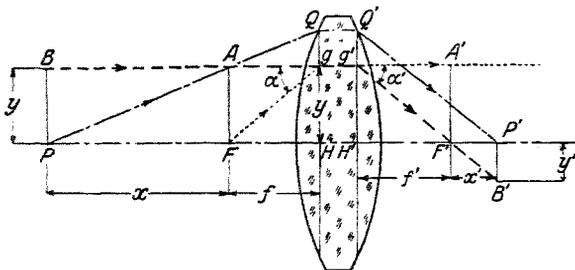


Abb. 1. Zur Abbildung durch ein optisches System.

mit der Achse als Hauptpunkte. Wenn das System beiderseits an das gleiche Mittel, gewöhnlich Luft, grenzt, so sind die Abstände FH und $H'F'$ gleich, wie sich aus folgender Betrachtung ergibt. Wir denken uns bei kleinem Abstände $GH = y$, daß die Linie GH Licht nach rechts aussendet, und zwar innerhalb des Winkels $\alpha = AGF$ mit der Intensität i , das Licht wird im Bildraum von der Linie $G'H'$ innerhalb des Winkels $\alpha' = A'G'F'$ weitergestrahlt, die Intensität sei i' . Sieht man von den Verlusten durch Reflexion und Absorption ab, so ist nach den Lehren der Physik $i = i'$. Da nun die Lichtmenge $iy\alpha = i'y\alpha'$ erhalten bleibt, so muß $y\alpha = y'\alpha'$, $\alpha = \alpha'$, mithin $FH = H'F'$ sein, eine Größe, die man als die Brennweite f bezeichnet. Zeichnet man nun zu dem Strahl PQ den Bildstrahl $P'Q'$, der die hintere Hauptebene in gleicher Höhe wie die vordere schneiden muß und, da PQ die vordere Brennebene in dem gleichen Punkt A wie AG durchstößt, parallel $G'F'$ verlaufen muß, so ergibt sich, wenn $FP = -x$ und $F'P' = x'$ gesetzt wird, indem man die Abstände von den Brennpunkten im Sinne der Lichtbewegung positiv rechnet, aus $AF:QH = G'H':Q'H'$

$$\frac{-x}{-x+f} = \frac{f}{x'+f}$$

oder

$$(1) \quad xx' = -f^2;$$

ferner gilt, wenn man die $PB = y$ entsprechende Bildstrecke $P'B' = -y'$ setzt und die Vergrößerung $y':y$ des Bildes mit β bezeichnet,

$$(2) \quad \beta = \frac{y'}{y} = \frac{-x'}{f} = \frac{f}{x}.$$

Ist die Achse eine wagrechte Gerade, so rechnet man im Ding- und Bildraum die Strecken nach oben positiv; ist sie gebrochen, so ist im Bildraum die Strecke positiv, die der positiven Strecke im Dingraum entspricht, wenn die Wirkung der Kugelflächen unberücksichtigt bleibt. Abb. 2 zeigt die Lage und Größe der Bilder für verschiedene Dingabstände bei einem System mit positiver Brennweite.

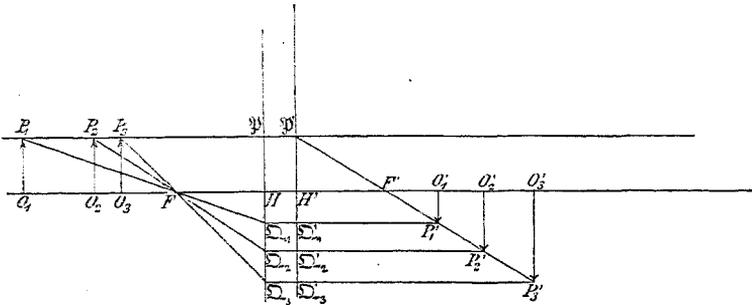


Abb. 2. Die Abbildung durch ein sammelndes System für verschiedene Dingabstände.

Mit Hilfe der Formeln (1) und (2) ist Lage und Größe des Bildes bestimmt; man bezeichnet die achsenkrechten Ebenen in den Abständen x und x' als zugeordnete (konjugierte) Ebenen; jede Strecke in der einen Ebene erscheint in der anderen im gleichen Verhältnis vergrößert. Diese Streckenvergrößerung bezeichnet man auch als Lateral- (Quer-) vergrößerung β , daneben spricht man von dem Konvergenzverhältnis γ , dem Verhältnis des tangens der Neigung eines Bildstrahls zur Achse zum tangens der Neigung des zugehörigen Dingstrahls, das sich gleich dem Kehrwert der Lateralvergrößerung ergibt, ferner von der Axial- (Tiefen-) vergrößerung, dem Verhältnis des Bildes einer Achsenstrecke zu ihr selbst, das sich gleich dem Produkt der Lateralvergrößerungen für die Enden der Strecke ergibt. Ist der Gegenstand oder das Bild unendlich entfernt, so wird die Größe nicht mehr durch y , sondern durch die scheinbare Größe, die Winkelgröße α oder α' , unter der er dem Auge erscheint, gemessen. Da nun $\text{tg } \alpha = y : x$ und $\text{tg } \alpha' = y' : x'$ ist, so gilt in diesen Fällen an Stelle von Formel (2)

$$(3) \quad y' = f \operatorname{tg} \alpha,$$

$$(4) \quad \operatorname{tg} \alpha' = -y':f.$$

Man kann Ding- und Bildabstand auch von den Hauptpunkten rechnen; für diese Abstände a und a' gelten die umgeformten Abbildungsgleichungen (1) und (2)

$$(5) \quad \frac{1}{a} + \frac{1}{f} = \frac{1}{a'},$$

$$(6) \quad \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a}.$$

Betrachtet man die Strahlen durch einen Punkt in der Hauptebene im Abstand h von der Achse, so ist $h:a$ die Neigung dieser Strahlen, und Formel (5) bringt zum Ausdruck, daß man die entsprechenden Neigungen $h:a'$ erhält, wenn man die ersten Neigungen um die gleichen Stücke $h:f$ ändert; $1:f$ stellt so die ablenkende Kraft des Systems, bezogen auf die Einfallshöhe 1, dar.

Wenden wir uns nun zur Abbildung durch das Fernrohr, so ist es, um das Wesentliche der Wirkungsweise besser hervortreten zu lassen, zweckmäßig, sich zunächst auf den Fall zu beschränken, daß es ein teleskopisches System ist, d. h. daß es die unendlich entfernte Ebene als ebensolche abbildet. Ein solches System erhält man, wenn man zwei gewöhnliche Systeme so zusammensetzt, daß der hintere Brennpunkt des ersten mit dem vorderen des zweiten zusammenfällt. Wendet man Gleichung (3) und (4) auf einen parallel zur Achse einfallenden Strahl an, so ergibt sich bei Unterscheidung der beiden Teilsysteme durch die Zahlen 1 und 2

$$(7) \quad -y_2 : y_1 = f_2 : f_1,$$

da $\alpha'_1 = \alpha_2$ ist. Wendet man sie auf einen Strahl an, der zwischen den Systemen parallel zur Achse verläuft, so ergibt sich

$$(8) \quad -\operatorname{tg} \alpha'_2 : \operatorname{tg} \alpha_1 = f_1 : f_2,$$

da $y'_1 = y_2$ ist. $\operatorname{tg} \alpha'_2 : \operatorname{tg} \alpha_1 = \Gamma$ bezeichnet man als Fernrohrvergrößerung, da man hier mit der scheinbaren Größe rechnen muß. Man

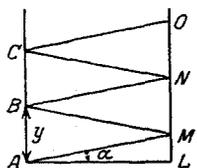


Abb. 3. Zur Abbildung durch ein teleskopisches System.

könnte nun die Abbildungsgesetze eines teleskopischen Systems ableiten, indem man die Formeln (1) und (2) auf die Teilsysteme anwendet, man erhält sie jedoch unmittelbar wie folgt. Zunächst gilt wieder der S. 1 ausgesprochene erste Satz über die Abbildung des gewöhnlichen Systems. Beim teleskopischen System werden weiter parallele Bündel wieder als parallele abgebildet. Denkt man sich nach Abb. 3 zwischen zwei achsensenkrechten Ebenen im Dingraum Strahlen mit abwechselnd entgegengesetzter Neigung zur Achse, die also einen Zickzackweg von gleicher Steigung bestimmen, so muß wegen der Symmetrie der Nei-

gung zur Achse das Bild dieses Wegs wieder gleichbleibende Steigung zeigen; die Punkte A, B, C und ebenso M, N, O in den gleichen Abständen y werden als solche in gleichen Abständen y' abgebildet. Es ist also die Lateralvergrößerung $\iota : \Gamma$ in der ganzen Ebene gleich, und dieselbe Vergrößerung besteht auch für alle anderen zugeordneten achsensenkrechten Ebenen, da man sich durch A, B, C Geraden parallel zur Achse gelegt denken kann, deren Bilder wieder parallel zur Achse sind. Da jeder Strahl durch die Durchstoßungspunkte in zwei achsensenkrechten Ebenen bestimmt ist, so ergibt sich für die Strahlneigungen, daß $\text{tg } \alpha' : \text{tg } \alpha$ für den ganzen Raum denselben Wert hat. Wendet man weiter den oben erwähnten Satz der Physik über die Lichtstrahlung an, so ergibt sich, wenn das Fernrohrsystem beiderseits an Luft grenzt, zunächst für kleine Strahlneigungen zur Achse $\alpha' : \alpha = \Gamma$, damit aber auch für größere Neigungen $\text{tg } \alpha' : \text{tg } \alpha = \Gamma$. Da $z AL = y : \text{tg } \alpha$ ist, folgt ferner für die Axialvergrößerung $A'L' : AL$ der Wert $\iota : \Gamma^2$; derselbe Wert gilt für das Verhältnis aller Strecken parallel zur Achse.

Nachdem wir die Gesetze, denen eine vollkommene Abbildung gehorchen muß, kennengelernt haben, müssen wir auf die weniger vollkommenen Mittel zu ihrer Verwirklichung eingehen. Das allgemeine optische System können wir uns in Teile zerlegt denken, die jedes für sich eine Teilabbildung besorgen. Die aufeinanderfolgenden Teilabbildungen, bei denen von der zweiten ab das von den vorhergehenden Teilen entworfene Bild als Gegenstand gilt, ergeben die Abbildung des ganzen Systems. Als solche Teile kommen in Betracht: der Planspiegel, die planparallele Platte, der Kugelspiegel und die dünne Linse. Unter einer dünnen Linse bzw. einem dünnen System verstehen wir ein solches, bei dem die Dicken und Abstände so klein sind, daß ihr Einfluß als unerheblich für den vorliegenden Zweck angesehen werden kann; auch wenn die Dicken und Abstände etwas größer sind, gelten die einfacheren Gesetze für das dünne System wenigstens angenähert. Bei der Abbildung durch einen ebenen Spiegel wird jeder senkrecht einfallende Strahl in sich zurückgeworfen, es liegt also ein teleskopisches System mit der Vergrößerung ι vor, die Spiegelebene wird in sich selbst abgebildet. Ein besonderes Merkmal dieser Abbildung besteht darin, daß die Bilder, wie man sich ausdrückt, spiegelverkehrt sind. Gegenstand und Bild sind in bezug auf die Spiegelebene symmetrisch gleich. Man nennt eine solche Abbildung rückwendig im Gegensatz zu rechtwendig; wenn in der achsensenkrechten Dingebene nach Polarkoordinaten gerechnet wird, so muß ein Beobachter, der sowohl im Ding- wie im Bildraum entgegengesetzt der Lichtfortpflanzung blickt, bei der rechtwendigen Abbildung die Polarwinkel in der Bildebene in demselben Drehsinn wie in der Dingebene rechnen, bei rückwendiger entgegengesetzt. Bei zwei Spiegelungen ist die Abbildung wieder rechtwendig, überhaupt bei einer geraden Anzahl Spiegelungen, während sie bei einer ungeraden Anzahl

rückwendig ist. Auf die Wirkung von Spiegelgruppen wird S. 52 und 108 noch näher eingegangen werden. Die Abbildung durch eine planparallele Platte ist ebenfalls die eines teleskopischen Systems mit der Vergrößerung 1, da die senkrecht einfallenden Strahlen ungebrochen durchgehen; sie ist aber rechtwändig. Die schräg einfallenden Strahlen erfahren beim Ein- und Austritt eine Ablenkung (Abb. 4); sind i bzw. r die Winkel des Strahls in Luft

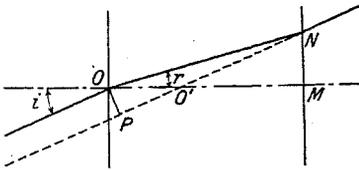


Abb. 4. Der Durchgang des Lichts durch eine planparallele Platte.

bzw. in der Platte mit dem Einfallslot, der Senkrechten im Einfallspunkt, und ist n das Brechungsverhältnis, das die optische Wirkung des Plattenstoffs kennzeichnet, so lautet das Brechungsgesetz

$$(9) \quad \sin i = n \sin r,$$

außerdem bleibt der Strahl in der Ebene durch ihn und das Einfallslot, der Einfallsebene. Auch der schräge Strahl hat also nach dem Austritt wieder die Richtung wie beim Eintritt, er ist aber bei einer Dicke $d = OM$ der Platte um $OP = e$, wo

$$(10) \quad e = \frac{d \sin(i - r)}{\cos r}$$

ist, quer zum einfallenden Strahl versetzt. Die Verschiebung OO' des Schnittpunkts auf der Achse beträgt

$$(11) \quad g = \frac{e}{\sin i} = d \left(1 - \frac{\operatorname{tg} r}{\operatorname{tg} i} \right).$$

Da nun $\sin i : \sin r$ konstant ist, kann es $\operatorname{tg} r : \operatorname{tg} i$ nicht sein; der Schnittpunkt ist also von der Strahlneigung abhängig, d. h. es findet kein strenges punktförmiges Zusammenlaufen der Strahlen eines Büschels nach dem Durchgang durch die Platte statt; die Abbildung ist unvollkommen; nur wenn man sich auf kleine Neigungen zur Achse beschränkt, so daß das Verhältnis der tangens gleich dem der sinus ist, und

$$(12) \quad g = \frac{n - 1}{n} d$$

gesetzt werden kann, d. h. für einen fadenförmigen Raum um die Achse, sind die allgemeinen Abbildungsgesetze anwendbar. Man kann diese Gesetze auch als angenäherte für die wirkliche Abbildung ansehen, die um so genauer gelten, je besser die Strahlenvereinigung ist. Wir werden später (S. 22) noch die Bildfehler und die Erweiterung der Abbildung auf einen größeren Raum besprechen. Die Verschiebung des Bildpunkts gegen den Dingpunkt ist für alle Dinglagen gleich, da die Abbildung im Maßstab 1 erfolgt. Denkt man sich die zweite Fläche der Planplatte durch eine Kugelfläche ersetzt oder, was auf dasselbe hinauskommt, eine dünne

plankonvexe Linse aus dem gleichen Stoff auf sie aufgelegt (eine Fläche wird als erhaben [konvex] oder hohl [konkav] nach der der Luft zugekehrten Seite bezeichnet), deren Krümmungsmittelpunkt in der ersten Fläche liegt, so wird ein von diesem Punkt O ausgehendes Strahlenbüschel ungebrochen durchgelassen, da die Strahlen die Kugelfläche senkrecht durchsetzen. Nimmt man die Planplatte fort und läßt von dem Punkt O' , der als Bildpunkt in bezug auf die Planplatte O zugeordnet ist, ein Strahlenbüschel ausgehen, so wird dies durch die dünne Linse so gebrochen, daß der zu O' zugeordnete Bildpunkt nach O fällt. Setzt man in Formel (5) für α den Wert $r : n$ und für α' den Wert r ein, wo $r = -d$ der Krümmungsradius ist, und wo r positiv gerechnet wird, wenn der Abstand des Krümmungsmittelpunktes vom Flächenscheitel im Dingraum im Sinne der Lichtbewegung positiv ist, so erhält man die zur Berechnung von f geeignete Formel:

$$(13) \quad \frac{1}{f} = \pm \frac{n-1}{r},$$

wo $+$ oder $-$ gilt, je nachdem die Kugelfläche die vordere oder hintere Fläche der Linse ist. Bei der dünnen Linse fallen die Hauptebenen zusammen und in den gemeinsamen Scheitel ihrer Kugelflächen; der Brennpunkt Abstand ist gleich der Brennweite. Für eine dünne Linse mit den beiden Radien r_1 und r_2 ergibt sich aus Formel (5), wenn man sie durch eine Planfläche in zwei Teillinsen mit je einer Planfläche zerlegt denkt und den Dingpunkt in den vorderen Brennpunkt der ersten Teillinse verlegt,

$$(14) \quad \frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Beim Kugelspiegel fallen die Hauptebenen ebenfalls zusammen und in den Spiegelscheitel; die Abbildung ist rückwändig. Das Bild des Kugelmittelpunktes fällt mit diesem zusammen, da die Strahlen senkrecht auf den Spiegel fallen und in sich zurückgeworfen werden. Die Anwendung von Formel (5) gibt

$$(15) \quad \frac{1}{f} = - \frac{2}{r}.$$

Es sei noch ohne Beweis bemerkt, daß bei der dünnen Linse und dem Kugelspiegel ebenfalls nur in dem fadenförmigen Raum um die Achse punktförmige Abbildung stattfindet. Den Kehrwert q des Radius bezeichnet man als Krümmung, der zweite Klammerausdruck in (14) stellt also den Krümmungsunterschied dar. Den Kehrwert q der Brennweite bezeichnet man als Stärke oder Brechkraft, man mißt die Stärke bei Brillengläsern in Dioptrien (dptr), wo 1 dptr der Brennweite von 1 m entspricht. Man unterscheidet sammelnde und zerstreue Systeme, je nachdem f positiv oder negativ ist; bei dem System der

zweiten Art kehrt sich die Lage der Brennpunkte zu den Hauptpunkten um, so daß der vordere Brennpunkt hinten liegt. Man bezeichnet einen Ding- bzw. Bildpunkt, also auch den Brennpunkt als reell oder virtuell, zugänglich oder unzugänglich, je nachdem sich die Ding- bzw. Bildstrahlen selbst oder nur ihre Verlängerungen in dem Punkte schneiden; die Brennpunkte einer dünnen Zerstreuungslinse sowie die eines erhabenen Kugelspiegels sind z. B. virtuell. Abb. 5 zeigt die Lage und Größe der Bilder für verschiedene, gewöhnlich virtuelle, Dinglagen bei einem System mit negativer Brennweite. Wandert bei einem sammelnden bzw. zerstreuenden System der Gegenstand auf der Achse in der Lichtrichtung bzw. ihr entgegen vom vorderen Brennpunkt F bis ∞ und weiter von ∞ bis F , so wandert das Bild immer in gleicher Richtung mit und zwar von ∞ bis F' und weiter bis ∞ ; die Vergrößerung V nimmt dabei fortwährend ab und zwar von ∞ über 0 bis $-\infty$. Ausgezeichnete Dinglagen sind außer F mit $V = \infty$ der vordere Hauptpunkt H mit $V = 1$, der unendlich ferne Punkt mit $V = 0$ und der Punkt mit $V = -1$, der von H den doppelten gleichgerichteten Abstand wie von F hat.

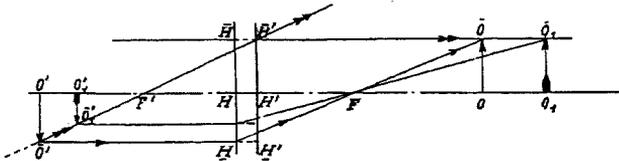


Abb. 5. Die Abbildung durch ein zerstreues System für verschiedene Dingabstände.

Es mögen hier einige Bemerkungen über die Wirkung eines Glaskeils eingeschaltet werden. Denkt man sich die Glasplatte durch einen Schnitt senkrecht zu ON in zwei Glaskeile von dem gleichen Keilwinkel (brechenden Winkel) τ zerlegt, so ist die Ablenkung für einen solchen Glaskeil $i - \tau$ und für kleine Winkel $(n - 1)\tau$. Dies Verhältnis des Ablenkungs- zum Keilwinkel ist bei kleinem Einfallswinkel unabhängig von diesem, wie sich ergibt, wenn man den Glaskeil bei anderem Einfallswinkel wieder durch einen Schnitt senkrecht zum Strahl im Glase in zwei Keile zerlegt und die Summe ihrer Ablenkungen bestimmt.

2. Die Strahlenbegrenzung.

Infolge der beschränkten Größe der Flächen des Systems wird nur ein Teil der von den Punkten des Gegenstands ausgehenden Strahlen aufgenommen und für die Bilderzeugung wirksam. Für die Größe und Lage des Bildes nach den vorher entwickelten Abbildungsgesetzen ist es ohne Bedeutung, ob die zur Konstruktion des Bildes benutzten Strahlen wirklich von dem System durchgelassen werden, da alle Strahlen in einem Punkt vereinigt werden. Aber schon bei der Untersuchung der Fehler der Strahlenvereinigung, die das praktische System gegenüber dem vor-

ausgesetzten idealen zeigt, ist es wesentlich, welche Strahlen bei der Bilderzeugung beteiligt sind. Auch davon abgesehen bestimmt die Strahlenbegrenzung Helligkeit, Gesichtsfeld, Abbildungstiefe und Perspektive in der nun zu erläuternden Weise. Der Einfachheit halber sollen diese Eigenschaften zunächst untersucht werden, ohne, wie es beim Fernrohr nötig ist, das Auge mit einzubeziehen. Es soll nur angenommen werden, daß das Bild auf einer Umdrehungsfläche zur Achse aufgefangen wird; man bezeichnet sie als Auffangschirm und die zugeordnete Fläche im Dingraum als Einstellfläche. Die Begrenzungen der Kugelflächen (inneren Fassungsränder) bezeichnet man neben anderen strahlenbegrenzenden mechanischen Teilen als Blenden, jede möge ein zur Achse zentrischer und senkrechter Kreis sein. Verfolgt man vom Scheitel der Einstellfläche aus einen Strahl von bestimmter Neigung durch das System (beim Fernrohr ist meist der Scheitel der Einstellfläche unendlich entfernt und dann ein achsenparalleler Strahl von bestimmter Einfallshöhe zu wählen) und stellt die Verhältniszahlen der Blendenhalbmesser zu den Durchtritts-

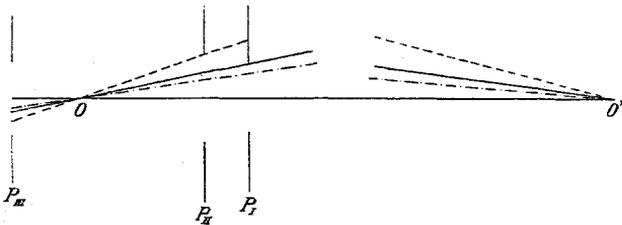


Abb. 6. Zur Ermittlung der Öffnungsblende.

höhen in den Blenden fest, so ist für die Öffnung des wirklich aufgenommenen Strahlenbüschels die Blende mit der kleinsten Verhältniszahl maßgebend, siehe Abb. 6 (genau genommen muß die Rechnung für einen Strahl mit einer in diesem Verhältnis geänderten Neigung wiederholt werden), und wir wollen annehmen, daß man auch für Strahlen, die von anderen Punkten der Achse innerhalb des Teils des Dingraums ausgehen, der im Gebrauch für die Abbildung in Betracht kommt, auf dieselbe Blende geführt wird. Man bezeichnet diese Blende als Öffnungsblende (Aperturblende) und ihr durch gedachte Rückstrahlung im Dingraum entworfenen Bild als Eintrittspupille, ihr Bild im Bildraum als Austrittspupille, beim Fernrohr auch wohl als Augenkreis; es kann auch vorkommen, daß die Öffnungsblende selbst Eintritts- oder Austrittspupille ist. Nach den Abbildungsgesetzen gehen alle durch die Eintrittspupille gehenden Strahlen auch durch die Aperturblende und die Austrittspupille; beim teleskopischen System ist das Verhältnis der Durchmesser von Ein- und Austrittspupille gleich der Fernrohrvergrößerung V . Beim Fernrohr kann die Eintritts- bzw. Austrittspupille für eine ferne Einstellfläche ermittelt werden, indem man die Größe aller Blendenbilder im Ding- bzw. Bild-

raum (sie können auch virtuell sein) ausmißt und feststellt, welches das kleinste ist. Die Austrittspupille liegt meist nahe an der letzten Linse; man sieht sie dann als helles Scheibchen, wenn man sich mit dem Auge etwa 25 cm von dieser Linse entfernt.

Für die Helligkeit des Bildes ist einerseits die Strahlenmenge, andererseits die spezifische Intensität der Strahlen maßgebend. Die aufgenommene Strahlenmenge ist für weit entfernte Gegenstände durch die Flächen-größe der Eintrittspupille bestimmt, die von dem Fernrohr weitergegebene durch die der Austrittspupille; ihrer Fläche entspricht die relative Lichtstärke des Fernrohrs, als Maßeinheit dient ein Kreis von 1 mm Durchmesser. Die spezifische Intensität wird durch Verluste infolge Absorption und Reflexion durch die Glasteile des Fernrohrs vermindert. Das Produkt aus der relativen Lichtstärke und diesem Verlustfaktor bezeichnet man als absolute Lichtstärke. Die Lichtdurchlässigkeit des Glases nimmt mit wachsender Dicke und mit abnehmender Wellenlänge des Lichts ab, aber noch bei $\lambda = 0,48 \mu$ liegt der Durchlässigkeitsfaktor für 100 mm Glasdicke bei den meisten für Fernrohre benutzten Gläsern zwischen 0,94 und 0,97. Die Verluste durch Reflexion kann man angenähert nach der Zahl z der Flächen gegen Luft bemessen, wenn man ein mittleres Brechungsverhältnis von 1,56 zugrunde legt; der Durchlässigkeitsfaktor ist dann $0,952^z$.

Verfolgt man von der Mitte der Eintrittspupille aus einen zur Achse geneigten Strahl (man bezeichnet einen solchen als Hauptstrahl) und vergleicht wieder die Blendenhalbmesser mit den Durchtrittshöhen dieses Strahls, so ist die Blende mit der kleinsten Verhältniszahl dafür maßgebend, in welcher seitlichen Ausdehnung Gegenstände durch das System abgebildet werden, sie heißt daher Gesichtsfeldblende, ihr dingseitiges bzw. bildseitiges Bild Eintritts- bzw. Austrittsluke, weil sie wie ein Fenster oder eine Luke einen Bildausschnitt abgrenzt. Für die hier zu beantwortenden Fragen genügt es, entweder Eintrittspupille und -luke sowie Einstellungsfläche oder Austrittspupille und -luke sowie Auffangschirm zu kennen, je nachdem man die Verhältnisse im Ding- oder Bildraum untersuchen will; das erste ist im allgemeinen vorzuziehen. In Abb. 7 ist B der Ort der Aperturblende und L_1 der Eintrittsluke. Geht die Einstellfläche durch den Rand der Luke, so ist das Gesichtsfeld scharf begrenzt; $2w$ ist der dingseitige Gesichtswinkel, wo $\operatorname{tg} w$ durch das Verhältnis des Halbmessers g der Luke zu ihrem Abstand a von der Eintrittspupille gegeben ist. Geht die Einstellungsfläche nicht durch den Rand der Luke, so herrscht innerhalb des Gesichtsfelds $2w_i$ die volle Lichtstärke, außerhalb des Winkels $2w_a$ findet keine Abbildung mehr statt; bei einem Durchmesser $2p$ der Austrittspupille ist für einen unendlich fernen Schirm $\operatorname{tg} w_i = (g - p) : a$ und $\operatorname{tg} w_a = (g + p) : a$. Dazwischen liegt eine Übergangszone abnehmender Helligkeit, indem ein immer größerer Teil der Öffnung durch den Lukenrand abgeblendet und

damit das Bild abgeschattet wird; in dem durch die Hauptstrahlen mit der Neigung w bestimmten Ring ist die Helligkeit nahe gleich der halben, um so näher, je größer der Durchmesser der Luke gegen den der Pupille ist. Die Übergangzone wird um so schmaler, je kleiner die Pupille ist und zieht sich zuletzt auf den dem Hauptstrahlwinkel w entsprechenden Ring zusammen; man mißt daher gewöhnlich durchweg das Gesichtsfeld mit dem Winkel w , auch hier wird so verfahren werden; wo nötig, soll es als das Gesichtsfeld nach mittlerem Maß gekennzeichnet werden. Ist das Fernrohr ein teleskopisches System, so ist der bildseitige halbe Gesichtsfeldwinkel $2w'$, unter dem die Austrittsluke von der Mitte der Austrittspupille erscheint, durch $\operatorname{tg} w' : \operatorname{tg} w = V$ gegeben, das gleiche gilt für w_i und w_a . Das dingseitige bzw. bildseitige

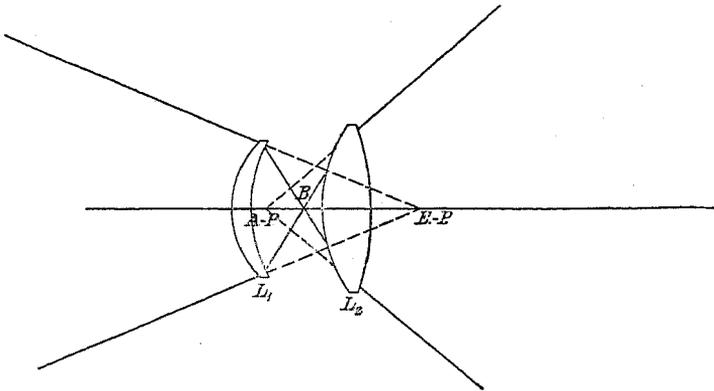


Abb. 7. Zur Ermittlung der Gesichtsfeldblende.

Gesichtsfeld bezeichnet man auch als objektives bzw. subjektives oder als wahres bzw. scheinbares Gesichtsfeld.

Im allgemeinen fällt die Dingfläche, die Gesamtheit der von der Mitte der Eintrittspupille aus sichtbaren Oberflächenteile der Gegenstände, nicht mit der Einstellfläche zusammen, daher auch ebensowenig die zugeordnete Bildfläche mit dem Auffangschirm. Das von der Austrittspupille nach einem Punkt der Bildfläche zusammenlaufende Strahlenbündel bestimmt auf dem Schirm eine Zerstreuungsgfigur, und ebenso das von der Eintrittspupille nach einem Punkt der Dingfläche zusammenlaufende Strahlenbündel eine durch die Abbildung zur ersten Figur zugeordnete Zerstreuungsgfigur auf der Einstellfläche. Die Gesamtheit dieser Zerstreuungsgfiguren in der Einstellfläche bzw. auf dem Auffangschirm bezeichnet man als Abbild bzw. Abbildskopie der Dingfläche. Der Abbildungsvorgang zerfällt also 1. in die Erzeugung des Abbilds, einen reinen Projektionsvorgang, für den nur die Lage und Größe der Eintrittspupille, soweit das System in Betracht kommt, maßgebend ist, und 2. in die eigentliche optische Abbildung, durch die von dem Ab-

bild ein optisches Bild, die Abbildskopie, entworfen wird. Solange die Zerstreuungskreise dem Auge unter einem bestimmten kleinen Winkel von etwa $1'$ geboten werden, erscheinen sie als Punkte und die Ab-

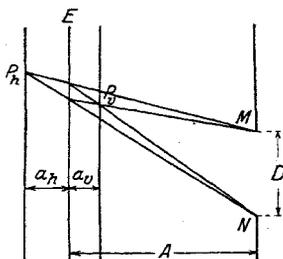


Abb. 8. Die Tiefe der scharfen Abbildung.

bildung vollkommen. Bei größeren Zerstreuungsfiguren kann man etwa den Schwerpunkt als Bildpunkt der unvollkommenen Abbildung ansehen. Man kann nun fragen, wie weit für eine gewisse Grenzgröße der Zerstreuungsfigur die scharfe Abbildung bei einem optisch vollkommenen Fernrohr von der Einstellebene, die hier als achsensenkrechte Ebene angenommen werde, nach vorn und hinten reicht. Ist in Abb. 8 A der Abstand der Einstellebene von der Eintrittspupille, a_v bzw. a_h der Abstand

der vorderen bzw. hinteren Grenzebene der scharfen Abbildung von der Einstellebene, D der Durchmesser der Pupille, so ist die Größe Z des Zerstreuungskreises in der Einstellebene

$$Z = \frac{a_h D}{A + a_h} \quad \text{oder} \quad \frac{a_v D}{A - a_v},$$

je nachdem er in der vorderen oder hinteren Grenzfläche liegt. Die scheinbare Größe gesehen von der Eintrittspupille erhält man durch Division mit A und die scheinbare Größe seines Bildes gesehen von der Austrittspupille, indem man weiter mit der Fernrohrvergrößerung V multipliziert.

$$\zeta = \frac{a_h D V}{A(A + a_h)} = DV \left(\frac{1}{A} - \frac{1}{A + a_h} \right) \quad \text{oder} \quad = -DV \left(\frac{1}{A} - \frac{1}{A - a_v} \right).$$

Für die beiden Grenzebenen ist also der Unterschied der Kehrwerte ihrer Abstände von der Eintrittspupille

$$\frac{1}{A - a_v} - \frac{1}{A + a_h} = \frac{2\zeta}{DV}.$$

Dieser Wert ist ein Maß für die Tiefe der scharfen Abbildung und ist also umgekehrt proportional dem Durchmesser der Eintrittspupille und der Vergrößerung; er wird am besten in Dioptrien ausgedrückt. Ist die eine Grenzebene die unendlich ferne, so gibt er den Kehrwert des Abstands der Ebene, bis zu der die scharfe Abbildung reicht, wenn die Einstellebene so weit nach vorn gerückt ist, daß für die unendlich ferne Ebene die Zerstreuungskreise gerade noch unmerklich bleiben. Für $V = 6\times$; $D = 20$ mm und $\zeta = 1' = \text{rd. } 1:3500$ ist $A - a = 210$ m; die Tiefe der Abbildung ist also auf der Dingseite = 0,0048 dptr.

3. Das Auge und sein Gebrauch beim Sehen.

Das Auge ist ein Linsensystem, das aus Hornhaut, Kammerwasser, Linse und Glaskörper mit annähernd kugelförmigen Flächen besteht

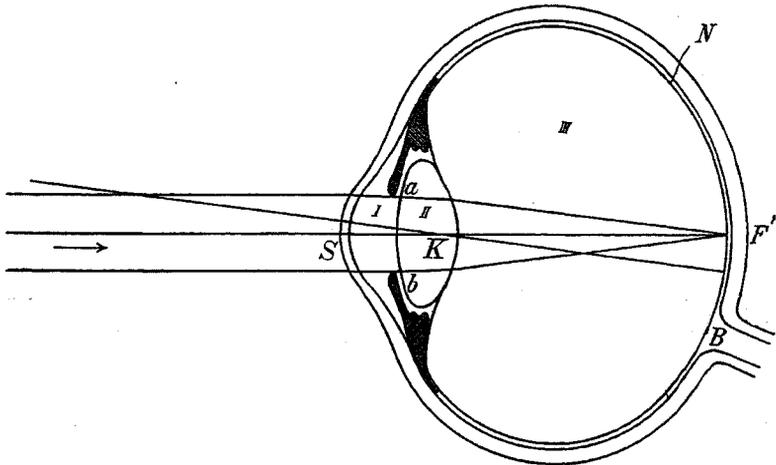


Abb. 9a. Ein wagerechter Schnitt durch das rechte Auge.

S Hornhaut. I Kammerwasser. II Linse. III Glaskörper. N Netzhaut. F' gelber Fleck. B blinder Fleck.

(Abb. 9a und b). Die lichtempfindliche Netzhaut als Aufwandschirm kann man sich durch eine dünne unwirksame Luftschicht von dem Glaskörper getrennt denken, um die Abbildungsgesetze für ein von Luft umgebenes System anwenden zu können. Die kreisförmige Iris wirkt als Aperturblende, ihr zugeordnetes Bild im Dingraum als Eintrittspupille. Der Durchmesser der Iris ändert sich mit der Helligkeit von etwa 2 mm bei Tageslicht bis zu etwa 8 mm bei Nacht und in der Dämmerung. Die Fähigkeit des Auges, die Flächen der Linsen stärker zu krümmen und dadurch die Brennweite von 17 mm um

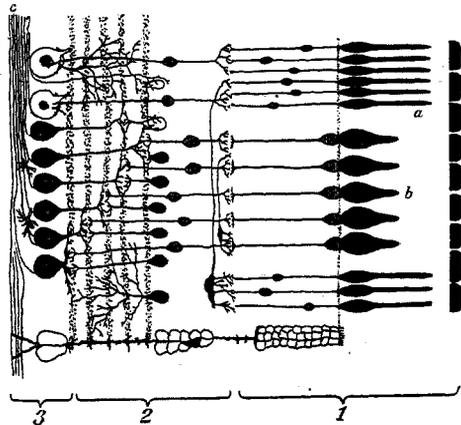


Abb. 9b. Ein Schnitt durch die Netzhaut.

Das aus dem Glaskörper kommende Licht durchsetzt zunächst die Schicht 3 mit den Nervenfasern und Ganglienzellen, dann Schicht 2, bestehend aus der inneren und äußeren retikulären Schicht und der davon eingeschlossenen inneren Körnerschicht; die Schicht 1 enthält die Stäbchen *a* und Zapfen *b*, die auf der linken Seite die feine äußere Grenzmembran von der äußeren Körnerschicht trennt, auf der anderen Seite die Pigmentschicht von der nicht dargestellten Aderhaut.

etwa $\frac{1}{6}$ zu verringern, Akkommodation genannt, ermöglicht dem Menschen, Gegenstände in verschiedener Entfernung zwar nicht gleichzeitig, aber nach-

einander scharf zu sehen. Der entfernteste Punkt, der im Ruhezustand des Auges bei entspannter Akkommodation scharf gesehen werden kann, ist der Fernpunkt, der nächste der Nahpunkt. Beim normalen Auge liegt der Fernpunkt im Unendlichen, der Nahpunkt in der Jugend etwa 10 cm vom Auge. Im Alter nimmt die Akkommodation ab, der Nahpunkt des alternden Auges rückt weiter weg; die Akkommodationsbreite ist im Alter von 10, 30, 50, 70 Jahren etwa 14, 7, 2,5, 0,25 Dioptrien. Beim kurzsichtigen (myopischen) Auge mit zu kurzem Bau liegen beide Punkte näher; da das Auge bei zu kurzem Bau übersichtig (hyperopisch) ist, so wird hier der Fernpunkt virtuell; ist es dies in stärkerem Maße und etwa dazu noch alterssichtig, so kann auch der Nahpunkt noch virtuell werden. Diesen Mängeln hilft man durch Tragen einer Brille ab; die Fernbrille entwirft von einem unendlich entfernten Punkt ein Bild im Fernpunkt des Auges. Ein anderer Fehler des Auges, der Astigmatismus (S. 28), der meist in ungleicher Krümmung der Hornhaut für zwei aufeinander senkrechte Meridiane seinen Grund hat, wird ebenfalls durch entsprechende Brillen gehoben. Bei der Akkommodation auf nähere Gegenstände verengert sich der Durchmesser der Eintrittspupille auch bei gleichbleibenden Bedingungen. Für das Auge in Akkommodationsruhe bzw. in größter Akkommodation von 10 dptr liegt der vordere Hauptpunkt 1,35 bzw. 1,77 mm innerhalb des Auges, die Eintrittspupille 3,05 bzw. 2,67 mm innerhalb; sie ist in beiden Fällen etwa um $\frac{1}{8}$ größer als die Augenpupille. Die Tiefe, bis zu der die scharfe Abbildung reicht, ist bei 4-mm-Pupille durch 0,15 dptr bestimmt. Wie schon bemerkt,

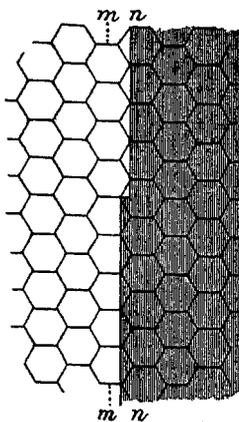


Abb. 10. Der Einfluß der Zapfenanordnung auf die Breitenwahrnehmung.

erscheint ein Gegenstand punktförmig, wenn er dem Auge unter einem kleineren Winkel als $1'$ geboten wird; sinkt bei wachsender Entfernung des Gegenstands der Sehwinkel unter diese Größe, so wird nur die Lichtstärke vermindert, und zwar im umgekehrten Verhältnis des Quadrats der Entfernung, für die Linien gilt das lineare Verhältnis. Bei Tageslicht sind dunkle Linien auf hellem Grunde, deren Länge nicht unter einigen Minuten bleibt, noch bei $1,2''$ Dicke sichtbar, helle Linien auf dunklem Grund erst bei $3,5''$ Dicke. Die Sehschärfe ist durch die Größe der Zapfen von etwa 4μ im gelben $1,4-2$ mm breiten Fleck der Netzhaut bestimmt, die ein annähernd sechseckiges Mosaik (Abb. 10) bilden, und deren Größe im Verhältnis zur Brennweite des Auges etwa $1'$ beträgt. Diese Größe ist unmittelbar maßgebend für das Trennungsvermögen, die Fähigkeit, benachbarte Linien getrennt wahrzunehmen. Wesentlich genauer ist die Breitenwahrnehmung, das Erkennen kleiner seitlicher Lagenver-

schiedenheiten. Es spielt dies bei Messungen, wie z. B. der Nonius-einstellung, eine Rolle. Geübte Beobachter erreichen hier unter günstigen Bedingungen einen mittleren Fehler der Einstellung von $3''$; etwa ebenso genau wird ein Strich zwischen zwei parallele Gerade bei schmalen Lichtspalten zwischen Strich und Geraden eingestellt. Die Abweichung der fertigen Einstellung wird mit geringerer Genauigkeit erkannt. Je nachdem die Bilder der versetzten Striche des Nonius auf verschiedene Zapfen fallen wie in Abb. 10 oder auf die gleichen, ist eine Breitenwahrnehmung möglich oder nicht. Bei den kleinen unwillkürlichen Schwankungen der Blickrichtung wird bald der eine, bald der andere Fall vorliegen. Das Mittel der Reizung der Zapfen wird die, wenn auch abgeschwächte, Wahrnehmung der Versetzung hervorrufen. So erklärt sich die größere Genauigkeit der Breitenwahrnehmung. Man unterscheidet absolute und natürliche Sehschärfe, je nachdem man den Scheitel des kleinsten Winkels für gesonderte Wahrnehmung in den vorderen Brennpunkt oder Hauptpunkt des Auges legt; die erste spielt eine Rolle beim Vergleich der verschiedenen langgebauten Augen, die zweite beim Vergleich von Zielen in verschiedener Entfernung. Mit höherem Grade der Kurzsichtigkeit nimmt die Sehschärfe ab. Ebenso nimmt sie nach dem Rande der Netzhaut, wo diese mehr mit etwa 2μ dicken Stäbchen besetzt ist, stark ab (das Verhältnis der Stäbchen zu den Zapfen ist in der etwa $0,2 \text{ mm}$ großen Mitte des gelben Flecks, der Fovea, Netzhautgrube, $1:10$ und steigt nach dem Rande der Netzhaut auf den umgekehrten Wert); es fällt dies nicht besonders auf, weil beim Sehen mit ruhendem Auge die Wahrnehmungen in den Randteilen nur zur Orientierung und Warnung dienen. Wird die Aufmerksamkeit auf einen bestimmten Punkt gerichtet, so dreht man unwillkürlich den Augapfel so, daß das Bild dieses Punktes auf die Netzhautgrube, die Stelle der größten Sehschärfe, fällt. Bei Beobachtung eines größeren Sehfeldes kommt es auf dies Sehen mit bewegtem Auge an, das als direktes Sehen dem indirekten mit ruhendem Auge gegenübergestellt wird.

Für die Empfindung von Helligkeitsunterschieden gilt bei mittleren Beleuchtungsstärken angenähert das WEBER-FECHNERSche Gesetz, daß der eben merkliche Helligkeitsunterschied durch das Helligkeitsverhältnis gegeben ist oder durch dessen Abweichung von 1, den verhältnismäßigen Schwellenwert. Dieser ist für die Beleuchtungsstärken von $12,5$ bis 25 Lux $0,00863$; $50-75 \text{ Lux}$ $0,00432$; $125-250 \text{ Lux}$ $0,00237$; 500 bis 1000 Lux $0,00366$; $1500-11500 \text{ Lux}$ $0,00474$. Das Auge ist imstande, bei schwachem Mondlicht wie bei blendendem Sonnenlicht zu sehen, obwohl sich deren Beleuchtungsstärken wie $1:5000000$ verhalten. Dies wird einerseits erreicht, wie schon erwähnt, durch Verengerung und Erweiterung der Augenpupille in den Grenzen 2 und $8-9 \text{ mm}$ (die Werte der Helligkeiten, bei denen die größte und kleinste Pupille erreicht werden, verhalten sich wie $1:100000000$), andererseits durch die

Adaptation des Auges, die Einstellung des Empfindlichkeitsgrades der Netzhaut für verschiedene Beleuchtung. Der Durchmesser der Augenspille ist nach BLANCHARD bei den Feldhelligkeiten von 0,0001 MK 7,3 mm; 0,01:7,0; 1:6,0; 100:3,9 und von 10000 MK 2,1 mm. Andere Beobachter, die ebenfalls mit Blitzlicht arbeiteten, stellten besonders bei Jugendlichen noch größere Austrittspupillen, bis etwa 10 mm, fest. Wenn ein Auge geschlossen ist, sind bei den mittleren Helligkeiten die Durchmesser bis zu 1,6 mm größer. Die Tageshelligkeit im Freien ist etwa 10000 MK. Man unterscheidet Hell- und Dunkeladaptation, man spricht aber auch von dem Zustande der Hell- und Dunkeladaptation, je nach längerer Einwirkung starken Lichts bzw. längerem Lichtabschlusse. Während der erste Zustand nach wenigen Minuten erreicht ist, ist der letzte erst nach einer Stunde nahezu erreicht. Dann ist der Schwellenwert der Lichtempfindung auf etwa 1:100000 herabgesetzt. Als lichtempfindliche Elemente sind besonders nach dem Rande der Netzhaut zu neben den Zapfen die Stäbchen vorhanden. Sie spielen beim Sehen in der Dunkelheit eine besondere Rolle, da dann ihre Lichtempfindlichkeit größer als die der Zapfen ist; von der Mitte nach dem Rande der Netzhaut steigt bei Dunkeladaptation die Empfindlichkeit auf das 1000fache; in 4° Abstand von der Mitte ist sie bereits 60fach. So erklärt sich, daß beim Fixieren die Sterne in der Nacht weniger hell erscheinen, und der silberne Sternenglanz verschwindet; ebenso erkennt man in den Plejaden bei direktem Sehen nur wenige Sterne, während beim Vorbeigleiten des Blicks sogleich eine Anzahl schwächere Sterne sichtbar wird. Farben werden nur mit den Zapfen gesehen, das Sehen mit den Stäbchen gleicht dem des Farbenblinden. Während die Lichtempfindlichkeit für verschiedene Farben bei den Zapfen in der Nähe von $\lambda = 0,55 \mu$ am größten ist und nach größeren und kleineren Wellenlängen gleichartig abfällt, ist sie bei den Stäbchen am größten bei $\lambda = 0,515 \mu$ und fällt nach Rot besonders stark ab, so daß das leuchtende Rot von Ziegeldächern im Stäbchensehen schwarz erscheint. Dadurch erklärt sich die PURKINJESCHE Erscheinung, daß z. B. in der Morgendämmerung zuerst Blau bemerkt wird und die roten Farben lange am dunkelsten bleiben. Im Beginn der Dunkeladaptation sehen wir noch mit dem farbenächtigen, zu scharfer Formwahrnehmung befähigten, aber starke Lichtreize erfordernden Tagesapparat, gegen das Ende mit dem farbenblinden, nur unscharf die Formen erkennenden, aber sehr lichtempfindlichen Dämmerungsapparat. Erst wenn seine Empfindlichkeit die des Tagesapparats übertrifft, kommt das Auge in das farblose Intervall, den Bereich geringer Stärke des Reizlichts, innerhalb dessen das Licht zwar sichtbar ist, aber die Qualität der Empfindung noch zu unbestimmt ist, um die Farbigkeit erkennen zu lassen. Die Sehschärfe ist bei Tagesehen in den Winkelabständen von der Netzhautgrube von 5°, 10°, 20°, 40° nur 1:4, 1:15, 1:40, 1:200; bei Dämmerungsehen ist die Sehschärfe in der Netz-

hautgrube stark herabgedrückt. Die Sehschärfe für dies bei Beleuchtungsstärken unter $0,1$ MK ist proportional dem Logarithmus der Beleuchtungsstärke, bei Tagesehen mit höheren Beleuchtungsstärken ebenso, aber mit 10 mal größerem Proportionsfaktor; während bei 12 MK noch volle Sehschärfe vorliegt, ist sie bei $1:9$ MK bereits auf $1:10$ herabgesetzt. Im gesättigten blauen Licht ist sie am geringsten, am höchsten, etwa $4,5$ mal so groß, im gelben Licht. Für die Wahrnehmung von Bewegungen sind die äußeren Netzhautteile besonders empfindlich, aber auch in der Netzhautgrube wird durch die Bewegung die Sehschärfe gesteigert; so werden noch Bewegungen von $20''$ Winkel in $1:15$ Sekunde Dauer erkannt. Im beidäugigen Sehen soll bei Helladaptation die Helligkeit nicht viel größer sein als im einäugigen, während sie bei Dunkeladaptation etwa doppelt so groß ist. Nach dem Riccoschen Gesetz ist für das Sehen innerhalb der Netzhautgrube das Produkt aus der Flächengröße des Netzhautbildes eines hellen Flecks und der Lichtintensität beim Schwellenreiz konstant, d. h. die Empfindlichkeit ist proportional der Flächengröße, es liegt eine Art Mitempfinden vor. Nach GEHLHOFF gilt dagegen dies Gesetz nur für das indirekte Sehen mit den Stäbchen, während für das foveale Sehen mit den Zapfen das Produkt aus Sehwinkel und Schwellenreiz nahezu konstant ist, wenn dieser Winkel größer als $30''$ ist. Zur Veranschaulichung der Empfindlichkeit des Auges mögen noch die folgenden Angaben dienen. 1 MK ist gleich 15 erg/sec; 1 erg/sec erwärmt in 1 Jahr und 89 Tagen 1 g Wasser um 1° . Ein Stern 6. Größe, der noch eben mit bloßem Auge sichtbar ist, ist so hell wie eine Kerze in 11 km Entfernung; in diesem Falle erhält das Auge bei 3 mm Pupille 10^{-8} erg/sec. Bei Dunkeladaptation unter den günstigsten Verhältnissen vermögen noch $2,6 \times 10^{-10}$ erg/sec einen Lichtreiz hervorzurufen; REEVES findet für foveales Sehen etwa 18×10^{-10} . Die Sonne sendet uns 50 Milliarden mal soviel Licht zu als der Stern 1. Größe Capella, sie würde daher in $3,5$ Millionen mal größerer Entfernung als Stern 6. Größe erscheinen, und zwar unter einem Sehwinkel von etwa $1:2000''$.

Beim direkten Sehen ist der Augendrehpunkt, der etwa $10,5$ mm hinter der Pupille liegt, das Zentrum der Perspektive; die von ihm nach den Punkten des Gegenstandes gezogenen Linien heißen Blicklinien. Neben diesem festen Zentrum, das die Hauptperspektive bestimmt, spielt das wandernde Zentrum der Pupille des bewegten Auges, das die Füllperspektiven von kleiner Winkelausdehnung bestimmt, keine praktische Rolle, da die Verschiedenheit der Lagenverhältnisse des Bildes in den Füllperspektiven und der Hauptperspektive selbst bei besonders darauf gerichteter Aufmerksamkeit nicht leicht bemerkt wird. Für den Projektionsvorgang bei der Darstellung des Abbilds ist also der Augendrehpunkt maßgebend. Da die Beurteilung der Entfernung im einäugigen Sehen auf Grund der Akkommodation unsicher ist, wählt man zweckmäßig

als Einstellfläche eine Ebene senkrecht zur mittleren Blickrichtung, beim freien Sehen also meist vertikal, beim Sehen durch ein optisches Instrument senkrecht zu dessen optischer Achse.

4. Das Sehen durch das Fernrohr.

Die Betrachtung einer dem Abbild vollkommen ähnlichen Abbildskopie vermag nur dann den richtigen perspektivischen Eindruck eines Gegenstands zu geben, wenn Lage und Abstand des Augendrehpunkts in bezug auf die Kopie zu Lage und Abstand des Projektionszentrums für das Abbild in bezug auf dieses in demselben Verhältnis stehen wie die Größen von Kopie und Abbild, d. h. die scheinbare Größe der Kopie dieselbe ist wie die des Abbilds vom Projektionszentrum betrachtet. Das Wesen des Fernrohres besteht nun darin, die scheinbare Größe zu ändern; es muß also einzig und allein auf Grund dessen die Perspektive verfälscht werden. Abb. 11 stellt diese Verhältnisse für einen Gegenstand $ABCD$ dar, der nach a bei der Projektion von P das Abbild

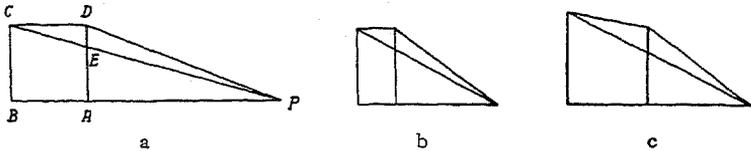


Abb. 11. Die Änderung der Raumvorstellung durch unrichtigen Abstand von der Abbildskopie.
b: Kulissenwirkung. c: Vergrößerung des Hintergrunds.

AED liefert. Erscheint die Kopie unter vergrößertem Winkel, so entsteht entweder nach b der Eindruck einer Verringerung des Tiefenabstands (Kulissenwirkung) oder nach c einer Vergrößerung des Hintergrunds; es fällt dies besonders auf, wenn man einen Gang oder eine Fensterfront entlang sieht. Fehler der Geleise treten bei Fernrohrbeobachtung auffallend hervor, wie es Abb. 12 zeigt. Auch erscheinen Bewegungen in der Blickrichtung verändert.

Es ist noch zu untersuchen, wie es mit der Strahlenbegrenzung und den davon abhängigen Eigenschaften des Fernrohres steht, wenn es in Verbindung mit dem Auge betrachtet wird. Es ist hier von neuem festzustellen, welche Blenden als Apertur- und Gesichtsfeldblende des Gesamtsystems Fernrohr und Auge wirken. Es mögen vier Fälle unterschieden werden. Kann im ersten Fall das Auge mit seinem Augendrehpunkt in die Austrittspupille des Fernrohres gebracht werden, so bleibt die Perspektive dieselbe wie für das Fernrohr allein, das Gesichtsfeld für das bewegte Auge ebenso, bei genügend großer Austrittspupille auch das Gesichtsfeld für das ruhende Auge in Winkelmaß, wenn die Austrittsluke im Unendlichen liegt, wie es meist der Fall ist. Die Größe der Austrittspupille genügt dann, wenn sie den die Gesamtheit der Strahlen

einschließenden Kegel umfaßt, d. h. wenn sie bei normalem Auge die Größe der Augenpupille um $10,5 \text{ mm} \times 2 \text{ tg } w'$, entsprechend dem Gesichtsfeld $2 w'$, übertrifft. Nimmt die Größe der Austrittspupille ab, so wird das Gesichtsfeld für das ruhende Auge zunächst abgeschattet, weiter wird das Gesichtsfeld nach mittlerem Maß verringert. Obwohl dieser Fall den natürlichen Bedingungen des Sehens am meisten entspricht, ist er seltener verwirklicht, da mit Recht die Verkleinerung des Gesichtsfeldes für das ruhende Auge bei kleiner Austrittspupille als gewichtiger Nachteil für die grobe Orientierung angesehen wird, und da



Abb. 12. Geleisefehler, wie sie durch das Fernrohr übertrieben erscheinen.

hier ein größerer Durchmesser für die nahe am Auge stehende Linse nötig ist, als wenn, wie es bei vielen Fernrohren der Fall ist, dem Auge eine solche Lage zugewiesen ist, daß die Austrittspupille des Fernrohrs mit der Eintrittspupille des Auges zusammenfällt. Ist in diesem zweiten Fall die Austrittspupille wieder um das eben angegebene Stück größer als die Augenpupille, so wird nur das Gesichtsfeld für das bewegte Auge, wenn die Austrittsluke nicht im Unendlichen liegt, und die Perspektive ein wenig anders, während das Gesichtsfeld für das ruhende Auge dasselbe ist wie für das Fernrohr allein. Für eine kleinere Austrittspupille gleicht hier das Sehen mit bewegtem Auge dem durch ein Schlüsselloch, als das hier die Austrittspupille des Fernrohrs wirkt; um das Gesichts-

feld des Fernrohrs abzusuchen, müssen nämlich kleine Kopfbewegungen zu Hilfe genommen werden; da es fast unbewußt geschieht, fallen sie nicht besonders auf und werden kaum als Nachteil empfunden. Im wirklichen Gebrauch des Fernrohrs wird die Augenpupille öfters eine Lage zwischen beiden Fällen einnehmen, wobei sich die Nachteile ausgleichen. Als dritten und vierten Fall behandeln wir die, wo Augenpupille und Augendrehpunkt erheblich von der Austrittspupille entfernt (vor oder hinter) liegen und die Austrittspupille entweder im dritten Fall kleiner oder im vierten größer als die Augenpupille ist. Im dritten Fall wirkt bei nicht gar zu kleinem Gesichtsfeld die Augenpupille als unscharfe Blende für das kleine Gesichtsfeld des ruhenden Auges, das zu Schlüssellochbeobachtung drängt; die Aperturblende des Fernrohrs behält ihre Bedeutung. Im vierten Fall wird die Augenpupille zur Aperturblende und der Kreuzungspunkt der Hauptstrahlen liegt in ihr bzw. dem Augendrehpunkt; die Austrittspupille des Fernrohrs aber begrenzt das Gesichtsfeld, wenn es nicht zu klein ist, und zwar unscharf; es ist für ruhende Augen größer als für bewegte, wenn die Augenpupille der Austrittspupille näher liegt als der Augendrehpunkt; der Fall, daß sie ferner liegt, hat keine Bedeutung, da man wohl meist durch Zurückgehen mit dem Auge den ersten oder zweiten Fall der Strahlenbegrenzung herbeiführen kann, während das Vorbewegen durch das Fernrohr gehemmt sein kann, insbesondere wenn die Austrittspupille virtuell ist. Der erste und vierte Fall, wenn nur die Austrittspupille des Fernrohrs allein genügend groß ist, stellen das erstrebenswerte Ideal des Sehens durch das Fernrohr dar; wie beim unbewaffneten Auge erfolgt die Wahrnehmung im direkten Sehen; das indirekte Sehen kommt nur noch für die grobe Orientierung in Betracht.

Bei der strengeren Behandlung der Strahlenbegrenzung hat man nach Abb. 13 und 14 zu unterscheiden, ob die Augenpupille bzw. der Augendrehpunkt in das von den gestrichelten Grenzstrahlen gebildete lichte Viereck fällt. In den Abb. ist angenommen, daß die Augenpupille kleiner als die Austrittspupille des Fernrohrs ist; π bezeichnet den Augendrehpunkt; die Augenpupille ist für die verschiedenen Hauptstrahlneigungen bis in den Drehpunkt zurückverschoben gedacht und so durch einen kleinen Kreis dargestellt; die Tangenten an diesem Kreis bezeichnen die Grenze, an der die Abschattung beginnt.

Die Helligkeit des vom Auge durch das Fernrohr erhaltenen Netzhautbildes ist als Verhältniszahl im Vergleich mit dem des unbewaffneten Auges anzugeben. Ist die Augenpupille gleich oder kleiner als die Austrittspupille des Fernrohrs, so daß bei richtiger Augenhaltung die Augenpupille ganz mit Licht erfüllt ist, so ist die Helligkeit des Bildes einer Fläche gleich dem Durchlässigkeitsfaktor K des Fernrohrs; in dem Maß, wie die Fläche durch das Fernrohr vergrößert ist, ist ja auch die Eintrittspupille größer als die Austrittspupille und demgemäß die Lichtzufuhr vermehrt. Ist aber der Durchmesser P der Austrittspupille kleiner als der Durchmesser p der Augenpupille, so ist entsprechend der vermin-

clerten Ausnutzung der Augenpupille die Helligkeit gleich $KP^2 : p^2$. Ein Fernrohr, das für Tagesgebrauch eine genügende Austrittspupille von 2 mm besitzt, zeigt bei Nacht, wenn sich die Augenpupille auf 8 mm erweitert hätte, nur $K : 16$ der Helligkeit des freien Sehens; anderseits wird die Lichtstärke eines Nachtfernrohrs von 8 mm Austrittspupille bei Tage nicht voll ausgenutzt, so daß es sich dann einem Fernrohr mit kleinerer Austrittspupille nicht überlegen zeigt. Die Vergrößerung, bei der Austritts- und Augenpupille gleich groß sind, bezeichnet man als Normalvergrößerung. Auf die Helligkeit von Punkten und Linien wird S. 34 eingegangen werden. Entgegen den obigen Ausführungen erscheint bei schwachem Licht ein Gegenstand durch das Fernrohr betrachtet oft heller als mit bloßem Auge. Nach dem verbesserten Riccoschen Gesetz (S. 17) nimmt bei fovealem Sehen der Schwellenwert des Lichtreizes

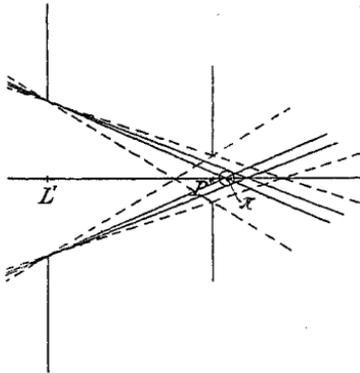


Abb. 13. Der Augendrehpunkt x liegt im lichten Viereck. Die Austrittsluke bestimmt das Gesichtsfeld.

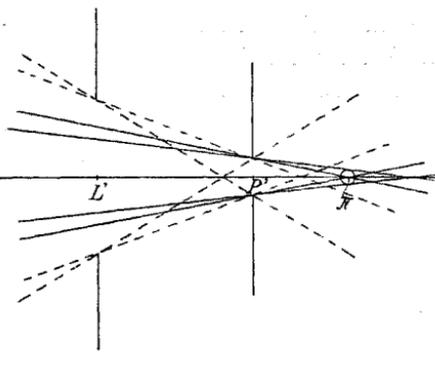


Abb. 14. Der Augendrehpunkt liegt außerhalb des lichten Vierecks. Die Austrittspupille des Fernrohrs bestimmt das Gesichtsfeld.

Die Strahlenbegrenzung beim direkten Sehen, wenn die Augenpupille kleiner als die Austrittspupille des Fernrohrs ist.

mit dem Sehwinkel ab. Das Bild eines mit bloßem Auge unsichtbaren Gegenstands kann also durch die Fernrohrvergrößerung trotz den Lichtverlusten im Fernrohr über die Reizschwelle gehoben und dadurch sichtbar werden. Ferner gibt die Vergrößerung des Seh winkels eine Verstärkung der Helligkeitsabstufungen. Auch macht man sich aus einer größeren Zahl zusammenhängender Einzeleindrücke leichter ein Bild als aus einer kleineren Zahl, wenn auch hellerer, Einzeleindrücke.

Es ist noch der Sinn des Wortes Vergrößerung bei Beobachtung näherer Gegenstände durch das Fernrohr klarzulegen. Handelt es sich z. B. um die Beobachtung von Vorgängen in einem durch ein Glasfenster abgeschlossenen Raum, und liegt die Eintrittspupille in der vordersten Linse, so ist das Konvergenzverhältnis in den zugeordneten Pupillen wie bisher das geeignete Maß für die Vergrößerung, da beim freien Sehen die Augenpupille an die Stelle der Eintrittspupille rückt. Dient

aber bei Messungen, um den störenden Einfluß der Körperwärme auszuschalten, das Fernrohr zum Beobachten aus größerem Abstand, wobei es besonders lang gewählt sein kann, so ist der Winkel, unter dem der Gegenstand durch das Fernrohr erscheint, mit dem Winkel, unter dem er im freien Sehen von der Austrittspupille erscheint, zu vergleichen; ist der Dingabstand von der Eintritts- bzw. Austrittspupille x_e bzw. x_a , so ist diese Vergrößerung im Verhältnis $x_a : x_e$ stärker als nach der vorigen Feststellung. In diesem Falle ist man durch das Fernrohr dem Gegenstand näher gerückt, was auch für die Perspektive zu beachten ist. Ebenso ist auch im ersten Fall, wenn die Eintrittspupille erheblich hinter (holländisches Fernrohr S. 43) oder vor der vordersten Linse liegt, die Vergrößerung nicht mehr durch das Konvergenzverhältnis zu messen. Wenn Gegenstände in einem dichteren Mittel (wie im Wasser oder auf der Unterseite einer planparallelen Glasplatte) beobachtet werden, so ist nach der optischen Abbildung die Vergrößerung $= 1$; dadurch, daß das Bild dem Auge näher gerückt ist, erscheint es im Verhältnis dieser Annäherung vergrößert. Sinkt der Dingabstand von der Eintrittspupille unter die übliche deutliche Sehweite von 250 mm, so ist das System als Mikroskop anzusehen und die Vergrößerung nach den dafür geltenden Grundsätzen zu bemessen.

5. Die Bildfehler.

Die allgemeinen Abbildungsgesetze gelten bei einem beliebigen System nur für einen fadenförmigen Raum um die Achse, da nur dann, wenn man sich auf die Berücksichtigung der ersten Potenzen der Neigungswinkel der Strahlen zur Achse beschränkt, von der Vereinigung der von einem Dingpunkt ausgehenden Strahlen in einem Bildpunkt gesprochen werden kann, wie hier nicht weiter bewiesen werden soll. Man bezeichnet dies auch als GAUSSISCHE Abbildung. Es handelt sich nun darum, die Abweichungen von der Strahlenvereinigung bei größeren Neigungen zu untersuchen. Einen Strahl eines von einem Punkt außer der Achse ausgehenden Büschels kann man durch die Durchstoßungspunkte in der Dingebene und in der Eintrittspupille, deren Abstand $= a$ sei, festlegen. Zweckmäßig wählt man als die eine Koordinatenebene den sogenannten Hauptschnitt durch die Achse und den Dingpunkt, sein Abstand von der Achse sei l ; den Abstand des Durchstoßungspunkts in der Eintrittspupille zerlegt man in die zum Hauptschnitt parallele Komponente h_t und die dazu senkrechte h_s . Dann drückt $l : a = \operatorname{tg} w$ die Hauptstrahlneigung aus; $h_t : a = \operatorname{tg} u_t$ und $h_s : a = \operatorname{tg} u_s$ sind für den Achsenpunkt der Dingebene, bei kleinem w auch für den Punkt außer der Achse, die Komponenten der Neigung des Strahls gegen den Hauptstrahl, seines halben Öffnungswinkels u . Sucht man für den zugehörigen Bildstrahl die Durchstoßungspunkte in der GAUSSISCHEN Bildebene auf, so kann man

die Abweichung δ von dem GAUSSISCHEN Bildpunkt wieder nach den Komponenten δ_t und δ_s in bezug auf den Hauptschnitt zerlegen und δ_t und δ_s als Funktionen von w , u_t und u_s darstellen. Entwickelt man nach Potenzen dieser Veränderlichen und geht man dabei nur bis zu den dritten Potenzen ihrer selbst und ihrer Produkte, so wird man auf folgende Ausdrücke für δ_t und δ_s geführt:

$$\begin{aligned}\delta_t &= A(u_t^2 + u_s^2)u_t + B(3u_t^2 + u_s^2)w + Cu_t w^2 + Ew^3, \\ \delta_s &= A(u_t^2 + u_s^2)u_s + 2B u_t u_s w + D u_s w^2,\end{aligned}$$

wo A, B, C, D, E vom Bau des Systems und der Lage von Dingebene und Eintrittspupille abhängen. Für die planparallele Platte ist z. B.

$$A = -B = \frac{C}{3} = D = -E = \frac{n^2 - 1}{n^3} d.$$

Die vorstehenden Formeln mögen hier kurz abgeleitet werden und dabei auch der Zusammenhang der Faktoren A bis E mit den Bestimmungsstücken des Systems,

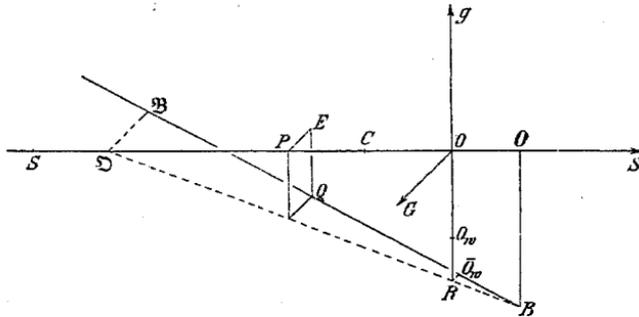


Abb. 15. Zur Ableitung der Ausdrücke für die SEIDELSCHE Bildfehler.

obwohl man sonst sehr viel rascher zum Ziel kommt, da man weiter unten leicht erkennt, von welcher Potenz von v die Größe $d\delta$ und von welcher von h_t, h_s und l die Größen v_t, v_s und $ds - d\delta$ abhängen. Zunächst ist die Brechung an einer Fläche für den Fall zu untersuchen, daß schon das einfallende Bündel mit Bildfehlern behaftet ist. In Abb. 15 sei SS die Achse des Systems, C der Krümmungsmittelpunkt der Fläche, O_w der GAUSSISCHE Dingpunkt, der in der Zeichenebene liegt, die somit Hauptschnitt und erste Koordinatenebene ist. Die Lage eines beliebigen Strahls BB sei durch den Durchstoßungspunkt B mit dem Hauptschnitt und Q mit der Eintrittspupille gegeben; es ist $OB = l, PE = h_s, EQ = h_t$. Die gleichen Verhältnisse gelten für den Bildraum, dessen Größen durch Striche unterschieden werden. Zunächst werde die Brechung des Strahls in bezug auf die Nebenachse BC betrachtet. Ist v der Winkel des Strahls mit dieser Achse und $CB = \delta - r$, so gilt als Invariante für die Brechung (es ist dies nur ein anderer Ausdruck für das Brechungsgesetz $n \sin i = n' \sin i'$):

$$r^2 \sin \varphi Q_s = n(\delta - r) \sin v = n'(\delta' - r) \sin v',$$

wo auch Q_s invariant ist. Daraus ergeben sich zunächst die Formeln für die GAUSSISCHE Abbildung:

$$Q\delta = n \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\delta} \right) = n' \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\delta'} \right); \quad \alpha = \frac{n \delta'^2}{n' \delta^2}; \quad \beta = \frac{n \delta'}{n' \delta}; \quad \gamma = \frac{\delta}{\delta'}.$$

Führt man nun die Reihenentwicklung weiter und ersetzt δ durch $\delta + d\delta$, wo δ der GAUSSISCHEN Abbildung auf der Nebenachse entspricht, und entwickelt $\sin v$ nach Po-

tenzen des Winkels φ der Einfallsnormale mit der Nebenachse, indem man von der Formel ausgeht

$$\operatorname{tg} v = \frac{r \sin \varphi}{\bar{s} - r + r \cos \varphi},$$

so erhält man

$$Q_{\bar{s}} = n \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\bar{s} + d\bar{s}} \right) \left\{ 1 + \frac{1}{2} \frac{(\bar{s} - r)r}{\bar{s}^2} \varphi^2 \right\},$$

$$Q_s - Q_{\bar{s}} = \frac{n d\bar{s}}{\bar{s}^2} + \frac{n}{2} \frac{(\bar{s} - r)^2}{\bar{s}^3} \varphi^2.$$

Da nun $r\varphi = \bar{s}v$, so ergibt sich daraus, wenn \mathcal{A} den Unterschied der Ausdrücke vor und nach der Brechung bezeichnet,

$$\mathcal{A} \frac{n d\bar{s}}{\bar{s}^2} = - \frac{1}{2} \bar{s}^2 v^2 Q_{\bar{s}}^2 \mathcal{A} \frac{1}{n\bar{s}} = \bar{s}^2 \mathfrak{N} v^2.$$

Nun kann v in seine Komponenten v_t und v_s nach den Koordinatenebenen zerlegt werden; es ist aber mit genügender Näherung

$$v^2 = v_t^2 + v_s^2$$

$$v_t = \frac{h_t - l}{x - s} - \frac{l}{r - s} = \frac{1}{x - s} \left(h_t - \frac{x}{s} \frac{Q_x l}{Q_s} \right) = u_t + \mathfrak{B} w; \quad v_s = u_s,$$

wo $s - r$ der Abstand des GAUSSISCHEN Bildpunktes auf der Achse von C ist, $x - r$ der der Eintrittspupille. Mithin ist

$$\mathcal{A} \frac{n d\bar{s}}{\bar{s}^2} = \bar{s}^2 \mathfrak{N} (u_s^2 + u_t^2 + 2 \mathfrak{B} u_t w + \mathfrak{B}^2 w^2).$$

Da die Strecken \bar{s} bzw. \bar{s}' auf der brechenden Fläche und mit ihr konzentrischen Kugeln endigen und gleich s bzw. s' sind, gilt für die auf die Achse bezogene Längsabweichung ds gegen die GAUSSISCHE Bildebene ($ds = OO$)

$$ds = d\bar{s} - \frac{l^2}{2(s - r)},$$

$$\mathcal{A} \frac{n ds}{s^2} - \mathcal{A} \frac{n d\bar{s}}{\bar{s}^2} = - \frac{1}{2} \mathcal{A} \frac{n}{s^2} \frac{l^2}{s - r} = - \frac{1}{2} \frac{n^2 l^2}{s^2} \mathcal{A} \frac{1}{n(s - r)} = \frac{n^2 l^2}{2s^2} \frac{1}{r} \mathcal{A} \frac{1}{n} = \frac{s^2 \mathfrak{N} l^2}{(x - s)^2}.$$

Zu dieser Längsabweichung ds ist nun die entsprechende tangentielle Seitenabweichung $\delta_t = OR - OO_w$ abzuleiten. δ_t besteht aus einem Stück $ds v_t$ und einem Stück $(r - s) d\gamma$, wo $\gamma = \angle O_w CB$ ist. Da sv_t und $n(r - s)d\gamma : s$ bei der Brechung invariant sind, ist

$$\mathcal{A} \frac{n \delta_t}{s} = sv_t \mathcal{A} \frac{n ds}{s^2},$$

$$\mathcal{A} \frac{n \delta_t}{s} = s^3 \mathfrak{N} \left\{ (u_t^2 + u_s^2) u_t + \mathfrak{B} (3 u_t^2 + u_s^2) w + (3 \mathfrak{B}^2 + \mathfrak{C}) u_t w^2 + (\mathfrak{B}^3 + \mathfrak{B} \mathfrak{C}) w^3 \right\}.$$

Entsprechend ergibt sich für die sagittale Seitenabweichung aus $\delta_s = ds v_s$

$$\mathcal{A} \frac{n \delta_s}{s} = s^3 \mathfrak{N} \left\{ (u_t^2 + u_s^2) u_s + 2 \mathfrak{B} u_t u_s w + (\mathfrak{B}^2 + \mathfrak{C}) u_s w^2 \right\}.$$

Will man die Gesamtabweichung eines Systems von k Flächen kennen, so ist bei der Summenbildung folgendes zu beachten. Beim Übergang von der ν ten zur $(\nu + 1)$ ten Fläche muß die Abweichung nach der ν ten Fläche mit $s'_{\nu} : s_{\nu} + 1$ multipliziert werden, ehe das nächste Abweichungsglied addiert wird; außerdem ist es zweckmäßig, die Faktoren s^3 , $x : s$ in \mathfrak{B} und s^{-4} in \mathfrak{C} auf die s - und x -Werte nach der letzten Fläche umzurechnen; ferner sind u_t , u_s und w beim Übergang, $s u_t$, $s u_s$ und $x w$ bei der Brechung invariant. Um den schädlichen Einfluß der Bildfehler auf das Erkennen von Einzelheiten des Gegenstands unmittelbar beurteilen zu können, ist es endlich vorteilhaft, ein Bild der Zerstreungsfigur, wie es im Bildraum nach der letzten Fläche

entsteht, durch Rückstrahlung in den Dingraum zu entwerfen und die obigen Faktoren sowie die Winkel auf den Dingraum umzurechnen. Bezeichnet man diese Abweichungen mit δ_t^0 , δ_s^0 und führt die Abkürzungen ein:

$$\rho_{vs} = \frac{s_v}{s'_v - 1} \frac{s_v - 1}{s'_v - 2} \dots \frac{s_2}{s'_1}; \quad \rho_{vx} = \frac{x_v}{x'_v - 1} \frac{x_v - 1}{x'_v - 2} \dots \frac{x_2}{x'_1},$$

so ist für den Dingraum mit $n = 1$

$$\begin{aligned} 2 \delta_t^0 &= (1u_t^2 + 1u_s^2) 1u_t s_1^4 \sum_{v=1}^k \rho_{vs}^4 Q_{vs}^2 \frac{\mathcal{A}}{\nu} \frac{1}{ns} - \\ &\quad - (31u_t^2 + 1u_s^2) w_1 s_1^3 x_1 \sum_{v=1}^k \rho_{vs}^3 \rho_{vx} Q_{vs} Q_{vx} \frac{\mathcal{A}}{\nu} \frac{1}{ns} + \\ &\quad + 1u_t w_1^2 s_1^2 x_1^2 \sum_{v=1}^k \rho_{vs}^2 \rho_{vx}^2 \left[3 Q_{vx}^2 \frac{\mathcal{A}}{\nu} \frac{1}{ns} - (Q_{vx} - Q_{vs})^2 \frac{1}{r_v} \frac{\mathcal{A}}{\nu} \frac{1}{n} \right] - \\ &\quad - w_1^3 s_1 x_1^3 \sum_{v=1}^k \rho_{vs} \rho_{vx}^3 \left[\frac{Q_{vx}^3}{Q_{vs}} \frac{\mathcal{A}}{\nu} \frac{1}{ns} - \frac{Q_{vx}}{Q_{vs}} (Q_{vx} - Q_{vs})^2 \frac{1}{r_v} \frac{\mathcal{A}}{\nu} \frac{1}{n} \right]. \end{aligned}$$

Der entsprechende Ausdruck gilt für $2 \delta_s^0$. Daraus folgt dann der PETZVALSche Satz (S. 29). Ist $s_1 = \infty$, so ist $\delta^0: s_1$ für δ und $u_1 s_1$ für u_1 einzuführen, also Winkelmaß für die Abweichung und lineares für die Öffnung.

Statt der Kugelflächen werden auch sphäroidische Flächen verwandt, die von der Kugel wenig abweichen und durch Umdrehung um die optische Achse erzeugt sind; man vergleicht diese Fläche mit der im Scheitel berührenden Kugelfläche vom Radius r . Wir beschränken uns auf solche, bei denen der Unterschied σ zwischen gleichgerichteten Radienvektoren von der Kugelmitte gegeben ist durch

$$\sigma = \frac{1}{4} x r^4 \varphi^4,$$

wo x die Flächenabweichung kennzeichnet. Innerhalb der Gültigkeitsgrenzen der obigen Fehlerausdrücke können diese Flächen ersetzt werden durch die, deren Meridiankurve ein Kegelschnitt ist. Für diese gilt

$$x = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon^2}{\rho^3},$$

wo ε die numerische Exzentrizität und 2ρ der Parameter ist. Für diese Flächen treten zu den obigen Ausdrücken unter dem Σ -Zeichen noch Glieder $2x_v \frac{\mathcal{A}}{\nu} n$, von deren Ableitung wir absehen. Wir wollen noch für den Sonderfall eines Doppelspiegels mit Spiegelabstand d_1 , wie er für Spiegelfernrohre, z. B. die nach CASSEGRAIN und GREGORY (S. 72), Verwendung findet, die Ausdrücke in Winkelmaß auf der Dingsseite für die folgenden Bildfehler (S. 26) geben: sphärische Abweichung δ_A , Koma im engeren Sinne δ_B und sagittale bzw. tangentielle Bildkrümmung δ_C bzw. δ_D , wenn $s_1 = \infty$ und $x_1 = 0$ ist. Es ist dann, wenn $\rho_2, s = \rho_s = (r_1 + 2d_1): r_1$ gesetzt wird und h_1 der Öffnungshalbmesser ist,

$$\begin{aligned} \delta_A &= \frac{h_1^3}{2} \left[-\frac{2}{r_1^3} + 4x_1 - \rho_s^4 \left\{ \left(\frac{1}{r_2} + \frac{2}{\rho_s r_1} \right)^2 \frac{2}{r_2} - 4x_2 \right\} \right], \\ \delta_B &= \frac{3}{2} h_1^2 w_1 \left[\frac{2}{r_1^2} + \frac{(\rho_s - 1) \rho_s^3 r_1}{2} \left\{ \left(\frac{1}{r_2} + \frac{2}{\rho_s r_1} \right) \left(\frac{1}{r_2} + \frac{2}{(\rho_s - 1) r_1} \right) \frac{2}{r_2} - 4x_2 \right\} \right], \\ \delta_C &= \frac{1}{2} h_1 w_1^2 \left[-\frac{2}{r_2} + \frac{(\rho_s - 1)^2 \rho_s^2 r_1^2}{4} \left\{ \left(\frac{1}{r_2} + \frac{2}{(\rho_s - 1) r_1} \right)^2 \frac{2}{r_2} - 4x_2 \right\} \right], \\ \delta_D &= 3\delta_C + 2h_1 w_1^2 \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right). \end{aligned}$$

Die Flächenabweichung des ersten Spiegels hat somit keinen Einfluß auf Koma und Bildkrümmung. Ist die sphärische Abweichung und Koma für den Doppelspiegel gehoben, so wird die Bildkrümmung unabhängig von der Blendenstellung, wie sich aus der geometrischen Auffassung der Bildfehler unmittelbar ergibt; in diesem Falle ist hier die sagittale Bildkrümmung, der Ausdruck [...] in δ_C , (F = Gesamtbrennweite)

$$e_s = -\frac{\rho_s - 1}{\rho_s} r_1 \left(\frac{2}{r_1^2} - \frac{1}{4F^2} \right); \quad \frac{1}{2F} = \frac{1}{r_1} + \frac{\rho_s}{r_2}.$$

Ist die sphärische Abweichung für die Einzelspiegel gehoben, so ist bei einer Öffnungsblende im ersten Spiegel

$$\delta_B = \frac{3 h_1^2 w_1}{4 F^2},$$

$$e_s = \frac{2(\rho_s - 1)}{r_2} \left(2 + \frac{\rho_s r_1}{r_2} \right).$$

Die Koma ist hier nur für $F = \infty$ gehoben. Liegt dagegen die Öffnungsblende im zweiten Spiegel ($x_2 = 0$) und ist wieder $s_1 = \infty$, so ist

$$\delta_B = \frac{3}{2} h_1^2 w_1 \left[\frac{\rho_s + 1}{\rho_s} \frac{1}{r_1^2} + \frac{2(\rho_s - 1)}{\rho_s} r_1 x_1 + \frac{2\rho_s}{r_2} \left(\frac{\rho_s}{r_2} + \frac{2}{r_1} \right) \right],$$

$$\delta_C = \frac{1}{2} \frac{h_1 w_1^2}{\rho_s^2} \left[\frac{1 + 2\rho_s - 3\rho_s^2}{2} \frac{1}{r_1} - (\rho_s - 1)^2 r_1^2 x_1 \right].$$

Für δ_A und δ_D gelten dieselben Formeln wie für $x_1 = 0$; ebenso für die Bildkrümmung für den Fall, daß $\delta_A = \delta_B = 0$ ist. Ist die sphärische Abweichung für die Einzelspiegel gehoben, so ist hier bei Öffnungsblende im zweiten Spiegel

$$\delta_B = \frac{3 h_1^2 w_1}{4 F^2}; \quad e_s = \frac{2(1 - \rho_s)}{\rho_s r_1}.$$

Bei aufgehobener sphärischer Abweichung ist die Koma von der Blendenstellung unabhängig. Von den ersten Formeln ausgehend kann man auch die Fehler außer der Achse für den Fall untersuchen, wo die sphärische Abweichung des Doppelspiegels durch die Flächenabweichung nur eines Spiegels gehoben ist.

Um eine Übersicht zu bekommen, kann man für Kreise in der Eintrittspupille, die zur Achse konzentrisch und in der Größe abgestuft sind, ($u_1^2 + u_s^2 = \text{const.}$) die entsprechenden Abweichungskurven in gleicher Koordinatenkreuzlage für verschiedene Werte von w zeichnen. Man kann aber auch die ganze Abweichung in die den 5 Koeffizienten A bis E entsprechenden Teilabweichungen, die sogenannten 5 SEIDEL'schen Bildfehler zerlegen. Durch entsprechende Wahl der Bestimmungsstücke des Systems können alle oder einzelne dieser Koeffizienten gleich Null gemacht werden, man spricht dann von Korrektur oder Hebung der betreffenden Bildfehler. Sind alle Bildfehler bis auf einen gehoben, so hat man die Wirkung dieses Bildfehlers für sich. Der A -Fehler ist unabhängig von w , d. h. über das ganze Gesichtsfeld gleich und in dessen Mitte allein vorhanden. Da $\delta_z : \delta_s = u_z : u_s$ ist, fällt die ganze Abweichung $\delta = \sqrt{\delta_z^2 + \delta_s^2}$ in die Ebene durch den Strahl und den Hauptstrahl, sie ist der 3. Potenz von $u = \sqrt{u_z^2 + u_s^2}$, dem halben Öffnungswinkel, proportional. Dieser Fehler heißt die sphärische Abweichung in der Achse oder Kugelgestaltfehler, da man ihn durch Abweichung einer Fläche des Systems von der Kugelgestalt heben kann. Diese Abweichung

für parallel einfallendes Licht bezogen auf die Brennweite ist für eine Sammellinse aus gewöhnlichem Kronglas von der günstigsten Form $r_2 : r_1 = -6$ gleich $2,14 u'^3$, bei Zerlegung in zwei Sammellinsen mindestens $0,43 u'^3$. Statt durch die Seitenabweichung kann man diesen Fehler auch durch die Längsabweichung, den Abstand des Schnittpunkts eines Strahls des Bündels mit der Achse von der GAUSSSISCHEN Bildebene, messen; diese ist gleich $\delta : u'$, also u'^2 proportional. Abb. 16 zeigt ein mit sphärischer Abweichung behaftetes Achsenbündel. Weicht der Schnittpunkt des Randstrahls wie gezeichnet entgegengesetzt der Lichtbewegung ab,

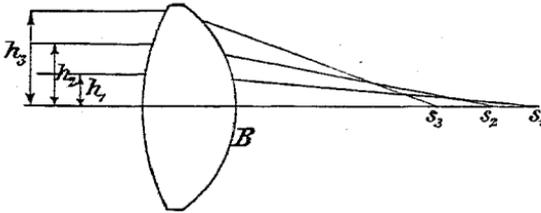


Abb. 16. Die sphärische Abweichung einer einfachen Sammellinse.

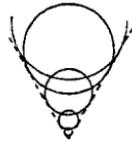


Abb. 17. Die Abweichungskurven der Koma.

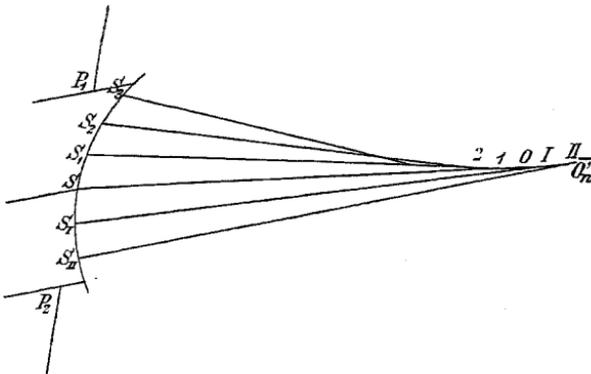


Abb. 18. Die Koma als Längsabweichung.

so spricht man von sphärischer Unterkorrektion, bei entgegengesetzter Abweichung von Überkorrektion. Die Untersuchung des B -Fehlers ergibt, daß den Öffnungskreisen mit dem Polarwinkel φ als Abweichungskurven ein System von Kreisen mit dem Polarwinkel 2φ entspricht, die von zwei Geraden, die mit dem Hauptschnitt einen Winkel von 30° bilden, berührt werden (Abb. 17). Man bezeichnet den Fehler wegen der kometenähnlichen Zerstreungsfigur als Koma; sie ist w proportional. Vielfach betrachtet man nur die Abweichung der im Hauptschnitt verlaufenden Strahlen, die Koma im engeren Sinne; sie ist u'^2 , die entsprechende Abweichung des Schnittpunkts mit dem Hauptstrahl u' proportional, wie es Abb. 18 zeigt. Während bei der sphärischen Abweichung

die Abweichungen der Schnittpunkte von der Mitte nach dem Rande der Öffnung zu- oder abnehmen, nehmen sie hier von Rand zu Rand zu oder ab. Die Fehler C und D bestimmen zusammen elliptische Abweichungskurven. Den Bau eines mit solchen Fehlern behafteten Büschels zeigt Abb. 19. Die Abweichung δ_t ist u_t proportional, d. h. alle dem Hauptschnitt parallelen ebenen Büschel haben dieselbe Längsabweichung ihres Schnittpunkts, diese Schnittpunkte bilden eine kurze achsensenkrechte Gerade, die tangentiale (meridionale) Brennlinie des Büschels; das Gleiche gilt für die zum Hauptschnitt senkrechten ebenen Büschel. nur ist der Abstand dieser zur anderen senkrechten sagittalen Brennlinie von der GAUSSISCHEN Bildebene ein anderer. Die Abweichungsfiguren in den zur GAUSSISCHEN Bildebene parallelen Ebenen sind Ellipsen, die bei Annäherung an die Brennlinien immer schmaler werden, um in diese überzugehen, in der Mitte zwischen ihnen gehen sie in einen Kreis

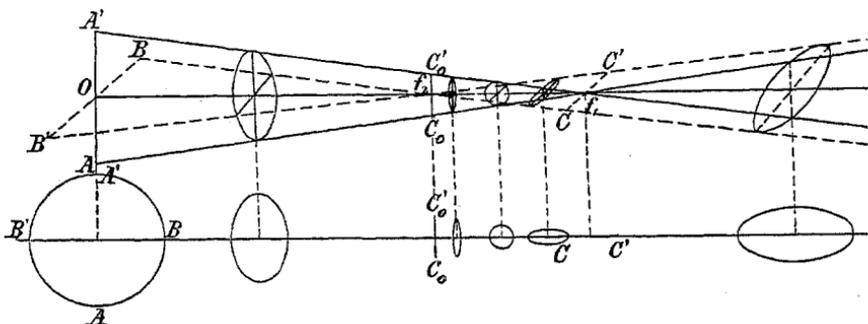


Abb. 19. Ein mit Astigmatismus behaftetes Büschel.

über. Da der Abstand der Brennlinien von der GAUSSISCHEN Bildebene mit w^2 wächst, liegen innerhalb der hier geltenden Näherung die tangentialen bzw. sagittalen Brennlinien je auf einer die GAUSSISCHE Bildebene in der Achse berührenden Kugel mit einer C bzw. D proportionalen Krümmung (Kehrwert des Radius) ρ_t bzw. ρ_s . Handelt es sich um die Abbildung eines durch die Achse gehenden geraden Durchmessers in einer achsensenkrechten Ebene, so liegen die sagittalen Brennlinien sich überdeckend in einem Durchmesser als scharfes Bild; die Gesamtheit solcher Durchmesser wird so auf der sagittalen Bildkugel scharf abgebildet. Handelt es sich dagegen um die Abbildung zur Achse konzentrischer Kreise in dieser Dingenbene, so sind die Bilder wieder zur Achse konzentrische scharfe Kreise, deren Gesamtheit auf der tangentialen Bildkugel liegt. Diese Linien nennt man abbildbare Linien. Zu anderen Linien gibt es überhaupt kein scharfes Bild. Den Unterschied der beiden Bildkrümmungen $\rho_t - \rho_s$ bezeichnet man als Astigmatismus schiefer Büschel des Systems; spricht man von dem Astigmatismus für eine bestimmte Hauptstrahlneigung oder von dem eines Büschels, so

ist der Abstand der Brennlinien gemeint; das Fremdwort drückt aus, daß die Strahlen nicht in einem Punkt zusammenlaufen. Den Mittelwert von q_t und q_s nennt man Bildfeldkrümmung im übertragenen Sinne. Ist $q_t - q_s = 0$, so nennt man das System für das vorliegende Feld punktuell abbildend oder astigmatisch korrigiert; ist $q_t + q_s = 0$, so nennt man es auf Bildfeldebnung im übertragenen Sinne korrigiert; ist $q_t = q_s = 0$, so besitzt das System Ebnung des punktuellen Feldes oder anastigmatische Bildfeldebnung, ist anastigmatisch. Es sei noch der PETZVALSche Satz hervorgehoben:

$$q_t - 3 q_s = 2 \sum \frac{\varphi}{n},$$

wo φ die Stärke der Linsen bzw. Kugelspiegel bei Vernachlässigung der Dicken bedeutet und n das Brechungsverhältnis (für den Kugelspiegel $= -1$). Für ein anastigmatisches System muß die Summe Null sein (PETZVALSche Bedingung). Wird ein System, das frei von Astigmatismus ist und die Bildkrümmung q besitzt, auf Bildfeldebnung im übertragenen Sinne (Abb. 20) umkorrigiert, ohne daß diese Summe geändert wird, so werden die beiden Bildkrümmungen entgegengesetzt und gleich $q:2$. Vergleicht man nun die Zerstreuungskreise in einer achsensenk-rechten Ebene für ein gegebenes Bildfeld, wobei im ersten Fall ausgleichend einzustellen ist, so daß die Zerstreuungskreise am Rand und in der Mitte des Feldes gleich groß werden, im zweiten Fall für die Mitte einzustellen ist, so sind diese Kreise gleich groß; beim Fernrohr

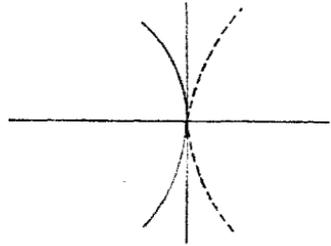


Abb. 20. Bildfeldebnung im übertragenen Sinne.

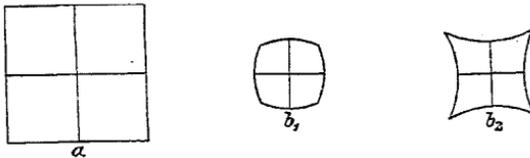


Abb. 21. Verzeichnung des Gegenstands a , b_1 tonnenförmig, b_2 kissenförmig.

wird man meist den zweiten Fall vorziehen. Der E -Fehler ist unabhängig von u_t und u_s und nur proportional w^3 , er gibt die Abweichung des Hauptstrahls an, man bezeichnet ihn als Verzeichnung und unterscheidet kissen- und tonnenförmige Verzeichnung (Abb. 21), je nachdem die Bilder der zu den Durchmessern des Bildfeldes parallelen Geraden von der Achse weg oder nach ihr zu gekrümmt sind. Meist gibt man die Verzeichnung in Prozenten der Größe des Bildes von 1 an; sie ist dann w^2 proportional. Bei teleskopischen Systemen treten an Stelle von

u_z und u_s die Komponenten der Einfallshöhe in der Eintrittspupille h_z und h_s ; die Seitenabweichungen werden im Winkelmaß angegeben. Man bezieht sie oft auf die unendlich entfernte Dingebene zurück, indem man sie durch die Fernrohrvergrößerung dividiert; man erkennt so unmittelbar, wie weit die Verundeutlichung das Erkennen feiner Einzelheiten des Gegenstands beeinträchtigt.

Berücksichtigt man die 5. Potenzen von u_z , u_s und w , so erhält man 9 neue Bildfehler höherer Ordnung (siehe weiter unten). Auf diesem Wege sind aber die praktischen Erfolge in der Verbesserung der Bildgüte der optischen Systeme meist nicht erzielt worden. Man hat sich vielmehr mit einem ungleichmäßigen Ausbau der Theorie begnügt. Die sphärische Längsabweichung eines axialen Büschels endlicher Öffnung ist eine Funktion von u , die man graphisch in rechtwinkligen Koordinaten darstellen kann. Trägt man die u -Koordinaten nach den Werten von u^2 auf und verbindet die Endpunkte der Kurve durch eine Gerade, so nennt man die Abweichung der Kurve gegen diese Gerade die Zonen der sphärischen Aberration. Fällt die Gerade in die u -Achse, d. h. ist die sphärische Abweichung für den Randstrahl gehoben, so stellen die Zonen die Restabweichung dar, die man auch erkennt, wenn man s als Funktion von u bzw. h darstellt (Abb. 22). In vielen Fällen ist nur ein

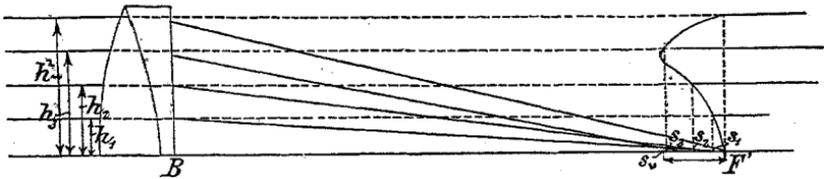


Abb. 22. Darstellung der sphärischen Abweichung als Funktion der Einfallshöhe.

Maximum der Zonenabweichung vorhanden; überwiegt das Glied mit der 5. Potenz die höheren Glieder stark, so liegt es nahe bei $u = u_{\max} \sqrt{0,5}$ und kann als Maß der Zonenabweichung dienen. An die Stelle der tangentialen und sagittalen Bildkugel treten bei endlicher Neigung der Hauptstrahlen eine tangentiale und sagittale Umdrehungsfläche um die Achse als Orte der scharfen Abbildung des Systems von Kreisen und Durchmessern in der Dingebene. Man kann die Abstände, die die Punkte der Erzeugenden dieser Umdrehungsflächen von der GAUSSISCHEN Bildebene haben, ebenso als Funktion von w graphisch darstellen. Beim Fernrohr wird man statt dieser Abweichungen den Unterschied des Kehrwerts der tangentialen bzw. sagittalen Schnittweite gegen den der Achsenschnittweite der GAUSSISCHEN Bildebene in Dioptrien auftragen, wobei diese Schnittweiten von der Austrittspupille zu rechnen sind. Für die Verzeichnung in allen zugeordneten Ebenenpaaren genügt es, den Gang der Hauptstrahlen zu kennen; sie hängt von der sphärischen Abweichung, mit der die Aperturblendenmitte in die Eintritts- und Austrittspupille abgebildet wird, und von dem Gang des Konvergenzverhältnisses $\text{tg } w'$: $\text{tg } w$ in den Pupillen ab. Beim teleskopischen System hängt die Verzeichnung nur von dem Gang des Konvergenzverhältnisses ab. Bei einem für kurze Bildweiten eingestellten Fernrohr kann dagegen die sphärische Abweichung der Austrittspupille von Bedeutung sein. Man stellt die Verzeichnung in Prozenten als Funktion von w dar. In demselben Sinne wie bei der sphärischen Aberration von Öffnungszonen kann man bei der Bildkrümmung und bei der Verzeichnung von Gesichtsfeldzonen reden als Abweichung von dem w^2 proportionalen Gang. Die gemessenen Werte der Verzeichnung können bei unsymmetrischen Zerstreungskreisen von den berechneten abweichen, da die Auffassung der Mitte dann unsicher wird, wenn diese nicht etwa durch eine die Mitte der Öffnung

abdeckende Blende hervorgehoben ist. Hier soll ferner die Frage beantwortet werden, weshalb die Vergrößerung des Fernrohres nach dem Verhältnis $tg w' : tg w$ und nicht nach $w' : w$ bemessen wird. Bei der Wiedergabe der Darstellung in einer Ebene in einer anderen Ebene ist das Auge besonders empfindlich dafür, ob Geraden als Geraden wiedergegeben werden; nur dann erscheint die Wiedergabe treu, frei von Verzeichnung. Als Aufgabenebene beim Fernrohr gilt uns die unendlich ferne Ebene; da es hier nur auf die Hauptstrahlen ankommt, kann eine achsenkrechte Einstellenebene angenommen werden. Geraden in der einen Ebene werden in diesem Falle nur dann in der anderen Ebene als Geraden wiedergegeben, wenn $tg w' : tg w$ unabhängig von w ist. Es ist daher zweckmäßig $tg w' : tg w$ als Maß der Vergrößerung zu wählen, weil so die Lagenzeichnungen bei der erstrebten treuen Darstellung einfach ausgedrückt werden können. Endlich kann man noch ein einfaches Kennzeichen für die Aufhebung der Koma bei endlicher Öffnung und kleiner Hauptstrahlneigung angeben, die **ABBESCHE** Sinusbedingung. In der von **STAEBLE** erweiterten Form lautet sie: Im axialen Büschel muß sich das Verhältnis $\sin u' : \sin u$ mit u in demselben Verhältnis ändern wie die Schnittweite des Bildstrahls gerechnet von der Austrittspupille.

Bezüglich der oben erwähnten 9 Bildfehler höherer Ordnung sei noch erwähnt, daß 5 von diesen den Gesichtsfeldzonen der 5 **SEIDEL**schen Bildfehler entsprechen; sie sind nur einer um 2 höheren Potenz von w proportional. Die übrigen 4 Bildfehler entsprechen den Öffnungszonen der **SEIDEL**schen Bildfehler. Dies Öffnungszonenglied der sphärischen Abweichung wurde schon oben besprochen. Die Abweichungskurven des Öffnungszonenglieds der Koma sind Kreise, die innerhalb eines Winkels von $81,6^\circ$ liegen (Abb. 23), die Abweichungskurven des einen Öffnungszonenglieds der Bildkrümmung, des Flügelfehlers, zeigt Abb. 24, die Abweichungskurve des Öffnungszonenglieds der Verzeichnung, des Pfeilfehlers, besteht aus einem geraden Strich, der sich vom **GAUSS**ischen Bildpunkt aus nach einer Seite in der Richtung des Gesichtsfeldsradius erstreckt.

Die bisher behandelten Bildfehler faßt man auch als sphärische Abweichungen zusammen im Gegensatz zu den Farben-(chromatischen) Abweichungen. Bei den Systemen, die Linsen enthalten, ist nämlich zu beachten, daß sich das Brechungsverhältnis mit der Farbe ändert, und daß so dem Gegenstand eine Reihe über- und hintereinanderliegender ungleicher Bilder in verschiedenen Farben entspricht, da sich sowohl die Lage wie die Größe des Bildes mit der Farbe ändern kann. Den ersten Fehler bezeichnet man als Farbenlängsabweichung; man mißt sie durch die Achsenprojektion des Abstands der Bildpunkte für zwei ausgewählte Farben, die bei Instrumenten zur Unterstützung des Auges gewöhnlich den **FRAUNHOFER**schen Linien C und F ($\lambda = 0,656$ und $0,486 \mu$) entsprechen; als Maß für die Verundeutlichkeit dient die Farbenseitenabweichung, die Abweichung des Randstrahls der zweiten Farbe gegen den Bildpunkt der ersten Farbe in deren **GAUSS**ischer Bildebene oder der gleich große Durchmesser des Zerstreungskreises für jede der beiden Farben in der mittleren Bildebene. Der zweite Fehler ist die Farbenabweichung

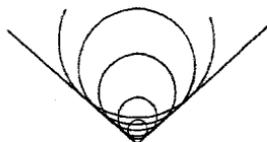


Abb. 23. Abweichungskurven der Koma zweiter Stufe.



Abb. 24. Abweichungskurven des Flügelfehlers.

der Vergrößerung des Bildes (chromatische Vergrößerungsdifferenz); die Verundeutlichung ist gegeben durch das Auseinandertreten der Hauptstrahlen für die beiden Farben in der Einstellebene, sie ist in erster Annäherung w proportional. Der Unterschied Δn des Brechungsverhältnisses für F und C heißt die Dispersion $C-F$; dividiert man mit ihr in das um 1 verminderte Brechungsverhältnis für die erste Farbe, so erhält man den ν -Wert. Für die Planplatte mit der Dicke d ist die Farbenlängsabweichung

$$\Delta s' = \frac{d \Delta n}{n(n + \Delta n)}.$$

Ist die Stärke der dünnen Linse für die erste Farbe φ , so ist der Stärkenunterschied für die beiden Farben $\varphi : \nu$; die Längsabweichung ist angenähert $f : \nu$, die Seitenabweichung $f \operatorname{tg} u' : \nu$; wird sie in die unendlich ferne Dingebene zurückentworfen, um wie oben als Maß der Verundeutlichung in dieser zu dienen, und in Winkelmaß gemessen, so wird sie $\operatorname{tg} u' : \nu$ oder $D : (2 f \nu)$.

Der ν -Wert ist für verschiedene Glasarten verschieden. Vereint man eine dünne Sammellinse aus Kronglas mit einer dünnen Zerstreuungslinse aus Flintglas zu einer dünnen sammelnden Doppellinse, so kann man die Einzelstärken φ_1 und φ_2 so wählen, daß $\varphi_1 + \varphi_2 = \Phi$, einer gegebenen Gesamtstärke, und $\frac{\varphi_1}{\nu_1} + \frac{\varphi_2}{\nu_2} = 0$, d. h. die Farbenabweichung für die Brennweite und die Brennpunkte und damit überhaupt gehoben ist. Eine solche Doppellinse nennt man achromatisch (farbenfrei) oder einen Achromaten. Für manche Zwecke brauchen nur die Brennweiten für beide Farben gleich zu sein; man kann dies schon durch Zusammenetzen von zwei Sammellinsen erreichen, deren Abstand gleich dem arithmetischen Mittel ihrer Brennweiten ist. Die vorerwähnte dünne achromatische Doppellinse zeigt für andere Farben noch Abweichungen, die man sekundäres Spektrum nennt. Die dritte Farbe sei G' ($\lambda = 434 \mu$), dann nennt man $(n_G - n_C) : (n_F - n_C)$ die relative Teildispersion oder den \mathcal{D} -Wert. Es ist nun die Stärkenabweichung der dritten Farbe bei einem dünnen Linsensystem

$$W\Phi = \sum_{r=1}^K \frac{\mathcal{D}_r \varphi_r}{\nu_r}.$$

Für die Glasarten gilt mit einigen Ausnahmen praktisch

$$\mathcal{D}_r = A + B\nu_r,$$

wo $A = 1,674$ und $B = -0,0018$ ist. Setzt man dies ein, so erhält man für ein achromatisches System (${}_C\mathcal{A}_F\Phi = 0$, also für $\mathcal{D} = 1$ ist $W\Phi = 0$). $W\Phi = -0,0018 \Phi$ praktisch gleichbedeutend mit $WF = 0,0018 F$. Der Fehler ist bei großen Brennweiten recht störend, er kann bei einem dünnen Linsensystem nur gehoben werden, wenn bei den benutzten

Glasarten \mathcal{D} nicht linear von ν abhängig ist. Erst in neuerer Zeit ist es der Glastechnik durch die vereinten Bemühungen von ABBE und SCHOTT gelungen, für größere Fernrohrobjektive solche Glasarten zu schmelzen. Man bezeichnet Systeme mit verringertem sekundärem Spektrum als Apochromate. Abb. 25 gibt einen Vergleich von Achromat und Apochromat, wobei die Abweichung für eine bestimmte Brennweite in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichts dargestellt ist. Bei einem System aus getrennten Linsen mit alten Glasarten kann das sekundäre Spektrum zwar gehoben werden, es wird aber der Bildpunkt für einen reellen Dingpunkt virtuell.

Man kann nun fragen, welche Farben bei einem Achromaten zu vereinigen sind. Es kommt darauf an, was für Licht von den Gegenständen

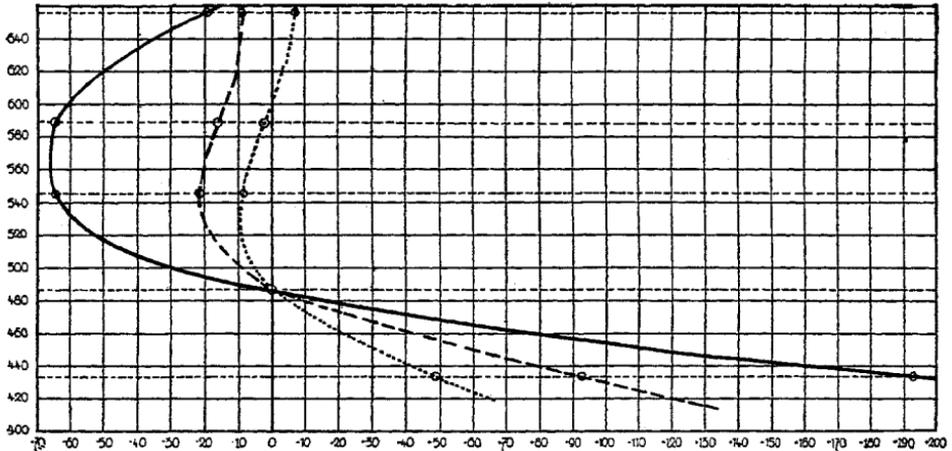


Abb. 25. Die Farbenlängsabweichung verschiedener Objektive. — Achromat, --- 2-linsiger Apochromat, 3-linsiger Apochromat. Abscissen: Wellenlängen in $\mu\mu$; Ordinaten: Abweichungen in F : 10000. Der Darstellung liegen die Messungen an einer größeren Anzahl ZEISSISCHER Objektive zugrunde.

ausgeht, und wie sich die Empfindlichkeit der Aufnahmeschicht (der Netzhaut oder der photographischen Platte) mit der Wellenlänge ändert. Es gilt für zweckmäßig, daß die wirksamste Wellenlänge dem Scheitel der Farbenabweichungskurve entspricht; man vereinigt so für Beobachtungszwecke C und F (wie in Abb. 25), für Astrophotographie F und H_{β} ($\lambda = 0,410 \mu$). Bei stärkerer Farbenabweichung wird für einen Teil der Farben der Zerstreungskreis in der Einstellebene so groß, daß sie für die Erzeugung des Bildpunkts praktisch nicht in Betracht kommen; die achsensenkrechte Schicht, die die Bildpunkte der wirksamen Farben enthält, nennt man Fokalschicht, man nimmt an, daß die eine Grenzebene dem Scheitel der Farbenkurve entspricht. Die Einstellebene des besten Bildes liegt jedenfalls in der Fokalschicht und nahe dem Scheitel. Es sei noch erwähnt, daß sich auch die Bildfehler mit der Farbe ändern; in früherer

Zeit ist viel von der Aufhebung der sphärischen Abweichung für zwei Farben, der Erfüllung der sogenannten GAUSSSISCHEN Bedingung, geredet worden; ihre praktische Bedeutung für das Fernrohr ist überschätzt worden.

6. Die Bilderzeugung vom Standpunkt der Beugungslehre.

Es wurde bisher angenommen, daß die Lichtverteilung in der Einstellebene die Summe der Wirkung voneinander unabhängiger Lichtstrahlen sei. Von dieser Annahme ausgehend hat die rechnende Optik ihre Erfolge erzielt, indem sie eine möglichst gute Strahlenvereinigung erstrebte. Bei der Erörterung mancher Fragen ist es aber nötig, sich auf den Boden der Wellenlehre des Lichts zu stellen. Einem Büschel, dessen Strahlen in einen Punkt O zusammenlaufen, entspricht hier eine Wellenfläche von der Form einer Kugel mit O als Mittelpunkt. Die Lichtverteilung von O hängt von der Begrenzung der Kugelwelle, der Form der Öffnungsblende, ab und ist als FRAUNHOFERSCHE Beugungserscheinung bekannt. Bei einer Kreisöffnung mit dem Durchmesser D und der Mitte P ist die Lichtstärke bei Licht von der Wellenlänge λ für einen Punkt im Abstand r von O in der Ebene durch O senkrecht zu $PO = f$ eine Funktion von $g = \pi r D : (\lambda f)$. Stellt man die Lichtverteilung als Funktion von g

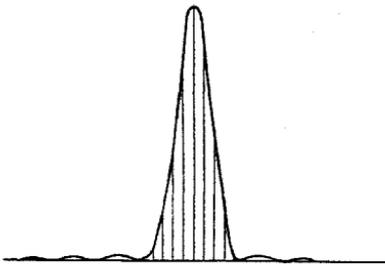


Abb. 26. Die Lichtverteilung in dem Beugungsscheibchen einer kreisförmigen Öffnung.

dar, so kann man aus der Kurve (Abb. 26) für alle Fälle die Lichtverteilung bequem entnehmen. Man unterscheidet in dem Beugungsbild das mittlere hellere Scheibchen von den umgebenden farbigen Ringen, die rasch an Helligkeit abnehmen. Wir messen die Größe des Beugungsscheibchens durch die Winkelgröße des ersten dunklen Rings ψ ; bei den kleinen Scheibchen, die hier in Betracht kommen, ist $\psi = 1,22 \lambda : D$; wird D in mm gemessen, so ist $\psi = 138'' : D$ in Winkelmaß. Auf der Netzhaut des Auges entsteht so bei 5 mm Pupille ein Beugungsscheibchen, das einem Winkel von etwa $30''$ entspricht; seine Größe ist also

angenähert gleich der Zapfengröße, die somit den optischen Verhältnissen gut angepaßt ist. Betrachtet man durch das Fernrohr bei Nacht einen Stern, so erhält man bei der normalen und bei schwächerer Vergrößerung dasselbe Scheibchen, bei übernormaler Vergrößerung, wo die Austrittspupille des Fernrohrs kleiner als die Augenpupille ist, das dieser kleineren Öffnung entsprechende größere Scheibchen. Um die Ringe zu sehen, muß man einen hellen Stern wählen und die Vergrößerung wenigstens gleich der doppelten Normalvergrößerung nehmen.

Es soll nun zunächst die Frage der Sichtbarkeit der Sterne behandelt werden. Wir nehmen an, daß hierfür nur das Beugungsscheibchen maßgebend ist und gerade einen Zapfen deckt, wenn das Fernrohr die Normalvergrößerung Γ_0 besitzt, für die wir eine Augenpupille von etwa 5 mm zugrunde legen wollen. Ist die Vergrößerung $\Gamma < \Gamma_0$, so gelangt im Verhältnis $\Gamma^2 : \Gamma_0^2$ weniger Licht in das Auge, während das Beugungsscheibchen unverändert bleibt. Bei dunklem Nachthimmel ist somit die Sichtbarkeitsgrenze im Entfernungsmaß $\Gamma : \Gamma_0$ und kleiner als für $\Gamma = \Gamma_0$; bei hellem Hintergrund ist es noch ungünstiger, da dessen Helligkeit nach S. 20 unverändert bleibt. Ist dagegen $\Gamma > \Gamma_0$, so ist die Lichtstärke des Himmels im Verhältnis $\Gamma_0^2 : \Gamma^2$ geschwächt. Es kommt nun auf den Kontrast des Sternbilds gegen das Himmelslicht und das Eigenlicht der Netzhaut an; dies Eigenlicht bleibt unverändert, es hat etwa die Helligkeit einer schwarzen Samtfläche, die durch eine 3 m entfernte Stearinkerze beleuchtet wird. Die Lichtstärke des Nachthimmels ist für 1 Quadratgrad nach neueren Messungen etwa gleich 0,13 in Sternmaß. Damit sich die Hellig-

keit H einer Fläche von der Helligkeit H_u der Umgebung abhebt, muß $H:H_u = 1 + \epsilon$ sein, wo ϵ die Verhältnisschwelle des Auges und hier gleich einigen Hundertstel anzuwenden ist. Sind die Lichtstärken von Stern, Himmel und Eigenlicht I, i, e und die Durchmesser des Objektivs, der Austrittspupille und der Augenpupille D, d und d' , so ist

$$\frac{H}{H_u} = \frac{id^2 + e d'^2 + ID^2}{id^2 + e d'^2},$$

wenn man nach dem RICCOSCHEN Gesetz (S. 17) die gesamte Lichtmenge im Beugungsscheibchen als maßgebend für die empfundene Flächenhelligkeit ansieht. Das ungleiche Maß für I und i bzw. e kann unbeachtet bleiben, da hier nur die Art des Zusammenhangs der Größen erörtert werden soll. Nun ist

$$\epsilon = \frac{I \Gamma_0^2}{i + e \Gamma_0^2}.$$

Setzt man die Intensität eines Sterns an der Sichtbarkeitsgrenze bei völlig dunklem Himmel $= I_g$ (man erhält sie für $i = 0$, wo $\epsilon = I_g \Gamma_0^2 : e$), so ist

$$I = I_g \left(1 + \frac{i \Gamma_0^2}{e} \right).$$

Die Intensität für die Sichtbarkeitsgrenze nimmt also mit der Übervergrößerung ab; bei dunklem Nachthimmel ändert sich die Sichtbarkeitsgrenze mit der Übervergrößerung nicht, bei hellem Himmel liegt sie tiefer. Bei der Normalvergrößerung ist die Sichtbarkeitsgrenze bis auf die I_0 fache Entfernung oder bis zur Γ_0^2 mal kleineren Intensität gesteigert, wenn die Pupille beim Sehen mit bloßem Auge und durch das Fernrohr dieselbe ist. Die Helligkeit des Netzhautbildes eines Sterns ist bei Normalvergrößerung Γ_0^2 mal größer als im freien Sehen. Die Erkennbarkeit von hellen Linien auf dunklem Grunde und von dunklen Punkten oder Linien auf hellem Grunde ist nach denselben Grundsätzen zu beurteilen. Die Helligkeit des Netzhautbildes einer Linie hängt aber linear von I_0 ab.

Die nächste Frage betrifft die Trennung von Doppelsternen; die beiden Sterne seien gleich hell. Abb. 27 zeigt die Übereinanderlagerung der beiden Beugungsscheibchen bei einem Abstände ψ ; hier besteht zwischen den Gipfeln ein Lichtabfall von 15%, der meist genügen wird, um trotz den noch zu erörternden Störungen die Sterne zu trennen. Da für das Beugungsscheibchen und damit für den Trennungswinkel im Bildraum die Größe der Augenpupille maßgebend ist, ist es im Dingraum der Objektivdurchmesser; dort ist dieser Winkel erfahrungsgemäß etwa gleich $116'' : D$ in mm, also etwas kleiner als der oben errechnete Wert; den Kehrwert des obigen Wertes von ψ sieht man als Maß des Trennungs-, Unterscheidungs- oder Auflösungsvermögens an. Bei dem Erkennen von Einzelheiten handelt es sich ja darum, ob benachbarte Punkte oder Linien getrennt gesehen werden. Bei leuchtenden Flächen, die unter einem größeren Winkel als ψ' erscheinen, besteht das Bild aus der Übereinanderlagerung der den einzelnen Punkten entsprechenden Scheibchen; je größer die Scheibchen, desto unschärfer erscheinen die Grenzen zwischen Hell und Dunkel, besonders der Rand; die Scheibchen wirken wie das Korn einer photographischen Platte.

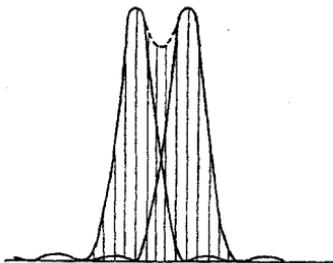


Abb. 27. Die Lichtverteilung bei Übereinanderlagerung zweier Beugungsscheibchen.

Die obige Erfahrungsformel für ψ leitete DAWES aus seinen Doppelsternbeobachtungen ab, sie gilt nach ihm für mittlere Luftverhältnisse. Es kommt auch auf die absolute und relative Helligkeit der Teilsterne an, doch soll ein Unterschied von

3 Größenklassen noch unschädlich sein; ein schwacher Begleiter kann aber leicht im ersten hellen Ring des Hauptsterns verschwinden. Für $D > 80$ soll bei Doppelsternen eine Vergrößerung $27,8 \sqrt{D}$ zweckmäßig sein. FOUCAULT fand auf Grund von Gitterbeobachtungen mit stärkeren astronomischen Fernrohren den theoretischen Wert. RAYLEIGH beobachtete Gitter mit schwächeren Fernrohren und fand für rechteckige Öffnung $\psi = \lambda : D$ und für kreisförmige $\psi = 1,1 \lambda : D$. Nach NOETZLI scheint für schwächere Vergrößerungen die einfache Formel nicht zu stimmen; er beobachtete auf der STAMPFERSchen Prüfungstafel (Abb. 28), bis zu welcher Stelle auf ihr die Auflösung reichte, und fand $\psi = (38,5 : D) + 1''$ für $D = 1$ bis 54 mm.



Abb. 28. STAMPFERS
Tafel zur Prüfung des
Auflösungsvermögens.

Diese Betrachtungen gelten nur für selbstleuchtende Gegenstände, bei denen das Licht des einen Beugungsscheibchens mit dem des anderen nicht interferieren kann, so daß sich die Intensitäten in den zusammenfallenden Punkten des Scheibchens addieren. Bei nicht selbstleuchtenden Gegenständen kann das Ergebnis der Interferenz ein anderes sein. ABBE, der zuerst diesen Unterschied erkannte, behandelt die Bildentstehung für solche Gegenstände in der folgenden aufschlußreichen Weise. Er verfolgt das Licht von der Lichtquelle an, die zunächst punktförmig angenommen werde. Fällt dies Licht auf eine beliebig gegliederte und begrenzte Fläche, deren Teile das

Licht in verschiedener Weise durchlassen bzw. zurückwerfen, so kommt es auf das in der Ebene der Objektivöffnung entstehende Beugungsspektrum an, von dessen Licht aber nur der mittlere Teil um den sogenannten ungebeugten Strahl in das Objektiv eindringen kann. Das Bild des Gegenstands ist nun die Lichtwirkung, die dieser Teil in der Einstellenebene des Objektivs hervorruft, indem es in den einzelnen Punkten dieser Ebene zur Interferenz kommt. Man bezeichnet diesen Vorgang auch als sekundäre Abbildung. Handelt es sich um das Erkennen einer Gliederung, die einem einfachen Kreuzgitter entspricht, dessen Gitterkonstanten sich wie $1 : 2$ verhalten, so besteht das Beugungsspektrum aus einem mittleren weißen Fleck mit gekreuzten symmetrisch zu beiden Seiten liegenden Reihen von Teilspektren, wobei der kleineren Gitterkonstante der doppelte Abstand der Teilspektren entspricht. Wird nur der mittlere Fleck von dem Objektiv aufgenommen, so erscheint die Einstellenebene gleichmäßig beleuchtet ohne irgendein Anzeichen der Gliederung. Wird aber neben dem mittleren Fleck noch ein Spektrum der engeren Reihe aufgenommen, so erscheint das breitere Gitter mit groben Streifen in dem der Vergrößerung entsprechenden Abstand. Erst wenn auch von der anderen Reihe noch ein Spektrum aufgenommen wird, erhält man ein Kreuzgitter als Bild. Je mehr Spektren höherer Ordnung aufgenommen werden, desto schärfer wird das Bild. Fällt der helle Fleck in die Mitte und die ersten Teilspektren gerade auf den Rand der Öffnung, so ist die Streifenbreite b im Bild bezogen auf die Brennweite F , also das Auflösungsvermögen

$$b : F = 2 \lambda : D,$$

es ergibt sich nahe der doppelte Wert wie der Erfahrungs Wert ψ für die Auflösung von Doppelsternen. Fällt der mittlere Fleck auf den einen Rand, das erste Spektrum auf den gegenüberliegenden, so genügt dies für die grobe Wiedergabe des Gitters; das Auflösungsvermögen ist so verdoppelt. Ist die Lichtquelle nicht mehr punktförmig, sondern eine Fläche, so ist für andere Punkte das Beugungsspektrum gegen die Objektivöffnung verschoben, es kommen andere Teile davon zur Wirkung. Für jedes dieser abgeblendeten Spektren ist die Interferenzwirkung in der Einstellenebene zu bestimmen. Die einzelnen Lichtverteilungen sind dann einfach zu addieren, da die Strahlen von verschiedenen Teilen der Lichtquelle nicht interferenzfähig sind. Im ganzen führt dies zu einer Verschleierung der Einzelheiten. Dies zeigt sich beim Mikroskop, wo man das Beleuchtungsbüschel nach Bedarf abblenden kann, und bei dem von ABBE zur Vorführung dieser Erscheinungen gebauten Apparat; man erhält

so ein an Lichtabstufungen reicheres Bild, während beim Beobachten weit entfernter Gegenstände mit dem Fernrohr diese Möglichkeit im allgemeinen verschlossen ist. Es läßt sich zeigen, daß in vielen Fällen die Abbildung die gleiche ist, ob die Gegenstände selbstleuchtend sind oder nicht; solche Fälle dürften beim gewöhnlichen Gebrauch des Fernrohrs meist vorliegen. Man hat es mit ihnen z. B. zu tun, wenn bei weißem Licht der Gangunterschied so groß ist, daß die Interferenzwirkung mit der Wellenlänge rasch wechselt oder bei einfarbigem Licht gar so groß ist, daß die Interferenz aufhört; aber auch schon, wenn ein aus getrennten lichtundurchlässigen Teilen bestehendes ebenes Gefüge mit so weitem Kegel beleuchtet wird, daß der Phasenunterschied benachbarter Dingpunkte mit der Beleuchtungsrichtung wechselt. Man erkennt dies am besten, wenn man abweichend von ABBE zunächst die Beugungswirkung der Öffnung feststellt und dann die Interferenz der Beugungsscheibchen. Man kann auch Erfahrungen über die Abbildung der einen Art auf die der anderen übertragen, so wurde die eigenartige Verdopplung der Gitterstreifenanzahl durch Ablendung des Mittelspektrums auch bei Gittern aus leuchtenden Drähten beobachtet.

Man ist durch die Beugungslehre zu dem Ergebnis gekommen, daß die Grenze der nützlichen Vergrößerung durch die Zahl für den Objektivdurchmesser in mm gegeben ist, also bei einer Austrittspupille von 1 mm erreicht ist; bei weiterer Vergrößerung erkennt man keine weiteren Einzelheiten, es ist leere Vergrößerung, deren Anwendung wohl bequem sein kann, aber in den meisten Fällen keinen Vorteil bringt. Sind den Leistungen des Fernrohrs so bei der Schwierigkeit der Herstellung brauchbarer größerer Glasscheiben Grenzen gesetzt, so ist ein noch größeres Hindernis für Himmelsbeobachtungen die ungleiche Brechung der Luft infolge ungleicher Erwärmung; bei mittleren Luftverhältnissen ist in unserer Gegend schon bei etwa 150 mm Objektivdurchmesser das Szintillationsscheibchen so groß wie das Beugungsscheibchen. Für die Erkennung von Planeteneinzelheiten wird man unter günstigen Bedingungen selten mehr als eine Objektivöffnung von 300 mm ausnutzen können. Betrachtet man mit einem solchen Fernrohr den Mars in größter Erdnähe, so kann man auf ihm so viel Einzelheiten erkennen, wie bei einer Augenpupille von 2 mm im freien Sehen auf dem Vollmond. Bei Beobachtung von irdischen Zielen ist die Ausnutzung von stärkeren Vergrößerungen noch mehr beschränkt, besonders wenn die Lichtstrahlen in geringer Höhe über dem Erdboden verlaufen.

Zur Unterstützung des Sehens wird vielfach ein Farbglas eingeschaltet, so ein Rauchglas zum Abdämpfen des grellen Lichts, ein gelbrotes Glas, das das blaue Ende des Spektrums abschneidet, zum Abdämpfen des diffusen blauen Lichts, das die Ferne verschleiert. Dies letzte Glas verringert auch die sekundären Farbensäume und zeigt die verschieden bewachsenen Flächen des Geländes in stärkerem Kontrast. Zum Abdämpfen des diffusen blauen Lichts und, beim Hineinsehen in Wasser, zum Abhalten des von der Oberfläche zurückgeworfenen Lichts dient ferner ein NICOLSches Prisma.

Da die Astrophotographie in den Zielen und Mitteln der beobachtenden Astronomie verwandt ist, sollen hier ihre Leistungen besprochen werden. Für die Verbreiterung des Bildscheibchens kommen hier folgende Ursachen in Betracht: 1. die der photographischen Platte eigentümlichen, 2. Beugung, 3. sekundäres Spektrum, 4. Aufhellung der Atmosphäre in der Nähe des Lichtwegs, 5. Fehler des Objektivs infolge Verbiegung und schlechter Beschaffenheit des Glases, 6. Luftunruhe, 7. ungenaues Nachführen des Fernrohrs zum Ausgleich der täglichen Bewegung der Gestirne, wobei auch Aufstellungsfehler des Fernrohrs mitspielen können. Die letzten drei Ursachen verbreitern am meisten, so daß es für die Photographie lichtschwacher Sterne nicht nur auf große Öffnung, sondern auch auf großes Öffnungsverhältnis ankommt. Die Luftunruhe ist hier störender als beim Beobachten, besonders wenn es sich um dunkle Punkte oder Linien auf hellem Grunde handelt wie bei Planeten, wo kurze Belichtungen wie bei der Sonne ausgeschlossen sind. Für die Auswahl der photographischen Platte gilt Folgendes. Damit das in der empfindlichen Emulsion zerstreute Licht möglichst unschädlich ist, muß der Entwicklungsfaktor groß, der

Trübungsfaktor klein sein; der erste ist gegeben durch $dS: d \log I$, wo S die Schwärzung und I die Intensität des zerstreuten Lichts bedeutet, der zweite durch $dR: d \log I$, wo R der Abstand vom Rande des Scheibchens ist. Das Korn soll nicht nur klein, sondern auch von gleicher Empfindlichkeit sein, im anderen Fall kann durch das zerstreute Licht bei empfindlichen Körnern der Schwellenwert überschritten werden. In der Astrophotographie kommt es bei der mangelhaften Strahlenvereinigung auf den Trübungsfaktor weniger an. Das Beugungsscheibchen ist entsprechend der kürzeren Wellenlänge des photographisch wirksamen Lichts kleiner, seine Größe ist im übrigen dem Öffnungsverhältnis umgekehrt proportional. Im allgemeinen geht man nicht unter 1:50 herunter. Durch lange Belichtung können noch lichtschwache Gegenstände entdeckt werden. Während man durch $2\frac{1}{2}$ fache Belichtung bei Photographie von Sternen den Gewinn einer Größenklasse erwarten sollte, gewinnt man in Wirklichkeit nur etwa 0,6 Größenklassen. Die photographischen Refraktoren der Himmelskarte von 3,4 m Brennweite und 1:10 Öffnungsverhältnis liefern bei einstündiger Belichtung noch die 15. Größenklasse. Mit dieser Belichtungsdauer bringt man das zur Sichtbarkeit, was man mit dem gleichen Objektiv noch eben unmittelbar wahrnehmen kann. Mit dem 1,5 m Spiegel von Mount Wilson wurden noch Sterne der 20. Größenklasse photographiert, ein solcher Stern ist 10000000mal lichtschwächer als der der ersten Klasse; mit dem 2,5 m Spiegel wurde die nächste Größenklasse erreicht.

Der Einfluß der Bildfehler ist ebenfalls vom Standpunkt der Beugungslehre zu überprüfen, worauf aber hier nicht eingegangen werden soll. Für die Kugelform der Wellenfläche sind keine größere Abweichungen als $\lambda:4$ zulässig; damit ist auch die Genauigkeitsgrenze für die Linsenflächen gegeben, deren Abweichungen insgesamt jeweils mit $n-1$ multipliziert nicht größer sein dürfen, also etwa bis $\lambda:2$ steigen dürfen; beim Spiegel ist die Grenze $\lambda:8$. Für den Vergleich des vierflächigen Objektivs mit dem einflächigen Hohlspiegel stellt sich also das Objektiv in bezug auf Empfindlichkeit etwa doppelt so günstig, da man bei vier Flächen mit dem wahrscheinlichen Fehler rechnen kann. Man hat auch erörtert, ob bestimmte Abweichungen der Wellenfläche oder bestimmte Abblendungen der Öffnung von Vorteil sind; so wird für die Trennung von Doppelsternen die Ausblendung eines mittleren Streifens senkrecht zur Verbindungslinie der Sterne empfohlen, schon HERSCHEL deckte die Mitte ab, auch DAWES arbeitete mit verschiedenen Blendenformen und fand sie für besondere Fälle geeignet. Man kann weiter fragen, ob man nicht auf andere Weise die Leistung des Fernrohrs für bestimmte Aufgaben steigern kann. Blendet man das Objektiv auf zwei parallele Spalte ab, so treten in dem Beugungsbild feinere Interferenzstreifen auf, auf die man genauer einstellen kann, auf diese Weise ist die Genauigkeit der GAUSSSISCHEN Spiegelablesung erhöht worden. Die Sichtbarkeit der feineren Streifen wird nun verändert, wenn die Lichtquelle statt aus einem Punkt aus mehreren Punkten oder einem Scheibchen besteht. Mißt man mit MICHELSON den Abstand der Spalte, bei dem die Streifen verschwinden, so kann man auf die Verteilung und die Größe der Bestandteile der Lichtquelle rückschließen. Mit dem 2,5 m Spiegelfernrohr auf Mount Wilson wurde der Abstand der Teilsterne von Capella zu $0,0525''$ auf weniger als 1% genau gemessen; weiter der scheinbare Durchmesser von α Orionis zu $0,045''$, dessen linearer sich daraus bei einer Entfernung von 150 Lichtjahren zu dem 300fachen des Sonnendurchmessers ergab, der Spaltabstand von 3,1 m wurde im letzten Falle durch Vorsetzen einer dem Telestereoskop (S. 90) ähnlichen Spiegelanordnung erreicht.



JOHANNES KEPLER

geb. am 15. Mai 1571 in Weil, gest. am 15. Okt. 1630 in Regensburg.

II. Der Bau des Fernrohrs.

1. Die astronomischen Okulare.

Die Zerlegung des Fernrohrs in einen vorderen, objektseitigen Teil, das Objektiv, und einen hinteren, augenseitigen Teil, das Okular, ist oft schon durch den mechanischen Aufbau gegeben, besonders dadurch, daß mehrere auswechselbare Okulare beigegeben sind. Die Trennung in Objektiv und Okular erweist sich meist auch für die theoretische Behandlung vorteilhaft, sie kann z. B. durch Meßeinrichtungen innerhalb des Fernrohrs gegeben sein. An dieser Stelle soll es von dem Gesichtspunkt aus geschehen, wie die Hebung der Bildfehler auf die Linsen (Spiegel) zu verteilen ist. Abgesehen von ganz schwachen Vergrößerungen und den Fernrohren mit Strahlenbegrenzung nach Fall 4 (S. 20), die praktisch nur für schwache Vergrößerungen gebaut werden, ist eine bestimmte Verteilung das Gegebene. Zum Objektiv rechnet man zweckmäßig die vorderen Linsen bis zu der Stelle, wo sich der Querschnitt des achsenparallel einfallenden Büschels etwa bis auf die Größe der Austrittspupille des Fernrohrs zusammengezogen hat, das übrige zum Okular. Die Aufhebung der Fehler in der Nähe der Achse, der sphärischen Abweichung, der Koma und der Farbenlängsabweichung ist hauptsächlich durch den Bau des Objektivs zu erreichen, die der übrigen Fehler, wie Bildwölbung, Astigmatismus, Verzeichnung und Farbenabweichung der

Vergrößerung durch den Bau des Okulars. Sind in einer reellen Bildebene Marken angeordnet, mit deren Lage das Bild verglichen werden soll, so ist der vor dieser Bildebene gelegene Teil des Systems in der Achse und je nachdem auch außer der Achse für sich gut zu korrigieren, damit muß aber auch der hintere Teil für sich bis zu einer gewissen Grenze korrigiert sein. Für Objektiv und Okular hat man bestimmte Bauformen ausgebildet, von denen die Okulare mit positiver Brennweite, astronomische Okulare genannt, schon hier besprochen werden mögen. Bei der einfachen Sammellinse als Okular ist besonders die Farbenabweichung der Vergrößerung störend; für die Hebung des Astigmatismus ist die bikonvexe Form günstig. Es muß also die Farbenzerlegung des Hauptstrahls in der Einstellebene beseitigt sein. Da nun bei stärkerer Vergrößerung des Fernrohrs der Hauptstrahl auf der Dingseite gewöhnlich nahe parallel zur Achse verläuft, ergibt sich die Forderung, daß die Brennweite des Okulars sich mit der Farbe nicht ändert. Dafür wurde oben die Bedingung gegeben. Ihr gehorchen die Urformen des HUYGENSSchen (1703) und RAMSDENSchen (1783) Okulars. Beide bestehen aus zwei einfachen plankonvexen Linsen mit den Brennweiten f_1 der Augenlinse und f_2 der Feld-(Kollektiv)linse im Abstände d ; die letzte Bezeichnung bringt zum Ausdruck, daß von beiden Linsen die zweite mehr auf die Hauptstrahlen (das Gesichtsfeld) wirkt, während die erste mehr

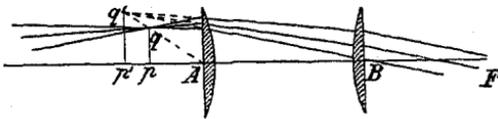


Abb. 29. Das RAMSDENSche Okular.

das achsenparallel ins Fernrohr tretende Bündel und damit die Vergrößerung beeinflusst. Für die Gesamtbrennweite $= 1$ ist beim RAMSDENSchen Okular $f_1 = f_2 = d = 1$ (Abb. 29); beim HUYGENSSchen Okular $f_1 = 2 : 3, f_2 = 2; d = 4 : 3$. (Abb. 30.) Bei beiden ist auch der Astigmatismus annähernd gehoben und die Verzeichnung auf ein erträgliches Maß herabgedrückt. Faßt man unter den Begriff des RAMSDENSchen bzw. HUYGENSSchen Okulars alle Okulare aus zwei getrennten

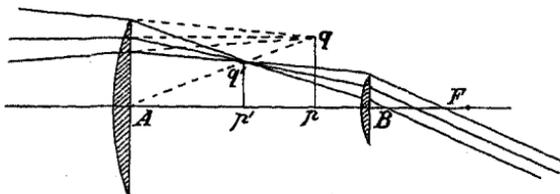


Abb. 30. Das HUYGENSSche Okular.

einfachen Sammellinsen mit reellem bzw. virtuellem dingseitigem Brennpunkt zusammen, so zeigt sich, daß nur beim zweiten für eine reelle Austrittspupille die Farbenabweichung der Vergrößerung völlig gehoben werden kann. Es ist aber in Verbindung mit Meßfäden in manchen Fällen

weniger geeignet und besitzt bei der gebräuchlichen Bauart kleineren Abstand der Austrittspupille von der Augenlinse, so daß es sich für stärkere Vergrößerungen weniger eignet, da dieser Abstand nicht viel unter 10 mm sinken darf, wenn die Austrittspupille dem Auge zugänglich sein soll. Das KELLNERSCHE Okular (Abb. 31) ist ein RAMSDENSCHES mit annähernd achromatischer Augenlinse, die Bildgüte ist verbessert, es wurde von dem Erfinder wegen der Hebung der Verzeichnung orthoskopisches Okular genannt. Als solches bezeichnet man heute

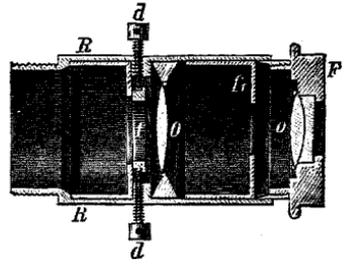


Abb. 31. Das KELLNERSCHE Okular.

meist ein Okular aus (meist vier) dicht zusammenstehenden Linsen (Abb. 32), das daher einen besonders großen Abstand der Austrittspupille hat, die dreifache verkittete Linse wird auch mit Zerstreulinse in der Mitte ausgeführt. Während diese Bauarten im Laufe der Zeit für ein brauchbares Gesichtsfeld von 50° , bei größeren Brennweiten auch 60° ausgebildet wurden, ist bei den neuen Okularen von ERFLE 70° erreicht (Abb. 33).

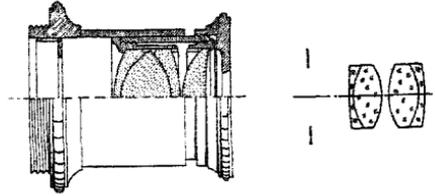


Abb. 32. Orthoskopische Okulare.

Die monozentrischen Okulare (Abb. 34) sind reflexfreier, haben aber nur 30° Gesichtsfeld. In der vorderen Brennebene des Okulars ordnet man eine Blende zur scharfen Begrenzung des Gesichtsfelds an; bei

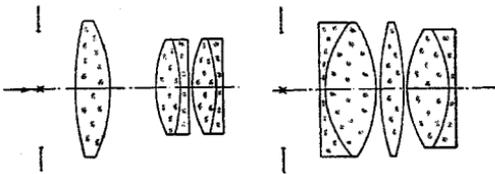


Abb. 33. Okulare nach ERFLE.

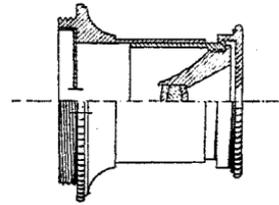


Abb. 34. Das monozentrische Okular

tangentialer Bildkrümmung ist sie entsprechend zu verschieben. Beim HUYGENSSCHEN Okular kommt diese Blende in die Bildebene zwischen den Linsen, sie zeigt einen blauen Saum, da für die Augenlinse die Farbenabweichung der Vergrößerung nicht gehoben ist. Besitzt das Objektiv Farbenabweichung der Vergrößerung, so kann sie durch sogenannte Kompensationsokulare gehoben werden, bei Überkorrektion des Okulars zeigt die Blende einen roten Saum.

Will ein Kurz- oder Übersichtiger das Fernrohr benutzen, so tut er gut, wenn er mit der Fernbrille durch das Fernrohr beobachtet, da so zugleich

ohne Fernrohr die Ferne scharf gesehen wird. Da die Augenmuskeln der Okulare meist so hoch sind, daß das Auge beim Anlegen ohne Brille in die richtige Lage zur Austrittspupille des Fernrohrs kommt, ist es für den Brillenträger zweckmäßig, besondere niedere Augenmuskeln zu benutzen. Statt dessen können Brillengläser in besonderer Fassung (auch solche für Hebung des Astigmatismus, bei denen die richtige Lage durch Marken zu kennzeichnen ist) auf die Okulare aufgesteckt werden. Vorwiegend wird jedoch die Verschiebung des Okulars in der Richtung der optischen Achse zum Ausgleich der Abweichung des Auges von der Normalsichtigkeit benutzt, auch die Verschiebung der Augenlinse, des Objektivs oder einer inneren Linse oder die Änderung eines Linsenabstands durch Prismenverschiebung (S. 60) kann dem gleichen Zweck dienen. Die meisten Beobachter stellen das Okular so ein, daß das Bild nicht im Unendlichen ist, sondern entsprechend der Akkommodation von einigen Dioptrien in der Nähe liegt. Man stellt daher unverstellbare Okulare z. B. bei Zielfernrohren für Militär auf etwa $-1\frac{1}{2}$ dptr fest ein. Nach GULLSTRAND „ist mit dem Gedanken scharf zu sehen im gewöhnlichen Leben eine Innervation der Akkommodation verbunden, die erst durch Übung überwunden werden kann. Im Fernrohr kann auch bei Ungeübten eine mangelhafte Zentrierung der Austrittspupille des Instruments auf die eigene Pupille mitwirken, da das normalsichtige Auge in kurzem Abstände vom optischen Zentrum der Pupille myopisch ist, und da bei dieser Dezentration ein Astigmatismus auftritt, der an und für sich die Akkommodation stimuliert.“ Es ist daher zweckmäßig, beim Scharfstellen das Okular nach innen zu verschieben und anzuhalten, wenn das Bild eben scharf wird. Bei schwacher Beleuchtung stellen manche Beobachter anders ein. So fand RAYLEIGH dann eine Verbesserung des Sehens ohne Fernrohr, wenn er eine Brille von -1 dptr aufsetzte. Vielleicht erklärt sich dies durch die sphärische Abweichung des Auges und gegebenen Falls des Okulars bei größerer Pupille. Bemerkenswert ist, wie die Akkommodationsbreite beim Sehen durch das Fernrohr nahe ausgeschaltet ist, und mit welcher Sicherheit auch jüngere Personen immer mit derselben Okularlage scharf einstellen. Auf dieselbe Weise wird auch die Scharfstellung für verschiedene Dingenfernung erreicht, wobei die mechanischen und optischen Mittel gemeinsam oder verschieden sein können. Die Verschiebung von inneren Teilen bietet Vorteile für Staub- und Wasserdichtigkeit. Fällt die Austrittspupille in den hinteren Brennpunkt des Okulars, wie es bei dem astronomischen und terrestrischen (S. 58) Okular für stärkere Vergrößerung und kürzere Okularbrennweite nahezu der Fall ist, so entspricht einer axialen Verschiebung des Okulars von der Brennweite f um Δx , also einer Dingweite $-x = \Delta x$ eine Verlegung des Fernrohrbilds in den Abstand $a = x'$ des Augenfernpunkts von der Austrittspupille. Da nun $x = -f^2 : x'$ ist, so ist die Okularverschiebung dem Kehrwert des Fernpunktsabstands, annähernd auch der Dioptrien-

zahl der Fernbrille, proportional; man bringt daher für die Verschiebung eine gleichmäßige Teilung in Dioptrien an. Bei dem Okular des holländischen Fernrohrs liegt der hintere Brennpunkt nahe um $-f + 10$ mm von der Augenpupille entfernt, die Dioptrieneinteilung fällt daher nicht gleichmäßig aus. Über den Einfluß der Okularverstellung auf Vergrößerung, Gesichtsfeld und Helligkeit ist folgendes zu bemerken, wobei wir uns auf Fall 2 der Strahlenbegrenzung (S. 19) beschränken wollen, während Fall 4 beim holländischen Fernrohr (S. 46) abgehandelt wird. Ist $-M$ der Abstand der Austrittspupille des nicht verschobenen Teils von seiner Bildebene, wo in vielen Fällen M die Brennweite des Objektivs ist und Δx die Verschiebung des Okulars, so wird die Austrittspupille des Fernrohrs durch die Verschiebung im Verhältnis $1 + \Delta x : M$ kleiner, oder, wenn man den obigen Wert für x' einsetzt, $1 + f^2 : (Ma)$ oder, falls $-M = F$ ist, $1 + f : (\Gamma a)$, wo Γ die Fernrohrvergrößerung ist. Im selben Verhältnis wird das dingseitige Gesichtsfeld bei mitverschobener Blende kleiner, die Vergrößerung gesteigert; bei Einstellung für Kurz- und Übersichtige ist die Änderung natürlich entgegengesetzt. Ebenso kann man auch nach dem Einfluß der Einstellung auf nähere Dingabstände fragen, wobei ein auf ∞ akkommodiertes Auge vorausgesetzt, der dingseitige Seh- und Gesichtsfeldwinkel von der Eintrittspupille gerechnet und der Fall eingeschlossen werden soll, daß durch eine Vorsatzlinse vor dem Objektiv der Einstellbereich des Fernrohrs um eine bestimmte Anzahl Dioptrien näher gelegt ist, z. B. zur Beobachtung der Kleintierwelt im Freien. Was nun die Änderung von Vergrößerung, Gesichtsfeld und Helligkeit betrifft, so ist sie wie oben durch das Verhältnis $1 + x' : M$ bestimmt, nur ist hier $x' = -F^2 : x$, wo x der Dingabstand vom vorderen Brennpunkt des Objektivs ist und bei der Vorsatzlinse deren Stärke in die Stärke $1 : F$ einzurechnen ist. Die Vorsatzlinse selbst ändert die Vergrößerung $\text{tg } u' : \text{tg } u$, das Gesichtsfeld und die Helligkeit nicht, wenn sie in der Eintrittspupille steht und diese nicht abblendet.

2. Das holländische (Galileische) Fernrohr.

Es wurde 1608 von LIPPERSHEY angegeben und besteht aus einem sammelnden Linsensystem als Objektiv und einem einfachen zerstreuen- den Linsensystem als Okular. Unter einem einfachen sammelnden bzw. zerstreuen- den Linsensystem ist dabei ein solches verstanden, das positive bzw. negative Brennweite besitzt und bei dem Strahlengang des Fernrohrs zwischen den Linsen des Systems kein reelles Bild entwirft, das gegen das letzte Bild umgekehrt ist. Das Bild dieses Fernrohrs ist aufrecht. Für den Strahlengang kommen die Fälle 3 und 4 (S. 20) in Betracht. Da bei den gebräuchlichen Bauarten höchstens bei Nachtbeobachtungen der Fall 3 verwirklicht und sein Wesen bereits gekennzeichnet ist, beschränken wir uns auf die Behandlung von Fall 4. Ferner wird

angenommen, daß Objektiv und Okular dünne Linsensysteme sind, da die bemerkenswerten Eigentümlichkeiten dieser Bauart sich so einfacher ergeben und die Ausdehnung der Behandlung auf dicke Systeme keine grundsätzlichen Schwierigkeiten bietet. Abb. 35 stellt den Strahlengang

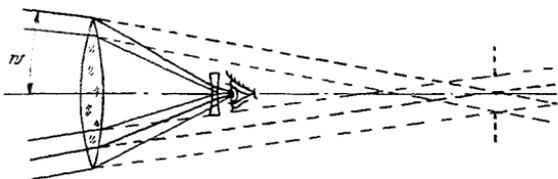


Abb. 35. Der Strahlengang beim holländischen Fernrohr.

dar; von dem oberen Randbündel kommt in dem Schnitt nur die Hälfte zur Wirkung. Obwohl es gerade bei dieser Fernrohrart richtig ist, den Augendrehpunkt als Kreuzungspunkt der Haupt-

strahlen anzusehen, wollen wir doch bei der Untersuchung der Gesichtsfeldgröße, zu gerechterem Vergleich mit dem astronomischen Fernrohr, die Augenpupille als solchen ansehen; es bedeutet dies für das folgende nur den Unterschied, daß für den Abstand a der Austrittspupille vom Okular 10 mm statt 25 mm angesetzt werden. Das Gesichtsfeld ist meist durch die Objektivfassung oder durch eine Blende zwischen Objektiv und Okular begrenzt. Der Abstand der Austrittspupille vom hinteren Brennpunkt des Okulars ist $a - f$, also der Abstand der Eintrittspupille vom vorderen Brennpunkt des Objektivs $\Gamma^2(a - f)$. Ist nun der Abstand der Gesichtsfeldblende oder ihres vom Objektiv in dem Dingraum entworfenen Bildes vom vorderen Brennpunkt des Objektivs c , so ist der Abstand von Eintrittspupille und -luke $\Gamma^2(a - f) - c$. Wir setzen $c = F$, der Objektivbrennweite, da ja der Durchmesser D des Objektivs letzten Endes das mögliche Gesichtsfeld bestimmt, und finden für den halben dingseitigen Gesichtsfeldwinkel w

$$\operatorname{tg} w = \frac{D}{2 \Gamma^2(a - f) - F} = \frac{D}{2 \Gamma(a \Gamma + l)},$$

wo l der Abstand vom Objektiv und Okular, die Fernrohrlänge ist. Für das bildseitige Gesichtsfeld gilt $\operatorname{tg} w' = \Gamma \operatorname{tg} w$. Setzt man das halbe Öffnungsverhältnis des Objektivs $D : 2 F = Q$, so ergibt sich

$$\frac{Q}{\operatorname{tg} w'} = 1 - \frac{1}{\Gamma} - \frac{a}{f}.$$

Für das gleiche bildseitige Gesichtsfeld muß also das Öffnungsverhältnis des Objektivs um so größer genommen werden, je stärker die Vergrößerung und je größer a im Verhältnis zu f genommen wird. Für den Augendrehpunkt als Kreuzungspunkt der Hauptstrahlen ergibt sich daher ein kleineres Gesichtsfeld als für die Augenpupille. Vergrößert man den Ausführungsmaßstab des Fernrohrs, so wird $a : f$ kleiner und damit das Gesichtsfeld größer. Für stärkere Vergrößerung gilt angenähert, daß bei gleichbleibendem a und f das Gesichtsfeld proportional dem Öffnungs-

verhältnis wächst und das bildseitige bei gleichem Öffnungsverhältnis unabhängig von der Vergrößerung ist. Großes Öffnungsverhältnis gibt sich in dem großen Durchmesser im Verhältnis zur Länge des Fernrohrs kund. Man hat vielfach vorgeschlagen, durch eine Sammellinse zwischen Objektiv und Okular das Gesichtsfeld zu vergrößern. Nach unserer Auffassung liegt dann ein Objektiv aus zwei getrennten Sammellinsen vor. Ist hier die Fassung der Vorderlinse Gesichtsfeldblende, so ist ihr Abstand von dem vorderen Brennpunkt des Objektivs kleiner als seine Brennweite. Ihr Abstand von der Eintrittspupille ist bei sonst gleichen Verhältnissen gegenüber dem einfachen Objektiv gleicher Brennweite größer, also das Gesichtsfeld bei gleichem Öffnungsverhältnis kleiner. Nun kann freilich mit einem dünnen System aus zwei Sammellinsen ein größeres Öffnungsverhältnis erreicht werden als mit einer einzigen Sammellinse, und dies gilt auch noch bei Auseinanderrücken der beiden Linsen in abnehmendem Maße. Es kommt also nur auf eine Steigerung des Öffnungsverhältnisses hinaus. Das Gesichtsfeld eines Fernrohrs, für das $D = 8 \Gamma \text{ mm}$ ist und dessen Lichtstärke somit in der Mitte des Gesichtsfelds der Nachtaustrittspupille von 8 mm angepaßt ist, ist gegeben durch

$$\text{tg } w' = \frac{4}{a - \left(1 - \frac{1}{\Gamma}\right) f}$$

Für $a = 10$, $f = -20$ und $\Gamma = 4$ ergibt sich $2w' = 18,4^\circ$, das Öffnungsverhältnis ergibt sich zu $1 : 2,5$. Das Gesichtsfeld ist im Verhältnis zum astronomischen Okular (S. 41) klein. Will man es steigern, so muß man den Durchmesser größer wählen, als für die größte Lichtstärke nötig. Da aber bei stärkerer Vergrößerung das Objektiv die Kosten des Fernrohrs bestimmt, und es abgesehen von dem großen Durchmesser noch durch das größere Öffnungsverhältnis verteuert wird, ist die Herstellung holländischer Fernrohre nur für schwache Vergrößerungen wirtschaftlich. Das holländische Fernrohr ist namentlich als Theater-, Jagd- und Nachtmarineglas (Abb. 36) in Gebrauch. Die Verluste des durchgehenden Lichts sind bei ihm besonders klein, allerdings



Abb. 36. Ein Jagdglas mit 2,5 facher Vergrößerung und 14° Gesichtsfeld.

ist das Gesichtsfeld ungleichmäßig hell; die Stelle, von der aus die Helligkeit nach dem Rande abfällt, hebt sich als heller Ring ab.

Abb. 37 zeigt die Linsenformen eines gewöhnlichen holländischen Fernrohrs, Abb. 38 die eines solchen mit vergrößertem Gesichtsfeld.

Für die Perspektive ist hier der Augendrehpunkt maßgebend und zu beachten, daß die ihm entsprechende Eintrittspupille weit hinter dem Objektiv liegt. Das Konvergenzverhältnis in dieser Pupille ist auch für die Vergrößerung maßgebend, wenn das Okular für einen kurz- oder übersichtigen Beobachter verschoben ist. Da man annehmen kann, daß dabei der Abstand A des Augendrehpunkts vom hinteren Hauptpunkt des Okulars derselbe bleibt, so bestimmt die verhältnismäßige Änderung, die der Abstand $-M$ des vom Okular durch Rückstrahlung nach vorn entworfenen Bildes dieses Drehpunkts von dem hinteren Brennpunkt des Objektivs erfährt, die verhältnismäßige Änderung der Vergrößerung, und zwar ist sie $= M:(M - Ax)$. Die Änderung ist hier im allgemeinen größer als beim astronomischen Okular, da M kleiner ist; wenn die Okularbrennweite $-P$ mal so groß als A ist, ist $M = P^2 A:(P + 1)$; P weicht gewöhnlich nicht viel von 1 ab. Handelt es sich dagegen um die Einstellung auf nahe Gegenstände bei einem auf ∞ akkommodierten

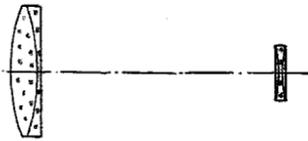


Abb. 37. Der Linsenaufbau eines gewöhnlichen holländischen Fernrohrs.

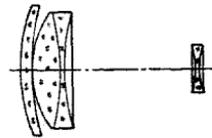


Abb. 38. Der Linsenaufbau eines verbesserten holländischen Fernrohrs nach M. VON ROHR.

Auge, so kommt es auf den Scheitel des dingseitigen Schwinkels an, im Allgemeinen ist es der Augendrehpunkt. Statt dessen kann nun angenähert der hintere Brennpunkt des Objektivs als der Ort genommen werden, für den das Konvergenzverhältnis zu vergleichen ist. Es kommt also auf die verhältnismäßige Änderung an, die der Abstand des vom Objektiv entworfenen Bildes dieses Orts von dem vorderen Brennpunkt des Okulars erfährt; die verhältnismäßige Änderung der Vergrößerung ist so durch $(F - 2x'):F$ gegeben, wo wie beim astronomischen Okular $x' = -F^2:x$ ist.

Was die Anforderungen an die Bildgüte des holländischen Fernrohrs betrifft, so kommt es bei den üblichen schwachen Vergrößerungen in erster Linie auf die Bildfehler außer der Achse an. Es ist also Verzeichnungsfreiheit, Farbenfreiheit der Vergrößerung, Bildfeldebhnung im übertragenen Sinne anzustreben; dabei behandelt man das Fernrohr als ein Ganzes. Die übrig bleibenden sphärischen und chromatischen Abweichungen in der Achse, die besonders hervortreten, wenn das Auge nicht mitten vor dem Okular gehalten wird, dürfen nicht zu stark werden. Dies führt dazu, daß für etwas stärkere Vergrößerungen Objektiv und Okular in der Achse chromatisch nahezu für sich korrigiert sein müssen,

es erschwert dies den Bau stärkerer Vergrößerungen noch mehr. Für die Annäherung an die anastigmatische Bildfeldebnung liegen bei den schwachen Vergrößerungen die Verhältnisse wesentlich günstiger als beim astronomischen Fernrohr, wenn man an den gewöhnlichen Bauarten festhält.

3. Das astronomische (Keplersche) Fernrohr. (Der Refraktor.)

Es wurde 1611 von KEPLER angegeben und besteht gewöhnlich aus einem dünnen sammelnden Linsensystem als Objektiv, das meist auch Aperturblende und Eintrittspupille ist, und einem einfachen sammelnden Linsensystem als Okular von der S. 39 beschriebenen Art, das meist das bildseitige Gesichtsfeld bestimmt. Den Strahlengang zeigt Abb. 39;

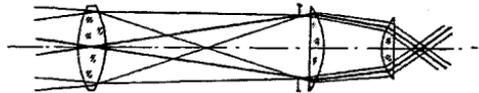


Abb. 39. Der Strahlengang beim astronomischen Fernrohr.

das Fernrohrbild ist umgekehrt. Wir fragen zunächst, in welchen Fällen eine einfache Linse als Objektiv genügt. Am meisten stört bei ihr die Farbenabweichung in der Achse; deren dingseitiger Zerstreungskreis ist nach S. 32 $D : (2F\nu)$; der bildseitige das Γ fache. Läßt man einen Zerstreungskreis von $z' = 1 : 1700$ zu und setzt für gewöhnliches Kronglas $\nu = 60$, so wird $F = 14 D \Gamma$; wählt man Γ gleich der Normalvergrößerung $= D$ in mm, so ist $F = 14 D^2$ zu nehmen; dies ergibt bei 20 mm Objektivdurchmesser schon eine Brennweite von 5,6 m. Man war so vor der Erfindung des achromatischen Objektivs durch CHESTER MOOR HALL 1729 genötigt, sehr lange Fernrohre anzuwenden, die man oft als Luftfernrohre (Abb. 40) ohne Verbindungsrohr ausbildete. Bei dem dünnen Objektiv aus 2 Linsen ist es möglich, neben der Farbenabweichung der Bildlage und Größe auch die sphärische Abweichung in der Achse und die Koma in der Nähe der Achse zu heben. Die sagittale bzw. tangentielle Bildkrümmung ist bei einem dünnen für diese Fehler korrigierten Objektiv von der Brennweite 1 aus zwei und mehr Linsen unabhängig von der Lage der Eintrittspupille gleich $1 + \Sigma(\varphi/n)$ bzw. $3 + \Sigma(\varphi/n)$, wo für φ und n die Stärken und Brechungsverhältnisse der einzelnen Linsen einzusetzen sind. Der Astigmatismus ist immer $= 2$, die Bildkrümmung hängt noch von den Glasarten ab; für die gebräuchlichen Objektive ist annähernd $q_s = -1,7$ und $q_t = -3,7$. Wir geben noch die Daten für das FRAUNHOFERSCHE Heliometerobjektiv der Königsberger Sternwarte, bei dem die Koma zwar nicht völlig, aber praktisch beseitigt ist (Abb. 41): $F = 1132$; $r_1 = 838,164$; $r_2 = -333,768$; $r_3 = -340,536$; $r_4 = -1172,508$; $a_{1,2} = 6$; $a_{2,3} = 0,01$; $a_{3,4} = 4$; $c_{n_1} = 1,524738$; $F_{n_1} = 1,533699$; $c_{n_2} = 1,630307$; $F_{n_2} = 1,648455$; und für ein Objektiv aus neueren Glasarten, die es

ermöglichten, die Innenradien gleich zu machen, so daß die Linsen zur Verringerung des Reflexionslichtverlusts mit Kanadabalsam verkittet werden können: $F = 100$; $r_1 = 64,73$; $r_2 = r_3 = -30,59$; $r_4 = -317,5$; $Dn_I = 1,5899$; $Dn_{II} = 1,6229$; $Fn_I - Cn_I = 0,00970$; $Fn_{II} - Cn_{II} = 0,01581$. FRAUNHOFER hat vor 100 Jahren das astronomische Fernrohr auf die Stufe der Vollendung gehoben, die ihm noch heute den Vorrang

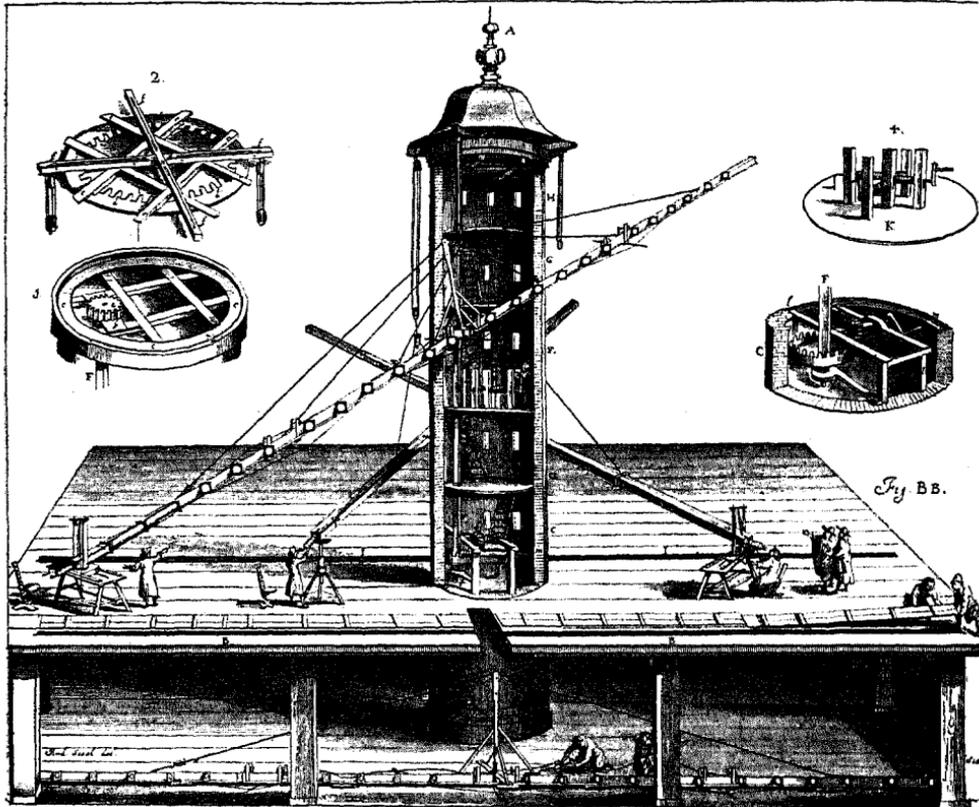


Abb. 40. Ein Luftfernrohr nach HEVEL.

Die untere der rechten kleinen Abbildungen zeigt den im ersten Stockwerk untergebrachten Antrieb für die Schwenkung der Turmhaube, die obere den Seilantrieb im dritten Stockwerk für das Richten der Fernrohre nach der Höhe. Die linken kleinen Abbildungen zeigen das Triebwerk in der Turmhaube. Der Beobachtertisch besitzt Einrichtungen zum Nehmen der feinen Seiten- und Höhenrichtung.

als Meßfernrohr sichert; er hat zu dem Zweck mit bestem Erfolg die Bereitung des optischen Glases auf wissenschaftliche Grundlage gestellt; seine Verfahren zur Berechnung und Herstellung der Objektive sind im wesentlichen noch heute üblich.

Bei dem Objektiv eines Ablesefernrohrs wird zweckmäßig an Stelle der Sinusbedingung die HERSCHELSche Bedingung erfüllt, d. h. dafür gesorgt, daß die Änderung der sphärischen Abweichung innerhalb der gebrauchten Dingabstände möglichst gering ist oder für den Abstand,

dessen Kehrwert das Mittel der Kehrwerte der Grenzabstände ist, gleich Null ist. Diese Bedingung läßt sich nicht gleichzeitig mit der Sinusbedingung erfüllen, außer wenn das Objektiv mit der Vergrößerung -1 abbildet. Bei kleinerem Durchmesser führt man die zweilinsigen Objektive noch mit einem Öffnungsverhältnis bis zu $1:4$ aus; je größer der Durchmesser wird, desto kleiner wählt man das Öffnungsverhältnis, bei großen astronomischen Objektiven etwa $1:18$, um den störenden Einfluß des sekundären Spektrums zu verringern. Wie schon oben bemerkt, ist dessen Beseitigung nur durch besondere Glasarten möglich. Da die Krümmungen beim Apochromaten wegen des kleinen ν -Unterschiedes dieser Glasarten wesentlich stärker ausfallen wie beim Achromaten, so geht man beim zweilinsigen Objektiv auch hier nicht wesentlich über $1:18$ hinaus und baut für größeres Öffnungsverhältnis das Objektiv aus drei Linsen (Abb. 42). Die Daten des dreilinsigen TAYLORSchen Objektivs sind nach der englischen Patentschrift: $F = 1000$; $r_1 = 366$; $r_2 = r_3 = -124$; $r_4 = r_5 = 85,1$; $r_6 = 1593$; $a_{1,2} = 5,35$; $a_{2,3} = 0$; $a_{3,4} = 1,07$; $a_{4,5} = 0,72$; $a_{5,6} = 5,35$; $D^{n_1} = 1,5637$; $D^{n_2} = 1,5468$; $D^{n_3} = 1,5109$; $F^{n_1} - C^{n_1} = 0,01115$; $F^{n_2} - C^{n_2} = 0,01089$; $F^{n_3} - C^{n_3} = 0,00844$. Für Beobachtung und Photographie sind die Achromate verschieden chromatisch zu korrigieren (S. 33). Durch eine Zusatzdoppellinse zwischen Objektiv und Brennpunkt kann die Korrektur der einen Art in die der anderen verwandelt werden. Ist diese ein dünnes System, so wird dadurch Farbenabweichung der Vergrößerung eingeführt, die beim visuellen Gebrauch durch Kompensationsokulare ausgeglichen werden kann. Zur Abschwächung des sekundären Spektrums sind vielfach Farbenfilter vorgeschlagen worden. Um das Fernrohr zu verkürzen, wendet man wohl das Teleobjektiv (Fernlinse) aus einem sammelnden Vorderglied und einem davon abstehenden zerstreuenen Hinterglied an (KEPLER 1611); der Abstand des Objektivbrennpunkts von der vorderen Linse ist hier kürzer als beim dünnen Objektiv gleicher Brennweite. Besser kennzeichnet man es dadurch, daß die Quervergrößerung in den Pupillen, wenn es allein benutzt wird, erheblich kleiner als 1 ist. Verglichen mit einem Fernrohr gleicher Vergrößerung, bei dem ein dünnes Objektiv mit dem gleichen Abstand des Brennpunkts von der Vorderlinse verwandt ist, bietet das mit Fernlinse hinsichtlich der Bildfehler in der Achse, besonders der Zonen der sphärischen Abweichung und des sekundären Spektrums, keinen praktischen



Abb. 41. Ein Objektiv der FRAUNHOFERSchen Art.



Abb. 42. Ein dreilinsiger Apochromat von ZEISS.

Vorteil. Es kann aber unter Umständen besser auf Astigmatismus und Bildwölbung korrigiert sein, während die Hebung der Verzeichnung meist Schwierigkeiten bietet. Es hat außerdem den Vorteil, daß das Okular längere Brennweite erhält und so geringere Bildfehler zeigt sowie größeren Augenabstand besitzt; auch kann dies für Meßvorrichtungen in der Brennebene von Wert sein. In der Astrophotographie kommt das Teleobjektiv für Sonnen- und Mondaufnahmen in Betracht, man entwirft aber auch für diesen Zweck von dem Bild, das das dünne Objektiv liefert, ein



Abb. 43. Das PETZVALSche Porträtobjektiv.

vergrößertes reelles Bild mit dem Okular. Für die Photographie von Nebelflecken, und wo es sonst auf größeres Gesichtsfeld ankommt, verwendet man photographische Objektive, so besonders das PETZVALSche Porträtobjektiv (Abb. 43), das TAYLORSche Triplet (Abb. 44) und das

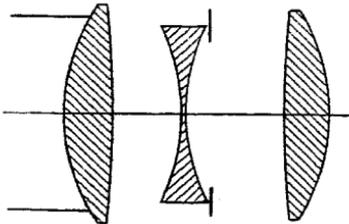


Abb. 44. Das TAYLORSche Triplet.

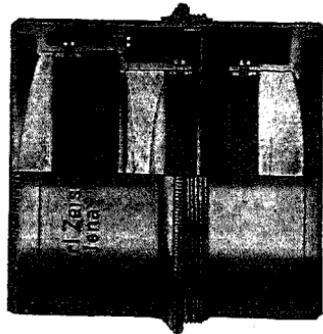


Abb. 45. Das RUDOLPHSche Tessar.

Tessar (Abb. 45), über dessen Leistung S. 79 berichtet wird. Bei den größeren Objektiven spielen die Ausführungsfehler eine Hauptrolle, besonders sind die Glasstücke trotz allen Fortschritten der Schmelztechnik nicht gänzlich frei von Schlieren (Streifen abweichender chemischer Zusammensetzung) und Spannung, wodurch der geradlinige Lauf der Lichtstrahlen gestört wird; die durch die Spannung hervorgerufene Doppelbrechung bewirkt keine merkliche Bildverschlechterung. Diese Fehler sucht man, so gut es geht, bei der endgültigen Politur durch »Lokalretusche« zu verbessern; man unterscheidet diese Fehler wohl als mechanische Zonenfehler von den optischen der Rechnung entsprechenden. Endlich ist die Durchbiegung infolge der Schwere schädlich, sie ist je

nach der Lage des Objektivs verschieden. Bei dreipunktiger Auflage ist die Deformation einer runden Planplatte dem Quadrat des Verhältnisses zwischen Durchmesser und Dicke und außerdem dem Durchmesser proportional. Die Durchbiegung hängt weiter von der Form der Linse ab, sie ist am wenigsten schädlich, wenn die Strahlen die Linse im Minimum der Ablenkung durchsetzen. Das größte Fernrohr ist das der Yerkes-Sternwarte, das Objektiv hat 1,02 m Durchmesser und 18,9 m Brennweite, das der Lick-Sternwarte $D = 0,91$ m und $F = 17,6$ m.

Es mag noch gezeigt werden, wie ein dünnes Fernrohrobjektiv aus zwei Linsen berechnet werden kann. Zunächst sind die Brennweiten f_I und f_{II} der beiden Linsen so zu wählen, daß die Farbenlängsabweichung gehoben ist (S. 32), weiter die Formen dieser Linsen so, daß die sphärische Abweichung und die Koma gehoben ist. Für das dünne Objektiv sind nun die Faktoren ρ_s und ρ_x (S. 25) gleich 1; führt man ferner in die dort gegebenen Ausdrücke bei jeder Linse die Größen ein

$$\rho_d = \frac{2(n-1)f}{r_1} - 1; \quad -\sigma_d = \frac{2f}{s_1},$$

wo ρ_d bzw. $\sigma_d = 0$ bedeutet, daß die Linsenform bzw. der Strahlengang symmetrisch ist, so gilt für jede Linse für die sphärische Abweichung

$$\sum Q_s^2 \Delta \frac{1}{ns} = \frac{\varphi^3}{4} \left\{ \frac{n^2}{(n-1)^2} + \frac{3n+2}{n} \sigma_d^2 + \frac{4(n+1)}{n(n-1)} \sigma_d \rho_d + \frac{n+2}{n(n-1)^2} \rho_d^2 \right\}$$

und ebenso für den Unterschied der sphärischen Abweichung und der Koma, wenn durch $Q_s - Q_x$, das beim dünnen Objektiv für alle Flächen gleich ist, dividiert wird,

$$\sum Q_s \Delta \frac{1}{ns} = -\frac{\varphi^2}{2} \left\{ \frac{2n+1}{n} \sigma_d + \frac{n+1}{n(n-1)} \rho_d \right\}.$$

Die Summen dieser Ausdrücke für die beiden Linsen müssen nun verschwinden; es ergeben sich so für die gesuchten Größen $\rho_{d,I}$ und $\rho_{d,II}$ eine quadratische und eine lineare Gleichung. Man stellt gewöhnlich die Sammellinse voraus; in diesem Falle entspricht von den beiden möglichen Lösungen die mit den schwächeren Krümmungen der gewöhnlich ausgeführten Objektivform der obigen Beispiele. Die Abhängigkeit der Radien dieser Form von den n -Werten zeigen folgende empirische Formeln und von den ν -Werten die Tabellen der Konstanten:

$$\rho_2 - \rho_3 = a + \frac{b}{n_1 + c} + \frac{d}{n_2 + e}$$

$\nu_2 : \nu_1$	a	b	c	d	e
0,6	+ 0,131	- 0,376	- 1,021	+ 0,292	- 1,098
0,7	+ 0,039	- 0,525	- 1,054	+ 0,511	- 1,064
0,8	- 0,071	- 0,814	- 1,072	+ 0,897	- 1,048

$$\rho_1 = a + \frac{b}{n_1 + c} + \frac{d(n_1 - 1,5) + e}{n_2 + f}$$

$\nu_2 : \nu_1$	a	b	c	d	e	f
0,6	+ 0,365	+ 0,755	- 0,899	+ 0,200	+ 0,019	- 1,230
0,7	- 0,134	+ 1,017	- 0,830	+ 0,507	+ 0,080	- 1,260
0,8	- 1,227	+ 1,142	- 0,877	+ 1,449	+ 0,205	- 1,319

4. Das Prismenfernrohr (Porrosche Fernrohr 1850).

Wenn man auch bei astronomischen und geodätischen Arbeiten sowie bei vielen anderen Messungen die Bildumkehrung des astronomischen Fernrohrs mit Rücksicht auf seinen einfachen Bau in Kauf nimmt, so liegen doch die Vorteile eines aufrechten Bildes, besonders für die Orientierung, auf der Hand. In neuerer Zeit erreicht man dies durch Hinzufügen eines Systems von ebenen Spiegeln, das auch durch Prismen verkörpert sein kann. Um seine Wirkung zu kennzeichnen, benutzen wir die Lage der optischen Achse im Bildraum und die Lage des Bildes einer senkrecht zu der Achse gerichteten Strecke im Dingraum; für die Wirkung der Kugelflächen werden die Ding- und Bildabstände auf der gebrochenen Achse gerechnet. Die Lage der Bildraumachse findet man, wenn man einen in die Dingraumachse fallenden Strahl verfolgt, wobei zu beachten ist, daß beim Spiegel einfallender und zurückgeworfener

Strahl mit dem Lot im Einfallspunkt gleiche Winkel, Einfalls- und Reflexionswinkel bilden und mit ihm in der gleichen Ebene, der Einfallsebene, liegen. Für zwei Spiegel, einen Winkelspiegel, erhält man den zurückgeworfenen Strahl einfacher, wenn man den einfallenden Strahl um die Spiegelachse, die Schnittgerade der Spiegelebenen, um das Doppelte des Spiegelwinkels dreht, und zwar in demselben Sinne, in dem man den erst getroffenen Spiegel auf den zweiten dreht, z. B. lenkt das Pentaprisma mit

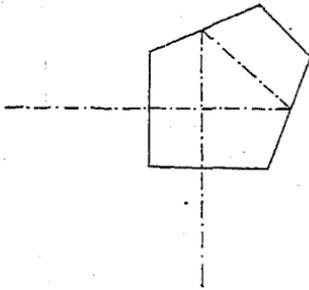


Abb. 46. Das Pentaprisma nach GOULIER.

Spiegelwinkel von 45° um 90° ab (Abb. 46). Wir nennen ein Bild aufrecht, wenn oben und unten richtig wiedergegeben und eine wagerechte Gerade des Dingraums im Bildraum wagerecht erscheint bzw. beim Blick nach unten parallel der Verbindungslinie der Augen abgebildet wird, wie es der Ausdrucksweise entspricht, wenn man eine auf dem Tische liegende Zeichnung betrachtet. Wir rechnen die Bildverdrehung gegen das aufrechte Bild im Uhrzeigersinn positiv. Ein um $\pm 180^\circ$ gedrehtes Bild nennen wir umgekehrt, ein aufrechtes rückwendiges Bild nennen wir seitenverkehrt, ein umgekehrtes rückwendiges Bild nennen wir höhenverkehrt. Das Bild in einem senkrechten Spiegel erscheint seitenverkehrt. Bei der Drehung des Spiegels um eine zur Einfallsebene senkrechte Achse erhält man alle Ablenkungen, ausgenommen solche in der Nähe von 0° , wo infolge der Verkürzung des Spiegels das brauchbare Strahlenbüschel zu schmal wird. Den Spiegel kann man nun durch ein gleichschenkliges Prisma ersetzen. Abb. 47 zeigt die Wirkung eines solchen rechtwinkligen Prismas für verschiedene Ablenkungen. Ist der Einfallswinkel bei gewöhnlichem Kronglas

größer als 41° , so findet Totalreflexion statt, der Spiegel braucht dann nicht versilbert zu werden. Die Breite des durchgelassenen Parallelstrahlenbüschels beträgt für gewöhnliches Glas, verglichen mit der größten bei den Ablenkungen 90° und 270° , bei 0° und 180° Ablenkung 1:3. Die Wirkung der Brechungen beim Ein- und Austritt heben sich aus der

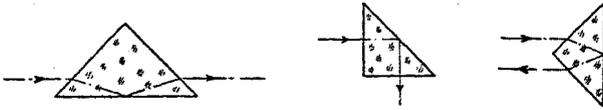


Abb. 47. Das rechtwinklige Prisma bei verschiedenen Ablenkungen.

Gesamtablenkung heraus und damit auch in bezug auf die bei der Brechung auftretenden Farbensäume für entfernte Gegenstände auf, wenn nur Ein- und Austrittsfläche mit der Spiegelfläche gleiche Winkel bilden; im übrigen wirken die beiden Brechungen wie die einer schräg durchgesetzten Parallelplatte mit gleichem Glasweg. Legt man nach Abb. 48 2 Prismen zusammen, so wird die Bündelbreite für gerade Durchsicht verdoppelt, und man kann von dieser Sicht nach beiden Seiten unmittelbar ablenken; zur Vermeidung von Doppelbildern müssen aber die beiden Spiegelflächen genau parallel gehalten werden. Dreht man das einfache oder doppelte Prisma

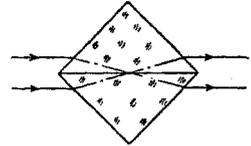


Abb. 48. Das Doppelwendeprisma.

in der Lage für gerade Durchsicht um die Visierlinie, so bleibt die Visierlinie unabgelenkt, aber das Bild wird gedreht, und zwar wegen der Symmetrie zur Spiegelebene um den doppelten Drehwinkel. In dieser Verwendung bezeichnet man das einfache Prisma als AMCISches Reflexionsprisma oder als Wende-(Reversions-)Prisma. Nach 90° Prismendrehung ist das Bild statt seitenverkehrt höhenverkehrt geworden. Ordnet man nun

zwei solche Prismen, das eine mit senkrechter, das andere mit wagerechter Spiegelebene, hintereinander an (Abb. 49), so erhält man ein umgekehrtes Bild. Hier und in den



Abb. 49. Das Umkehrprisma nach DELABORNE.

folgenden Abbildungen ist der Mittelstrahl ausgezogen; der in der Höhe und der in der Seite versetzte sind durch Strichlung unterschieden; die Pfeile, die die Bildlage kennzeichnen, sind in der Ein- und Austrittsfläche wiederholt. Da die Abbildung rechtwändig ist, findet bei Drehung des Doppelprismas um die Visierlinie keine Bilddrehung statt. Diese Unabhängigkeit gilt für alle geradsichtigen Spiegelsysteme mit einer geraden Anzahl Spiegelungen und für alle rücksichtigen mit einer ungeraden Anzahl, während alle geradsichtigen Systeme mit einer ungeraden Anzahl Spiegelungen und alle rücksichtigen mit einer geraden Anzahl wie ein

Wendepisma wirken. Für das eben beschriebene Doppelprisma von DELABORNE folgt dies daraus, daß der Winkelspiegel von 90° das Bild um 180° um die Spiegelachse, die zugleich Visierlinie ist, dreht. Es ist so zur Bildaufrichtung beim astronomischen Fernrohr geeignet. Für das mit Spiegeln ausgeführte System, wo allerdings der Einblick gegen den Ausblick etwas geneigt sein muß, hatte man dies schon im 17. Jahrhundert erkannt. Man kann den Winkelspiegel von 90° auch an einem Prisma nach Abb. 50 verwirklichen, man nennt es ein Dachprisma; die Reihenfolge, in der die Spiegel getroffen werden, ist bei der



Abb. 50. Das geradsichtige Dachprisma.

einen Hälfte der Strahlen die umgekehrte wie bei der anderen; die Flächen werden doppelt benutzt, indem jeder Punkt von zwei Strahlen getroffen wird; es müssen daher die Dachflächeu einen genauen Winkel von 90° bilden, damit kein Doppelbild entsteht. Der Querschnitt des durchgelassenen Parallelstrahlenbüschels ist ein Quadrat, dessen Seite bei gewöhnlichem Glase etwa ein Sechstel der Länge des unverkürzten Dachfirsts beträgt. Für die Ablenkung der Strahlen kann das Dachprisma wie das einfache Prisma benutzt werden, dessen Spiegelebene senkrecht auf der winkelhalbierenden Ebene des Winkelspiegels steht, wenn die Drehung um das Lot auf dieser Ebene erfolgt. Die beschriebenen beiden Formen des Umkehrsystems haben den Nachteil, daß sie wegen der der schrägen Planplatte ähnlichen bildverschlechternden Wirkung im allgemeinen nur vor oder hinter dem astronomischen Fernrohr, wo die abbildenden Büschel nahezu parallelstrahlig sind, verwendet werden können. Zwischen Auge und Okular ist gewöhnlich dafür kein Platz; will man nun, wie es meist für die Ersparnis an Raum und Werkstoff erwünscht

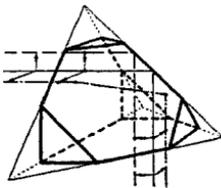


Abb. 51. Das ablenkende Dachprisma nach AMICI.

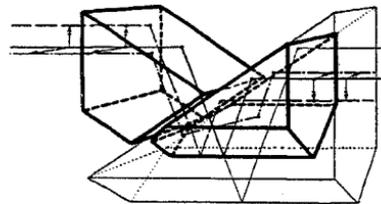


Abb. 52. Das Umkehrprisma nach ABBE.

ist, das Prismensystem zwischen den Linsen unterbringen, so muß für senkrechten Durchgang gesorgt werden. Dieser ist für Ablenkung auch bei den beschriebenen Formen möglich, wie es z. B. für 90° Ablenkung das sogenannte AMICISCHE Prisma Abb. 51 zeigt. Für gerade Durchsicht wendet man statt der Ablenkungen durch Brechung solche durch Spiegelungen an, wie es Abb. 52 zeigt; zum leichteren Verständnis denke man sich die Lage mit senkrechten Zusatzspiegeln, so daß diese das

Bild nicht drehen; eine zweite Form ist, soweit sie abweicht, durch dünnere Linien angedeutet. Bei der zweiten Form können die beiden Teile verkittet werden, bei der ersten Form ist der Werkstoffbedarf geringer, es findet aber eine geringe Parallelversetzung der Strahlen statt.

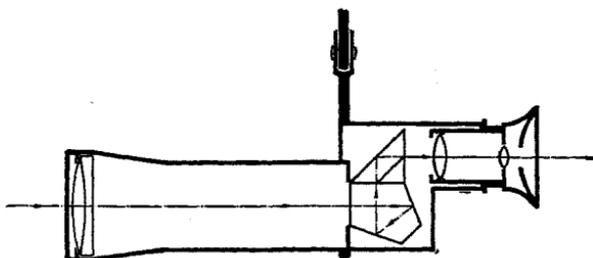


Abb. 53. Ein Fernrohr mit Umkehrprisma nach DAUBRESSE.

Statt die Zusatzspiegel vor und hinter dem Dach anzuordnen, kann man sie beide vor oder hinter ihm anordnen, man ergänzt das Dachprisma bei der angenommenen Lage durch einen senkrechten Winkelspiegel von

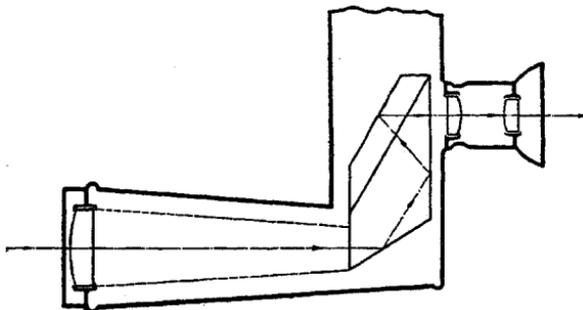


Abb. 54. Ein Fernrohr mit Umkehrprisma nach LEMAN.

passender Ablenkung, wie es Abb. 53 und 54 zeigen. Bei der ersten Form müssen zwei Flächen versilbert werden; die zweite Form, das LEMANsche Prisma, kann aus einem Stück hergestellt werden; welche Fläche als Dach ausgebildet ist, ist für die Bildumkehrung ohne Belang; daher wurde die erste Form bald dahin verbessert, daß einer der Spiegel des Pentaprismas durch ein Dach ersetzt wurde (Abb. 66). Wir führen noch die Form Abb. 55 an, bei der aber das Dachprisma nicht senkrecht durchsetzt wird; verzichtet man hier auf die doppelte Benutzung des Dachs, so daß auch die genaue Einhaltung seines Winkels entfällt, so erhält man die für die Ausführung bequeme Form Abb. 56, das erste PORROSche Umkehrsystem. Es besteht gewöhnlich aus zwei rücksichtigen rechtwinkligen Prismen, die je einem 90° -Winkelspiegel entsprechen; es

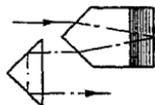


Abb. 55. Ein Umkehrprisma mit rücksichtigem Dachprisma.

kann aber auch in drei oder vier Prismen zerlegt werden; die Bildumkehrung kann hier dadurch erklärt werden, daß zwei Drehungen um 180° um die zueinander senkrechten Spiegelachsen einer Drehung um 180° um die zu diesen

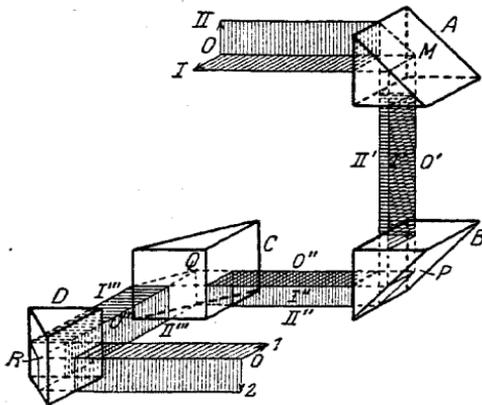


Abb. 56. Das Porrosche Umkehrprisma erster Art.

Achsen senkrechte Visierlinse gleichwertig sind. Wie erste aus Abb. 55 kann das zweite Porrosche Umkehrsystem (Abb. 57) aus der Form (Abb. 52) abgeleitet werden, wenn man den Endspiegeln stärkere Ablenkung gibt. Diese Form kann aus zwei symmetrisch gleichen oder drei bzw. vier rechtwinklig gleichschenkligen Prismen aufgebaut werden; bei beiden Porroschen Formen besteht die Möglichkeit, alle Prismen zu verkitten. Von den ablenkenden Systemen mit vier Spiegelungen führen wir noch das nach Abb. 156 an; von den geradsichtigen mit sechs Spiegelungen das aus zwei gleichen rücksichtigen Prismen nach Abb. 58; das Einzelprisma lenkt dreimal um 90° ab, wobei jede Einfallsebene auf den beiden anderen senkrecht steht. Die Wirkungsweise wird deutlicher, wenn man es sich aus drei ineinander geschobenen

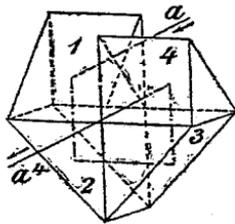


Abb. 57. Das Porrosche Umkehrprisma zweiter Art.

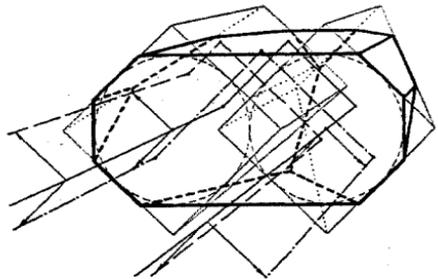


Abb. 58. Die Hälfte des Umkehrprisma mit 6 Spiegeln nach Daubresse.

einfachen Prismen für die drei Spiegel aufgebaut denkt, von denen das erste und dritte durch schwache Linien angedeutet sind. Das Prisma dreht das Bild um 90° unabhängig von der Drehung um den Einblick, aber nach links oder rechts, je nachdem in welchem Sinne das Licht durch das Prisma geht. Je nach der Zusammensetzung des ganzen Systems aus den beiden Prismen ist das Bild aufrecht oder umgekehrt; in der gestreckten Lage teilt es mit den Umkehrprismen mit Dach die flache Form.

Was die Lage des Prismensatzes zwischen Objektiv und Okular betrifft, so kann er am kleinsten ausgeführt werden, wenn er an der Stelle des kleinsten Strahlenquerschnitts liegt; das ist meist der Fall, wenn er dicht vor dem Okular liegt (Abb. 54). Hierfür eignen sich besonders die Umkehrprismen nach Abb. 52 und 57, bei denen die Versetzung gering ist; bei einigen kann durch Verkittung der Lichtverlust verringert werden; für einen Vergleich ist der Lichtverlust durch die Silberreflexion zu beachten. In vielen Fällen, besonders bei Doppel- und Zielfernrohren ist eine geringe Rohrlänge erwünscht. Man erreicht dies unter entsprechender Vergrößerung des Querschnitts, indem gewissermaßen das Rohr in drei Teile zerschnitten wird, die nebeneinander gelegt werden. Die Handprismenfernrohre, bei denen das erste PORROSche Umkehrprisma in dieser Art verwendet ist (Abb. 59), haben die weiteste Verbreitung gefunden.

Um den Einfluß der Prismen auf die Bildgüte zu untersuchen, faßt man die zwischen zwei Kugelflächen liegenden Prismen zusammen; ihre Wirkung ist der einer Planplatte senkrecht zur Achse gleichwertig, deren Dicke gleich dem Lichtweg des Achsenstrahls in den Prismen ist. Es kommt hauptsächlich auf die sphärische und chromatische Abweichung in der Achse und auf Astigmatismus und Bildkrümmung an; für die Achsenabweichungen wird das Objektiv entsprechend umkorrigiert; die Bildkrümmung im übertragenen Sinn wird bei einem dünnen Objektiv durch eine Planplatte, die den ganzen Platz zwischen Objektiv und Systembrennpunkt ausfüllt, etwa auf ein Drittel, der Astigmatismus etwa auf die Hälfte vermindert.

Der wissenschaftlichen Merkwürdigkeit halber sei hier noch kurz auf das BREWSTERsche Fernrohr hingewiesen, das keine Kugelflächen enthält und nur aus brechenden Prismen besteht. Bei der Anordnung nach Abb. 60 wird durch jedes der beiden Prismen ein paralleles Strahlenbüschel in der Ablenkungsebene gleichmäßig verschmälert, während die Farbenabweichung der Ablenkung in beiden Prismen entgegengesetzt ist und sich so aufhebt. Diese Anordnung vergrößert so in der Ablenkungsebene entsprechend der Verschmälерung, das Bild ist verzerrt, wie in dem Falle, wo es sich auf einer dehnbaren Unterlage befände und diese in der einen Richtung gedehnt würde. Bringt man zwei solche Prismengruppen in gekreuzter Lage hintereinander, so erhält man die Wirkung eines Fernrohrs. Diese Fernrohrart liefert für schwache Vergrößerungen ein brauchbares Bild.

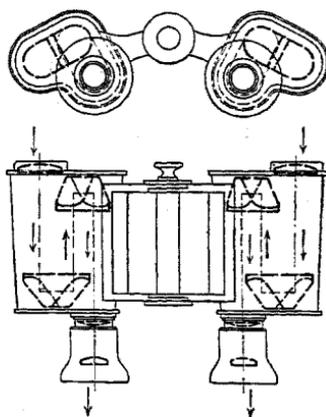


Abb. 59. Ein Prismendoppelfernrohr nach ABBE.

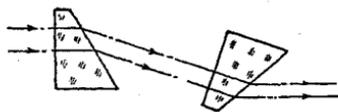


Abb. 60. Ein Prismenpaar des BREWSTERschen Fernrohrs.

5. Das terrestrische Fernrohr (Erdfernrohr).

Statt der Prismen kann man auch Linsen zu dem astronomischen Fernrohr hinzufügen, wie es lange ausschließlich üblich war und jetzt noch in manchen Fällen von Vorteil ist. Diese Bauart wurde 1611 von KEPLER beschrieben, 1645 von SCHYRL ZU RHEITA, danach auch RHEITAsches Fernrohr genannt. Schaltet man zwei astronomische Fernrohre hintereinander, zweckmäßig so, daß die Eintrittspupille des zweiten in die Austrittspupille des ersten fällt, so erhält man ein Fernrohr mit aufrechtem Bild und einer Gesamtvergrößerung, die gleich dem Produkt der Vergrößerungen der Einzelfernrohre ist. Ist die gewünschte Vergrößerung nahe $= 1$, so verwendet man als vorderes Fernrohr ein verkleinerndes, bei dem das Objektiv nach Art eines astronomischen Okulars und das Okular nach Art eines Objektivs gebaut ist, man richtet gewissermaßen zwei Fernrohre gegeneinander. Die zugekehrten Objektive bezeichnet man als Umkehrlinsen. Bei dieser Fernrohrart ist vielfach eine größere Länge erwünscht, während der Rohrdurchmesser gegeben ist; damit sind die Grenzdurchmesser von Objektiv, Umkehrlinsen und Okular gegeben. Will man die höchste optische Leistung erzielen, so

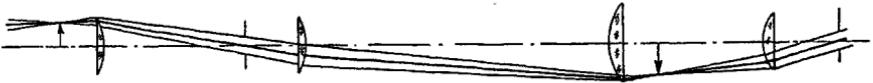


Abb. 61. Der Strahlengang beim Erdfernrohrökular.

verfährt man wie folgt. Das Gesichtsfeld bestimmt die größtmögliche Brennweite von Objektiv und Okular; die Brennweiten f_u der Umkehrlinsen werden gleich und annähernd gleich der Rohrlänge gewählt, falls diese groß gegen Objektiv- und Okularbrennweite ist; daraus folgt die Vergrößerung des hinteren Fernrohrs und bei gegebenem Durchmesser der Umkehrlinsen der Durchmesser d der Austrittspupille. Dieser kann annähernd n^2 mal größer gemacht werden, wenn bei gleichem bildseitigem Gesichtsfeld $2w'$ der Rohrdurchmesser D auf das n -fache vergrößert oder die Länge L auf das n^2 -fache verkleinert wird; da $D : f_u = d : f$ ist, gilt annähernd $D = \sqrt{L d t g w'}$. Läßt man eine gewisse Abschattung des Gesichtsfelds zu, so kann die Länge dadurch vergrößert werden, daß man die Umkehrlinsen auseinander rückt; sonst können diese unter Umständen zu einer Umkehrlinse verschmolzen werden.

Das stärker vergrößernde Erdfernrohr besteht gewöhnlich aus einem zweilinsigen Objektiv wie beim astronomischen Fernrohr und dem terrestrischen oder Erdfernrohrökular, das in der einfachsten, üblichen Form aus vier getrennten dünnen plankonvexen Linsen besteht. Wie der Strahlengang Abb. 61 zeigt, kann man im Vergleich mit dem eben beschriebenen Erdfernrohr das Objektiv samt der vorderen sogenannten Feldlinse dieses Okulars als ein Objektiv nach Art des HUYGENSSchen

Okulars auffassen; die zweite Linse dieses Okulars entspricht der Umkehrlinse und wird auch als solche bezeichnet; die dritte und vierte Linse sind nichts anderes als ein gewöhnliches HUYGENSSches Okular. Das Erdfernrohrokular mit etwa 40° Gesichtsfeld ist ähnlich korrigiert wie ein HUYGENSSches Okular, die Verzeichnung ist geringer, Bildkrümmung bzw. Astigmatismus stärker, da die Abweichung von der PETZVALschen Bedingung größer ist. Die sphärische und chromatische Abweichung in der Achse sind stärker, so daß meist das Objektiv auf ihren Ausgleich korrigiert ist, was aber nur für eine einzige Okularbrennweite möglich ist.

Durch Vermehrung der Linsenzahl können diese Fehler in der Achse leicht gehoben werden, dagegen ist für die Bildgüte am Rande des Sehfelds keine erhebliche Verbesserung erreicht worden. Die Bildfehler außer der Achse werden größer, wenn die Länge des Okulars bei gleicher Brennweite verringert wird. Wird diese Länge dagegen vergrößert, so treten Fehler in der Achse, wie Zonen der sphärischen Abweichung und sekundäres Spektrum in Erscheinung, um so mehr, je größer das Öffnungsverhältnis ist. Man kann weiter fragen, wie groß bei einem Erdfernrohr-Okular von gegebener Länge L und Brennweite F am zweckmäßigsten die Brennweite des darin enthaltenen astronomischen Okulars gewählt wird, wenn bei Bildfeldebhnung im übertragenen Sinne der Astigmatismus möglichst klein werden soll. Wir denken uns das Umkehrsystem in zwei Teile mit den Brennweiten f_1 und f_2 zerlegt, zwischen denen paralleler Strahlengang herrscht, so daß man das Erdfernrohr-Okular als aus



Abb. 62. Ein Zugfernrohr (Vergrößerung 17fach, Gesichtsfeld $1,9^\circ$, Austrittspupille 2,5 mm).

drei astronomischen Teilokularen zusammengesetzt auffassen kann, von denen die ersten beiden gegeneinander gerichtet sind. Es muß dann die PETZVALsche Summe ein Minimum werden. Steht diese Summe bei den Teilokularen in dem gleichen Verhältnis zu ihren Stärken $\varphi_1; \varphi_2; \varphi_3$, so muß $\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3$ ein Minimum werden; andernfalls ein Ausdruck von der Form $p_1 \varphi_1 + p_2 \varphi_2 + p_3 \varphi_3$, wo p_1, p_2 und p_3 im allgemeinen wenig von 1 verschieden sind. Wir beschränken uns daher auf den einfacheren Fall. Wir nehmen weiter an, daß der Abstand von bildseitiger Pupille und dingseitigem Brennpunkt bei allen Teilokularen das $1:m$ fache der Brennweite ist, wobei als dingseitiger Brennpunkt der angesehen wird, in dem beim Strahlengang des ganzen Okulars das Bild entsteht. Es ist also $f_1 + f_2 + f_3 = m L$. Endlich gilt noch $f_3 f_1 : f_2 = F$. Führt man die Rechnung durch, so findet man aus der Gleichung $f_1 = f_3 = -F + \sqrt{F^2 + m L F}$ für $F = 1$ bei $m L = 10: f_1 = f_3 = 2,32, f_2 = 5,37$ und bei $m L = 5: f_1 = f_3 = 1,45, f_2 = 2,1$. Die hier vorgenommene Zerlegung verdeutlicht besonders gut das folgende eigenartige Okular. Wenn man die Strahlen nach dem Durchgang durch ein astronomisches Okular durch einen zur Achse senkrechten Planspiegel, der die Hälfte der Austrittspupille (oder die exzentrische) verdeckt, zurückwirft und nach dem Rückgang durch das Okular nochmals durch einen zur Achse senkrechten Planspiegel, der die Hälfte der Gesichtsfeldblende verdeckt, und nun durch die andere Hälfte der Austrittspupille blickt, so sieht man in dem Gesichtsfeldspiegel das umgekehrte Objektivbild aufgerichtet bei halbem Gesichtsfeld.

Als Beobachtungsfernrohr ist das Erdfernrohr mit gerader Achse besonders bei der Marine in Gebrauch. Es ist gewöhnlich als Zugfernrohr ausgebildet (Abb. 62), bei dem ein oder mehrere Rohre einziehbar sind, um es für die Aufbewahrung verkürzt zu können; zu-

gleich dient ein Auszug zur Scharfstellung. Es wird vorzugsweise mit stärkerer Vergrößerung (10 bis 30 fach) ausgerüstet, und besitzt meist nur geringe Lichtstärke, da bei großem Öffnungsverhältnis die Bildscharfe des Erdfernrohrokulars nach dem Rande zu sehr abfällt.

6. Die Fernrohre mit Vergrößerungswechsel.

Die Änderung der Vergrößerung kann entweder in stetigem Übergang innerhalb gewisser Grenzen möglich sein, oder es kann nur zwischen einigen bestimmten Vergrößerungen gewechselt werden, wobei zweckmäßig dafür gesorgt wird, daß die Scharfstellung des Bilds erhalten wird. Im ersten Falle dient als Mittel die Änderung von Linsen- (Kugelspiegel-) Abständen, man erreicht dies meist durch Verschieben von Linsen, aber auch, worauf hier nicht weiter eingegangen wird, durch Verschiebung von inneren Prismen, insbesondere des rücksichtigen Prismas mit 90°-Winkelspiegel, wie es im ersten PORROschen Umkehrsystem verwandt ist. Man bezeichnet diese Fernrohre als solche mit veränderlicher Vergrößerung oder als pankratische, früher auch als polyadische. Da das Bild bei der Vergrößerungsänderung scharf bleiben soll, müssen für größere Änderungen mindestens zwei Linsen verschieden verschoben werden. Diese zusammen müssen so korrigiert sein, daß sie in den verschiedenen Stellungen ein gutes Bild liefern. Zu dem Zweck müssen diese Linsen einzeln chromatisch korrigiert sein. Ferner müssen für sie zusammen in der Mittelstellung annähernd die sphärischen Abweichungen in und außer der Achse gehoben sein und zugleich ihren größten oder kleinsten Wert annehmen. Dieser letzten Forderung kann man bei zwei verschobenen Teilen dadurch genügen, daß man entweder dies Doppelteil in der Mittelstellung symmetrisch ausbildet und bei der Vergrößerung ± 1 für das Ganze symmetrisch durchsetzen läßt oder daß man diese Ausführung auf den einen Teil beschränkt, der andere erfährt dann nur eine geringe Verschiebung, die von dem Quadrat der Verschiebung des ersten Teils aus der Mittelstellung abhängt. Diese Anordnungen haben auch den Vorteil, daß größere Verschiebungen der Austrittspupille vermieden werden können. In dem zweiten Fall bewirkt der erste Teil, die Vergrößerungslinse, hauptsächlich die Vergrößerungsänderung, der zweite Teil, die Einstelllinse, die Erhaltung der Lage der Bildebene. Als zweiter Teil wird gewöhnlich entweder das Okular oder eine innere Linse, etwa die Feldlinse des Erdfernrohrokulars, verschoben. Als erster Teil wird besonders a) die Umkehrlinse dieses Okulars verschoben, ganz ähnlich wirkt b) die Verschiebung der hinteren Linse eines aus vorderer Zerstreuungs- und hinterer Sammellinse zusammengesetzten Objektivs. Während hier für die Mittelstellung die Vergrößerung $- 1$ ist, erhält man für sie die Vergrößerung $+ 1$, wenn man c) eine Sammellinse durch den Brennpunkt hindurchbewegt (die Zerstreuungslinse ist weniger geeignet).

Die dem ersten Fall entsprechenden drei Unterfälle erhält man, wenn man die Einstelllinse fortläßt und dafür die Vergrößerungslinse in zwei Hälften zerlegt. Roh genommen bewirkt dann die mittlere Verschiebung die Vergrößerungsänderung, während die Änderung ihres Abstands die Scharfstellung erhält. Diesen Fall zeigt Abb. 63; der Strahlengang für die schwache Vergrößerung ist durch ausgezogene Linien, der für die starke durch gestrichelte dargestellt. Wirkt hier eine verschobene Linse als Aperturblende, so nimmt der Durchmesser der Austrittspupille weniger als im Verhältnis der Vergrößerung ab. Will man nur zwischen zwei Vergrößerungen wechseln, so kommt man in den Fällen 1a bis 1c ohne Verschiebung der Einstelllinse aus, wenn man die beiden Stellungen der Vergrößerungslinse symmetrisch zu ihrer Stellung für die Vergrößerung ± 1 wählt, so daß sie in der einen Stellung ebensoviel vergrößert wie in der anderen verkleinert.

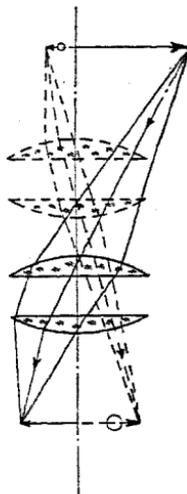


Abb. 63. Der Strahlengang im Umkehrsystem des pankratischen Fernrohrs.

Am gebräuchlichsten ist für das Wechseln zwischen bestimmten Vergrößerungen der Wechsel der Okulare, die zu dem Zweck mit Vorliebe (Abb. 64) auf einer kugelförmigen Drehscheibe (Revolver) oder besonders bei periskopartigen Fernrohren (Abb. 121) auf einem Ring angeordnet sind; der Durchmesser der Austrittspupille ist hier umgekehrt proportional der Vergrößerung. Demgegenüber bietet der Wechsel der Objektive den Vorteil, daß die Austrittspupille bei den verschiedenen Vergrößerungen gleichgemacht werden kann. Um die Länge des Fernrohrs dabei annähernd gleich zu halten, verwendet man wohl für das Objektiv langer Brennweite ein Teleobjektiv, das aus einer vorderen Sammellinse und einer davon abstehenden hinteren Zerstreulinse besteht, und bei dem der Abstand zwischen Vorderlinse und Brennpunkt kleiner als bei einer dünnen

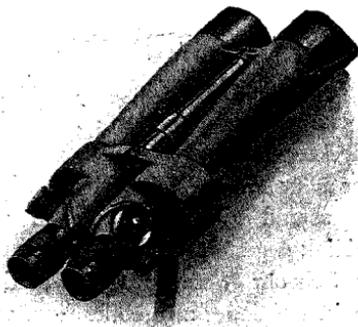


Abb. 64. Ein kleines Aussichts-doppelfernrohr mit Okularwechsellern.

Linse gleicher Brennweite ist, und für das Objektiv kurzer Brennweite ein Objektiv aus einer vorderen Zerstreulinse und einer hinteren Sammellinse, bei dem diese Verhältnisse umgekehrt sind (Abb. 72 auf S. 66). Diese Einrichtung hat den Nachteil, daß bei Fernrohren zum

Messen oder Richten beim Wechsel der Vergrößerung die Lage der Visierlinse nicht genau erhalten bleibt. Kommt es auf die Lage der Visierlinse nur bei der stärkeren Vergrößerung an, so schaltet man besondere Linsen in den Strahlengang eines gewöhnlichen Fernrohrs ein, gewöhnlich davor ein umgekehrtes holländisches Fernrohr, um durch Herabsetzen der Vergrößerung ein größeres dingsseitiges Gesichtsfeld als Übersichtsbild zu gewinnen. Die Strahlenbegrenzung in diesem Vorschaltfernrohr kann von der des holländischen Fernrohrs (S. 43) wesentlich abweichen (Abb. 65). Der Objektivwechsel kann auch durch Um- oder Einschalten von Prismen oder in Verbindung damit erfolgen. Das bildseitige Gesichtsfeld ist bei allen diesen Arten des Vergrößerungswechsels gewöhnlich durch das astronomische Okular bestimmt.

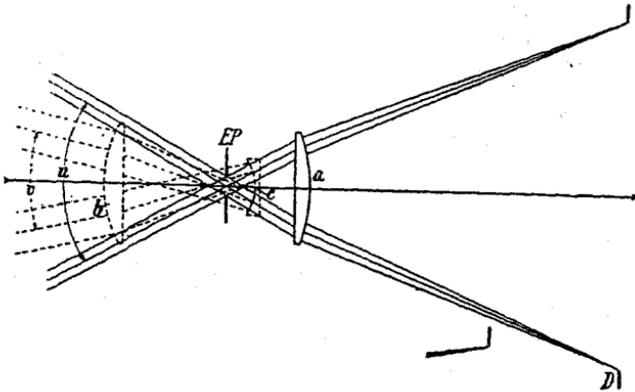


Abb. 65. Der Vergrößerungswechsel mit Vorschaltfernrohr bc von etwa 2facher Vergrößerung.

7. Die Periskope (Ausblickrohre, Sehrohre).

Sie haben die Aufgabe, dem Beobachter den Ausblick von einer für ihn unzugänglichen oder gefährlichen Stelle zu bieten, z. B. wenn er in gedeckter Stellung seitlich an einem Baum vorbei, hinter einem Wall oder über höhere Hindernisse hinweg, besonders aber aus einem Kommandostand hinaus beobachten will. Zu dem Zweck sind Aus- und Einblick gegeneinander versetzt, meist parallel. Beim Blick nach vorn ist das Sehrohr ohne optische Änderung sowohl in liegender Anordnung wie in stehender zu gebrauchen, wir beschränken uns daher auf stehende Rohre. Je nachdem bei der Hauptbeobachtungsart mit stärkerer oder schwächerer (weniger als zweifacher) Vergrößerung gearbeitet wird, kann man die allgemeine Einteilung zwischen vergrößernden und wiederholenden Sehwerkzeugen auch hier anwenden. Bei den vergrößernden Sehrohren ist die 10fache Vergrößerung für militärische Zwecke bei Standfernrohren besonders beliebt, doch neigt man neuerdings auch zu stärkerer Vergrößerung besonders im Wechsel mit 10 facher. Zum Beobachten hinter Deckung war der Ausblick bisher etwa 30 cm erhöht, doch

geht man neuerdings bis auf 50 cm. Hierfür eignet sich das Prismenfernrohr; ein Teil der Umkehrprismen bietet ohne weiteres die Möglichkeit, durch Abrücken eines Prismas die Achsenversetzung zu erreichen, wobei dies meist vor dem Objektiv liegt, während der übrige Teil des Umkehrprismas dicht vor der Brennebene liegt (Abb. 66). Ein gewöhnliches Fernrohr wird durch Vorsetzen eines Rohrs mit zwei parallelen um 90° ablenkenden Spiegeln für gelegentliche Beobachtung aus Deckung geeignet. Für Beobachtung aus Unterständen, auf Baumhochständen und über größere Hindernisse hinweg dient das Feldsehrohr (Abb. 67), ein Erdfernrohr mit einfachem Objektiv- und Okularprisma zur Knickung der Achse und mit parallelem Strahlengang zwischen den Umkehrlinen, so daß durch Einschalten von Zwischenrohren an dieser Stelle eine Ausblickshöhe von 4—6 m vom Fuß des Beobachters erreicht werden kann. Noch höheren Ausblick von 9—26 m bietet das Mastfernrohr, das an die Stelle der unsicheren Beobachtungsleiter tritt (Abb. 68). Es ist auf einem eigens dafür hergerichteten Wagen aufgebaut. Beim Fahren ist der Mast in zusammengeschobenem Zustand umgelegt; beim Beobachten dient der Wagen als Untergestell für den ausgezogenen Mast, der nur bei stärkerem Wind noch durch Seile verankert wird. Da die Linsen größeren Durchmesser haben, sind sie neben dem Mast in einem beim Ausschieben mitgenommenen Oberteil und einem festen Unterteil untergebracht. Das Oberteil enthält nur Objektiv und Feldlinse; infolgedessen nimmt, wenn keine entsprechenden Vorkehrungen getroffen sind, die Vergrößerung mit der Ausblickshöhe ab; auch muß im Unterteil auf Bildschärfe nachgestellt werden. Für Seitenrichtung wird der Mast gedreht, für Höhenrichtung der Objektiv-

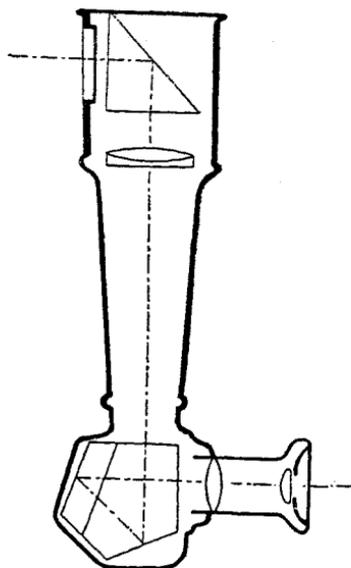


Abb. 66. Ein Sehrohr für Handgebrauch.

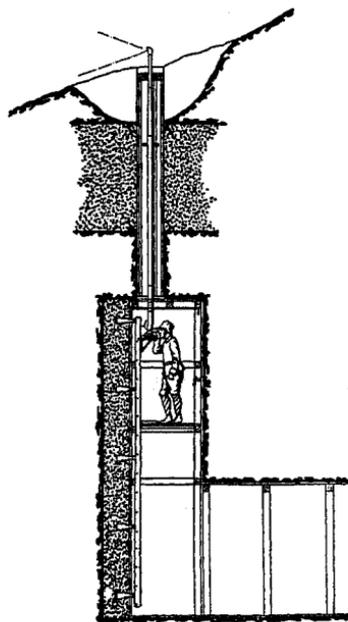


Abb. 67. Das Feldsehrohr.

ab; auch muß im Unterteil auf Bildschärfe nachgestellt werden. Für Seitenrichtung wird der Mast gedreht, für Höhenrichtung der Objektiv-

spiegel mit Hilfe eines ausziehbaren Gestänges im Mast gekippt. Für Übersichtsbeobachtung kann bei den verschiedenen Sehrohren durch Vorschalten eines verkleinernden holländischen Fernrohrs (S. 62) die Vergrößerung auf eine ein- bis zweifache mit entsprechend vergrößertem Gesichtsfeld herabgesetzt werden.

Wird beim Sehrohr die Einblickachse festgehalten und das Objektiv-

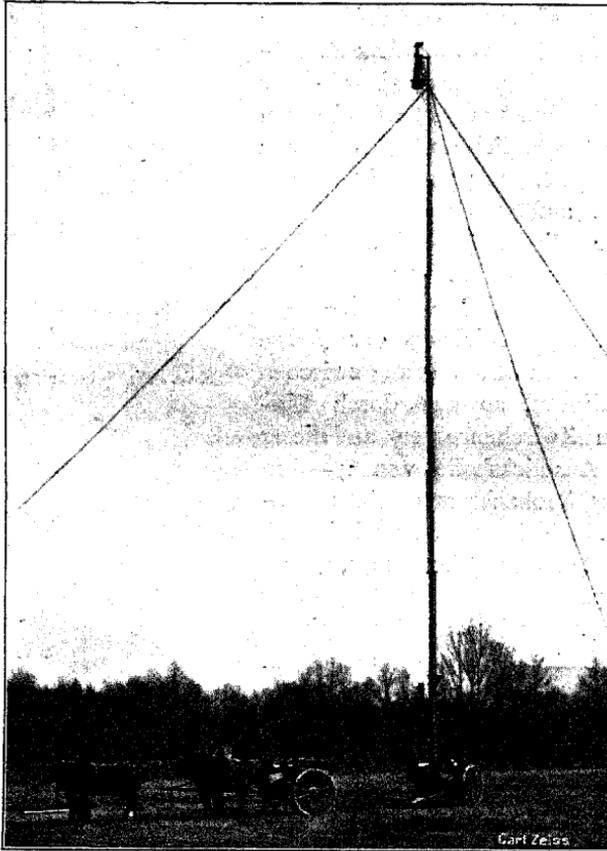


Abb. 68a. Das Mastfernrohr bei größter Ausblickhöhe.

prisma um den aus ihm austretenden Achsenstrahl gedreht, so beschreibt die Ausblickrichtung einen Kegel um die Drehachse; bei stehender Anordnung und horizontalem Ausblick wird so der Horizont abgesucht, ohne daß der Beobachter wie bei den anderen (Rundgang-) Sehrohren der Drehung zu folgen braucht. Die Drehung des Bildes in seiner Ebene (das Stürzen des Bildes) wird aufgehoben, indem ein Wendeprisma eingeschaltet und mit der halben Geschwindigkeit nachgedreht wird (Abb. 69); die Drehung der beiden Prismen wird zu dem Zweck durch das

bekannte Kegelräderrifferentialgetriebe gekuppelt (Abb. 70). Ein Zeiger in Verbindung mit einer Ringteilung im Gesichtsfeld kann zur Anzeige der Ausblickrichtung dienen. Dies Rundblickfernrohr hat eine große Bedeutung als Geschützzelfernrohr erlangt (S. 121).

Die wiederholende Art der Sehrohre ist besonders für Tauchboote wichtig, sie wird mit Recht als deren Auge bezeichnet. Als Haupt-

vergrößerung wird gewöhnlich eine $1\frac{1}{2}$ fache gewählt, da beim Blicken durch ein Rohr die Gegenstände scheinbar etwas verkleinert werden, und so der natürliche Eindruck gewahrt wird. Der Ausblick ist meist 6—7 m höher als der Einblick. Abb. 71 zeigt den Strahlengang, dessen Wesen auf S. 58

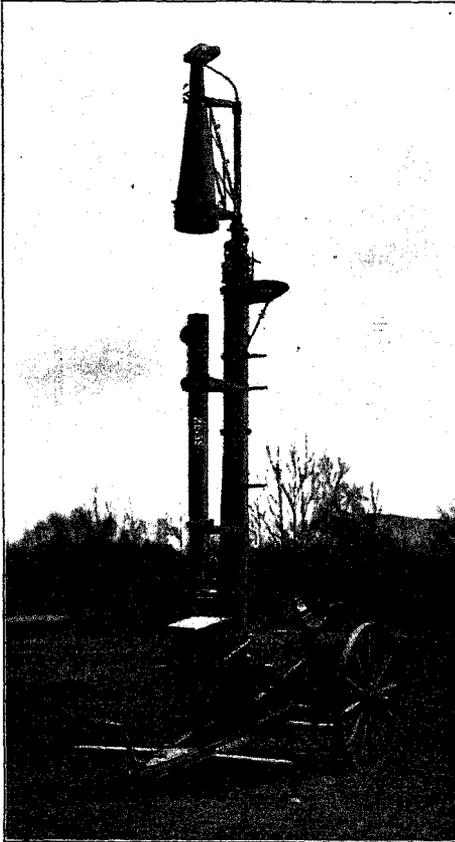


Abb. 68b. Das Mastfernrohr bei kleinster Ausblickhöhe.

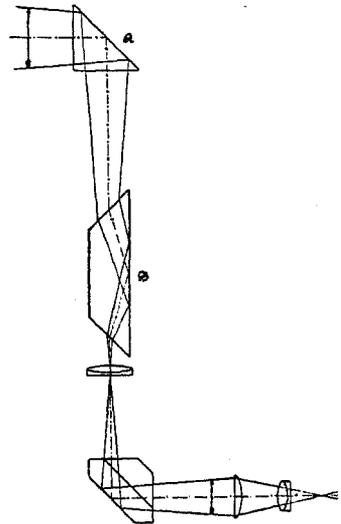


Abb. 69. Der Gang der Strahlen im Rundblickfernrohr.

erläutert wurde; der obere Rohrteil ist neuerdings meist zur Verringerung des Wasserwiderstandes verjüngt. Um die $1\frac{1}{2}$ fache gegen eine stärkere $6\times$ Vergrößerung zu wechseln, wird im Objektivkopf das Doppelprisma mit den beiden Vorschaltfernrohren (S. 62) um die Knickstelle des Strahlengangs um 180° gedreht (Abb. 72). Bei dem Multi-periskop sind eine Mehrzahl von gewöhnlich acht Periskopen mit gemeinsamem Umkehrsystem in einem Rohr vereinigt und der Horizont so auf acht meist etwas übergreifende Gesichtsfelder verteilt. Um den ganzen

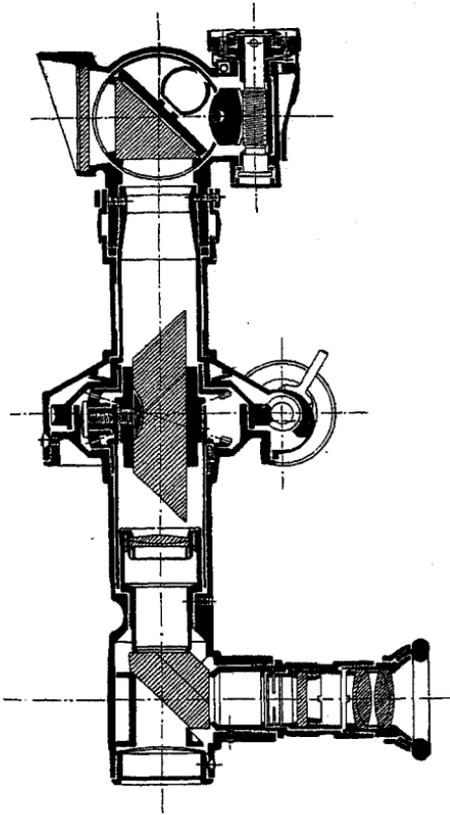


Abb. 70. Die von der Firma GOERZ ausgebildete Bauart des Rundblickzielfernrohrs (S. 121).

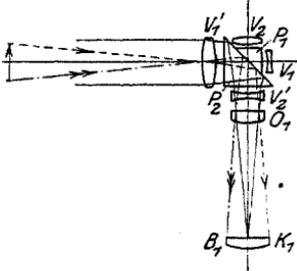


Abb. 72. Der Vergrößerungswechsel mit Vorschaltfernrohr.

$V_1' V_2'$ vergrößerndes, $V_1 V_2$ verkleinerndes Vorschaltfernrohr, $A_1 P_2$ Doppelprisma, O_1 Objektiv, K_1 Feldlinse. Ist O_1 mit V_2' und V_2 verschmolzen, so liegt Objektivwechsel vor.

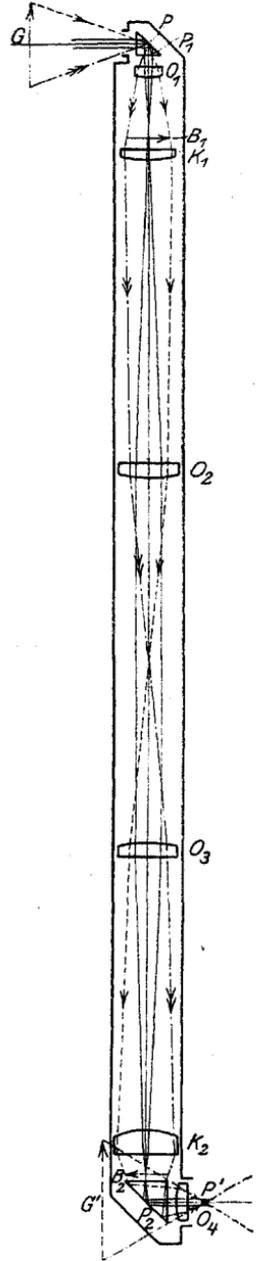


Abb. 71. Ein Tauchbootsehrrohr.

P_1 Objektivprisma, O_1 Objektiv, K_1 Feldlinse, $O_2 O_3$ Umkehrs-linsen, $K_2 O_4$ Okular, P_2 Okularprisma, B_1 u. B_2 erstes und zweites Bild.

Horizont auf einmal abzubilden, wendet man beim Ringbildsehrohr eine Ringspiegellinse an (Abb. 73). Bei der punktuell abbildenden Form von ALDIS ist die Eintrittsfläche eine Kugel um den Achsenpunkt in halber Höhe dieser Fläche, die Austrittsfläche eine Kugel um den Achsenpunkt, in dem sich die austretenden Hauptstrahlen kreuzen, die Spiegelfläche ein Hyperboloid mit diesen beiden Achsenpunkten als Brennpunkten. Das von dem Ring entworfene Bild ist virtuell, das Auge erhält ein etwa 0,5 fach vergrößertes Bild. In der Mitte des Ringes läßt man ein Objektiv ein Bild wie sonst entwerfen, so daß ein Gesamtbild nach Abb. 74 entsteht. Damit der obere Teil des Ringbilds aufrecht erscheint, muß das im Objektivkopf entworfene Mittelbild gegenüber dem Bild des gewöhnlichen Periskops umgekehrt im Okular abgebildet werden. Die Abb. 73 zeigt daher eine vorausgehende Umkehrlinse und ein Objektivprisma, das gegenüber dem einfachen Prisma ein umgekehrtes Bild entwirft; statt dessen kann man auch eine Zerstreuungslinse als Objektiv mit einfachem Prisma verwenden (Abb. 75). Bei dem Mattscheibensehrohr können eine Mattscheibe M in der Brennebene und eine Augenlinse O_2 wechselweise benutzt werden (Abb. 76); das Mattscheibenbild ist sehr viel lichtschwächer und daher nur bei guten Lichtverhältnissen zu gebrauchen, dafür bietet es die Annehmlichkeit der beidäugigen Beobachtung, die man vollkommener mit binokularen Sehrohren erreicht, die aber zu großen Durchmesser erhalten. Das Sehrohr läßt sich in einer Stopf-

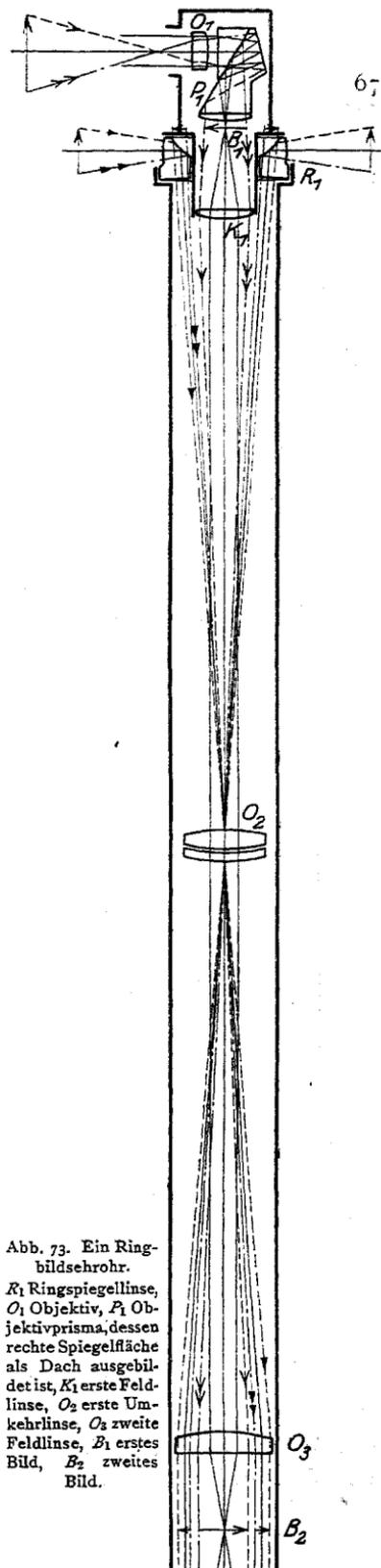


Abb. 73. Ein Ringbildsehrohr.
 R_1 Ringspiegellinse,
 O_1 Objektiv, P_1 Objektivprisma, dessen rechte Spiegelfläche als Dach ausgebildet ist, K_1 erste Feldlinse, O_2 erste Umkehrlinse, O_2 zweite Feldlinse, B_1 erstes Bild, B_2 zweites Bild.

büchse nicht nur drehen, sondern auch aus- und einschieben, sowohl um mit verschiedener Ausblickhöhe über dem Wasser beobachten zu

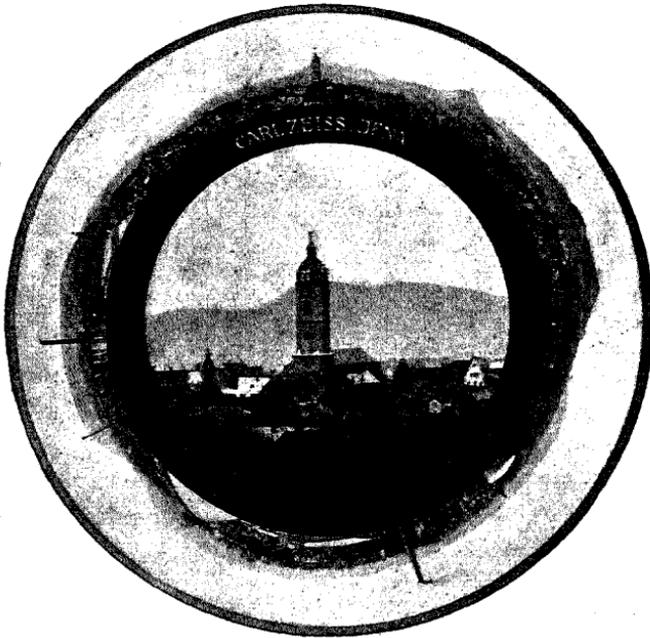


Abb. 74. Das Gesichtsfeld des Ringbildsehrohrs.

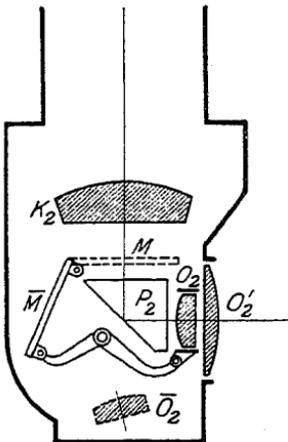


Abb. 76. Ein Okularkopf für ein Mattscheibensehrohr.

können als auch um das Rohr für Unterwasserfahrt ganz einziehen zu können. Damit man bei größeren Verschiebungen des Rohrs bequem beobachten kann, nimmt bei dem Fahrstuhlsehrohr ein Beobachterstuhl an den Bewegungen des Sehrohrs teil. Die hier nachteilige Trennung von den übrigen Instrumenten, die der Bootsführer zu beobachten hat, beseitigt das Standsehrohr, bei dem der Beobachter seinen festen Platz entweder im Turm oder besser in der darunter liegenden Zentrale hat, da hier der Bootsführer in unmittelbarer Verbindung mit dem Wachoffizier

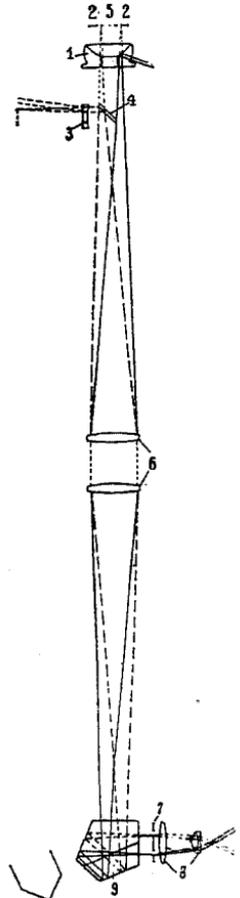


Abb. 75. Ein Ringbildsehrohr mit Negativlinse (3) als Objektiv und Pentadachprisma (9) als Okularprisma.

für den Tauch- und Tiefensteuerbetrieb ist. Bei der ersten Form des Standsehrohrs (Abb. 77) ist durch das zusätzliche Prisma P_2 ein Umweg der Lichtstrahlen bedingt, der von dem kleinsten Wert bei ausgefahrenem

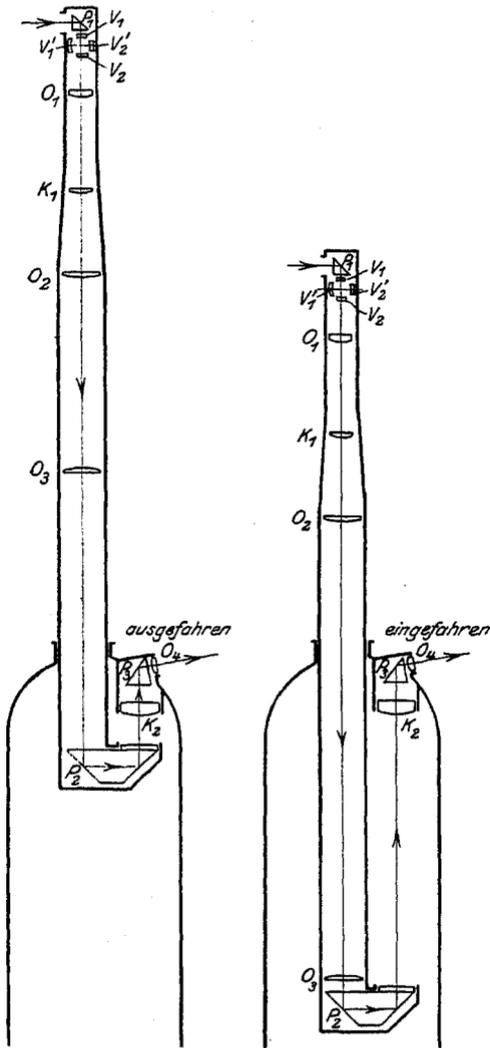


Abb. 77. Das Standsehrohr nach HUMBRECHT.

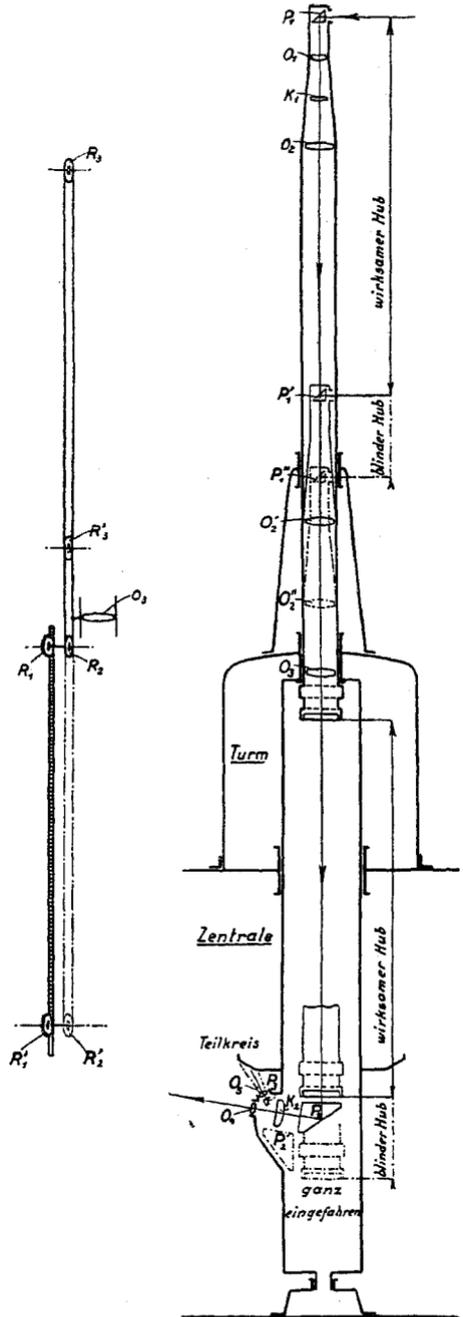


Abb. 78. Das Standsehrohr nach BLUM.

Rohr um das Doppelte der Verschiebung v von P_2 wächst, die gleich der des Rohres ist. Zur Erhaltung der Bildschärfe wird daher der Abstand der Umkehrlinsen O_2 und O_3 , zwischen denen die zu einem Dingpunkt gehörigen Bildstrahlen parallel verlaufen, um v vergrößert. Bei der zweiten Form (Abb. 78) ist unter Fortfall von P_2 gewissermaßen der Weg der Lichtstrahlen nach oben an ihren Weg nach unten angesetzt und der Einblick und damit der Beobachterstand entsprechend tiefer, d. h. in die Zentrale verlegt. Es wird hier beim Einziehen nur das optische Oberteil bis O_2 eingeschlossen auf das Unterteil aufgeschoben. Bei dem wirksamen, d. h. für die Beobachtung nutzbaren Hub wird also O_3 durch eine daneben dargestellte Einrichtung, bei der das Zahnrad R_1 des Seiltriebs $R_2 R_3$ auf einer festen Zahnstange ahrollt, in seiner Lage festgehalten, erst beim blinden Hub, durch den der Objektivkopf völlig eingezogen wird, wandert O_3 mit nach unten; das Okularprisma P_2 wird dabei selbsttätig aus dem Wege geklappt. Die Abbildung zeigt auch eine Einrichtung, um den Teilkreis für die Seitenrichtung gleichzeitig im Okular ablesen zu können.

8. Die Spiegelfernrohre (Reflektoren).

Zu diesen Fernrohren rechnet man alle, bei denen die Wirkung von einem Teil der brechenden Kugelflächen durch die von spiegelnden ersetzt ist. So entspricht einer der ersten Vorschläge für solche Fernrohre von MERSENNE 1639 dem Bau des holländischen, indem als Objektiv ein hohler und als Okular ein erhabener Kugelspiegel gewählt war. Praktisch kommt aber der Ersatz nur bei dem Objektiv und dem Umkehrsystem in Betracht. Die so beschränkte Gattung teilt man in reine (katoptrische) und gemischte (katadioptrische) Spiegelfernrohre ein. Von diesen Unterarten hat sich nur die erste eingeführt, die wir zunächst behandeln. Bei allen Spiegelfernrohren besteht die Schwierigkeit, das zurückgeworfene Licht dem Auge zugänglich zu machen, so daß von den eintretenden Strahlen entweder nichts oder nur ein geringer Teil abgeblendet wird (die Verwendung halbdurchlässiger Spiegel kommt praktisch nicht in Betracht.) Der erste Fall fordert die Schrägstellung von Spiegeln gegen die optische Achse. In der einfachsten Form ist er bei der HERSCHELschen Bauart verwirklicht, die auf LEMAIRE (1732) zurückgeht, sie ist der des astronomischen Fernrohrs verwandt, indem ein gegen die Achse geneigter Hohlspiegel als Objektiv dient (Abb. 79); das Fernrohr ist rücksichtig, die Abbildung rückwendig, das Bild höhenverkehrt. Der Spiegel wurde gewöhnlich mit 1:10 Öffnungsverhältnis ausgeführt; der größte von HERSCHEL angefertigte hatte 1,22 m Durchmesser. Nimmt man den Einfallswinkel der Achse zu $1,5^\circ$ an, so ist der Unterschied der sagittalen und tangentialen Schnittweite $= f \sin i \operatorname{tg} i$, also in diesem Fall 4,2 mm. Bei 400 facher Vergrößerung würde so

dem Auge 4 dptr Astigmatismus zugemutet; in Wirklichkeit dürfte dieser starke Fehler durch Schliff- oder eher durch Verbiegungsfehler bei der Lagerung ausgeglichen worden sein; eine Verbiegung von 1:100 mm am Rande genügte bereits. Bei der NEWTONSchen Bauart (1672) ist die Schiefstellung aufgegeben und dafür in den Strahlengang ein um 90° ablenkender Spiegel (Fangspiegel) oder Prisma eingeschaltet, so daß am Rande des Rohres ein scharfes Bild entsteht (Abb. 80); das Fern-

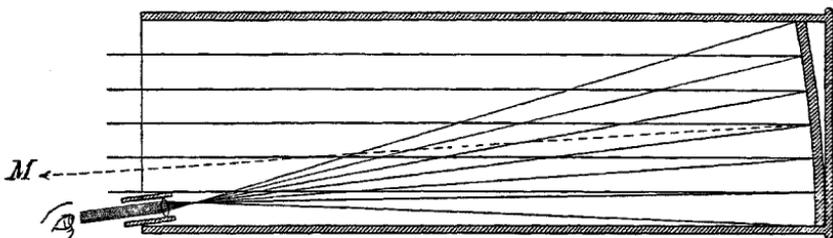


Abb. 79. Das Spiegelfernrohr nach HERSCHEL.

rohr hat seitlichen Einblick bei umgekehrtem rechtwändigem Bild. Der Fangspiegel muß annähernd so groß sein, daß er ein Bündel von dem Durchmesser $D^2 : 2F$ (D und F Durchmesser und Brennweite des Hauptspiegels) aufnimmt. Dieser Durchmesser ist um den der Gesichtsfeldblende des Okulars zu vermehren, wenn keine Abschattung eintreten soll. Von

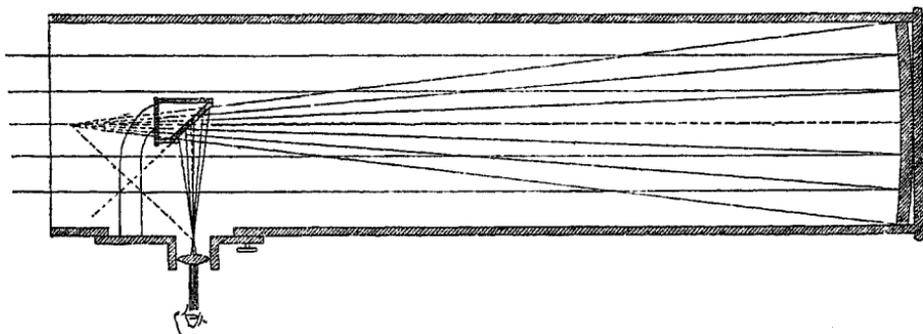


Abb. 80. Das Spiegelfernrohr nach NEWTON.

größeren Fernrohren dieser Art hat das von LASSELL die gleichen Verhältnisse wie das von HERSCHEL, während das Pariser bei der gleichen Öffnung nur 7,15 m Brennweite hat. Um den Fangspiegel zu verkleinern, ließ FOUCAULT das Bild näher am Fangspiegel entstehen und beobachtete mit einem Erdfernrohrökular; der Vorschlag, hierbei dem Fangspiegel eine solche Neigung zu geben, daß das Auge neben dem Hauptspiegel beobachten kann, hat keine praktische Bedeutung, da die Nachteile des Erdfernrohrökulars viel stärker hervortreten als bei FOUCAULTS Vorschlag. Bildet man aber den Fangspiegel kugelförmig aus, so kann man die

Radien von Fang- und Hauptspiegel so wählen, daß der Fangspiegel das Bild neben dem Hauptspiegel entwirft. Bei erhabenem Fangspiegel bietet sich ferner die Möglichkeit, das Rohr gegen NEWTONS Bauart zu verkürzen; es ist dies das schon von ZAHN 1685 beschriebene Brachyteleskop. Der Hauptspiegel ist hier ebenfalls zur Achse so weit geneigt, daß der Fangspiegel außerhalb der eintretenden Strahlen liegt. Bei dem Fernrohr der Marinesternwarte Pola nach Abb. 81 beträgt die Gesamtbrennweite 8,56 m. Der Einfallswinkel des Hauptspiegels ist 2° , des

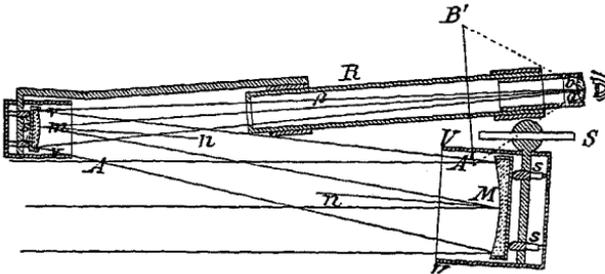


Abb. 81. Das Brachyteleskop.

Fangspiegels $4,7^{\circ}$, so daß wenigstens der bei der schiefen Spiegelung auftretende Astigmatismus des Hauptspiegels durch den Fangspiegel gehoben ist. Führt man das Brachyteleskop mit ungebrochener Achse aus, so wird meist der Hauptspiegel in der Mitte ausgebrochen. Diese Form bezeichnet man nach CASSEGRAIN (1672, Abb. 82), sie entspricht dem astro-

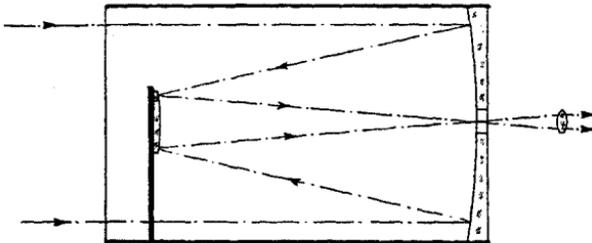


Abb. 82. Das Spiegelfernrohr nach CASSEGRAIN.

nomischen Fernrohr mit Teleobjektiv. Von ihr unterscheidet sich die GREGORYSche (1661, Abb. 83) dadurch, daß der Fangspiegel über den Brennpunkt des Hauptspiegels hinausgerückt und als Hohlspiegel ausgebildet ist; sie entspricht dem Erdfernrohr, indem der Fangspiegel als Umkehrlinse wirkt. Das Fernrohr von CASSEGRAIN gibt ein umgekehrtes, das von GREGORY ein aufrechtes Bild; bei beiden sind die Bilder rechtwändig. Den Fangspiegel läßt man das Bild dicht hinter dem Hauptspiegel entwerfen; den Durchmesser des Fangspiegels und den des Ausbruchs im Hauptspiegel wählt man gewöhnlich gleich. Ist der Durchmesser des Ausbruchs m mal kleiner als der D_1 des Hauptspiegels mit der Brenn-

weite f_1 , der Durchmesser des Fangspiegels dem achsenparallelen Bündel angepaßt und entsteht das Bild im Scheitel des Hauptspiegels, so ist bei GREGORYS Form die Gesamtbrennweite $F = (m + 1)f_1$ und bei CASSEGRAINS $(m - 1)f_1$; das Gesichtsfeld $2w'$ des Okulars mit der Brennweite f_3 bestimmt $\text{tg } w' = D_1 : (2m f_3)$. Je größer D_1 und $D_1 : F$ sind, ein desto größeres bildseitiges Gesichtsfeld $2w'$ läßt sich ausnutzen. Bei beiden Fernrohrarten ist es zweckmäßig, in der Austrittspupille eine Blende anzubringen, die alle Strahlen abfängt, die ohne doppelte Spiegelung unmittelbar in das Okular gelangen und die dunklen Stellen des Bildes aufhellen würden; es wird so freilich die Übersicht des Gesichtsfelds beeinträchtigt. Das GREGORYSche Fernrohr wird in kleineren Größen von englischen Liebhabern der Astronomie viel benutzt; für ein solches, das aus der im 18. Jahrhundert berühmten SHORTSchen Werkstatt stammt, ist für den Hauptspiegel die Brennweite $f_1 = 244$ mm, der Durchmesser $D_1 = 58$ mm, für den Fangspiegel $f_2 = 38$ und $D_2 = 15$ mm, der Ab-

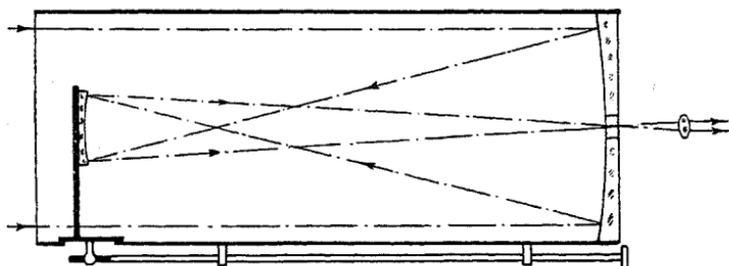


Abb. 83. Das Spiegelfernrohr nach GREGORY.

stand der Spiegel $A = 286$ mm, also die Gesamtbrennweite $F = 2400$ mm; das HUYGENSSche Okular mit $f_3 = 42$ mm und 18° Gesichtsfeld gibt 57fache Vergrößerung. Für das CASSEGRAINSche Fernrohr von Victoria (Kanada) ist $f_1 = 9,179$ m, $D_1 = 1845$ mm, der Durchmesser des Ausbruchs 257 mm, $f_2 = 3,028$ m, $D_2 = 508$ mm, $A = 7$ m, $F = 32,92$ m.

Bei den photographischen Spiegelfernrohren auf dem Mt. Wilson sind verschiedene Bauarten vereinigt (Abb. 84). Der Hauptspiegel des älteren hat 1,52 m Öffnung und 7,6 m Brennweite; für Aufnahmen unmittelbar in der Brennebene mit 1:5 Öffnungsverhältnis dient die Anordnung von NEWTON; in einer solchen ähnlich CASSEGRAINS wird die Brennweite durch zwei auswechselbare Fangspiegel auf 24,4 bzw. 30,5 m vergrößert, wobei das Bild durch einen kleinen 90° ablenkenden Planspiegel D vor der Mitte des Hauptspiegels auf die seitliche Platte bzw. den Sternspektrographen geworfen wird. Durch einen dritten Fangspiegel D kann die Brennweite auf 45,7 m gesteigert werden, der kleine Planspiegel steht hier im Kreuzungspunkt der Deklinations- und Polarachse und wird so mitgedreht, daß er die Strahlen durch die Polarachse E hindurch in den Beobachtungsraum wirft, wo ein 6,4 m langer Sternspektrograph angeschlossen

werden kann. Der parabolische Hauptspiegel hat eine Mitteldicke von 175 mm, der hyperbolische Fangspiegel eine solche von 76 mm bei einem Durchmesser von 406 bis 445 mm für die verschiedenen Brennweiten, der eine Planspiegel hat eine Öffnung von $502 \times 368 \text{ mm}^2$ und eine Dicke von 79 mm, der andere von $565 \times 318 \text{ mm}^2$ und 92 mm. Es zeigte sich, daß die Leistung dieses vorzüglichen Fernrohrs nur dann voll ausgenutzt wird, wenn die Temperatur auf 1° konstant gehalten wird. Bei dem neuen von HOOKER gestifteten Fernrohr derselben Sternwarte hat der Hauptspiegel 2,57 m Durchmesser, 292 mm Mitteldicke und 12,88 m Brennweite; durch Fangspiegel von 0,73 bzw. 0,64 m Durchmesser kann die Brennweite auf 41 bzw. 76 m gesteigert werden. Der Sternspektrograph in der Polarachse ist für Konkavgitter von 6,4 m Radius und für ebene Gitter mit einem Objektiv von 9,15 m Brennweite eingerichtet.

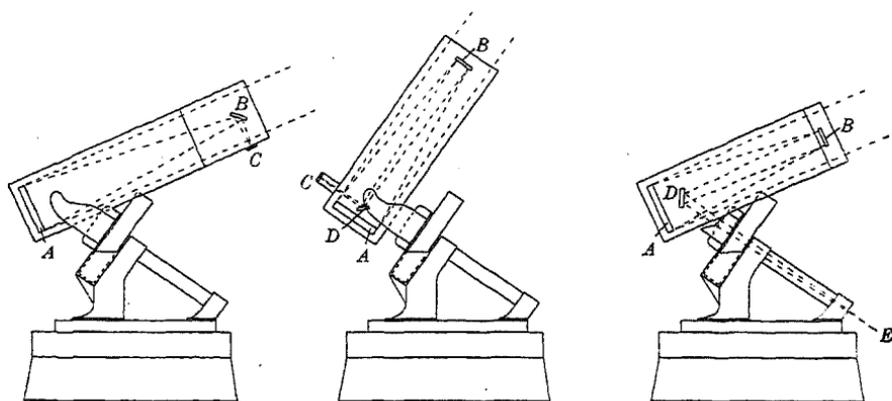


Abb. 84. Die optische Anordnung der Spiegelfernrohre auf dem Mt. Wilson.

Links die Anordnung nach NEWTON, in der Mitte ähnlich wie bei CASSEGRAIN, rechts nach RANYARD.

Als Werkstoff für die Spiegel dienten früher Metallegierungen. Bei dem Spiegelmetall von ROSSE ($68,2 \text{ Cu} + 31,8 \text{ Sn}$) werden etwa 64% des Lichts zurückgeworfen, bei einer neueren Stahllegierung von KRUPP mit ausgezeichneter Haltbarkeit etwa 59%. Dagegen erreicht man bei einer guten Versilberung 96%. Das Zurückwerfungsvermögen sinkt mit abnehmender Wellenlänge, Silber hat bei $0,31 \mu$ ein stark ausgeprägtes Minimum. Das für Melbourne 1869 gestiftete CASSEGRAINSche Spiegelfernrohr mit $D = 1,219 \text{ m}$ war wohl das letzte größere mit einem Metallspiegel ausgerüstete. Heute benutzt man auf der Vorderfläche versilberte Glasspiegel, deren Gewicht wesentlich geringer ist; die Rückseite wird nur zum Wärmeschutz mitversilbert; die öfters nötige Erneuerung der Versilberung bietet bei geeigneten Einrichtungen keine besondere Schwierigkeit.

Man wird es trotzdem verständlich finden, daß es nicht an Vorschlägen fehlt, bei denen die Kugelspiegel durch Decklinse geschützt

sind, d. h. die Rückfläche der Linse versilbert ist, so daß die Versilberung durch einen Überzug, gewöhnlich von Kupfer, gegen Verderben geschützt ist. Diese gemischten Spiegelfernrohre bieten zugleich die Möglichkeit, eine vollkommeneren Hebung der sphärischen Bildfehler herbeizuführen, sie haben aber auch den Nachteil, daß durch falsches Licht von Nebenbildern die dunklen Stellen des Bildes aufgehellt werden. Während beim Linsenfernrohr solche nur durch zweifache Zurückwerfung am Glase entstehen und daher ihre Lichtstärke auf etwa 0,16 % herabgesetzt ist, treten hier solche auf, die durch einmalige Zurückwerfung am Glase und ein- oder mehrmalige Zurückwerfung am Silber Spiegel entstehen und daher etwa 4 % Lichtstärke zeigen. Es müssen daher die Linsenformen so bestimmt sein, daß diese Nebenbilder möglichst entfernt vom Hauptbild entstehen. Da einmal solche gemischte Bauarten erwogen wurden, blieb man nicht bei der Umbildung der Spiegelfernrohre stehen; vielmehr suchte man durch besondere zusätzliche Linsen eine bessere Bildgüte zu erreichen; andererseits wurde man auf Bauarten geführt, die zwischen Linsen- und Spiegelfernrohren stehen, die sogenannten Mediale. Es ist S. 33 erwähnt, daß die Aufhebung des sekundären Spektrums bei einem Objektiv mit getrennten Linsen aus gewöhnlichen Glasarten möglich ist, daß aber dabei das Bild virtuell wird. Durch einen zusätzlichen Hohlspiegel, der als die hintere Fläche einer Linse ausgebildet wird, ist es nun möglich, ein reelles Bild zu erhalten, ohne die Farbenreinheit zu stören. Das Brachymedial, das auf HAMILTON (1814) zurückgeht, zeigt Abb. 85, das Medial von SCHUPMANN (1899) Abb. 86. Ein besonderer Vorteil dieser Bauart gegenüber dem Spiegelfernrohr besteht darin, daß die Verbiegungsfehler des Spiegels infolge von Schwere und ungleicher Erwärmung entsprechend der geringeren Größe der Spiegel-

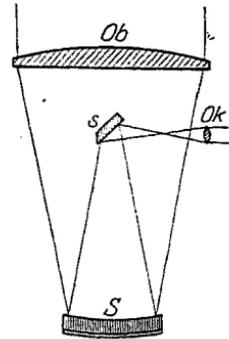


Abb. 85. Das Brachymedial.

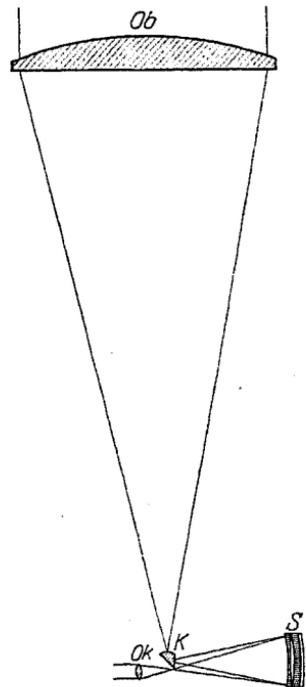


Abb. 86. Das Medial.

linse S herabgesetzt sind, am meisten bei dem Medial, das dafür den Nachteil hat, daß durch die Schiefstellung der Spiegellinse Bildfehler auftreten. Bei dem Medial ist eine Kollektivlinse K in der Nähe der

Brennebene der Frontlinse Ob angebracht, die Ob in die Spiegellinse abbildet; dadurch wird hier die Farbenabweichung der Vergrößerung gehoben. Beim Brachymedial müssen zur Hebung dieses Fehlers Kompensationsokulare angewandt werden oder man verkittet mit dem als Prisma ausgebildeten Fangspiegel s eine Verbesserungslinse, dann ist es auch für photographische Zwecke brauchbar, zumal da sich neben der Hebung der Koma Bildfeldebnung im übertragenen Sinne bei mäßigem Astigmatismus erreichen läßt. Leider ist bisher mit dem Brachymedial kein Versuch im Großen gemacht worden.

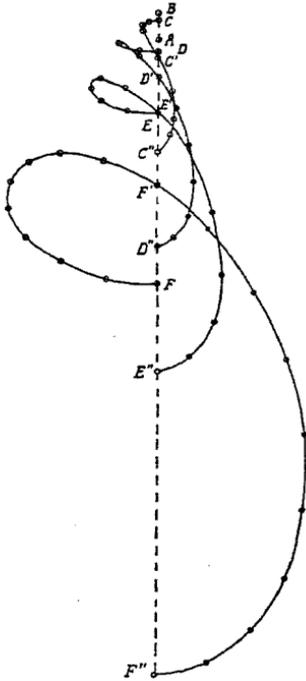


Abb. 87.

Was die Bildfehler eines Kugelhohlspiegels, der zugleich Öffnungsblende ist, für parallel einfallendes Licht nach der SEIDELschen Theorie S. 25 betrifft, so ist die Seitenabweichung in der GAUSSischen Bildebene für die sphärische Abweichung durch $u'^3 r : 16$, für die Komponenten der Koma durch $(3u_t'^2 + u_s'^2)wr : 8$ und $u_t' u_s' wr : 4$, für die tangentielle Bildkrümmung durch $u' w^2 r : 2$ gegeben (der Radius dieser nach dem Spiegel hohlen Bildkrümmung ist $r : 4$); die sagittale Bildkrümmung und die Verzerrung sind gleich Null. Der Parabolspiegel ist frei von sphärischer Abweichung; Koma und Bildkrümmung sind dieselben wie beim Kugelspiegel, wenn er zugleich Öffnungsblende ist. In Abb. 87 sind die Streuungsfiguren C, D, E, F in der Brennebene eines solchen Parabolspiegels wiedergegeben, die den Öffnungshalbkreisen mit den Öffnungswinkeln (Durchmessern) $2^\circ; 3^\circ; 4^\circ; 6^\circ$ bei einer Hauptstrahlneigung $w = 1^\circ$ entsprechen. A ist der Durchstoßungspunkt des Hauptstrahls, B der höchste Punkt. Der

Durchstoßungspunkt der Achse liegt auf AH oberhalb A ; AH ist $= 0,00002 F$. Diese Kurven sind von CROCKETT auf Grund der genauen trigonometrischen Durchrechnung für Punkte der Halbkreise erhalten, die um 10° voneinander abstehen. Fast die gleichen Werte erhält man nach den obigen Näherungsformeln; führt man die Polarkoordinaten u' und φ für die Öffnung ein, so ist

$$\delta_t = \left\{ (2 + \cos 2\varphi) u'^2 w' - 4 \cos \varphi u' w'^2 \right\} \frac{F}{4}$$

$$\delta_s = \sin 2\varphi u'^2 w' \frac{F}{4}$$

Abb. 88a zeigt das fünfmal vergrößerte Sternbild in der Brennebene des Hamburger Parabolspiegels von 1 m Durchmesser und 3 m Brennweite für $w' = 1,8^\circ$. Die entsprechenden Abweichungskurven sind hier nicht wiedergegeben, da Abb. 87 die Umbildung der Kurven mit wachsendem w' besser hervortreten läßt. Es sei nur bemerkt, daß die beiden Einhüllenden der Kurven die äußere Begrenzung des Doppelschweifs in dem

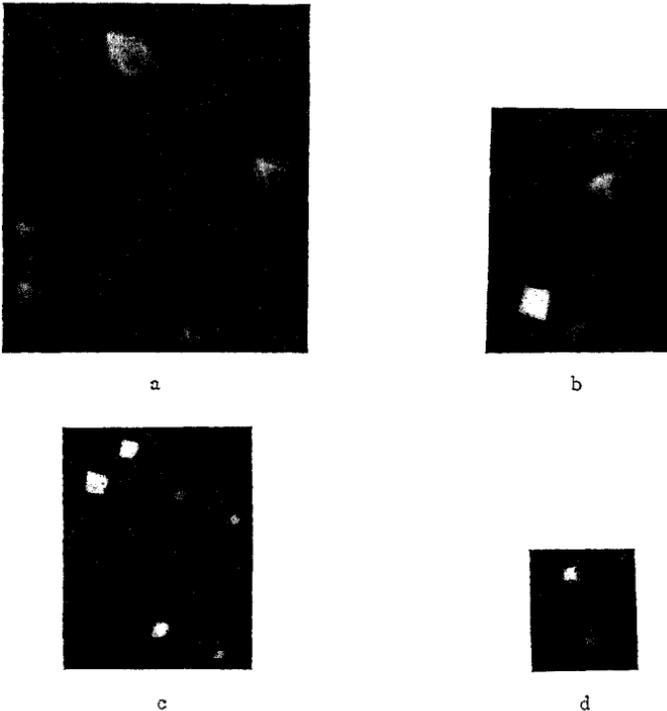


Abb. 88. Sternbilder in der Brennebene außer der Achse.

a) des Parabolspiegels ($D = 1000$, $F = 3000$, $w = 1,8^\circ$), b) des PETZVALSchen Portraitobjektivs ($D = 160$, $F = 800$, $w = 7^\circ$), c) des Tessars ($D = 120$, $F = 600$, $w = 8,5^\circ$), d) des Triplets ($D = 200$, $F = 1000$, $w = 7,5^\circ$). Längenmaße in mm. Plattenmitte links oben. a ist 5 mal, b, c und d sind 10 mal vergrößert. Die Aufnahmen können nicht zum Vergleich der Leistung dienen, da Belichtungsdauer und Sternhelligkeit verschieden waren.

Sternbild darstellen; sie laufen hier mit Neigungen von etwa 26° und 34° gegen den Hauptschnitt aus.

Man kann nun fragen, ob bei einem System aus zwei Kugelspiegeln die sphärische Abweichung gehoben werden kann; es gibt keine hier brauchbare Lösung; bei den Spiegelfernrohren nach CASSEGRAIN und GREGORY ist dies nicht möglich, da die Abweichung des Hauptspiegels überwiegt und sie durch die Abweichung des Fangspiegels im ersten Fall nur wenig vermindert, im zweiten nur wenig vermehrt wird. Mit einem Hohlspiegel verglichen, der den gleichen Durchmesser und dieselbe

Brennweite wie die Gesamtbrennweite hat, ist sogar bei abweichungsfreiem Fangspiegel die sphärische Abweichung im Verhältnis der dritten Potenz der Vergrößerung des Fangspiegels größer; wird in diesem Fall mit einem Hohlspiegel von der Brennweite des Hauptspiegels verglichen, so ist die auf den Dingraum bezogene Abweichung die gleiche. Auch bei den letzten drei Bauarten führt man daher den Hauptspiegel parabolisch und den Fangspiegel hyperbolisch bzw. ellipsoidisch aus; durch diese Abweichung von der Kugelgestalt wird die sphärische Abweichung gehoben, und man kann Haupt- und Fangspiegel für sich prüfen und austauschen, sie sind ferner weniger empfindlich gegen Fehler in der Zentrierung zueinander; sonst könnte man auch die ganze Abweichung am Hauptspiegel beseitigen. SCHWARZSCHILD hat für photographische Zwecke eine Gruppe von zwei Hohlspiegeln angegeben, die von der Kugel abweichende Umdrehungsformen haben, deren Scheitelradien $r_1 = -5$ und $r_2 = -1,67$ und deren Abstand $d_1 = 1,25$ bei der Gesamtbrennweite $F = 1$ ist; für die Flächenabweichung gilt $\kappa_1 = -0,054$ und $\kappa_2 = 0,211$. Der Fangspiegel hat den halben Durchmesser des Hauptspiegels. Diese Bauart ist frei von sphärischer Abweichung und Koma, sie besitzt Bildfeldebnung im übertragenen Sinn, der Astigmatismus ist das 0,4 fache des Parabolspiegels mit $F = 1$. Die Bauart dieses Doppelspiegels entspricht der eines photographischen Aplanats. Die gleichen drei Bildfehler wie bei dieser Bauart können gehoben werden, wenn man den Parabolspiegel durch eine achromatische vergrößernde Zerstreulinse zwischen ihm und seinem Brennpunkt ergänzt, deren Radien passend zu bestimmen sind. Was die Bildfehler außer der Achse bei dem GREGORYschen bzw. CASSEGRAINSchen Doppelspiegel betrifft, dessen Einzelspiegel von sphärischer Abweichung befreit sind, so ist die Koma im Bildraum gleich der im Verhältnis der Vergrößerung des Fangspiegels vergrößerten Koma eines Parabolspiegels, der die gleiche Brennweite und Öffnung hat wie der Hauptspiegel, da die auf den Dingraum bezogene Koma für diese Doppelspiegel die gleiche ist wie für den Parabolspiegel. Wenn man von der Vergrößerung der Sternbilder durch die der photographischen Platte eigentümliche Verbreiterung absieht, so läuft dieser Vergleich auf dasselbe hinaus, wie wenn man einmal eine Aufnahme mit dem Parabolspiegel macht und sie durch ein genügend abweichungsfreies photographisches Objektiv soviel vergrößert wie der Fangspiegel und das andere Mal eine Aufnahme mit dem Doppelspiegel macht. Für die Bildkrümmungen beschränken wir uns auf den Sonderfall des Doppelspiegels mit $F = 1$; $r_1 = -1:2$; $r_2 = -1:7,5$ bzw. $+1:7,5$ und $d_1 = 1:3$ bzw. $1:5$. Wirkt der Hauptspiegel als Öffnungsblende, so ist $q_s = 15$ bzw. -15 ; $q_t = 7$ bzw. -23 ; wirkt der Fangspiegel als solche, so ist $q_s = 16$ bzw. -16 ; $q_t = 10$ bzw. -26 . Ist im ersten Fall der Fangspiegel kugelförmig, so ist $q_s = 11,25$ bzw. $-11,25$ und $q_t = -4,25$ bzw. $-11,75$; auf die Flächenabweichung des Haupt-

spiegels kommt es dabei nicht an. Vergleicht man wie bei der Koma mit dem Parabolspiegel, wo $q_s = 0$; $q_t = -4$ ist, so sind diese Doppelspiegel ungünstiger. Liegt die Öffnungsblende und der Brennpunkt des Doppelspiegels im Hauptspiegel, und sind die Einzelspiegel frei von sphärischer Abweichung, so ist $q_s + q_t = 0$, wenn $r_1 = r_2 = -0,618$ und $d_1 = 0,118$ für $F = 1$ ist; dann ist $q_s = -q_t = 3,236$.

In der Geschichte des astronomischen Fernrohrs zeigt sich immer wieder der Wettkampf zwischen Linsen- und Spiegelfernrohr; er hat dazu beigetragen, daß die Leistung beider Bauarten auf das höchste gesteigert worden ist. Für Messungen ist das Linsenfernrohr überlegen, einerseits weil die Störung durch Koma fortfällt, wenn diese auch beim Spiegel durch Kennzeichnen der Mitte des Bildflecks durch Öffnungsblenden verringert werden kann, andererseits weil die Linsen weniger durch Temperaturänderung beeinflußt werden (S. 38); es ist so auch durch bessere Bildschärfe ausgezeichnet und für die Trennung von Doppelsternen überlegen. Die Normalfernrohre für die photographische Himmelskarte von 340 mm Öffnung und 3,4 m Brennweite zeichnen $2,8^\circ$ Gesichtsfeld aus, die Zerstreuungsflecke eines Hohlspiegels von gleicher Öffnung und Brennweite sind nicht größer, seine Bilder aber lassen sich aus den erwähnten Gründen weniger genau ausmessen; infolge der Koma sinkt beim Spiegel mit n mal größerem Öffnungsverhältnis das brauchbare Gesichtsfeld auf den n^2 ten Teil. Für das Aufsuchen von Planeten und Kometen, wo man großes Gesichtsfeld und Öffnungsverhältnis braucht, verwendet man photographische Objektive aus 3 bis 4 getrennten Linsen; mit einem PETZVALSchen Porträtobjektiv von 160 mm Öffnung und 800 mm Brennweite erhält man etwa 10° Gesichtsfeld ausgezeichnet, obwohl hier bei Bildfeldebahnung im übertragenen Sinne am Rande etwa 2,5 mm astigmatische Längsabweichung vorhanden ist; mit einem Tessar oder Triplet gleicher Größe kommt man bis 15° . Abb. 88 b, c, d zeigen Sternbilder außer der Achse in der Brennebene dieser Objektive. Wo es auf das Gesichtsfeld und die höchste Schärfe weniger ankommt, wie bei Aufnahme von Nebelflecken und Sternhaufen und in der Spektrophotographie, wird der Spiegel vielfach vorgezogen; er empfiehlt sich auch durch leichtere Montierung und geringere Kosten, die bei größeren Abmessungen etwa 1:10 eines zweilinsigen Objektivs betragen. An die Glasscheibe werden nicht so hohe Ansprüche gestellt, so daß der größte Hohlspiegel 2,5 m Durchmesser hat gegenüber dem größten Objektiv von 1 m. Man hat Spiegel mit dem großen Öffnungsverhältnis von 1:2,5 bei etwa 1 m Brennweite noch mit Erfolg verwandt. SHAPLEY steigerte das Öffnungsverhältnis des 2,5 m Spiegelfernrohrs im Verhältnis von 15:8, indem er dicht vor dem Brennpunkt ein photographisches Objektiv von $F = 75$ mm und $D:F = 1:1,9$ anordnete, und erzielte damit bei Sternphotographie mit der gleichen Belichtung den Gewinn einer Größenklasse; das Gesichtsfeld betrug nur $6'$; bei anderer Objektiv-

lage war die Steigerung noch größer. Ein Vorzug des Spiegels ist die vollkommene Freiheit von sekundärem Spektrum, die nicht nur für das Erkennen von Farben wertvoll ist, sondern auch bei größeren Abmessungen einen erheblichen Helligkeitsgewinn bedeutet. In der Tat zeigte sich der 1,5 m Spiegel und erst recht der 2,5 m dem Lick-Objektiv für Beobachtung von Planeten sowie lichtschwachen Sternen und Nebeln überlegen. Der Übergang von der Beobachtung zur Photographie ist beim Spiegelfernrohr ohne weiteres möglich, und manche spektroskopische Arbeiten werden erleichtert. Wegen der größeren Absorption des Glases jenseits des sichtbaren Teils des Spektrums ist der Spiegel auch bei Untersuchungen der Wärmestrahlen und ultravioletten Strahlen überlegen; für die letzten sind Spiegel aus Spiegelmetall geeigneter.

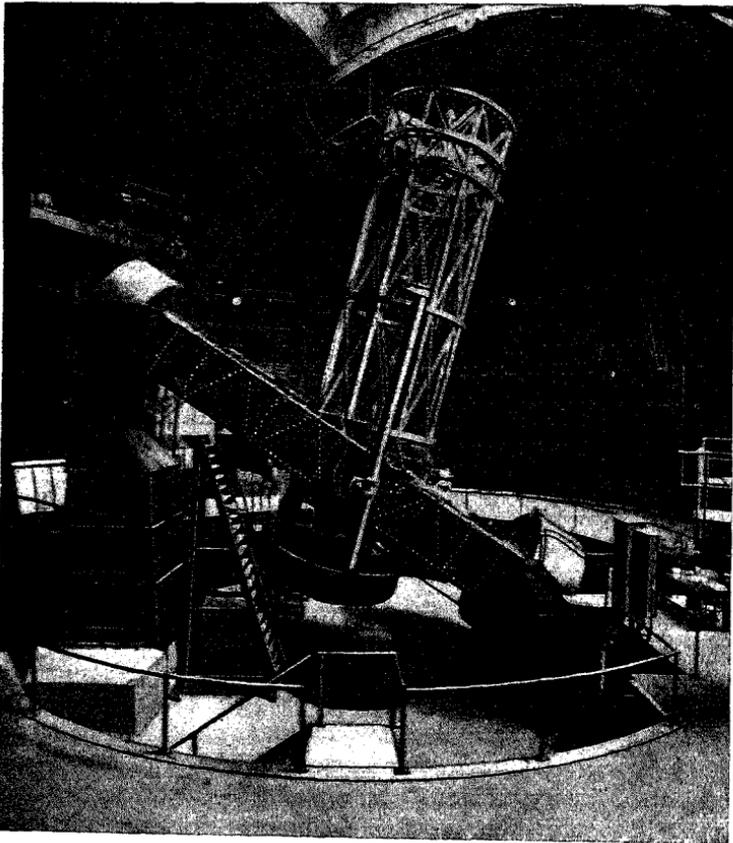


Abb. 89. Das 2,5 m-Spiegelfernrohr auf dem Mt. Wilson mit englischer Aufstellung.

9. Die Montierungen.

An dieser Stelle mögen einige Bemerkungen über die Aufstellung der Fernrohre für astronomische Zwecke eingeschaltet werden. Um dem Fernrohr jede Richtung im Raume geben zu können, verwendet man für Beobachtung irdischer Gegenstände die sogenannte azimutale Aufstellung, bei der eine Drehung um eine untere senkrechte und eine obere wagrechte Achse vorgesehen ist (Abb. 113), eine andere Anordnung zeigt der Kipptheodolit (Abb. 185). Um bei astronomischen Beobachtungen das Fernrohr durch ein Uhrwerk der täglichen Bewegung der Gestirne in einfacher Weise nachzuführen, bedient man sich der parallaktischen oder äquatorealen Aufstellung, bei der die untere Polar-(Stunden-) Achse nach dem Himmelspol gerichtet ist und eine dazu senkrechte Deklinationsachse vorgesehen ist. Bei der sogenannten englischen Aufstellung ruhen die Lager der Polarachse auf getrennten Pfeilern; das Fernrohr liegt mitten zwischen den Lagern der Deklinationsachse wie beim 2,5 m Spiegelfernrohr auf dem Mt. Wilson (Abb. 89) oder einseitig zu dieser Achse (Abb. 90).

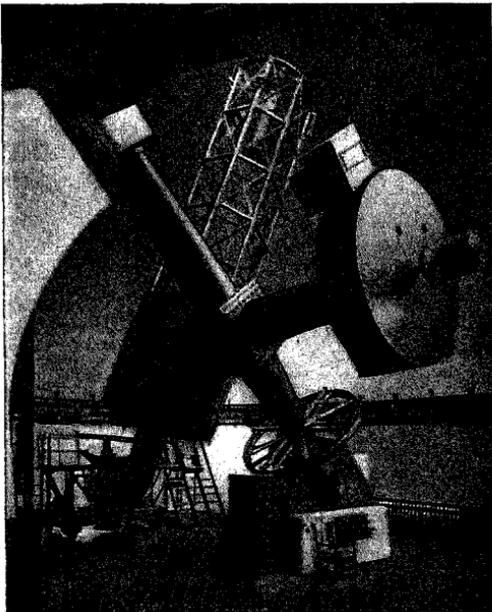


Abb. 90. Das CASSEGRAINSche Spiegelfernrohr ($D = 1845$ mm) in Victoria mit englischer Aufstellung.

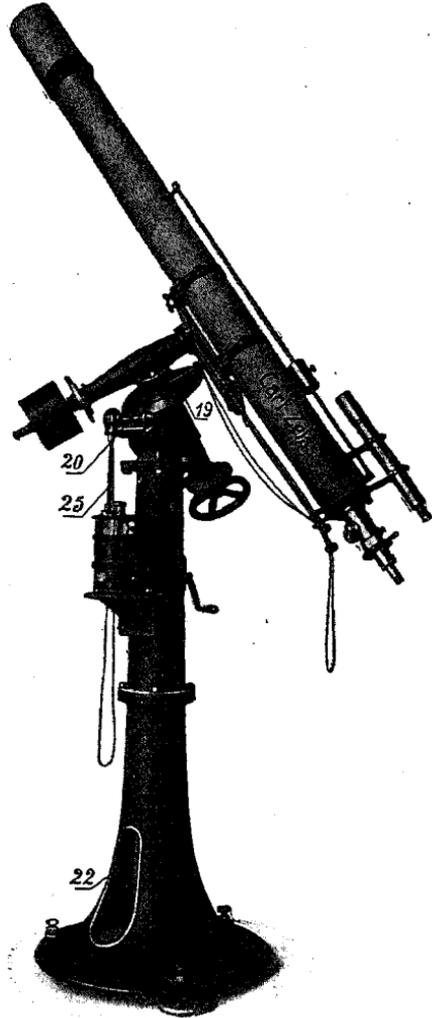


Abb. 91. Ein Linsenfernrohr mit deutscher Aufstellung.

Bei dieser Aufstellung ist die Beobachtung in der Nähe des Pols beschränkt; auch sind die getrennten Lager meist ein Nachteil. Bei der deutschen Aufstellung liegt die Deklinationsachse in der Verlängerung des oberen Lagers der Polarachse; das Linsenfernrohr sitzt meist einseitig an der ersten Achse (Abb. 91 u. 92). Bei dieser Form

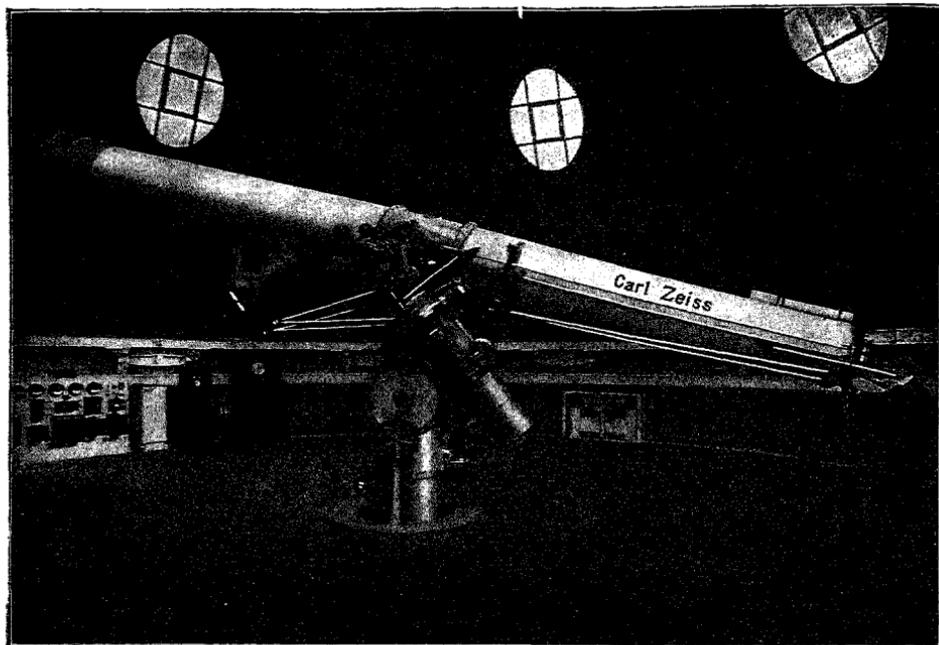


Abb. 92. Das Babelsberger Fernrohr ($D = 650$ mm) mit deutscher Aufstellung.

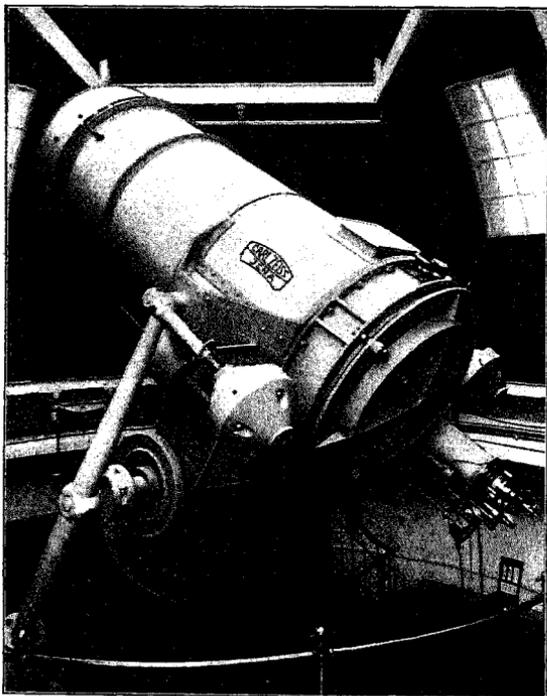


Abb. 93. Das Bergedorfer Spiegelfernrohr ($D = 1000$ mm) mit deutscher Aufstellung

ist in der Nähe des Zenits für photographische Daueraufnahmen ein Umlegen des Fernrohres nötig, um nicht an der Säule anzustoßen; für solche Zwecke bildet man daher bei mäßig großen Fernrohren den Träger der Polarachse am oberen Ende als Verlängerung dieser Achse so lang aus, daß das Fernrohr am unteren Ende nicht anstoßen kann. Die mittlere Lagerung bei einem Spiegelfernrohr zeigt Abb. 93. Hier ist ferner bemerkenswert, daß nach MEYER getrennt von dem Führungssystem für die Bewegung nach Stundenwinkel und Deklination ein entlastendes Tragsystem angeordnet ist, durch das die Durchbiegung der Achsen vermieden wird. Bei den

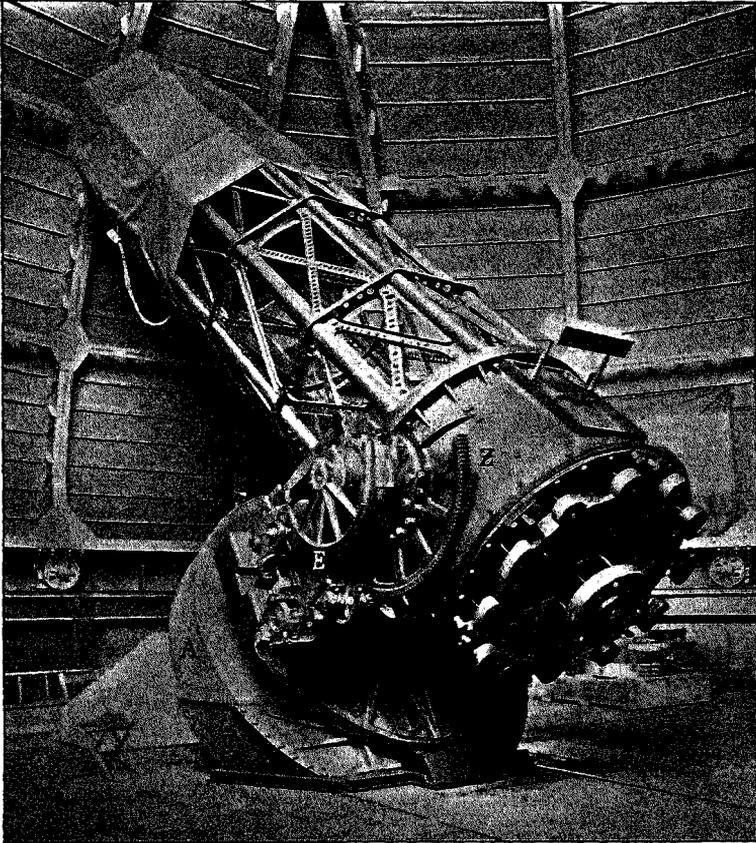


Abb. 94. Das 1,5 m-Spiegelfernrohr auf dem Mt. Wilson mit deutscher Aufstellung.

Spiegelfernrohren auf dem Mt. Wilson ist die Stundenachse durch den Auftrieb von Quecksilber entlastet. Die Montierung des kleineren zeigt Abb. 94; hier ist *T* der Quecksilbertrog, in den der Schwimmer *A* taucht; *Z* ist der Zahnkranz für die Bewegung in Deklination, mit dem zugleich sich der Zahnkranz *E* des RANYARDSchen drehbaren Fangspiegels halb so schnell dreht. Der Hauptspiegel wird außer von drei festen Punkten noch von einer größeren Zahl hier sichtbarer Entlastungshebel getragen. Damit der Beobachter den Bewegungen des Okulars folgen kann, ist ein fahrbarer Stuhl nötig, der neuerdings an der Drehkuppel angehängt wird; noch bequemer ist eine Hebebühne (Abb. 92). Bei dem 21 m langen Fernrohr der Treptower Stern-

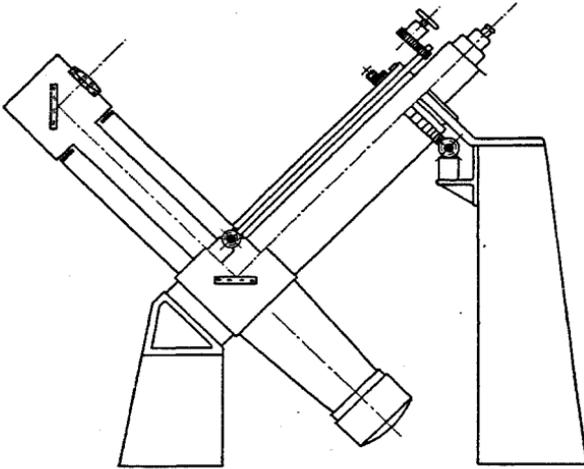


Abb. 95. Das Äquatoreal coudé von Löwy.

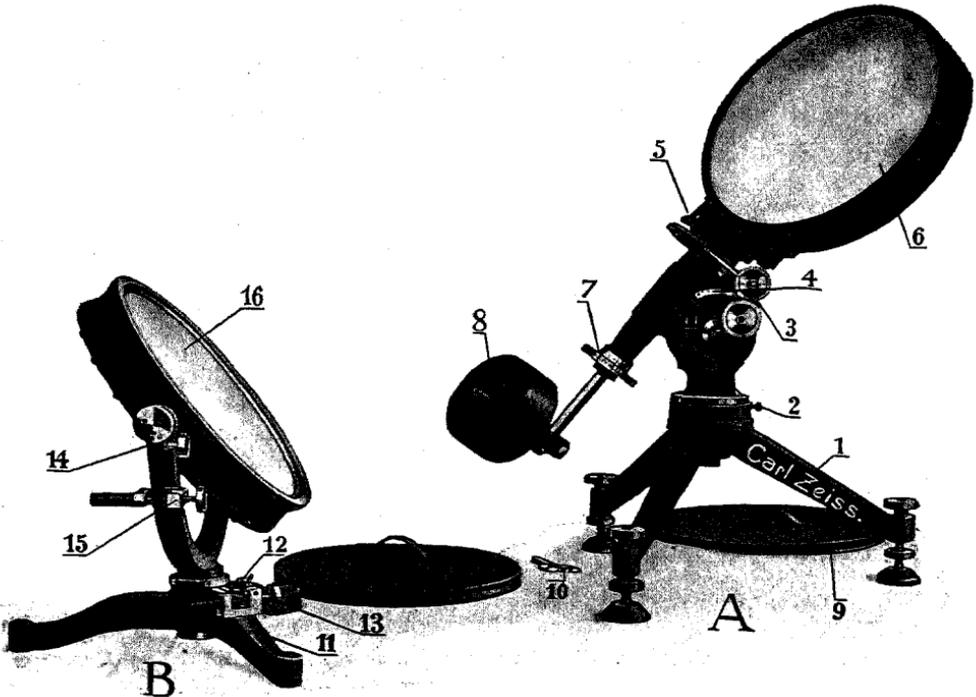


Abb. 96. Der Zölostat von LIPPMANN.

warte liegt der Kreuzungspunkt der Drehachsen im Auge; in kleineren Verhältnissen fand diese Aufstellung auch für Kometensucher Verwendung.

Statt das Fernrohr der Bewegung der Gestirne nachzuführen, kann man auch drehbare Planspiegel in Verbindung mit festem Einblick verwenden. Bei dem Äqua-

toreal coudé von Löwy (Abb. 95) erfolgt der Einblick in Richtung der Polarachse und zwar von oben; hinter dem Objektiv sind zwei Spiegel angeordnet, von denen der erste das Licht in die Deklinationsachse, der zweite in die Polarachse lenkt, beide bei 45° Einfallswinkel. Man kann auch mit einem neigbaren Spiegel auskommen, verliert aber dann die Möglichkeit der Beobachtung in der Nähe des Pols. Diese Anordnung ist von RANYARD in glücklicher Weise auf das CASSEGRAINSche Fernrohr übertragen worden; die mit einem Spiegel (Abb. 84) ist bei dem S. 73 erwähnten 1,5 m Spiegelfernrohr von Mount Wilson ausgeführt; da hier der Spektrograph fest angeordnet werden kann, konnte man ihm eine Länge von 6,4 m geben. Für bolometrische und spektrographische Sonnenuntersuchungen hat man zu festem wagrechtem Einblick gegriffen. Das wagrechte Pariser Fernrohr von 1,25 m Öffnung und 60 m Brennweite, das allerdings keine ernstliche wissenschaftliche Verwendung gefunden zu haben scheint, ist mit einem FOUCAULTSchen Siderostaten versehen. Da sich aber bei diesem wie bei den anderen Siderostaten das Bild beim Nachführen in seiner Ebene dreht, muß auch die photographische Platte nachgedreht werden. Diesen Nachteil vermeidet der LIPPMANNSche Zölostat (Abb. 96), bei dem der Spiegel der Polarachse parallel ist und um sie gedreht wird; wenn nötig, werden die Strahlen über einen Hilfspiegel geleitet. Bei dem wagrechten Fernrohr auf dem Mt. Wilson, das SNOW stiftete, werden die Strahlen nach Zurückwerfung von dem Zölostaten durch einen zweiten Spiegel mit 6° Neigung gegen die Horizontale auf einen der beiden Hohlspiegel von 610 mm Öffnung und 18,3 bzw. 43,6 m Brennweite geleitet, die so schräg gestellt sind, daß die optische Achse zuletzt horizontal verläuft. (Hier sei kurz der SCHRÖDERSche Vorschlag erwähnt, das Licht von einem großen Planspiegel um 90° abgelenkt dem Hohlspiegel zuzuführen und das Bild im mittleren Ausbruch des Planspiegels entstehen zu lassen.) Noch besser hat sich das HALEsche Turmfernrohr der gleichen Sternwarte (Abb. 97) mit einem Objektiv von 305 mm Öffnung und 18,29 m Brennweite in einem 20 m hohen Turm wegen der geringeren Störungen durch Luftunruhe bewährt, bei dem der zugehörige Spektrograph von 9,1 m Brennweite in einen Schacht eingebaut ist. Später wurde dort noch ein größerer Turm errichtet für ein Objektiv von gleicher Öffnung und 45,7 m Brennweite mit Spektrograph von 22,8 m Brennweite.

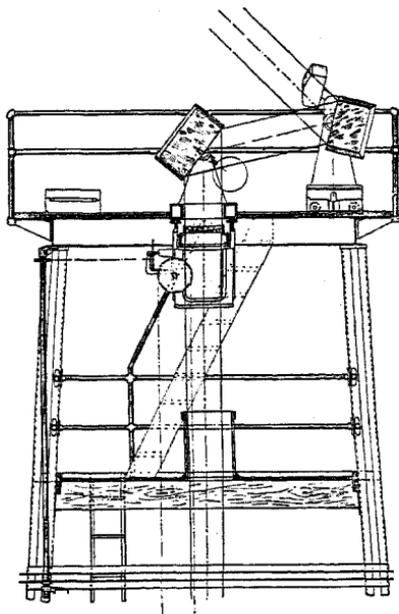


Abb. 97. Der obere Teil des Turmfernrohrs von HALE.

10. Das beidäugige Sehen.

Dienen die Augen zur Beurteilung der Entfernung, so sind zweierlei Hilfsmittel zu unterscheiden, die einen gehören der Erfahrung über die besondere Natur der Seheindrücke an und geben nur eine Vorstellung des Abstandes, die anderen geben eine wirkliche Wahrnehmung. Zu den ersten gehören die Kenntnis der Größe und Form (Änderung durch Über-

schneiden) der Gegenstände, die Verteilung des Schattens und die Trübung der vor ihnen liegenden Luft. Zu den letzten gehören das Gefühl der notwendigen Akkommodationsanstrengung, die Beobachtung bei bewegtem Auge und Körper und der gleichzeitige Gebrauch beider Augen. Die Akkommodation läßt nur Annäherung und Entfernung erkennen und dazu noch ungenau. Die beiden anderen Hilfsmittel beruhen beide auf der Vergleichung der perspektivischen Bilder, die von verschiedenen Standpunkten erhalten werden, das eine bietet sie nacheinander dar, das andere zugleich. Im einen Fall spielt die Überlegung eine mehr oder minder große Rolle, im anderen wird die Tiefengliederung unmittelbar erkannt und mit großer Genauigkeit beurteilt. Die Reizungen beider Augen erzeugen trotz ihrer Verschiedenheit einen einheitlichen Eindruck, indem die Verschiedenheit unmittelbar ohne Überlegung als Anzeichen von Tiefenunterschieden empfunden wird; es ist ja den meisten Menschen gar nicht bekannt, daß die beiden Netzhautbilder eines Gegenstandes verschieden sind. Werden von den Standorten der beiden Augen zwei photographische Aufnahmen eines Gegenstandes gemacht und den Augen so dargeboten, daß sie ihnen unter dem gleichen Winkel und in der gleichen Lage wie der Gegenstand erscheinen, so erhält man denselben räumlichen Eindruck, soweit er auf dem beidäugigen Sehen beruht, wie von dem Gegenstand selbst; es bestimmen also tatsächlich die perspektivischen Verschiedenheiten diesen besonderen Tiefeneindruck. Die Blicklinie ist beim beidäugigen Sehen die Winkelhalbierende der Blicklinien der einzelnen Augen; man beobachtet wie mit einem Auge mitten zwischen beiden und auch mit der ihm entsprechenden Augenstellung.

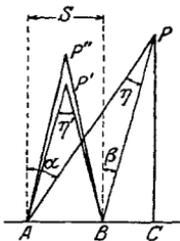


Abb. 98. Die Tiefenunterscheidung beim beidäugigen Sehen.

Den Abstand der beiden Aufnahmepunkte der Perspektive, hier der Augenpupillen A und B (Abb. 98), bezeichnet man als Stand- oder Grundlinie (Basis) b . Wir nehmen zunächst ruhende senkrecht zur Standlinie blickende Augen an und beschränken uns auf Punkte P des Sehfelds, deren seitlicher Abstand von den senkrechten Ebenen durch diese Blicklinien AS und BS klein gegen die Entfernung von den Augenpupillen ist. Dann ist die Entfernung $PC = E_p$ des Punktes P von der senkrecht zu den Blicklinien durch AB gelegten Ebene angenähert $= b : \operatorname{tg} \eta$, wo $\eta = \angle APB$ als beidäugige (binokulare) Parallaxe bezeichnet wird. Der

Unterschied $\Delta \eta$ der Parallaxe zweier Punkte in den Entfernungen E'_p und E_p mit dem Unterschied ΔE_p ist

$$\Delta \eta = b \left(\frac{1}{E'_p} - \frac{1}{E_p} \right) = \frac{b \Delta E_p}{E'_p E_p}.$$

Die Erfahrung zeigt nun, daß $\Delta \eta$ maßgebend für das Erkennen von Tiefenunterschieden ist, auch dann, wenn die Augen auf einen anderen

Punkt in endlicher Entfernung und kleinem Abstände von AS und BS gerichtet sind; daß ferner der eben erkennbare Grenzwert von $\Delta\eta$ bei Messungen von annähernd derselben Größe ist wie bei der Nonius-einstellung (S. 15). Bei einem Grenzwert von $\Delta\eta = 10''$ heben sich bei einem mittleren Augenabstände von 65 mm Gegenstände in etwa 1300 m Entfernung noch eben von der unendlich entfernten Ebene ab; an den Gegenständen selbst werden dort natürlich keine Tiefenunterschiede mehr erkannt. Wenn ΔE_p klein gegen E_p ist, wächst der kleinste erkennbare Entfernungsunterschied mit dem Quadrate der Entfernung; man bemerkt ferner, daß die Formel für $\Delta\eta$ mit der für die Tiefe der Abbildung (S. 12) verwandt ist. Sind die beiden Augenachsen zur Seite geschwenkt, so wird gleichsam die Standlinie verkürzt. Der Punkt P liege nun in größerem Abstände von AS und BS und seine Lage sei durch das Mittel E_m der Entfernungen $E_a = AP$ und $E_b = BP$ und die mittlere Blickrichtung $\alpha_m = (\alpha + \beta) : 2$ gegeben, dann ist

$$E_m = \frac{b(\cos\alpha + \cos\beta)}{2\sin\eta} = \frac{b\cos\alpha_m}{\operatorname{tg}\eta}$$

und

$$\frac{dE}{E} = -\frac{2d\eta}{\sin 2\eta}.$$

Mithin ist der geometrische Ort gleicher Genauigkeit für das Erkennen von Entfernungsunterschieden im Verhältnis zur Entfernung ein Kreis durch die Punkte A und B mit dem Durchmesser $bdE:Ed\eta$, wenn η klein ist. Wird der Entfernungsunterschied zwischen P und P' unter Wenden der Blickrichtung von P nach P' , also mit bewegten Augen, beobachtet, so dürfte auch hier der Unterschied von η und η' maßgebend sein. Da aber hierbei wohl das Erinnerungsbild von Empfindungen, die von η abhängen, mit den Empfindungen selbst von η' verglichen wird, ist es verständlich, daß mit größerem Winkelabstand von P und P' die Genauigkeit der Tiefenerkennung erheblich abnimmt; es ist mir nicht bekannt, in welchem Betrage; beim Sehen mit ruhendem Auge nimmt die Genauigkeit mit diesem Winkelabstande erst recht ab. Befinden sich P und P' auf einer Geraden, die durch die Mitte zwischen beiden Augen geht, so werden P und P' nicht als ein Bild, sondern als Doppelbilder gesehen, die beidäugige Tiefenvergleiche ist nicht möglich, wohl aber, wenn P und P' übereinander liegen. Da η beim Fixieren von P der Konvergenzwinkel der Blicklinien ist, könnte man annehmen, daß das Konvergenzgefühl die Erkennung der Tiefenunterschiede bestimmt; die Empfindlichkeit für verschiedene Konvergenz ist aber bedeutend geringer. Endlich sei noch hervorgehoben, daß die Beurteilung der Entfernung selbst durch das beidäugige Sehen im Gegensatz zu der der Tiefenunterschiede verhältnismäßig ungenau ist.

Wird das beidäugige Sehen durch optische Hilfsmittel unterstützt, so ist die Grundlage für den möglichen räumlichen Eindruck durch die Abbildskopien in den Einstellebenen der beiden Augen gegeben. Verbindet man nun den Bildpunkt eines und desselben Dingpunkts in jeder der beiden Kopien mit seinem Aufnahmepunkt, der Mitte der Austrittspupille, so schneiden sich bei geeignetem Bau des abbildenden Instruments die beiden Geraden in einem Punkte, den man als das Raumbild des Dingpunkts bezeichnet; die Gesamtheit dieser Raumbildpunkte bildet das Raumbild des Gegenstands. Dies Bild macht auf den Beobachter denselben räumlichen Eindruck wie ein Gegenstand derselben räumlichen Anordnung. Es ist also zunächst zu untersuchen, wie sich das Raumbild zu dem Gegenstand verhält, um dann auf den Eindruck einzugehen, den man erhält, wenn das Raumbild eine Anordnung zeigt, die von der gewöhnlichen Erfahrung abweicht. Wenn die Lage des Gegenstands zu den Eintrittspupillen gegeben ist, so ist das Raumbild vollständig bestimmt durch den Abstand der Eintrittspupillen, durch das Konvergenzverhältnis in ihnen, durch die Lage des Konvergenzpunktes

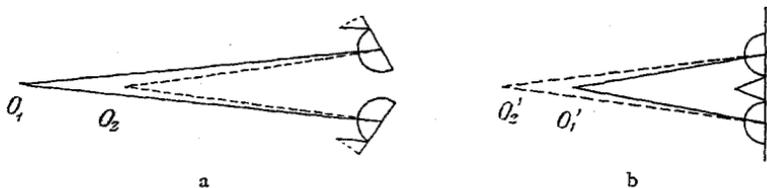


Abb. 99. Die Umkehrung der Tiefenfolge bei gekreuzter Stellung der scheinbaren Augenorte.

der beiden Augen sowie des ihnen entsprechenden Punktes im Dingraum und durch den Abstand der Austrittspupillen, für den der mittlere Augenabstand von 65 mm zugrunde gelegt werde; bei dem Konvergenzverhältnis ist nicht nur die Größe, sondern auch das Vorzeichen für den Bilddurchmesser parallel zur Verbindungslinie der Augen wichtig, der zugeordnete Durchmesser im Dingraum sei parallel der Verbindungslinie der Eintrittspupillen. Das Konvergenzverhältnis soll hier der Fernrohrvergrößerung gleichgesetzt werden, da die abweichenden Fälle nichts Besonderes bieten. Das vorerwähnte Vorzeichen bestimmt mit, wie der Gesichtsaufriß senkrecht zur Blicklinie $\hat{\wedge} | \hat{\wedge}$ bei umgekehrter Lichtrichtung in den Dingraum abgebildet wird. Ist jedes Auge mit einer besonderen optischen Vorrichtung ausgerüstet, die auch Teile gemeinsam haben können, so kann der Gesichtsaufriß im Dingraum folgende Gestalten annehmen: $\hat{\wedge} | \hat{\wedge}$ $\cup | \cup$ $| \hat{\wedge} | \cup$ $| \cup | \cup$; bildet dagegen ein einheitlich wirkendes Instrument ab, so kommen nur die ersten beiden Gestalten in Betracht. Was nun allein die Anordnung der Raumbildpunkte verglichen mit dem Gegenstand betrifft, also abgesehen von der Größe ihrer Abstände und von Verzerrungen, so kommen in den beiden ersten Fällen keine anderen Verhältnisse vor,

als sie sich auch bei der gewöhnlichen und bei der umgekehrten Lage des Kopfes gegenüber den Gegenständen ergeben. Anders ist es in den beiden letzten Fällen, wo die Stellung der scheinbaren Augenorte, der Eintrittspupillen, zum Gegenstand gegen die der Augen zum Bild gekreuzt ist. Wie Abb. 99 zeigt, erscheint hier die Tiefenfolge der Dingpunkte O_1, O_2 im Bild umgekehrt als O'_2, O'_1 . An die Stelle der tiefenrichtigen (orthoskopischen) Wahrnehmung tritt die tiefenverkehrte (pseudosko-

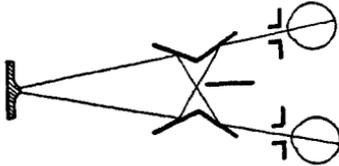


Abb. 100. Das Pseudoskop von EWALD.

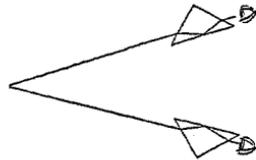


Abb. 101. Das Pseudoskop von WHEATSTONE.

pische); Vorsprünge erscheinen als Vertiefungen und umgekehrt, soweit dem nicht die Kenntnis der gewöhnlichen Form und die Schlagschatten in den Weg treten. Diese tiefenverkehrte Erscheinung tritt auch bei einäugiger Beobachtung gelegentlich auf, z. B. bei Beobachtung der Mondkrater, besonders aber bei manchen perspektivischen Zeichnungen; sie

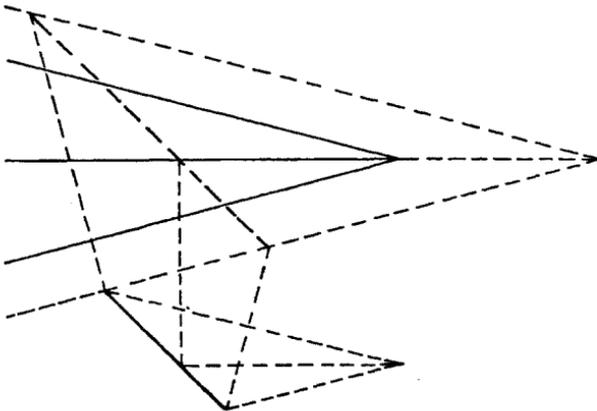


Abb. 102. Das Pinakoskop von M. VON ROHR.

wird dann als Trugbild (Inversion) bezeichnet. Die Tiefenverkehrung im beidäugigen Sehen kann entweder durch Verlagerung der Augenorte wie beim Pseudoskop von EWALD (Abb. 100) oder durch Seitenverkehrung der einzelnen Bilder wie beim Pseudoskop von WHEATSTONE (Abb. 101) erreicht werden. Fallen die scheinbaren Augenorte zusammen, so ist eine beidäugige Tiefenwahrnehmung nicht mehr möglich, die Gegenstände erscheinen flachgepreßt. Sieht man durch eine ähnliche Anordnung wie das Pinakoskop von M. VON ROHR (Abb. 102) ein Ge-

mälde an, so erscheint es wie mit einem Auge gesehen, für das es ja entworfen ist. Diese Betrachtungsart kommt auch vielfach vor, wenn durch Instrumente für einäugigen Gebrauch gelegentlich mit beiden Augen beobachtet werden soll. Es wird behauptet, daß hier der Tiefeneindruck lebhafter als beim Sehen mit einem einzelnen Auge sei; der Hauptvorteil ist aber die geringere Ermüdung der Augen.

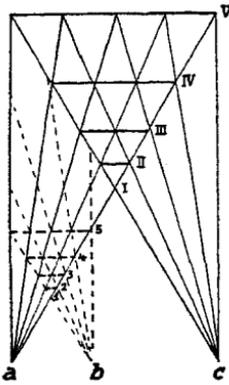


Abb. 103. Das Raumbild bei vergrößertem Abstand der Eintrittspupille.

Was nun den Einfluß des Abstandes der Eintrittspupillen auf die Raumwiedergabe betrifft, wenn zunächst das Konvergenzverhältnis gleich 1 gesetzt wird, so zeigt Abb. 103, daß bei einem Abstände gleich dem K -fachen des Augenabstandes das Raumbild einen in allen Richtungen K -fach verkleinerten Gegenstand darstellt. Man sollte so erwarten, in diesem Raumbild ein je nach dem Wert von K verkleinertes oder vergrößertes Modell des Gegenstands zu sehen; der Scheineindruck wird aber durch andere Umstände, als die unsichere Vorstellung über die absolute Entfernung, mitbestimmt. Wir gehen hierauf nicht weiter ein und heben nur hervor, daß das Erkennen von Tiefenunterschieden, man sagt auch wohl die Körperlichkeit, auf das K -fache gesteigert ist, da die Tiefenstrecke zwar K -mal verkleinert ist, aber in K -mal kleinerer Entfernung K^2 -mal kleinere Tiefenunterschiede erkannt werden. Man nennt daher die einfache Spiegelanordnung von HELMHOLTZ für diesen Zweck (Abb. 104) ein Telestereoskop. Den Einfluß der Fernrohrvergrößerung Γ auf die Raumwiedergabe, wenn $K=1$ ist, zeigt Abb. 105. In dem Schnitt durch das Raumbild erscheint der Abstand eines Dingpunkts von der

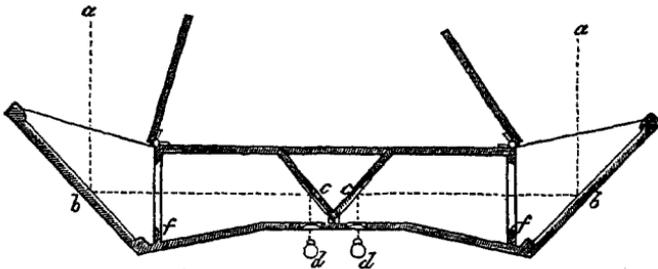


Abb. 104. Das Telestereoskop von HELMHOLTZ.

Verbindungsline der Eintrittspupillen als Γ -mal kleinerer Abstand des zugehörigen Raumbildes von der Verbindungsline der Augen; die Breiten- und Höhererstreckung ist im Raumbild unverändert, sie erscheint nur im Winkelmaß vergrößert, die Tiefenerstreckung ist dagegen verkleinert wiedergegeben. Man erhält ein raumverzerrtes (heteromorphes) Bild

statt des raumrichtigen (orthomorphen). Die Tiefenunterscheidung ist ähnlich wie beim Telestereoskop auf das Γ fache gesteigert. Vergleicht man aber den räumlichen Eindruck mit dem beim Sehen mit freien Augen, so erscheinen die Gegenstände durch das vergrößernde Doppelfernrohr kulissenartig in der Sehrichtung zusammengedrängt; beide Beobachtungen widersprechen sich nicht und sind die notwendige Folge der Fernrohrvergrößerung. Ein Doppelfernrohr mit vergrößertem Abstand der Eintrittspupillen liefert ein in der Quere K mal und in der Tiefe $K\Gamma$ mal verkleinertes Raumbild; die Tiefenunterscheidung ist auf das $K\Gamma$ fache gesteigert; man sagt auch: die totale Plastik beträgt $K\Gamma$ und unterscheidet sie von der spezifischen Plastik K .

Um bei dem üblichen Prismenfeldstecher die Wirkung des vergrößerten

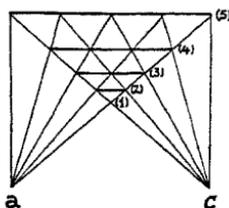


Abb. 105. Das Raumbild bei Fernrohrvergrößerung.

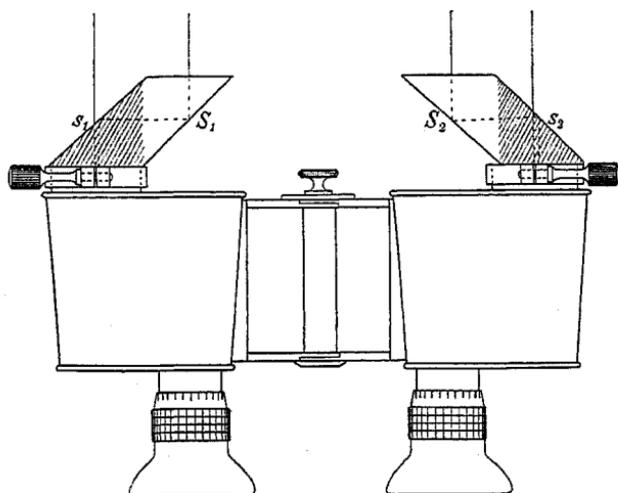


Abb. 106. PULFRICH'S Einrichtung zum Prüfen der Wirkung des vergrößerten Objektivabstandes.

Objektivabstandes zu zeigen, werden nach PULFRICH dem Beobachter gleichzeitig zwei Raumbilder dargeboten, von denen das eine mit, das andere ohne erweiterten Abstand der Eintrittspupillen erhalten ist. Zu dem Zweck schaltet er

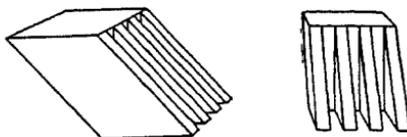


Abb. 107. Ein Zinkenprisma.

nach Abb. 106 vor jedes Objektiv des Feldstechers ein rhombisches Zinkenprisma nach Abb. 107, das die eine Hälfte der Strahlen unmittelbar zwischen den Zinken durch, die andere nach Durchgang durch das Prisma eintreten läßt.

II. Die Doppelfernrohre.

Bei der Wiedergabe des Raumeindrucks hat ein Doppelfernrohr folgende Bedingungen, abgesehen von der guten optischen Abbildung, zu erfüllen. Erstens sollen die optischen Achsen der Einzelfernrohre parallel sein, damit weit entfernte Gegenstände wieder mit parallelen Augenachsen gesehen werden. Sind sie um δ gegeneinander geneigt, so werden zwei Strahlen, die parallel in die Fernrohre eintreten, nach dem Austritt um $(\Gamma - 1)\delta$ in derselben Ebene wie die Fernrohrachsen gegeneinander geneigt sein. Als Gebrauchsgrenze sieht man gewöhnlich an, wenn die Strahlen in der Höhe um $0,5^\circ$ gegeneinander geneigt austreten, in der Seite im Sinne von divergenten Augenachsen um 1° , im Sinne der konvergenten Achsen um 3° , was einer Konvergenz der Augen auf einen Punkt in etwa 1,2 m Entfernung entspricht. Beim Höhenfehler entsteht überhaupt kein Raumbildpunkt; die Strahlen laufen in kleinem Abstände aneinander vorbei; das Auge faßt aber die Mitte ihres Abstands an der Kreuzungsstelle, solange der Abstand klein ist, als den Raumbildpunkt auf. Zweitens sollen die Vergrößerungen Γ gleich sein; bei nahen Gegenständen dürfen also auch die Eintrittspupillen nicht zu verschiedene Abstände von ihnen haben. Sonst werden nur die Strahlen, die parallel zu den Fernrohrachsen einfallen, parallel austreten, während die anderen proportional der Vergrößerungsabweichung und ihrem Winkelabstand von der Achse einen Winkelunterschied für die beiden Fernrohre in der Ebene des Winkelabstands zeigen. Drittens dürfen keine Unterschiede in der Verdrehung der Bilder um die Austrittsachsen vorhanden sein, sonst entstehen an den seitlichen Bildrändern Höhenfehler und am oberen bzw. unteren Rand Seitenfehler. Um die optischen Achsen parallel zu richten, benutzt man vorzugsweise die Verschiebung der Objektive und Prismen, und zwar bei dem Objektiv durch Drehen von zwei es umgebenden exzentrischen Ringen (Doppelexzenter).

Für die Anpassung an den Augenabstand muß der Abstand der beiden Austrittspupillen geändert werden, indem die ganzen Einzelfernrohre oder Teile von ihnen parallel verschoben oder gedreht werden, wobei für die Erhaltung der Scharfstellung des Bildes zu sorgen ist. Die Verschiebung der ganzen Fernrohre hat wenig Anwendung gefunden. Verlaufen an einer Stelle die Strahlen des Achsenbüschels parallel und in der Richtung der Okularachse oder senkrecht zu ihr, so genügt es, die optischen Teile des einen Fernrohrs hinter dieser Stelle in der Ebene durch die Okularachse zu verschieben; bei Querfernrohren (Abb. 120) verschiebt man so das eine Fernrohr ohne das Eintrittsprisma in dem Querrohr. Ist die optische Achse vor dem Eintritt in das Okular durch ein Prismensystem um 90° abgelenkt, sei es in der Ebene durch die Okularachsen oder senkrecht zu ihr, so kann man mit der Verschiebung des einen Okulars die eines Prismas kuppeln, z. B. die halb so große gleichgerichtete Verschiebung eines Prismas, das einen 90° Winkelspiegel verkörpert, dessen Halbierungsebene senkrecht zur Verschiebung ist, etwa des Prismas Abb. 51. Verschiebt man bei Ablenkung der Achse in der Ebene durch die Okularachsen das ablenkende System gemeinsam mit dem Okular, so ändert sich die Scharfstellung; um sie zu erhalten, müssen dafür geeignete Einrichtungen (S. 60) mit der Okularverschiebung gekuppelt werden. In manchen Fällen ist symmetrische Verschiebung der Teile beider Fern-

rohre zweckmäßig oder nötig. Die Anpassung durch Drehung ist für die Herstellung meist vorzuziehen. Das gebräuchlichste Mittel, das Gelenk, dessen Achsen parallel den optischen Achsen sind, geht bis in die Zeit der Erfindung des Fernrohrs auf CHÉRUBIN D'ORLÉANS 1671 (Abb. 108) zurück. Die Verwendung des doppelten oder dreifachen Gelenks kommt heute nur für besondere Zwecke in Betracht, wie das Beispiel Abb. 114 zeigt. Was die Verdrehung von Teilen der Fernrohre betrifft, so können die optischen Achsen durch entgegengesetzt gleiche Drehung von gerad- oder rücksichtigen Prismensystemen, die je die Achsen gleich viel versetzen, in der Ebene der Augenachsen verschoben werden; bei ihrer Drehung müssen die Bilder gegeneinander unverdreht bleiben; neben Umkehrprismen von solcher Beschaffenheit ist das System mit zwei parallelen Spiegeln, das am einfachsten durch ein rhombisches Prisma verkörpert wird, und der Zentralspiegel S. 109 zu erwähnen; Beispiele für diese Anpassung zeigen die Abb. 64 und 219. Alle bisher beschriebenen Anordnungen haben den Vorzug, daß die Fernrohrachsen parallel bleiben; die Anpassung ist aber auch dadurch möglich, daß die Lichtaustrittsachsen gegeneinander geneigt werden; dies hat um so weniger Bedenken, je geringer der Neigungswechsel ist, durch den die Änderung des Abstands der Austrittspupillen erreicht wird. Vorzugsweise benutzt man die Verschiebung der Okulare allein gegeneinander in der Ebene ihrer Achsen. Bei vollkommener Abbildung ist im letzten Fall die Wirkung die gleiche wie bei einer Verschiebung der den Augen dargebotenen Bilder oder einer Änderung der Tangenten der in die Verschiebungsebene fallenden Komponenten der Hauptstrahlneigungswinkel um durchweg den gleichen Betrag. Bei symmetrischer Verschiebung der Okulare wird für alle Raumbildpunkte einer achsensenkrechten Ebene nach Abb. 8, wenn man MP_h und NP_h als die unverschwenkten Austrittsachsen und MP_v und NP_v als die verschwenkten ansieht, der Kehrwert des Abstands des Raumbildpunkts von der Frontalebene durch die Augen unabhängig von seinem Wert um das gleiche Stück geändert, die achsensenkrechte Ebene als solche in größerer Nähe wiedergegeben; das Raumbild wird so nach denselben Gesetzen entworfen, wie sie in der Bildhauerei für die Reliefdarstellung maßgebend sind.

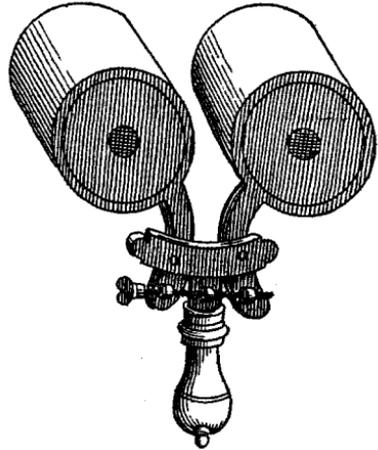


Abb. 108. Ein Doppelfernrohr nach CHÉRUBIN D'ORLÉANS.

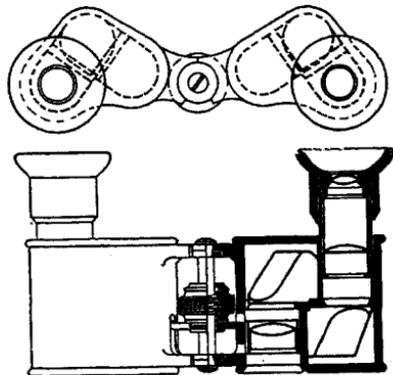


Abb. 109. Ein Theaterprismenglas.

Als marktgängige Ware ist das Doppelfernrohr erst etwa 100 Jahre alt. Das holländische Doppelfernrohr mit schwacher Vergrößerung, dessen hohe Lichtstärke und geringe Herstellungskosten auch heute noch seine ausgedehnte Verwendung als Theaterglas sichern, erhielt damals die Form mit festem Achsenabstand und gemeinsamer Okulareinstellung durch

Mitteltrieb, die bis heute im wesentlichen unverändert geblieben ist (Abb. 36). Das Erdfernrohr wird als Doppelfernrohr etwas unhandlich und ist als solches wenig beliebt, besonders seit vor etwa 30 Jahren durch ABBES Verdienst bei fortgeschrittener Technik das Prismendoppelfernrohr geschaffen war und dies nun seinen Siegeszug begann. Abb. 59 zeigt den Aufbau als Handfernrohr unter Verwendung des ersten PORROschen Umkehrsatzes. Die Vergrößerung des Objektivabstands gegenüber dem Okularabstand

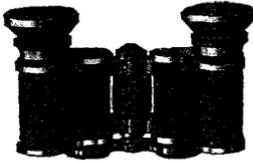


Abb. 110. Ein 6mal vergrößernder Feldstecher mit einer Austrittspupille von 2,5 mm und $8,3^\circ$ Gesichtsfeld.

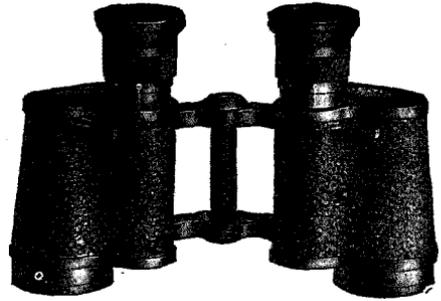


Abb. 111. Ein 6mal vergrößernder Feldstecher mit einer Austrittspupille von 5 mm und $8,3^\circ$ Gesichtsfeld.

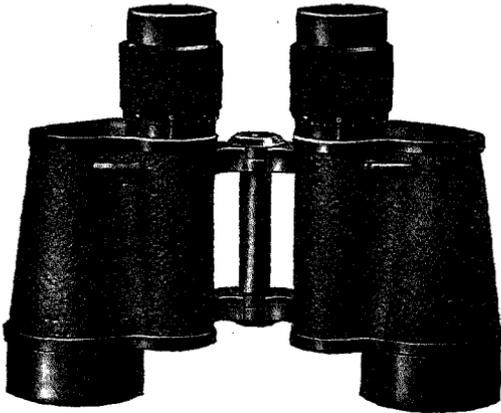


Abb. 112. Ein 8mal vergrößernder Feldstecher mit einer Austrittspupille von 5 mm und $8,75^\circ$ Gesichtsfeld.

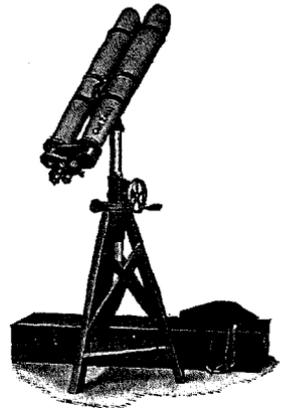


Abb. 113. Ein größeres Aussichtsfernrohr. Objektivdurchmesser 130 mm.

gibt dem Feldstecher nicht nur die gefällige und handliche Form, sondern steigert zugleich die spezifische Plastik auf nahe das Doppelte; die Formen, bei denen diese nahe $= 1$ ist, haben sich weniger eingebürgert. Für das Theater ist wegen des gedrängten Aufbaus besonders die Form (Abb. 109) mit verkleinertem Objektivabstand beliebt, wo zur Scharfstellung die Objektive gemeinsam mit dem Mitteltrieb heraus und hinein bewegt werden. Der Mitteltrieb ist auch sonst bei Prismengläsern zur gemeinsamen Scharfstellung beider Okulare verbreitet, meist

ist noch das eine Okular für sich einstellbar, um eine Verschiedenheit der Augen ausgleichen zu können. Der Mitteltrieb erleichtert die Einstellung auf wechselnde kurze Entfernungen wie im Theater und bei Rennen. Wo dies nicht in Betracht kommt, ist die Einzeleinstellung beider Okulare vorzuziehen, da diese einfachere Bauart eine bessere Gewähr für dauernd gute Justierung des Feldstechers sowie für staub- und wasserdichten Abschluß des Inneren bietet. Die Größe der Prismendoppelfernrohre ist hauptsächlich durch den Objektivdurchmesser bestimmt. Zur Veranschaulichung sind drei Fernrohre für Handgebrauch nebeneinander abgebildet. Das erste (Abb. 110) hat bei $6\times$ Vergrößerung nur 15 mm Öffnung, also 2,5 mm Austrittspupille, seine Helligkeit reicht daher nur für Tagesgebrauch. Das zweite (Abb. 111) hat bei der gleichen Vergrößerung 30 mm Öffnung, also die vierfache Lichtstärke; die Überlegenheit in dieser Hinsicht tritt aber nur bei schwachem Licht in der Dämmerung und bei Nacht hervor. Das dritte (Abb. 112) hat bei $8\times$ Vergrößerung 40 mm Öffnung, also die gleiche Lichtstärke wie das zweite. Während die ersten beiden Fernrohre aber nur 50° bildseitiges Gesichtsfeld besitzen, beträgt dies



Abb. 114. Ein Doppelfernrohr nach GULLSTRAND.

beim dritten 70° , so daß es trotz stärkerer Vergrößerung noch ein etwas größeres dingseitiges Gesichtsfeld hat als die beiden ersten. Die Gewichte sind 215, 630 und 1030 g; die Verringerung von Gewicht und Größe beim ersten Fernrohr ist zum Teil dem kleineren Objektivabstand zuzuschreiben. Für Doppelfernrohre mit größeren Objektiven finden auch die Umkehrprismen nach Abb. 52 Verwendung; ein solches mit dem zweiten PORRÖSCHEN Prismensatz zeigt Abb. 64, bei dem die Anpassung an den Augenabstand erreicht wird, indem die Prismenköpfe durch Kreuzband entgegengesetzt gleich gedreht werden. Ein großes Aussichts-doppelfernrohr mit Objektiven von 130 mm Öffnung zeigt Abb. 113. Bei kleineren Fernrohren herrscht das einfache Gelenk vor. Ein Handfernrohr nach GULLSTRAND mit dreifachem Gelenk und LEMANSCHEN Prismen zeigt Abb. 114; der Objektivabstand ist auch hier nahe verdoppelt. Stärker ist er bei dem Scheren-(Relief-)Fernrohr gesteigert (Abb. 115); die vielfach erhöhte spezifische Plastik bei gestreckter Lage der Arme und die Möglichkeit der Beobachtung besonders mit hochgestellten Armen begründen seinen Wert als militärisches Beobachtungsgerät. Abb. 116 zeigt ein solches Handfernrohr, Abb. 117 ein Standfernrohr. Beim Hand-

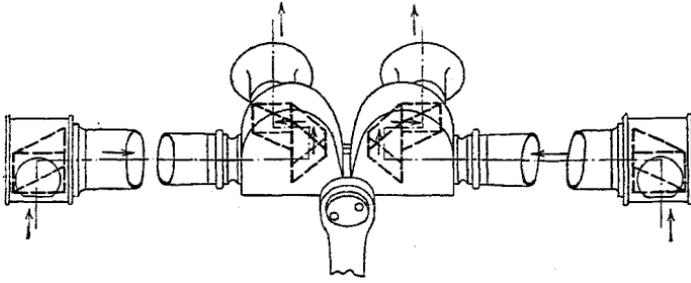


Abb. 115. Der Aufbau des Scherenfernrohrs von ABBÉ.

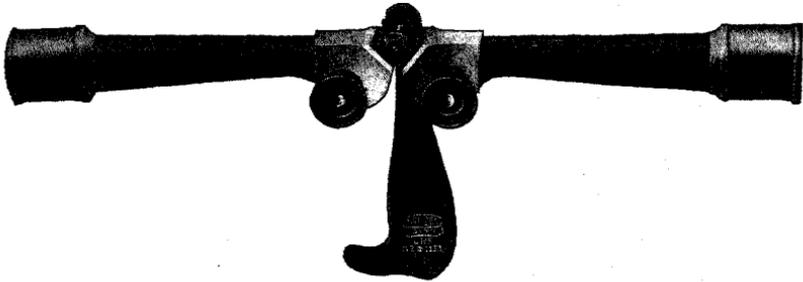


Abb. 116. Ein Handscherenfernrohr.

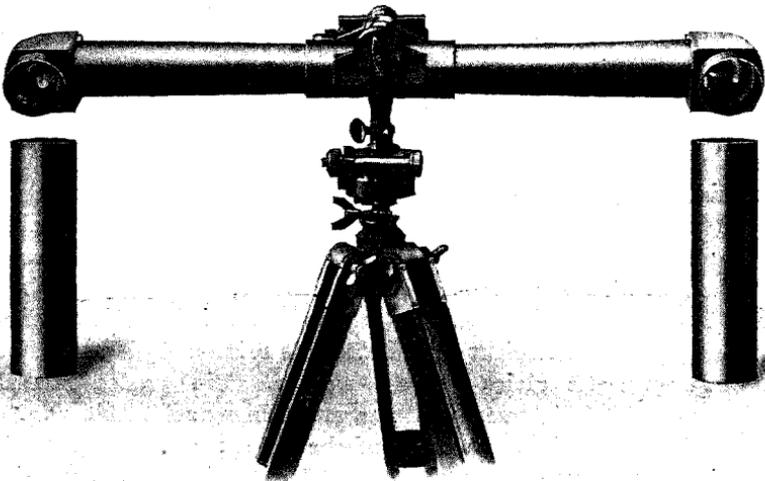


Abb. 117. Ein Standscherenfernrohr.

fernrohr nach Abb. 118 und beim Standfernrohr nach Abb. 119 ist auf die gestreckte Lage verzichtet und das Gelenk nach oben verlegt. Dadurch kann beim zweiten Fernrohr trotz der großen Höhenversetzung der

Achsen um 500 mm und dem großen Objektivdurchmesser von 60 mm ein leichtes und doch widerstandsfähiges Beobachtungsgerät geschaffen werden; der Okularabstand läßt sich hier so weit vergrößern, daß zwei Personen gleichzeitig einäugig beobachten können. Bei der Stand-schere nach Abb. 120 ist hinter dem einen Okular noch eine photo-graphische Kammer angebracht; das so aufgenommene Bild ist im Ver-hältnis der Fernrohrvergrößerung größer, als wenn es mit der Kammer

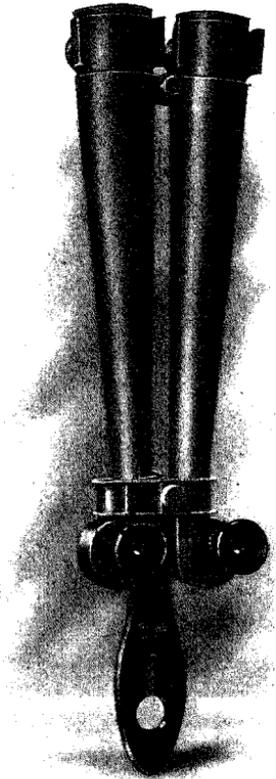


Abb. 118. Ein Grabenhandscherenfernrohr.
(Gelenk oben.)



Abb. 119. Ein Grabenstandscherenfernrohr. (Gelenk oben.)

allein aufgenommen wäre, in dem dargestellten ist die Objektivbrennweite von 20 cm so auf 2 m vergrößert, das Öffnungsverhältnis ist dabei 1:40; die größte Schärfe erhält man mit Gelbglas bei 1:70 Öffnung. Wo es nur auf erhöhte Plastik ankommt, verwendet man ein Querfernrohr, wie es Abb. 121 zeigt, das sogenannte Stangenfernrohr. Abb. 122 zeigt ein solches von 2 m Objektivabstand; ein Ringokularwechsler läßt zwischen 10 und 20 \times Vergrößerung wählen.

Bei dem GULLSTRANDSchen Fernrohr kann man bei gleichem Okularabstand den Objektivabstand ändern und so bequem die Wirkung einer



Abb. 120. Ein Scherenfernrohr mit Lichtbildkammer.

Änderung der spezifischen Plastik beobachten. In größeren Verhältnissen zeigt sich dies bei dem älteren, Hyoskop (Abb. 123a u. 123b) genannten Standfernrohr für militärische Beobachtung. Die Achsen der einzelnen Periskope sind in der Mitte zweimal um 90° abgelenkt; um diesen mittleren Teil der Achse ist bei beiden Okular- und Objektivteil drehbar. Die Drehung der Okulararme dient zur Anpassung an den Augenabstand und ermöglicht ferner zwei Personen, gleichzeitig zu beobachten; die Objektivarme werden aus der Verpackungsstellung mit abwärts gerichteten Armen zunächst in die mit gestreckten Armen gekurbelt, wo dem Abstand der Objektivprismen von 3,3 m

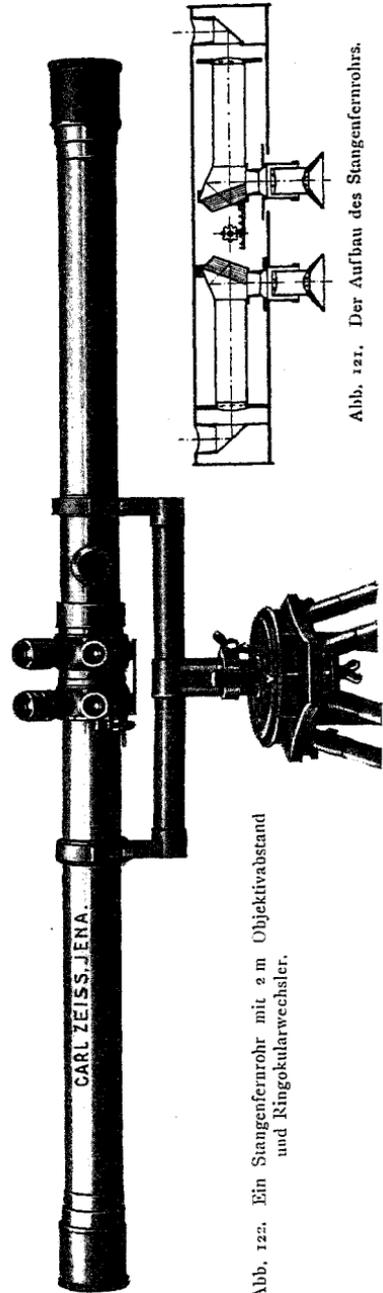


Abb. 122. Ein Stangenfernrohr mit 2 m Objektivabstand und Ringokularwechsler.

Abb. 121. Der Aufbau des Stangenfernrohrs.

und der 15fachen Vergrößerung entsprechend die Tiefenunterscheidung auf das 750fache gesteigert ist; der Ausblick ist hier um 1,6 m erhöht; indem man die Arme weiter nach oben dreht, wird er im ganzen um 3 m erhöht, wobei allerdings die Tiefenunterscheidung

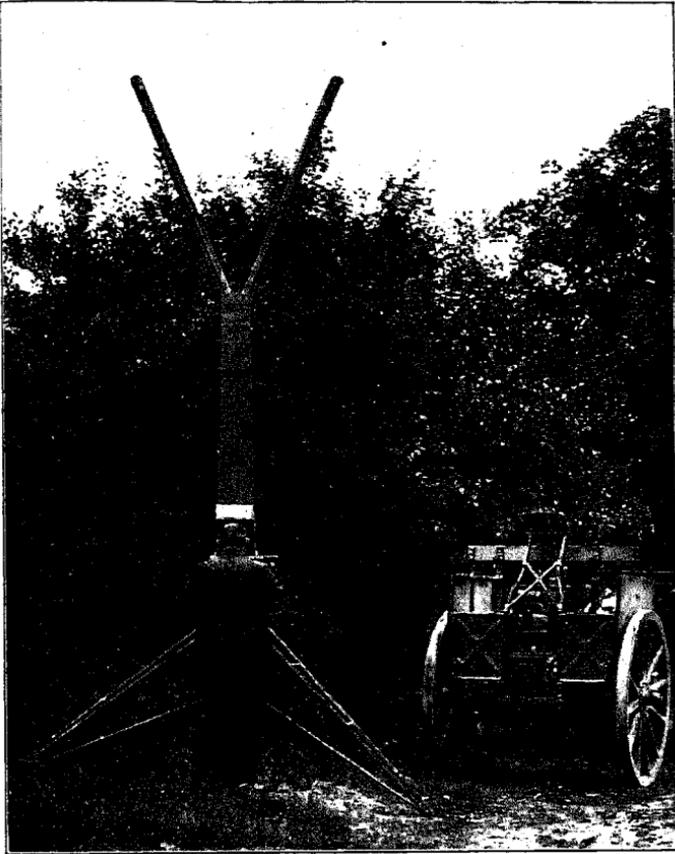


Abb. 123 a. Das Hyposkop in Beobachtungsstellung.

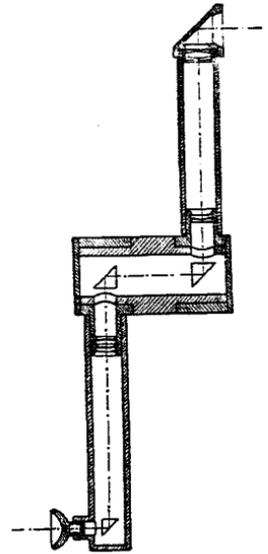


Abb. 123 b. Der Aufbau des Hyposkops.

mit dem Abstand der Objektivprismen abnimmt. Durch Aufstellung auf dem Beobachtungswagen wird die Ausblickhöhe auf etwa 6 m gebracht. Hinter dem Objektivprisma des einen Rohrs kann vorübergehend vom Okularende aus ein teleskopisches System eingeschaltet werden, durch das man bei 3facher Vergrößerung ein Übersichtsbild erhält. Die Doppelfernrohre mit gemeinsamen optischen Teilen werden im folgenden Abschnitt behandelt.

12. Die Doppelblickfernrohre.

Zwei Fernrohre können noch in anderer Weise und zu anderen Zwecken als beim Doppelfernrohr zu einem Ganzen vereinigt sein, wobei auch einzelne optische Teile gemeinsam sein können; da die Vereinigung von mehr als zwei Fernrohren nichts grundsätzlich Neues bietet, so wird darauf nur gelegentlich eingegangen werden. Es ist zunächst zwischen gemeinsamem Ein- und Ausblick zu unterscheiden. Im ersten Fall kreuzen sich die optischen Achsen der beiden Fernrohre im Augendrehpunkt. Es werden so zwei Gesichtsfelder zugleich übersehen; grenzen diese aneinander, so kann dadurch das Gesichtsfeld in der Höhe oder Breite auf das Doppelte gesteigert werden (Abb. 124); das zweite Fernrohr kann auch bei schwächerer Vergrößerung ein Übersichtsfeld bieten, bei dem dasselbe Ziel in der Mitte des Gesichtsfelds erscheint, oder es kann etwa zu Ablesungszwecken dienen. Im zweiten Fall sollen etwa verschiedene Beobachter dasselbe Bild beobachten, wie bei dem Fernrohr Abb. 125. Drittens können sowohl Einblick wie Ausblick doppelt sein, z. B. bei den gekreuzten Fernrohren S. 153. Sollen optische Teile gemeinsam

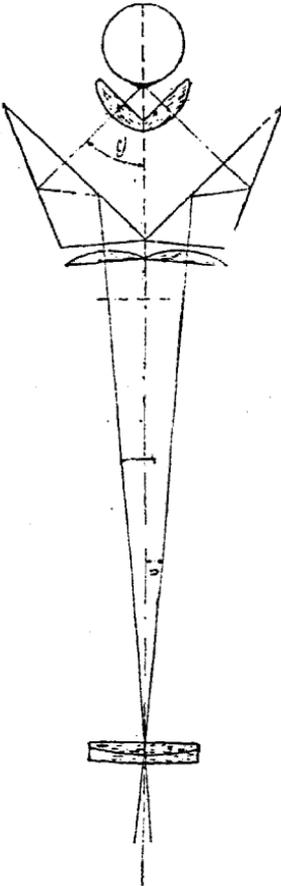


Abb. 124. Ein Fernrohr mit zwei Okularen für gemeinsamen Augenort.

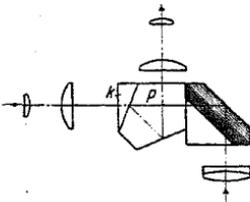


Abb. 125. Ein Fernrohr mit doppeltem Einblick.

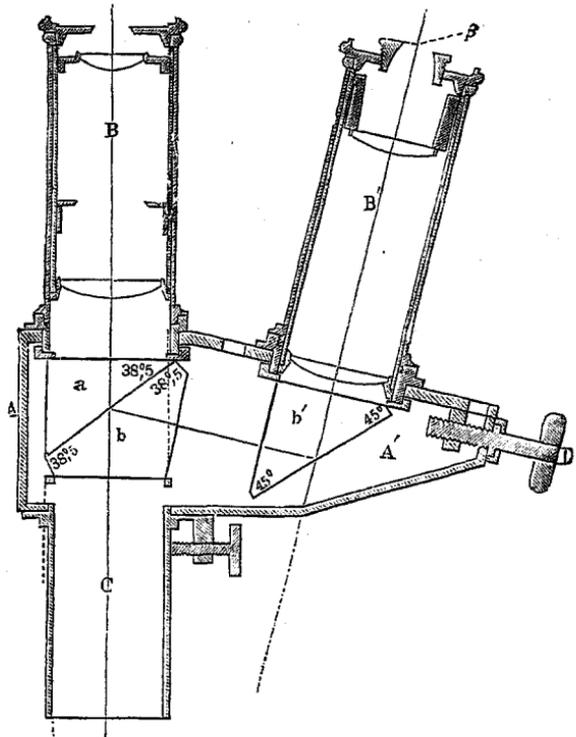


Abb. 126. Das Okular für beidäugigen Gebrauch nach ABBE. Mit der Schraube *D* wird das Okular *B'* zur Anpassung an den Augenabstand verschoben.

sein, so müssen an bestimmten Stellen die optischen Achsen zusammen- oder auseinandergeführt werden. Man unterscheidet nun zwischen der geometrischen Teilung der Strahlen, wo die Öffnung oder Gesichtsfeldblende zwischen den Fernrohren so aufgeteilt wird, daß die durch den einen Teil der Blende tretenden Strahlen zu dem einen, die anderen zu dem anderen Fernrohr gehören, und der physikalischen Teilung, wo in jedem Strahl auf der einen Seite eines halbdurchlässigen Spiegels oder eines doppeltbrechenden Prismas zwei Strahlen auf der anderen Seite, beim Spiegel ein durchgehender und ein zurückgeworfener, enthalten sind. Bei der physikalischen Teilung kann die Verzweigung der Achsen an beliebiger Stelle erfolgen. Für diesen Fall bei gemeinsamem Einblick bietet das Doppelbildmikrometer (Abb. 172) ein Beispiel, bei gemeinsamem Ausblick das Okular für beidäugigen Gebrauch nach ABBE (Abb. 126), bei dem die durch eine sehr dünne Luftschicht getrennten Flächen der Prismen *a*, *b* den halbdurchlässigen Spiegel darstellen, und das Okular für beidäugigen Gebrauch (Abb. 127) mit Umkehrprismen und Anpassung an den Augenabstand wie in Abb. 64, bei dem die erste Spiegelfläche des vorderen Umkehrprismas durch schwaches Versilbern und Ankiten eines Ergänzungsprismas halbdurchlässig gemacht ist, ferner das Fernrohr nach Abb. 125 für zwei Beobachter, bei dem die von der Objektivachse durchsetzte Spiegelfläche des Pentaprismas ρ halbdurchlässig ist. Die geteilte Öffnungsblende bei der geometrischen Teilung kann im Objektiv oder Umkehrsystem liegen. Beispiele bieten das Heliometer (Abb. 166), das Erdfernrohr-Okular für beidäugigen Gebrauch nach Abb. 128 und der Kümmertiefenmesser (Abb. 251). Ein Beispiel für geteiltes Gesichtsfeld bietet ein Fernrohr mit einem Objektiv und zwei Okularen, deren Achsen sich im Augendrehpunkt kreuzen (Abb. 124), ferner ein Teil der Einstandentfernungsmesser für einäugigen Gebrauch. Das geteilte Gesichtsfeld kann beim Erdfernrohr in der ersten oder zweiten Bildebene liegen. An Stelle der Teilung kann auch der Wechsel der Strahlen für das eine und das andere Fernrohr benutzt werden wie beim Doppelblickzielfernrohr (Abb. 155), und zwar für wechselnden Einblick wie Ausblick. Erfolgt der Wechsel genügend rasch, so ist gleichzeitige Beobachtung mit beiden Fernrohren möglich. Für ein Fernrohr, das bei verschiedenem Einblick und Ausblick nur ein Umkehrsystem besitzt, ist das Multi-periskop, S. 65, ein Beispiel. Hat ein Doppelfernrohr, wie es bei Sehrohren vorkommt, das Linsenumkehrsystem gemeinsam, so findet eine Überkreuzung der Achsen statt, einen tiefenrichtigen Eindruck erhält man nur bei Rückblick, bei nochmaliger Überkreuzung oder bei seitenverkehrten Bildern. Das gemeinsame Umkehrsystem ist besonders vorteilhaft, wenn man das Rundblickfernrohr als Doppelfernrohr ausbilden will; das Wendepisma muß dann in der Nähe des Umkehrsystems angeordnet werden.

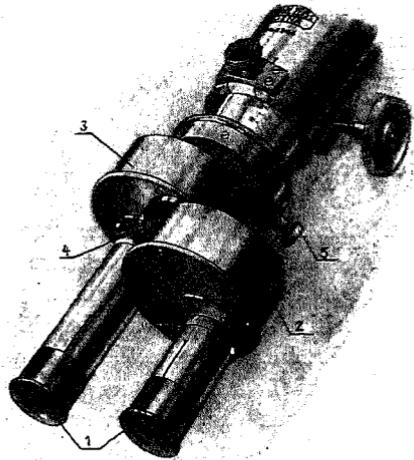


Abb. 127. Ein Okular für beidäugigen Gebrauch mit Umkehrprisma.

Abb. 128. Ein Erdfernrohr-Okular für beidäugigen Gebrauch.

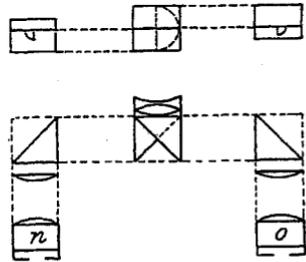


Abb. 128. Ein Erdfernrohr-Okular für beidäugigen Gebrauch.

13. Die Prüfung der Fernrohre.

Die Prüfung der Fernrohre für einäugigen Gebrauch erstreckt sich hauptsächlich auf die optische Leistung nach Vergrößerung, Gesichtsfeld und Helligkeit und auf die Bildgüte; bei den Doppelfernrohren ist außerdem zu prüfen, ob beim Durchsehen nach einem Fernziel die Bilder den parallel gerichteten Augen in gleicher Lage und Vergrößerung geboten werden. Für die Prüfung auf Bildgüte sollen nur die Verfahren erörtert werden, die für den Benutzer des Fernrohrs in Betracht kommen. Für Erdfernrohre genügt die Musterung des Bildes einer entfernten Probeplatte mit regelmäßigen scharf begrenzten Figuren und Gittern, am besten wird eine Blechplatte mit Ausschnitten gegen den Himmel als Hintergrund gestellt. Den Astigmatismus erkennt man daran, daß zueinander senkrechte Linien nicht gleichzeitig scharf eingestellt werden, die Koma an einseitiger Ausstrahlung der Figuren trotz zentraler Augenhaltung. Für die Prüfung der sphärischen Abweichung benutzt man einen dunklen Streifen auf hellem Grunde, der mit voller Öffnung scharf eingestellt wird; wird nun das Objektiv auf die Hälfte quer zum Streifen einseitig abgeblendet, so wird die eine oder andere Kante unscharf, je nachdem sphärische Über- oder Unterverbesserung vorliegt. Ebenso prüfte schon NEWTON auf Farbenverbesserung. Man kann auch die Austrittspupille durch seitliche Bewegung des Auges einseitig abblenden. Schon kleinere Objektive zeigen dabei deutlich das sekundäre Spektrum. Als Kennzeichen der richtigen Verbesserung bei mäßiger Abweichung gelten die Mischfarben Apfelgrün und Rosa; Unter- bzw. Überverbesserung gibt sich im Umschlagen der letzten Farbe in Kirschrot bzw. Gelb kund.

Der Astronom beurteilt sein Fernrohr nach der Güte der Sternbilder in ruhigen Nächten. Auch die Auflösung von geeigneten Doppelsternen ist ein beliebtes Maß der Leistung, obwohl sie nach DAWES durch Mängel der Strahlenvereinigung weniger herabgesetzt wird, als man annehmen sollte. FOUCAULT lehrte, wie man aus dem Beugungsbild bei Heraus- und Hereinschieben des Okulars auf die Art der Strahlenvereinigung schließen kann. Um die Beugungsringe zu sehen, muß man mit Übervergrößerung arbeiten. Abb. 129 zeigt die Sternbilder in der Achse von guten und fehlerhaften Objektiven. Teilb. VIII und III a' zeigen das Sternbild eines guten Objektivs im Brennpunkt; Teilb. III a , XIII, XIV nach Okularverstellung; Teilb. VI l., VII l. bzw. VI r., VII r., bei sphärischer Unterverbesserung verschiedener Größe innerhalb bzw. außerhalb des Brennpunkts oder bei Überverbesserung außerhalb bzw. innerhalb des Brennpunkts. Zonenfehler (Teilb. X bis XII) äußern sich ebenfalls durch Lichtanhäufung in einzelnen Ringen, die rechten Bilder zeigen sie außerhalb des Brennpunkts. Teilb. I und II zeigen Koma in verschiedener Stärke, Teilb. III d , d' , d'' , IV, V Astigmatismus; diese Fehler können in der Achse infolge Dejustierung des Objektivs auftreten. Teilb. IX zeigt

den Einfluß der dreipunktigen Auflage des Objektivs, Teilb. III *b*, *b'*, *c*, XV, XV *a* von Verspannung, Teilb. XV *b* von Schlieren (Streifen abweichender Brechung). Ein zweites Verfahren von FOUCAULT, dessen rohe Grund-

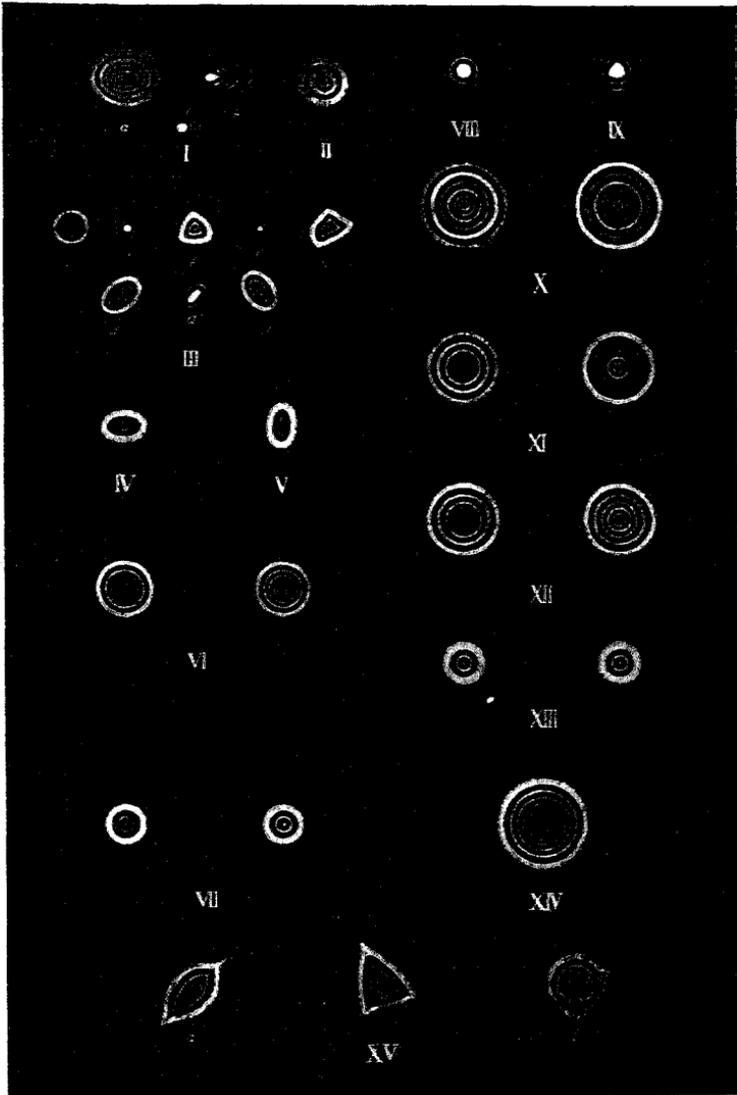


Abb. 129. Sternbilder in und außer der Brennebene von guten und fehlerhaften Objektiven.

form auf HUYGENS (1703) zurückgeht, besteht darin, eine Messerschneide von der Seite in das Strahlenbüschel zu schieben, das die von dem Lichtpunkt ausgehenden Strahlen nach dem Durchgang durch das Objektiv bilden.

Wird die Schneide in der Bildebene verschoben, und werden die Strahlen streng in einen Punkt vereinigt, so wird für ein Auge hinter der Schneide das Objektiv plötzlich über die ganze Fläche verdunkelt, wenn die Schneide den Bildpunkt trifft. Ist aber z. B. sphärische Abweichung

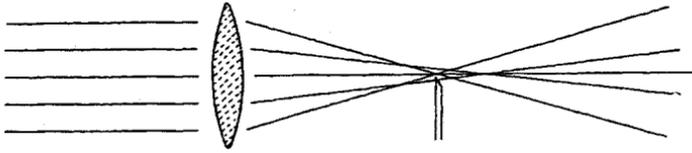


Abb. 130. Die Schneidenprobe nach FOUCAULT.

vorhanden, so werden nach Abb. 130 die einzelnen Zonen der Öffnung bei der Verschiebung nacheinander verdunkelt; Abb. 131 zeigt einen solchen Anblick des Objektivs; man erkennt deutlich die feinen Polierzonen. Die Farbenverbesserung beurteilt man nach den Mischfarben, die

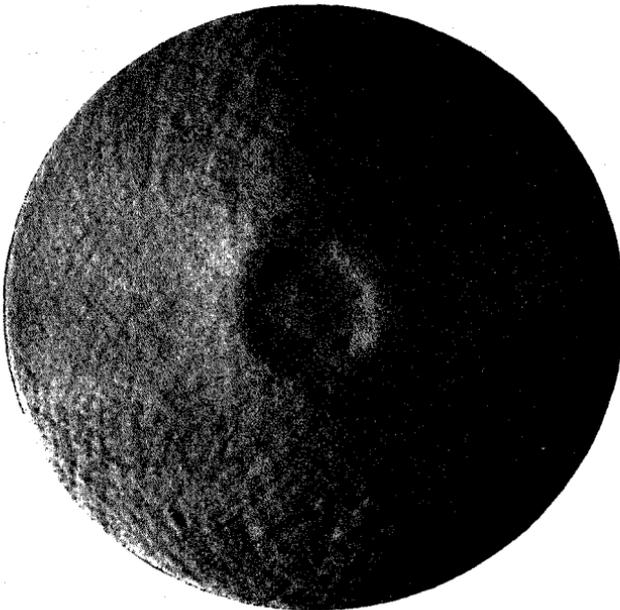


Abb. 131. Der Anblick eines Objektivs bei der FOUCAULTSchen Probe.

beim Einstellen außerhalb des Brennpunkts auftreten; sie sollen dieselben wie oben sein. Um diese Abweichung zu messen, bringt man hinter das Okular einen geradsichtigen Prismensatz und zieht damit das Sternbild in ein Spektrum auseinander. An der Stelle derjenigen Farben, auf deren Bilder das Okular eingestellt ist, zeigen sich Einschnürungen

(Abb. 132), die mit der Verschiebung des Okulars auf der Achse wandern; so stellt man die Längsabweichung fest, während die Verbreiterung des Spektrums unmittelbar die Seitenabweichung darstellt. Auf das Verfahren



Abb. 132. Die Farbenprobe nach RUTHERFURD und VOGEL.

von HERTZSPRUNG mit Objektivgittern sei nur hingewiesen. Zur Messung der sphärischen und chromatischen Abweichungen eignet sich besonders das Verfahren von HARTMANN.

Aus dem von einem Lichtpunkt ausgehenden Büschel werden durch eine Blende eine Anzahl regelmäßig angeordneter Teilbüschel ausgesondert. Die Lage der Achsen der zugehörigen Bildbüschel wird durch die Mitten ihrer Zerstreuungskreise in zwei zur Objektivachse senkrechten Ebenen bestimmt, die annähernd gleichviel vor und hinter dem Bildort liegen. In diesen Ebenen werden photographische Aufnahmen gemacht, am besten mit einfarbigem Licht (Abb. 133) und mikrometrisch ausgemessen; Abb. 134 zeigt eine Aufnahme mit einem Okularspektrographen, dessen Spalt das Licht von den Öffnungen für zwei Zonen aufnahm; man erhält so unmittelbar die Kurve

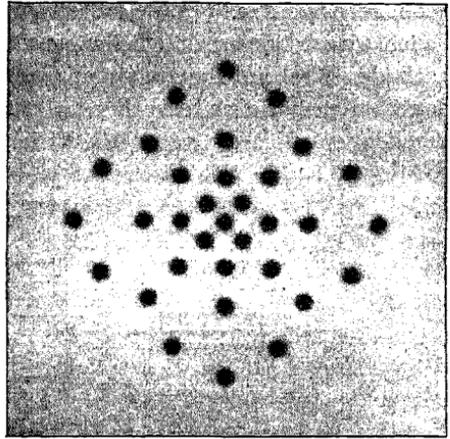


Abb. 133. Eine Aufnahme in einfarbigem Licht nach dem HARTMANNschen Prüfungsverfahren.

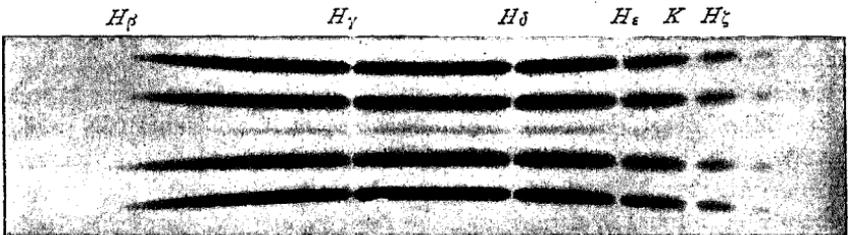


Abb. 134. Eine Aufnahme mit einem Okularspektrographen nach dem HARTMANNschen Prüfungsverfahren.

des sekundären Spektrums mit den FRAUNHOFERSchen Linien als Unterbrechungen.

Für die Prüfung der optischen Leistung eignet sich der folgende

Apparat (Abb. 135), mit dem zugleich der richtige Aufbau eines Doppelfernrohrs geprüft werden kann. Als Ersatz des Fernziels dient ein Doppelkollimator A , dessen beide Rohre und Visierlinien in starrer Verbindung und parallel sind, und dessen Objektiven zwei entgegengesetzt drehbare rhombische Prismen p_l, p_r vorgelagert sind, um ihn an den Objektivabstand des zu untersuchenden Fernrohrs B anpassen zu können. Auf der entgegengesetzten Bildseite von B wird ein Doppelrichtfernrohr C mit schwacher Vergrößerung aufgestellt, dessen Rohre und Visierlinien ebenfalls in starrer Verbindung und parallel sind, und dessen Objektive genügend groß sind, daß auch bei Einstellung von B für verschiedene Augenabstände die aus B austretenden Achsenstrahlen noch von C aufgenommen werden. In den Brennebenen a_l, a_r, c_l, c_r sind außer den Fadenkreuzen wagerechte Teilungen für Winkelmessungen vorgesehen, die nach den Winkeln abgestuft und beziffert sind, unter denen die von den betreffenden Strichen ausgehenden Strahlen nach dem Austritt aus dem zugehörigen Objektiv gegen die Visierachse von A bzw. C geneigt sind.

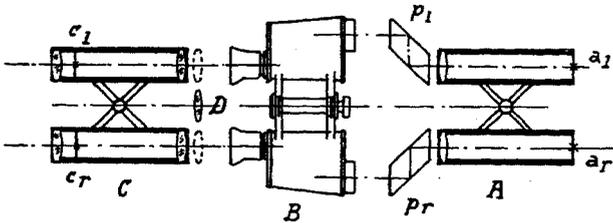


Abb. 135. Ein Apparat zur Prüfung von Doppelfernrohren.

Sind die beiden optischen Achsen von B einander parallel, so müssen die beiden parallelen Visierlinien von A nach dem Durchgang durch B noch parallel sein. Steht also das Fadenkreuz in c_r auf dem Bild des Kreuzes in a_r ein, so muß auch das Kreuz in c_l auf dem Bild des Kreuzes in a_l eintreten. Nun braucht die Parallelität nicht streng erreicht zu sein; die Augen können sich ohne Zwang auf mäßig abweichende Blickrichtungen einstellen, namentlich nach innen entsprechend der Einstellung für die Nähe dürfen die Augenachsen um größere Winkel verschwenkt sein. Man bringt daher in c_l ein Grenzrechteck an, innerhalb dessen das Bild des Kreuzes eintreten muß; meist gilt ein kleineres Rechteck für die Abnahme fertiger Fernrohre und ein größeres für die Prüfung gebrauchter Fernrohre darauf, ob eine Berichtigung der Parallelität nötig ist. Bei Prismenfernrohren kann durch Fehler der Prismen oder ihrer Lagerung das Bild in einer achsensenkrechten Ebene verdreht sein; man erkennt dies daran, ob die Fadenkreuzbilder in a mit den Fadenkreuzen in c gleichgerichtet sind. Namentlich kommt es darauf an, daß kein Unterschied in den Verdrehungen für die rechte und linke Seite vorhanden ist. Den Unterschied in den Vergrößerungen erhält man aus den Messungen

der Vergrößerungen für den rechten und linken Teil von B . Ist C unmittelbar auf A gerichtet, so stimmen die Bilder der Winkelteilungen in a_l und a_r nach der Größe mit den Winkelteilungen in c_l und c_r überein, 1° entspricht wieder 1° ; ist aber ein Doppelfernrohr B mit fünffacher Vergrößerung zwischengeschaltet, so sind die Bilder der Winkelteilungen fünfmal vergrößert; 1° in a_l und a_r entspricht 5° in c_l und c_r . Auch das Verhältnis von Eintritts- und Austrittspupille gibt die Vergrößerung. Die Austrittspupille mißt man ohnehin, da sie die Helligkeit bestimmt. Zu dem Zweck schaltet man vor das betreffende Objektiv von C eine Lupe D und schiebt C so weit zurück, daß ein scharfes Bild der Austrittspupille in c_l bzw. c_r entsteht. Bei einer Brennweite von D von 57,3 mm kann nun die Winkelteilung in c_l bzw. c_r ohne weiteres als mm-Teilung zum Messen des Durchmessers der Austrittspupille dienen. Diese Einrichtung ist auch für holländische Fernrohre brauchbar, während man bei Fernrohren mit zugänglicher Austrittspupille auch die Meßteilung unmittelbar in die Pupille bringen kann und dann mit einer zugleich als ihr Träger dienenden Lupe beobachtet; es ist dies das Dynameter nach RAMSDEN, bei dem man zweckmäßig eine Blende im hinteren Brennpunkt vorsieht. Wenn man nicht sicher ist, daß die Objektivfassung von B als Eintrittspupille wirkt, indem Blenden dahinter den Achsenstrahlenquerschnitt verringern, setzt man eine kleinere Blende vor B und stellt fest, wievielmals diese größer ist als ihr von B entworfenes Bild. Die nach den beiden Verfahren ermittelten Vergrößerungen werden zuweilen nicht übereinstimmen. Es kann nämlich beim ersten Verfahren die Vergrößerung von der Größe des benutzten Stücks der Kollimatorteilung abhängig sein, bei der zweiten von der Größe der vorgesetzten Blende. Es müssen aber die Grenzwerte für den achsennahen Raum für beide Verfahren übereinstimmen. Will man ohne weitere Hilfsmittel die Vergrößerung ungefähr messen, so blickt man mit dem einen, etwa dem rechten, Auge durch das Fernrohr, mit dem linken daran vorbei nach einem entfernten Gegenstand mit natürlicher Teilung (Zaun, Mauerwerk) und vergleicht, wieviel Teile im linken Auge auf ein Teil im rechten Auge fallen. Man messe, wenn zugänglich, in senkrechter Richtung, auch kann es bequemer sein, das Fernrohr umgekehrt, verkleinernd zu benutzen. Liegt der Gegenstand näher, so ist durch Umrechnung zu berücksichtigen, daß der Dingsehinkel, der hier von der Austrittspupille gemessen ist, von der Eintrittspupille zu rechnen ist, die namentlich beim holländischen Fernrohr gegen die Eintrittspupille in der Achse stark versetzt sein kann. Um das dingsseitige Gesichtsfeld zu messen, schiebt man C beiseite und beobachtet unter Hineinschauen in B , welches Stück der Winkelteilung in a_l bzw. a_r durch die Gesichtsfeldblende von B ausgeschnitten wird. Bei holländischen Fernrohren muß bei der Gesichtsfeldmessung eine kleine Blende am Augenort angebracht werden, gewöhnlich setzt man sie 10 mm hinter die Augenlinse; außerdem muß darauf geachtet werden, daß das Kollim-

matorobjektiv nicht das Gesichtsfeld abbildet und bei der weit zurückliegenden Eintrittspupille dieses Fernrohrs nicht merkliche Verzeichnung besitzt. Bei den Messungen aller dieser Bestimmungsgrößen ist darauf zu achten, daß die Okulare von B für den Austritt von Parallelbüscheln eingestellt sind; man bewirkt dies unabhängig von dem Augenzustande des Beobachters, wenn man die Okulare von B so einstellt, daß die Fadenzkreuze in a_l bzw. a_r ohne Parallaxe auf die Kreuze in c_l bzw. c_r abgebildet werden. Damit wird zugleich der Nullpunkt der Dioptrienteilung dieser Okulare geprüft. Um die Dioptrienteilung selbst zu prüfen, schaltet man entweder Brillengläser von bekannter Stärke hinter die Okulare oder man richtet die Fernrohre von C so ein, daß ihre Fadenzkreuze für verschiedene Dingentfernungen parallaxenfrei eingestellt werden können und die eingestellte Entfernung in d_{ptr} angezeigt wird. Auf diese Weise ist es auch möglich, die obigen Messungen für eine andere Einstellung der Okulare von B durchzuführen.

14. Die Bildlage bei Spiegelgruppen und ihre Abhängigkeit von Drehungen der Gruppe.

Zunächst mögen die Ausführungen von S. 52 über Bildlage vervollständigt werden. Eine Gruppe von drei Spiegeln nennt man einen Tripelspiegel. Die drei Spiegelebenen bestimmen auf einer Kugel um die Spiegelecke, in der die Ebenen zusammenstoßen, ein sphärisches Dreieck (Abb. 136). a, b, c seien die Seiten, A, B, C die Ecken und Winkel dieses Dreiecks; die Folge der Spiegelungen sei die alphabetische. Die Kugelmittle als Spiegelecke wird in sich selbst abgebildet. Da der Bildpunkt von C nach Spiegelung an a und b wieder C ist, ist der Bildpunkt nach den drei Spiegelungen der Punkt C' , der in bezug auf c symmetrisch liegt; ebenso liegt der Dingpunkt A' zu dem Bildpunkt A in bezug auf a symmetrisch. Somit haben alle Ding- und Bildpunkte von der Symmetrieebene s durch die Höhenfußpunkte A_0 und C_0 den gleichen Winkelabstand und können, wie wir zeigen wollen, durch die gleiche Drehung um eine zur Symmetrieebene senkrechte Achse in symmetrische Lage zu dieser Ebene gebracht werden. Legt man durch A und A' größte

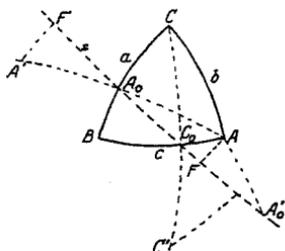


Abb. 136. Zur Wirkung des Tripelspiegels.

Kreise AF und $A'F'$ senkrecht zu s , so ist $FF' = \sigma$ dieser Drehungswinkel und $A_0F = \sigma/2$. Das Bild A'_0 von A_0 liegt auf s ; bei der Spiegelung von A_0 wird durch a der Ort nicht geändert, b und c bewirken eine Drehung $2A$ um A , so daß $A_0AF = A$ ist. Da ferner $\sin AA_0 = \sin c \sin B$ ist, ist

$$\sin \frac{\sigma}{2} = \sin c \sin B \sin A.$$

Ebenso findet man für C und C'

$$\sin \frac{\sigma}{2} = \sin a \sin B \sin C.$$

Nach dem Sinussatz sind aber diese Drehungen und damit auch die für alle anderen zugeordneten Punkte gleich. Spiegeln a, b, c in umgekehrter Reihenfolge, so ist nur der Sinn der Drehung σ entgegengesetzt. Von den übrigen vier Spiegelfolgen unterscheiden sich ebenfalls die entgegengesetzten nur durch den Drehungssinn. Der

absolute Wert von σ ist nach dem Sinussatz für alle sechs Folgen derselbe. Die Symmetrieebenen bilden ein sphärisches Dreieck, dessen Ecken die Höhenfußpunkte des gegebenen Dreiecks sind. Sind die drei Spiegel einer Geraden parallel, so verwandelt sich das sphärische in ein ebenes Dreieck; die Symmetrieebenen sind dieser Geraden parallel; an Stelle der Drehung tritt eine Verschiebung S in der Symmetrieebene senkrecht zur Geraden, und es ist

$$S = 2c \sin B \sin A.$$

Fallen der erste und dritte Spiegel zusammen, so ist die Wirkung gleich der eines Planspiegels, der durch die Schnittgerade der Spiegel geht und zum zweiten Spiegel in bezug auf die anderen Spiegel symmetrisch liegt. Ist ein Spiegelwinkel ein rechter, z. B. B , so fallen zwei Symmetrieebenen und die zu ihnen senkrechte Drehachse zusammen. Alle Symmetrieebenen gehen durch B und die Spiegelecke; für die doppelte Symmetrieebene ist der Winkel τ dieser Ebene mit c

$$\text{ctg } \tau_c = \cos c \text{ tg } A,$$

für die einfache

$$\text{tg } \tau_e = \text{tg } c : \sin a.$$

Der Drehungswinkel σ ist

$$\sin \frac{\sigma}{2} = \sin c \sin A.$$

Sind zwei Spiegelwinkel rechte, z. B. B und C , so gibt es nur eine Symmetrieebene, die mit dem Spiegel a zusammenfällt; σ ist gleich $2A$. Sind alle drei Spiegelwinkel rechte, so hat man einen Zentralspiegel; es gibt nur ein Bild, das in bezug auf die Spiegelecke zentrisch symmetrisch ist; es ist höhenverkehrt, während der einfache Spiegel im senkrechten Draufsehen ein seitenverkehrtes Bild liefert. Die Wirkung eines Tripelspiegels für eine der sechs Spiegelungsfolgen ist gleich der eines Winkelspiegels mit dem Winkel $\sigma : 2$ und der eines zu dessen Achse senkrechten Planspiegels oder auch gleich der eines Winkelspiegels mit dem Winkel $90 \mp \sigma : 2$ und der eines Zentralspiegels. Die Gruppe mit einer geraden Anzahl von vier und mehr Spiegelungen ist in der Wirkung einem Winkelspiegel gleich, abgesehen von Parallelverschiebungen in der Spiegelachse; die Gruppe mit einer ungeraden Anzahl von fünf und mehr Spiegelungen führt man auf einen Tripelspiegel zurück, indem man die um einen Spiegel verminderte Gruppe durch einen Winkelspiegel ersetzt. Der erste Satz gründet sich darauf, wie man zwei Drehungen zusammensetzt (Abb. 137). Ist die erste gleich 2α um die Achse A , die folgende 2β um die A schneidende Achse B , so trägt man auf der Einheitskugel, die um den Schnittpunkt O der Achse beschrieben ist, an den größten Kreis AB in A den Winkel α in entgegengesetztem Sinne an und in B den Winkel β in gleichem Sinne. Der Schnittpunkt C bestimmt mit O die Achse für die Gesamtdrehung und der Nebenwinkel $180 - \gamma$ ihre Größe dem Sinne nach übereinstimmend mit β . Ist zu einer beliebigen Dinglage eine beliebige Bildlage gegeben, die man nicht schon durch Parallelverschiebung erhalten kann, so kann die Umlagerung immer durch eine Drehung und eine Parallelverschiebung in der Richtung der Drehachse bewirkt werden; es gibt in jedem Falle nur eine solche Drehachse und die beiden sich zu 360° ergänzenden entgegengesetzten Drehungen.

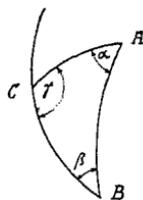


Abb. 137. Zur Wirkung von Spiegelgruppen.

Wir wollen nun den Einfluß von Verdrehungen der Spiegelgruppe untersuchen. Prismen als Ersatz von Spiegeln wirken hier wie bei der Bildlage bis auf Parallelverschiebungen gleich. Bei dem einfachen Spiegel läßt sich jede Verdrehung in die um zwei Achsen zerlegen, die in ihm liegen und zueinander senkrecht sind, und von denen die eine in der Einfallsebene liegt; die Drehungen um diese Achsen bewirken doppelt so große Drehungen des Bildraums um sie. Beim Doppelspiegel mit dem

Winkel α zerlegt man nach den zwei Achsen, die auf der Spiegelachse und zueinander senkrecht stehen, und von denen die eine den Spiegelwinkel halbiert. Der Einfluß der Verkipfung ergibt sich als der Unterschied der Drehung 2α um die unverkippte und die verkippte Spiegelachse. Es seien diese Achsen durch A und B (Abb. 138) dargestellt, φ sei die Verkipfung, C die Achse, um die dadurch der Bildraum gekippt wird. CA und CB bilden mit AB die Winkel $\alpha - 180$ und α . Mithin ist angenähert $CA = 90^\circ + \varphi/2 \cos \alpha$ und die Drehung ψ des Bildraums

$$\sin \frac{\psi}{2} = \sin \frac{\varphi}{2} \sin \alpha.$$

Für die beiden oben hervorgehobenen Kippachsen des Doppelspiegels liegen also die Kippachsen des Bildraums angenähert in der zur Spiegelachse senkrechten Ebene, im sogenannten Hauptschnitt. Wird die Spiegelachse senkrecht aus der Halbierungsebene verkippt, so fällt die Achse I für die Bildverdrehung mit dem symmetrisch zur Halbierungsebene verlaufenden Strahl (Abb. 46) im Bildraum zusammen. Dieser Strahl bildet oft die Achse des Bildraums; das zu dieser achsensenkrechte Bild wird also in seiner Ebene gedreht. Wird die Spiegelachse in der Halbierungsebene gekippt, so liegt die entsprechende Achse II für die Bildverdrehung senkrecht zur anderen I; bei der erwähnten Achsenlage des Bildraums und lotrechter Spiegelachse bedeutet dies eine Kippung des Bildes nach der Höhe. Die Winkelspiegel α und $180 - \alpha$ verhalten sich gleich, da die Wirkung beider durch einen Winkelspiegel α aufgehoben werden kann. Der Tripelspiegel ist nach dem früheren einem solchen gleichwertig, der aus einem Winkelspiegel und einem zu dessen Achse senkrechten einfachen Spiegel besteht. Es genügt daher, die Wirkung der Verkipfung dieses einfacheren Tripelspiegels zu untersuchen. Beim Verkippen des Zentralspiegels heben sich die Wirkungen des Winkelspiegels und des einfachen Spiegels auf. Für Tripelspiegel, die einen Winkelspiegel α enthalten, ist die Wirkung der Verkipfung des einfachen Spiegels nach den Achsen für die Verdrehung des Bildes zu



Abb. 138. Zur Wirkung des verkippten Doppelspiegels.

Spiegelachse bedeutet dies eine Kippung des Bildes nach der Höhe. Die Winkelspiegel α und $180 - \alpha$ verhalten sich gleich, da die Wirkung beider durch einen Winkelspiegel α aufgehoben werden kann. Der Tripelspiegel ist nach dem früheren einem solchen gleichwertig, der aus einem Winkelspiegel und einem zu dessen Achse senkrechten einfachen Spiegel besteht. Es genügt daher, die Wirkung der Verkipfung dieses einfacheren Tripelspiegels zu untersuchen. Beim Verkippen des Zentralspiegels heben sich die Wirkungen des Winkelspiegels und des einfachen Spiegels auf. Für Tripelspiegel, die einen Winkelspiegel α enthalten, ist die Wirkung der Verkipfung des einfachen Spiegels nach den Achsen für die Verdrehung des Bildes zu

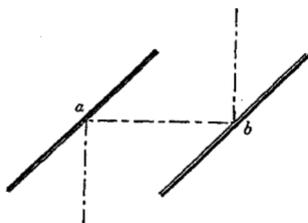


Abb. 139. Der Rhombusspiegel.

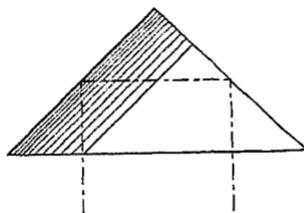


Abb. 140. Der Zentralspiegel (Prisma).

zerlegen, wie sie der Winkelspiegel allein gibt. Die Kippung φ des Planspiegels in der Halbierungsebene liefert dann zur Bildverdrehung der ersten Art um Achse I einen Beitrag $2\varphi \sin \alpha$ und zu der der zweiten Art um Achse II $2\varphi \cos \alpha$; die Kippung ψ dieses Spiegels um seinen Schnitt mit der Halbierungsebene liefert die Beiträge $2\psi \sin \alpha$ zur Drehung zweiter Art und $2\psi \cos \alpha$ zur Drehung erster Art. Für kleine Kippungen wird die Wirkung des Winkelspiegels durch die eine Komponente der Wirkung des einfachen Spiegels aufgehoben, so daß die andere Komponente allein die Gesamtwirkung darstellt. Ist $\alpha = 45^\circ$ oder 135° , so wird die Wirkung auf die beiden Drehungen des Bildes gerade vertauscht, statt Kippung tritt Bilddrehung und umgekehrt auf, z. B. wenn das Pentaprisma durch ein Pentadachprisma ersetzt wird, dessen Dachkante dem Hauptschnitt parallel ist. Völlige Unabhängigkeit der Bildlage abgesehen von Parallelverschiebungen ist bei der Verdrehung einer Spiegelgruppe nur möglich, wenn Ding- und Bildachse die gleiche oder entgegengesetzte Richtung

haben, da nur hier die Drehung der Spiegelgruppe um die Dingachse die Richtung der Bildachse ungeändert läßt; es genügen daher dieser Forderung nur zwei Spiegelgruppen und die ihnen gleichwertigen. Es sind dies der Rhombusspiegel (Paar paralleler Spiegel) und der Zentralspiegel (Abb. 139 und 140). Zuweilen, z. B. bei Entfernungsmessern, kommt es vor, daß durch eine Doppelgruppe zweier fest miteinander verbundener Gruppen von je einer Ding- oder auch Bildebene in verschiedener Lage je ein Bild in dem gleichen Gesichtsfeld entworfen wird, so daß die Ebenenlote, Achsen, zusammenfallen, und man wissen will, wie die gegenseitige Lage der gespiegelten Bilder von der Verdrehung der Doppelgruppe abhängt. Ergänzt man die Doppelgruppe durch eine zusätzliche Gruppe so, daß die eine Gruppe zu einer geradsichtigen ohne Drehung des Bildes um seine Achse wird, so wirkt die Verdrehung der so ergänzten anderen Gruppe auf ihr Bild, wie die der Doppelgruppe auf die gegenseitige Lage, wenn beide Wirkungen in bezug auf die Dinglage ausgedrückt werden. Man findet so, daß die Doppelgruppe, die unempfindlich gegen Verdrehung ist, diejenige ist, die zwei entgegengesetzte Richtungen in eine zusammenbringt und aus einem einfachen Spiegel einerseits und einem 90° Winkelspiegel andererseits gebildet wird, dessen Achse auf dem einfachen Spiegel senkrecht steht; da bei dieser Gruppe durch einen einfachen Spiegel der Winkelspiegel zu einem Zentralspiegel und der einfache Spiegel zu einem Rhombusspiegel ergänzt wird (Abb. 141). Die Wirkung dieser Doppelgruppe wird nicht geändert, wenn man in jeder Teilgruppe Spiegel hinzufügt, die in jeder dieselbe Änderung der Bildlage bewirken.

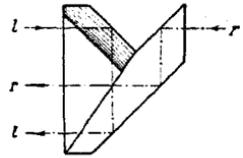


Abb. 141. Eine Doppelgruppe besonderer Art.

III. Die Richtfernrohre.

1. Die Wirkungsweise der Richtfernrohre.

Die Richt- (Ziel-) Fernrohre dienen dazu, um eine Richtung festzustellen oder einen Gegenstand in eine bestimmte Richtung zu bringen. Das ältere Hilfsmittel ist das Absehen (Dioptr), wie es z. B. zum Richten eines Gewehrs in Form von Kimme und Korn noch viel gebraucht wird; ebenso dient ein Rohr mit einem liegenden Fadenzug an dem einen Ende und einem stehenden an dem anderen zum groben Einrichten. Soll nur entweder die Höhen- oder Seitenrichtung festgestellt werden, so wendet man Spalt und Faden (Abb. 142) oder zwei schmale Spalte in etwa 15 cm Abstand an. Bei Zielversuchen mit dem Spaltabsehen fand STAMPFER, daß er genauer zielte, wenn er das Nebenlicht durch ein Rohr abblendete und wenn die augenseitige Öffnung rund war; als Spaltbreite fand er 0,5–0,7 mm, als Lochbreite die doppelte vorteilhaft. Er stellte bei günstigen Verhältnissen auf 10'' genau ein, gewöhnlich rechnet man nur mit einer Genauigkeit von 1–2', bei Kimme

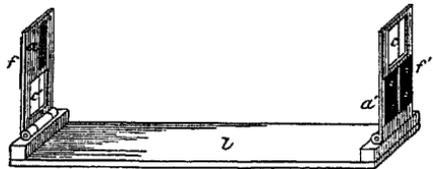


Abb. 142. Ein Absehen (Dioptr).

Bei Zielversuchen mit dem Spaltabsehen fand STAMPFER, daß er genauer zielte, wenn er das Nebenlicht durch ein Rohr abblendete und wenn die augenseitige Öffnung rund war; als Spaltbreite fand er 0,5–0,7 mm, als Lochbreite die doppelte vorteilhaft. Er stellte bei günstigen Verhältnissen auf 10'' genau ein, gewöhnlich rechnet man nur mit einer Genauigkeit von 1–2', bei Kimme

und Korn noch weniger. Ein roheres Richtmittel, aber mit geringem Raumbedarf, ist ein Spiegel, bei dem die Mitte des oberen geraden Randes gekennzeichnet ist. Hält man das Auge so, daß es zentrisch zur Randmitte gespiegelt erscheint, so ist die Visierlinie senkrecht zum Spiegel; das Ziel muß nun auf der Randmitte eintreten. Die Genauigkeit aller dieser Absehen wird dadurch beeinträchtigt, daß deren beide Glieder und das Ziel in drei verschiedenen Entfernungen vom Auge liegen und daher nicht gleichzeitig scharf gesehen werden können; ferner muß das Auge genau in der Absehenslinie gehalten werden. Die Beobachtung ist so zugleich ermüdend; dazu kommen systematische Fehler, mögen sie nun auf den Bau des Auges (S. 128) oder auf einseitige Beleuchtung des Abkommens zurückzuführen sein. Diese Nachteile werden vermieden, wenn das vordere oder hintere Glied durch ein sammelndes optisches System ersetzt wird, in dessen Brennpunkt das andere Glied als Zielmarke angeordnet ist.

Wir behandeln zunächst die Einrichtung, bei der die Marke im vorderen Brennpunkt des Systems steht, das Bild dieser Marke also im Unendlichen entworfen wird und so zugleich mit dem Ziel scharf erscheint. Das Richtglas (Abb. 143) ist ein Glasstab, dessen eine Endfläche die Marke trägt, während an die andere eine Kugel von solchem

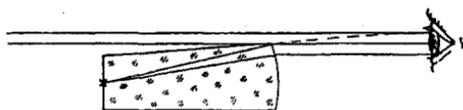


Abb. 143. Der Strahlengang beim Richtglas.

Radius angeschliffen ist, daß die von der Marke ausgehenden Strahlen parallel austreten. Man hält das Auge so, daß die untere Hälfte der Pupille Licht von der Marke, die obere vom Ziel aufnimmt. Die Visierlinie geht durch die Augenmitte und ist der Visierachse, der Geraden durch Marke und Kugelmittelpunkt, parallel. Die Visierichtung bleibt also ungeändert, wenn das Auge seitlich oder auf und ab bewegt wird, im letzten Fall ändert sich nur mit der anderen Aufteilung der Pupille das Helligkeitsverhältnis von Ziel und Marke. Damit die obere Fläche des Richtglases das Beobachten der unteren Fortsetzung des Ziels nicht stört, ist sie entsprechend dem Verhältnis des Radius der Pupille zu ihrem Abstand von der zugekehrten Richtglasendfläche abzuschrägen und die Visierachse im Richtglas entsprechend tief zu legen. Die obere Kante dieser Endfläche erscheint als unscharfer schmaler Streifen, innerhalb dessen sich Markenbild und Ziel übereinanderlagern und die Helligkeit des Ziels von oben nach unten, die der Marke von unten nach oben von dem vollen Wert auf Null abnimmt. Bei dem Spiegelvisier wird das Markenbild nach Abb. 144 durch einen halbdurchlässigen Spiegel dem Auge dargeboten. Hier lagert sich das Markenbild im ganzen Gesichtsfeld mit gleichmäßiger Helligkeit über das Ziel. Für beide Richtmittel ist eine helle Marke auf dem dunklen Grunde geeigneter,

da so nur das Licht der Marke, nicht das ihrer Umgebung, als fremdes Licht über das Ziel gelagert wird. Das Spiegelvisier eignet sich besonders für künstliche Beleuchtung der Marke; als Nachtvisier zum Anschneiden schwächer, kurz aufleuchtender Lichter, wie des Feuerscheins eines Geschützes, hat es den Vorteil großen Spielraums für die Haltung des Auges. Beim Richtglas dient gewöhnlich nur das Tageslicht zur Beleuchtung der Marke; über die Marke wird zuweilen noch ein Glaskeil oder Spiegelprisma gekittet, um besseres Licht von oben herabzuholen. Beim Richtglas kann durch eine kleine Höhenverschiebung des Auges das Helligkeitsverhältnis von Markenbild und Ziel passend geregelt werden. Die Genauigkeit beider Richtmittel kann man erhöhen, wenn man ein holländisches Fernrohr dahinterschaltet. Dies ist zugleich die einzige Möglichkeit, dies Fernrohr mit einer Zielmarke auszurüsten. Den halbdurchlässigen Spiegel kann man dann zwischen dessen Linsen verlegen; ebenso kann man die Richtglaslinse als eine die Okularlinse zum Teil überdeckende Linse ausbilden; das Bild der Marke muß für das Auge wieder in der Zielentfernung abgebildet werden.

Der zweite Fall, wo das Zielbild durch ein sammelndes System an dem Ort der Zielmarke entworfen wird, wird durch das Richtfernrohr verwirklicht. Hier sind die optischen Verhältnisse der Übereinanderlagerung von derselben Art, wie wenn sich die Marke unmittelbar vor

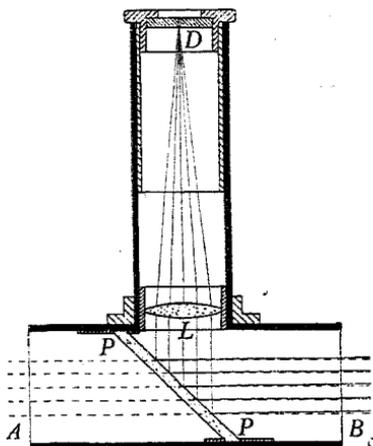


Abb. 144. Der Strahlengang beim Spiegelvisier.

dem Ziel befände; die Marke deckt nur einen kleinen Teil des Gegenstandes ab, dessen Erscheinung im übrigen ungestört ist. Im allgemeinen wird Zielbild und Marke mit einem Okular vergrößert; beim Erdfernrohr, besonders bei dem mit veränderlicher Vergrößerung, bringt man vorzugsweise die Marke in der ersten Bildebene an, da gewöhnlich die Unveränderlichkeit der Visierlinie so am besten gesichert ist. Das Richtfernrohr hat erst die feineren Winkelmessungen in der Astronomie und Geodäsie ermöglicht. Als Fadenkreuz benutzte man früher besonders Spinnfäden, neuerdings auch Quarz- und Platinfäden. In ein Glasplättchen eingerissene Striche sind am dauerhaftesten; dabei ist allerdings staubdichter Abschluß nötig, damit nicht die durch das Okular vergrößerten Staubteilchen auf der Glasplatte stören. Das Fadenkreuz oder das Objektiv ist vielfach zentrierbar (Abb. 31), um die Visierlinie mit der durch die Lagerringe bestimmten Achse oder mit einer anderen mecha-

nisch festgelegten Richtung parallel stellen zu können. Ebenso wie es nötig war, den Abstand von Objektiv und Okular zu ändern, um Gegenstände in verschiedener Entfernung scharf einzustellen, muß auch noch der Abstand von Objektiv und Fadenkreuz geändert werden können, um das Fadenkreuz und das Bild gleichzeitig scharf zu sehen. Nur wenn der Unterschied der Kehrwerte der Grenzentfernungen unter einer gewissen Größe bleibt, die kleiner ist als für die Okularscharfstellung, und wenn auch Änderungen des Abstandes von Objektiv und Fadenkreuz durch äußere Verhältnisse, wie Temperaturänderung, belanglos sind, ist es am Platze, auf diese Verstellung zu verzichten, wie es bei Zielfernrohren für militärische Zwecke meist geschieht. Die Visierlinie ist durch die Verbindungslinie der in den Dingraum durch Rückstrahlung abgebildeten Fadenkreuzmitte mit der Mitte der Eintrittspupille gegeben, auch dann, wenn dies Fadenkreuzbild vor oder hinter dem Ziel entworfen wird. Fallen diese genügend zusammen, so können auch Strahlen, die etwas exzentrisch zur Eintrittspupille verlaufen, als Visierlinien gelten.

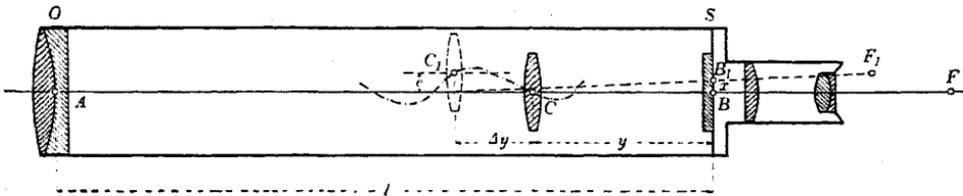


Abb. 145. Ein Fernrohr mit einer Einstelllinse.

Werden mit dem Fernrohr die Richtungen von Zielen in verschiedener Entfernung verglichen, und erfolgt nur die nötige Verstellung des Fadenkreuzes auf einer Geraden, so kann man daher als Visierlinie die Gerade ansehen, die im Dingraum dieser Verstellungsgeraden durch die Abbildung zugeordnet ist. Wenn z. B. festgestellt werden soll, ob mehrere Ziele in einer Geraden liegen, so muß das Fernrohr nur der Forderung genügen, daß das Fadenkreuz auf einer Geraden verstellt wird, die auch gegen die Achse geneigt sein kann. Wenn aber außerdem die Ziele auf der mechanischen Achse der Lagerringe des Fernrohrs liegen sollen, muß die Verstellungsgerade dieser Achse parallel sein und durch den hinteren Hauptpunkt des Objektivs gehen; für sehr nahe Ziele muß noch der vordere Hauptpunkt auf der Achse liegen. Die Verstellung des Objektivs statt des Fadenkreuzes ist praktisch einer parallelen entgegengesetzten des Fadenkreuzes gleichwertig. Für feinere Messungen sind die Anforderungen an die Geradlinigkeit der Verstellung des Fadenkreuzes ziemlich hoch. Ebenso wie bei der Scharfstellung des Bildes kommt nun auch die Verstellung von inneren Linsen, insbesondere einer Einstelllinse hinter dem Objektiv, in Betracht (Abb. 145). Hat diese eine

längere Brennweite, so ist die Visierlinie gegen Abweichungen der Führung von der Geraden weniger empfindlich, und zwar im Verhältnis ihres Abstands vom Fadenkreuz zu ihrer Brennweite; es fällt zwar auch die Verschiebung größer aus; bei mäßiger Größe ist aber die erreichbare Genauigkeit der Führung dieselbe. In diesem Falle kommt es ferner darauf an, daß die Bahn der Hauptpunkte der Einstellinse in die Gerade fällt, die den hinteren Hauptpunkt des Objektivs mit dem Fadenkreuz verbindet; wie die Untersuchung zeigt, wird dafür nur mäßige Genauigkeit verlangt. Um das Zielbild in die Fadenkreuzebene zu bringen, hat man bei der üblichen Einrichtung zunächst das Fadenkreuz mit dem Okular scharf einzustellen und dann, indem das Auge darauf akkommodiert bleibt, das Zielbild durch Verschieben des Fadenkreuzes samt Okular gegen das Objektiv. An die Stelle der Beurteilung nach Schärfe des Zielbildes tritt mit Recht meist die, ob bei seitlichen Bewegungen des Auges die Querverschiebung des Fadens, die sogenannte Parallaxe, verschwindet. Liegt nämlich das Zielbild vor oder hinter der Faden-ebene, auf die das Auge eingestellt sei, so treten in dieser Ebene an die Stelle der Bildpunkte des Ziels Zerstreungskreise; deren Größe ist gleich dem Produkte aus dem Abstände Δx von Faden- und Bildebene und dem Öffnungswinkel $2u$ der Strahlen an dieser Stelle, für größere Zielentfernung also dem ausgenutzten Öffnungswinkel des Objektivs. Bei seitlicher Abweichung des Auges aus der Achse wird von der Austrittspupille ein Stück abgeschnitten und demgemäß auch von der Bündelöffnung; die Schwerlinie des übrigen Stücks wird man etwa als Hauptstrahl ansehen können. Die Parallaxe ist also jedenfalls nur ein Bruchteil q von $\text{tg } u \Delta x$.

q kann man bestimmen, wenn man bei größerem Δx , wo das Bild noch eben erkennbar ist, die seitliche Verschiebung des Bildes gegen einen Maßstab oder ein Maßstabbild in der Fadenebene beobachtet. q hängt in erster Linie von dem Durchmesser d der Austrittspupille ab, daneben auch von der Größe der Augenpupille und der Beschaffenheit des Fadenkreuzes; bei Tagesbeleuchtung ist für $d = 0,6 \text{ mm}$ q etwa $= 1:3$; für $d = 2 \text{ mm}$ $3:5$ und für $d = 5 \text{ mm}$ $4:5$. Ist f die Okularbrennweite, so erscheint dem Auge die Parallaxe in der Winkelgröße

$$\zeta = q \frac{\text{tg } u \Delta x}{f}.$$

RAYLEIGH fand auf Grund der Beugungslehre, nach der ζ proportional $\lambda:d$ ist, $\Delta x < \lambda : \text{tg }^2 u$. Die Einstellung auf Verschwinden der Parallaxe ist besonders dann genauer als die auf Bildschärfe, wenn die Austrittspupille größer als die Augenpupille ist. Parallaxe kann auch von Abbildungsfehlern des Objektivs oder Auges herühren. Von den Augenfehlern ist man frei, wenn man einen Spalt über das Objektiv pendeln läßt; RAYLEIGH beobachtete so aber keine merklich kleineren Δx . Am genauesten erkennt man die Parallaxe und ihr Verschwinden, wenn man das Mittel aus zwei Reihen Zielungen vergleicht, von denen die eine mit dem Auge in der einen Grenzlage, die andere mit dem Auge in der anderen Grenzlage gemacht ist. ENGI fand aus den beobachteten eben erkennbaren Δx für Vergrößerungen V zwischen $1,6$ und $75 \times$, daß das entsprechende $\zeta = K\sqrt{V}$ ist und für Entfernungen unter 100 m etwa $K = 3,8''$ und für 800 m $K = 4,6''$. Der Grund dieser Abhängigkeitsform ist noch aufzuklären.

Um das Fadenkreuz auch bei schwach erhelltem Bildgrund sehen zu können, muß für Beleuchtung gesorgt werden. Sind die Ziele ziemlich helle Gegenstände auf dunklem Grunde, so genügt es, das ganze Bildfeld zu erhellen, indem man einem Teile des Objektivs, der zweckmäßig zur Meßrichtung symmetrisch ist, durch eine schräge weiße Fläche Licht zuführt. Bei helleren Zielen kann auch deren Licht zur Aufhellung dienen, indem ein Teil des Objektivs durch eine diffus zerstreuende Platte bedeckt wird. Sind aber die Ziele ziemlich lichtschwach, so muß das Fadenkreuz leuchtend gemacht werden. Dabei darf nur das von dem Fadenkreuz abgebeugte oder zurückgeworfene Licht, nicht das vorbeigehende blendende Licht in das Auge gelangen; auch muß die Beleuchtung zur Achse symmetrisch sein. Am einfachsten erreicht man dies bei einem in Glas eingerissenen Kreuz, wenn die Glasplatte etwas dicker gewählt und der polierte Kreisrand bis auf einen Sektor für das seitlich einfallende Licht versilbert wird. Das Licht etwa von einem elektrischen Lämpchen wird zwischen den Planflächen durch Totalreflexion hin

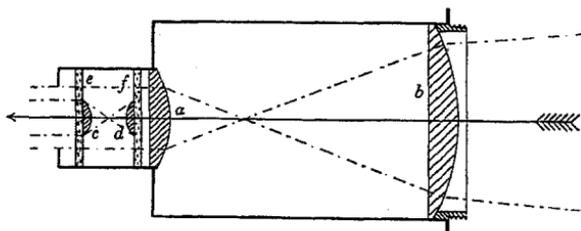


Abb. 146. Das Okular von R. KÖNIG und SARTORI.

und her geworfen und auch von dem Rande wieder zurück; so wird eine breite allseitige Beleuchtung erreicht, ohne daß Licht unmittelbar in das Auge gelangt; die Strichfurchen werden mit einer geeigneten weißen Masse eingelassen, unbeleuchtet erscheinen sie im durchfallenden Licht des Bildes trotzdem schwarz. Größere Marken können auch mit Radiummasse eingelassen werden; für feinere Striche ordnet man diese Masse ringförmig um die Glasplatte an. Man kann auch das Licht durch einen schrägen ringförmigen Reflektor, der das axiale Bildbüschel umgibt, von vorn zuführen; es muß dann das direkte Licht durch eine die Austrittspupille umgebende Blende abgehalten werden, wenn dies nicht schon etwa durch die Fassung der Umkehrlinsen geschieht. Für feinere Messungen ist dies auch bei den vorigen Anordnungen zweckmäßig, damit Fadenkreuz und Bild durch die gleichen Teile des Auges abgebildet werden.

Die Schwierigkeit der Beleuchtung und genauen Achsenverschiebung des Fadenkreuzes fällt beim Richtfernrohr ohne Fadenkreuz von JEAURAT (1779) fort, bei dem im Gesichtsfeld zwei gleich große Bilder des Ziels entworfen werden, von denen das zweite in bezug auf das erste höhen- und seitenverkehrt ist; nur ein Punkt des Ziels kann also in beiden Bildern an derselben Stelle des Gesichtsfelds erscheinen.

Bei dem Okular von R. KÖNIG und SATORI (Abb. 146) ist dies erreicht, indem auf das gewöhnliche Okular *ab* ein kleines astronomisches Fernrohr *ef* mit der Vergrößerung 1 und so kleinem Durchmesser aufgesetzt ist, daß von dem Achsenbüschel die eine Hälfte der Strahlen hindurch, die andere daran vorbei in das Auge gelangt. Liegen alle Linsen auf einer gemeinsamen Achse, so ist die ihr entsprechende Gerade im Dingraum die Visierlinie; nur der Punkt des Ziels, auf den sie gerichtet ist, gibt zwei sich genau deckende Bilder und ist daran kenntlich. Bei Richtungsänderung des Fernrohrs verschieben sich die Bilder doppelt soviel gegeneinander wie gegen ein Fadenkreuz, sie sind gegenläufig; andererseits ist die Genauigkeit der Einstellung auf Deckung im allgemeinen geringer, als die Einstellung mit Fadenkreuz. In dieser Art kann auch das AMICISCHE geradsichtige Dachprisma (Abb. 50) als Richtmittel dienen, indem man das Auge in die Verlängerung der Dachkante bringt, so daß man im Vorbeisehen ein aufrechtes Bild und im Durchsehen ein umgekehrtes Bild erhält; bilden Ein- und Austrittsfläche gleiche Winkel in der gleichen Ebene mit der Dachkante, so ist die Visierlinie der Kante parallel. Sollen nur Seiten- (Höhen-) Winkel gemessen werden, so braucht das zweite Bild nur seiten- (höhen-) verkehrt zu sein; hierfür schlug AMICI sein Wendepisma vor. Bei dem Dipleidoskop zum Feststellen des Sternendurchgangs durch den Meridian wird so das eine Bild von einem einfachen Spiegel, das andere von einem 90° Winkelspiegel geliefert; die Senkrechte zum ersten und die winkelhalbierende Ebene des zweiten müssen im Meridian liegen.

2. Die Gewehrzielfernrohre.

Die Zielfernrohre für Jagdgewehre sind meist terrestrische mit zwei bis fünffacher Vergrößerung; doch werden auch stärkere Vergrößerungen, bis zehnfach, benutzt, besonders für den Gebrauch in der Dämmerung. Der Durchmesser der Austrittspupille beträgt gewöhnlich 7 bis 8 mm, nur bei den starken Vergrößerungen muß er mit Rücksicht auf das Gewicht geringer gewählt werden. Der Abstand des Auges vom Okular beträgt etwa 8 cm; damit das Okular nicht zu groß und schwer wird, geht man mit dem augenseitigen Gesichtsfeld nicht über 25° hinaus. Zum Abhalten des Seitenlichts, auch des von der Augenlinse zurückgeworfenen Lichts, kann ein Gummistutzen dienen, der für den Gebrauch ausgeschoben wird. Abb. 147 zeigt, wie durch einen festklemmbaren Knopf das Fadenkreuz in der Höhe für die Schußentfernung eingestellt wird. Für ein scharfes Bild wird entweder das Umkehrsystem allein oder samt Okular verschoben. Um das Aufpassen auf das Gewehr zu erleichtern, dient im ersten Fall die Drehung des Okulars zum Verschieben des Umkehrsystems, oder (Abb. 148) über dem Höhenstellknopf befindet sich noch ein Flügelgriff zum Scharfstellen. Abb. 149 zeigt verschiedene Formen des Abkommens; die dicken Balken dienen zum Zielen in der Dämmerung; die Lücke zwischen ihnen gibt einen Anhalt zum Schätzen der Entfernung nach der scheinbaren Größe des Wildes. Die Höhenverstellung des Abkommens dient meist nur zum Einschießen des Gewehrs auf eine mittlere Entfernung. Soll sie auch auf der Jagd zum Einstellen der Erhöhung entsprechend der Entfernung dienen, wie es bei Militärgewehren üblich ist, so ist es zweckmäßig, die Teilung in das Gesichtsfeld zu verlegen. Bei der üblichen Aufbringung des Fernrohrs

in der Nähe des Ladungsraums wird infolge der geänderten Schwingung des Laufs der Treffpunkt nach der Seite des Fernrohrs verlegt, um so mehr, je

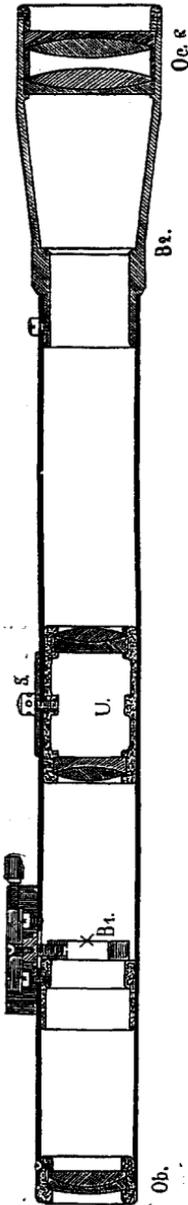


Abb. 147. Der Aufbau des Gewehrzielfernrohrs.
Ob Objektiv, *U* Umkehrsystem, *Oc* Okular, *B*₁ und *B*₂ 1. und 2. Bildebene.



Abb. 148. Ein Gewehrzielfernrohr mit koaxialer Höhen- und Scharfstellung.

schwerer das Fernrohr, je leichter die Büchse und je stärker die Ladung ist. Bei der Aufpassung wird die Seitenrichtung meist durch Treiben der Fußplatte bewirkt, doch werden

auch Stellschrauben benutzt. Gegen das Verkanten kann eine Querlibelle angebracht werden; das Fadenzug gibt aber im allgemeinen genügenden Anhalt für die richtige Lage. Damit bei Selbstladebüchsen das Fernrohr nicht den ausgeworfenen Patronenhülsen den Weg versperrt, hat man Fernrohre gebaut, bei denen entweder der vordere

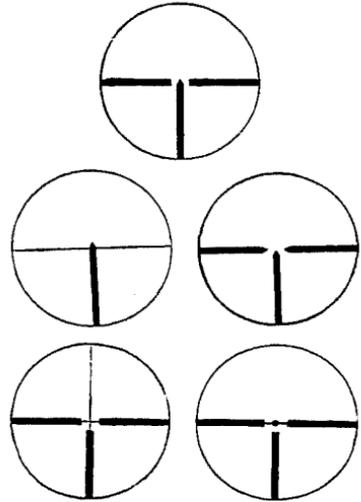


Abb. 149. Abkommen für Jagdziel fernrohre.

Teil des Fernrohrs gegen das Okular seitlich versetzt oder durch einen freien Zwischenraum von ihm getrennt ist. Neuerdings werden auch Ziel-



Abb. 150. Ein Gewehrzielfernrohr mit den Vergrößerungen 1 und 6 fach.

fernrohre für veränderliche oder für mehrere Vergrößerungen eingerichtet. Bei dem abgebildeten Zielfernrohr (Abb. 150) kann zwischen den Vergrößerungen ein- und sechsfach getauscht werden, indem

durch Drehen des Flügelgriffs das Umkehrsystem verschoben wird; bei der Vergrößerung \times schließt sich hier das Gesichtsfeld des freien Auges ohne wesentliche Trennungslinie an das des Fernrohrs an, so daß flüchtiges Wild beschossen werden kann. Ein Bedürfnis für leuchtende Zielmarken scheint nicht zu bestehen; besser ist die nicht gerade bequeme Einrichtung eines kleinen Scheinwerfers auf dem Zielfernrohr; mit dem Scheinwerfer allein ein helles Fadenkreuz auf dem Ziel abzubilden und ihn als Ersatz des Zielfernrohrs zu benutzen, hat sich nicht bewährt.

Auch bei Militärgewehren drängte der Grabenkrieg, bei dem man es mehr als sonst mit kleinen Kopfzielen zu tun hatte, zur Einführung von Zielfernrohren, die in der Bauart nicht wesentlich abweichen; zur Deckung des Schützen kann der Einblick mit Spiegeln gegen die Visierlinie nach unten verschoben werden. Das Zielfernrohr für Maschinengewehre besitzt ebenfalls immer Höhenverstellung des Abkommens mit Außen- oder Innenablesung oder beiden für die Schußweite; es wird auch wohl das Objektivprisma oder das ganze Fernrohr gekippt. Um den Drall zu berücksichtigen, ist die Führungsbahn bzw. Kippachse entsprechend seitlich geneigt. Noch einfacher wird dies erreicht, wenn auf einer Kreisscheibe, die durch das Gesichtsfeld um einen außerhalb liegenden Punkt gedreht werden kann, für abgestufte Entfernungen demgemäß bezifferte Zielmarken in einer Spirale angeordnet sind (Abb. 151); das

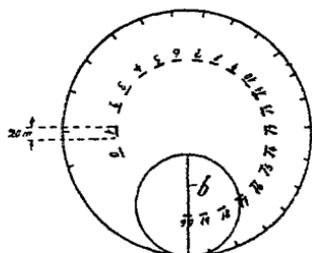


Abb. 151. Eine Zielmarkenspirale.

Einstehen der Marken ist durch Rasten gesichert; bei \wedge -förmigen Marken kann die Breite entsprechend einer bestimmten linearen Streubreite am Ziel gewählt werden. Die Vergrößerung ist meist zwei- bis dreifach. Als Abstand des Auges genügt unter Verwendung einer Gummimuschel etwa 4 cm. Gewöhnlich ist seitliche Beleuchtung des Fadenkreuzes möglich. Zur Berücksichtigung der Zielbewegung kann das Fadenkreuz nach Außen- oder Innenteilung seitlich verstellbar sein. Soll bei der üblichen Einrichtung die Erhöhung des Maschinengewehrs nach Maßgabe der Entfernung geändert werden, so muß erst die Visierlinie entsprechend verstellt werden und darauf das Gewehr, bis das Ziel wieder auf dem Fadenkreuz einsteht. Um nun bei Einstellung der Erhöhung das Ziel angerichtet halten zu können (sogenannte unabhängige Visierlinie) hat man folgende Einrichtung vorgesehen. Zielfernrohr und Gewehr sind um die gleiche Achse für sich kippbar; beim Einrichten der Visierlinie auf das Ziel ist das Fernrohr mit dem Gewehr geklemmt, bei Erhöhung des Gewehrs dagegen mit der Lafette. Es sind sowohl Fernrohre mit Prismen- wie mit Linsenumkehrung im Gebrauch. Bei den ersten (Abb. 152) tritt infolge der erhöhten Lage des Objektivs der Lauf weniger störend in

das Gesichtsfeld; die letzten bieten bei Ausrüstung des Gewehrs mit Schutzschild den Vorteil, daß das Objektiv nahe an den Schild gerückt

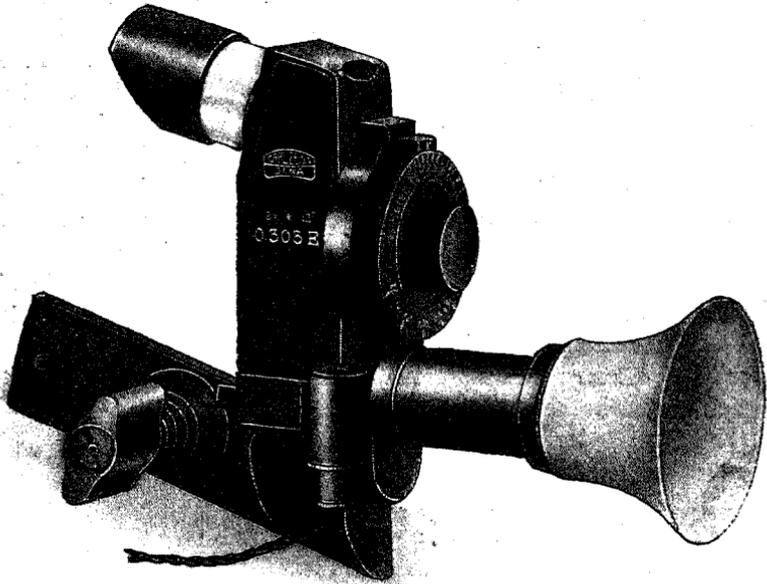


Abb. 152. Ein Prismenzielfernrohr für Maschinengewehre.

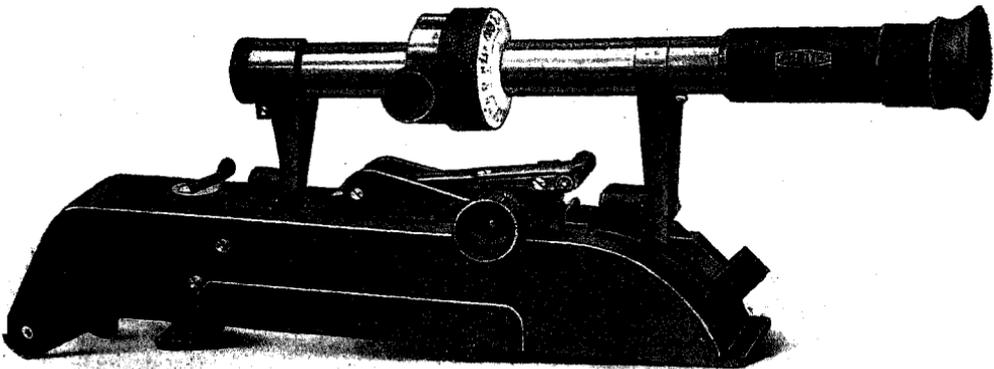


Abb. 153. Ein Linsenzielfernrohr für Maschinengewehre.

werden kann und so die Durchblicköffnung bei gleichem Gesichtsfeld kleiner ausfällt. Am kleinsten wird sie, wenn die Eintrittspupille gegen das Objektiv vorgeschoben ist und in die Öffnung fällt; dafür muß das Objektiv größer sein. Ebenso ist es bei Kippung des ganzen Fernrohrs

vorteilhaft, den Drehpunkt in die Scharte zu legen. Das Zielfernrohr nach Abb. 153 kann zur Seite geklappt werden, um im Bedarfsfalle bequem über Kimme und Korn zielen zu können.

3. Die Geschützzielfernrohre.

Bei Landgeschützen spielt heute das direkte Richten nur eine geringe Rolle, da gewöhnlich aus verdeckter Stellung geschossen wird. Vielmehr wird die Zielrichtung von einem entfernten Beobachtungsstande aus ermittelt oder auch aus der Karte entnommen. Nachdem das Geschütz in die Richtung gebracht ist, wird für das weitere Schießen beim Richten mit dem Zielfernrohr ein rückwärtiges Hilfsziel

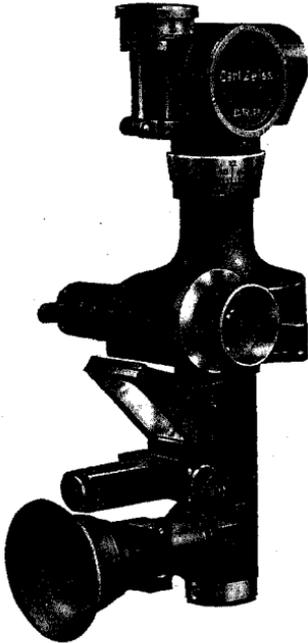


Abb. 154. Ein Rundblickzielfernrohr.

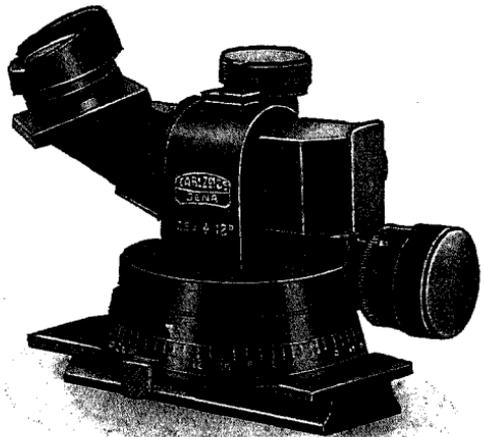


Abb. 155. Ein Doppelblickzielfernrohr.

benutzt, da der Ausblick nach vorn durch den Schutzschild beschränkt ist.

Daher ist das Rundblickfernrohr (S. 65) hier als Zielfernrohr (KORRODI 1902) besonders geeignet (Abb. 154). Es hat meist vierfache Vergrößerung, 10° Gesichtsfeld und 4 mm Austrittspupille. Durch Kippung des Objektivprismas mit Schneckentrieb läßt sich die Visierlinie in meßbarem Betrage um $\pm 15^\circ$ neigen. Für die Seitendrehung des ganzen Oberteils dient eine mit Exzenter auslösbare Schnecke mit Feinablesung neben der Grobablesung für die Seitenwinkel. Um die Rohrerhöhung für die Schußweite einstellen zu können, sitzt das Zielfernrohr meist auf einer bogenförmigen Aufsatzstange, die in einer gleichgebogenen Führungsbuchse nach einer Entfernungsteilung verschoben wird; das Rohr ist richtig erhöht, wenn eine Libelle am Aufsatz einspielt; Feldgeschütze

werden jetzt meist für unabhängige Visierlinie (S. 119) eingerichtet. Eine Querlibelle am Rundblickfernrohr läßt erkennen, ob der Aufsatzbogen zur Ausschaltung des schiefen Räderstandes in eine senkrechte Ebene gestellt ist. Für Gebirgsgeschütze findet an Stelle des Rundblickfernrohrs auch das kleinere Doppelblickzielfernrohr (Abb. 155) auf Seiten-

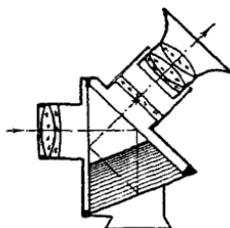


Abb. 156. Ein Zielfernrohr für Flugabwehrgeschütze.

richtkreis Verwendung; der Einblick ist ganz oder schräg seitlich von oben; das Objektivprisma ist um eine horizontale Achse um 180° umschaltbar, in der einen Stellung dient es für direktes Richten nach vorn, in der anderen für indirektes Richten. Beim Ausrichten von Luftzielen geben geradsichtige Zielfernrohre eine unbequeme Kopfhaltung; bei Flugabwehrgeschützen verwendet man daher Prismenzielfernrohre mit geneigtem Einblick (Abb. 156); noch besser ist ein liegendes Rundblickfernrohr,

bei dem das Okular horizontal gehalten wird, während der Objektivkopf vermöge seiner Drehbarkeit um die Achse des Fernrohrgehäuses an der Höhenkippfung des Aufsatzes teilnehmen kann; die Kippung des Objektivprismas um die andere Achse dient zur Einstellung der Seitenverbesserung für Bewegungen des Ziels und dergleichen. Da die Aufsatzverstellung weniger als 90° beträgt, kann als Zielfernrohr mit festem Okular auch ein solches ohne Wendeprisma dienen, bei dem ein einfacher Spiegel oder ein 90° Winkelspiegel in der Vertikalebene ge-



Abb. 157. Ein geradsichtiges Zielfernrohr mit veränderlicher Vergrößerung.

kippt wird. Die Ablesung der Aufsatzteilung im Gesichtsfeld des Zielfernrohrs ist bisher nicht eingeführt worden, ebenso nicht der Vorschlag, die Ausgleichung des schiefen Räderstandes dadurch zu bewirken, daß die Visierlinie entsprechend Radstand und Rohrerhöhung verstellt wird.

Auf Schiffen werden mit Vorliebe Zielfernrohre mit veränderlicher Vergrößerung verwandt, bei denen durch Verschieben der Umkehrlinse die Vergrößerung von dem niedrigsten bis auf den 3mal, neuerdings selbst 5mal höheren Wert gesteigert werden kann (Abb. 157), die Vergrößerung war bisher 3—9fach für leichte, 5—15fach für mittlere und 7—21fach für schwere Artillerie. Zuweilen ist noch am Objektivende ein umschaltbares Linsensystem zum Aufsuchen des Ziels vorhanden, mit dem die Vergrößerung auf 1—3fach herabgesetzt werden kann. Bei den Kasemattgeschützen muß das Fernrohr genügend lang gewählt werden,

damit es bis dicht an die Scharte reicht (Schartenzielfernrohr). Vielfach ist je ein Zielfernrohr für die Seiten- und Höhenrichtung in gemeinsamem Lager vorhanden, von denen das eine durch ein Ablenkungsprisma für seitlichen Einblick eingerichtet ist (Abb. 158); auch wird wohl durch einen umschaltbaren halbdurchlässigen Spiegel ein Teil der Lichtstrahlen in ein seitliches Kontrollokular geleitet.

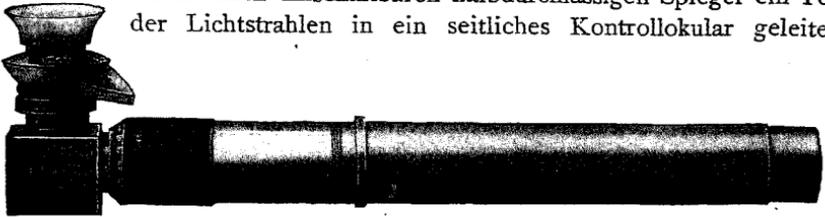


Abb. 158. Ein winkelsichtiges Zielfernrohr mit veränderlicher Vergrößerung.

Die Zielfernrohre für die Schiffsgeschütze sind mit Gummiaugenmuscheln bei verhältnismäßig kleinem Augenabstand von 2—3 cm ausgerüstet, der großes Gesichtsfeld ermöglicht; noch besser ist der Doppelaugenschutz mit einer Blindmuschel für das unbenutzte Auge. Ferner sind gewöhnlich auswechselbare Farbgläser auf einer Drehscheibe am Okular angeordnet. Ebenso wie die für Landgeschütze sind sie für seitliche Beleuchtung des Fadenkreuzes eingerichtet.

4. Die Prüfung der Parallelität von Visierlinie und Seelenachse des Geschützes.

Zunächst handelt es sich darum, die Seelenachse des Geschützes festzulegen. Als solche wollen wir die Verbindungslinie von Mündungs- und Ladungsraummitte ansehen; ob die Wahl anderer Stellen des Rohrs zweckmäßiger ist, mag unerörtert bleiben, da dies das Wesen der Prüfeinrichtung nicht berührt. Früher benutzte man dazu ein sogenanntes Seelenfernrohr, das mit passenden Kaliberringen genau zentrisch in den Ladungsraum eingesetzt wird; es ist in einem zentrischen Kugelkopf drehbar und kann so mit seinem Fadenkreuz auf ein Fadenkreuz eingerichtet werden, das zentrisch in den Mündungsraum eingesetzt ist. Nachdem so die Visierlinie des Seelenfernrohrs in die Geschütze Seele gebracht ist, wird sie mit der Richtmaschine des Geschützes auf ein Fernziel gerichtet, dann muß auch das Zielfernrohr auf dies Fernziel einstehen; anderenfalls wird seine Visierlinie, gewöhnlich durch Querverschiebung des Objektivs, berichtigt. Wenn ein geeignetes Fernziel fehlt, benutzt man eine Tafel in 10—50 m Abstand senkrecht zur Visierlinie, auf der die Höhen- und Seitenversetzung des Zielfernrohrs gegen die Seelenachse vermarktet ist. Das Linsenjustiergerät verlangt weniger Sorgfalt in der Herstellung und Behandlung; sein Mündungseinsatz trägt eine zentrische einfache Linse als Objektiv, sein Ladungsraumeinsatz eine

Feldlinse mit zentrischem Fadenkreuz, die die Austrittspupille ein wenig hinter das Bodenstück verlegt; es wird so das Geschützrohr in ein Fernrohr verwandelt. Bei der großen Objektivbrennweite kann meist auf Okularvergrößerung verzichtet werden. Für die verschiedenen Geschützarten braucht man natürlich verschiedene Einsätze. Die richtige Aufstellung der Tafeln an Bord der Schiffe bietet erhebliche Schwierigkeiten. Man ist daher dazu übergegangen, die zu vergleichenden Visierlinien durch optische Parallelverschiebung zusammenzubringen. Dazu dient das Vorsatzrohr (Abb. 159) nach STRAUBEL mit einem Zentralspiegel (S. 109), der unabhängig von Verkippungen die Strahlen parallel zur Einfallsrichtung zurückwirft. Das Linsenjustiergerät wird nun (Abb. 160) durch Beleuchten des Fadenkreuzes von hinten in einem Kollimator verwandelt, der die von der Kreuzmitte ausgehenden Strahlen parallel aus dem



Abb. 159. Das Vorsatzrohr nach STRAUBEL.

Objektiv treten läßt. Die Strahlen werden weiter durch den Zentralspiegel parallel versetzt und in das Zielfernrohr gesandt, in dessen Brennebene das Fadenkreuzbild bei richtiger Lage des Zielfernrohrs auf dessen Fadenkreuz eintreten muß. Damit das Vorsatzrohr zur Überbrückung verschiedener Abstände des Zielfernrohrs von der Seelenachse geeignet ist, besteht es (Abb. 161) aus der scherenartigen Verbindung eines Rohrs, das den Zentralspiegel enthält, mit einem Rohr, das einen Rhombusspiegel enthält; die Versetzung der Strahlen geschieht so in zwei Stufen; nach der ersten verlaufen sie in Richtung der Scherenachse. Verkippungen des Vorsatzrohrs infolge ungenauer Befestigung auf der Mündung stören die Parallelversetzung nicht; es können dadurch nur einseitige Ablendungen der Strahlen eintreten, die sich in ungleich-

mäßiger Beleuchtung des Gesichtsfelds verraten und nur indirekt bei unzulässiger Parallaxe der Fadekreuzе kleine Fehler hervorrufen könnten. Die Befestigung der einzelnen Spiegel der Gruppe, die den Zentral-

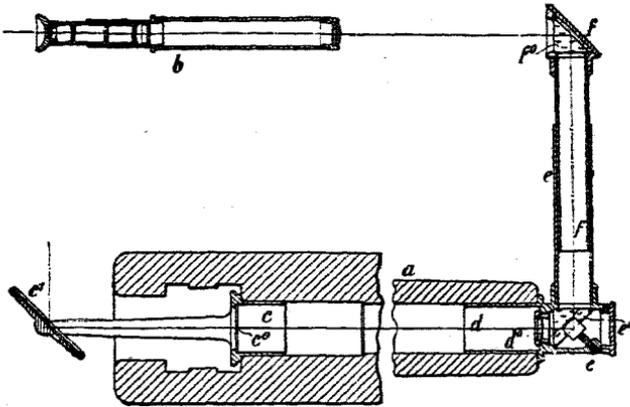


Abb. 160. Die Prüfung der Parallelität von Visierlinie und Seelenachse des Geschützes.

bzw. Rhombusspiegel bilden, an dem tragenden Rohr muß allerdings derart sein, daß ihre gegenseitige Lage in der Gruppe durch Verbiegungen infolge mechanischer und thermischer Einflüsse und durch Erschütterungen nicht verändert wird. Die Paralleljustierung mit dem Zentralspiegel wird auch sonst vielfach angewendet (siehe z. B. Abb. 229); bei kleineren Versetzungen wird er zweckmäßig durch ein einziges Prisma verkörpert. Von seinem Erfinder BECK (1887) wurde er für die Bestimmung des Kollimationsfehlers beim Durchgangsinstrument empfohlen. Fernrohre in größerem Querabstande auf schwankendem Schiff können noch in folgender Weise nach einem Fernziel parallel gerichtet werden. Um gleichzeitig die Lage des Zielbilds zu einem Fadennetz in jeder Brennebene zu beobachten, wird in den Gesichtsfeldern gleichzeitig ein Lichtsignal gegeben. Arbeitet man nachts mit einem fernen Scheinwerfer als Ziel und mit erleuchtetem Fadennetz, so kann das Signal darin bestehen, daß man die Fadennetze gleichzeitig oder den Scheinwerfer kurz aufleuchten läßt. Statt die Lage des Bildes im Netz zu beobachten, kann man sie auch photographieren.

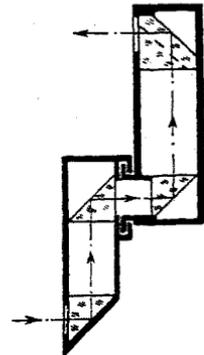


Abb. 161. Die optische Einrichtung des Vorsatzrohrs.

5. Die Genauigkeit des Zielens.

Die erreichbare Genauigkeit wird bei der Verwendung des Fernrohrs zum Richten und Winkelmessen durch vielerlei Umstände herabgesetzt, deren gesonderte Feststellung bei der praktischen Benutzung des Fernrohrs nicht leicht ist. Für diese Auf-

gabe legt man daher einfache, wohlbestimmte Verhältnisse zugrunde. Bei den neueren Untersuchungen handelte es sich somit um Einstellung von einfachen und doppelten dunklen Fäden auf schwarze bzw. weiße Rechtecke (Striche), Dreiecke und Kreise auf weißem bzw. schwarzem Grunde. Bei dieser Mitteneinstellung ist ein systematischer, konstanter Fehler und ein zufälliger, der mittlere Fehler der Einstellung, zu unterscheiden. Der erste Fehler ist zugleich meist ein persönlicher und mit der Zeit etwas veränderlich. Er ist vielfach für die beiden Augen entgegengesetzt, bei beidäugigem Sehen nähert er sich dem Mittel. Er kann für horizontale und vertikale Hälfte verschieden sein; bei vertikaler scheint durchweg die obere Hälfte zu klein gemacht zu werden; man sehe eine gedruckte 8 nach Drehung um 180° an. Der Fehler kann für Rechtecke und Kreise verschieden sein. Bei Kreisen werden die Verhältnisse dadurch verwickelt, daß man entweder auf Gleichheit der Kreisabschnitte oder, ungenauer, auf Symmetrie, d. h. Durchschneiden des höchsten bzw. am meisten seitlich gelegenen Punktes des Umfangs einstellen kann, und man sich von dem Mitwirken der zweiten Beurteilung schwer ganz frei macht. Dieser Fehler wird durch eine quadratische Funktion der Breite des zu teilenden Intervalls dargestellt und wächst meist in abnehmendem Maße mit dieser Breite. Bei Doppelfäden ist er naturgemäß am kleinsten, wenn sich der Fadenabstand der Breite nähert. LABITZKE fand keinen Unterschied, ob er mit schwarzem oder weißem Faden oder mit anderer Farbe des Grundes beobachtete, wenn sich nur der Faden genügend vom Hintergrund abhob. Bei Sternen hängt der Fehler noch von der Helligkeit der Sterne ab (sogenannte Helligkeitsgleichung); GROSSMANN erzeugte daher durch eine Lamelle vor dem Objektiv ein lineares Beugungsspektrum von hellen Sternen und stellte auf diese Lichtlinie ein. Der konstante Fehler spielt besonders eine Rolle, wenn der Abstand von Streifen verschiedener Breite gemessen werden soll; wo es möglich ist, wie bei der Ausmessung von Platten, beseitigt man den Fehler durch eine zweite Messung nach Drehen der Platte um 180° ; sonst dreht man mit dem Wendeprisma das Bild um 180° , allerdings ist bei Einstellung von rechts und links der Fehler etwas verschieden.

Den zufälligen Fehler fand LABITZKE bei hellen Strichen größer als bei hellen Kreisen; für Doppelfäden mit größerem Abstand als das Intervall dagegen bei Kreisen größer als bei Strichen. Ob dieser Fehler bei horizontaler oder vertikaler Hälfte größer ist, wechselt mit dem Beobachter. Der Fehler kann durch passendes Verhältnis zwischen Fadendicke und Intervallbreite sehr verringert werden; man wählt diese so nahe gleich, als die Beleuchtung zuläßt. Bei sehr heller Beleuchtung eines Streifenausschnitts von 8,5' Breite mit durchfallendem Azetylenlicht konnte NOETZLI einen Faden, dessen Dicke 99,6% dieser Breite betrug und der unmittelbar vor dem Streifen verschoben wurde, ohne Fernrohrvergrößerung mit der erstaunlichen Genauigkeit von 0,02" auf Mitte einstellen; bei auffallendem Sonnenlicht fand er 0,3" für das Verhältnis 87% und 1,8' Breite. Ebenso stellt man mit dem Doppelfaden am genauesten ein, wenn sein Abstand sich der Gegenstandsweite nähert; verglichen mit einem einfachen Faden ist er aber für erheblich größere und kleinere Breiten ungenauer. Bei kleinen Intervallen wird mit ruhendem Auge verglichen, bei größeren mit bewegtem Auge und dann auch genauer als mit ruhendem Auge. Die Grenze der Breite ist wohl bei den einzelnen Beobachtern verschieden; NOETZLI findet, daß die Grenze bei einer scheinbaren Breite von etwa $1,1^\circ$ liegt. Nach ihm gilt für kleinere Breiten die REINHERTZsche Formel, daß der Fehler bei gleicher scheinbarer Fadenstärke \sqrt{l} proportional ist, für größere Breiten sei er l proportional. Auch LABITZKE findet, daß für größere Breiten der Fehler stärker als mit \sqrt{l} ansteigt, wenn auch nicht so einfache Verhältnisse. Die scheinbare Fadenstärke selbst spielt in den Grenzen von 1' bis 10' bei gleich günstigen Zielverhältnissen keine Rolle; nur ermüden zu dünne Fäden das Auge. Muß auf eine und dieselbe Marke in verschiedenen Entfernungen gerichtet werden, so ist die Keilform am günstigsten, indem man an der Stelle des günstigen Verhältnisses zwischen Fadenstärke und Intervall beobachten kann. Das gleichseitige Dreieck gibt verglichen mit einem parallelen Streifen von

günstiger Breite nur etwa halbe Genauigkeit; man wählt daher möglichst spitze Keile. Bei solchen Dreiecksmarken wurde die Abnahme der Zielgenauigkeit mit der Entfernung kaum anders gefunden als bei jeweilig günstigsten Marken. Um die Abhängigkeit der Genauigkeit von der Fernrohrvergrößerung unverfälscht zu erkennen, verschob NOETZLI den Faden unmittelbar vor der Zielmarke; das Fernrohr steigerte nur die Sehschärfe. Um die Verschiebung nahe beim Fernrohr bewirken zu können, wurde das Zielbild durch einen entfernten Spiegel in das Fernrohr zurückgeworfen. Seine Entfernung wurde proportional der Fernrohrvergrößerung gewählt, so daß nicht nur das Verhältnis von Fadenstärke und Intervall, sondern auch die scheinbare Fadenstärke dieselbe blieb. Innerhalb der Vergrößerungsgrenzen 1—78 fand er so die Genauigkeit der Vergrößerung V proportional. Befand sich aber der Faden in der Bildebene des Fernrohrobjektivs, so fand er die Genauigkeitssteigerung geringer, für stärkere Vergrößerungen als 10 nur \sqrt{V} proportional, obwohl nur auf kurze Entfernungen unter 20 m beobachtet wurde, um Störungen durch ungleich erwärmte Luft einzuschränken; das Verhältnis zwischen Fadenstärke und Intervall war immer das günstige. Aus dem abweichenden Gesetz wird man schließen, daß noch verschiedene Fehlerquellen mitwirken; als solche kommen in Betracht die Fadenparallaxe, der Faden als räumliches Gebilde, Unregelmäßigkeiten an Faden und Zielmarke, Bewegungen der Instrumente und der Luft. Wie wir für die Fadenparallaxe S. 115 fanden, ist augenseitig der Winkelfehler $\zeta = K \sqrt{V}$, er nimmt also dingsseitig mit der Vergrößerung ab wie der Einstellfehler. Da man das Auge möglichst in die Achse bringt, so wird der Fehler freilich nur ein Bruchteil von ζ sein. Für die Erklärung des Einstellfehlers ist aber nicht viel gewonnen; bei der Beziehung zwischen ζ und V spielen auch die übrigen aufgezählten Fehlerquellen eine Rolle, deren Abhängigkeit von der Vergrößerung schwer festzustellen ist; bei einigen ist man geneigt, den augenseitigen Fehler als konstant anzusehen; besteht die Wirkung der kleinen eben merklichen Schwingungen infolge der Luftunruhe nur in einer Verbreiterung der Zielmarke, so würde er hier mit \sqrt{V} wachsen. ENGI fand bei einem 30fachen Fernrohr mit einem Objektiv von $D = 30$ und $F = 240$ mm einen kleinsten Zielfehler von $0,187''$ und ein Ansteigen des Zielfehlerquadrats proportional der Parallaxe, und zwar 1 Sek.² für 1 mm Fadenverschiebung in der Achse. Weiter fand er, wenn er nur wenig von der Einstellung des Okulars auf scharfen Faden abwich, daß sowohl die Genauigkeit der Einstellung des Fadens auf Parallaxenfreiheit als auch, wenn der Faden in der besten Stellung belassen wurde, die Genauigkeit des Zielens beeinträchtigt wurde.

Bei Zielungen auf trigonometrische Signale unter normalen äußeren Verhältnissen fand NOETZLI die Steigerung der Zielgenauigkeit durch die Vergrößerung im allgemeinen noch geringer; je nach dem Grade der Luftunruhe erreicht man früher oder später die Grenze der nutzbaren Vergrößerung. Die Abnahme der Schärfe des Bildes, wie sie nach dem Rande des Gesichtsfelds eintritt, macht sich bei kleiner scheinbarer Intervallgröße mehr bemerkbar. Nach den Versuchen auf kurze Entfernungen wird bei gleicher Vergrößerung mit der Austrittspupille von 1 mm am genauesten eingestellt; bei größerer Pupille wirken die Fehler des Auges, gegebenenfalls auch die des Fernrohrs mit, bei kleinerer stört die Beugung. Auf größere Entfernung bei natürlichen Zielen spielt aber die Helligkeit des Fernrohrs eine wichtige Rolle und drängt zu größeren Pupillen. Der mittlere Zielfehler auf entfernte trigonometrische Signale wurde bei 20—30facher Vergrößerung zu etwa $0,5''$ gefunden. Dieser Fehler kann aber durch Auffassungsfehler übertroffen werden; solche entstehen besonders durch Beleuchtung aus anderer Richtung bei wechselndem Sonnenstande, wenn z. B. die Zielfläche aus Teilen besteht, die verschieden gegen die Visierlinie geneigt sind; dabei ist außerdem der Hintergrund maßgebend, ob die dunklen oder hellen Teile in der Auffassung überwiegen; nur bei völlig schwarzen Zielen, auf hellem Grunde und bei ebenen Zielen tritt der Fehler nicht auf. Auch bei breiten Zielen, deren Helligkeit nach der einen Seite gleichmäßig wächst, verschiebt sich die Mitteneinstellung nach dem Lichtschwerpunkt; man hat daher versucht, den oben besprochenen konstanten Fehler durch ungleiche Lichtdurchlässigkeit in dem Wall der Netzhautgrube zu erklären; eine

Entscheidung für diese Auffassung geben aber die Beobachtungen nicht. Ferner können Unsymmetrien in der Umgebung des Ziels einen konstanten Fehler hervorrufen. Schon GAUSS stellte fest, daß er ein zur Turmlaterne exzentrisches Heliotropenlicht mit Doppelfaden um einen festen Betrag falsch anschnitt, nur wenig mit einfachem Faden. Wie verschiedenartige Fehlerquellen bei scheinbar einfachen Verhältnissen zu berücksichtigen sind und was eine verfeinerte Meßkunst in der Reinigung ihrer Ergebnisse von diesen leisten kann, dafür bieten die Doppelsternmessungen ein gutes Beispiel; wir erwähnen nur, daß dabei die persönlichen Fehler der Beobachter an künstlichen Doppelsternen festgestellt wurden.

Auf die Parallaxe ist hier nochmals einzugehen. Wird ein Lichtpunkt unscharf gesehen, so erscheint infolge der Fehler des Auges, besonders der Kristalllinse, der Lichtfleck in unregelmäßiger Begrenzung und Lichtverteilung. In der Auffassung des Ortes des Flecks werden sich um so größere systematische Fehler zeigen, je breiter der Fleck ist. Blickt man z. B. nach dem Spiegelbild des Auges, das von einem 90° -Winkelspiegel geliefert wird (am besten durch ein Prisma verkörpert), so sollte die Schnittkante der beiden Spiegel das Augenbild halbieren; bei den meisten Beobachtern zeigen sich aber kleine Abweichungen; die Kante wird ja nicht gleichzeitig mit dem Augenbild scharf gesehen. So erklären sich auch einseitige Fehler beim Zielen über Kimme und Korn.



JOSEPH FRAUNHOFER

geb. am 6. März 1787 in Straubing, gest. am 7. Juni 1826 in München.

B. Die Mikrometer.

1. Die Fadenmikrometer.

Besondere Einrichtungen zur Messung kleiner Winkel nennt man Mikrometer (Feinwinkelmesser). Die einfachste Form besteht in einer Glasteilung in der Brennebene des Fernrohrobjektivs; ihr Maßstab steht zweckmäßig in einem solchen Verhältnis zur Brennweite des Objektivs, daß der Teilstrichabstand einem runden dingseitigen Winkelwert in Winkel-, Bogen- oder Tangensmaß entspricht; Bruchteile werden geschätzt. Statt der Glasteilung können auch Einschnitte in die Gesichtsfeldblende oder darüber gespannte Fäden benutzt werden. Ein Netz in Rechteckform dient zur Messung in rechtwinkligen Koordinaten, ein solches in Form von Kreisen und Durchmessern zur Messung von Polarkoordinaten. Mit einem solchen kann man auch die Richtung und Geschwindigkeit der Bewegung eines Ziels messen; am Anfang der Meßzeit wird die Mittelmarke auf das Ziel eingerichtet, dann läßt man das Zielbild bei unveränderter Visierlinie auslaufen und beobachtet, bis zu welcher Stelle des Netzes es am Ende der Meßzeit gelangt ist; zur Erleichterung der Ablesung kann man während der Meßzeit eine gegen die

Teilung bewegliche Hilfsmarke dem Zielbild nachführen. Man kann auch ohne Netz eine Hilfsmarke oder besser eine Reihe miteinander verbundener Marken mit regelbarer und meßbarer Geschwindigkeit in der Bewegungsrichtung des Zielbilds verschieben und so die Geschwindigkeit des Zielbilds unmittelbar messen, indem man ihr die der Marke gleich macht. Bei dem Fadenbild-(Ghost-)Mikrometer wird in der Brennebene des Fernrohrobjektivs ein helles Fadenbild entworfen.

In der Astronomie mißt man die gegenseitige Lage von zwei nahe- stehenden Gestirnen nach Rektaszension und Deklination durch die Zeiten ihrer An- und Austritte an geraden oder kreisförmigen Linien in der Brennebene. Wir erwähnen nur das Lamellenmikrometer mit einem drehbaren dunklen Streifen, das Kreuzstabmikrometer mit zwei sowie das Rautenmikrometer mit vier festen Lamellen und das Ringmikrometer mit einem breiten dunklen Ring.

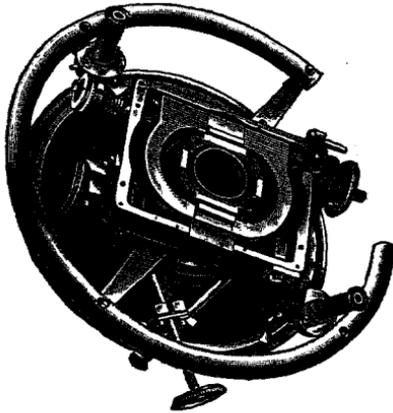


Abb. 162. Ein Positionsmikrometer von REPSOLD.

Das von GASCOIGNE 1640 erfundene Schraubenmikrometer ist in der einfachsten Form mit einem festen und einem parallel dazu mit einer Schraube verschieblichen Faden ausgerüstet. Da die Verschiebung in Vielfachen und Teilen der Schraubenumdrehung gemessen wird, muß entweder die Schraube mit einer für den Zweck genügenden Genauigkeit arbeiten, oder es müssen ihre Fehler bestimmt werden. Man unterscheidet fortschreitende und mit der Ganghöhe periodische Fehler. Zur

Ausschaltung der letzten Fehler wird die Messung an verschiedenen gleichmäßig über einen Schraubengang verteilten Stellen wiederholt; zu dem Zweck ist entweder der feste Faden oder das Widerlager der Meßschraube verschiebbar. Um den toten Gang, den Unterschied der Messungen, der auf den Wechsel der Drehrichtung zurückzuführen ist, zu beseitigen, läßt man Spiralfedern ihm entgegenwirken, außerdem macht man die letzten kleinen Drehungen für die Einstellung im Sinne des Zusammenpressens der Federn. Läßt sich das Schraubenmikrometer noch meßbar um die Fernrohrachse drehen, so nennt man es ein Positionsmikrometer; in dem Mikrometer nach Abb. 162 ist Grob- und Feindrehung für den Kreis mit Lupenablesung vorgesehen; der größeren Längenmeßschraube mit Trommelteilung gegenüber befindet sich eine kleinere Meßschraube zur Verstellung des Widerlagers; eine dritte parallele Schraube dient zur Verschiebung des Mikrometerkastens. Zum Registrieren der Messungen können Zähl-scheiben mit vorstehenden

Strichen und Zahlen dienen, von denen mit einem angedrückten Papierstreifen ein Abdruck genommen wird. Für die Beobachtung des Durchgangs von Sternen durch den Meridian ist noch das sogenannte unpersönliche Mikrometer von REPSOLD zu erwähnen; der Faden wird dabei dauernd auf dem Sternbild gehalten und mit Hilfe von elektrischen Kontakten, die gleichmäßig (abgesehen von Abweichungen, um z. B. die Kontakte zu unterscheiden) auf den Umfang der Meßschraube verteilt sind, die Zeit, wo das Sternbild an bestimmten Stellen des Gesichtsfelds

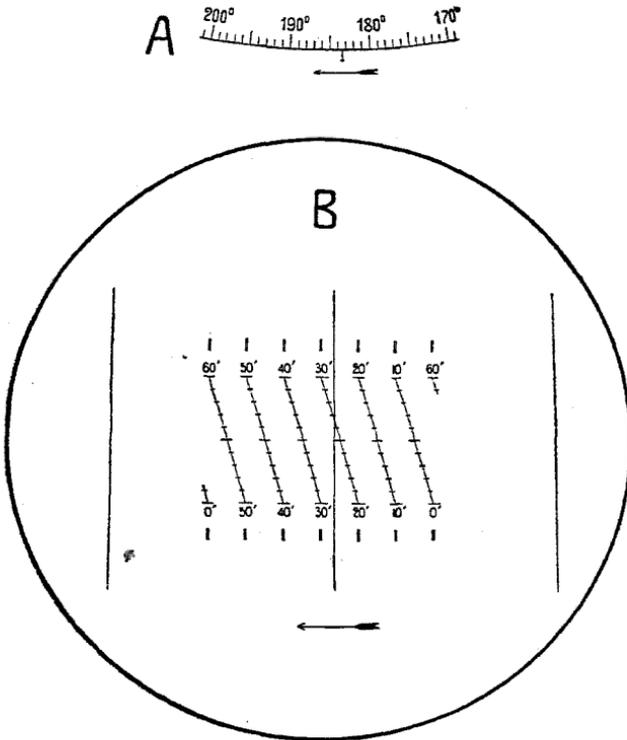


Abb. 163. Der optische Meßkeil.

angekommen ist, auf einem Zeitschreiber verzeichnet. Statt der Schraube können auch andere Mechanismen zur Fadenverschiebung dienen, die ihr an Genauigkeit aber nicht gleichkommen. Ein einfacher, wenn auch nicht vollgültiger Ersatz für das Schraubenmikrometer ist der bis auf HUYGENS zurückgehende optische Meßkeil, der aus zwei gegeneinander geneigten Meßfäden besteht, zu denen die Ablesestriche quer verlaufen (Abb. 163). Zur Einstellung wird das ganze Fernrohr gerichtet oder die Meßplatte verschoben, bis die zu messende Größe gerade zwischen die Meßfäden paßt; statt in der Teilung abzulesen, kann auch diese Bewegung

zur Messung benutzt werden, an deren Genauigkeit hier nur geringere Anforderungen gestellt werden. An die Stelle der Verschiebung des Meßkeils kann auch die Drehung einer Glasplatte mit Spirallinie und Mittelpunkt treten, wo die Radienvektoren die stetige Folge der Meßstrecken darstellen.

Da der Winkelwert des Fadenabstands durch die Brennweite des Objektivs mitbestimmt wird, kann man statt dieses Abstands auch die Brennweite in der S. 60 besprochenen Weise verändern und, wie schon RÖMER um 1690 tat, zur Messung benutzen. Endlich kann man die Fadenverschiebung durch eine optische Verschiebung des Bildes des Gegenstands oder auch, falls ein Fadenbild zur Einstellung benutzt wird, dieses Bildes ersetzen. In manchen Fällen ist es dabei vorteilhaft, mit einem festen und einem beweglichen Fadenbilde zu arbeiten oder nur den Teil des Bildes des Gegenstands zu bewegen, der auf den einen Faden fällt, da so gleichzeitig beide Einstellungen beobachtet werden können. Die optische Verschiebung erreicht man durch Ablenkung oder Parallelversetzung der Strahlen, worauf bei den Bilderpaarmikrometern noch näher eingegangen wird.

2. Der Strahlengang sowie die Abbildungs- und Auffassungsfehler bei Messungen.

Das Ergebnis der gereinigten Messung wird durch die Lage der Schwerpunkte der zu vergleichenden Bildflecke in der Einstellebene bestimmt. Dabei soll der Schwerpunkt durch die Begrenzung des Bildflecks und die Lichtverteilung in ihm gegeben sein; die Berechnung seiner Lage stößt auf Schwierigkeiten, sie ist aber durch die gemessene Lage des Bildflecks gegeben, wenn bei ihr die Auffassungsfehler, insbesondere die persönlichen Fehler, und die Fehler der Abbildung des Bildflecks auf die Netzhaut durch geeignete Anordnung der Messungen ausgeschaltet sind. Wir nehmen zunächst an, daß die Büschel, die die Einstellebene durchsetzen, einen Vereinigungspunkt, achsensymmetrische Öffnung und gleichmäßige Lichtverteilung haben. Dann ist die Lage des Schwerpunkts durch den Durchstoßungspunkt des Hauptstrahls in der Einstellebene gegeben; dieser Punkt ist für einen Dingpunkt bestimmt durch dessen Abstand von der Achse und Achsenabstand von der Eintrittspupille, durch den Abstand der Einstellebene und der Meßmarkenebene, die beide der Bildfläche nahe liegen und senkrecht zur Achse sein sollen, von der Austrittspupille, durch das Konvergenzverhältnis in den Pupillen und durch die etwa vorhandene Verzeichnung. Nur wenn Einstell- und Meßmarkenebene im Scheitel der Bildfläche zusammenfallen und das Bild frei von Verzeichnung ist, bestimmt die GAUSSISCHE Abbildung das Meßergebnis. Fallen Einstell- und Meßmarkenebene zusammen, weichen aber um $\pm a$ gegen den Abstand x der Bildebene von der Austrittspupille ab, so wird, wie Abb. 8 zeigt, das Bild im Verhältnis $1 \pm (a:x)$

größer gemessen; die Abweichung ist für eine Hauptstrahlneigung ω' gleich $a \operatorname{tg} \omega'$. Man erkennt also, daß dieser Fehler nur außer der Achse auftritt und auch dort dadurch ausgeschaltet werden kann, daß $x = \infty$ gemacht wird, d. h. die Hauptstrahlen müssen auf der Bildseite parallel sein, der Strahlengang muß hier nach der Bezeichnung *ABBES* telezentrisch sein. Da die Anbringung einer Öffnungsblende im vorderen Brennpunkt meist nicht zugänglich ist, erreicht man dies am einfachsten dadurch, daß dicht vor der Bildebene eine Feldlinse eingefügt wird, deren Brennweite gleich ihrem Abstände von der Austrittspupille des Objektivs ist. Sind Objektiv und Feldlinse dünne Linsen, und liegt die Öffnungsblende im Objektiv, so haben die Einzelbrennweiten f_1 und f_2 und der Abstand A dieser Linsen sowie die Gesamtbrennweite F den gleichen Wert. Aus der Formel $F = f_1 f_2 : (f_1 + f_2 - A)$ ergibt sich nun, daß in diesem Falle kleine Änderungen von f_1 und f_2 etwa mit der Temperatur bis auf Größen zweiter Ordnung ohne Einfluß auf F sind, und daß F einzig durch A , die Rohrlänge und ihre Änderung mit der Temperatur bestimmt ist. Das gebräuchliche Mittel, um das Zusammenfallen von Marken- und Bildebene zu erkennen, besteht in dem Verschwinden der S. 115 behandelten Parallaxe, der seitlichen Verschiebung von Bild und Marke, die bei seitlicher Bewegung des Auges vor dem Okular auftritt. Daß man in vielen Fällen von der Herstellung des telezentrischen Strahlengangs absehen kann, liegt daran, daß bei genauen Messungen der Gesichtsfeldwinkel des Meßbereichs meist klein gegen den Öffnungswinkel ist und so Bild- und Markenebene genügend genau zusammengebracht werden können. Fällt die Einstellenebene nicht mehr mit der Markenebene zusammen, so bleibt die Messung in der Markenebene richtig, wenn Marke und Bildpunkt Strahlenbüschel von gleicher Lage, Öffnung und Lichtverteilung in das Auge senden. Dies ist z. B. der Fall, wenn sich die Marken im Schattenriß auf dem Bild des selbst oder diffus leuchtenden Gegenstands abzeichnen, oder Marke und Gegenstand sich so von einer gleichmäßig leuchtenden Fläche wie dem Himmel als Hintergrund abheben, nicht aber immer, wenn die Marken durch Brechung, Spiegelung oder Beugung das Licht ablenken und so gewissermaßen selbstleuchtend werden, oder wenn die Marken durch Markenbilder ersetzt sind, oder wenn der Gegenstand in dunkler Unterbrechung einer Spiegelfläche besteht. In diesen letzten Fällen muß durch geeignete Anordnung der Beleuchtung dafür gesorgt werden, daß die Schwerlinien der Büschel, die von den Marken und von den von ihnen gedeckten Bildpunkten ausgehen, zusammenfallen. Auch dann können noch bei verschiedener Öffnung der Bündel durch Abbildungsfehler des Okulars und des Auges die Messungen verfälscht werden. Man kann dem nur mit Hilfe einer wirklichen Blende in der Austrittspupille begegnen. Diese Abbildungsfehler verfälschen übrigens erst recht die Messung, wenn die erwähnten Schwerlinien nicht zusammenfallen.

3. Die Bilderpaarmikrometer.

Die Messung mit den Fadenmikrometern ist erschwert oder unmöglich, wenn sich der Beobachter auf schwankendem Fahrzeug befindet, wenn freihändig gemessen wird, wenn sich das Ziel ungleichförmig bewegt oder durch die Luftunruhe in scheinbarer Bewegung ist, und wenn ähnliche Störungen wirken. Auch wenn man das Richtfernrohr ohne Fadenkreuz (S. 116) als Mikrometer ausbildet, indem man seine beiden Bilder gegeneinander verstellt, sei es daß die nur zu einem Fernrohr gehörenden Teile verstellt werden, sei es daß besondere optische Mittel zur Verschiebung des einen Bilds gegen das andere dienen, bleibt in den erwähnten Fällen die Messung erschwert. Eine Anwendung dieses Mikrometers in Kreuzung mit dem noch zu besprechenden Raumbildmikrometer zeigt der PULFRICHsche Entfernungsmesser mit verdoppelter Standlinie (S. 173).

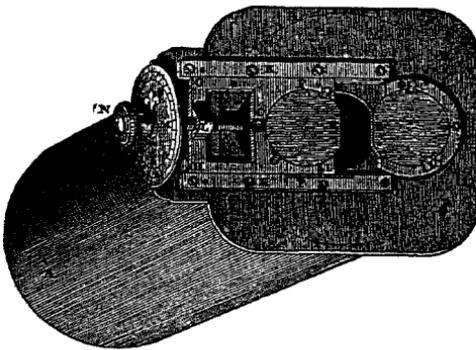


Abb. 164. BOUGUERS Heliometer.

SAVERY suchte 1743 die Winkelgröße der Sonne dadurch zu messen, daß er zwei von einer Linse abgeschnittene Segmente so nahe aneinanderschob, daß zwei Sonnenbilder dicht nebeneinander entworfen wurden, und nun den kleinen Abstand der zugekehrten Ränder mit dem Schraubenmikrometer maß, wobei die Einstellung auf beide Ränder mit einem Blick umfaßt werden konnte.

BOUGUER erkannte es 1752

als vorteilhaft, ohne mit den Fäden zu messen, die beiden Segmente meßbar gegeneinander zu verschieben, bis sich die Sonnenränder berührten (Abb. 164), da dann nur an einer Stelle die Einstellung zu beobachten ist; er führte den Namen Heliometer ein. Die Messung wird also bei richtiger Abbildung durch Schwankungen der optischen Achse gegen die Zielrichtung nicht verfälscht; im allgemeinen ist auch abgesehen davon die Genauigkeit gesteigert, da nur der Fehler einer Einstellung statt der zweier in die Messung eingeht. Ehe wir die Einrichtung der Bilderpaarmikrometer näher beschreiben, sollen zunächst die Art der Einstellung und die allgemeinen Bedingungen des Strahlengangs erörtert werden.

Die Einstellung auf Berührung bei flächenhaften Zielbildern, wie dem der Sonne, erfolgt durch Verschieben der Objektivteile in Richtung der Verbindungslinie ihrer hinteren Hauptpunkte; es kann nun entweder der linke Rand des einen Bilds auf den rechten des anderen oder der rechte des einen auf den linken des anderen eingestellt werden. Beim Über-

gang von der einen zur anderen Einstellung mißt man den doppelten Winkel und macht sich von der Feststellung des Nullpunkts der Verschiebung frei, die durch Einstellen auf Deckung nur ungenau erreicht wird. Die Genauigkeit der Einstellung auf Deckung kann durch das Blinkverfahren erhöht werden, wo dem Auge die beiden Bilder abwechselnd in rascher Folge gezeigt werden; zum Gebrauch im Freien ist es wenig geeignet. Man stellt zweckmäßig auf Berührung durch Schraubenbewegung in beiderlei Sinne ein, wenn der tote Gang ohne Einfluß oder klein genug ist. Handelt es sich um die Messung des Abstands von zwei Sternen m und n , so kann man eine der drei Anordnungen für Doppelmessung (Abb. 165) anwenden; die dritte ist bei ungleicher Helligkeit weniger zu empfehlen; ferner kommen die letzten beiden nur in Betracht, wenn die dem Auge dargebotenen Winkelabstände genügend klein sind.

Was den Strahlengang betrifft, so sind bei den Mikrometern mit einem Bilderpaar die beiden Grenzfälle hervorzuheben, gegenüber denen die Zwischenstufen nur unvollkommenere Abarten darstellen. Im ersten Fall, wie er bei BOUGUERS Mikrometer verwirklicht ist, gelangen von jedem Punkt des Gesichtsfelds die das eine und das andere Doppelbild erzeugenden Strahlen in gleichem, von der Gesichtsfeldstelle unabhängigem Verhältnis in das Auge; im zweiten Fall von jeder Stelle des Gesichtsfelds entweder Strahlen des einen oder des anderen Bilds in das Auge.

Im ersten Fall werden die Helligkeitsgegensätze im Bild durch Übereinanderlagern der hellen Stellen des einen über die dunklen des andern Bilds und Aufhellen der dunklen verringert (Abb. 176); wenn dies auch in vielen Fällen das Zurechtfinden erschwert, so wird die Einstellung auf Berührung von hellen bzw. dunklen Flächen besonders deutlich durch das Auftreten einer hellen bzw. schwarzen Berührungslinie. Im zweiten Fall sprechen wir von Halbbildern, auch wenn die Teile des Gesichtsfelds ungleich sind oder gar der eine Teil aus getrennten Stücken besteht, wir unterscheiden das Mikrometer als ein Halbbildermikrometer von dem Doppelbildmikrometer im ersten Fall. Entsprechend unserer Annahme stoßen die Halbbilder in einer scharfen Grenze, der Trennungslinie, zusammen. Wir setzen ein ebenes Bild und eine gerade Trennungslinie voraus. Es sind nun drei Fälle zu unterscheiden, 1. wo die Halbbilder ohne Verdrehung durch Teilung eines und desselben Bilds entstanden sind (Abb. 189), 2. das eine Bild

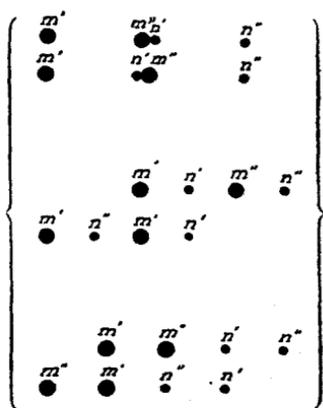


Abb. 165. Verschiedene Arten der Messung des Sternabstands mit Doppelbildern.

ist höhenverkehrt (Abb. 190), und 3. das eine Bild ist seitenverkehrt. In den beiden ersten Fällen erfolgt die Messung des Abstandes $m n$ dadurch, daß die Trennungslinie in die Verbindungslinie $m n$ gebracht wird und die Halbbilder parallel der Trennungslinie gegeneinander verschoben werden, bis m' genau über n'' oder m'' genau über n' einsteht, wenn die Halbbilder durch einfache und doppelte Striche unterschieden werden. Bei Zielen mit unregelmäßigen Grenzen ist der zweite Fall dem ersten vorzuziehen, da man dann nach oben oder unten gerichtete Spitzen des Zielbilds an die Trennungslinie heranzuführen und zur genaueren Einstellung benutzen kann. Im dritten Fall wird gemessen, indem die Halbbilder senkrecht zur Trennungslinie bewegt werden, bis sie symmetrisch zu ihr einsteht; er ist bislang nicht verwertet, man spricht daher im zweiten Fall kurzweg von dem einen Bild als Kehr- oder Reversbild. Um die Einstellung zu bewirken, werden bei den Mikrometern mit zwei Bildern die Strahlen da, wo sie getrennt verlaufen, parallel verschoben oder abgelenkt. Beim Doppelbildmikrometer geschieht dies am einfachsten in oder nahe der Eintrittspupille; wenn jedoch die Strahlen eines jeden Bilds einen Teil ihres Wegs getrennt durchlaufen, an beliebigen Stellen dieses Wegteils. Der Übergang vom getrennten zum gemeinsamen Weg und umgekehrt hat dabei ebenfalls in der Nähe der Eintrittspupille oder ihrer Bilder zu erfolgen; nur wenn keine Teilung der Strahlen, sondern gewissermaßen eine Aufspaltung der Strahlen, wie an einem halbdurchlässigen Spiegel, stattfindet, kann die Übergangsstelle beliebig liegen, dann ist auch die Lage der Meßvorrichtung nicht mehr beschränkt. Beim Halbbildmikrometer sollten die Übergangsstellen in der Eintrittsluke oder ihren Bildern liegen, die Meßvorrichtung gehört in den Wegteil für getrennten Verlauf. Wenn die Scharfstellung der Bilder ungenügend ist, so wird die Messung außer bei Doppelmessung durch Änderung ihrer Größe bei der Einstellung von Flächen auf Berührung oder Einstehten der Grenzen verfälscht; bei Doppelmessung und bei punkt- oder linienförmigen Zielen tritt ein weiterer Fehler auf, wenn sich bei der Verbreiterung durch die Unschärfe die Schwerpunkte der Zielbilder ungleich verschieben. Es darf daher der Schwerpunkt der Teile der Austrittspupille, die das eine Bild liefern, gegen den Schwerpunkt der Teile für das andere Bild nicht in der Meßrichtung verschoben sein, und dies muß auch noch für die durch die Augenpupille etwa abgeblendete Austrittspupille gelten. Wir nennen dies die Forderung des übereinstimmenden Strahlenaustritts. Liegen die Bilder nicht in einer Ebene, so erkennt man dies an der Parallaxe des einen Bilds gegen das andere. Soll die Messung unabhängig davon sein, an welcher Stelle eines mittleren Gesichtsfeldsbereichs sie erfolgt, so muß gleiche Bildgröße und übereinstimmende Abbildung, insbesondere Unabhängigkeit der Ablenkung für die Einstellung von der Hauptstrahlneigung, gefordert werden.

Auf die Halbbildermikrometer soll noch näher bei den Einstandentfernungsmessern eingegangen werden, ebenso auf die Raumbildmikrometer, deren Verwendung auf nahe gleichgeformte Ziele beschränkt ist. Wir gehen hier nur näher auf die Doppelbildmikrometer ein. Ihr ältester Vertreter ist das Heliometer (Abb. 166); für die heutige Bauart wirkte FRAUNHOFER grundlegend (1814). Die Hälften des zerschnittenen Objektivs werden entlang der Schnittlinie gegeneinander verschoben werden, und zwar zweckmäßig symmetrisch in Zylinderführungen, so daß die Berührungseinstellung immer in der Mitte des Gesichtsfelds erfolgt und trotz der Bildkrümmung für alle Abstände die Scharfstellung erhalten bleibt.

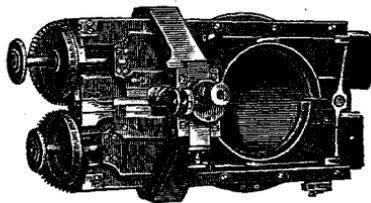


Abb. 166. Das Göttinger Heliometer von FRAUNHOFER.

Für astronomische Messungen, wo das Heliometer als Positionsmikrometer ausgebildet ist, tritt die Skalenablesung mit Mikroskopen an Stelle der Schraubenmessung. Gemäß ABBES Schlittenforderung ist dann die Teilung in der Verlängerung der Bahn des hinteren Hauptpunkts anzuordnen. Für übereinstimmenden Strahlenaustritt ist die Öffnungsblende entsprechend zu regeln; sorgt man zugleich für symmetrische Gestaltung der Halböffnungen, so wird auch das Beugungsscheibchen symmetrisch. Handelt es sich nicht um genaueste Messungen, so wird das Helligkeitsverhältnis durch Bewegen des Auges quer zur Teilungslinie der Austrittspupille geregelt. Um das Zerschneiden des großen Objektivs zu vermeiden, hat man wohl auch die Umkehrlinse (Fangspiegel) oder die Augenlinse des Okulars oder eine besondere Linse zerschnitten und deren Teile quer verschoben. Um größere Verschiebungen zu erreichen, kann man von dem Objektiv oder den anderen Linsen eine schwächere Linse abspalten und deren Hälften verschieben. Will man in diesem Falle symmetrische Verschiebungen der Bilder mit nur einer Linsenverschiebung erreichen, so gibt man den Halblinsen entgegengesetzt gleiche Brennweiten, wobei die verschiedene Wirkung auf den Bildabstand in der Achse durch feste Linsen ausgeglichen werden muß.

Zur Erzeugung und Verschiebung der Doppelbilder können noch verschieden andere Mittel dienen, so nach BOSCOVICH 1777 die Ablenkung der Strahlen durch einen Glaskeil von veränderlichem brechendem Winkel. Man erhält die Wirkung eines solchen erstens, wenn man eine plankonvexe und eine plankonkave Linse von gleichem Kugelradius und gleicher Brechung um den gemeinsamen Mittelpunkt gegeneinander verdreht (Abb. 167); statt dessen können für schwache Ablenkungen auch zwei Linsen entgegengesetzt gleicher Brennweite übereinander gerad-



Abb. 167. Ein veränderlicher Keil nach BOSCOVICH.

gerad-

linig verschoben werden (Abb. 168). Im Grunde beruht ja auch das Heliometer auf einer Keilablenkung des Hauptstrahls. Zweitens verwirklicht man den veränderlichen Glaskeil, indem man zwei gleiche in der Achse hintereinanderliegende Glaskeile um entgegengesetzt gleiche Beträge dreht (Abb. 169); dabei erhält man alle Ablenkungen von Null bis zum Doppelten der Einzelablenkung ε ; wird jeder Keil aus der Lage größter

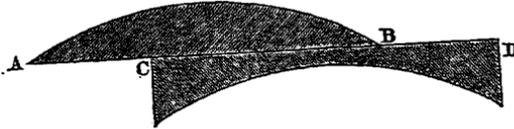


Abb. 168. Ein Mikrometer mit Linsenverschiebung.

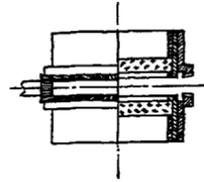


Abb. 169. Ein Drehkeilpaar nach Boscovich.

Ablenkung um φ gedreht, so ist die Ablenkung durch $2\varepsilon \cos \varphi$ gegeben. Die Ablenkung erfolgt in der Ebene, in der die Keilwinkel bei der größten Ablenkung liegen. Sind die Keilwinkel nicht genau gleich, so beschreibt der abgelenkte Hauptstrahl einen elliptischen Kegel; ebenso wenn die Keilwinkel etwas größer sind und nicht dafür gesorgt ist, daß Ein- und Austrittswinkel bei ihnen gleich sind. Man bezeichnet ein solches Drehkeilpaar auch als Keilkomparator. In dieser Weise kann man auch die beiden obigen Linsen drehen, statt sie gegeneinander zu verschieben, allerdings wandern beide Bilder gemeinsam senkrecht zur Trennung. Zur Erzeugung der Doppelbilder läßt man den veränderlichen Keil aus zwei Linsen auf eine Objektivhälfte wirken; man kann auch die Objektivöffnung in mehrere, etwa vier, zur Meßrichtung parallele Streifen teilen und den Keil auf das durch den ersten und dritten Streifen gegangene Licht wirken lassen, damit das Helligkeitsverhältnis der Bilder weniger von der Haltung des Auges abhängig ist.

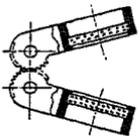


Abb. 170. Ein Schwingkeilpaar.

Beim Drehkeilpaar werden die Keile vorzugsweise als Ringe ausgebildet, deren Flächengröße für gleiche Helligkeit der Bilder gleich der des Ausbruchs gewählt wird. Für übereinstimmenden Austritt ist es nötig, daß die Augenpupille zentrisch zur Austrittspupille ist, wenn sie nicht, was noch besser ist, sie ganz umschließt. Dreht man zwei gleiche Keile entgegengesetzt gleich um die brechende Kante

(schwingende Keile nach Abb. 170), so erhält man ebenfalls veränderliche Ablenkung im Betrage von $2\mu\{(n \cos r : \cos i) - 1\}$, wo r und i die Winkel des Strahls mit dem Einfallslot in Glas und Luft und μ der Keilwinkel ist. Bei nur einem Keil würde hier die Ablenkung zu stark vom Hauptstrahlwinkel abhängen. Statt die entgegengesetzt gedrehten Elemente hintereinander anzuordnen, kann man sie auch auf die beiden Hälften

des Strahlengangs verteilen, so daß sie gewöhnlich nebeneinander liegen. Die Verschiebung der Bilder kann auch durch Parallelverschiebung der Strahlen dicht hinter oder zwischen den Objektivlinsen erreicht werden. Bei diesem auf CLAUSEN 1841 zurückgehenden Parallelplattenmikrometer werden zwei gleiche Planparallelplatten entgegengesetzt gleich geneigt gedreht (Abb. 171); die Formel für die Versetzung ist auf S. 6 gegeben. Wegen der beim Durchgang auftretenden Bildfehler, wenn auch ein Teil durch die Doppelanordnung unschädlich gemacht ist, können nur kleine Versetzungen im Verhältnis zur Brennweite ausgenutzt werden. Man kann auch zwei Platten fester Neigung wie Drehkeile drehen oder nur eine Glasplatte mit fester Neigung und veränderlicher Dicke anwenden; man erhält sie, indem man eine Planplatte schräg durchschneidet und die Teile übereinander verschiebt, oder, wenn der Schnitt senkrecht zur Neigungsebene ist, indem man sie in der Richtung der Achse trennt. Liegt im letzten Fall der feste Keil in der Brennebene, so wird die Trennung der Doppelbilder nicht geändert, wenn er fortgelassen wird.

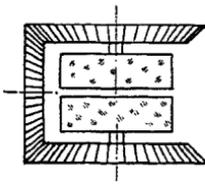


Abb. 171. Ein Parallelplattenmikrometer.

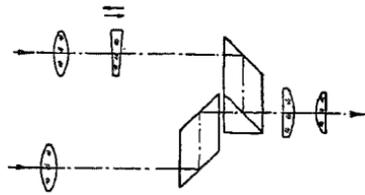


Abb. 172. Ein Doppelbildmikrometer mit Verschiebungskeil.

Diesen Verschiebungskeil von MASKELYNE 1777 kann man in Verbindung mit einem halb durchlässigen Spiegel (Abb. 172) und zwei Objektiven verwenden. Parallelplatte wie Keile erzeugen sphärische und chromatische Fehler. Der Unterschied der Ablenkungen für C und F ist bei einem Keil aus gewöhnlichem Kron etwa 1:60 der ganzen Ablenkung. Ähnlich wie bei der Linse kann man durch Zusammensetzen von zwei Keilen aus verschiedenem Glase die Farbenabweichung heben. Von den sphärischen Fehlern wird der Astigmatismus verringert und unabhängig von der Lage der Keile auf der Achse, wenn die Ablenkungen an beiden Flächen gleich sind.

Eine ähnliche einfachere Anordnung wie die zuletzt beschriebene zeigt das ROCHONSche Kristallmikrometer 1777 (Abb. 173), das aus zwei verkitteten Quarz- oder Kalkspatprismen besteht. Bei dem Prisma P fällt die Kristallachse in die optische Achse, beim anderen P' liegt sie parallel der brechenden Kante a , so daß beim Eintritt in P' jeder Strahl in einen ordentlichen unabgelenkten und in einen außerordentlichen abgelenkten zerlegt wird. Die Trennung der Strahlen wird verdoppelt und symmetrisch zur Achse, wenn man nach WOLLASTON im

Prisma P die Kristallachse parallel der Kante ab legt, so daß zum ordentlichen Strahl in dem einen Prisma der außerordentliche in dem andern gehört und umgekehrt. Für die Verminderung des Astigmatismus ist es hier zweckmäßig, das Prisma symmetrisch zu der einen Außenfläche zu ergänzen, so daß man ein dreiteiliges Prisma erhält, dessen Mittelteil den doppelten brechenden Winkel wie die Außenteile besitzt und in dem die Kristallachse senkrecht zu der in diesen gelegt ist. Farbenfehler sind auch hier merklich. Bildet man aus zwei ROCHONSchen

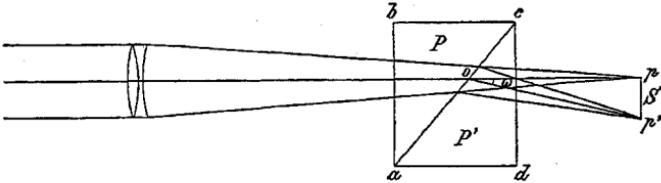


Abb. 173. Ein Kristallmikrometer nach ROCHON.

Prismen ein Drehkeilpaar, so erhält man ein ROCHONSches Prisma von veränderlicher Winkeltrennung; um das Entstehen von vier Bildern zu vermeiden, muß das Licht zwischen den Prismen zirkular polarisiert werden. Bei DOLLONDS Mikrometer (1821) besteht die Augenlinse aus einer Kugel eines einachsigen Kristalls, die mit ihrer Achse in einer Ebene durch die optische Achse gedreht wird. Bei WELLMANNS Mikrometer (1889) ist ein ROCHONSches Prisma hinter dem Okular des Fernrohrs

mit Fadenkreuz um dessen Achse drehbar angeordnet. Es werden so Fadenkreuz und Bild (z. B. von einem Doppelstern 1, 2) verdoppelt. Man dreht nun das Prisma aus der Stellung, wo die Fäden aa und bb (Abb. 174) den größten Abstand haben (er sei auf der Dingseite in Winkelmaß μ) um den Winkel φ , bis die abgebildete Stellung erreicht ist; dann ist der Sternabstand $\mu \sin \varphi$. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, daß die Einstellung auf Sternmitte ersetzt wird durch

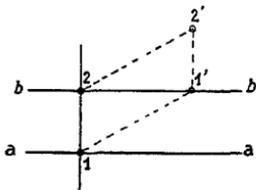
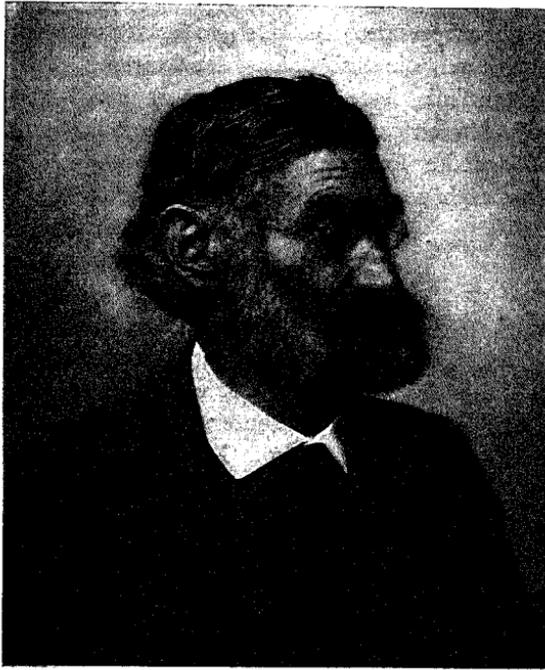


Abb. 174. Die Wirkung des WELLMANNSchen Mikrometers.

die vom Zittern der Sterne weniger gestörte Richtungsbeobachtung, ob die Verbindungslinie der Sterne parallel dem Faden ist. Es wird aber hier auf den Vorteil der Doppelbildmikrometer ohne Fadenkreuz verzichtet, daß die Einstellung durch Beobachtung an einer Stelle erkannt wird, es gehört daher streng genommen zu den Fadenmikrometern. Endlich sei noch erwähnt, daß die Doppelbild- wie Halbbildmikrometer mit fester Verschiebung der Bilder in Verbindung mit Fernrohren von veränderlicher Vergrößerung zur Winkelmessung durch diese Änderung benutzt werden können.



ERNST ABBE

geb. am 23. Januar 1840 in Eisenach, gest. am 14. Januar 1905 in Jena.

C. Die Entfernungsmesser.

I. Einteilung und Genauigkeitsgrundlagen.

Bei der Messung mit optischen Hilfsmitteln wird die Entfernung als die eine Seite E eines Dreiecks (Abb. 175) gefunden, von dem eine andere Seite b , die Standlinie, und zwei Winkel bekannt oder gemessen sind; auch die Beurteilung der Entfernung durch das Auge (S. 87) hat im wesentlichen dieselbe geometrische Grundlage. Die Entfernungsmesser teilen wir ein in Standwinkel- und Zielwinkelentfernungsmesser, je nachdem die Standlinie, auf deren Winkelgröße es besonders ankommt, durch den Abstand von Teilen des Entfernungsmessers oder durch Abmessungen des Ziels dargestellt ist oder, was das gleiche bedeutet, je nachdem die Spitze C des Dreiecks am Ziel oder im Entfernungsmesser liegt. Die erste Art wird in Zweistand- und Einstandentfernungsmesser eingeteilt. Bei der ersten Unterart besteht der Entfernungsmesser aus zwei getrennten an den Enden der Standlinie aufzustellenden Teilen, während bei der zweiten ein gemeinsamer Träger für die optischen Teile vorhanden ist. Bei allen Arten ist zu unter-

scheiden, ob die Entfernung durch Veränderung des parallaktischen (der Standlinie gegenüberliegenden) Winkels η oder der Standlinie b gemessen wird, ferner ob durch die Anordnung der Messung die Lage des Ziels auf eine zur Standlinie feste Gerade, insbesondere die in ihrer Mitte oder an ihren Enden errichtete Senkrechte beschränkt ist oder nicht. Im letzten Fall hängt die Entfernung nicht nur von dem parallaktischen Winkel, sondern auch von der Neigung der Standlinie zur Zielrichtung ab.

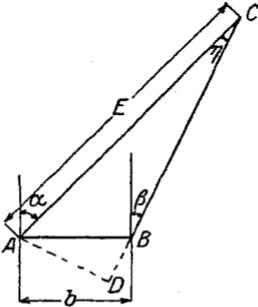


Abb. 175. Die geometrische Grundlage der Entfernungsmessung.

Zu den Standwinkelentfernungsmessern rechnen wir auch die Hochstandentfernungsmesser (Depressionstelemeter), bei denen nur die Richtung des Ziels von einem hohen Standort gegeben ist, seine Lage aber weiter dadurch festgelegt ist, daß es sich auf der Meeresoberfläche von bekannter Gestalt befindet.

Über die Genauigkeitsverhältnisse der Standwinkelentfernungsmesser mögen einige allgemeine Bemerkungen vorausgeschickt werden; die geometrischen Verhältnisse sind für die Zielwinkelgeräte dieselben. Liegt das Ziel innerhalb der Senkrechten auf den Enden der Standlinie

und ist der parallaktische Winkel η klein, so gilt $\eta = b : E$. Daraus folgt, daß der prozentische Fehler $d\eta : \eta$ in η den gleichen prozentischen Fehler in $1 : E$ nach sich zieht; solange dieser Fehler nur wenige Prozent beträgt, auch den gleichen prozentischen Fehler $dE : E$ in E . Da nun $dE : E = d\eta : \eta = E d\eta : b$ ist, so ist $dE = E^2 d\eta : b$; der Entfernungsf Fehler dE wächst bei fester Standlinie mithin proportional dem Quadrate der Entfernung und wird im Verhältnis der Steigerung der Standlinie und der Verringerung von $d\eta$ verkleinert. Wird aber bei festem η mit Änderung von b gemessen, so ist $dE = db : \eta = E d\eta : \eta$, der Entfernungsf Fehler wächst nur proportional E und wird durch Vergrößerung von η verkleinert. In beiden Fällen ist vorausgesetzt, daß die Meßvorrichtung fehlerfrei arbeitet. Ein Fehler in b , auch bei Messung mit b , kommt bei guter Ausführung und Berichtigung des Entfernungsmessers im allgemeinen nicht in Betracht. $d\eta$ hängt von der Sehschärfe des Beobachters und von der Meßart ab; es wird im Verhältnis der Fernrohrvergrößerung verkleinert, soweit diese bei den Luftverhältnissen, der Zielbeschaffenheit, der Güte des Entfernungsmessers u. dgl. ausgenutzt wird. Bei allen Standwinkelentfernungsmessern wird die Messung unmöglich, wenn sich das Ziel in gleichmäßiger Beschaffenheit parallel der Standlinie erstreckt, z. B. wenn es durch so verlaufende Telegraphendrähte dargestellt wird; etwas anderes ist es, wenn etwa aufsitzende Vögel oder anhängende Regentropfen als Meßziel dienen. Am besten ist es, wenn das Ziel Begrenzungen senkrecht zur Standlinie besitzt; bei kleineren Einstandentfernungsmessern kann man durch Drehen um die Visierlinie die Stand-

linie in die günstige Lage zum Ziel bringen. Da es für die Genauigkeit jeder Entfernungsmessung nur auf die Fernrohrvergrößerung des Ziels im Schnitt mit der Meßebeane ankommt, kann man die Vergrößerung in der Richtung senkrecht dazu kleiner wählen, sei es um das Gesichtsfeld zu steigern oder um gegen Schwankungen oder Erzitterungen des Standorts unempfindlicher zu sein.

In dem allgemeinen Fall, wo die Zielrichtung gegen die Senkrechte zur Standlinie erhebliche Neigung besitzt, wird die Entfernung und Richtung des Ziels gewöhnlich von dem einen Stand, dem Hauptstand, aus gerechnet, der z. B. nahe bei der Batterie gewählt wird. Es kommt nur eine feste Standlinie in Betracht. Es ist dann

$$E = \frac{b \cos \beta}{\sin(\alpha - \beta)}$$

$$\frac{dE}{E} = N d\beta + M d\alpha; \quad N = \operatorname{ctg}(\alpha - \beta) - \operatorname{tg} \beta; \quad M = -\operatorname{ctg}(\alpha - \beta).$$

Wir nehmen zunächst an, man hätte es nur mit dem Fehler $d\beta$ zu tun. Da man N auf die Form bringen kann

$$N = \frac{E^2 - 2Eb \sin \alpha + b^2}{Eb \cos \alpha},$$

ist es gleich dem Verhältnis der aufeinander senkrechten Strecken BC und AD . Mithin ist der geometrische Ort der Punkte gleicher Genauigkeit $dE:E$ ein Kreis, der die Standlinie in B berührt und den Durchmesser $b dE:Ed\beta$ hat. Dem Fehler $d\alpha$ allein entspricht ein Kreis, der durch die Enden der Standlinie geht und den Durchmesser $b: \sin(\alpha - \beta) = b\sqrt{1 + (dE:Ed\alpha)^2}$ hat. Der mittlere Gesamtfehler ist gleich $\sqrt{N^2 d\beta^2 + M^2 d\alpha^2}$. Mit Hilfe der vorerwähnten Kreise kann man leicht die Kurven 4. Grades für diesen mittleren Fehler entwerfen. Ist $d\beta = d\alpha$, so hat man nur die Schnittpunkte der Kurven aufzusuchen, für die die Quadratsumme der Fehler die gleiche ist. Ist b klein gegen E , so sinkt die Genauigkeit mit wachsender Seitenrichtung α im umgekehrten Verhältnis der Standlinie zu ihrer Projektion auf die Ebene senkrecht zur Zielrichtung.

II. Die Zielwinkelentfernungsmesser.

1. Militärische Entfernungsmesser.

Ist die Größe g eines Ziels bekannt, und steht es annähernd senkrecht zur Visierlinie, so kann die Entfernung E durch Messung der scheinbaren Größe, des Zielwinkels η , bestimmt werden, da $E = g \operatorname{ctg} \eta$ ist. Die Genauigkeit hängt davon ab, wie genau g bekannt ist; bei festem η nimmt sie mit der Entfernung, bei festem g mit dem Quadrat der Entfernung ab. Dies Verfahren wird für militärische Zwecke noch viel angewandt. Hierzu benutzte schon 1674 MONTANARI ein Fernrohr mit Parallelfäden; auch ein Richtglas mit Strichplatte ist geeignet. Wird die Teilung nach $\operatorname{ctg} \eta$ aufgetragen, so sind die Ablesungen nur noch mit g zu multiplizieren. Bei freihändigem Gebrauch wird die Genauigkeit durch ein Doppelbildmikrometer erhöht. Man wendet so vielfach ein Kalkspatprisma mit fester Trennung der Doppelbilder an und beobachtet, wie weit sich die Bilder eines Fußsoldaten oder Reiters inein-

anderschieben (Abb. 176); ein Zielbild mit Einteilung (Abb. 177) erleichtert die Entfernungsschätzung. In entsprechender Weise kann man auch mit einem Fernrohr mit zwei festen Fäden arbeiten. Doppelbildmikrometer mit Messung werden besonders bei der Kriegsmarine angewandt, wo die Schornsteine und Masten feindlicher Schiffe Ziele bieten,



Abb. 176. Die Entfernungsmessung mit einem festen Kalkspatprisma.



Abb. 177. Zielbild für die Ablesung der Entfernung.

die sich wegen der regelmäßigen Begrenzung genau auf Berührung einstellen lassen, und wo bei dem gleichmäßigen Hintergrund das Ziel auch im Doppelbild gut zu erkennen ist (Abb. 178). Die Zielgröße braucht man nicht zu kennen, wenn die Anfangsentfernung mit Einschießen oder

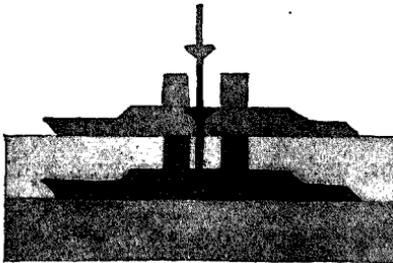


Abb. 178. Die Entfernungseinstellung beim Doppelbildmikrometer.

einem Standwinkelentfernungsmesser ermittelt ist. Gegenüber diesen besitzen sie den Vorteil wesentlich geringeren Raumbedarfs. Sie können sich daher gegenseitig unterstützen. Um die Entfernung für verschiedene Zielhöhen bequem ablesen zu können, wird der Entfernungsmesser zweckmäßig mit einem Rechenapparat verbunden, am besten nach ABBE mit einem logarithmischen Rechenschieber. Sind demgemäß zwei konzentrische logarithmische Teilungen

für Entfernung und Zielhöhe vorhanden (Abb. 179), so braucht nur die Entfernungsteilung von der richtigen Grundstellung aus um den Logarithmus des gemessenen Winkels durch ein Getriebe verdreht zu werden, das die Meßbewegung zur Einstellung der Doppelbilder in passender ungleichförmiger Weise überträgt; dann kann gegenüber der jeweiligen gültigen Zielhöhe die richtige Entfernung abgelesen

werden; ein drehbarer Doppelzeiger erleichtert diese Ablesung. Kann mit der ZielhöhenEinstellung das Anzeigegetriebe oder der mikrometrische Winkel so verändert werden, daß die richtige Entfernung an einem festen Zeiger abgelesen wird, so kann das Anzeigewerk mit dem eines Standwinkelentfernungsmessers gekuppelt werden. Wird nun mit beiden Entfernungsmessern ein Ziel fortlaufend gemessen, so zeigt die Bewegung des Höhenstellknopfs an, wie die Messungen auseinandergehen, und gewährt so eine bequeme Kontrolle der Messenden. Die wagrechte Entfernung eines Ziels kann auch ermittelt werden, wenn man den Geländewinkel eines Flugzeugs mißt, das gerade über dem Ziel steht, und von dem man den barometrisch gemessenen Höhenunterschied gegen den Beobachtungsstand gemeldet erhält. Bei größerer Entfernung ist die Krümmung der Erde ähnlich wie bei den Hochstandentfernungsmessern (S. 192) zu berücksichtigen.

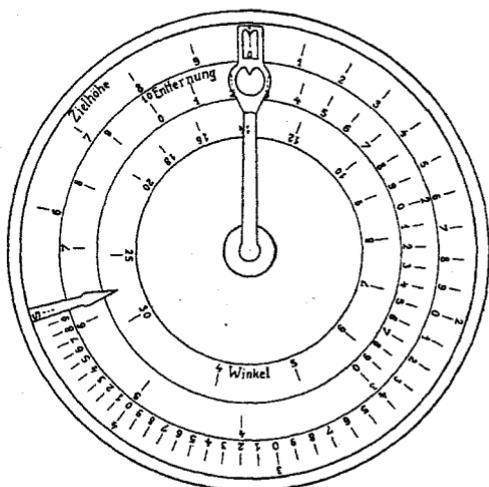


Abb. 179. Der logarithmische Rechenschieber am Zielwinkelentfernungsmesser.

2. Geodätische Entfernungsmesser.

Bei der Tachymetrie (Schnellmessung) in der Geodäsie wird zur Messung der horizontalen (Karten-) Entfernung als Ziel eine Latte mit Teilung oder Abstandsmarken benutzt; sie wird entweder lotrecht oder in vertikaler oder horizontaler Ebene senkrecht zur Visierlinie gehalten, die auf die Mitte oder das eine der Enden der Standlinie gerichtet sein kann. Wir sehen zunächst eine senkrechte Latte mit Teilung (Selbstablesung) voraus; das Fernrohr braucht dann nur für die Messung eines festen mikrometrischen Winkels η eingerichtet zu sein, wo $2 \operatorname{tg} \eta/2 = 1 : K$ ist, praktisch auch gleich $\operatorname{tg} \eta$, und K gewöhnlich gleich 100 gewählt wird. Die einfachste Einrichtung besteht nach WATT (1771) (meist als REICHENBACHSCHER Distanzmesser bezeichnet) in zwei festen Fäden in der Objektivbildebene im Abstände p von $1 : 100$ der Brennweite F des Objektivs; $K = F : p$. Da die Entfernungen klein und wechselnd sind, muß dafür gesorgt sein, daß Bild und Fäden in der Achsenrichtung gegeneinander verstellbar werden können, bis die Parallaxe ver-

schwindet. Ist nun (Abb. 180) l die Länge des von den Fäden ausgeschnittenen Lattenabschnitts, c der Abstand des vorderen Objektivbrennpunkts von der Stehachse des Geräts, E_h der Kartenabstand der Latte von dieser Achse, w der Höhenwinkel der Visierlinie, so ist für den Fall, daß die Visierlinie auf den oberen oder unteren Lattenabschnitt gerichtet ist,

$$E_h = c \cos w + Kl \cos^2 w \left(1 \pm \frac{1}{K} \operatorname{tg} w \right);$$

das obere Vorzeichen gilt für Höhenwinkel bis zur oberen und Tiefenwinkel bis zur unteren Sicht. Sind die Höhenwinkel bei Zielung auf die Lattenmitte von der mittleren Sicht gezählt, so ist

$$E_h = c \cos w + Kl \cos^2 w \left(1 - \frac{1}{4K^2} \operatorname{tg}^2 w \right).$$

Das Verbesserungsglied in der Klammer ist hier so klein, daß es unbedenklich vernachlässigt werden kann. Verwandte Formeln erhält man, wenn die Latte senkrecht zur Zielung stehend oder liegend gebraucht wird. Bei mäßig geneigter Zielung spielt der Fehler in der Lattenablesung die Hauptrolle; mit Fadenplatte wird bei $K = 100$ von geübten Beobachtern, wie es die Landmesser sind, bei guter Luft im Durchschnitt etwa auf 1 : 500 genau gemessen; bei günstigen Verhältnissen

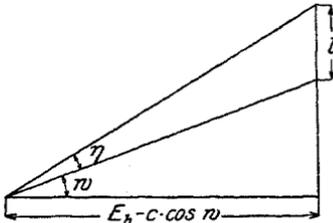


Abb. 180. Die geometrische Grundlage der Lattenentfernungsmessung mit Doppelfäden.

haben manche das Mehrfache dieser Genauigkeit erreicht. Bei stärker geneigter Zielung überwiegt leicht der Fehler infolge schiefer Lattenhaltung; ist die Schiefe $= \delta$, so ist dieser Entfernungsfehler annähernd $= E_h \delta \operatorname{tg} \alpha$.

Die Bruchteile der Lattenteilung werden bei der Ablesung geschätzt. Es hat nun nicht an Bestrebungen gefehlt, auch diese Bruchteile zu messen, ohne die nahezu gleichzeitige Beobachtung an beiden Meßfäden aufzugeben, die besonders bei größeren Höhenwinkeln wegen Schwankungen der Latte wichtig ist. MÜLLER wendet den optischen Meßkeil mit quer zur Teilung verschiebbarem Hilfsfaden an, indem entweder der eine Faden oder die Lattenteilstriche bis auf den Nullstrich etwas schräg gestellt sind, die Strichdicke nimmt in der Teilung so ab, daß der auf den zweiten Faden fallende Teilstrich im Bild immer gleich dick erscheint. BOSSHARDT verschiebt die dem einen Faden entsprechende Bildhälfte mit einer drehbaren Glasplatte. HOHENNER verändert die Brennweite des Objektivs; in allen diesen Fällen wird das Ziel durch Änderung vom K erreicht. HÄNEL benutzt schräge unterbrochene Striche. Von WERFFELI rührt eine Lattenteilung her, mit der eine dem Nonius

verwandte Ablesung möglich ist; von der Mitte aus laufen zwei Teilungen mit etwa 10% verschiedenen Teilungseinheiten, so daß durch Kippen des Fernrohrs und damit Verschieben des Fadenpaares in der Teilung erreicht werden kann, daß die Fäden gerade auf zwei Teilstriche treffen; diese Verschiebung entspricht der Feinablesung. TICHY verwendet eine logarithmisch geteilte Latte, er liest den Logarithmus der Entfernung an der Latte ab; die Feineinstellung mit Schraubenmikrometer oder optischem Meßkeil (Abb. 163) gibt die Unterteile des Logarithmus unmittelbar. Er liest dann noch an der Höhentheilung $\log \cos^2 w$ ab und erhält durch Addition zur Ablesung den Logarithmus der Kartenentfernung.

Zur Steigerung der Genauigkeit hat man auch an Stelle des Fadendas Doppelbildmikrometer zu setzen versucht; grundsätzlich sind alle verwendbar, es ist aber nicht leicht, eine dem Aufwand an Mitteln entsprechende Steigerung der Genauigkeit zu erzielen. AUBELL verwendet das Heliometer in einer dem WELLMANNschen Mikrometer verwandten Weise. Die Halblinsen sind mit fester Versetzung für eine gemeinsame Drehung um die Fernrohrachse gelagert, die in solchem veränderlichen Verhältnis mit der Höhenwinkleinstellung gekuppelt ist, daß die senkrechte Komponente der Trennung der Doppelbilder entsprechend $\cos^2 w$ verändert wird; die Lage eines Horizontalfadens wird in beiden Lattenbildern abgelesen. SCHNEIDER verwendet ein Halbbildermikrometer mit fester Trennung.

Für viele Aufgaben der Tachymetrie kommt es nicht auf die höchste Genauigkeit, aber auf schnelles Arbeiten an. Man hat sich daher bemüht, die Berechnung nach der Formel ganz oder teilweise durch das Tachymeter besorgen oder erleichtern zu lassen. So ist es erwünscht, die Konstante $c = 0$ zu machen. Bei dem anallaktischen Fernrohr von PORRO wird dies dadurch erreicht, daß eine feste Linse zwischen Objektiv und Fadenplatte, und zwar dieser näher, so eingeschaltet wird, daß das Objektiv von einem virtuellen Dingpunkt, der auf dessen Achse und in der Stehachse des Geräts liegt, ein Bild im vorderen Brennpunkt dieser Linse entwirft; dann fällt ja der vordere Brennpunkt von Objektiv und Zusatzlinse zusammen genommen in die Stehachse. Praktisch die gleiche Wirkung kann man bei geeignetem Linsenaufbau auch mit einem Fernrohr erreichen, bei dem die Scharfstellung für verschiedene Lattenentfernung statt durch Ausschieben von Fadenplatte und Okular durch Verschieben einer inneren Linse von schwacher Brennweite erfolgt (S. 114), die noch den Vorteil hat, daß Fehler der Geradföhrung die Messung weniger verfälschen; angenähert ist nämlich auch hier die Entfernung von der Lattenablesung linear abhängig. Wird hier die Brennweite des Objektivs mit f_1 , ferner bei der Einstellung auf ∞ die Gesamtbrennweite mit F und die Ding- bzw. Bildweite der inneren Linse mit s_2 bzw. s'_2 bezeichnet, so ist genähert

$$c = -\frac{f_1^2}{s_2 + s'_2} + \frac{3f_1}{2} - \frac{s_2 - s'_2}{2}; \quad K = \frac{F}{p}.$$

Die eigentliche Aufgabe besteht aber in der mechanischen Umrechnung entsprechend $\cos^2 w$, wie wir es schon bei den Tachymetern von TICHY und AUBELL kennen gelernt haben; man bezeichnet solche als selbst-rechnende oder Reduktionstachymeter. Meist sind diese Tachy-

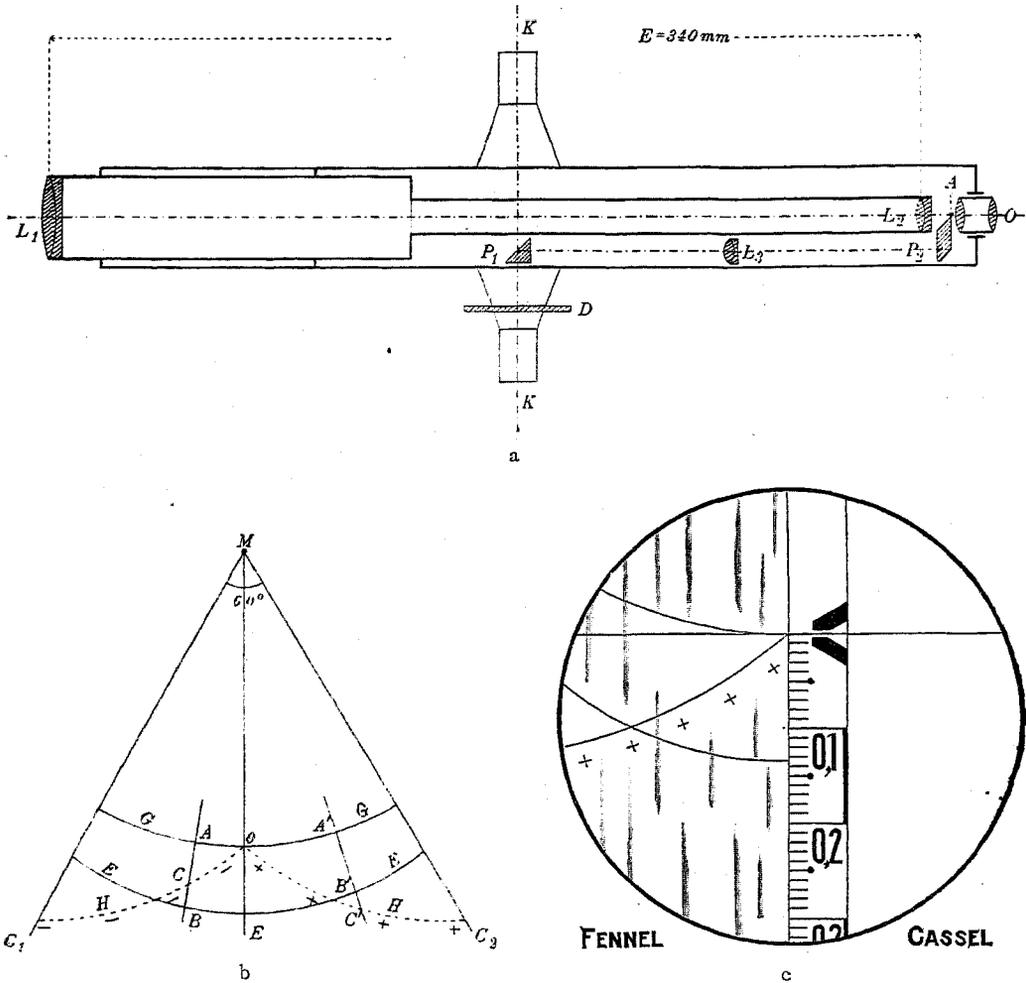


Abb. 18r. Das HAMMER-FENNELsche Tachymeter.

a) Ein Schnitt durch das Fernrohr. D Kurbensektor, der durch die Prismen P_1, P_2 und die Linse L_3 in die Bildebene A abgebildet wird. b) Der Kurbensektor. c) Das Fernrohrbild.

meter auch für die Berechnung der Höhe des Lattennullpunkts über dem Tachymeterstandpunkt eingerichtet. Schon PORRO ließ 1858 beim Kippen durch ein Gelenkparallelogramm den Fadenabstand sich entsprechend $\cos^2 w$ ändern oder 1852 beim sthenallaktischen Fernrohr durch eine entsprechend verschobene Zusatzlinse die Brennweite. Bei dem

HAMMER-FENNELSchen Tachymeter (Abb. 181) wird eine Kurvendarstellung, die sich auf einem zur Kippachse zentrischen Sektor befindet, in das Gesichtsfeld gespiegelt und so ein $\cos^2 z$ entsprechendes Stück durch die Kurven G und E auf dem Lattenbild abgegriffen, das die Entfernung angibt; die Kurven G und H greifen die Höhe ab. Eine große Anzahl von Tachymeterformen enthält die von HOGREWE 1800 in die Landmessung eingeführte Tangentenschraube. Kippt man mit einer solchen (Abb. 182) in festem Abstand a von der Achse angeordneten senkrechten Schraube das Fernrohr, so ist $E_H = al : b$, wenn b die Strecke ist, um die die Schraube von einer Zielung zur anderen bewegt wurde. Ist b fest und wird l abgelesen, so wird die Bewegung um b meist durch Anschläge festgelegt. CORADI benutzte ein Winkelrepetitionsverfahren, bei der der ganzen Lattenlänge entsprechende Winkel mehrere Male aneinander gesetzt wurden, bis der Anschlag erreicht war; l wurde also in Vielfachen und Teilen der Lattenlänge abgelesen; den genauen Kontakt erkannte er mit einer Gefühlschraube. Besitzt die Latte nur zwei Abstandsmarken, so dient b zur Messung. Dann eignet sich das Tachymeter besonders in Verbindung mit einem Meßtisch zum Auftragen der

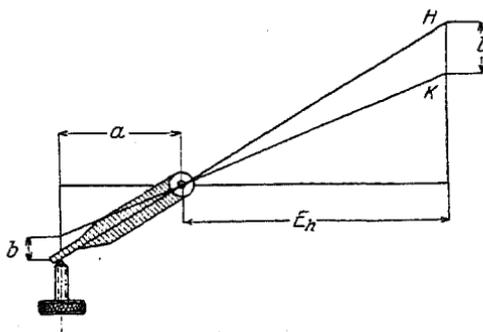


Abb. 182. Die Lattenentfernungsmessung mit Tangentenschraube.

Punkte nach Polarkoordinaten in die aufgespannte Karte, d. h. als Tachygraph oder Topometer. Bei dem Sondiertachygraph von REICH-GANSER wird das geometrische Dreieck durch ein mechanisches in paralleler Lage nachgebildet; mit dem Zeichenstift zusammen wird eine für den Maßstab gestellte senkrechte Mikrometerschraube verschoben, deren Spitze gegen eine gerade Gleitfläche drückt, die mit dem Fernrohr verbunden ist und durch die Kippachse geht. Es wird verschoben, bis die Fernrohrricht von der ersten Abstandsmarke auf die zweite verstellt ist. Auch bei dem Schiebetachymeter von WAGNER-FENNEL, das von den selbstrechnenden Tachymetern wohl am meisten verbreitet ist, wird ein Dreieck mechanisch nachgebildet. Hier ist eine schiefe zur Sicht senkrechte Latte nötig, während bei der Abänderung von PULLER nach Abb. 183 die übliche senkrechte Latte verwendet wird. Mit dem nicht dargestellten Fernrohr ist hier das Lineal AA verbunden, auf dem entsprechend der Lattenablesung mit den beiden festen Entfernungsfäden der Arm EE mit Nonius G nach der durch DD verschobenen Teilung BB gestellt wird. Dann wird der Schieber PP heran-

geschoben und in der Teilung *CC* die Kartenentfernung, in der senkrechten Teilung die Höhe abgelesen. Läßt man *DD*, *EE*, *BB* weg und bringt die *B*-Teilung auf *AA* an, so hat man das WAGNERSche Tachymeter, das von SCHRODER dahin abgeändert wurde, daß die Einstellung der Entfernung auf *AA* durch eine Kurvenscheibe mit der Auseinanderstellung der beiden Meßfäden gekuppelt ist, die auf den beiden Lattenmarken in festem Abstand eintreten müssen. Das PULLERSche, WAGNERSche und HAMMERSche Tachymeter werden auch mit Meßtisch als Tachygraphen gebaut.

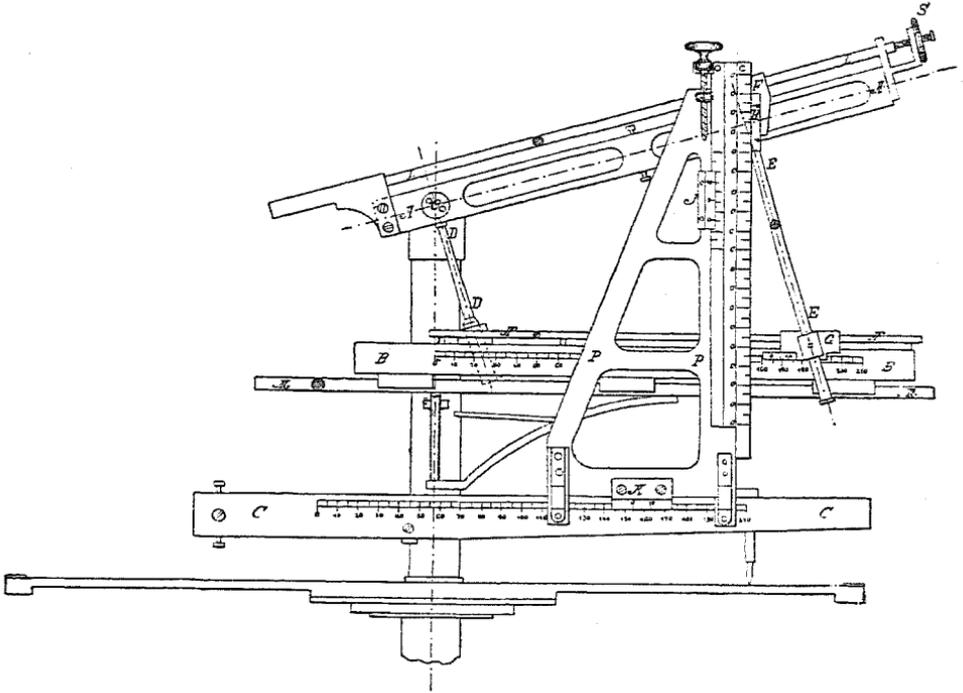


Abb. 183. Das Schiebetachymeter von PULLER-BREITHAUPT.

Bisher ist eine stehende Latte vorausgesetzt, die wegen der Vorteile für die Aufstellung ganz vorwiegend verwendet wird; nur in Frankreich hat man sie vielfach mit einer herausdrehbaren Querlatte versehen. Die horizontale Latte bietet nun, wenn sie auch kürzer gewählt werden muß, den Vorteil, daß die Messung weniger durch Refraktion (S. 193) gestört wird. Die vorerwähnten Bauarten lassen sich auch für sie passend gestalten. Als dieser Lattenlage gemäß ist aber wohl das folgende Verfahren zu bezeichnen, das von KRAUSE 1881 angegeben wurde, jedoch älter sein dürfte. Mißt man mit der Horizontalschraube eines Theodolits den Winkel $\eta/2$, unter dem der Abstand l zweier Marken auf der senk-

recht zur einen Zielung stehenden Latte erscheint, so ist damit die Kartenentfernung

$$E_h = l : \operatorname{tg} \eta_h$$

gegeben. Bei dem Tachymeter von ZWICKY ist η_h fest und l wird an der Latte abgelesen; eigentümlich ist ihm die gemeinsame Kippung zweier Zielfernrohre um Achsen, die in der Horizontalebene gegeneinander verdreht sind (Abb. 184); der Konstanten K kann so ein großer Wert gegeben werden.

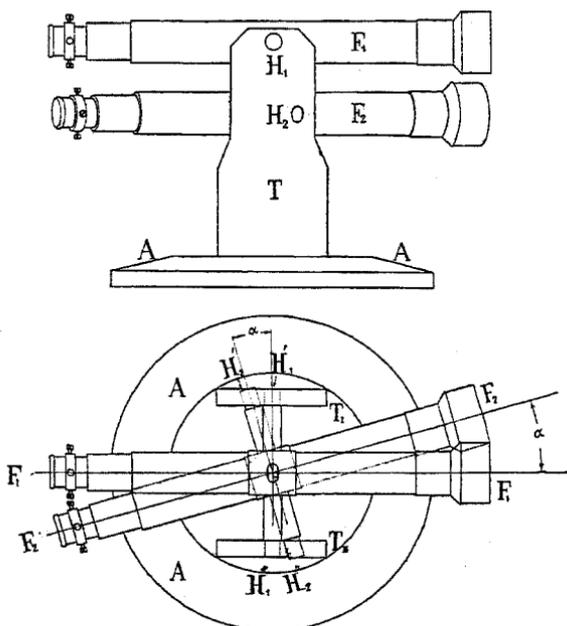


Abb. 184. Das Tachymeter von ZWICKY.

Zur Zielwinkelentfernungsmessung kann man auch das Rückwärts-einschneiden in der Geodäsie und Nautik rechnen; dabei sind drei entfernte Punkte L , M , N in ihrer gegenseitigen Lage gegeben; man findet die Lage des eignen Standpunkts S , indem man die Winkel LSM und MSN mißt.

III. Die Zweistandentfernungsmesser.

Diese Entfernungsmesser sind namentlich in Aufstellung an der Küste für Seeziele benutzt worden. Auf zwei Ständen, die in bekannter größerer Entfernung von 1 km und mehr eingerichtet sind, wird der Winkel der Zielrichtung mit der Standlinie gemessen; da der Höhenwinkel des Ziels nur klein ist, genügt es bei größerem Gesichtsfeld der Zielfernrohre,

wenn sie mit einem lotrechten Faden ausgerüstet sind und nur in wagrechter Ebene meßbar geschwenkt werden können. Die Winkel α und β und ebenso die Entfernung können im allgemeinen durch ihre Horizontalprojektionen ersetzt werden. Da Schiffsziele beweglich sind, so müssen die Winkel α und β gleichzeitig gemessen werden; der Winkel β des Nebenstandes wird entweder durch Fernruf übermittlelt, oder ein Zeiger im Hauptstand ist für die Winkelanzeige von β mit der Drehung des Richtfernrohrs im Nebenstand elektrisch gekuppelt. Um die Entfernung für unmittelbare Ablesung mechanisch auszuwerten, wird meist das geometrische Dreieck mechanisch nachgebildet. Z. B. trägt die Kante eines mit dem Haupttrichtfernrohr verbundenen Lineals die Entfernungsteilung etwa im Maßstab 1 : 10000; die Drehachse eines zweiten Lineals, das die gleiche Winkelbewegung wie das Nebenstandfernrohr macht, ist um 1 : 1000 der Standlinie von der Drehachse des ersten entfernt angeordnet; gehen die Kanten durch die Drehachsen, und sind die Lineale richtig eingestellt, so wird an ihrem Schnittpunkt die Entfernung angezeigt. Eine andere mechanische Lösung ist die folgende. Durch ein Differentialgetriebe wird der Winkel $\alpha - \beta$ eingestellt und in die Drehung einer Kreisscheibe entsprechend $\log \sin(\alpha - \beta)$ umgesetzt, während ein über dieser Teilung spielender Zeiger entsprechend $\log \cos \beta$ gedreht wird und bei passender logarithmischer Teilung der Kreisscheibe auf dieser die Entfernung anzeigt. Endlich können statt dessen die elektrischen Einrichtungen so durchgebildet sein, daß die Entfernung unmittelbar angezeigt wird; für die elektrische Rechnung können z. B. die Stromgesetze von OHM und KIRCHHOFF die Grundlage bilden. Für Ziele, die nahe in der Richtung der Standlinie liegen, ist der Entfernungsmesser unbrauchbar; für Luftziele, die sich gewöhnlich in größerer Höhe bewegen, scheidet dieser Fall aus. Im Weltkrieg sind viele Versuche gemacht worden, diese Bauart für Luftzielmessung auszubilden. Die Richtfernrohre müssen hier außer der Seiten- auch Höhenbewegung erhalten. Am zweckmäßigsten ist die Verwendung der Kippwinkeltheodolite nach TETENS, bei denen die Winkel α und β in dem geeigneten durch Standlinie und Luftziel gegebenen Dreieck unmittelbar gemessen werden (Abb. 185). Bei einem solchen Theodolit ist das Fernrohr für die Messung von α bzw. β um eine Achse schwenkbar, die zur Standlinie senkrecht um diese als Achse gekippt werden kann, so daß sie zu dem Meßdreieck senkrecht steht; für die mechanische Auswertung der Entfernung bleiben also die obigen Einrichtungen verwendbar. Statt der Winkel α und β selbst können auch ihre Projektionen in die lotrechte oder wagrechte Ebene durch die Standlinie gemessen werden. Im ersten Falle mißt man wieder mit Kippwinkeltheodoliten, deren Kippachsen aber statt in die Standlinie nun dazu senkrecht und wagrecht gerichtet sind; hier ergibt sich die Zielhöhe unmittelbar aus den Höhenwinkeln α_v und β_v der Schwenkebenen, die durch das Ziel und die Kippachsen

gehen; es ist $H(\operatorname{ctg} \alpha_v + \operatorname{ctg} \beta_v) = b$. Im zweiten Fall arbeitet man mit gewöhnlichen Theodoliten; aus dem in die wagrechte Ebene projizierten Meßdreieck, dessen Winkel α_h und β_h gemessen werden, ergibt sich zunächst die wagrechte Entfernung; aus dieser und dem Höhenwinkel im Hauptstand die gesuchte.

Wie bei den Zweistandgeräten die Genauigkeit mit der seitlichen Lage des Ziels abnimmt, ist auf S. 143 erörtert. Die Einstellgenauigkeit der Winkel hängt namentlich von der Größe der seitlichen Bewegung des Ziels im Winkelmaß ab, die bei Luftzielen sehr hohe Beträge annehmen kann; man wird hier nur mit einer Genauigkeit von etwa 2' rechnen können. Anders bei Schiffszielen, wo die Genauigkeit eher durch die der elektrischen Übertragung begrenzt wird, deren Fehler neuerdings unter 1' gehalten werden. Die militärische Verwendbarkeit wird aber besonders dadurch in Frage gestellt, daß die Verständigung darüber, welches Ziel bei Geschwadern und welche Teile des Ziels anzuschneiden sind, umständlich und unsicher ist, besonders bei Luftzielen. Hier hat allerdings das erste Kippwinkelverfahren gegenüber den beiden anderen Verfahren den Vorteil, daß das Kennzeichen übereinstimmender Kippwinkel einen in den meisten Fällen ausreichenden Schutz gegen grobe Entfernungfehler gewährt, da selten zwei Luftziele vorübergehend und noch weniger dauernd in der gleichen

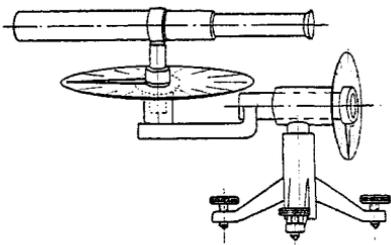


Abb. 185. Der Kippwinkeltheodolit nach TETENS.

Ebene durch die Standlinie anzutreffen sind. Ein weiterer Übelstand ist der, daß bei teilweise bewölktem Himmel die Messung nicht nur wie beim Einstandentfernungsmesser ausfällt, wenn das Ziel vom Hauptstand beim Geschütz aus verdeckt ist und nicht beschossen werden kann, sondern auch wenn es für den Nebenstand verdeckt ist. Der Zweistandentfernungsmesser wird daher wohl nur noch an der Küste neben einem Einstandentfernungsmesser als Aushilfe und Ersatz benutzt werden, siehe aber S. 175.

Die Zweistandgeräte mit Zielrichtung senkrecht zur Standlinie sind erst recht ganz überlebt. Die Darlegung ihrer Wirkungsweise dient aber dem Verständnis der Einstandgeräte. Sie arbeiten mit wesentlich kleineren Standlinien von etwa 20—50 m. Der parallaktische Winkel ist daher nur klein; für seine genaue Messung ist daher neben einem guten Mikrometer die Parallelität der Grundrichtungen der Visierlinien wichtig. Diese Parallelität kann etwa dadurch geprüft werden, daß jedes der beiden Fernrohre mit einem dazu senkrechten Richtfernrohr fest verbunden ist. Werden diese Querfernrohre aufeinander gerichtet, so ist das Zusammenfallen ihrer Visierlinien und damit die Parallelität der

Hauptfernrohre daran erkennbar, daß das Bild des Fadenkreuzes des einen Querfernrohrs im anderen auf dessen Fadenkreuz einsteht. Das erste Querfernrohr wird dann als Kollimator bezeichnet, der ein Okular entbehren kann und ein Fernziel in Richtung seiner Visierlinie schafft. Ist das Fadenkreuz des zweiten Querfernrohrs beleuchtet, so kann das erste Querfernrohr auch durch einen zu seiner Visierlinie senkrechten Spiegel ersetzt werden. Die Strahlen, die von den Punkten des beleuchteten Fadenkreuzes ausgehen und parallel aus dem Objektiv austreten, werden von dem Spiegel zurückgeworfen und erzeugen nach Rückkehr durch das Objektiv ein Fadenkreuzbild, das sich mit dem Fadenkreuz decken muß. Man nennt diese Prüfungsart Autokollimation. Gewöhnlich wird das Fadenkreuz von hinten durch eine schräge Glasplatte (GAUSSISCHES OKULAR) (Abb. 186) oder durch ein kleines um 90° ablenkendes Glasprisma beleuchtet; im zweiten

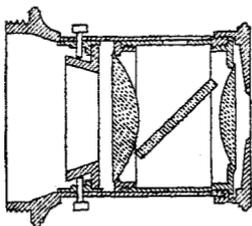


Abb. 186. Ein GAUSSISCHES Okular.

Fall wird das Bild auf ein zweites Fadenkreuz dicht neben oder über dem Prisma eingestellt. Statt Querfernrohre zu verwenden, kann man wie GOULIER die Hauptfernrohre in solche verwandeln, indem man Winkelspiegel mit fester Ablenkung um 90° , insbesondere Pentaprismen (Abb. 46), vor ihre Objektive schaltet. Verzichtet man für behelfsmäßige Messung auf die Verwendung von Fernrohren, so kann man mit den Pentaprismen allein arbeiten, etwa in Anordnung

nach Abb. 226, indem man mit ihnen Ziellinien senkrecht zur Standlinie absteckt. Dabei sucht der eine Beobachter einen solchen Platz im Abstand der etwa mit Bandmaß gemessenen Standlinie vom ersten, daß er über das Prisma hinweg das Ziel sieht und gerade darunter durch das Prisma blickend in gleicher Richtung das andere Prisma; der zweite Beobachter richtet den Blick über sein Prisma hinweg auf das Ziel und stellt im Durchblick durch Ablenkung der Strahlen mit einem Keil von veränderlichem Winkel (S. 137) das andere Prisma in die gleiche Richtung. Statt die Entfernung durch den parallaktischen Winkel zu messen, kann man auch mit einem Ablenkungskeil von festem Winkel arbeiten und die Standlinie ändern, indem sich der zweite Beobachter so lange in Richtung dieser Linie bewegt, bis das Prisma des anderen Standes und das Ziel aufeinander einstehen.

IV. Die Einstandentfernungsmesser.

1. Die Fadenentfernungsmesser.

Ordnet man die optischen Teile des Zweistandgeräts für Frontziele auf den Enden eines langen Balkens an, der um seine Mitte schwenkbar und kippbar ist, so erhält man ein Einstandgerät, das bei kleinerer

Standlinie wesentlich höhere Genauigkeit erfordert, aber noch alle mit zwei Beobachtern verbundene Nachteile besitzt. Wie schon BRANDER 1781 erkannte, gehört eben zu einem Stand auch ein Beobachter. Er ordnete daher (Abb. 187) an den Enden eines Querrohrs je einen um 90° ablenkenden Spiegel und je ein Objektiv an, in der Mitte zwei ebensolche unter 90° gekreuzte Spiegel und dahinter ein gemeinsames

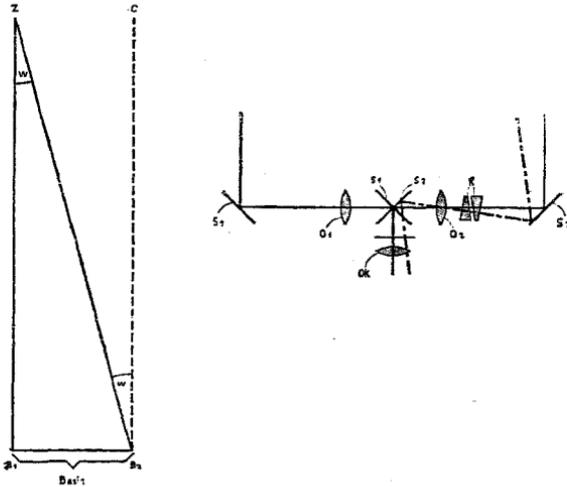


Abb. 187. Die Grundanordnung des Entfernungsmessers mit einem Okular.

Okular, in dessen oberem Gesichtsfeld das von dem einen Objektiv erzeugte Bild und in dessen unterem das von dem anderen auf einen durchgehenden senkrechten Faden eingestellt werden konnte (Abb. 188), indem neben dem ganzen Gerät noch der eine Objektivspiegel schwenkbar war. Ein brauchbarer Entfernungsmesser war damit freilich noch nicht geschaffen; die Aufgabe war mit den Mitteln der damaligen Technik nicht zu lösen. Fragen wir zunächst, welche Genauigkeit man heute von einem Entfernungsmesser verlangt, der für die Hauptverwendung, die militärische, geeignet ist. Die Grenzentfernung, bei der noch auf 100 m genau gemessen werden soll, ist bei der Infanterie etwa 2000 m, bei der Feldartillerie etwa 6000 m, bei Schiffszielen etwa 15000 m. Die technischen Schwierigkeiten sind nun bei einem Instrument für die Infanterie nicht viel geringer, da hier Gewicht und Ausmaße entsprechend kleiner sein müssen. Wählt man für die Infanterie die Standlinie zu 0,7 m, so ist in Winkelmaß $dr_1 = 206000 \times 0,7 \times 100 : 2000^2 = 3,6''$; wählt man sie für den Schiffs- oder Küstenentfernungsmesser zu 10 m, so ist $dr_1 = 0,9''$; die Winkel η selbst sind in den beiden Fällen nur

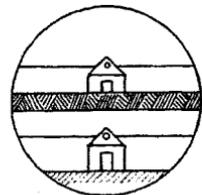


Abb. 188. Das Gesichtsfeld des BRANDERSCHEN Entfernungsmessers.

$1' 12''$ bzw. $2' 15''$. Bedenkt man, daß einem dingseitigen Winkel von $1'$ bei einer Objektivbrennweite von 400 mm in der Bildebene eine Strecke von nur etwa $0,002 \text{ mm}$ entspricht, so versteht man, welche Schwierigkeiten die Technik zu überwinden hatte, um den inneren Aufbau des Entfernungsmessers so durchzubilden, daß mechanische und thermische Änderungen nicht die Lage der optischen Teile zueinander und damit den richtigen Gang der Lichtstrahlen störten. Ist ein Stahlrohr auf der einen Seite um 1° wärmer wie auf der anderen und macht man die rohe Annahme, daß das Rohr dadurch nach einem Radius R gekrümmt wird, der im Verhältnis des Kehrwerts der relativen Ausdehnung für 1° größer ist als die Rohrdicke D , so ist $R = 5 \times 10^6$ für $D = 60 \text{ mm}$. Bei 2 m Standlinie wird so jeder Endspiegel um $0,7'$ und damit jede Visierlinie um $1,4'$ verdreht. Nimmt man ferner an, daß die Objektivbrennweite $\frac{2}{5}$ der Standlinie betrage und die Bildebene an der Kreuzungsstelle der Spiegel in der Mitte liegt, so weicht die Verbindungslinie von Objektiv und Faden um $0,28'$ ab; der Gesamtfehler beträgt also etwa $2,2'$. Um den schlimmeren Fehler der Spiegel auszuschalten, hat man diese durch 45° -Winkelspiegel (Pentaprismen) ersetzt, die nach S. 152 unabhängig von Verdrehungen um die Spiegelachse die Lichtstrahlen um 90° ablenken. An Stelle dieser können auch andere Spiegelgruppen aus zwei und mehr Spiegeln treten, wenn sie nur gegen Drehungen um die gleiche Achse unempfindlich sind. Um den anderen Fehler zu beseitigen, dient als Träger der Mittelspiegel, des Fadens und der Objektivs ein Innenrohr, das in dem Außenrohr kardanisches aufgehängt ist, so daß sich dessen Verbiegungen nicht übertragen; daneben ist noch für geringe und möglichst gleichmäßige Erwärmung des Innenrohrs gesorgt. Die Meßablenkung der Visierlinie durch Spiegelschwenkung ist bei den Pentaprismen nicht mehr möglich; sie hätte ohnehin eine kaum zu erfüllende Genauigkeit der Mikrometerschraube verlangt, ob sie nun zum Verstellen des Spiegels oder zum Querverschieben des Objektivs oder Fadens dient. Man verwendet daher eins der oben S. 137 beschriebenen optischen Mikrometer. Von diesen haben sich besonders der Verschiebungskeil zwischen Objektiv und Bildebene und die Drehkeile, meist zwischen Endprisma und Objektiv (Abb. 187), eingebürgert. Ist die kleinste Entfernung, die noch gemessen werden soll, das 500fache der Standlinie, so würde dem eine Verdrehung des Endspiegels um $3,4'$ entsprechen, während man für die gleiche Ablenkung die Drehkeile so wählen kann, daß jeder um 120° , also nahe 2200mal soviel gedreht werden muß, und dementsprechend die geforderte Genauigkeit der mechanischen Ausführung geringer wird; als Querverschiebung des Objektivs brauchte man $0,8 \text{ mm}$ für $f = 400 \text{ mm}$, während man in dem Falle als Keilverschiebung bequem 300 mm ausnutzen kann. In der beschriebenen Form verlangt der Entfernungsmesser eine sehr feste Aufstellung, da er zwischen der Einstellung der beiden Zielbilder auf den

Faden seine Lage nicht ändern darf; schon eine Verdrehung von wenigen Sekunden durch Erschütterung oder Wind ist unzulässig. Ist gar Stand oder Ziel in fortschreitender oder drehender Bewegung, wie es bei Flugzeug und Schiff der Fall ist, so ist eine brauchbare Entfernungsmessung nicht mehr möglich. Die beiden Einstellungen müssen daher in eine zusammengezogen werden. Wir haben solche Mikrometer S. 134 kennen gelernt. Bei den Doppelbildmikrometern muß hier auf Deckung eingestellt werden; das ist im allgemeinen zu ungenau, und auch die Verwendung des Blinkverfahrens versagt bei etwas unruhiger Luft. Einen solchen Entfernungsmesser mit Einstellung auf Deckung von Doppelbildern gab zuerst RAMSDEN 1790 an. Die gebräuchlichen Entfernungsmesser sind auf Feinmessung mit Halbbildern (Schnittbild oderkehrbild) für einäugige Beobachtung oder mit Raumbild für beidäugige Beobachtung gegründet. Die Ausbildung des Halbbilderentfernungsmessers haben sich besonders seit 1888 die Firma BARR und STROUD, später auch nacheinander die Firmen ZEISS und GOERZ angelegen sein lassen; die Ausbildung des Raumbildentfernungsmessers ist im wesentlichen das Werk der Firma ZEISS seit 1892, auch bei der Ausbildung der Justiereinrichtungen spielte sie eine führende Rolle.

2. Die Halbbilderentfernungsmesser.

Bei dem BRANDERSchen Entfernungsmesser kommt das Einstellen der beiden Bilder auf den Faden darauf hinaus, die beiden Bilder übereinander zu stellen. Man kann dies somit ohne Faden erreichen, wie zuerst ADIE (1863) erkannte. Für ein genaues Einstellen ist es allerdings wesentlich, daß die beiden Bilder in einer wagrechten Grenze (Trennungslinie oder Scheidekante) aneinander stoßen, und das obere Bild die genaue Fortsetzung des unteren bildet, das ganze Bild also nur von der Trennungslinie durchschnitten ist abgesehen von den kleinen Querverschiebungen, die die Entfernung der an diesen Stellen abgebildeten Ziele zum

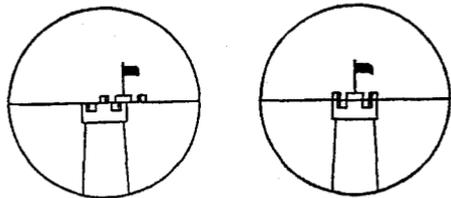


Abb. 189. Die Einstellung beim Schnittbildentfernungsmesser.

Ausdruck bringen, und auf deren Messung die Entfernungsmessung beruht. Abb. 189 zeigt das Gesichtsfeld vor und nach der Einstellung. Wofern nur die Begrenzung des Ziels ein kurzes gerades Stück zeigt, das durch Richten des Entfernungsmessers mit der Trennungslinie geschnitten werden kann, so läßt sich mit großer Genauigkeit einstellen. Da diese mit größerer Neigung der Geraden gegen die Senkrechte zur Trennungslinie abnimmt, muß dann der Entfernungsmesser um die Visierlinie gedreht werden, bis wieder ein senkrechter Schnitt erreicht ist. Um einzelne

hervorstechende Punkte zu messen, wie z. B. Lichter bei Nacht, zieht man die Bildpunkte durch Einschalten von Zylinderlinsen in die beiden Fernrohre in kurze Geraden genau senkrecht zur Trennungslinie aus. Der eben beschriebene Schnittbildentfernungsmesser (Koinzidenztele-

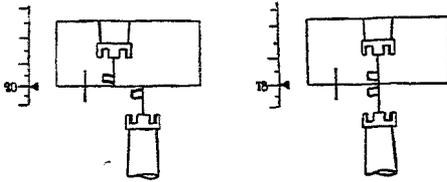


Abb. 190. Die Einstellung beim Kehr-
bildentfernungsmesser.

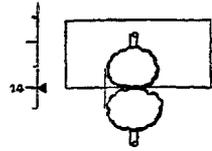


Abb. 191. Die Einstellung mit
Faden beim Kehr-
bildentfernungsmesser.

meter) wird vorwiegend an Bord und an der Küste gebraucht, da die Schiffe mit Masten und Schornsteinen gut geeignete Ziele bilden.

Bei den meisten Feldzielen fehlen geradlinige Grenzen; dafür bieten sie auffällige Punkte und Spitzen; um auch an ihnen zu messen, wird

zweckmäßig das eine Bild in der Höhe verkehrt. Abb. 190 zeigt das Gesichtsfeld dieses Kehr-
bildentfernungsmessers (Invertelemeters). Auch gewährt bei diesen Ge-
räten die Symmetrie zur Trennungslinie schon bei geringen Abweichungen einen besseren Schutz gegen einseitige Fehler. Sind keinerlei scharfe Ab-
grenzungen vorhanden, so greift man darauf zurück, daß man mit einem Strich auf Berührung oder Hälfte-
tung einstellt (Abb. 191).

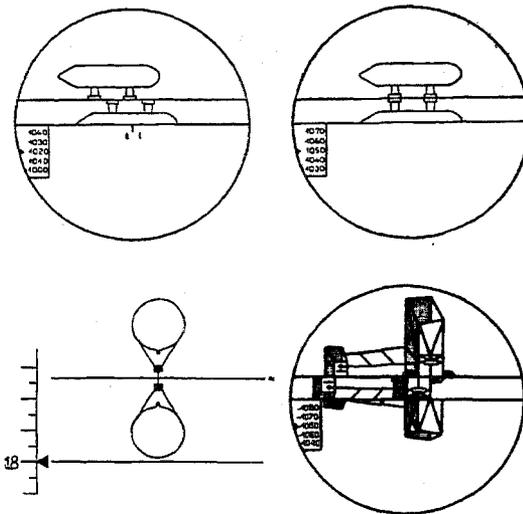


Abb. 192. Die Einstellung von Luftzielen beim Kehr-
bildentfernungsmesser.

Um das aufrechte Ge-
sichtsfeld möglichst wenig zu beschränken, wird das umgekehrte Bild nur in einem Ausschnitt (Fenster oder Streifen) des Gesichtsfelds sichtbar gemacht. Der Teil des Gesichtsfelds, der im aufrechten Bild in diesen Streifen gefallen wäre, wenn das Objektiv für das aufrechte Bild allein ein Bild entworfen hätte, ist ausgefallen; an seine Stelle ist eine höhen-
verkehrte Wiederholung des an die Trennungslinie grenzenden Streifens

des aufrechten Bildes getreten; es haben so entsprechende Punkte in diesem Streifen und in seiner Wiederholung gleichen Abstand von der Trennungslinie, wenn der Entfernungsmesser in Ordnung ist. Richtet man diesen nach der Höhe, so bewegen sich die entsprechenden Punkte gleich und entgegengesetzt nach der Höhe, so daß die Bildpunkte von Zielen mit anderem Höhenwinkel an die Trennungslinie rücken und für die Messung bereit gestellt werden. In den abgebildeten Beispielen treffen sich der obere Punkt des aufrechten und der untere Punkt des umgekehrten Bilds an der Trennungslinie. Dies Verfahren versagt bei Luftzielen (Flugzeugen, Luftschiffen, Ballons), da bei diesen gewöhnlich nicht oben, sondern unten scharf hervortretende Einzelheiten vorhanden und zur Messung geeignet sind; es würde so der Hauptteil des Ziels beim Messen nicht sichtbar sein. Für diesen Fall wird vielfach eine zweite Trennungslinie vorgesehen, an der der untere Punkt des aufrechten mit dem oberen des umgekehrten zum Einstehen gebracht wird (Abb. 192).

Abb. 193 zeigt einen Kehrbildentfernungsmesser für Feldartillerie, während zu Abb. 241 und 243 größere Schnittbildentfernungsmesser beschrieben werden sollen. *c* sind die durch Glasplatten verschlossenen Eintrittsöffnungen für das Licht; hinter ihnen liegen die Penta-

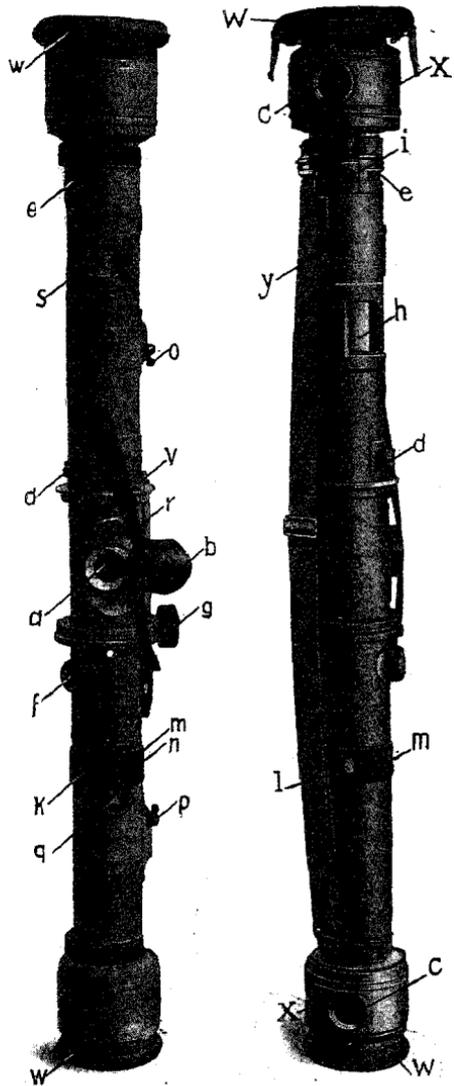


Abb. 193. Ein Kehrbildentfernungsmesser für Feldartillerie.

prismen; *x* sind drehbare Verschlüßringe, *w* Gummipuffer. *a* ist das Okular mit Hebel zum Einstellen auf scharfes Bild und Verschlüßkappe *b*; *d* und *e* sind Suchervisiere. *h* ist die Meßwalze, mit der die Drehkeile verstellt

werden; für die Ablesung der Entfernung wird die Teilung an den Rand des Gesichtsfelds gespiegelt; ihr Licht erhält sie durch das Fenster z , das verdeckt wird, wenn man den Meßmann kontrollieren will, es wird dann an der zweiten Entfernungsteilung unter dem Fenster z abgelesen. g ist der Triebknopf für die Höhenkipfung des Entfernungsmessers in dem Gestellager. Mit f wird umgeschaltet, wenn von der Messung nach Feldzielen zu der nach Luftzielen und umgekehrt übergegangen werden

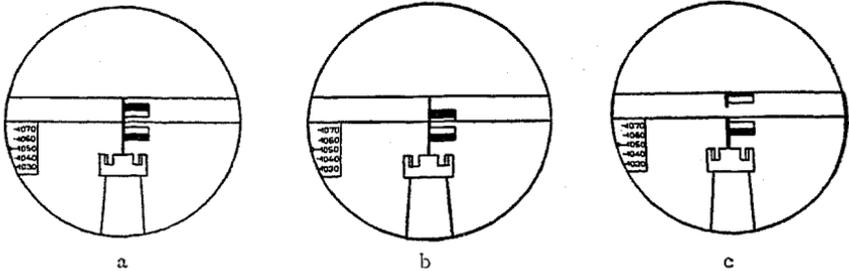


Abb. 194. Das Bild im Kehrbildentfernungsmesser bei Höhenfehler.

soll (S. 164). Mit Rücksicht auf die Luftziele ist das Okular um 60° geneigt und gewährt so eine bequemere Kopfhaltung. Eine Berichtigung des Entfernungsmessers ist notwendig, wenn die Bilder falsche Höhenlage haben, oder wenn falsche Entfernung angezeigt wird. Die Berichtigungswalzen k und l werden erst nach Drehen des Verschlußbrings m zugänglich; die für Entfernung l kann erst nach Lösen der Sperrschraube n betätigt werden. Zur Prüfung auf Höhenfehler läßt man die Spitze eines gut sichtbaren unbewegten Ziels die Trennungslinie berühren, dann muß auch die umgekehrte Spitze gleichzeitig berühren (Abb. 194a); bei Höhenfehler ist sie

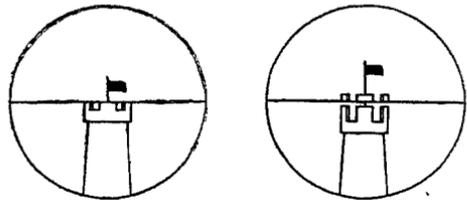


Abb. 195. Das Bild im Schnittbildentfernungsmesser bei Höhenfehler.

entweder bereits unterhalb der Trennungslinie verschwunden (Abb. 194b) oder steht noch von ihr ab (Abb. 194c). Abb. 195 zeigt die entsprechenden Erscheinungen für den Schnittbildentfernungsmesser. Die Entfernung kann nach Zielen in bekannter Entfernung geprüft werden; entnimmt man sie einer Karte, so soll sie möglichst groß sein, da die verlangte Genauigkeit dann geringer ist. Auf den Ersatz solcher Fernziele wird auf S. 176 eingegangen. Haben die Halbbilder in der Richtung der Meßverschiebung, es sei auch die Richtung der Trennungslinie, ungleiche Größe, so wird bei einem Ziel, das aus drei zur Trennungslinie senkrechten Geraden in größerem Abstände besteht, für die einzelnen Geraden die Entfernungseinstellung verschieden. Ist für die Stücke der

mittleren Geraden auf Verlängerung eingestellt, so sind die Stücke der beiden äußeren in entgegengesetztem Sinn gegeneinander versetzt (Abb. 196). Man prüft auf diesen Fehler, indem man für dasselbe Ziel an den entgegengesetzten Enden der Trennungslinie Entfernungseinstellungen macht; diese müssen übereinstimmen.

Während die bisher beschriebenen Halbbildergeräte von diesem Fehler frei sein müssen, wurde von EPPENSTEIN ein solches absichtlich mit stärkerem Vergrößerungsunterschied der beiden Fernrohre eingerichtet, um ohne Mikrometereinstellung die Entfernung messen zu können. Die Erfindung wird durch Abb. 197 erläutert. Das obere Halbbild ist größer als das untere; zur besseren Veranschaulichung der Wirkungsweise sind sie mit einem größeren Höhenunterschied gezeichnet. Der Schornstein a_1, a_2 eines unendlich fernen Dampfers ist über dem Horizont sichtbar, außerdem befindet sich noch ein Dampfboot b_1, b_2 in 500 m Entfernung. Der Entfernungsmesser ist so gerichtet, daß die Bilder a_1 und a_2 in den Strich ∞ der Teilung fallen. Zufällig hat das Ziel b eine solche Lage, daß b_2 ebenfalls auf den Strich ∞ fällt. Im unteren Bildfeld steht dagegen b_1 um die Strecke d^{500} nach links von Strich ∞ ab. Jetzt werde das Gerät so geschwenkt, daß beide Bilder durch das Gesichtsfeld nach links wandern. Nachdem dabei b_2 den Weg l_2 zurückgelegt hat, steht es über b_1 ein, b_2 und b_1 fallen in den Strich 500. Man hat also nur die Zielbilder an der Trennungslinie entlang zu führen, bis sie aufeinander eintreffen, und findet dort die Entfernung angeschrieben. Man unterscheidet einen solchen Entfernungsmesser durch den Zusatz „mit fester Skala“.

Es mögen hier verschiedene Arten von optischen Einrichtungen (wo nicht anders bemerkt, sind solche für Schnittbild dargestellt) beschrieben werden, die dazu dienen, von den durch die Objektive gelieferten Bildern geeignete Teile auszusondern und zusammenzufügen. Wir bezeichnen sie als Scheideprismen, ohne uns darauf zu beschränken, daß sie durch Prismengruppen verkörpert sind. Dabei setzen wir voraus, daß die dem Scheideprisma zugeführten Strahlenkegel Vollkegel sind, ein anderer Fall wird zu Abb. 218 behandelt. Die älteste Form des Scheideprismas bestand aus zwei gekreuzten Spiegeln oder Prismen, die um 90° in der Meßebene ablenken und im Zusammenstoßen parallel zu ihr begrenzt sind. Wird auf den Punkt P , in dem die beiden Spiegelflächen zusammenstoßen, scharf eingestellt, so trennt eine durch P gehende Gerade, die parallel zur Meßebene und senkrecht zur optischen Austrittsachse ist, die beiden Halbbilder. Abgesehen von P ist die Helligkeit in allen Punkten dieser Geraden für jedes Bild gleich 0; volle Helligkeit besteht für jedes Bild außerhalb einer Zone, die die Form eines zur Geraden symmetrischen Doppelkeils hat, der von der Breite o in P bis zur Breite des von dem Ende der Spiegel- bzw. Prismen-

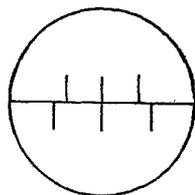


Abb. 196. Das Bild bei ungleicher Größe der Halbbilder.

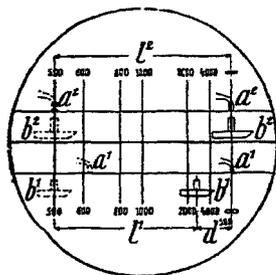


Abb. 197. Die Wirkungsweise eines Schnittbildentfernungsmessers mit fester Skala.

kanten gelieferten Zerstreungskreises anwächst. In dieser Zone nimmt bis zur Geraden die Helligkeit jedes Bildes von der vollen auf 0 ab. Außerdem ist beim Prisma Nebenlicht von den zusammenstoßenden Grundflächen in der Zone störend. Eine bessere Anordnung zeigt Abb. 198 für Kehr Bild; hier sind die beiden Prismen I und II miteinander verkittet, und von dem Flächenteil von II, der an die Kittschicht grenzt, ist nur die Hälfte bis zu einer scharfen geraden Grenze versilbert, die den Grundflächen parallel ist. Wird hier auf die Mitte der Grenze eingestellt, so greifen

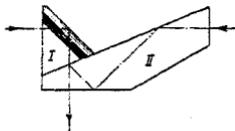
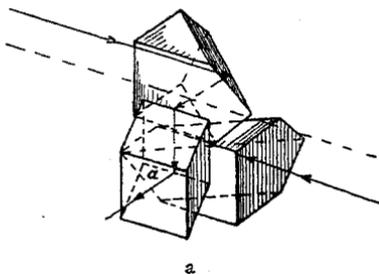
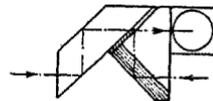


Abb. 198. Ein einfaches Scheideprisma.

die Bilder in einer Doppelkeilzone, dem unscharfen Bild der Silbergrenze, ineinander; die Helligkeit jedes Bildes nimmt wieder von dem vollen Wert bis auf 0 ab, wird aber erst 0 an der gegenüberliegenden Grenze. Die Zone ist hier entsprechend der geringeren Neigung der Grenze nur etwa halb so breit, so daß in dem mittleren Teil des Gesichtsfelds, der für die Messung benutzt wird, die Trennungslinie genügend scharf ist. Ein Scheideprisma für Schnittbild mit 45° Neigung der Trennungslinie zeigt Abb. 231. Sollen die Halbbilder in voller Helligkeit in einer scharfen Geraden aneinander grenzen, so muß diese in der Bildebene liegen, wobei folgende Grundsätze zu beachten sind. Damit das Helligkeitsverhältnis der Bilder von der Haltung des Auges möglichst unabhängig ist, muß entweder wie bei den obigen Beispielen die Austrittspupille für beide Halbbilder zusammenfallen, oder, wenn sie etwa im Prisma halbkreisförmig begrenzt worden ist, müssen die Halbkreise soweit wie möglich zur Deckung gebracht werden. Soll außerdem jede Austrittspupille die größtmögliche Lichtmenge liefern, so müssen die in der Trennungslinie abbildenden Büschel des einen Halbbilds bis zu dieser Linie getrennt von den entsprechenden des anderen Halbbilds verlaufen und erst hier senkrecht zur Trennungslinie so abgelenkt werden, daß die von demselben Punkt der Trennungslinie ausgehenden Büschel so weit als möglich zusammenfallen. Der Ablenkungswinkel muß also mindestens gleich dem Öffnungswinkel der Büschel in der Ablenkungsebene sein. Diese Ablenkung kann durch Glaskeile bewirkt werden, z. B. bei den gekreuzten Prismen durch entsprechende Abschrägung der Austrittsflächen; damit der Hauptschnitt der Endprismen in der Meßebene und das Bild unverdreht bleibt, werden auch die Eintrittsflächen der gekreuzten Prismen mit gleicher Neigung zur Meßebene abgeschrägt. Diese Anordnung hat den Nachteil, daß die



a



b

Abb. 199. Scheideprismen mit durchweg scharfer Trennungslinie.

Eintrittsbrechungen das Bild verschlechtern und schwer so saubere Scheidekanten zu erzielen sind, daß sie die Okularvergrößerung vertragen; eine bessere Form zeigt Abb. 218. Man bringt daher die Büschel statt durch Brechung meist durch Spiegelung zusammen. Die beiden Hauptanordnungen unterscheiden sich dadurch, daß in dem ersten Fall die Scheidekante parallel zur Standlinie, im zweiten parallel zur Zielrichtung ist. Im ersten Fall wird z. B. hinter das Kreuzprisma ein rhombisches Prisma gesetzt, dessen Kante a die Trennungslinie bildet (Abb. 199a). Im zweiten Fall (Abb. 199b) verlaufen beide Achsen im Scheideprisma bis zur Trennungslinie in einer Ebene, die auf der Meßebene senkrecht und parallel zur Standlinie ist, hinterher wird die gemeinsame Achse durch ein Prisma in die Zielrichtung gebracht. Zwischen die Prismen

a und b ist in dem gewählten Beispiel eine dünne planparallele Platte eingesprengt, d. h. ohne Bindemittel zur innigen Berührung gebracht, so daß die von links kommenden Strahlen dort durchgehen, während die von rechts kommenden im dem darüber liegenden Streifen totalreflektiert werden.

Wenn auch die Entfernung von Luftzielen gemessen werden soll, ist es erwünscht, den Einblick gegen die Meßebeane mindestens um 45° nach unten zu neigen. Zur Bildaufrichtung in Verbindung mit Endpentaprismen braucht man mindestens zwei Spiegelungen im Okularprisma, also einen Winkelspiegel. In den beiden ausgezeichneten Fällen dieses einen Winkelspiegels, die sich nur durch dessen Verdrehung um die Spiegelachse unterscheiden, steht der eine Spiegel für die Umkehrung in der Seite senkrecht zur Meßebeane unter 45° zur Objektivachse, der andere für die Umkehrung in der Höhe ist um den halben Schrägwinkel des Okulars gegen die Meßebeane geneigt und lenkt, je nachdem er vor oder hinter dem anderen Spiegel steht, die Achse in der senkrechten Ebene durch die Objektiv- oder Okularachse ab. Abb. 200 ist ein Beispiel für ein Scheideprisma der ersten Art, Abb. 201 für ein solches der zweiten Art mit Kehrbild, bei dem durch Drehen des Kreuzprismas 5,6 mit Knopf 11

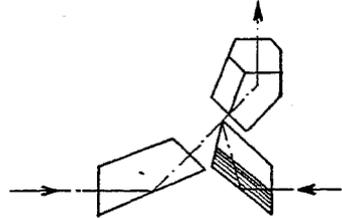


Abb. 200. Ein Scheideprisma für schrägen Einblick.

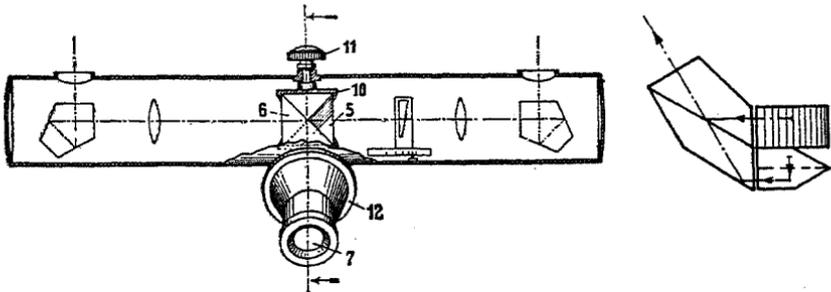


Abb. 201. Ein Kehrbildentfernungsmesser mit Wechsel für Erd- und Luftziel.

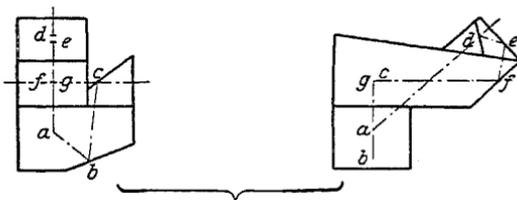


Abb. 202. Ein Scheideprisma für schrägen Einblick.

um 180° für Erd- und Luftziel gewechselt werden kann (siehe nächste Seite). Man kann auch für die Strahlen des einen Objektivs die eine Art, für die des anderen die andere Art anwenden, wie Abb. 202 für ein Kehrbildprisma zeigt; für die an der Trennungslinie vorbeigehenden Strahlen sind die Spiegelungen a, b, c nach der zweiten Art, für die dort zurückgeworfenen sind die Spiegelungen d, e, f, g nach der ersten Art angeordnet. Es ist hier gleichzeitig dafür gesorgt, daß die Objektivachsen wie üblich in eine Gerade fallen, außerdem sind zwei Trennungslinien vorgesehen, deren

Bedeutung im nächsten Abschnitt behandelt wird; es ist hier vorteilhaft, daß die Scheidefläche der Austrittsfläche nahe liegt, so daß vom Okular kein großer Brennpunktswert gefordert wird, und daß sie zur Bildebene wenig geneigt ist, so daß der Einstellungsunterschied für die beiden Trennungslinien gering ausfällt.

Für die Messung von Luftzielen braucht man eine Trennungslinie, an der das obere Bild aufrecht, das untere umgekehrt erscheint. Als solche ist der obere Rand des Kehr bildstreifens geeignet; ist die Fortsetzung des unteren Bilds oberhalb des Streifens dieselbe, wie wenn das Kehr bild nicht einen Teil des Hauptbilds verdrängt

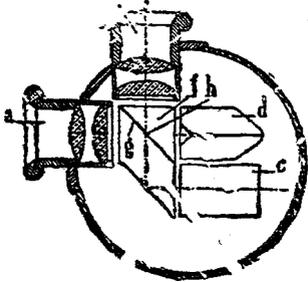
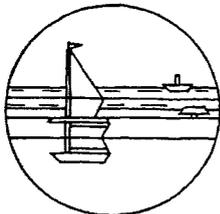


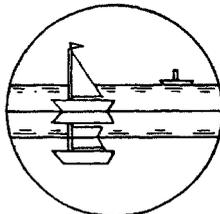
Abb. 203. Ein Doppelokular für Erd- und Luftzielmessung.

hätte, so ist an der oberen Trennungslinie ein Höhenfehler gleich der doppelten Höhe des Streifens vorhanden, wenn der Höhenfehler an der unteren Linie beseitigt ist; dieser Höhenfehler muß beim Übergang zur Messung an der oberen Linie beseitigt werden; dazu diente S. 159 Schalter *f*. Die beiden Trennungslinien können statt übereinander angeordnet sein, es kann dann ohne weiteres an jeder Trennungslinie gemessen werden. Um nicht an Gesichtsfeld einzubüßen, muß man noch das Okular verschieben; die Einrichtung ist aber für Vergrößerungsunterschied der Bilder empfindlich. Enthält das Scheideprisma ein Kreuzprisma mit einem Dach, so kann man dies um seine Austrittsachse um 180° drehen (Abb. 201). Bei Kehr bildentfernungsmessern mit Prismenanordnung *A_g*

nach Abb. 223 kann durch Höhenverschiebung des Prismas *l* umgeschaltet werden. Endlich können beide Bilder durch Um- oder Zuschalten von Prismen umgekehrt werden. Benutzt man die verlorenen Strahlen, d. h. diejenigen, die zu den Halbbildern gehören, die im Hauptgesichtsfeld unterdrückt sind, für das Gesichtsfeld mit der zweiten Bildanordnung, so wird man auf die Einrichtung nach Abb. 203 geführt, bei der das obere Okular für die Messung von Luftzielen dient; es zeigt



a



b

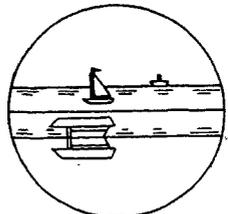


Abb. 205. Das Gesichtsfeld eines Entfernungsmessers mit oberem Übersichtsbild.

das ganze Gesichtsfeld höhenverkehrt und gerade das, was im unteren Gesichtsfeld verdeckt ist. Vereinigt man diese beiden Gesichtsfelder in einem Okular, wobei wenigstens das eine von neuem durch Linsen abgebildet werden muß, etwa nach Abb. 204a, wo von jedem nur die Hälfte verwertet ist, so kann wie oben ohne weiteres an jeder Trennungslinie gemessen werden. Es ist aber als Vorteil anzusehen, daß die Trennungslinien übereinander statt nebeneinander liegen. Dazu kommt, daß die beiden Teile des aufrechten äußeren und des umgekehrten inneren Bildes sich zu einem lückenlosen ergänzen; die Teile des umgekehrten sind allerdings statt aneinander übereinander weg geschoben. Auch ohne die verlorenen Strahlen zu benutzen, kann man bei einheitlicher Abbildung im inneren Streifen erreichen, daß sich die beiden äußeren Segmente zu einem lückenlosen Vollbild ergänzen,

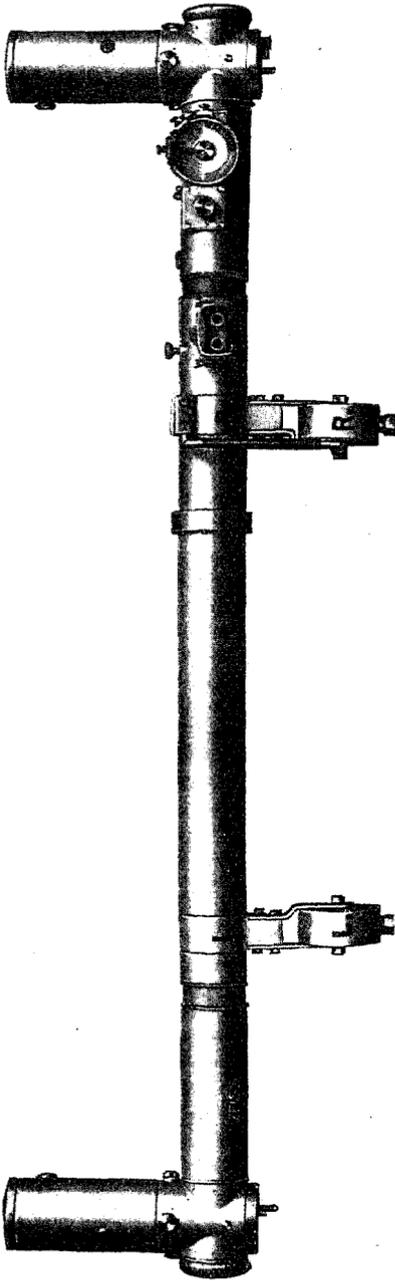


Abb. 206. Ein Raumbildentfernungsmesser mit hinaufgeführten Objektiven.

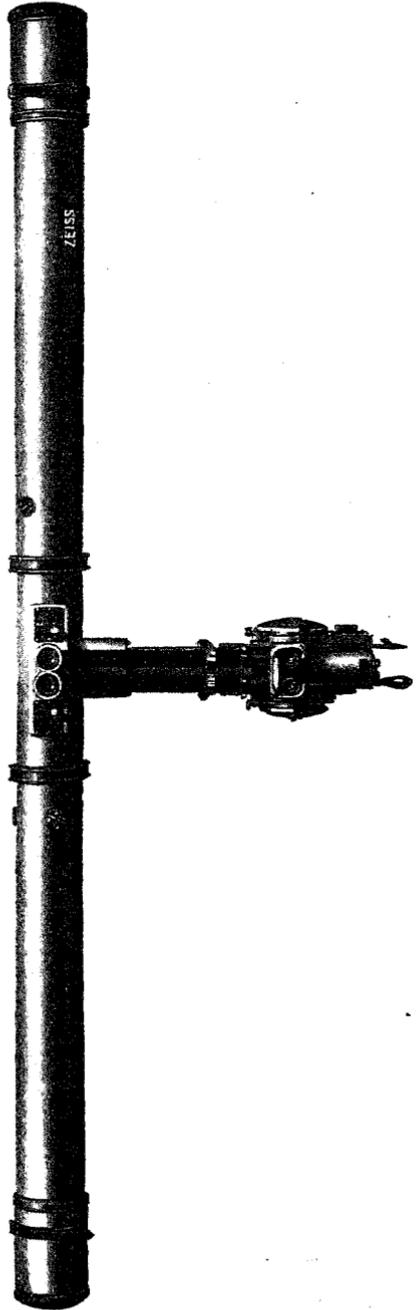


Abb. 207. Ein Raumbildentfernungsmesser mit herabgeführten Okularen.

sei es, daß man die Segmentbilder mit getrennten Objektiven entwirft oder die Teile des von einem einzelnen Objektiv entworfenen Bildes durch Brechung oder Spiegelung

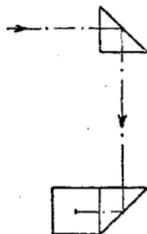


Abb. 208. Eine Prismengruppe als Ersatz des Pentaprismas.

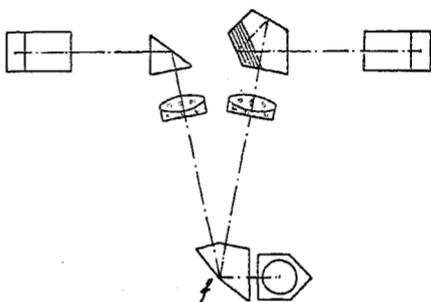


Abb. 209. Die optische Anordnung eines Grabenschnittbildentfernungsmessers.

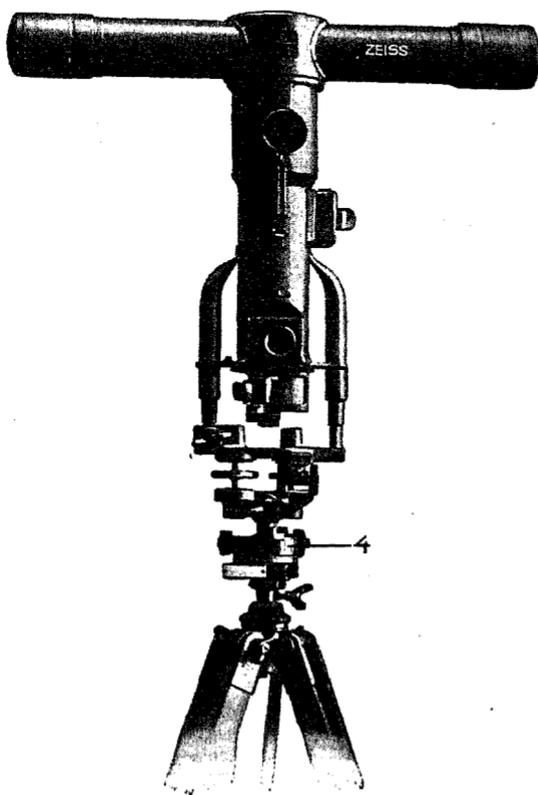


Abb. 210. Ein Grabenschnittbildentfernungsmesser.

um die Breite des inneren Streifens übereinanderschiebt. Verschiebt man um den doppelten Betrag, so daß ein Streifen von der Höhe des umgekehrten Bildes sowohl im oberen wie im unteren aufrechten Bild erscheint (Abb. 204 b), so kann wieder ohne weiteres an beiden Trennungslinien gemessen werden. Verzichtet man in diesem Fall auf die Messung an der oberen Trennungslinie, so kann man im oberen Segment ein Übersichts bild von schwächerer Vergrößerung entwerfen (Abb. 205) und hier die Stelle zum Richten bezeichnen, um das Hauptzielbild auf die Trennungslinie zu bringen. Im allgemeinen dürfte diese Anordnung der vorzuziehen sein, wo das Sucherbild als Ring mit fehlender Mitte den Meßgesichtsfeldkreis umschließt, da das Sucherbild hier eine Lücke hat, die durch das Meßgesichtsfeld nicht voll ergänzt wird.

Auch Entfernungsmesser will man in gedeckter Stellung verwenden. Zwar ist es bei Panzertürmen möglich, die Objektivenden seitlich heraustreten zu lassen; damit sie aber unabhängig von der Turmdrehung

genügend schwenkbar sind, braucht man größere Ausbrüche. Man zieht daher vielfach einen Deckenausbruch vor; es müssen dann die Eintrittsfenster des Geräts gegen die Okulare in der Höhe versetzt sein. Diese Entfernungsmesserart ist auch für Grabendeckung brauchbar. Die Versetzung kann nun entweder durch Herabführen der Lichtstrahlen gleich nach dem Eintritt oder durch Herabführen in der Mitte des Geräts erfolgen; im ersten Fall (Abb. 206) spricht man von hinaufgeführten Objektiven, im zweiten (Abb. 207) von herabgeführtem Okular. Abb. 208 zeigt eine Prismengruppe mit den vorteilhaften Eigenschaften des Pentaprismas, die für die erste Art geeignet ist. Es muß natürlich dafür gesorgt sein, daß innerhalb der Prismengruppe keinerlei merkliche Verlagerungen eintreten. Die zweite Art kann in der Weise ausgeführt werden, daß das Bild eines gewöhnlichen Entfernungsmessers durch ein herabgeführtes Erdfernrohroktular betrachtet wird. Bei nicht zu großer



Abb. 211. Ein Grabenschnittbildentfernungsmesser im Gebrauch.

Standlinie ist aber eine andere Bauart vorzuziehen. Schon bei dem gewöhnlichen, als Querrohr ausgebildeten Entfernungsmesser hat man vielfach versucht, den Einfluß der Verbiegung des Innenrohrs auf die Justierung durch eine andere optische Anlage auszuschalten, indem man die beiden Objektive dicht nebeneinander anordnet oder sie gar zu einem vereinigt, von dem der eine Teil der Öffnung das eine, der andere das andere Halbbild liefert (S. 174). Einen Grabenschnittbildentfernungsmesser mit zwei Objektiven nebeneinander stellt Abb. 209 dar. Es sind hier astronomische Fernrohre mit bildaufrichtenden Prismen verwandt. Das Scheideprisma mit der Trennungslinie f ist nach unten verlegt. Die getrennten optischen Teile sind hier gegen Verlagerung zueinander möglichst unempfindlich, wie nicht weiter begründet werden soll. Die äußere Ansicht des Geräts und seinen Gebrauch zeigen Abb. 210 und 211.

3. Die Raumbildentfernungsmesser (Stereotelemeter).

Wir haben oben gesehen, daß die Menschen im beidäugigen Sehen die beiden verschiedenen Netzhautbilder, von denen ja jedes seine besondere Perspektive hat, zu einem Eindruck verschmelzen, und daß diese geringen Bildverschiedenheiten unmittelbar ohne Überlegung (die meisten

sind ja ohne Kenntnis dieser Verhältnisse) als Anzeichen der Tiefenordnung empfunden werden. Zwar wird die Vorstellung über die absolute Entfernung eines Gegenstands durch andere Umstände bestimmt, aber die Entfernungsunterschiede von Gegenständen in nahe der gleichen Blickrichtung werden mit großer Feinheit erkannt. Würde ein Beobachter in der Zielrichtung einen mit Stiften besetzten Stab ausstrecken, deren Spitzen, von der Mitte zwischen den Augen gerechnet, abgestufte Entfernungen besitzen und danach beziffert sind, so würde er die Entfernung der Gegenstände messen können, indem er die Spitzen dicht darüber senkt und nun im beidäugigen Sehen beurteilt, wo sich die Gegenstände unter diesem schwebenden Entfernungsmaßstab einordnen. Man könnte zwar den Stab noch weiter senken und dann einäugig nach der Verdeckung der Stifte durch den Gegenstand urteilen, doch wäre dies weniger genau, da das Schätzen von Unterteilen aufhört. Einen räumlichen Gegenstand kann man nun für den Seheindruck durch zwei Bilder ersetzen (S. 86), die jedes dem betreffenden Auge geboten, die gleichen Bilder auf den

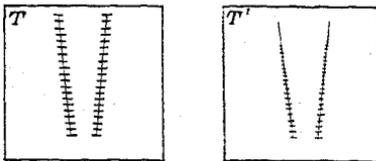


Abb. 212.

Zwei Formen der ROLLETTschen Leiter.

Netzhäuten geben und zu einem Raumbild vereinigt werden. So konnte ROLLETT 1861 den erwähnten Stab durch eine Glastafel senkrecht zur Blickrichtung ersetzen, wie sie Abb. 212 darstellt; das Raumbild dieser Leiter wird wie der Stiftenstab benutzt; bei der Form T' sind die Querstriche, die die entfernten Sprossen des Raumbilds

darstellen, kleiner gewählt, damit der Verkürzung in der Ferne Rechnung getragen wird, und die Sprossen dort in gleicher Breite wie im Vordergrund erscheinen. Das Raumbild der Leiter bzw. ihr Ersatz, wie wir ihn später kennen lernen, unterscheidet man zweckmäßig als Maßraum von dem zu messenden Raum. Die Messung geht dadurch vor sich, daß das Zusammenfallen von Punkten des zu messenden Raums mit besonders bezeichneten des Maßraums festgestellt wird; den Bedingungen des beidäugigen Sehens gemäß wird nur festgestellt, ob Entfernungsunterschiede zwischen den entsprechenden Punkten der beiden Räume bestehen. Es sei noch hervorgehoben, daß nun nicht mehr wie bei dem wirklichen Stab auch nach Verdecken geurteilt werden kann, da die Striche der Glasplatte den dahinterliegenden Teil des Gegenstands immer verdecken. Rein geometrisch betrachtet könnte das Raumbild der Leiter eine feste Wand in der mittleren Entfernung durchdringen; da dies aber der gewohnten Erfahrung widerspricht, so ist die Tiefenwahrnehmung gestört; vielfach scheinen die entfernteren Sprossen in der Wandfläche selbst zu liegen, nur selten sie zu durchdringen. Es darf daher bei Messung von Zielen auf der Wand nur auf die davor liegenden Sprossen geachtet werden. Durch ROLLETT war die Grundlage der Raumbildent-

fernungsmessung gegeben; sie war aber nur auf kurze Entfernungen bis auf etwa 100 m brauchbar.

Nun haben wir aber auf S. 95 kennen gelernt, in wie hohem Maße die Tiefenunterscheidung durch Doppelfernrohre mit erweitertem Objektivabstand gesteigert werden kann; die Verhältniszahl heißt die totale Plastik und ist gleich dem Produkt aus der Fernrohrvergrößerung und dem Verhältnis von Objektiv- und Augenabstand. Nachdem schon MACH die Vergrößerung des Augenabstands durch Spiegel für diesen Zweck vorgeschlagen hatte, kam erst GROUSILLIERS auf den Gedanken, eine Raumbildleiter in ein solches Doppelfernrohr einzubauen. Seine Erfindung wurde von der Firma ZEISS übernommen und von ABBE durch die folgenden beiden Meßverfahren ergänzt. Wie man an dem Stab die Stifte durch einen meßbar verschieblichen Stift ersetzen kann, so kann man auch die Leiter durch eine Wandermarke ersetzen. Man erhält diese, indem man den Abstand zweier Marken auf der Glasplatte, von denen jede dem betreffenden Auge geboten wird, verändert; das Raumbild der Wandermarke erscheint dem unbewaffneten Auge in dem Punkte, wo sich die Blickrichtungen der Augen nach ihren Marken schneiden; die Marke wandert in der Tiefenrichtung vor und zurück. Da es sich nur darum handelt, den Punkt des Maßraums in die gleiche Entfernung zu bringen wie den betreffenden Punkt des zu messenden Raums, so kann ebensogut dieser Punkt statt des ersten verschoben werden. Dies wandernde Raumbild erhält man durch Ablenken der Visierlinie des einen Fernrohrs gegen die des anderen. Der Seheindruck ist bei den beiden letzten Meßarten nicht wesentlich verschieden, da sich bald

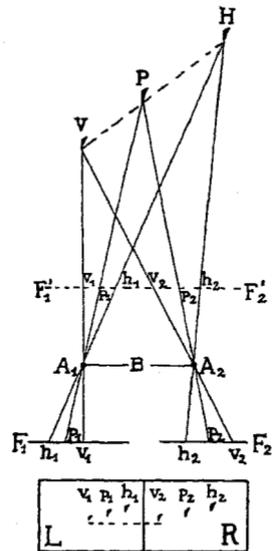


Abb. 213. Zur Entstehung der Markenplatte des Raumbildentfernungsmessers.

die Vorstellung der Wandermarke, bald die des Wanderbilds aufdrängt. Man unterscheidet demgemäß nur zwischen Raumbildentfernungsmessern mit fester Skala und solchen mit Wandermarke. Das Doppelfernrohr dieser Geräte unterscheidet sich im Aufbau von den Halbbildgeräten nur dadurch, daß an Stelle des Scheideprismas in der Mitte zwei getrennte Ablenkungsprismen im mittleren Augenabstand eingebaut sind, hinter denen sich die Okulare befinden, die an den Augenabstand angepaßt werden können. Die beiden Teilmessungen (Marken) befinden sich in der Brennebene der Objektive vor den Okularen. Abb. 213 zeigt unten eine solche Markenplatte, oben ihre Entstehung im Grundriß; V, P, H sind Marken in verschiedener Entfernung, die verschieden hoch über der Grundebene vorzustellen sind; A_1, A_2 sind zwei photographische Objektive, die in

gleicher Höhe in der Ebene B im Augenabstande angeordnet sind und deren Brennweite gleich der der Okulare ist; F_1 , F_2 sind die photographischen Platten, auf denen die Marken in der dargestellten Weise abgebildet werden. Um eine größere Anzahl Marken im Gesichtsfeld unterzubringen, ordnet man sie auf einem in die Tiefe führenden Zickzackwege an (Abb. 214). Beim Entfernungsmesser mit Wandermarke würde eine einzige Raummarke genügen; zur Anregung des räumlichen

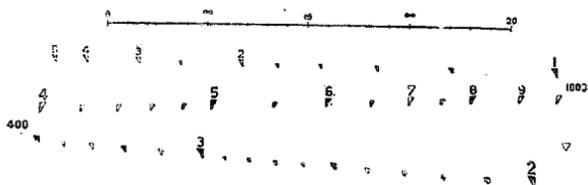


Abb. 214. Das Markenbild eines Raumbildentfernungsmessers mit fester Skala.

Sehens ergänzt man diese durch symmetrische Nebenmarken, z. B. auf zwei Linien, die symmetrisch schräg in die Tiefe führen (Abb. 215). Um plötzlich auftauchende Ziele an jeder Stelle des Gesichtsfelds messen zu können, können auch mehrere Wandermarken in der gleichen scheinbaren Entfernung vorgesehen werden; sie mögen zusammenfassend als flache Wandermarke bezeichnet werden. Die Wanderung des Raum-

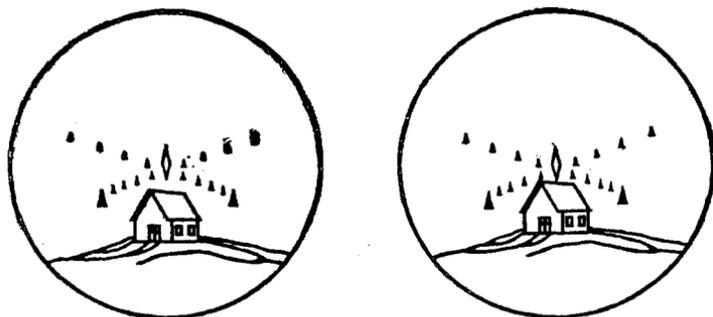


Abb. 215. Das Markenbild eines Raumbildentfernungsmessers mit Wandermarke.

bilds bewirkt man durch dieselben optischen Mikrometer wie die gegenseitige Verschiebung der Halbbilder. Man hat vor der Erfindung von GROSSILLIERS den BRANDERSCHEN Entfernungsmesser mit zwei Okularen im mittleren Augenabstand gebaut, in deren Gesichtsfeld Fadenkreuze eingesetzt waren, um durch Richten des ganzen Geräts das Ziel mit dem einen Kreuz und durch Betätigen der Meßschraube mit dem anderen Kreuz anzurichten. Das zufällig auftretende Verschmelzen der Bilder zum Raumbild wurde aber als Störung empfunden, da man das Wesen und die Bedeutung der Raumbildmessung nicht erkannte. Hierfür ist wesentlich,

daß die Okulare an den Augenabstand angepaßt und der Höhenfehler der Bilder (Abb. 215) beseitigt werden kann. Der Vergleich mit diesem Entfernungsmesser ohne Raumbild macht aber deutlich, daß die geometrische Grundlage der Raumbildmessung dieselbe ist wie die der anderen Meßarten, und daß auch hier die Genauigkeitsformel von S. 142 gilt.

Abb. 216 zeigt einen Raumbildentfernungsmesser mit Einblick schräg von oben, um auch Luftziele bequem messen zu können. Unter den Okularen befindet sich ein Ansatz zum Befestigen eines Handhebels für das Richten nach der Höhe. Über den Okularen sitzt das Gehäuse für die Lampe zur Beleuchtung der Meßmarken. Rechts von den Okularen befindet sich der Meßknopf, weiter die Meßscheibe mit mittlerem Stellknopf für den Ablesezeiger und mit Beleuchtungseinrichtung, noch weiter ein Richtfernrohr mit schrägem Einblick, darüber liegt ein Hilfsvisier, darunter ein elektrischer Schalter und ein Handhebel für den Richtmann. Am rechten Kopfe sieht man den Höhenmesser; er besteht aus einer

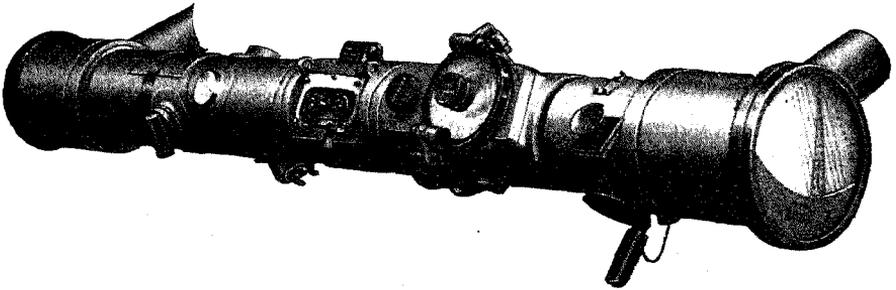


Abb. 216. Ein Raumbildentfernungsmesser mit Wandermarke.

Entfernungsteilung, die vor einer Scheibe mit zwei Scharen von Geraden, die nach Zielhöhe bzw. Kartenentfernung beziffert sind, einpendelt, so daß zu der gemessenen Entfernung die jeweilige Zielhöhe bzw. -Kartenentfernung abgelesen werden kann, indem man sieht, welche Gerade auf den Teilstrich des Pendels einsteht, der der gemessenen Entfernung entspricht. Das Handrad zum Einschalten der Justierprismen (Anordnung nach Abb. 226) ist nicht sichtbar.

Da beim (beidäugigen) Raumbild im Gegensatz zum Einzelbild noch die Tiefe wahrgenommen wird, so ist ein größerer Reichtum an Meßverfahren vorhanden. Bei einer vierten Meßart wird die ROLLETTSCHE Leiter ohne Bezifferung ausgeführt und in ihrer Längsrichtung so verschoben, daß die Beurteilung nach gleicher Entfernung immer an derselben Stelle des Gesichtsfelds erfolgt; diese Verschiebung gibt also das Maß der Entfernung. Man kann so die Teilungsfunktion verschiedenen Zwecken anpassen, insbesondere gleichmäßige Teilung für die Entfernung erzielen (siehe letztes Kapitel). Die fünfte Meßart entspricht dem Halbbildentfernungsmesser mit fester Skala; die Leiter erstreckt sich in der Ver-

bindungslinie der Augen und ist so angelegt, daß ihre Sprossen sämtlich in der gleichen Entfernung erscheinen, dafür sind aber die beiden Bilder des zu messenden Raumes von ungleicher Vergrößerung. Die Leiter ist gemäß den parallaktischen Unterschieden dieser Bilder bei den betreffenden Sprossen zu beziffern. Die Ebene der Raumbildmarken ist hier wie in dem oben erwähnten Fall der mehrfachen flachen Wandermarke die Grundebene, gegen die die Entfernung gemessen wird, wenn auch die Anzeige vom Gerät aus gerechnet werden muß.

Eine solche Grundebene benutzt auch die eine Ausführung der sechsten wichtigeren, von PULFRICH angegebenen Meßart. Die Ebene wird aber hier durch das Raumbild selbst dargestellt, indem den Augen zwei Raumbilder des Ziels gleichzeitig geboten werden, das eine von gleicher Art wie bisher, während für die Erzeugung des anderen den Augen zwei gleiche Bilder des Ziels geboten werden, so daß dies Raumbild in einer Ebene, der Grundebene, liegt. Einen solchen Entfernungsmesser erhält man, wenn man einen Schnittbildentfernungsmesser durch ein Fernrohr ergänzt, dessen Eintrittsöffnung dicht über einer der Endöffnungen liegt (es sei diejenige, die das obere Halbbild liefert), und dessen Okular vor das andere Auge, es sei das linke, gebracht werden kann. Das obere Halbbild im rechten Gesichtsfeld stimmt also für den Meßzweck mit der oberen Hälfte des linken überein, da beide Bilder von demselben Standpunkt, von der kleinen Höhenversetzung abgesehen, aufgenommen sind. Dagegen ist das untere Halbbild rechts von einer anderen Endöffnung wie die untere Hälfte links geliefert. Oben hat man also die Grundebene und unten das zu messende Raumbild. Betätigt man die Meßwalze, so würde man bei Abdecken des linken Auges im rechten Gesichtsfeld die Halbbilder eines Ziels durch Querverschieben übereinander stellen, wie auf S. 157 beschrieben. Läßt man aber das linke Auge für das Zustandekommen des räumlichen Eindrucks mitwirken, so beobachtet man eine Verschiebung der Raumhalbbilder des Ziels gegeneinander nach der Tiefe. Die Genauigkeit ist bei der zweiten Beobachtungsart gegenüber der ersten nur insofern erhöht, als die besonderen Vorteile der Raumbildeinstellung (S. 191) zur Geltung kommen. Man kann aber davon abgesehen offenbar die doppelte Genauigkeit erreichen, wenn dem linken Auge zwei Halbbilder geboten werden, die bei Nullstellung der Meßschraube die entgegengesetzte Abweichung zeigen wie für das rechte Auge. Man hat zu dem Zweck nur die Hälften der Bilder, die für das rechte Gesichtsfeld nicht gebraucht wurden, in unveränderter gegenseitiger Lage durch geeignete optische Mittel nach dem linken zu verschieben, wie Abb. 217 zeigt, wo bei jedem Halbbild eingeschrieben ist, von welchem Objektiv es stammt. Man erkennt, daß die unteren Halbbilder ein tiefenrichtiges, die oberen ein tiefenverkehrtes Raumbild erzeugen, daß also die totale Plastik bei beiden gleich, aber entgegengesetzt ist. Bei der Messung werden wieder die Raumbilder in der

Tiefenrichtung so lange verschoben, bis sie übereinander eintreten. Das obere tiefenverkehrte Raumbild kann auch erzeugt werden, indem das rechte obere Halbbild vom rechten Objektiv, das linke vom linken geliefert wird, doch müssen sie dann seitenverkehrt sein. Der Entfernungsmesser stellt dann ein Doppelrichtfernrohr dar, dessen Hälften Richtfernrohre ohne Fadenkreuz mit gegenläufigen Bildern (S. 117) sind. Damit beim tiefenverkehrten Raumbild nicht mit auswärtsgerichteten Augen beobachtet werden muß, sind hier die Doppelfernrohre nicht wie sonst in Meßstellung ∞ auf Parallelität der optischen Achsen zu justieren, wo dem unendlich entfernten Ziele ein ebenso entferntes Raumbild entspricht, sondern so, daß dem Ziel in kürzester meßbarer Entfernung ein unendlich entferntes tiefenverkehrtes Bild entspricht, dem unendlich entfernten Ziel also ein näher gelegenes Raumbild. Statt des Schnittbilds empfiehlt sich hier auch das Kehr Bild nicht nur wegen der allgemeinen Vorzüge,

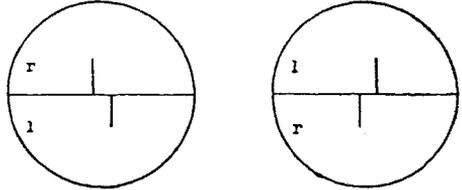


Abb. 217. Die Gesichtsfelder eines Raumbildentfernungsmessers mit verdoppelter Standlinie.

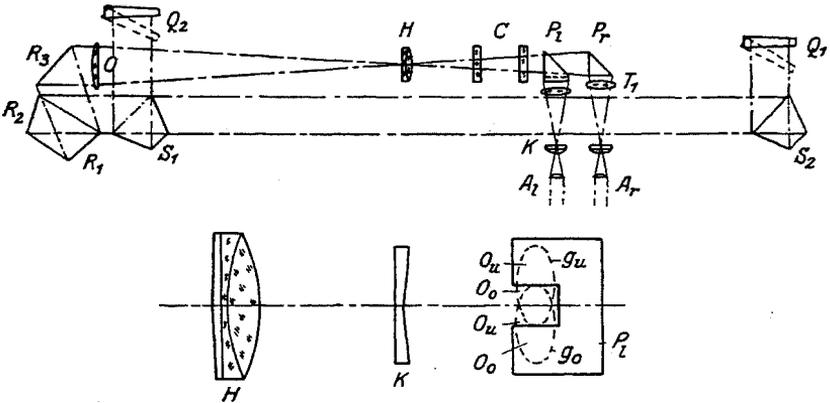


Abb. 218. Der Aufbau des TAYLORSchen Raumbildentfernungsmessers mit verdoppelter Standlinie.

sondern auch weil die ungewohnte, widersprechende, weil umgekehrte Tiefenfolge im höhenverkehrten Bilde weniger störend empfunden wird.

Als Beispiel eines Schnittbildgeräts mit verdoppelter Standlinie mag der TAYLORSche Entfernungsmesser beschrieben werden, weil dessen Anlage zugleich die Bauart mit nur einem Objektiv und mit anderem Scheideprisma zeigt, obwohl auch an der Ausbildung dieser Neuerungen ältere Erfinder beteiligt sind. Nach Abb. 218 werden die Strahlen durch die Pentaspiegel S_1 und S_2 mit verschiedener Höhen-

lage um 90° abgelenkt und dann durch die gemeinsamen Spiegel R_1, R_2, R_3 dem Objektiv O zugeführt, das zwei übereinander gelagerte Bilder am Ort der Feldlinse H entwirft. Diese trägt einen Doppelkeil, der bewirkt, daß vor den Umkehrlinsen T_1 zwei gegeneinander versetzte Bilder der Objektivöffnung entworfen werden. Die beigeschriebenen Buchstaben O_o, O_u, G_o, G_u bringen zum Ausdruck, daß die Strahlen durch die obere bzw. untere Hälfte des Objektivs bzw. Gesichtsfelds gegangen sind. Das Prisma P_l nimmt nur die Strahlen der äußeren Halbkreise auf, während die inneren übereinander gelagerten von dem Prisma P_r aufgenommen werden. Die Umkehrlinsen T_1 entwerfen dann Bilder nach Abb. 217 in der Brennebene der Okulare A_l und A_r ; das linke Okular trägt auf der Feldlinse noch einen Doppelkeil K , der die auseinanderstehenden Halbkreise in der Austrittspupille ineinanderschiebt, wie die des anderen Okulars. Ein Zylinderlinsensystem C bewirkt, daß die Ver-

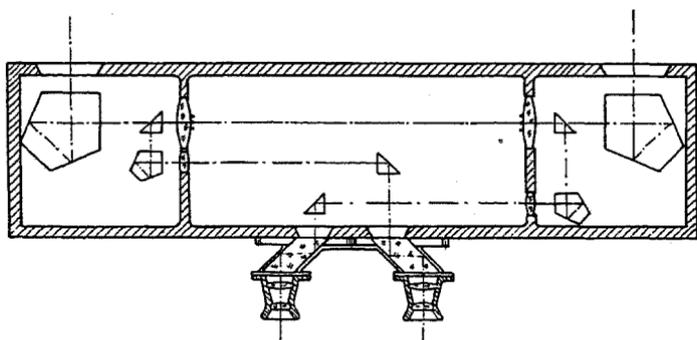


Abb. 219. Ein Raumbildentfernungsmesser mit biaxialem Fernrohr.

größerung in der lotrechten Richtung auf die Hälfte herabgesetzt wird (S. 143), und verzerrt zugleich die Austrittspupillen in erwünschtem Maße, so daß deren Höhen- und Breitenmaße gleich werden. Zur Ablenkung für die Entfernungsmessung und Justierung dienen die schwenkbaren Prismen Q_1 und Q_2 . Hinsichtlich der Unempfindlichkeit der Justierung ist diese Bauart der des Entfernungsmessers nach Abb. 209 verwandt. Sie hat aber den Nachteil, daß für größere Standlinien bei beschränkter Größe der Endspiegel das Gesichtsfeld durch den rechten verringert wird.

Von diesen Nachteilen sind die folgenden unempfindlichen Bauarten frei, die sich aber nicht für das Halbbilderverfahren eignen. Die erste zeigt Abb. 219; es ist ein Raumbildgerät mit fester Skala. Die Objektive hinter den Endprismen sind hier im Abstände ihrer Brennweite angeordnet und tragen zugleich die Teilungen zur Erzeugung der Meßskala. Diese werden zugleich mit den in ihren Ebenen liegenden Zielbildern durch je drei weitere Prismen und die Umkehrlinse vor den Feldlinsen der Okulare abgebildet; die zugleich mit den Okularen schwenkbaren rhombischen Prismen dienen zur Anpassung an den Augenabstand. Es ist ohne weiteres ersichtlich, daß die Querverschiebung eines Objektivs die Lage der Zielbilder zu den Marken in gleicher Weise ändert, oder die Verbindungslinien zwischen Objektivmitte

und Mittelmarke parallel bleiben, solange sich die Marken gegen den hinteren Hauptpunkt des sie tragenden Objektivs nicht verschieben. Das hier benutzte fest gesichtete Fernrohr bezeichnet man oft als biaxiales Fernrohr; ein solches mit umsteckbarem Okular zeigt Abb. 220, wie es schon von Brander 1772 angegeben wurde, allerdings ohne Einstelllinse. Die zweite Bauart nach Abb. 221 ist ebenfalls für Raumbildmessung mit fester Skala. Bei ihr wird ein optisches Bild der Meßmarken in das Ziel geworfen. Die Marken befinden sich auf den kleinen Objektiven im Abstände ihrer Brennweite, so daß durch diese und die kleinen Endprismen die Marken in Richtungen, die nahe senkrecht zur Standlinie sind, im Unendlichen abgebildet

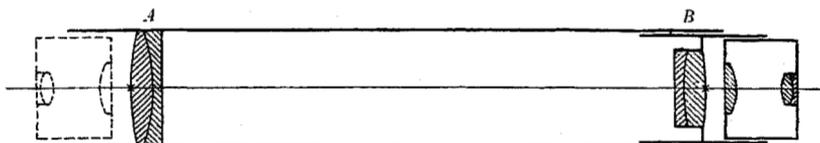


Abb. 220. Ein biaxiales Fernrohr mit umsteckbarem Okular.

werden und hier eine Raumbildskala im Zielraum erzeugen. Die weitere Abbildung von Ziel und Markenraumbild durch die Prismen, Objektive und Okulare eines Doppelfernrohrs mit erweitertem Objektivabstand erfolgt gemeinsam, so daß Lagenänderungen dieser Teile auf die Justierung keinen Einfluß haben. Es kommt also nur auf die Einrichtung zur Erzeugung der unendlich fernen Markenbilder an, die ebenso unempfindlich ist wie der Entfernungsmesser nach Abb. 209 und 218.

Endlich sei noch ein Zweistand-raumbildgerät erwähnt. Bei diesem gehen die Achsen für die Seitendrehung des Fernrohrs in jedem Stand durch den hinteren Hauptpunkt des Objektivs. Auf je einer festen Zylinderfläche um diese Achsen, deren Radius gleich der Objektivbrennweite ist, befinden sich übereinstimmende Winkelteilungen ohne Bezifferung, deren Striche als Meßmarken dienen, und an deren Ort das Bild des Ziels durch jedes Objektiv entworfen wird. Das Bild des linken bzw. rechten Objektivs wird zusammen mit den zugehörigen Meßmarken durch geeignete optische Mittel in das linke bzw. rechte Okular des Beobachters geleitet. Bei dieser optischen Übertragung können keine Fehler entstehen, da sie für Bild und Marke gemeinsam ist. Es wird nach dem Wandermarkenverfahren gemessen. Um Vereinigung von nicht zusammengehörigen Marken zu vermeiden, sind die seitlich aufeinanderfolgenden Marken verschieden geformt oder verschieden hoch gelegen, stimmen aber im rechten und linken Gesichtsfeld überein.

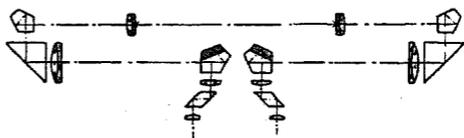


Abb. 221. Ein Raumbildentfernungsmesser mit biaxialer Kollimator.

V. Die Justiereinrichtungen der Einstand-entfernungsmesser.

i. Die Justierverfahren mit einfacher Messung.

Für die Justierung (Berichtigung, Abstimmung) braucht man Ziele in bekannter Entfernung oder deren Ersatz. Bei zweckmäßiger Bauart zeigt der Entfernungsmesser alle Entfernungen richtig an, wenn er nur

eine richtig anzeigt. Die Gestirne können als unendlich entfernt angesehen werden, sie sind aber oft nicht sichtbar. Für kleinere Entfernungsmesser kann auf dem Lande die Entfernung irdischer Ziele vielfach genügend genau aus der Karte entnommen werden; da kürzere Entfernungen im quadratischen Verhältnis genauer bekannt sein müssen, wählt man die Entfernung des Justierziels genügend groß. Liegen drei Punkte A, B, C in gerader Linie, am besten $AB = BC$, so mißt nur das berichtigte Gerät $AC = BA + BC$. Liegt die Justierentfernung noch unter der kürzesten meßbaren, so kann die Messung ermöglicht werden, indem man ablenkende Glaskerle vor die Eintrittsfenster des Entfernungsmessers schaltet; je kürzer die Entfernung ist, je stärker sie also gewählt werden müssen, desto mehr kommt es darauf an, daß der Hauptschnitt der Kerle in die Meßebeane fällt; gegen Verschwenkung um die brechende Kante sind sie am unempfindlichsten bei symmetrischem Durchgang des Lichts in jedem.

Das wesentliche ist, daß in die Eintrittsfenster des Entfernungsmessers zwei Strahlenbüschel von bekanntem nicht zu großem Richtungsunterschied in der Meßebeane eintreten. Die besonderen Einrichtungen zur Justierung schaffen auf diese Weise ein künstliches, jeder Zeit verfügbares Justierziel, dessen Entfernung durch den Richtungsunterschied bestimmt ist. Das einfachste Mittel ist eine Justierlatte, die zwei gewöhnlich gleiche Marken im Abstände der Standlinie trägt.

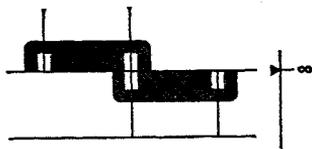


Abb. 222. Das Bild bei der Lattenjustierung mit Halbbildentfernungsmesser.

Sie wird parallel zur Standlinie in naher Entfernung aufgestellt, so daß die eine Marke dem einen, die andere dem anderen Eintrittsfenster als Ziel geboten wird; die beiden Marken wirken dann wie ein einheitliches Ziel in der Entfernung ∞ ; Abb. 222 zeigt, wie die Einstellung auf ein solches Ziel im Gesichtsfeld eines Schnittbildentfernungsmessers erscheint. Bei Raumbildgeräten zeigt das Bild der nahen Latte Parallaxe gegen die Meßmarken; man ordnet daher besondere Hilfsmarken in der Bildebene an oder verschiebt diese Ebene durch geeignete optische Mittel in die Ebene der Hauptmarken. Wird der größte Temperaturunterschied zwischen Latte und Entfernungsmesser zu 5° , der Ausdehnungskoeffizient für beide $= 0,000012$, die Fernrohrvergrößerung zu 30 , der zulässige augenseitige Fehler zu $3''$ angenommen, so ist das Verhältnis zwischen der Mindestentfernung der Latte und ihrer Länge $= 120$. Die Justierlatten sind gewöhnlich mit Füßen zum Aufstellen und einfacher Richtvorrichtung ausgerüstet; größere können als Klapp- oder Stecklatten ausgebildet sein, da sie sich so bequemer fortschaffen lassen; bei senkrechter Anordnung können die Markenplatten auch durch Ketten verbunden sein.

Diese Art der Justierung ist für militärische Zwecke oft noch zu umständlich und bei Schiffsentfernungsmessern meist nicht anwendbar.

Es muß daher die Justiereinrichtung dem Entfernungsmesser unmittelbar vor- oder auch eingebaut sein. Wir haben oben S. 167 Entfernungsmesser kennen gelernt, bei denen zwei Visierlinien, die im Abstände der Standlinie parallel verlaufen, durch geeignete optische Anordnungen vor den Objektiven zusammengebracht werden. Hier handelt es sich um die umgekehrte Aufgabe, zwei zusammenverlaufende Visierlinien in den Abstand der Standlinie parallel zu versetzen; der Strahlenverlauf muß also der umgekehrte sein. Diese Justiereinrichtung kommt nur für die gewöhnliche Bauart des Entfernungsmessers in Betracht, wo die parallele Zielung der beiden darin enthaltenen Richtfernrohre in Meßstellung ∞ durch ihre getrennte Lage gefährdet ist, während die eben erwähnten besonderen Bauarten von diesem Nachteil frei sind. Die wichtigsten Gabelungsarten sind in Abb. 223 zusammengestellt und zwar

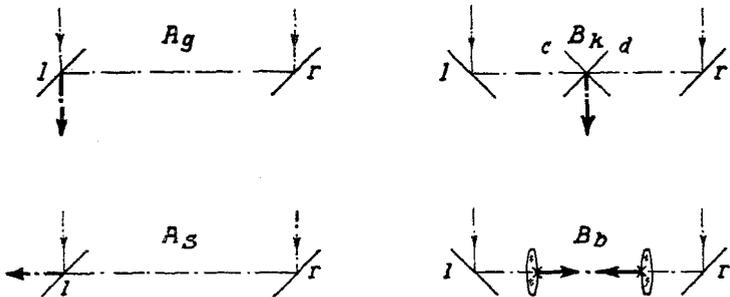


Abb. 223. Die verschiedenen Arten der Strahlengabelung bei den Entfernungsmessern und Justiereinrichtungen.

unter Beschränkung auf den Fall, daß die Achsenstrahlen in der Meße ebene verlaufen. Die Darstellung entspricht den Entfernungsmessern mit unempfindlicher Bauart, und zwar für Halbbilder (beim Raumbild liegen die Verhältnisse ähnlich), während für die Justiereinrichtungen die Strahlen in umgekehrter Richtung verlaufen. Es ist nun zu unterscheiden zwischen den gleichläufigen Anordnungen A_g und A_s mit geradem und seitlichem Einblick und den gegenläufigen Anordnungen, B_k mit Kreuzspiegel und B_b mit biaxialem Fernrohr (S. 175). Bei den Anordnungen A_g , A_s , B_k sei nur ein Objektiv vorhanden, zu dessen oberer Hälfte das eine, zu dessen unterer Hälfte das andere Büschel gehört; demgemäß deckt bei A_g und A_s Spiegel l nur die eine Hälfte des Objektivs, bei B_k sind die Spiegel c , d gegeneinander in der Höhe versetzt. Die einfachen Endspiegel l und r sind schwer in fester gegenseitiger Lage zu erhalten. Um bei A_g die Parallelität der Spiegel zu prüfen, kann man ein Interferenzverfahren anwenden; sind sie dicke auf der Rückseite halbdurchlässig versilberte Glasplatten, wobei der linke Spiegel die volle Höhe hat, so bilden sie einen JAMINSCHEN Interferenzrefraktor (Abb. 224). Bringt man nun die Interferenzstreifen im Gesichtsfeld des

Entfernungsmessers zum Verschwinden, so sind die Spiegel genau parallel. Wesentlich unempfindlicher für die gegenseitige Lage sind Endpentaspiegel (-prismen); diese Anordnungen mögen durch Anhängen des Zeichens β unterschieden werden. Als Ersatz für die Pentaprismen sind alle geeignet, die bei 90° Ablenkung ein Bild in gleicher oder nur höhen-

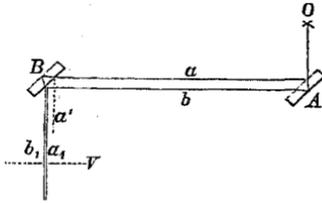


Abb. 224. Der JAMINSche Interferenzrefraktor.

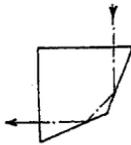


Abb. 225. Das WOLLASTONSche Prisma.

verkehrter Lage zeigen. Es können so insbesondere die Spiegelflächen des Pentaprismas durch Dachflächen ersetzt werden; bei nur einem Dach muß dessen Kante in der Ablenkungsebene liegen. Das WOLLASTONSche Prisma (Abb. 225) kommt wegen seiner ungünstigen Form wenig in Frage. Für manche Zwecke ist eine Versetzung bei der Ablenkung erwünscht; das läßt sich mit drei Spiegeln erreichen (Abb. 208); rechte und linke Prismen sind dabei symmetrisch gleich; das Prisma kann auch in umgekehrter Reihenfolge der Spiegelungen benutzt werden; es wird wohl als „ $3/4$ PORROSatz“ bezeichnet, da es einen Teil des Umkehrsatzes Abb. 57 bildet. Statt

eines natürlichen Ziels verwendet man bei den Justieranordnungen meist einen Kollimator, da durch scharfe Marken von geeigneter Form die Einstellgenauigkeit verbessert wird. Wenn das eine Fernrohr des Entfernungsmessers selbst als Kollimator eingerichtet ist

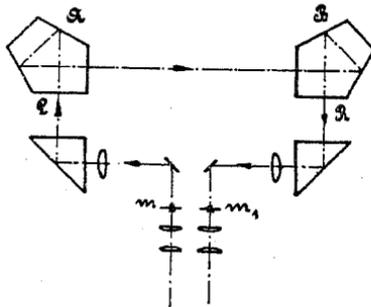


Abb. 226. Die kreisläufige Justieranordnung mit Pentaprismen.

und die Strahlen nach Ablenkung um 180° durch die Justierspiegel in das andere Fernrohr geworfen werden, auf dessen Marke die des Kollimators einzustehen hat, so hat man eine neue Justieranordnung, die als kreisläufige C bezeichnet werden mag. Diese Form der eingebauten Justiereinrichtung wurde zuerst erfunden und zwar von ABBE, der den Entfernungsmesser von GROUSILLIERS mit C_β (Abb. 226) ausrüstete, später folgten die Justiereinrichtungen nach $A_{s,\beta}$ (Abb. 227), $A_{g,\beta}$ und nach $B_{s,\beta}$ (Abb. 228). ABBES Erfindung war grundlegend; seither ist es üblich, bei den Entfernungsmessern mit größerer Standlinie eine Justiereinrichtung einzubauen.

Sind die Endspiegel des Entfernungsmessers selbst Pentaspiegel, so werden diese vielfach in die Justierung nicht mit einbezogen, obwohl die meist kleineren Pentaprismen der Justiereinrichtung größere Unver-

änderlichkeit (siehe weiter unten) als die des Entfernungsmessers zeigen. Diese neue sogenannte Innenjustierung zeichnet sich durch kleineren Raumbedarf aus. Abb. 229 stellt eine kreisläufige, Abb. 230 eine gegenläufige Anordnung mit Kollimator dar, bei der auch das rhombische Prisma fehlen kann; eine solche erhält man ferner, wenn man ein biaxiales Fernrohr zwischen die Prismen der ersten Anordnung schaltet, ähnlich wie in Abb. 228, oder wenn man bei der zweiten einen Teil der Strahlen, die von einem Fernziel kommen und auf der einen Seite des Entfernungsmessers eintreten, in das Objektiv der anderen Seite leitet. Es wird hier nur die richtige Lage der Mittelprismen zu den Objek-

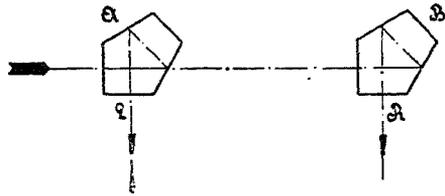


Abb. 227. Eine gleichläufige Justieranordnung mit Pentaprismen.

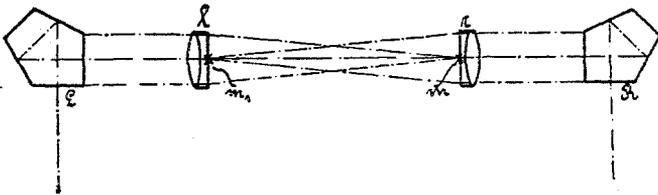


Abb. 228. Eine gegenläufige Justieranordou g mit Pentaprismen.

tiven an den Enden des Innenrohrs geprüft, die namentlich durch Verbiegungen dieses Rohrs gefährdet ist. Es muß also bei einem Kreuzprisma die Kreuzungsstelle der Spiegel in der Verbindungslinie der Hauptpunkte der Objektive liegen. Sind die Teile dieses Prismas fest miteinander verbunden, so wird die richtige Lage auch daran erkannt, daß die Spiegel des Kreuzprismas von Objektivmarken, die in der Nähe der Hauptpunkte auf der optischen Achse liegen, Bilder an derselben

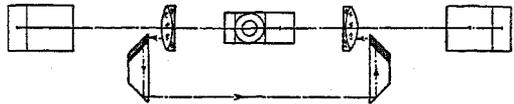


Abb. 229. Eine kreisläufige Anordnung für Innenjustierung.

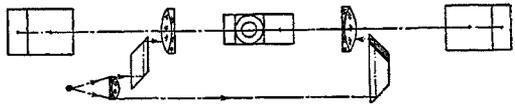


Abb. 230. Eine gegenläufige Anordnung für Innenjustierung.

Stelle entwerfen. Eine solche Prüfanordnung mit Benutzung der verlorenen Strahlen (S. 164) zeigt Abb. 231, wo die Marken nach der Spiegelung am Scheideprisma durch die Objektive in der Bildebene eines zweiten Okulars entworfen werden.

Unter Beschränkung auf die Anordnungen A mit Endpentaspiegeln mag noch gefragt werden, welchen Einfluß Verkippungen dieser Endspiegel haben (siehe auch S. 110). Setzt man voraus, daß keine Torsion des Tragrohrs eintritt, und die Endspiegel sicher gelagert sind, mithin Verdrehungen dieser gegeneinander um die Standlinie ausgeschlossen sind, so ist ihre Verdrehung gegeneinander um die Visierlinie, etwa durch Verbiegung des Tragrohrs, an dem Höhenfehler der Bilder zu erkennen. Da nun bei den Anordnungen $A_{g,\varphi}$ und $A_{s,\varphi}$ die übrigen gemeinsamen Teile keinen Höhenfehler herbeiführen, so kann hier durch Beseitigen des Höhenfehlers für die richtige Ablenkung in der Meßebeane gesorgt werden; bei Benutzung als Justier- vorrichtung muß allerdings der Entfernungsmesser von Höhenfehlern befreit sein. Will man beide mögliche Verkippungen der Endpentaspiegel gegeneinander, sowohl um die Standlinie wie um die Visierlinie erkennen, so muß außer auf Höhenfehler auch auf Verdrehung der Bilder in ihrer Ebene gegeneinander geprüft werden; die Prüfung auf diesen letzten Fehler läßt die Verkippung weniger genau erkennen und wird daher selten angewandt. Die Entfernungsmesseranordnung, wo die Endpentaspiegel wie bei B_φ angeordnet sind, aber die von dem einen abgelenkten Strahlen nach Durchwandern der Standlinie mit den von dem anderen abgelenkten durch einen 90° -Winkelspiegel in die gleiche Richtung gebracht werden, verhält sich in bezug auf die Spiegelverkippungen, wenn nur der 90° -Winkelspiegel mit dem zweiten Endspiegel fest verbunden ist, wie $A_{s,\varphi}$ und $A_{g,\varphi}$. Aus diesem Grunde und weil diese An-

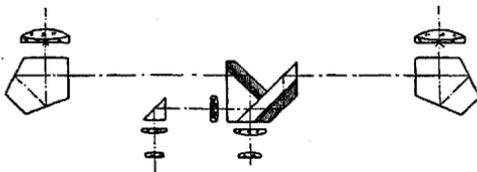


Abb. 231. Eine Anordnung für Innenjustierung mit Objektivenmarken.

nung für die unten besprochene Doppelmessung keine praktische Bedeutung hat, ist sie als besondere Art der Strahlengabelung nicht aufgeführt worden.

Liegt ein Pentaspiegel so, daß sein Hauptschnitt (Schnitt senkrecht zur Spiegelachse) in die Meßebeane fällt, und wird er um die Visier-

linie als Achse um ε gekippt, so bewirkt dies einen Höhenfehler ε (Ablenkung senkrecht zur Meßebeane) des austretenden Visierstrahls und eine Bildverdrehung ε um den unverkippten austretenden Strahl. Sind bei Anordnung B_φ einschließlich der beim gewöhnlichen Entfernungsmesser die beiden Endpentaspiegel um diesen Betrag entgegengesetzt verkipppt, etwa infolge Rohrdurchbiegung, so haben die austretenden Visierstrahlen gleichen Höhenfehler und die Bildddrehung ist bei beiden entgegengesetzt. Die Trennung 2ϑ dieser Strahlen ist mithin durch $\sin \vartheta = \sin^2 \varepsilon$ gegeben und bewirkt einen ebenso großen Meßfehler des Standwinkels; für $\varepsilon = 10'$ ist $2\vartheta = 1,75''$.

Bisher wurde vorausgesetzt, daß Winkelspiegel im Hauptschnitt unverändert ablenken. Das läßt sich aber für längere Zeit nicht erreichen, da die Form des Spiegelträgers, als der auch der Glaskörper des Prismas anzusehen ist, sich durch elastische Nachwirkung und durch ungleiche Erwärmung infolge von Temperaturschwankungen ändert. Wird in der den Pentaspiegel tragenden Grundplatte mit einem Ausdehnungskoeffizienten $K = 0,000012$ der Abstand der nahen Spiegelenden mit a , der der entfernten mit b und der Abstand von a und b mit c bezeichnet, so ist bei gleichmäßigem Temperaturabfall von a nach b um Δt die Winkeländerung des Pentaspiegels $K \Delta t (a + b) : c$; also für $t = 1^\circ$ etwa $4,8''$. Man sucht der Veränderung dadurch entgegenzuwirken, daß man für Spannungsfreiheit von Werkstoff und Lagerung und für guten Wärmeschutz sorgt. Bei den Prismen der Justiereinrichtungen sind die

gewöhnlich kleineren Abmessungen günstig. Vorwiegend werden Glasprismen verwendet. Der Baustoff sollte geringe Ausdehnung und große Wärmeleitung besitzen. Beim Winkelspiegel ist infolge seiner geringeren Masse der Temperatenausgleich besser, außerdem ist man in der Wahl des Baustoffs freier. Auch wenn Spiegel und Träger nicht aus einem Stück sind, sollten sie aus dem gleichen Baustoff bestehen. Werden die Teile nur durch mechanische Mittel zusammengehalten, so wird von der Auflage eine ungewöhnlich hohe Genauigkeit verlangt. Trotzdem man in der Herstellung von nahezu unveränderlichen Winkelspiegeln große Fortschritte gemacht hat, kann man ihre Entwicklung wohl noch nicht als abgeschlossen ansehen.

2. Die Justierverfahren mit Doppelmessung.

Werden bei der Grundform des Einstandentfernungsmessers die beiden Richtfernrohre an den Enden des Balkens als biaxiale (Abb. 232) ausgeführt, so kann die gewöhnliche Messung durch eine zweite ergänzt werden. Nachdem das Gerät in der Meßebeane um 180° gedreht ist

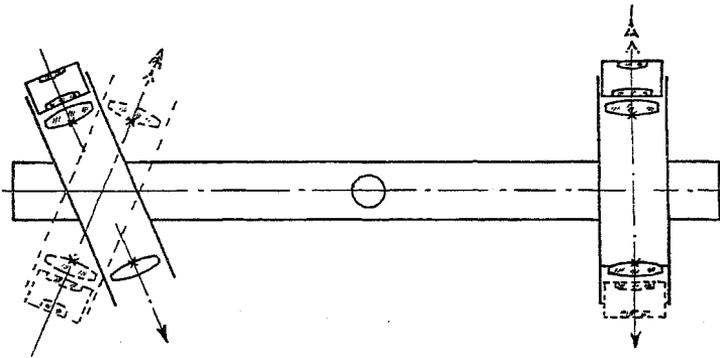


Abb. 232. Die Grundform eines Entfernungsmessers für Doppelmessung.

und die Fernrohre für den umgekehrten Einblick bereitgestellt sind, wird das Ziel zum zweiten Male mit beiden Fernrohren angerichtet. Wird dabei die Entfernung durch Verschwenkung des einen Fernrohrs gemessen, so ist seine Verschwenkung aus der Lage für die erste Messung in die andere Lage für die zweite Messung gleich dem doppelten Standwinkel. Die Genauigkeit der Entfernungsmessung ist entsprechend erhöht und für eine richtige Entfernungsanzeige ist nur nötig, daß jedes biaxiale Fernrohr genau gegensichtig ist, und sich die Winkel zwischen den Zielachsen der Fernrohre während der kurzen Zeit der Messung nicht ändern. Die gleiche Einrichtung ist auch als Justiervorrichtung brauchbar, indem die Fernrohre als Kollimatoren dienen. Das durch die Kollimatoren dargestellte Fernziel wird vor und nach der Drehung der Justiereinrichtung um 180° in der Meßebeane angemessen. Der Entfernungsmesser ist dann richtig justiert, wenn die beiden Anzeigen gleich viel und entgegengesetzt von der Anzeige ∞ abweichen. Die beiden Kollimatoren können auch durch zwei Spiegel auf einem gemeinsamen

Träger ersetzt werden, die beide nahezu senkrecht auf der Standlinie stehen und beiderseits spiegeln. Auf diese werden die Fernrohre des Entfernungsmessers mit Autokollimation (S. 154) senkrecht einjustiert. Diese ältere Erfindung von LE CYRE (1867) läßt sich in verschiedener Weise auf die üblichen Bauarten der Entfernungsmesser und Justierapparate anwenden; zunächst beim gewöhnlichen Entfernungsmesser dadurch, daß Innenrohr und Endpentaprismen gegeneinander um 180° um die Standlinie verdreht werden. Kann für die zweite Messung der Beobachter mit dem Gerät um 180° schwenken, so sind nur die Endprismen um 180° zu drehen. Statt dessen dreht man sie besser einzeln in der Meßebeane um 180° oder stattet sie mit zusätzlichen Spiegelflächen für den Rückblick (Abb. 233) aus. Eine Anordnung mit Verdrehung des Innenrohrs bei unverändertem Einblick zeigt Abb. 234, wo Okular und Prisma Ok an der Drehung nicht teilnehmen, sondern nur die Objektive Ob , Scheideprisma s und Zusatzprisma z .

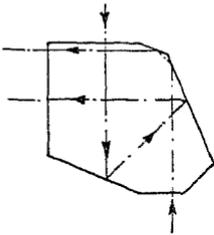


Abb. 233. Ein doppelsichtiges Pentaprisma.

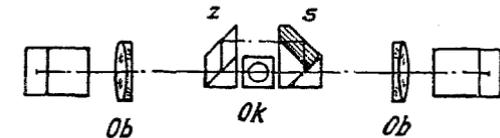


Abb. 234. Eine optische Anordnung für das Innenrohr mit zwei Gebrauchsstellungen.

seitigen. Es ist darunter die Komponente des Ablenkungsunterschieds der Bündel infolge der Spiegelung an einer der Anordnungen verstanden, die in die Meßebeane fällt; unter dem Spiegelungsfehler eines Winkelspiegels, z. B. des Pentaprismas, verstehen wir die entsprechende Komponente der Abweichung der Ablenkung gegen die vorgeschriebene. Man kann nun nach EPPENSTEIN den Spiegeln der obigen Anordnungen je eine zweite Lage geben, in denen der Spiegelungsfehler von gleicher Größe, aber entgegengesetztem Vorzeichen ist, so daß das Mittel der Messungen mit beiden Anordnungen von dem Spiegelungsfehler befreit ist. Selbstverständlich müssen die Bündel denselben Öffnungen und Gesichtsfeldhälften zugeteilt bleiben, wenn nicht entsprechende Vorkehrungen bei der Meßvorrichtung getroffen sind. Zur Anordnung A_s erhält man die zweite, indem man jedem Spiegel durch gemeinsame Drehung und Benutzung der Rückseite des Spiegels ein anderes der beiden getrennten Strahlenbündel zuordnet (Abb. 235). Der Spiegelungsfehler $u_l - u_r$ und ebenso $v_l - v_r$ ist gleich dem halben Winkel der Spiegel; da dieser in den beiden Lagen entgegengesetzt ist, ist es auch der Spiegelungsfehler. Zur Anordnung A_g erhält man die zweite, indem man die Reihenfolge der Spiegelungen vertauscht (Abb. 236). Die gleichen Mittel kann man bei den Anordnungen B_k benutzen, wenn man je ein Paar paralleler Spiegel zu einer der Anordnungen A_s und A_g zusammenfaßt und wie mit diesen verfährt. Bei Verwendung der Pentaprismen ergeben sich noch andere Möglichkeiten für die zweite Anordnung, da diese beim Übergang getrennt bewegt werden können. Bei $A_{s, p}$ kann die zweite Lage durch

Vertauschen der Pentaprismen (Abb. 237) oder durch Drehen der einzelnen Prismen um 90° in der Meßebeane (Abb. 238) erhalten werden, wobei aber der Einblick verlegt wird; der Spiegelungsfehler ist im ersten Fall das eine Mal $w_l - w_r$, das andere Mal $w_r - w_l$, im zweiten Fall $w_l - w_r$ bzw. $-(w_l - w_r)$. Bei der Anordnung $A_{E, \beta}$ kann man sowohl in der Weise wie mit den einfachen Spiegeln als auch durch Drehen der einzelnen Pentaprismen um 90° umschalten (Abb. 239). Hat man bei den beiden Anordnungen B_β nur mit den Fehlern der Endprismen bzw. Spiegel zu tun, die sich

Abb. 235.



Abb. 236.

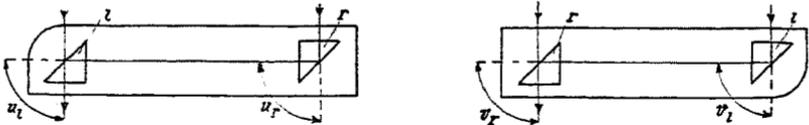


Abb. 237.



Abb. 238.



Abb. 239.



Verschiedene Paare von Spiegelungsanordnungen mit entgegengesetztem Spiegelungsfehler.

ja addieren, so müßte der Fehler eines jeden der beiden Pentaspiegel umgekehrt werden; das ist zwar möglich, indem nach Abb. 240 die beiden einfachen Spiegel einmal wie ein GOULIERSCHES, das andere Mal wie ein WOLLASTONSCHES PRISMA zusammenwirken; es ist aber von Nachteil, daß nicht die gleichen Flächenteile des einen Spiegels benutzt werden. Alle diese Anordnungen können auch mit Umkehrung des Strahlengangs als Justiereinrichtungen verwandt werden.

Die Anordnung nach Abb. 238 ist als sogenannte absolute Justierung von der Firma ZEISS vielfach bei größeren Entfernungsmessern eingebaut worden. Langjährige genaue Versuche hatten ergeben, daß die Pentaprismen die Eigenschaft, um unveränderlichen Winkel im Hauptschnitt

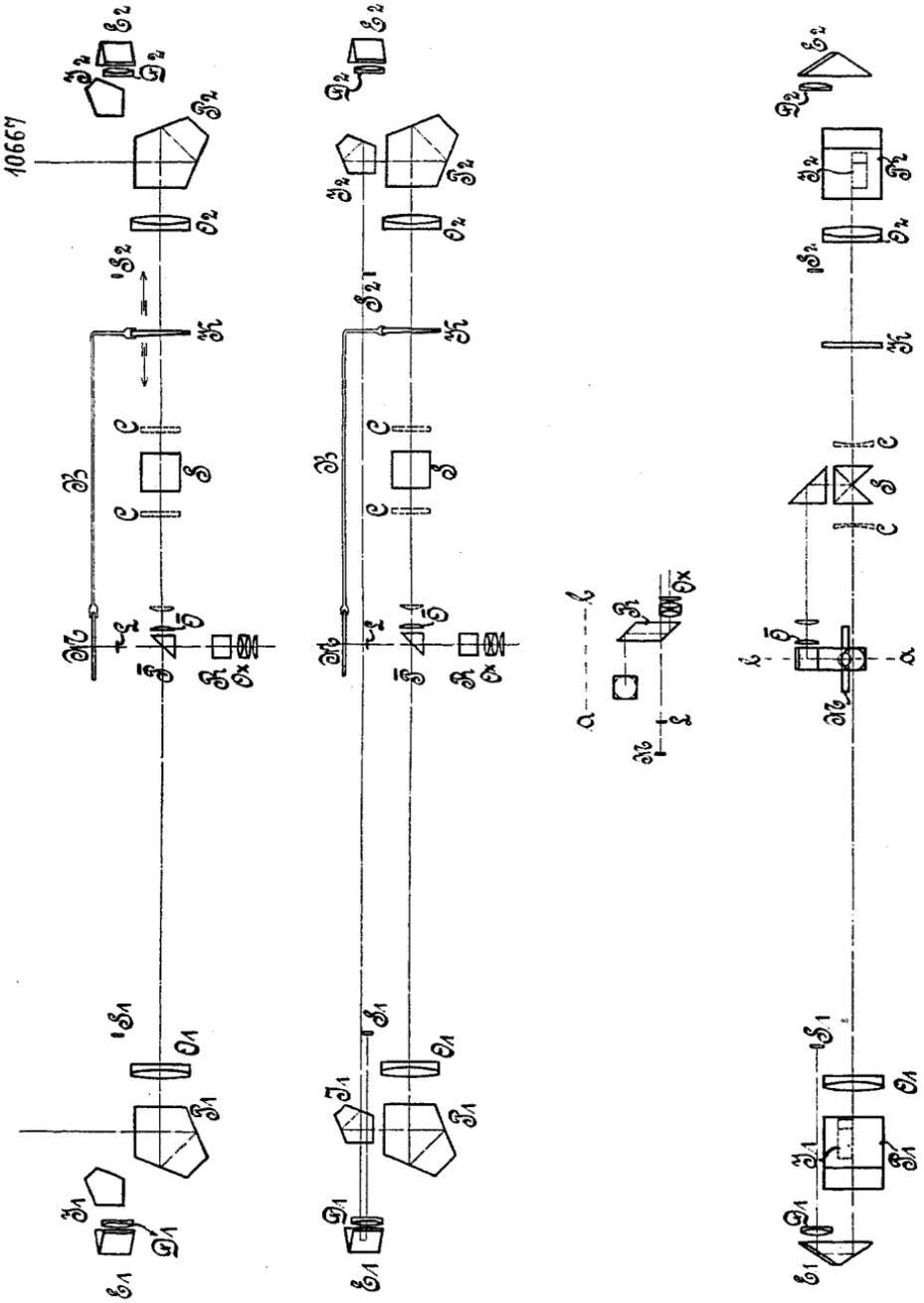


Abb. 241. Der Aufbau eines Schnittbildentfernungsmessers mit absoluter Justierung.

abzulenken, keineswegs im strengen Sinne besitzen. Die Ablenkung ändert sich vielmehr im Laufe der Zeit von selbst, besonders aber bei Temperaturschwankungen; die Form des Prismas hängt nicht nur von den jeweiligen äußeren Verhältnissen, sondern auch von seiner Lebensgeschichte ab. Es gibt kein Mittel, diese Änderungen zu vermeiden; ein guter Schutz gegen äußere Einflüsse verlangsamt sie nur. Nach Abb. 241 fällt das Strahlenbündel, das von dem Kollimator $S_1 D_1$ erzeugt und durch den 90° -Winkelspiegel E_1 umgelenkt wird, und das ein Fernziel darstellt, bei der ersten Justierung etwa von links her auf die Pentaprismen I_1 und I_2 , die in der Höhe versetzt sind. Wenn nun beide nicht um 90° und auch nicht gleichviel ablenken, so werden die Teile des Bündels nach dem Austritt aus den Prismen nicht parallel sein; nach Abb. 242a laufen sie zusammen. Bringt man mit der Meßschraube

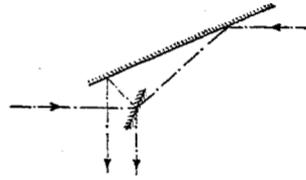


Abb. 240. Ein doppelt wirkender Pentaspiegel.

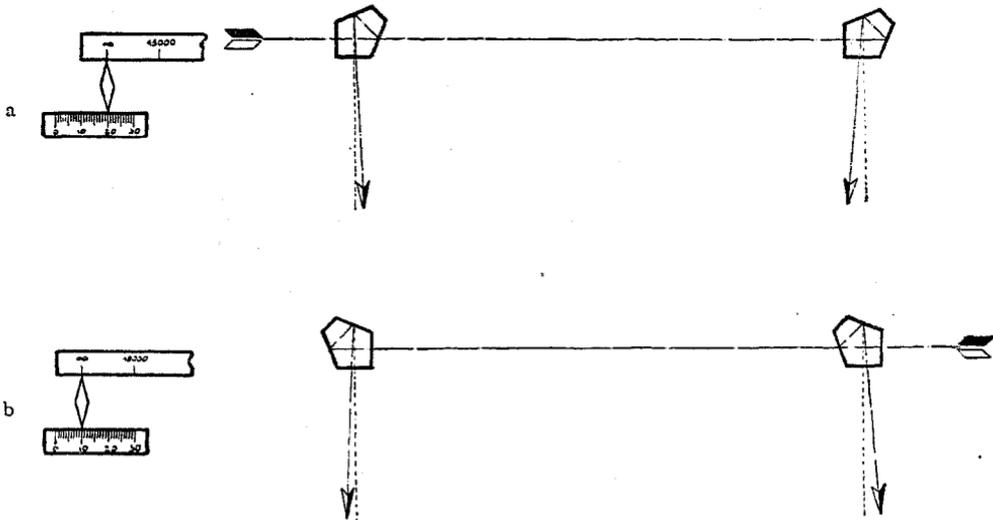


Abb. 242. Die Wirkungsweise der absoluten Justierung.

des Schnittbildentfernungsmessers die Teilbilder des Kollimatorfernziels zum Einstehen und stellt den Zeiger der Entfernungsteilung auf ∞ , so steht er falsch. Die Zeigerabweichung wird nun an einer zweiten sogenannten Justierteilung abgelesen. Werden nun beide Prismen I_1 und I_2 für die zweite Justierung so in der Meßebeane gedreht, daß sie das von dem Kollimator $S_2 D_2 E_2$ gelieferte Parallelbündel in den Entfernungsmesser leiten, so ist die Ablenkung eines jeden Prismas die gleiche wie

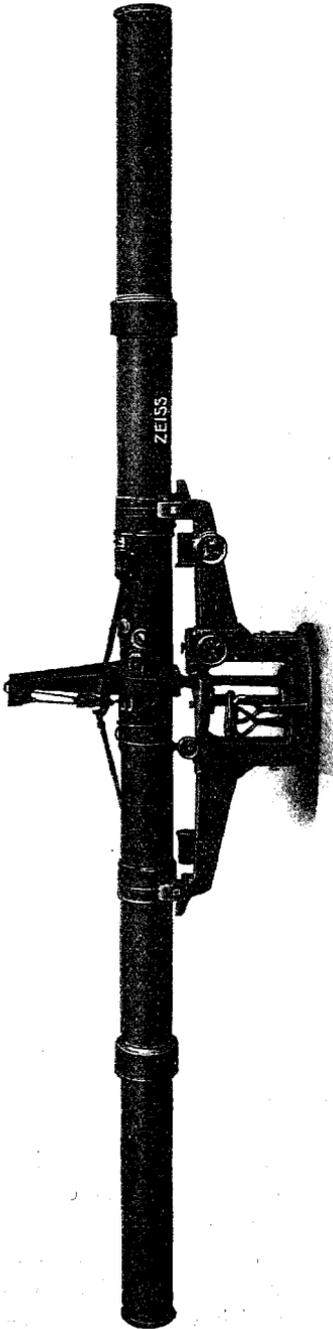


Abb. 243. Ein Schnittbildentfernungsmesser mit 10 m Standlinie.

vorher. Aber die Wirkung ist nach Abb. 242 b entgegengesetzt, indem die Teilbündel auseinanderlaufen, und zwar um den gleichen Winkel, um den sie bei der ersten Justierung zusammenliefen. Stellt man wieder mit der Meßschraube ein und verschiebt den Entfernungsszeiger auf ∞ , so steht er wieder falsch, und zwar ebensoviel nach links wie vorher nach rechts. Wird der Zeiger an der Justierteilung auf das Mittel eingestellt, so zeigt er an der Hauptteilung die gemessenen Entfernungen richtig an. Es sei noch kurz der dargestellte Schnittbildentfernungsmesser beschrieben. S ist das Scheideprisma, die vereinigten Halbbilder werden durch die Umkehrlinsen \bar{O} , die für Änderung der Fernrohrvergrößerung verschoben werden können, in der Brennebene des Okulars O^* abgebildet. Zum Messen der Entfernung dient der Verschiebungskeil K ; die mitverschobene Entfernungsteilung M wird durch die Linse L am Rande des Gesichtsfelds abgebildet. CC sind Zylinderlinsen (S. 158) für die Messung der Entfernung von Lichtern. Abb. 243 gibt die äußere Ansicht eines Schnittbildentfernungsmessers von 10 m Standlinie mit absoluter Justierung wieder. Bei diesem werden auch die Endwinkelspiegel und die Justier Vorrichtung von einem Innenrohr getragen, innerhalb dessen erst das Tragrohr für die Objektive und das Scheideprisma gelagert ist. Die Entfernung kann sowohl von außen als auch von dem Messenden im Okular ab-

gelesen werden. Ein zweites Okular im Abstand für das andere Auge gibt ein Sucherbild. Der Entfernungsmesser kann ohne Schutzkasten versandt werden; es werden nur an den zu schützenden Stellen Deckel aufgeschraubt. Das Gestell ist mit einem Kran zum Einheben des Geräts versehen. Um bei größeren Entfernungsmessern Störungen des Strahlengangs im Inneren durch Refraktion auszuschließen, hat man vorgeschlagen, diese Geräte luftleer zu machen. Betrachtet man eine Luftschicht von der Länge l , in der über die Dicke d die Temperatur um t gleichmäßig abnimmt, so ist die Ablenkung ε eines durchgehenden Lichtstrahls $l\delta n:d$, wo die Änderung δn der Brechung für Luft $= -1,1 \times 10^{-6} t$. Für $t = 1^\circ$, $l = 1000$ und $d = 30$ ist ε nahe $7''$.

Ein wesentlich anderes Justierverfahren geht auf BARR und STROUD zurück; voll ausgebildet wurde es aber erst durch STÜTZER. Es gründet sich darauf, daß

Abb. 244.

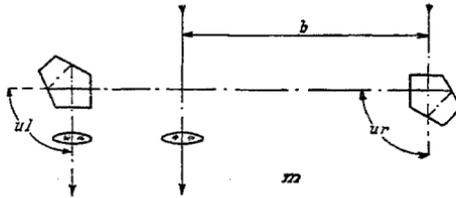
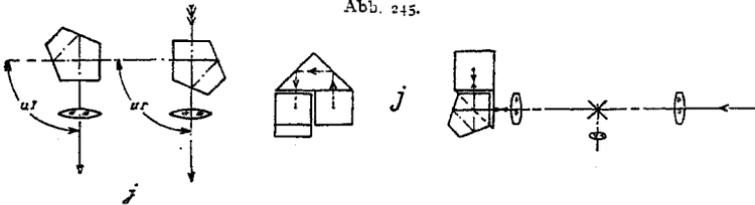


Abb. 245.



Spiegelanordnungen für die Änderung der Standlinie auf Null bei ungeändertem Spiegelungsfehler.

sich mit Änderung der Standlinie in bekanntem Verhältnis der Standwinkel, der die Entfernungsanzeige bestimmt, im gleichen Verhältnis ändert, wenn dabei die Ablenkung der Lichtstrahlen im Gerät unverändert bleibt, und der Entfernungsmesser richtig justiert ist. Sind für diese beiden Standlinien die Standwinkel eines Ziels in bestimmter Entfernung η_1 und η_2 und werden sie durch unrichtige Justierung um δ verfälscht, so ist ihr Verhältnis $(\eta_1 + \delta) : (\eta_2 + \delta)$ statt $\eta_1 : \eta_2$. Damit $\eta_1 : \eta_2$ gleich dem Verhältnis der Standlinien $b_1 : b_2$ ist, muß gefordert werden, daß beim Wechsel der Standlinie der Spiegelungsfehler derselbe bleibt, während er beim vorigen Justierverfahren nach der Umschaltung entgegengesetzt gleich sein mußte. Verzichtet man auf diese Forderung, so ist z. B. der Übergang zur Standlinie Null bei den Spiegelanordnungen, wo die Strahlen vor den in der Meßebebene unversetzten Objektiven vereinigt werden, einfach durch Ausschalten der den Objektiven vorgelagerten Spiegel zu erreichen. Obwohl auch sonst so die Bauart besonders einfach wird, sollen im folgenden nur Anordnungen behandelt werden, die dieser Forderung genügen. Hier kommt ferner die gewöhnliche optische Anordnung B_g des Entfernungsmessers in Betracht, die sich von B_z nur dadurch unterscheidet, daß der Kreuzspiegel nahe der gemeinsamen Objektivbrennebene liegt. Wir beschränken uns auf die ausgezeichneten Fälle, wo die Standlinie auf den Wert Null oder auf den entgegengesetzten Wert

gebracht wird, und gehen zunächst auf den ersten Fall ein. Bei der Standlinie Null muß die Entfernung ∞ gemessen werden; wird in dieser Stellung j der Entfernungsmesser berichtigt, so wird damit der Spiegelungsfehler ausgeglichen, und wenn in der anderen, der Meßstellung m , der Spiegelungsfehler der gleiche ist, ist dieser Fehler auch hier ausgeglichen. Bei der Anordnung $A_{s, \beta}$ mit Endwinkelspiegeln geht man von der Stellung m zu j über, indem man Prisma r über l schiebt. Bei $A_{g, \beta}$ ist dies nur möglich, wenn statt des einen Objektivs zwei nebeneinander angeordnet sind (Abb. 244) oder wenn der eine Endspiegel ein $3/4$ PORROSatz ist, ebenso wie bei den drei Anordnungen B_{β} der eine Endspiegel ein solcher Satz sein muß (Abb. 245). Bei den letzten drei Anordnungen ist das Ziel in der Justierstellung um 90° gegen das Gerät verschwenkt; das eine Bündel tritt unmittelbar in das eine Objektiv, das andere nach Durchgang durch beide Endspiegel in das andere. Für jede Anordnung A gibt es noch eine zweite gleichwirkende Anordnung, die man erhält, indem man die Spiegelgruppe um eine den austretenden Strahlen parallele Achse dreht und den

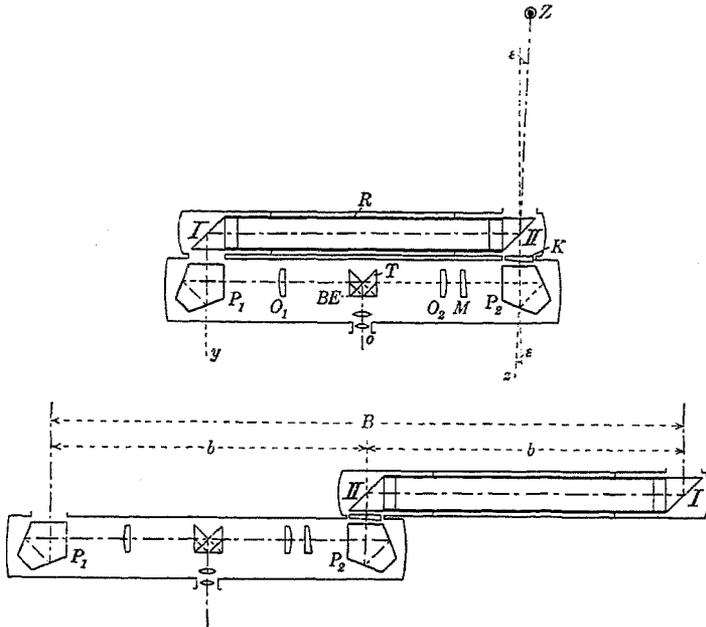


Abb. 246. Der Aufbau eines Klappentfernungsmessers für Doppelmessung in Justier und Meßstellung.

Objektiven richtig zuordnet; bei $A_{s, \beta}$ wird dadurch die Zielrichtung um 180° verlegt. Außerdem ist die Justieranordnung A_s für A_g und umgekehrt brauchbar, wenn wieder die Zuordnung zu den Objektivhälften richtig ist. Für dies Justierverfahren eignen sich ferner Klapp- und Steckentfernungsmesser mit rhombischen Vorsatzspiegeln; Abb. 246 zeigt zu der Entfernungsmesserstellung die Justierstellung; man erreicht sie zweckmäßig, indem man zu der Klappdrehung noch eine Drehung des umgeklappten Rohrs um seine Längsachse fügt. Die Änderung der Standlinie wird bei festem Standwinkel zuweilen auch zum Messen der Entfernung benutzt; dies hat den Vorteil, daß die Entfernungsteilung ohne weiteres gleichmäßig wird, und daß die Ausdehnung des Bereichs der meßbaren Entfernungen nach unten weniger oder gar keine Schwierigkeiten bietet. Der Spiegelungsfehler ist aber hier auch bei den Anordnungen $A_{s, \beta}$ und $A_{g, \beta}$ nicht ausgeschaltet, da die Unveränderlichkeit der Winkel-

spiegel bzw. -prismen wohl für die kurze Zeit der Justierung nach dem Doppelmeßverfahren, nicht aber für längere Zeit gewährleistet, noch auf übereinstimmende Änderung der beiden Prismen nach dem Früheren gerechnet werden kann; man kann natürlich wie vorher justieren.

Was nun den zweiten Fall, der wegen der erhöhten Genauigkeit wichtiger ist, betrifft, so kann man nach S. 172 die negative Standlinie dadurch erhalten, daß den Enden der Standlinie andere

Öffnungen bzw. Gesichtsfeldteile zugeordnet werden. Die Umkehrung des Vorzeichens der Standlinie durch Änderung der Spiegelanordnung ohne Änderung des Spiegelungsfehlers ist am einfachsten bei den Anordnungen, wo die Büschel an dem einen Ende der Standlinie zusammengeführt werden. Bei $A_{s, \rho}$ genügt es, die Endprismen zu vertauschen, ohne die Zuordnung zu den Objektiven zu ändern. Bei $A_{g, \rho}$ sind ebenfalls die Endprismen zu vertauschen, das neue Paar ist aber der anderen Objektivhälfte zuzuordnen. Der Übergang in die Meßlage kann bei A_g auch mit dem ganzen nur einfache Spiegel enthaltenden Vorsatzrohr bewirkt werden. Bei den gewöhnlichen Entfernungsmessern nach B_g kann man die Umstellung besonders einfach erreichen, wenn man auf jeder Seite einen Zentralspiegel (Abb. 140) hinter das Endprisma in den Strahlengang fügt (Abb. 247). Man hat dann nur beide Endprismen senkrecht zur Meßebene entgegengesetzt zu verschieben. (Nebenbei bemerkt ist diese Spiegelanordnung auch geeignet, um die kreisläufige Justieranordnung für Doppelmessung nach Art der absoluten Justierung auszubilden.) Es sei noch kurz die Wirkungsweise der Justierung mit umgekehrter Standlinie beschrieben. Für die Abbildung (248) ist der Übersichtlichkeit wegen die Anordnung A_g gewählt, obwohl die Beschreibung allgemein gilt. In der Justierstellung werden zunächst die beiden Bilder des Ziels durch Drehen der Meßschraube zum Einstehen gebracht. Ist φ der Standwinkel und liegt der Spiegelungsfehler ε in der Abbildung von Richtung z nach rechts, so wird $\varphi + \varepsilon$ gemessen. Bei der Umschaltung bleibt die Richtung der Visierlinien ungeändert, die den einzelnen Punkten der Objektivbildebene entsprechen. In der Meßstellung muß die Schraube also von der Nullstellung um $\varphi - \varepsilon$ im entgegengesetzten Sinn gedreht, von der Justierstellung aus also um

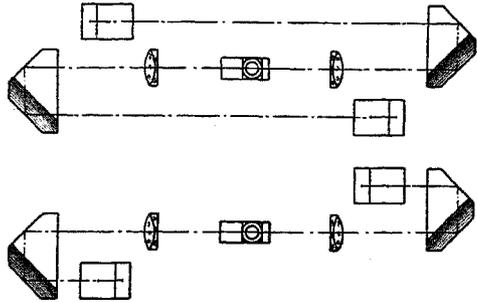


Abb. 247. Der Aufbau eines Entfernungsmessers mit verdoppelter Standlinie ohne Spiegelungsfehler.

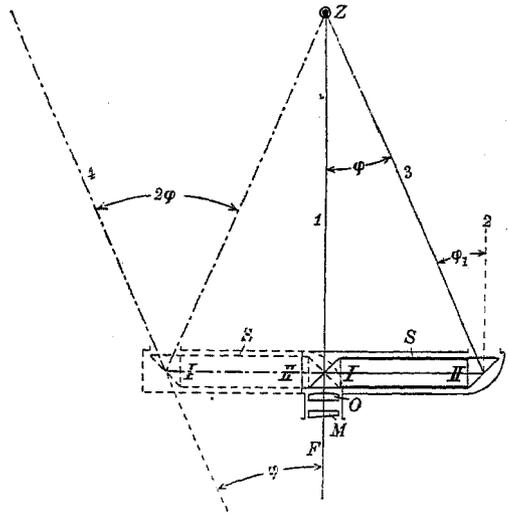


Abb. 248. Die Wirkungsweise des Entfernungsmessers nach Abb. 247.

2 φ . Sind in der Justierstellung die Zielbilder für die Entfernungsanzeige ∞ zum Einstehen gebracht, so gibt ein mit der Einstellung von 2 φ gekuppelter Entfernungszeiger die richtige Anzeige. Will man nicht immer die Doppelmessung machen, so wird man noch eine zweite Entfernungsteilung vorsehen, die der Einstellung φ entspricht. Man hat dann zunächst durch eine Doppelmessung die richtige Entfernung eines geeigneten Ziels festzustellen und die Anzeige in der zweiten Teilung damit in Übereinstimmung zu bringen.

Man kann auch einen Entfernungsmesser mit Hilfe eines anderen mit gleicher Standlinie durch Gegenrichten justieren; der Einfachheit der Beschreibung wegen seien es Schnittbildgeräte. Nachdem bei beiden die Meßstellung ∞ hergestellt ist, werden sie mit gegenüberstehenden Eintrittsfenstern aufeinander gerichtet. Sind beide richtig justiert, so müssen von einer zur Scheidekante senkrechten an deren Ort befindlichen Marke im ersten Gerät, sei es, daß sie eigens dort angebracht ist oder daß z. B. bei wagerechten Geräten ein Lotfaden durch das Okular des ersten dort abgebildet wird, im zweiten Gerät Teilbilder entworfen werden, die aufeinander eintreten. Ist dies nicht der Fall, so wird das eine Gerät so berichtigt, daß bei unveränderter Anzeige ∞ die Teilbilder eintreten. Die beiden Geräte haben nun entgegengesetzt gleichen Justierfehler. Mißt man mit beiden nacheinander die Entfernung des gleichen Ziels, so ist das Mittel aus den Standwinkeln richtig und die Geräte können danach berichtigt werden. Dies Verfahren wird noch einfacher, wenn man es auf ein Raumbildgerät mit zwei Teilentfernungsmessern (S. 172) anwendet, eines für die positive und einen für die negative Standlinie. Richtet man diese Teilgeräte gegeneinander, so ist hier die Justierung des Raumbildgeräts schon damit vollendet, daß man bei Meßstellung ∞ die Teilbilder einer Marke im ersten Teilgerät im zweiten zum Einstehen bringt. Wird nun das Gerät wieder für die Entfernungsmessung von Zielen hergerichtet, so erscheinen die Raumbilder eines unendlich fernen Ziels in der gleichen Entfernung, wie es der Meßstellung ∞ entspricht und für die richtige Justierung genügt. Die Wirkung der obigen Justierung besteht ja darin, daß die den beiden Objektiven entsprechenden Büschel des einen Teilgeräts und die des anderen entgegengesetzt gleichen Winkelunterschied in der Meßebeane erhalten. Ein solcher Unterschied hat aber beim ganzen Raumbildgerät nur die Wirkung, daß bei beiden Raumbildern die Entfernung die gleiche scheinbare Änderung erfährt; dies hat aber auf die Messung keinen Einfluß, da es dafür nur auf den Entfernungsunterschied der Raumbilder ankommt.

VI. Die Genauigkeit der Einstandentfernungsmesser.

Wenn schon die Genauigkeit des Zielens von so vielen Umständen abhängt, daß eine wissenschaftliche Behandlung, wie oben S. 125 gezeigt wurde, sich nur auf Versuche gründen ließ, bei denen die Bedingungen möglichst genau festgesetzt waren und in weiten Grenzen verändert werden konnten, so gilt dies erst recht von der Genauigkeit der Entfernungsmessung. An solchen grundlegenden Arbeiten fehlt es noch fast gänzlich, und die dürftigen Ausführungen dieses Kapitels haben ihren Zweck erfüllt, wenn sie zu solchen Untersuchungen anregen. Was zunächst den Vergleich der drei verschiedenen Meßverfahren mit Schnitt-, Kehr- und Raumbild betrifft, so ist die beidäugige Beobachtung natürlicher und wohl auch weniger anstrengend. Bei vielen Personen ist aber das beidäugige Sehen mangelhaft ausgebildet, sei es infolge Anlage oder Gewöhnung, besonders durch berufsmäßige Beobachtung mit nur einem Auge wie bei Landmessern. Der Prozentsatz der so ausgeschiedenen Mannschaft beim Militär ist aber nicht so groß, daß er als Hindernis

der Verwendung der Raumbildmessung angesehen werden kann. Die Befürchtung, daß in der Aufregung des Gefechts schlecht gemessen würde, hat sich nach den Erfahrungen des Weltkriegs, insbesondere der Skagerrakschlacht, nicht bestätigt. Die Raumbildmessung hat den Vorteil, daß die Genauigkeit der Messung durch unscharfe Begrenzung, wie bei Sprengwolken, weniger beeinträchtigt wird. Ziele, die sich kräftig vom Hintergrund abheben, sind bei ihr am leichtesten zu messen, so besonders Schiffe und Luftziele. Sind diese in rascher Bewegung, so ist die Raumbildmessung dadurch überlegen, daß es bei ihr weniger auf genaues Anrichten ankommt. Für Landziele ist das Verfahren mit Kehr Bild dem mit Schnittbild überlegen, da es bei vielen Zielen, die keine regelmäßige Begrenzung haben, doch hervortretende Spitzen und Punkte gibt, die für Kehr Bildmessung passen. Für Schiffsziele zieht man das Schnittbild vor, da es an hierfür geeigneten Linien nicht fehlt, und das Gesichtsfeld ununterbrochen ist. Die Genauigkeit der Einstellung auf Einstehen der Halbbilder hängt von ihrer Neigung zur Trennungslinie ab, nach VON HOFE ist der Fehler für Schnittbild bei 45° Neigung etwa doppelt so groß; bei Kehr Bild scheint die Neigung den Fehler weniger zu steigern. Er untersuchte ferner, wie genau verschiedene Markenformen im freien Sehen übereinandergestellt werden, am günstigsten war der dünnste zylindrische Stab (Sehwinkel 1 : 1000) und der breiteste flache (Sehwinkel 1 : 100), wenn sie senkrecht abgeschnitten waren; bei einer Spitze von 60° war der Fehler nahe doppelt so groß. Die Trennungslinie soll nach ihm nicht über $40''$ Sehwinkel dick sein. Bei Strichen gibt es eine günstigste Länge, von der besonders nach kürzeren Strichen die Genauigkeit abnimmt. LÖSCHNER fand bei Messungen nach Fernzielen mit einem Infanteriekehrbildentfernungsmesser von 80 cm Standlinie und 10-facher Vergrößerung für den Standwinkel einen augenseitigen Einstellfehler von $15''$, unter 1000 m nur den halben. ZELLER gibt auf Grund seiner Messungen mit einem nach seinen Angaben gebauten Schnittbildentfernungsmesser, bei dem die Entfernung durch Änderung der Standlinie gemessen wurde, folgende Tabelle für den dingseitigen mittleren Fehler in Sekunden in Abhängigkeit von Vergrößerung und Zielentfernung bei möglichst gleichen Luftverhältnissen:

Entfernung	Vergrößerung					Ziel	Bemerkungen
	7,4	14,3	18,7	21,2	30		
300 m	0,678	0,451	0,309	0,280	0,280	Blitzableiter	bewölkt
1240 >	0,758	0,518	0,474	0,307	0,264	Turmkante	leicht bedeckt
1710 >	0,986	0,550	0,454	0,481	0,366	Fahnenstange	trübe, Sicht ungünstig
2080 >	0,915	(0,828)	0,446	0,321	0,348	Kirchturmkante	zittert zeitweise stark
Mittel:	0,834	0,506	0,421	0,347	0,314		

Eine weitere Messungsreihe bei sehr schönem Wetter ergab für das erste Ziel

0,800 0,481 0,351 0,252 0,234.

Nimmt man an, daß der Entfernungsmesser so oft neu justiert wird, daß sich in der Zeit zwischen zwei Justierungen die Anzeige nicht ändert, so ist der Gesamtfehler aus dem Justierfehler Δ_1 und dem Meßfehler Δ zusammengesetzt, also gleich $\sqrt{\Delta_1^2 + \Delta^2}$ zu veranschlagen. Bei dem PULFRICH'SCHEN Entfernungsmesser (S. 172) ist, wie schon erwähnt wurde, die Genauigkeit entsprechend der Verdoppelung der Standlinie verdoppelt.

Auch der Entfernungsmesser mit Doppelmessung unter Umkehrung der Standlinie liefert höhere Genauigkeit. In Abb. 249 sind die Verhältnisse mit nebeneinander gelegten Standlinien $-b:2$ und $+b:2$ dargestellt. Zunächst wird mit den Visierlinien 1 und 3 die Justiermessung mit dem Fehler Δ_1 gemacht, dann umgeschaltet,

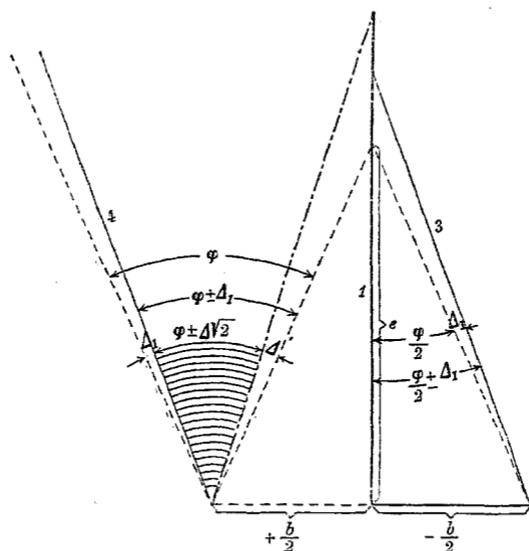


Abb. 249. Zur Fehlertheorie des Entfernungsmessers nach Abb. 247.

wobei 3 parallel nach 4 versetzt wird, und darauf mit dem Fehler Δ gemessen. Man kann hier annehmen, daß $\Delta = \Delta_1$ ist, der Gesamtfehler ist mithin $\Delta\sqrt{2}$, er kommt aber nur im Verhältnis zu dem Standwinkel in Betracht, der der doppelten Standlinie entsprechend verdoppelt ist. Es wird also die doppelte Genauigkeit wie mit dem gewöhnlichen Entfernungsmesser erreicht, falls nicht dort die Bedingungen für die Justierung günstiger als für die Messung sind, was allerdings vielfach der Fall ist. Andererseits ist bei dem Entfernungsmesser mit Doppelmessung die Gleichheit der optischen Bedingungen für die Justierung und die Messung von Vorteil.

VII. Die Hochstandentfernungsmesser.

Wo die Erdoberfläche wie auf dem Meere eine bekannte regelmäßige Form besitzt, bieten sich für die Entfernungsmessung besondere Verhältnisse. Zielt man von einem Stand in bekannter Höhe über dem Meeresspiegel die Wasserlinie eines Schiffes an, so ist seine Entfernung

durch den Winkel gegeben, den die Zielrichtung mit einer zur Erde festen Richtung in derselben Vertikalebene macht. Auf Hochständen an der Küste dient als feste Richtung die wagrechte, die mit Hilfe einer Libelle leicht zu erkennen ist; man pflegte den Tiefenwinkel durch Kippen des Fernrohrs mit einer Schraube zu messen. Auf dem Hochstand eines Schiffes, etwa dem Mastkorb, ist die Richtung nach dem Horizont, der Kimm, die gegebene Ausgangsrichtung, deren Erkennen allerdings oft erschwert oder unmöglich ist; dieser Tiefenwinkel wird mit irgendeinem Doppelbildmikrometer gemessen. Die Herstellung der festen Richtung durch Pendel oder Kreisell ist zu ungenau, sie kommt daher nur für Luftfahrzeuge in Betracht. Die Formeln für den Tiefenwinkel wollen wir unter den Voraus-

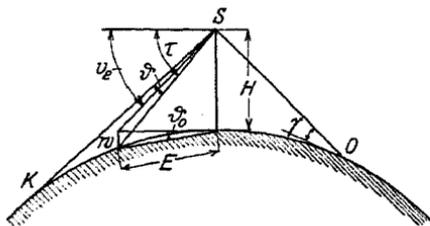


Abb. 250. Die geometrische Grundlage der Hochstandentfernungsmessung.

Statt ν_2 ist τ_2 zu lesen, statt γ : α , statt ϑ_0 : δ_0 .

setzungen ableiten, daß die Wasserfläche eine Kugel mit dem Erdradius R ist, daß die Entfernung E klein gegen R und die Stand- (Augen-) Höhe H über dem Wasser klein gegen E ist. Ist in Abb. 250 S der Hochstand, W die Wasserlinie des Ziels, K die Kimm, so setzt sich der Tiefenwinkel τ im ersten Fall zusammen aus dem Tiefenwinkel τ_2 für eine ebene Meeresfläche und dem Verbesserungswinkel $\delta = \tau - \tau_2$ für die Erdkrümmung. Winkel δ ist aber nahe gleich δ_0 , der nahe gleich $E : 2R$ ist. Es gilt also

$$(1) \quad \tau = \frac{H}{E} + \frac{E}{2R}.$$

Im zweiten Fall ist noch der Kimmtiefenwinkel $\varkappa = \tau - \vartheta$ abzuziehen; es ist nun $1 : \cos \varkappa = (R + H) : R$ und, da $1 : \cos \varkappa$ nahe gleich $1 + \varkappa^2 : 2$ ist, ist

$$(2) \quad \varkappa = \sqrt{\frac{2H}{R}}.$$

Es ergibt sich also der zu messende Tiefenwinkel

$$\vartheta = \frac{H}{E} + \frac{E}{2R} - \sqrt{\frac{2H}{R}}$$

oder

$$\sqrt{\vartheta} = \sqrt{\frac{H}{E}} - \sqrt{\frac{E}{2R}}.$$

Für größere Entfernungen ist noch die regelmäßige Refraktion zu berücksichtigen; es ist das die Krümmung des Lichtstrahls durch Luftschichten, in denen sich das Brechungsverhältnis gleichmäßig mit dem

Abstand vom Erdmittelpunkt ändert. Angenähert verläuft der Lichtstrahl in einer senkrechten Ebene in einem Kreisbogen von k mal größerem Radius als dem der Erde, es genügt daher, R durch $R(1 - k)$ zu ersetzen. Auf dem Lande bestimmt man z aus dem Unterschied der Höhenwinkel für die Richtungen AB und BA in den Punkten A und B ; auf dem Meere vergleicht man den gemessenen Kimmwinkel mit dem Sollwert und mißt zu dem Zweck den Winkel zwischen gegenüberliegenden Punkten der Kimm ($2z$) mit einem Kimmtiefenmesser, z. B. dem von PULFRICH, einem biaxialen Fernrohr mit seitlichem Einblick (Abb. 251) mit Fadenplatte oder Schraubenmikrometer. Man kann auch k aus der Formel von KOHLSCHÜTTER berechnen:

$$\sqrt{1 - k} = 0,9463 + 0,00036(t - 15^\circ) - \{0,1922 - 0,00131(t - 15^\circ)\} \frac{\Delta}{\sqrt{H}},$$

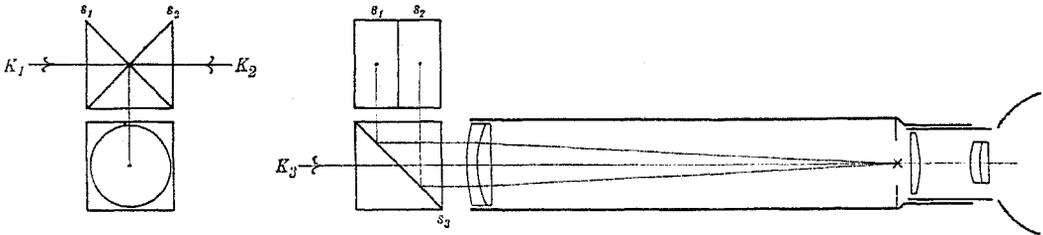


Abb. 251. Der Aufbau des Kimmtiefenmessers von PULFRICH.

wo t die Lufttemperatur ist und Δ der Unterschied der Lufttemperatur in 1 m Höhe über der Wasseroberfläche und der Temperatur des Wassers an der Oberfläche.

Aus den beiden im Aufbau verwandten Formeln für die Entfernungsmessung nach den beiden Arten wird E durch Auflösen einer quadratischen Gleichung berechnet; von den Lösungen gilt der kleinere Wert. Für eine bequeme Ablesung von E bei verschiedenen Höhen, mag es sich nun um Standwechsel oder Schwankung von Pegel oder Tiefgang handeln, werden die Winkelmessung mit einer Einrichtung zur mechanischen Auflösung der Gleichung verbunden. Es soll hier nur auf die erste Meßart eingegangen und von der Übertragung auf die zweite abgesehen werden. Bei der unmittelbaren geometrischen Nachbildung ist die nötige Genauigkeit kaum zu erreichen. Man hat nun vielfach die Kippung τ in die entsprechend den Teilwinkeln zerlegt; um $H : E$ darzustellen, kann man ähnlich wie bei dem Tachymeter von REICH-GANSER (S. 149) verfahren. Dabei ist das Fernrohr mit einer durch die Kippachse gehenden Gleitebene versehen, die auf der Spitze einer Schraube ruht, deren Höhe über der Kippachse proportional H ist, und die in einem horizontalen Schlitten verschoben wird, bis das Fernrohr auf die

Wasserlinie eingerichtet ist, dann ist bei ebener Meeresfläche die Verschiebung gegen die Kippachse proportional E . Um die Erdkrümmung zu berücksichtigen, verschiebt man nach WHISTLER-HEARN gemeinsam mit der Schraube eine schiefe Ebene, die die Kippachse entsprechend $E : 2R$ hebt, und deren Neigung entsprechend der Refraktion verstellt werden kann. Da die dauernd gute Beschaffenheit der Gleitebene fraglich ist, zieht man vor, die Verschiebung proportional $1 : H$ vorzunehmen und die Entfernung durch Drehen der Schraube proportional $1 : E$ zu messen, obwohl die Teilung nach den Kehrwerten etwas unbequem ist. Man hat nun wieder eine zusätzliche Kippung $E : 2R$ vorzusehen; um sie möglichst klein zu halten, dient nach LEWIS-ERDMANN (Abb. 252) folgende Einrichtung. Die Entfernungsteilung ist so aufgetragen, daß für ein mittleres H die Schraube die richtige Kippung gibt, und die Höhenteilung so, daß die gesamte Tiefenwinkelverstellung zwischen den Entfernungsgrenzen für die verschiedenen Höhen dieselbe bleibt. Es zeigt sich nun, daß sich die kleinen Abweichungen der nach der Entfernungsteilung eingestellten Tiefenwinkel zwar mit E ändern, aber bei anderen Höhen als der mittleren nahezu proportional dem Abstand

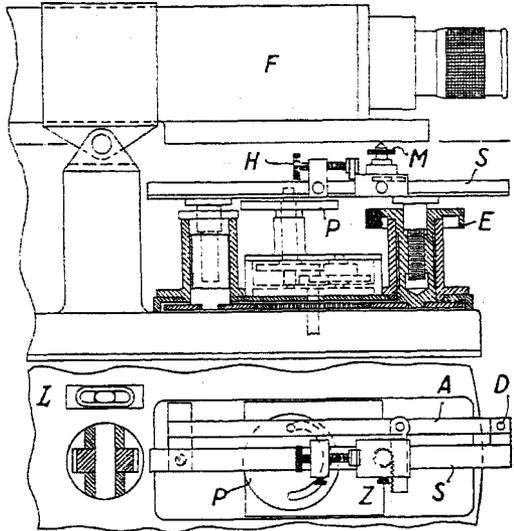


Abb. 252. Der Hochstandentfernungsmesser von ERDMANN.

des Teilstrichs für diese Höhe von dem für die mittlere sind. Um nun diesen Verbesserungswinkel einzustellen, drückt die Meßschraube E nicht unmittelbar gegen das Fernrohr, sondern eine von ihr getragene zweite M , die in folgender Weise verstellt wird. Durch eine Planschnecke P wird ein Hebel A um D entsprechend der Abhängigkeit der Verbesserung von der Entfernung gedreht. Je nachdem, für welche Höhe der Höhenschlitten S mit H eingestellt ist, dreht nun dieser Hebel mit Zahntrieb Z die zweite Schraube mehr oder weniger gemäß dem mit H geänderten Hebelarm. Ist der Entfernungsmesser für einen einzigen Stand bestimmt, so kommen nur kleine Änderungen von H in Betracht, und es genügt folgende mechanische Lösung. Man trägt die Entfernungsteilung so auf, daß der Abstand T eines Teilstrichs für die Entfernung E von dem Ausgangspunkt der Teilung bei der mittleren Höhe H_m durch die Formel

$$T = H_m \log \text{nat } E - \frac{E^2}{4R}$$

gegeben ist, und bildet die Übertragung von dem Winkelmesser auf das Anzeigewerk, etwa eine Kreisscheibe, so aus, daß E für das mittlere H richtig abgelesen wird. Rechnet man nun $dE : dH$ aus, wie es sich nach Formel (1) ergibt und setzt dies in $dT : dH$ ein, so wird $dT = dH$. Trägt man also konzentrisch zur Entfernungsteilung die entsprechende Höhentheilung auf, so hat man nur den Entfernungszeiger gegen die Kreisscheibe entsprechend der Höhentheilung zu verstellen, um für die geänderte Höhe die richtige Entfernung abzulesen. Die mechanische Auflösung der vorliegenden quadratischen Gleichung ist auch in Nachbildung der logarithmischen Rechnung in aller Strenge ohne besonderen Aufwand an mechanischen Mitteln möglich.

Was die Genauigkeit betrifft, so ist, wenn man die Entfernung der Kimm mit $E_k = \sqrt{2RH}$ bezeichnet,

$$dE = \frac{d\tau}{H \left(\frac{1}{E_k^2} - \frac{1}{E^2} \right)} = - \frac{d\tau}{E^2 \left(H - \frac{E^2}{2R} \right)}$$

Solange E klein gegen E_k ist, gilt also dasselbe Gesetz wie für die anderen Entfernungsmesser mit Zielrichtung senkrecht zur Grundlinie; nähern sich E und E_k , so sind hier die Fehler größer. Der Einfluß der Höhe ist derselbe wie bei den anderen Entfernungsmessern, wenn man $H - E^2 : 2R$ als wirksame Höhe ansieht, d. h. wenn man sie von dem Punkt rechnet, der ebensoviel über dem Meeresspiegel liegt wie die Wasserlinie des Ziels unter der Horizontalebene durch den Fußpunkt des Hochstands. Setzt man erfahrungsgemäß bei 10facher Vergrößerung $d\tau$ etwa $= 7''$, so ist für die Standhöhen $H = 40$ bzw. 80 m der Fehler dE in m wie folgt:

H	E in km					
	1	2	5	10	15	20
40	0,8	3,4	25	102	306	1000
80	0,4	1,5	11	50	120	250

Für $d\vartheta$ gilt dieselbe Formel und annähernd der gleiche Erfahrungswert wie für $d\tau$. Stärkerer Wellengang erschwert die genaue Auffassung der Lage der Wasserlinie. Liegt ein Ziel hinter dem Horizont und kennt man die Höhe des verdeckten Teils, so ist die Entfernung durch diese Höhe und die Augeshöhe bestimmt. Die Messung der Entfernungsabweichung von Geschoßaufschlägen kann man auf die des Unterschiedes der Tiefenwinkel von Ziel und Aufschlag gründen.

Der allgemeine Fall der Hochstandentfernungsmessung liegt vor, wenn der Stand durch ein Flugzeug S dargestellt wird (Abb. 250), dessen Fußpunkt außerhalb der

Verbindungsline zwischen dem Anfangspunkt O , von dem die Entfernung gerechnet wird, etwa dem eignen Schiff, und dem Ziel W , etwa dem feindlichen Schiff, liegt. Man kann nun von dem Luftfahrzeug aus etwa mit einem Pendelhöhenwinkelmesser die Tiefenwinkel τ oder mit einem Sextanten die Tiefenwinkel β für O und W messen, die die Entfernungen von O und W von dem Fußpunkt anzeigen. Mißt man weiter noch den Winkel zwischen den Lotebenen durch O und W im Flugzeug, so ist damit auch die Entfernung OW bestimmt. Das Pendelfernrohr liefert eine Ausgangsrichtung mit festem Höhenwinkel, meist 0 oder 90° , indem entweder das ganze Fernrohr pendelt oder einzelne Teile, die die Visierlinie bestimmen, wie Objektiv, Fadenkreuz oder Spiegel, in geeigneter Weise mit einem Pendel gekuppelt sind. Beim Sextanten (Abb. 253) wird der Winkel mit Doppelbildern gemessen. Die Strahlen L des einen Bildes gelangen unmittelbar über den Spiegel s hinweg in das Fernrohr, die Strahlen R des anderen Bildes nach Spieglung an S und s . Der Spiegel S wird für die Winkelmessung so mit dem Zeigerarm A für die Teilung gedreht, daß der Strahl R nach Zurückwerfung an S und s in die gleiche Richtung mit L

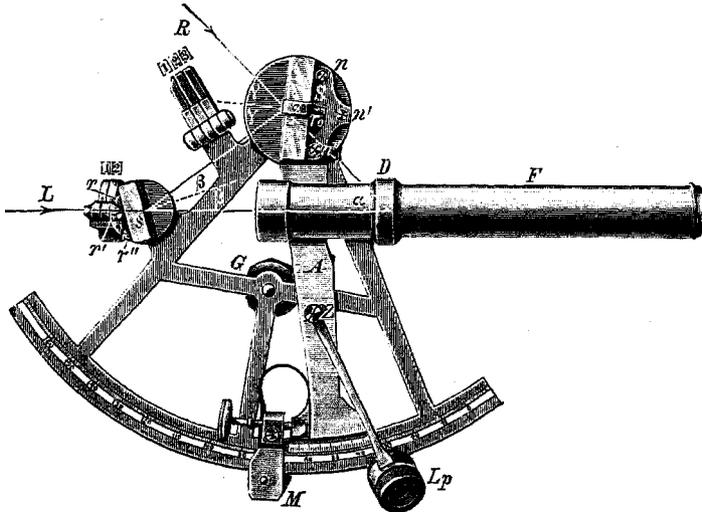


Abb. 253. Ein Sextant.

kommt; der Winkel zwischen dem drehbaren Spiegel S und dem festen Spiegel s ist dann gleich dem halben Winkel zwischen R und L . Man kann aber auch die Entfernung nach Art einer verallgemeinerten Zweistandentfernungsmessung bestimmen, bei der die eine Visierlinie durch einen Kreisbogen ersetzt ist; man kann nämlich den Schnitt der Ebene SOW mit der Meeresoberfläche angenähert als Kreisbogen ansehen, dessen Krümmung $R \cos \mu$ bestimmt, wo μ der Winkel der Ebene SOW mit der Lotebene durch OW ist. In O ist dann die Entfernung $SO = b$ des Flugzeugs und sein Höhenwinkel α zu messen; statt der Messung von b kann auch die barometrisch bestimmte Höhe vom Flugzeug gemeldet werden; außerdem ist in O der Winkel μ zu messen. Vom Flugzeug ist ferner der Winkel $\beta = 180^\circ - OSW$ mit dem Sextanten zu messen und zu melden (α und β sind hier gegen OS gerechnet). Wenn der Winkel zwischen OW und der Tangente in O gleich ν gesetzt wird, lautet die verallgemeinerte Formel:

$$\frac{\sin(\beta - \alpha' - \nu)}{\sin \beta} = \frac{b}{E}; \quad \text{tg } \nu = \frac{E}{2R \cos \mu}; \quad \sin \alpha' = \frac{\sin \alpha}{\cos \mu}$$

oder genähert

$$\sin(\beta - \alpha') = \frac{b \sin \beta}{E} + \frac{E \cos(\beta - \alpha')}{2R \cos \mu}.$$

Verwendet man statt des Flugzeugs einen Fesselballon, so ist δ annähernd gleich der ausgelaufenen Länge des Seils. Kommt hier das Verbesserungsglied für die Erdkrümmung nicht in Betracht und ist $\beta - \alpha$ klein, so kann man δ so regeln, daß δ sin β konstant bleibt; die Entfernung ist dann umgekehrt proportional $\beta - \alpha$.

VIII. Besondere Einrichtungen und Bauarten der Entfernungsmesser.

Auch bei Standwinkelentfernungsmessern kann es erwünscht sein, daß Kartenentfernung oder Höhe eines Ziels unmittelbar angezeigt wird. Dazu können ähnliche Einrichtungen dienen, wie wir sie bei den Zielwinkelgeräten kennen lernten. Man kann z. B. einen Entfernungsmesser verwenden, bei dem von der Spiegelanordnung A_s (Abb. 223), die zweckmäßig mit Pentaprismen ausgeführt wird, die beiden Strahlenbüschel in ein gemeinsames Richtfernrohr geworfen werden. Man richtet nun das Ziel in der Höhe durch gemeinsame Drehung der Pentaprismen an, dann schwenkt man das ganze Gerät um eine lotrechte Achse, die sich unter dem linken, dem Fernrohr nahen Prisma befindet, bis das von diesem Prisma aufgenommene Zielbild auf dem Fadenkreuz einsteht, weiter, bis das Zielbild vom anderen Prisma darauf einsteht. Die letzte Schwenkung ist gleich der Horizontalprojektion η_k des Standwinkels und die Entfernung $E_k = \delta : \sin \eta_k$. Man mißt daher den Winkel zweckmäßig mit einer Sinusschraube. Besser ist es, ein optisches Mikrometer zu verwenden und es mit einer geeigneten mechanischen Rechenvorrichtung für unmittelbare Ablesung von E_k auszustatten, wie solche bei den Zielwinkelgeräten in den verschiedensten Formen in Gebrauch sind, z. B. bei einem gewöhnlichen Entfernungsmesser hinter beiden Objektiven gleiche Glaskelle gleichviel zu verschieben und außerdem proportional dem Höhenwinkel um die optische Achse zu drehen; infolge dieser Verdrehung wirken die Keile nur mit einer Komponente und werden bei der Entfernungseinstellung η_k statt η proportional verschoben. Es sei noch darauf hingewiesen, daß es bei Luftzielen, deren Flughöhe sich weniger ändert als die Entfernung, vorteilhaft sein kann, statt der Entfernung die Höhe neben dem Höhenwinkel einzustellen, während die entsprechende Entfernung unmittelbar angezeigt wird oder auch nur die Höhe.

Wenn der Standwinkel mit einem optischen Mikrometer gemessen wird, bei dem die Verstellung der Meßschraube diesem Winkel proportional ist, wie z. B. beim Verschiebungskeil, so fällt bei gleichförmiger Übertragung auf die Verstellung der Entfernungsteilung gegen den Zeiger diese Teilung sehr ungleichmäßig aus, da sie nach den Kehrwerten der Entfernung fortschreitet. Bei den Mikrometern, bei denen die Meßverstellung dem Standwinkel nicht proportional ist, wie den Dreh- und Schwingkeilen, hat man es zwar in der Hand, die Teilung für die größeren Entfernungen zu dehnen; ebenso kann man durch eine spiralförmige Anordnung der Teilung diese bei den kleineren Entfernungen mehr zusammendrängen; die Ungleichmäßigkeit wird aber so nur vermindert, nicht durchweg gehoben. Für manche Zwecke ist aber eine Teilung erwünscht, die gleichmäßig ist oder nach einem vorgeschriebenen Gesetz fortschreitet. Dies kann durch Einschalten von bekannten Mechanismen, die ungleichförmig übertragen, erreicht werden; über andere Arten, eine gleichförmige Teilung zu erhalten, ist S. 171 und 188 berichtet.

Vielfach will man, besonders auf Kriegsschiffen, das Mittel aus den Anzeigen mehrerer Entfernungsmesser verwenden. Sind diese nahe beieinander aufgestellt, so können die Anzeigen mechanisch, z. B. durch ein Differentialgetriebe, addiert werden; die Division der Summenanzeige durch die Zahl der Geräte kann durch entsprechende Bezifferung der Teilung erreicht werden. An Stelle der mechanischen Addition kann die optische treten, indem z. B. ein Lichtzeiger durch die Drehungen mehrerer Spiegel beeinflusst wird, die je von der Einstellung des zugeordneten Geräts abhängen. Werden die Anzeigen elektrisch nach einer Hauptstelle geleitet, so kann die elektrische Einrichtung für die Addition eingerichtet werden. Für die Justierung genügt es im allgemeinen, wenn der gemittelte Wert richtig angezeigt wird. Sind zwei Geräte zur Mittelung verbunden, so kann die Justierung mit Gegeneinanderschaltung in der vereinfachten Form nach S. 190 angewandt werden.

Eine andere Aufgabe liegt vor, wenn bei einem Gerät die aufeinander folgenden Anzeigen einer Zielentfernung gemittelt werden sollen. Läßt man die Entfernungsanzeige auf eine Walze oder ein Rollband durch einen Stift aufschreiben, der quer zu deren Bewegungsrichtung entsprechend der Anzeige bewegt wird, so genügt meist die Mittelung nach Augenmaß. Bei Auftragung proportional der ab- oder zunehmenden Entfernung und gleichmäßig gedrehter Walze gibt die Richtung der Geraden, die mitten zwischen den aufgezeichneten Punkten durchgeht, ein Maß für die Geschwindigkeit der Entfernungsänderung, die man für die Vorausbestimmung des Ortes eines beweglichen Ziels braucht. Ersetzt man den Schreibstift durch eine Achse, um die eine Rolle schwenkbar ist, die auf die Walze aufgedrückt wird, so stellt sich diese Rolle nacheinander in die Richtungen ein, in denen die Kurve jeweils verlaufen würde. Ein mit der Rolle verbundener Zeiger vermag also an einer Teilung die Geschwindigkeit anzuzeigen. Diese Geschwindigkeit kann auch mit Hilfe eines Uhrwerks mit meßbar veränderlicher Ganggeschwindigkeit bestimmt werden. Statt die Meßschraube des Entfernungsmessers mit einer solchen Uhr unmittelbar anzutreiben, verwendet man meist eine sogenannte Entfernungsuhr, bei der das Uhrwerk in einen selbständigen Apparat für die Entfernungsanzeige eingebaut ist. Deren Zeiger wird zunächst übereinstimmend mit der Anzeige des Entfernungsmessers eingestellt und nun die Geschwindigkeit des Uhrwerks so geregelt, daß der Zeiger fortlaufend im Mittel übereinstimmend mit dem Entfernungsmesser anzeigt, oder man berechnet aus dem Unterschied der Entfernungsmessung am Anfang und Ende eines bestimmten Zeitabschnitts die Geschwindigkeit und stellt danach zunächst den Zeiger, der die Geschwindigkeit des Uhrwerks anzeigt. Will man bei der oben erwähnten Art der Auftragung der gemessenen Entfernungen bei einem Ziel, dessen Entfernung sich ändert, mit einem schmalen Band auskommen, so ist es zweckmäßig, auf den Schreibstift nur den Unterschied der gemessenen Entfernung und der vom Uhrwerk angezeigten Entfernung zu übertragen.

Mißt man bei lotrechtem Ziel EF (Abb. 254) von unbekannter Höhe den Zielwinkel auf zwei Standpunkten, deren Verbindungslinie CD das Ziel selbst oder seine Verlängerung trifft, und außerdem den Höhenwinkel dieser Linie und einer Visierlinie, so kann man daraus die Entfernung berechnen. Diese auf das Ziel gerichtete Standlinie kann durch eine AB ersetzt werden, die wie gewöhnlich quer zur Zielrichtung liegt und dieselben Visierlinien benutzt, wenn, wie die Abb. 254 zeigt, das Ziel EF senkrecht und symmetrisch zu CD liegt. Eine andere Art der Entfernungsmessung ergibt sich, wenn man EF als Standlinie eines Geräts und AB , etwa eine Latte mit Marken in diesem Abstand, als Ziel ansieht. Man kann so mit einem gewöhnlichen Standwinkelentfernungsmesser Entfernungen messen, die unterhalb seines Meßbereichs liegen; ist D das nächste mit dem Gerät allein meßbare Ziel, so wird durch Verwendung der Latte der Bereich bis AB ausgedehnt.

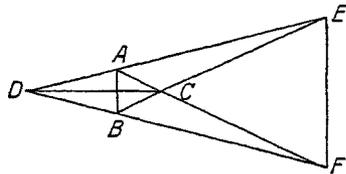


Abb. 254. Die geometrische Grundlage besonderer Arten der Entfernungsmessung.

Eine Erfindung, die immer wieder von neuem gemacht wird, sucht die Verschiebung des Okulars eines Fernrohrs gegen die Brennebene des Objektivs, wie sie zum Scharfstellen näherer Ziele nötig ist, für die Entfernungsmessung zu verwerten. Um von der Akkommodation des Beobachters unabhängig zu werden, stellt man auf Verschwinden der Parallaxe des Zielbilds gegen ein Fadenkreuz ein. Es kommt also darauf an, festzustellen, wo sich die Strahlenbüschel kreuzen, die den seitlichen Grenzlagen des Auges entsprechen und die von den gegenüberliegenden Randteilen des Objektivs kommen. Die benutzte Standlinie, der Abstand der Mitten dieser Randteile, ist daher kleiner als der Objektivdurchmesser. Die Genauigkeit, mit der der Richtungsunterschied dieser schmalen Büschel beim Eintritt in das Objektiv festgestellt werden kann, der für die Entfernungsgenauigkeit maßgebend ist, ist davon abhängig, wie genau seitliche Abweichungen der Büschel gegeneinander in der Einstellebene erkannt werden können; diese bleibt bestenfalls unter der Einstellgenauigkeit der gebräuchlichen Einstandentfernungsmesser. Die Beschränkung in der Größe der Standlinie schließt so eine praktische Verwertung dieser Entfernungsmessung im Gelände aus.

Während das Anschneiden des Ziels gewöhnlich dadurch festgestellt wird, daß von Ziel und Marke Licht in gleicher Richtung in das Auge gesandt wird, kann man auch von der Marke Licht in entgegengesetzter Richtung, d. h. nach dem Ziel senden; hat man es mit natürlichen Zielen zu tun, so muß man darauf ein reelles Bild der Marke entwerfen. Dies Verfahren ist von Wert, wenn man im Flugzeug vor der Landung den Erdbodenabstand messen will. Bei dem sogenannten Landungsscheinwerfer werden von zwei Scheinwerfern, die auch durch einen in Verbindung mit Spiegeln ersetzt sein können, zwei scharf begrenzte Lichtkegel von festem Richtungsunterschied ausgesandt. Von jeder Lichtquelle wird je durch eine Sammellinse ein Bild auf einer zweiten Sammellinse entworfen, die von einer passend geformten, etwa dreieckigen Blende am Ort der ersten Linse ein scharfes Bild in großer Entfernung entwirft. Wo die beiden Strahlenkegel sich kreuzen, d. h. in der Entfernung, die gleich dem Abstand der Lichtquellen dividiert durch die gegenseitige Neigung der Büschel ist, liegen die hellen Dreiecksfiguren übereinander Mitte auf Mitte; da man nur den beleuchteten Erdboden sieht, so erhält man dies Bild, wenn der Erdboden sich in der festgelegten Entfernung befindet. Größere oder kleinere Entfernung erkennt man bei symmetrischen Dreiecken daran, ob die Spitzen oder Breitseiten einander näher liegen.

Für die Ausbildung im Messen, besonders nach beweglichen Zielen, gibt es Lehrgeräte. Man kann z. B. einen Entfernungsmesser mit kleiner Standlinie und schwacher Fernrohrvergrößerung oder gar verkleinerung benutzen und das Ziel sowohl in der Tiefe wie nach Seite und Höhe verschieben. Will man einen gewöhnlichen Entfernungsmesser mit nicht zu großer Standlinie benutzen, so kann man das Ziel durch eine Justierlatte (S. 176) ersetzen, die um die Mitte des Entfernungsmessers nach Höhe und Seite gerichtet werden kann, und bei der der Abstand der Marken mit einer Mikrometerschraube meßbar veränderlich ist. Endlich können zur Übung für Halbbildermessung zwei Stifte auf einem nach Höhe und Seite verschieblichen Rahmen durch Verschieben quer zur Visierlinie im freien Sehen übereinander eingestellt werden.



Namenverzeichnis.

- Abbe 31, 33, 36, 54, 57, 96, 101, 133,
137, 144, 169, 178, (Bildnis 141).
Adie 157.
Aldis 67.
Amici 53, 54, 117.
Aubell 147.
- Barr und Stroud** 157, 187.
Beck 125.
Blanchard 16.
Blum 69.
Boscovich 137.
Bosshardt 146.
Bouguer 134.
Brander 155, 175.
Breithaupt 150.
Brewster 57.
- Cassegrain 72.
Chérubin d'Orléans 93.
Clausen 139.
Coradi 149.
Crockett 76.
Le Cyre 182.
- Daubresse 55.
Dawes 35, 38, 102.
Delaborne 54.
Dollond 140.
- Engi 115, 127.
Eppenstein 161, 182.
Erdmann 195.
Erfle 41.
Ewald 89.
- Fechner 15.
Fennel 149.
Foucault 36, 71, 85, 102.
Fraunhofer 34, 47, 48, 137 (Bildnis 129).
- Galilei 43.
Ganser 149.
Gascoigne 130.
Gauss 22, 34, 38, 128, 154.
- Gehlhoff 17.
Goerz 66, 157.
Goulier 52, 154.
Gregory 72.
Großmann 126.
Grousilliers 169.
Gullstrand 42, 95.
- Hale** 85.
Hall 47.
Hammer 149.
Hamilton 75.
Hänel 146.
Hartmann 105.
Hearn 195.
Helmholtz 90.
Herschel 38, 48, 70.
Hertzprung 105.
Hevel 48.
von Hofe 191.
Hogrewe 149.
Hohenner 146.
Hooker 74.
Humbrecht 69.
Huggens 40, 103, 131.
- Jamin 177.
Jeaurat 116.
- Kellner** 41.
Kepler 47, 49, 58, (Bildnis 39).
Kirchhoff 152.
Kohlschütter 194.
König 117.
Korrodi 121.
Krause 150.
Krupp 74.
- Labitzke** 126.
Lassell 71.
Lemaire 70.
Leman 55.
Lewis 195.
Lippershey 43.
Lippmann 85.

Löschner 191.

Löwy 85.

Mach 169.

Maskelyne 139.

Mersenne 70.

Meyer 83.

Michelson 38.

Montanari 143.

Müller 146.

Newton 71, 102.

Noetzli 36, 126, 127.

Nicol 37.

Ohm 152.

Petzval 25, 29, 50.

Porro 52, 55, 56, 147, 148.

Pulfrich 91, 172, 194.

Puller 149.

Purkinje 16.

Ranyard 74, 83, 85.

Ramsden 40, 107, 157.

Rayleigh 36, 42, 115.

Reeves 17.

Reich 149.

Reichenbach 145.

Reinhertz 126.

Repsold 130, 131.

Ricco 17.

Rochon 139.

Rollett 168.

Römer 132.

von Rohr 46, 89.

Rosse 74.

Rudolph 50.

Rutherford 105.

Satori 117.

Savery 134.

Schneider 147.

Schott 33.

Schroder 150.

Schröder 85.

Schupmann 75.

Schwarzschild 78.

Schyrl zu Rheita 58.

Seidel 26.

Shapley 79.

Short 73.

Snow 85.

Staeble 31.

Stampfer 36, 111.

Straubel 124.

Stützer 187.

Taylor 49, 50, 173.

Tetens 152.

Tichy 147.

Vogel 105.

Wagner 149.

Watt 145.

Weber 15.

Wellmann 140.

Werffeli 146.

Wheatstone 89.

Whistler 195.

Wollaston 139, 178.

Zahn 72.

Zeller 191.

Zeiss 157, 169, 183.

Zwicky 151.

Sachverzeichnis.

- Abbild. II.
Abbildbare Linien 28.
Abbildskopie II.
Abbildungsgesetze I.
Abbildung, sekundäre 36.
Ablesefernrohr 48.
Abschauen III.
Absolute Justierung 183.
— Lichtstärke 10.
— Sehschärfe 15.
Abweichungskurven 27, 30, 31, 33, 87.
Achromat 32.
Adaptation 16.
Änderung der Standlinie zum Messen 188.
Äquatoreale Aufstellung 81.
Äquatoréal coudé 85.
Akkommodation 13.
Anallaktisches Fernrohr 147.
Anastigmatische Bildfeldebahnung 29.
Anpassung an den Augenabstand 92.
Aperturblende 9.
Apochromat 33, 49.
Astigmatismus 14, 28.
Astronomisches Fernrohr 47.
— Okular 40.
Astrophotographie 37.
Auffangschirm 9.
Auffassungsfehler 127, 132.
Auflösungsvermögen 35.
Aufrechtes Bild 52.
Auge 13, 85.
Augendrehpunkt 17.
Augenkreis 9.
Augenlinse 40.
Ausblickrohr 62.
Austrittsluke 10.
Austrittspupille 9, 107.
Autokollimation 154, 182.
Axialvergrößerung 3.
Azimutale Aufstellung 81.

Beidäugiges Sehen 85.
Beidäugige Parallaxe 86.
Beleuchtung des Fadenkreuzes 116.
Berechnung eines zweilinsigen Objektivs
51.

Beugungswirkung bei der Abbildung 34.
Biaxiales Fernrohr 175.
Bilderpaarmikrometer 134, 137.
Bildfehler 22, 46, 57, 59, 76, 132.
Bildfeldkrümmung im übertragenen Sinne
29.
Binokulares Sehen 85.
Blende 9.
Blicklinien 17.
Brachymedial 75.
Brachyteleskop 72.
Brechender Winkel 8.
Brekraft 7.
Brechungsgesetz 6.
Brechungsverhältnis 6.
Breitenwahrnehmung 14.
Brennebene 2.
Brennpunkt 2.
Brennweite 2.
Brennweitenänderung für Mikrometer 132.
Brewstersches Fernrohr 57.

Chromatische Abweichung 31.
— Vergrößerungsdifferenz 32.

Dachprisma 54, (als Richtmittel) 117.
Depressionstelemeter 142, 193.
Deutsche Aufstellung 81.
Diopter III.
Dioptrie 7.
Dipleidoskop 117.
Direktes Sehen 15.
Dollondsches Mikrometer 140.
Doppelbildmikrometer 135, 137, 144, 157.
Doppelblickfernrohre 100.
Doppelblickzielfernrohre 122.
Doppelfernrohre 92.
Drehkeilpaar 138, 156.
Dünne Linse 5, 7.
Durchbiegung von Objektiven 51.
Dynameter 107.
Dunkeladaptation 16.

Ebhnung des punktuellen Feldes 29.
Eigenlicht der Netzhaut 34.
Einfallsebene 6.

- Einfallslot 6.
 Einfallswinkel 52.
 Einstandentfernungsmesser 141.
 Einstellfläche 9.
 Einstelllinse 42, 60, 114, 147.
 Eintrittspupille 9.
 Eintrittsluke 10.
 Englische Aufstellung 81.
 Entfernungsuhr 199.
 Entwicklungsfaktor 38.
 Erdfernrohr 58.
 Erdfernrohrokular 58.
- Fadenbildmikrometer** 130.
 Fadenentfernungsmesser 154.
 Fadenkreuzbeleuchtung 116.
 Fadenmikrometer 129.
 Fahrstuhlrohr 68.
 Fangspiegel 71.
 Farbenabweichung 31.
 Farbenfrei 32.
 Farbglas 37.
 Farbloses Intervall 16.
 Feldlinse 40.
 Feldsehrohr 63.
 Fernbrille 14.
 Fernlinse 49.
 Fernpunkt 14.
 Feste Skala 161.
 Flachgepreßtes Aussehen 89.
 Flächenabweichung 25.
 Flügelfehler 31.
 Fokalschicht 33.
 Fortschreitende Fehler 130.
 Fraunhofersche Beugungserscheinung 34.
 Füllperspektive 17.
- Galileisches Fernrohr** 43.
 Gaussische Abbildung 22.
 — Bedingung 34.
 Gaussisches Okular 154.
 Gaussische Spiegelablesung 38.
 Gegenläufige Bilder 117.
 — Justieranordnung 177.
 Gegenrichtjustierung 190.
 Genauigkeit des Zielens III.
 — der Entfernungsmesser 141, 155, 190.
 Geneigter Einblick 122, 160, 163.
 Geodätische Entfernungsmesser 145.
 Geometrische Teilung der Strahlen 101.
 Geschützzielfernrohre 121.
 Geschwindigkeitsmessung 129, 199.
 Gesichtsfeld 10, 18, 43, 44, 107.
 Gesichtsfeldblende 10.
 Gesichtsfeldzonen 30.
- Gewehrzielfernrohr 117.
 Ghostmikrometer 130.
 Gleichläufige Justieranordnung 177.
 Gleichmäßige Teilung 171, 188, 198.
 Grabentfernungsmesser 167.
 Grabenschere 97.
 Grundlinie 86.
- Halbbildermikrometer** 135, 157.
 Hauptebene 2.
 Hauptperspektive 17.
 Hauptpunkt 2.
 Hauptschnitt 22, 180.
 Heliometer 134, 137.
 Helladaptation 16.
 Helligkeit 20, 34, 43.
 Helligkeitsgleichung 126.
 Herabgeführtes Okular 167.
 Herschelsche Bedingung 48.
 Heteromorph 91.
 Hinaufgeführte Objektive 167.
 Hochstandentfernungsmesser 142, 193.
 Höhenmesser 148, 152, 171, 198.
 Höhenverkehrt 52.
 Holländisches Fernrohr 43.
 Horizontalentfernung; Messung der 145,
 198.
 Huygenssches Okular 40.
 Hyperopisch 14.
 Hyposkop 98.
- Indirektes Sehen** 15.
 Innenjustierung 179.
 Interferenzrefraktor 177.
 Inversion 89.
 Inverttelemeter 158.
- Justiereinrichtungen des Entfernungsmessers** 175.
 Justierlatte 176.
 Justierung, absolute 183.
 — der Doppelfernrohre 92, 106.
 Justierverfahren mit einfacher Messung 175.
 — mit Doppelmessung 181.
- Kartenentfernung, Messung der** 145, 198.
 Katadioptrisches Fernrohr 70, 75.
 Katoptrisches Fernrohr 70.
 Kehrbild 136, 158.
 Kehrbildentfernungsmesser 158.
 Keilkompensator 138, 156.
 Keilwinkel 8.
 Kellnersches Okular 41.
 Keplersches Fernrohr 47.
 Kimmiefenmesser 194.

Kippwinkeltheodolit 152.
 Kissenförmige Verzeichnung 29.
 Koinzidenztelemeter 158, 186.
 Kollimator 106, 124, 154, 178.
 Kollektivlinse 40.
 Koma 27, 31.
 Kompensationsokular 41, 49, 76.
 Konjugierte Ebenen 3.
 Konvergenzverhältnis 3.
 Konvergenzwinkel 87.
 Korrektur der Bildfehler 26, 32.
 Kreisläufige Justieranordnung 178.
 Kreuzstabmikrometer 130.
 Kristallmikrometer 139.
 Krümmung 7.
 Kugelgestaltfehler 26, 102.
 Kugelspiegel 7, 25.
 Kulissenwirkung 18.
 Kurzsichtig 14, 41, 46.

Längsabweichung 24, 27, 31.
 Lamellenmikrometer 130.
 Landungsscheinwerfer 200.
 Lateralvergrößerung 3.
 Latte für Entfernungsmessung 145, 199.
 Leere Vergrößerung 37.
 Lehrgeräte 200.
 Lichtdurchlässigkeit 10.
 Lichtempfindlichkeit des Auges 16.
 Lichtstärke 10.
 — des Nachthimmels 34.
 Linse 1, dünne 7.
 Linsenjustiergerät 123.
 Lokalretusche 50.
 Luftfernrohr 47.

Maschinengewehrzielfernrohr 119.
 Mastfernrohr 63.
 Mattscheibenschrohr 67.
 Medial 75.
 Mikrometer 129.
 Mitteltrieb 94.
 Mittlerer Fehler 126.
 Mittelung der Anzeigen 199.
 Monozentrisches Okular 41.
 Montierungen 81.
 Multipleriskop 65.
 Myopisch 14.

 Nahpunkt 14.
 Natürliche Sehschärfe 15.
 Nicolsches Prisma 37.
 Normalvergrößerung 21.
 Nützliche Vergrößerung 37.
 v -Wert 32.

Objektiv 39, 47.
 Objektives Gesichtsfeld 11.
 Öffnungsblende 9.
 Öffnungswinkel 22.
 Öffnungszonen 30.
 Okular 39.
 Okularauszug als Entfernungsmesser 200.
 Okular für beidäugigen Gebrauch 101.
 Okularverstellung, Einfluß der 42, 46.
 Optischer Meßkeil 131.
 Orthomorph 91.
 Orthoskopisches Okular 41.
 Orthoskopische Wahrnehmung 89.

Pankratisches Fernrohr 60.
 Parallaktische Aufstellung 81.
 Paralleplattenmikrometer 139.
 Parallaxe 86, 115, 128, 133, 176.
 Pendelfernrohr 197.
 Pentaprisma 52, 110, 154, 156, 178, 180.
 Periodische Fehler 130.
 Periskop 62.
 Persönlicher Fehler 126.
 Perspektive 18, 46, 86.
 Petzvalsche Bedingung 29, 59.
 Petzvalscher Satz 25, 29.
 Petzvalsches Porträtobjektiv 50, 79.
 Pfeilfehler 31.
 Physikalische Teilung der Strahlen 101.
 Planparallele Platte 6, 23, 32, 57.
 Planspiegel 5.
 Plastik 91, 94, 95, 169.
 Pinakoskop 89.
 Polyaldisches Fernrohr 60.
 Porrosches Fernrohr 52.
 Positionsmikrometer 130.
 Prismenfernrohr 52.
 Prüfen der Wirkung des vergrößerten Objektivabstandes 91.
 Prüfung der Fernrohre 103.
 Prüfung der Parallelität von Visierlinie und Seelenachse 123.
 Pseudoskop 89.
 Pseudoskopische Wahrnehmung 89, 172.
 Punktuell abbildend 29.
 Purkinjesche Erscheinung 16.

Quervergrößerung 3.

Ramsdensches Okular 40.
 Raumbild 88.
 Raumbildentfernungsmesser 167.
 Raumbildmikrometer 137, 168.
 Raumrichtig 91.
 Raumverzerrt 90.

- Rautenmikrometer 130.
 Rechtwendig 5.
 Reduktionstachymeter 148.
 Reell 8.
 Reflektor 70.
 Reflexbilder 75.
 Reflexionsvermögen 74.
 Reflexionswinkel 52.
 Refraktion 150, 187, 193.
 Refraktor 47.
 Reichenbachscher Distanzmesser 145.
 Relative Lichtstärke 10.
 — Teildispersion 32.
 Relieffernrohr 95.
 Reinhertzsche Formel 126.
 Reversionsprisma 53.
 Revolver für Okulare 61.
 — für Farbgläser 123.
 Rheitasches Fernrohr 58.
 Rhombusspiegel 111.
 Riccosches Gesetz 17, 21, 35.
 Richtfernrohre 111.
 Richtfernrohr ohne Fadenkreuz 116.
 Richtglas 112.
 Ringbildsehrohr 67.
 Ringmikrometer 130.
 Ringspiegellinse 67.
 Rollettsche Leiter 168.
 Rückwärtseinschneiden 151.
 Rückwendig 5.
 Rundblickfernrohr 65, 121.
 Rundblickzielfernrohr 121, 122.
 Rundgangsehrohr 64.

 Sagittale Brennlinie 28.
 — Seitenabweichung 24.
 Sammelndes System 7.
 Scharnzielfernrohre 123.
 Scheidekante 157.
 Scheideprismen 161.
 Scheinbares Gesichtsfeld 11.
 Scherenfernrohr 95.
 Schiebetachymeter 149.
 Schlieren 50, 103.
 Schlittenforderung 137.
 Schlüssellochbeobachtung 19.
 Schnittbildentfernungsmesser 158, 186.
 Schranbenmikrometer 130.
 Schwellenwert 15.
 Schwerpunkt des Bildflecks 132.
 Schwingkeilpaar 138.
 Scintillation 37.
 Seelenfernrohr 123.
 Sehrohr 62.
 Sehschärfe 15.

 Seidelsche Bildfehler 26.
 Seitenabweichung 24, 27, 31.
 Seitenverkehrt 52.
 Sekundäre Abbildung 36.
 Sekundäres Spektrum 32, 102.
 Selbablesung 145.
 Selbstrechnende Tachymeter 148.
 Sextant 197.
 Sichtbarkeit der Sterne 34.
 Siderostat 85.
 Sinusbedingung 31.
 Sinusschraube 198.
 Sondiertachygraph 149.
 Spannung im Glase 50.
 Spezifische Plastik 91, 94, 95, 169.
 Sphärische Abweichung in der Achse 26,
 95, 102.
 Sphäroidische Flächen 25.
 Spiegelachse 52.
 Spiegelfernrohr 70.
 Spiegelgruppen 52, 108.
 Spiegelungsfehler 182.
 Spiegelverkehrt 5.
 Spiegelvisier 112.
 Standlinie 86, 141, verdoppelte 172, 189.
 Standsehrohr 68.
 Standwinkelentfernungsmesser 141.
 Stangenfernrohr 97.
 Stärke 7.
 Stereotelemeter 167.
 Sternbilder in der Achse 103.
 Sternbilder außer der Achse 77.
 Sthenallaktisches Fernrohr 148.
 Strahlenbegrenzung 8.
 Subjektives Gesichtsfeld 11.
 Sucher- (Übersichts-) bild 62, 64, 65, 166.
 Systematischer Fehler 126.

 Tachygraph 149.
 Tachymetrie 145.
 Tangentenschraube 149.
 Tangentiale Brennlinie 28.
 — Seitenabweichung 24.
 Tauchbootsehrohr 65.
 Teleobjektiv 49, 61.
 Telestereoskop 38, 90.
 Teleskopisches System 4.
 Telezentrischer Strahlengang 133.
 Terrestrisches Fernrohr 58.
 — Okular 58.
 Tessar 50, 79.
 f -Wert 32.
 Tiefe der scharfen Abbildung 12.
 Tiefenrichtig 89.
 Tiefenverkehrt 89, 173.

- Tiefenvergrößerung 3.
 Tonnenförmige Verzeichnung 29.
 Topometer 149.
 Totale Plastik 91.
 Totalreflexion 53.
 Toter Gang 130.
 Trennung von Doppelsternen 35.
 Trennungslinie 135, 157.
 Trennungsvermögen 14.
 Tripelspiegel 108.
 Triplet 50, 79.
 Trübungsfaktor 38.
 Trugbild 89.
 Turmfernrohr 85.
- Übereinstimmender Strahlenausstritt** 136.
 Überkorrektion 27.
 Übersichtig 14, 41, 46.
 Umgekehrtes Bild 52.
 Umkehrlinsen 58.
 Umkehrprismen 53.
 Unabhängige Visierlinie 119.
 Unempfindliche Bauart des Entfernungsmessers 174.
 Unpersönliches Mikrometer 131.
 Unterkorrektion 27.
 Unzugängliches Bild 8.
- Veränderlicher Glaskeil** 137.
 Veränderliche Vergrößerung 60, 122.
 Veränderlichkeit der Ablenkung von Winkelspiegeln 180.
 Verdoppelte Standlinie 172, 189.
 Vergrößerung 3, 21, 31, 43, 46, 107.
 Vergrößerungswechsel 60, 65, 118.
 Verkippung von Spiegelgruppen 110, 180.
- Verschiebungskeil 139, 156.
 Verzeichnung 29.
 Visierlinie 114.
 Virtuuell 8.
 Vorschaltfernrohr 62, 64, 65.
 Vorsatzlinse 43.
 Vorsatzrohr 124.
- Wahres Gesichtsfeld** 11.
 Wandermarke 169.
 Wanderndes Raumbild 169.
 Weber-Fechnersches Gesetz 15.
 Wechselscheibe für Okulare 61.
 — für Farbgeläser 123.
 Wellmannsches Mikrometer 140.
 Wendeprisma 53.
 Wiederholende Werkzeuge 62.
 Winkelspiegel 52.
 Wollastonsches Prisma 139, 178.
- Zentralspiegel** 93, 109, 124, 189.
 Zentriert 1.
 Zerstreues System 7.
 Zielfernrohre 111.
 Zielwinkelentfernungsmesser 141, 143.
 Zinkenprisma 91.
 Zölost 85.
 Zonenabweichung 30, 50.
 Zufälliger Fehler 126.
 Zugängliches Bild 8.
 Zugeordnete Ebenen 3.
 Zugfernrohr 59.
 Zurückwerfungsvermögen 74.
 Zweistandentfernungsmesser 141, 151.
 Zweistandraumbildgerät 175.

Druck von Breitkopf & Härtel in Leipzig.

B. H. K.



BIBLIOTEKA GŁÓWNA

100183N/1

Verlag von Julius Springer in Berlin W 9

Naturwissenschaftliche Monographien und Lehrbücher

Herausgegeben von der Schriftleitung der „Naturwissenschaften“

Band I:

Allgemeine Erkenntnislehre

Von

Moritz Schlick

Zweite Auflage — In Vorbereitung

Band II:

Die binokularen Instrumente

Nach Quellen und bis zum Ausgang von 1910 bearbeitet

Von

Moritz von RohrDr. phil., wissenschaftlichem Mitarbeiter der optischen Werkstätte
von Carl Zeiss in Jena und a. o. Professor an der Universität Jena

Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage

Mit 136 Textabbildungen

1920. GZ. 8; gebunden GZ. 11

Vorzugspreis für Bezieher der „Naturwissenschaften“ GZ. 7.2; gebunden GZ. 9.9

Band III:

Die Relativitätstheorie Einsteins

und ihre physikalischen Grundlagen

Elementar dargestellt von

Max Born

Dritte, verbesserte Auflage — Mit 135 Textabbildungen

1922. GZ. 7.2; gebunden GZ. 10

Vorzugspreis für Bezieher der „Naturwissenschaften“ GZ. 6.4; gebunden GZ. 9

Band IV:

Einführung in die Geophysik

Von

**Prof. Dr. Adalbert Prey-Prag, Prof. Dr. C. Mainka-
Göttingen und Prof. Dr. E. Tams-Hamburg**

Mit 82 Textabbildungen

Erscheint Ende November 1922

Die eingesetzten Grundsätze (GZ.) entsprechen dem ungefähren Goldmarkwert und ergeben, mit dem Umrechnungsschlüssel (Entwertungsfaktor) Anfang November 1922: 160, vervielfach, den Verkaufspreis.