

# Abhandlungen zur Didaktik und Philosophie der Naturwissenschaft

(Sonderhefte der Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht)

Herausgegeben von  
K. Metzner-Berlin

Heft 12

---

## Die Linsenoptik in der Schule

Anleitung zu den Versuchen und zur rechnenden Behandlung

Von

**Dr. Wilhelm Volkmann**

Oberstudienrat an der staatlichen Hauptstelle  
für den naturwissenschaftlichen Unterricht, Berlin

Mit 85 Textabbildungen



Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg GmbH  
1927

# Die Linsenoptik in der Schule.

Anleitung zu den Versuchen und zur rechnenden Behandlung.

Von

**Dr. Wilhelm Volkmann,**

Oberstudienrat an der staatlichen Hauptstelle  
für den naturwissenschaftlichen Unterricht, Berlin.

Mit 85 Abbildungen.



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

1927.

ISBN 978-3-662-34330-2      ISBN 978-3-662-34601-3 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-662-34601-3

## Vorwort.

Die nachfolgende Darstellung der Linsenoptik hat sich mir im Laufe von drei Jahrzehnten entwickelt. Zuerst stellte mich die Aufforderung eines kleinen Kreises von Amateurphotographen, die der Physik gänzlich unkundig waren, vor die Aufgabe, das Gebiet ohne Voraussetzung irgendwelcher Kenntnisse und mit einfachsten Versuchen zu behandeln. Aus wiederholten Vorträgen und Übungen dieser Art entstand das Büchlein: *Praxis der Linsenoptik* (Berlin: Gebr. Borntraeger 1910). Inzwischen hatte meine Tätigkeit als Vorlesungsassistent an der Landwirtschaftlichen Hochschule in Berlin und meine Beteiligung an den dortigen Übungen für künftige Lehrer Anlaß gegeben, die Versuche in größerer Ausführung teils für die Vorlesung, teils für Schulzwecke auszugestalten.

Hatten die Versuche und Gedankengänge sich zunächst in keiner Beziehung zum Schulbuch befunden, so traten sie nun in einen Gegensatz zu ihm, der sich im Laufe der Zeit immer mehr verschärfte. In meinem jetzigen Amt hatte ich wiederholt Gelegenheit, das Gebiet in Übungen mit nicht ausschließlich jüngeren Fachkollegen durcharbeiten. Neben weiterer Klärung von Einzelheiten, die ich dieser gemeinsamen Arbeit verdanke, gewann ich immer mehr die Überzeugung, auf dem rechten Wege zu sein, und faßte den Entschluß, eine Anleitung zu bieten, die diesen Abschnitt der Optik in einer einfacheren und wirksameren Weise bietet, als es die Schulbücher zur Zeit tun.

Die Linsenoptik zerlege ich in drei Teile. Im ersten werden ohne Voraussetzung irgendwelcher Kenntnisse durch ganz einfache Versuche Erfahrungen über die Verwendbarkeit einiger Linsen gesammelt, ein Modell des Auges hergestellt und mit seiner Hilfe Aufbau und Wirkungsweise von Brille, Lupe, Fernrohr und Mikroskop gezeigt. Dieser Teil kann, da er ganz unabhängig von der übrigen Optik und Physik bleibt, auf der Unterstufe gebracht und irgendwo eingeschoben werden.

Auch im zweiten Teil wird das Brechungsgesetz noch nicht erwähnt. Trotzdem werden, rein durch Versuche, sphärische und chromatische Abweichung, Astigmatismus, Koma und Bildfeldwölbung, Verzeichnung und Spiegelflecke erläutert, ihre Abhängigkeit von einigen Bedingungen erkannt und in gewissen Fällen die Berichtigung sogar durchgeführt. Bei geringsten Voraussetzungen wird also tiefer in die Zusammenhänge eingedrungen und, wenn erwünscht, ein weiteres Gebiet zur Verfügung gestellt, als üblich ist.

Der dritte Teil ist eine Einführung in die rechnende Optik und setzt die Kenntnis des Brechungsgesetzes voraus. Von der üblichen unterscheidet sich

diese Einführung nicht nur in der Anordnung, sondern, indem die vorzeitige Beschränkung auf das Paraxialgebiet vermieden wird, können wichtige Beziehungen anschaulicher und mit breiterer Geltung abgeleitet werden, als auf dem Weg über die Kollineationslehre.

Anhangsweise und durch Kleindruck werden einige Ergänzungen gegeben, deren Mitteilung wünschenswert erschien, die aber über den gewählten Rahmen hinausgehen. Eine Reihe von Verbesserungen verdanke ich Herrn Studienrat Dr. SAGER, der die Freundlichkeit hatte, den Entwurf mehrmals durchzusehen.

Berlin-Steglitz, November 1926.

**WILHELM VOLKMANN.**

## Inhaltsübersicht.

	Seite
Vorwort . . . . .	3
Das Gerät. (Abb. 1—10.) . . . . .	7
<b>Erster Teil: Versuche über Linsen, Auge, optische Instrumente.</b>	
1. Sammelwirkung der Konvexlinsen. (Abb. 11—16.) . . . . .	15
2. Abbildung durch Linsen. (Abb. 17—20.) . . . . .	19
3. Modell des Auges, Brillen. (Abb. 21—23.) . . . . .	24
4. Vergrößerungsrohre. (Abb. 24—28.) . . . . .	29
5. Bildwerfer. (Abb. 29—37.) . . . . .	35
6. Das virtuelle Bild. (Abb. 38—44.) . . . . .	43
<b>Zweiter Teil: Die Linsenfehler und ihre Berichtigung.</b>	
7. Wahrnehmung von Linsenfehlern. . . . .	51
8. Auf der Achse, Wirkung von Rand und Mitte. (Abb. 45—49.) . . . . .	54
9. Farbenabweichung. . . . .	60
10. Schräg zur Achse, Astigmatismus, Bildfeldwölbung, Koma. (Abb. 50—54.)	61
11. Verzeichnung. (Abb. 55—61.) . . . . .	65
12. Spiegelflecke. (Abb. 62—63.) . . . . .	69
<b>Dritter Teil: Rechnende Optik.</b>	
13. Vorbemerkungen zur rechnenden Optik. . . . .	72
14. Die Brechung an einer Kugelfläche. (Abb. 64—67.) . . . . .	73
15. Vergrößerung bei Abbildung durch eine Kugelfläche. (Abb. 68—72.) . .	75
16. Die Brennweite. (Abb. 73—78.) . . . . .	81
17. Die Konvexlinse. (Abb. 79—81.) . . . . .	83
18. Paraxiales Gebiet. (Abb. 82.) . . . . .	85
19. Kollineation. . . . .	89
20. Rechnung und Wirklichkeit. . . . .	91
<b>Anhänge.</b>	
21. Das Verhältnis der vorliegenden Darstellung zur üblichen. . . . .	93
22. Das Format der Glasbilder für Bildwurf. (Abb. 83.) . . . . .	96
23. Das Schirmbild beim Bildwurf. (Abb. 84—85.) . . . . .	99

---

## Das Gerät.

Bei der Auswahl des Gerätes für die Linsenoptik wurde von vornherein Wert darauf gelegt, nur solche Stücke zu verwenden, die auch zu anderen Versuchen geeignet sind. Den Anlaß zu diesem Streben gibt die Tatsache, daß Linsen in physikalischen Unterrichtsversuchen sehr oft verwendet werden, sei es, um das Licht auf irgendeine Stelle zu sammeln, sei es, um kleine Gegenstände vergrößert zu zeigen, sei es, um Strahlenbündel von bestimmten Eigenschaften für optische Versuche zu schaffen. So gliedert sich wenigstens ein Teil der für die Linsenoptik nötigen Linsen ganz natürlich dem allgemeinen Arbeitsgerät ein, das ich mir seit 25 Jahren durch Auflösung der physikalischen Apparate in ihre immer wiederkehrenden Bestandteile geschaffen habe. Der Sinn meines Strebens ist zwar von vielen Fachgenossen richtig erkannt, von anderen aber auch gründlich mißverstanden worden. Bei meinem ersten Bericht über das Gerät<sup>1)</sup> war ich genötigt, um den Zweck der Zusammenstellungen schnell angeben zu können, bekannte Schulapparate aus dem Gerät nachzubauen. Daraus ist das Mißverständnis entstanden, ich wolle jeden fertigen Schulapparat durch Improvisationen aus meinem Gerät verdrängen. Diese Absicht habe ich niemals gehabt. Der Hauptwert des Gerätes liegt in der Möglichkeit, sich neue Versuchsanordnungen ganz oder zum großen Teil zusammensetzen zu können, ohne auf die Herstellung durch die Werkstatt warten zu müssen. Herr Prof. Dr. W. KAUFMANN empfahl deshalb kurz nach dem Erscheinen der genannten Schrift mein Gerät den Forschern als „einen soliden Ersatz für Siegellack, Kork und Glasrohr (die klassischen Baustoffe schnell gebrauchter Forschungsapparate), ebenso anpassungsfähig, aber nicht so zerbrechlich“. Der Baustoff für einen Forschungsapparat muß nicht nur in dem Sinn anpassungsfähig sein, daß er dem ersten Entwurf sich fügt, sondern auch, daß die Umgestaltung des Apparates möglich ist, die während der Arbeit sich in der Regel als nötig erweist. Für den Lehrer und Sammlungsverwalter bietet das Gerät die Möglichkeit, einen Apparat, dessen Anschaffung beabsichtigt ist, in der Improvisation zu erproben. Bei diesen Studien kann sich ergeben, daß die Anschaffung des Apparates nicht lohnt, immer ergibt sich die Erkenntnis, worauf bei Auswahl und Prüfung der Hauptwert gelegt werden muß. Die Möglichkeit, vor dem Ankauf Erfahrungen zu sammeln und ein sicheres Urteil zu gewinnen, ist sehr hoch zu bewerten. Sehr oft werden solche Vorstudien aber auch zu einer neuen, besseren Form des Versuches führen,

---

<sup>1)</sup> Der Aufbau physikalischer Apparate aus selbständigen Apparatenteilen. Berlin: Julius Springer 1905.

und zwar verhältnismäßig oft in dem Sinne, daß man von der Beschaffung eines Sondergerätes überhaupt Abstand nimmt und sich die Vorteile der freieren Gestaltung der Improvisation, die sich einmal so, das andere Mal anders dem Gedankengang des Unterrichts anpaßt, für die Dauer sichert. Zahlreiche Versuche vertragen es auch recht gut, daß man den Apparat erst vor den Augen der Schüler zusammenstellt. Zweck und Vermögen jeder Vorrichtung, die man verwendet, wird dabei viel klarer als bei der Beschreibung eines fertig hingestellten Apparates, da diese oft bei der Ungeduld des Hörers, den Versuch zu sehen, wirkungslos verhallt. Den Apparat begriffen zu haben, ist aber oft wichtiger, als den Versuch gesehen zu haben. Die Ausführung der Versuche mit einem vielfältig verwendbaren Arbeitsgerät ist nahe verwandt mit dem von B. SCHWALBE in die Schule eingeführten Freihandversuch, denn sie verfolgt dasselbe Ziel: einfachsten Ausdruck in Wort und Versuch. Das Verfahren bedeutet eine wesentlich stärkere Ausnutzung der Sammlung, also auch der dafür aufgewandten Gelder, es stellt aber an den Lehrer den Anspruch, daß er von der bequemen Demonstrationsphysik, bei der die Sammlung immer nur so weit gebrauchsfähig ist, als die Mittel zur Bezahlung der Instandsetzungen reichen, zur Experimentalphysik übergeht, bei der er selbst Hand anlegt und durch eigene Mühe und Geschicklichkeit sich aus jeder Verlegenheit heraushilft.

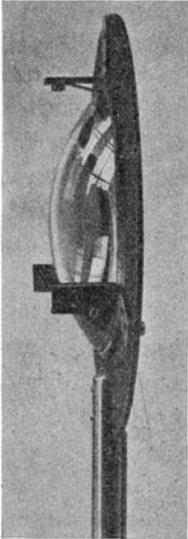


Abb. 1. Linse 10  $\varnothing$  15  
in Fassung.

Die Sammellinsen zu den hier zu beschreibenden Versuchen werden ausschließlich in plankonvexer Form verwendet. Die große Brauchbarkeit dieser Form wird bewiesen durch ihr häufiges Vorkommen in optischen Instrumenten. Die meisten Mikroskopokulare, viele Fernrohrokulare, die Beleuchtungslinsen der meisten Bildwerfer sind einige Beispiele der praktischen Verwendung von Plankonvexlinsen. Auch für die Unterrichtsversuche erweist sich diese Form als die allgemein brauchbarste. Linsen anderer Form zu haben, ist nicht nötig, die Möglichkeit anderer Querschnittsformen kann durch Zeichnung erläutert werden. Die in vielen Sammlungen befindlichen Sätze von sechs Linsen verschiedenen Querschnitts sind zu Versuchen kaum zu brauchen und stellen eine unnütze Geldausgabe dar.

Von den Zerstreuungslinsen muß eine wegen des Zusammenwirkens mit einer der Sammellinsen plankonkav sein, bei den anderen ist die Form gleichgültig. Die stärkste nimmt man bikonkav, um Verteuerung durch übermäßige Krümmung der Hohlfläche zu vermeiden.

Die Linsenfassung der Sammellinsen besteht, wie Abb. 1 zeigt, aus einem ebenen Blechring mit Stiel von 13 mm Stärke. Drei Winkel, von denen der eine mit Feder versehen ist, halten die Linse fest und stehen so weit über, daß sie beim Weglegen der Linse den Linsenscheitel vor Berührung mit der Tisch-

platte schützen. Sie verdecken so wenig von der Linse, daß man deren Gestalt gut sehen und im Schattenbild zeigen kann<sup>1)</sup>. Diese Linsenfassung ist billiger und für den Unterricht besser, als die 1905 beschriebene.

Zum Tragen der Linsen, Lampen usw. dienen am bequemsten die Klemmfüße meines Feinstellzeuges<sup>2)</sup>, deren Fußform im wesentlichen seit 1905 ungeändert geblieben ist, deren Kopf aber 1909 eine Verbesserung erfahren hat, die ich für die wichtigste Verbesserung am Feinstellzeug überhaupt halte<sup>3)</sup>, weil dadurch die Möglichkeit gegeben ist, statt der einen Stabdicke von 13 mm jede beliebige zwischen 7 und 13 mm mit der gleichen Sicherheit zu benutzen. Vor kurzem ist mir bekannt geworden, daß eine süddeutsche Werkstatt meine Stative herstellt und anbietet. Das sind aber die veralteten Stative von 1905, die nur mit genau 13 mm starken Stäben verwendbar sind und deshalb nicht zur Anschaffung empfohlen werden können. Das genau meinen Angaben entsprechende Feinstellzeug stellen Leppin & Masche, Berlin, Engelufer 27, her (Abb. 2 und 3).

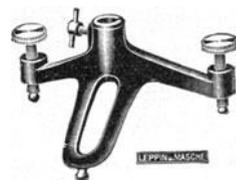


Abb. 2.  
Niedriger Klemmfuß.



Abb. 3. Hoher Klemmfuß.

Als wesentliche Aufgabe aller Klemmvorrichtungen des Feinstellzeuges ist anzusehen: zuverlässige Klemmung bei weitester Toleranz des Stabdurchmessers. Dabei ist nur Rücksicht auf zylindrische Stäbe zu nehmen, weil diese für die Herstellung und den Gebrauch am besten sind und nur selten die Notwendigkeit vorliegt, einen anderen Querschnitt zu nehmen. Die Lage eines Zylinders im Raum kann durch fünf Punkte seines Mantels vollkommen bestimmt werden. Wählt man vier Punkte, die wie die Ecken eines Rechtecks zueinander stehen, als Klemmbett und macht einen gegenüberliegenden Punkt als Ende einer Klemmschraube beweglich, so hat man eine Vorrichtung, mit der Zylinder der verschiedensten Dicke einwandfrei geklemmt werden können. Denkt man an einen Stab, der etwa zur Beseitigung von Rost wiederholt abgeschmirgelt wird, so kann man sagen, die auf die geometrisch notwendigen fünf Punkte beschränkte Klemmvorrichtung verbürgt Genauigkeit trotz der Abnutzung. Gerade das ist es, was man von einem Gerät für beständigen

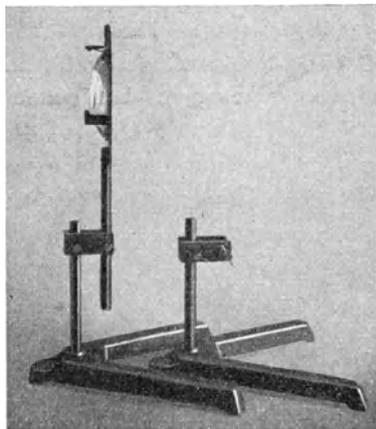


Abb. 4.  
Winkelfüße mit Stiel und Rohrmuffe.

<sup>1)</sup> Vgl. Zeitschr. f. d. physikal. u. chem. Unterricht **22**, 376. 1909.

<sup>2)</sup> Diesen sehr treffenden Namen hat der frühere Direktor der staatlichen Hauptstelle für den naturwissenschaftlichen Unterricht, HERMANN HAHN, geprägt.

<sup>3)</sup> Vgl. Physikalische Zeitschrift **10**, 646. 1909 und Zeitschr. f. d. phys. u. chem. Unterricht **22**, 375. 1909.

Gebrauch fordern muß. Es gibt viele Mechaniker, die eine mit so einfachen Mitteln hergestellte Zuverlässigkeit für eine Puscherei halten und als Lager für runde Stäbe nur eine genau gepaßte runde Bohrung gelten lassen wollen. Die Feinmechanik hat diesen Irrtum längst überwunden und lagert z. B. die Zapfen eines Fernrohres im Nivellierinstrument nur mit den geometrisch nötigen Punkten.

Außer den Klemmfüßen des Feinstellzeuges ist auch der Winkelfuß (Abb. 4) für die optischen Versuche geeignet. Er verdankt seine Entstehung der Not der Schulen, die in Physik und Chemie mit denselben Stativen auskommen müssen. Das Bunsenstativ auf Platte, das für den Chemiker durchaus zweckmäßig ist, genügt dem Physiker nicht. Es wackelt immer, weil es vier Stützpunkte hat, also einen zu viel. Außerdem lassen sich nicht mehrere Stative so stellen, daß die Stäbe nahe aneinander kommen. Der Klemmfuß des Feinstellzeuges, der dem Zwecke des Physikers entspricht, ist wieder für den Chemiker unbrauchbar, weil dieser genötigt ist, die Belastung etwa handbreit vom Stabe entfernt anzubringen. Der Winkelfuß ist für beide gut zu brauchen, für den Physiker nicht ganz so bequem wie der Klemmfuß, dafür ist er aber auch billiger. Als Linsenträger

wird er benutzt, indem man einen Stiel von 20 cm Länge einschraubt



Abb. 5.  
Rohrmuffe.



Abb. 6.  
Kreuzmuffe.



Abb. 7.  
Kopierklammer.

und an diesem eine Parallelmuffe so befestigt, daß ihre Längsachse wagerecht ist. Der Linsenstiel steht dann dem Stativstab parallel, 3,5 cm Mitte von Mitte entfernt. Da die Winkelfüße weit in-

einandergeschoben werden können, ist die gegenseitige Annäherung der getragenen Teile in genügender Weise möglich.

Die Rohrmuffe (Abb. 5), die zugleich Verlängerungs- und Parallelmuffe ist, wird außer zu dem eben genannten Zweck beim Modell des Auges verwendet.

Die Kreuzmuffe (Abb. 6), die sonst besonders oft gebraucht wird, benutzt man in der Optik nur ausnahmsweise. Die Winkelmuffe ist für einige Versuche (z. B. Abb. 50) sehr bequem, aber durch die beiden anderen und einen Stab ersetzbar.

Stäbe, die am Ende ein Schraubgewinde haben, werden Stiele genannt.

Ein ungemein oft verwendbares Hilfsmittel ist die hölzerne Kopierklammer des Photographen (Abb. 7). Schon in dem Zustande, in dem man sie für wenige Pfennige kauft, leistet sie vortreffliche Dienste. Man kann sie aber auch als Bestandteil sehr guter Klemmvorrichtungen verwenden. Beispiele dafür bietet die Schrift: „*Erziehung zur sparsamen Brennstoffverwendung*“, Darmstadt: Verlag der Hauptstelle für Wärmewirtschaft. (Bezug unmittelbar, Preis 45 Pf.)

Zum gelegentlichen Abblenden störenden Lichtes sind dunkel bezogene Pappen von etwa 20 : 60 cm sehr bequem, die paarweise durch einen Stoffstreifen wie Heftdeckel verbunden sind. Sie lassen sich ohne Stützvorrichtung auf dem Tisch aufstellen; ihre Anwendung verursacht also keinen Zeitverlust, während die Aufstellung einfacher Pappen immer Umstände macht.

Die Blenden für die Linsen sind bei den Versuchen beschrieben, zu denen sie gebraucht werden.

Welche Ansprüche die Physik an die Lichtquellen zu stellen hat, ergibt sich im allgemeinen aus der Notwendigkeit großer Tiefenschärfe beim Bildwurf von kleinen Apparaten, z. B. den Drahtkörpern für Plateausche Seifenhautversuche, und aus der Notwendigkeit, bei manchen optischen Versuchen das Licht durch einen engen Spalt gehen zu lassen. Es kommt also weniger auf die Gesamthelligkeit als auf die Leuchtdichte der Lichtquelle an. Die Leuchtdichte wird gemessen an der vom Quadratmillimeter ausgehenden Zahl von Hefnerkerzen. In der Linsenoptik kommen noch einige Glühlampen ihrer Fadenform wegen in Betracht.

Die Bogenlampe mit Reinkohlen übertrifft an Leuchtdichte alle anderen künstlichen Lichtquellen. Je nach Bauart hat sie eine Bogenspannung bis zu 72 Volt, und wenigstens die Hälfte der Bogenspannung muß im Beruhigungswiderstand aufgebraucht werden. Die Leuchtdichte kann 120 HK/mm<sup>2</sup> übersteigen, doch ist im allgemeinen nur mit diesem Wert zu rechnen. Bei 5 Amp. und nicht zu dicken Kohlen stehen rund 10 mm<sup>2</sup> und 1200 Kerzen zur Verfügung. Das genügt für einen großen Hörsaal.

Die Punktlichtlampen, d. h. Wolframbogenlampen in geschlossenem Glaskolben geben 20—30 HK/mm<sup>2</sup> bei 250—100 Stunden Lebensdauer. Sie stehen damit der Wechselstrombogenlampe sehr nahe, geben aber auch bei Wechselstrom ein ruhiges Licht, das stroboskopisch verwendbar ist. Sie übertreffen das Kalklicht, selbst wenn man für dieses Leuchtkörper aus seltenen Erden benutzt. Beim Vorbereiten und den meisten Versuchen kann man die Lampen zur Schonung mit der geringeren Belastung benutzen, und nur bei gewissen Vorführungen schließt man einen Teil des Vorschaltwiderstandes kurz. Mit 200 Kerzen (knapp 2 Amp.) kann man auskommen, Lampen über 4 Amp. kommen für die Physik nicht in Betracht, weil die Leuchtfläche zu groß wird. Bequeme Gehäuse mit eingebautem Widerstand liefern LEPPIN und MASCHÉ, Berlin, Engelufer 27.

Sehr brauchbar sind die kleinen Scheinwerferlampen. Bei ihrem niedrigen Preis kann man sie auf Kosten der Lebensdauer sehr stark beanspruchen und dabei Leuchtdichten erzielen, die denen der Punktlichtlampe wenig nachstehen. Bei geschickter Anwendung sind sie selbst für Spektrum, Interferenz und Beugung überraschend brauchbar. Aber auch bei normaler Beanspruchung sind besonders die Lampen 4 Volt 15 Watt und 6 Volt 50 Watt zu vielen Versuchen nützlich. Am stärksten tritt ihr Nutzen im Wechselstromnetz hervor, wo man sie mit Hilfe eines Transformators für 10 Amp. 8 Volt, der bei 2 und 4 Volt angezapft werden kann, mit winzigem Stromverbrauch aus dem Netz brennen kann. Ein solcher Transformator kostet etwa 35 Mark. Für den Bildwurf vom Glasbild gibt es jetzt gasgefüllte Glühlampen, die eine große Bogenlampe völlig ersetzen. Besonders die Niederspannungslampen, die im Wechselstromnetz mit Hilfe des Transformators bequem verwendbar sind, zeichnen sich durch kleine Leuchtfläche, gute Lichtausbeute und Lebensdauer aus. Daß man für alle Bedürfnisse

der Schule mit Wechselstromlampen auskommen kann, ist von großer Bedeutung, denn da man bei fast allen Schulversuchen, die mit Gleichstrom anzustellen sind, nur geringe Spannungen braucht, wird den meisten Schulen der billige tragbare Gleichrichter der Lorenz-A.-G., Berlin-Tempelhof, Lorenzweg, genügen, der 12 Volt 15 Amp. Gleichstrom gibt und an jede zwei-polige Steckdose angeschlossen werden kann. Bisher waren außer einem großen Umformer auch noch lange, dicke Leitungen und eine Schalttafel notwendig, und dann war man für die Versuche, besonders auch für das Vorbereiten, an einen festen Platz gebunden.

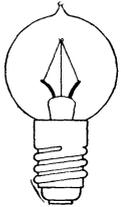


Abb. 8. Glühlampe mit Faden in Winkelform.

Von den Lampen, die der Fadenform wegen gebraucht werden, hat die eine einen bogen- oder winkelförmigen Faden. Man kann solche Lampen

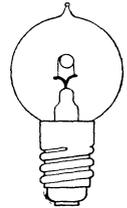


Abb. 9. Glühlampe mit gerolltem Faden.

für verschiedene Spannungen und Stromstärken kaufen. Abb. 8 zeigt eine Lampe für 4 Volt 1 Amp., die in Abschnitt 6 mehrfach genannt ist.

Eine andere Lampe hat einen gerollten Faden. In der Achse der Rolle gesehen bildet er einen Kreis von 1–1,5 mm Durchmesser. Abb. 9 zeigt eine solche Lampe für 4 Volt 1 Amp., die in Abschnitt 8 bis 12 Verwendung findet.

Als optisches Ding (früher sagte man Objekt) dient eine Glaskugelanordnung, die bei den Versuchen über Abbildung durch Linsen beschrieben wird (Abb. 17, vgl. auch *Zeitschr. f. d. phys. u. chem. Unterricht* 36, 28. 1923). Dieses Hilfsmittel ist wesentlich bequemer, als die 1905 für diese Versuche vorgeschlagenen Lampen mit gespanntem Faden, die im Wechselstromnetz überhaupt nicht anwendbar sind, weil dort der Faden unter dem Einfluß des erdmagnetischen Feldes Schwingungen ausführt, also unscharf erscheint.

Die Linsen werden im folgenden meist kurz durch Angabe des Durchmessers und der Brennweite in Zentimetern bezeichnet. 10 Ø 30 heißt also eine Linse von ungefähr 10 cm Durchmesser und 30 cm Brennweite. In den Zeichnungen, die,

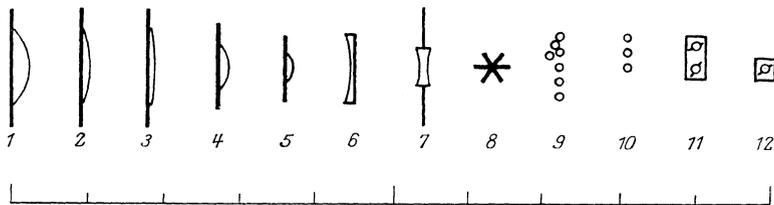


Abb. 10. Sinnbilder für Linsen, Lichtquellen und Muffen.

soweit nicht besonderer Maßstab eingetragen ist, in  $\frac{1}{10}$  der natürlichen Größe ausgeführt sind, werden die Linsen und Stativteile so angedeutet, wie es Abb. 10 angibt. In dieser Abbildung bedeuten 1 bis 5 die Plankonvexlinsen 10 Ø 15, 10 Ø 30, 10 Ø 60, 6 Ø 9 und 3 Ø 4,5; Bild 6 ist die Plankonkavlinse 9 Ø 30, 7 die Bikonkavlinse 5 Ø 10; 8 bedeutet eine (meist punktförmige) Lichtquelle, 9 die Eins aus

Glaskugeln von der Seite gesehen, 10 dieselbe von oben gesehen, 11 die Rohrmuffe, 12 die Kreuzmuffe, und der unterzeichnete Maßstab bedeutet 100 cm.

Die folgende Übersicht über die Verwendung der Linsen wird dem Sammlungsverwalter bei beschränkten Mitteln helfen, die Reihenfolge der Anschaffung zweckmäßig zu wählen, und soll außerdem zeigen, wie sehr auf gute Ausnutzung Bedacht genommen ist.

### Beispiele der Verwendung der Linsen.

#### Die Plankonvexlinse 10 $\varnothing$ 15 dient

zu Versuchen über die Wirkung von Sammellinsen,  
als Lupe zum Augenmodell,  
als Okular und Kollektiv in den Modellen der Vergrößerungsrohre,  
als Beleuchtungslinse beim Bildwurf vom Glasbild,  
als abbildendes Linsenpaar beim Bildwurf vom Glasbild,  
als Beleuchtungslinse beim Zeigen kleiner Apparate,  
als abbildende Linse beim Zeigen sehr kleiner Apparate,  
zur Darstellung von Astigmatismus, Bildfeldwölbung und Koma,  
als stigmatisches Objektiv (natürlicher Blendenort),  
als Beleuchtungslinse bei Versuchen über Verzeichnung;  
vgl. Abb. 11, 12, 18, 19, 24, 25, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 50, 51, 55, 56, 57.

#### Die Plankonvexlinse 10 $\varnothing$ 15 mit oberem Stiel dient

als Linse im Augenmodell;  
vgl. Abb. 21, 22, 24, 25, 27, 28, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44.

#### Die Plankonvexlinse 10 $\varnothing$ 30 dient

zu Versuchen über Wirkung der Sammellinsen,  
als Lupe und Brille im Augenmodell,  
als Objektiv in den Modellen der Vergrößerungsrohre,  
als Objektiv im holländischen Fernrohr (und als Starbrille),  
als zweite Beleuchtungslinse beim Bildwurf vom Glasbild,  
als abbildendes Linsenpaar beim Bildwurf vom Glasbild,  
als abbildende Linse beim Zeigen kleiner Apparate,  
zur Erläuterung des virtuellen Bildes,  
zu Versuchen über sphärische Abweichung,  
zum sphärisch berichtigten Linsenpaar,  
zu Versuchen über Astigmatismus, Bildfeldwölbung und Koma,  
zu Versuchen über Verzeichnung,  
zur Darstellung der Spiegelflecke,  
außerdem vielfach in der „physikalischen Optik“;  
vgl. Abb. 11, 12, 13, 14, 15, 19, 20, 21, 24, 25, 27, 28, 29, 32, 33, 34, 38, 39,  
46, 47, 49, 55, 56, 57, 62, 63.

Die Plankonvexlinse 10  $\varnothing$  60 dient

zu Versuchen über die Wirkung von Sammellinsen,  
 zur Erläuterung der Umkehrbarkeit des Lichtweges,  
 als Brille zum Augenmodell,  
 als Hilfslinse (Vorversuch für Augenmodell),  
 als abbildende Linse zum Zeigen kleiner Apparate bei großem Schirmabstand,  
 für Beugung an der Staubplatte und andere „physikalisch-optische“ Versuche;  
 vgl. Abb. 11, 12, 20 (auch 13, 14, 15, 18, 33, 34).

Die Plankonvexlinse 6  $\varnothing$  9 dient

als Beleuchtungslinse beim Zeigen sehr kleiner Apparate,  
 als abbildende Linse beim Zeigen kleinster Apparate,  
 als Zwischenlinse bei der Mikroprojektion,  
 für das virtuelle Bild an der Sammellinse;  
 vgl. Abb. 35, 36, 37, 40.

Die Plankonvexlinse 3  $\varnothing$  4,5 dient

als Beleuchtungslinse für kleinste Apparate,  
 als Beleuchtungslinse für Mikroprojektion,  
 ferner sehr oft in der „physikalischen Optik“;  
 vgl. Abb. 36, 37.

## Seltener gebraucht werden die Linsen:

Plankonvex 11,5  $\varnothing$  20, vgl. Abb. 31, Bildwurf,  
 Plankonvex 15  $\varnothing$  23 (entsprechend Abb. 31),  
 Plankonkav 9  $\varnothing$  30, vgl. Abb. 23, 41, 49.  
 Konkav 10  $\varnothing$  60 als Brille zum Augenmodell,  
 Konkav 5  $\varnothing$  10 zum holländischen Fernrohr, Abb. 27, 28.  
 Plankonvex 10  $\varnothing$  45 (zum Zeigen kleiner Apparate, wenn der Schirmabstand  
 für 10  $\varnothing$  30 zu groß, für 10  $\varnothing$  60 zu klein ist).

---

## Erster Teil.

### Versuche über Linsen, Auge und optische Instrumente.

#### 1. Sammelwirkung der Konvexlinsen.

Zu den ersten Versuchsreihen werden nur die drei Plankonvexlinsen von 10 cm Durchmesser und 15, 30 und 60 cm Brennweite benutzt. Die Art ihrer Fassung erlaubt es, ihre Gestalt im Schattenbilde zu zeigen. Abb. 11 zeigt den

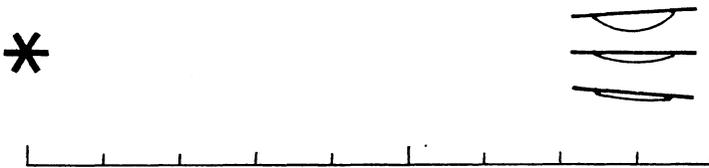


Abb. 11. Die Form der drei Linsen wird im Schatten gezeigt (Aufriß).

Aufbau im Aufriß. In etwa einem Fünftel der Schirmentfernung von der möglichst punktförmigen Lichtquelle sind die drei Linsen so nebeneinandergestellt, daß die Blechscheiben, die den Hauptteil der Fassung bilden, im Schattenbild als schmale Striche erscheinen. Hat man noch darauf geachtet, daß die Lichtquelle in der Höhe der unteren Befestigungswinkel der Linsen steht, so fallen deren Schatten aufeinander, und das Schattenbild hat das Aussehen der Abb. 12. Aus diesem Aufbau wird nun die Linse mit der stärksten Wölbung, dann die mit der schwächsten Wölbung beiseitegesetzt. Das längere Verweilen des Schattens der mittleren Linse auf dem Schirm soll dem Zuschauer eindringlich zeigen, mit welcher Linse die folgenden Versuche ausgeführt werden.

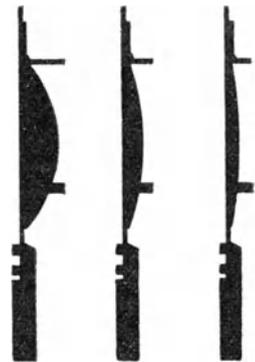


Abb. 12. Schatten der drei Linsen.

Die Linse 10  $\varnothing$  30 wird nun in die Hand genommen, quer zum Lichtstrahl gedreht und langsam vom Lichtpunkt bis zum Schirm getragen. Etwas mehr als 30 cm von der Lampe (Abb. 13) und vom Schirm sind die Stellen, an denen sich die Linse befinden muß, um das aufgefangene Licht zu einem hellen Fleck auf dem Schirm zu vereinigen.

Daß auch zwischen den beiden durch diesen Versuch gefundenen Stellen die Linse eine Sammelwirkung hat, zeigt man mit einem Blatt Papier, das etwa ein Gehilfe in die Hand nimmt und entsprechend der Bewegung der Linse immer

an die rechte Stelle hält. Man könnte auch den Schirm bewegen (falls er nicht an Decke oder Wand befestigt ist), dann hebt sich aber der Versuch weniger vom vorigen ab, deshalb ist es besser, eine äußerlich andere Versuchsform zu wählen. Abb. 14 zeigt die Ausführung des Versuches für einen

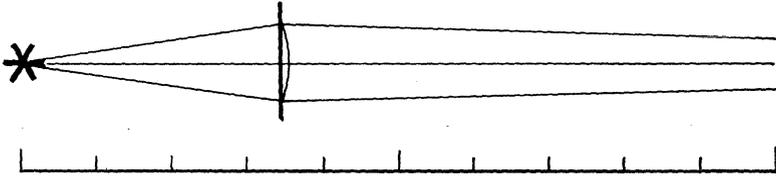


Abb. 13. Sammelwirkung (Bild auf fernem Schirm).

durch die Bezifferung angedeuteten Abstand von 75 cm zwischen Lichtpunkt und Linse.

Für die Außenstellungen, d. h. näher an Lampe oder Schirm, als bei dem ersten dieser Versuche, führt natürlich auch das Hilfsblatt nicht zum Ziel, aber

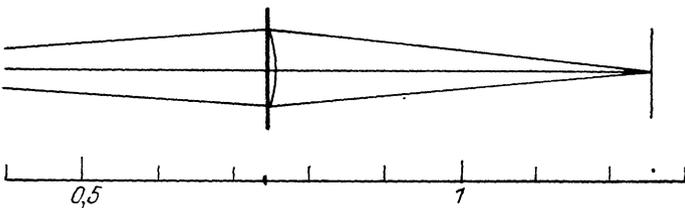


Abb. 14. Sammelwirkung, mit Hilfsblatt gezeigt.

auf andere Weise läßt sich die Sammelwirkung erweisen (Abb. 15). Man braucht dazu eine Kreisblende, deren Lochdurchmesser geringer ist als der

der Linse, 6 cm sind angemessen. Blende und Linse werden nun nicht mehr frei in der Hand benutzt, sondern auf Füße gesetzt, und zwar die Blende der Lampe näher. Indem man nun abwechselnd die Linse hinsetzt und wegnimmt, zeigt man, daß durch die Blende ohne Linse ein größerer Kreis auf dem Schirm

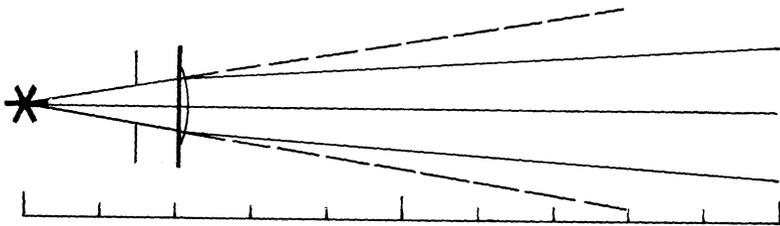


Abb. 15. Sammelwirkung, mit Lochblende nachgewiesen.

erhellt wird, als bei Hinzufügung der Linse, daß die Linse also das Licht sammelt. Dem Einwand, daß die Linse selbst als Blende wirkt und ein Teil des von der Blende durchgelassenen Lichtes vielleicht von der Linsenfassung abgeschnitten wird, kann man leicht begegnen, wenn man die Blende noch kleiner nimmt, als in der Abb. 15 dargestellt ist, oder sie der Linse näher rückt. Es ist dann eine seitliche Verschiebung der Linse möglich, ohne daß sogleich der Linsenrand einen flacheren Bogen vom hellen Kreise abschneidet.

Bei diesen Versuchen, wie auch der großen Mehrzahl der folgenden, soll das Zimmer gar nicht oder doch nicht stärker verdunkelt werden, als es für die Erkennbarkeit der Erscheinungen durchaus nötig ist. Ganz allgemein gilt das für alle physikalischen Versuche, die mit Hilfe von Licht gezeigt werden. Bei allen diesen Versuchen bleibt doch das, was der Experimentator tut, das für das Verständnis Wichtigste, es soll deshalb weder hinter dem Rücken der Schüler noch im Dunkeln geschehen. Wer nur Bilder zu zeigen hat, und für einige Unterrichtsfächer ist das ja der Fall, der wird am besten seinen Bildwerfer hinter den Schülern aufstellen und den Schirm vor oder über der Tafel anbringen. Der Physiker aber, der den Inhalt seiner Projektionseinrichtungen und die Veränderungen, die er daran vornimmt, zeigen will, muß unbedingt ungefähr in der Längsrichtung seines Experimentiertisches projizieren. Die meisten von denen, die dieser Regel folgen, haben die Gewohnheit, in der Richtung vom Fenster zur gegenüberliegenden Wand das Licht zu werfen. Diese Gewohnheit stammt gewiß aus den Zeiten, da in Ermanglung ausreichender künstlicher Lichtquellen mit dem Heliostaten gearbeitet werden mußte. Heute, wo wir jenes unbequeme Gerät nicht mehr nötig haben, können wir die Vorteile der

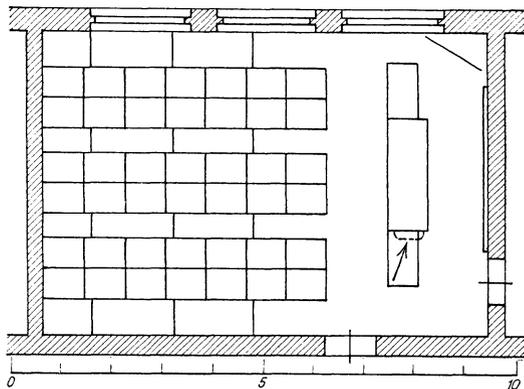


Abb. 16. Projektion im Physikzimmer.

umgekehrten Richtung ausnutzen. Abb. 16 zeigt ein 6,0 : 8,8 m großes Physikzimmer, dessen drei Fenster einzeln verdunkelt werden können. Wird nun in der Richtung des Pfeiles auf den Papierschirm von 1,4 m im Quadrat (Rollenzeichenpapier ist 142 bis 164 cm breit) projiziert, so genügt es fast immer, nur das eine Fenster am Experimentiertisch zu verdunkeln. Nur einige zarte optische Versuche, ferner Bildwurf vom Papierbild und Mikroprojektion erfordern völlige Verdunkelung.

Für die hier geschilderten optischen Versuche hat das Arbeiten im Hellen aber noch eine andere Bedeutung. Wir arbeiten mit großen, nicht abgeblendeten Linsen. Die Anwendung von Blenden bei diesen Anfangsversuchen wäre störend. Der Schüler würde es unzweckmäßig finden, daß man große Linsen kauft, wenn nur die Mitte zu brauchen ist. Er würde auch den ganzen Linsenversuchen mit weniger Freude folgen, wenn ihm zu zeitig bewußt wird, wie mangelhaft die Linsen wirken. Die Begründung der Anwendung der Blenden kostet Zeit und lenkt von dem ab, worauf es jetzt ankommt. Endlich soll dem Schüler offenbehalten werden, daß er an späterer Stelle die Blende als Mittel für bestimmte Untersuchungen entweder selbst vorschlägt oder diesen Vorschlag als naheliegend beifällig begrüßt. In der Wirkung besorgt die Helligkeit des Tageslichtes oder der Raumbelichtung dasselbe, was die Ablendung leisten würde. Auf dem einigermaßen beleuchteten Schirm sieht man nur die Spitze der Kaustik; der breite, von den Randgebieten der Linsen herrührende Lichthof, der diese Spitze umgibt, wird in dem Lichte der Raumbelichtung ersäuft. Man darf nicht sagen, daß der Schüler auf diese Weise bemogelt werde. Auf der einen Seite wird vermieden, daß Erscheinungen,

die im Augenblick nebensächlich sind, seine Aufmerksamkeit ablenken, auf der anderen Seite wird ihm der Nachteil erspart, den z. B. die herkömmliche mathematische Einführung in die Linsenoptik hat, daß er in seinem Bewußtsein auf den fadenförmigen Achsraum eingeschränkt wird und der Übergang zu den in der angewandten Optik wichtigsten weiteren Raumbereichen dann in peinlichen Gegensatz zu der Einführung in die Linsenoptik kommt. An späterer Stelle wird die Aufmerksamkeit auf das gelenkt werden, wovon wir sie jetzt absichtlich fernhalten. Dann wird es dazu dienen, die zunächst in groben Zügen herausgearbeitete Erkenntnis zu verfeinern und vorläufige Benennungen so scharf abzugrenzen, daß Messungen nicht nur ausgeführt, sondern auch mit voller Klarheit gedeutet werden können.

Es dürfte bei dieser oder späterer Gelegenheit den Zeitaufwand lohnen, auch dem Wort „Linse“ einige Bemerkungen zu widmen. Schon die Plankonvexgläser, die hier benutzt wurden, sehen nicht der Hülsenfrucht, die den Namen hergegeben hat, ähnlich, sondern höchstens ihrer Hälfte. Bei der Konkavlinse und der Zylinderlinse ist aber die Beziehung zur ursprünglichen Wortbedeutung ganz verlorengegangen. Der Schüler wird geneigt sein, das für eine unzulässige Leichtfertigkeit zu halten. Da wird man ihn darauf hinweisen, daß die Menschen allgemein so verfahren, wenn eine neue Benennung gebraucht wird. Der Tischler nennt eine kleine Griffsäge einen Fuchsschwanz. Eine Maschine zum Auflockern von Gespinnstfasern, ebenso eine zum Zerkleinern von Fleisch wird Wolf genannt. Aber auch der Sprachgelehrte wird kaum daran Anstoß nehmen, wenn nicht jeder, der das Wort Rubrik anwendet, der roten Farbe gedenkt; und wer beachtet, wenn vom Volumen eines Zylinders die Rede ist, daß das erste dieser Worte vom lateinischen *volvare* = wälzen, das andere vom griechischen *kylindein* = wälzen sich ableitet?

Zu beanstanden dagegen ist der in der Optik weitverbreitete Gebrauch des Wortes Diaphragma im Sinn von Loch. Das griechische Wort Diaphragma heißt Trennwand und wird schon im klassischen Griechisch auch für Zwerchfell gebraucht an Stelle des älteren *Phrën*. Richtig ist es, wenn man die Tonzelle eines Daniellelementes ein Diaphragma nennt (obwohl man nicht notwendig griechisch reden muß). Wird es aber für Loch benutzt, so ist wohl eine Verwechslung mit dem lateinischen Wortstamm, der in Fragment enthalten ist, zu vermuten. Auch das Wort Blende sollte man nicht in der Bedeutung eines Loches verwenden, nicht das Loch, sondern die Wand rings um das Loch blendet das Licht ab.

Nachdem die Sammelwirkung der Linse von 30 cm Brennweite gezeigt ist, wird in kürzerer Wiederholung der Versuche gezeigt, daß die beiden anderen Linsen diese Wirkung auch haben, daß die stärker gewölbte stärker, die schwächer gewölbte schwächer sammelnd wirkt. Die Abbildungen geben auch für diese Fälle die Aufstellung an, nur sind die Entfernungen das eine Mal etwa halb so groß, das andere Mal etwa doppelt so groß zu nehmen, als die Zeichnung angibt.

Nun macht man darauf aufmerksam, daß bei fest aufgestellter Linse jeder seitlichen Bewegung der Lampe eine entgegengesetzte des Lichtflecks auf dem Schirm entspricht. Daraus kann man folgern, daß mehrere Lichtquellen, die in einer leicht erkennbaren Figur angeordnet sind, in einer ähnlichen Figur auf dem Schirm abgebildet werden, nur daß Rechts und Links, Oben und Unten vertauscht sind. Das leitet über zur nächsten Reihe von Versuchen.

### Gerät zu den Versuchen über Sammelwirkung der Konvexlinsen.

Vier KlemmfüÙe *C* (oder *A*).

Punktlicht- oder Bogenlampe in Gehäuse auf Stiel.

Widerstand zur Lampe.

Linsen 10  $\varnothing$  15, 10  $\varnothing$  30, 10  $\varnothing$  60 in Fassung auf Stiel.

Blendscheibe mit 6-cm-Loch, auf Stiel.

Schirm auf Fuß oder hangend.

Hilfsschirm (Papierblatt).

(Abstellklotz für Linsen.)

(Statt der KlemmfüÙe sind auch WinkelfüÙe mit je einem 10 bis 20 cm langem Stiel und Rohrmuffe verwendbar.)

### 2. Abbildung durch Linsen.

Die in der Schlußbemerkung zu den letzten Versuchen erwähnte Figur von Lichtpunkten kann aus kleinen Glühlampen zusammengesetzt werden. Bedeutend bequemer aber ist es, sie nach Abb. 17 aus kleinen Glaskugeln zu bilden, auf die von der andern Seite her Licht fällt. Die Glaskugeln sind in Handlungen für chemisches Gerät käuflich; sie dienen dem Chemiker, um Lösungen, die gegen den Luftsauerstoff empfindlich sind, auch in angebrochenen Flaschen aufbewahren zu können: Nach Entnahme der Flüssigkeit werden so viel Glaskugeln eingeschüttet, daß die Flüssigkeit wieder bis zum Pfropfen reicht. Diese Glaskugeln von etwa 9 mm

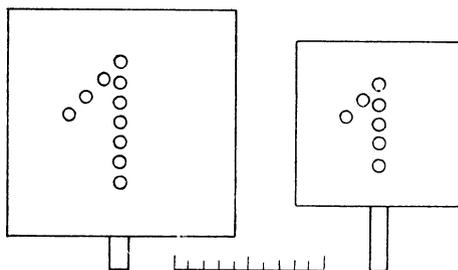


Abb. 17. Optisches Ding, große und kleine arabische Eins aus Glaskugeln.

Größe (es gibt auch kleinere) lassen sich in weichem Holz gut befestigen, wenn man die Löcher ein wenig kleiner bohrt und die Kugeln mit einem harten Holz hineindrückt. Eine zweckmäßige Figur ist die einer arabischen Eins, denn an ihr ist Oben und Unten, Links und Rechts zu unterscheiden. Die früher beliebte Pfeilform bietet nur einen dieser Unterschiede, ist also weniger geeignet. In der Regel kommt man mit einer 8 cm hohen Eins aus, es ist aber gut, wenigstens noch eine kleinere zu haben. Für Vorträge in großen Hörsälen kann man sie auch 30 cm hoch machen, wobei der Grundstrich als Doppelreihe ausgeführt wird.

Vielfach wird als „Ding“ oder „Gegenstand“ bei den Linsenversuchen eine aus Löchern gebildete Figur in der Form eines Pfeiles oder des Buchstabens *F* oder in anderer Form verwendet. Steht dahinter eine ausgedehnte Lichtquelle, etwa ein Gasglühlicht, so ist gegen diese Löcherfiguren nichts einzuwenden, denn aus jedem Loch tritt ein so weiter Lichtkegel, daß alle Punkte der Linse von ihm getroffen werden. Man ist aber in der Größe sehr beschränkt, da die Figur noch nicht die Größe der Lichtquelle erreichen darf. Aus diesem Grunde ist man dazu übergegangen,

den Löcherpfeil in das gerichtete Licht eines Bildwerfers zu stellen. So verwendet, ist die Vorrichtung nicht mehr einwandfrei, denn nun wird ein Punkt des Gegenstandes nicht mehr von der ganzen Linse, sondern nur von einem kleinen Linsenteil abgebildet und jeder andere Punkt von einem anderen Linsenteil. Richtet man das Licht so, daß es sich vor der Linse überkreuzt, so sieht das Bild völlig anders aus, als wenn man das Licht so richtet, daß die Überkreuzung erst hinter der Linse stattfindet (vgl. Abb. 55 bis 58). Wie man auch immer das Licht führen mag, man erhält etwas anderes, als wenn an der Abbildung jedes Punktes die ganze Linse teilnimmt. Es hilft nichts, wenn man dieser Bemänglung entgegenhält: „Der Versuch gelingt aber recht schön.“ Es ist eben ein anderer Versuch als der, den man vorführen will. Jede Überkreuzungsstelle kann, ohne daß sich irgend etwas ändert, mit einer kleinen Lochblende umgeben werden. Der Versuch stellt also vielmehr die Wirkung einer bestimmten Blendenstellung als die Wirkung der Linse dar. Bei den Glaskugelfiguren wirkt jede Kugel wie eine starke Linse; dicht hinter ihr wird die Lichtquelle sehr klein in stark zusammenlaufendem Licht abgebildet, und dieses Bild strahlt nun in einen so weiten Raumwinkel, daß überall, wo man die Linse beim Versuch hinstellen Veranlassung hat, die ganze Linse von dem Licht getroffen wird. Es ist nicht nötig, das Licht, bevor es die Glaskugelfigur trifft, durch eine Linse parallel zu richten, sondern es genügt, wenn man die Lampe um ungefähr die Höhe der Figur von ihr entfernt aufstellt. Eine gewöhnliche Glühlampe ist verwendbar, besser ist natürlich eine fast punktförmige Lampe. Auch wird man die Lampe um so stärker nehmen, je größer die Figur ist.

Die arabische Eins wird so aufgestellt, daß sie beim Blick gegen das Licht richtig erscheint, das muß man bei der Deutung der Bilder auf dem Schirm beachten. Blickt man erst auf den Gegenstand und dann auf das Bild auf dem Schirm, so hat der Körper dabei eine halbe Wendung ausgeführt. Dadurch ist für die Beurteilung von Rechts und Links eine Vertauschung, wenn man es mathematisch ausdrücken will, eine Umkehr des Vorzeichens, eingetreten. Für die Deutung des Schirmbildes muß man also stets den Anblick des Bildes sich vergegenwärtigen, den man von der Rückseite des Schirmes her haben würde.

Die Abbildung der arabischen Eins ist in mancher Hinsicht eine Wiederholung der Versuche über die Sammelwirkung der drei Linsen. Es kann deshalb hier die Beschreibung dieser Versuche im einzelnen weggelassen und auf die Abb. 13 und 14 und ihre Erläuterung verwiesen werden. Im Unterricht dürfte es aber doch gut sein, die Zeit zu opfern, die zur Ausführung dieser Versuche nötig ist, denn es kommt viel darauf an, daß die Schüler mit der Wirkung dieser drei Linsen, also auch mit dem Unterschied ihrer Wirkung vertraut sind. Nur wenn die Schüler selbst ein Urteil darüber haben, welche der drei Linsen in jedem Anwendungsfall dem Zweck entspricht, werden sie den Aufbau optischer Versuchsanordnungen und Instrumente wirklich verstehen können. Als neue Beobachtung kommt hinzu, daß die Größen von Gegenstand und Bild sich ebenso verhalten wie ihre Abstände von der Linse.

Ein Versuch, der hier oder an späterer Stelle eingeschaltet werden kann, betrifft die Umkehrbarkeit des Lichtweges. Man braucht dazu zwei arabische Einsen von etwas verschiedener Größe. In Abb. 18 sind 8 und 5 cm Höhe

angenommen. Die eine steht aufrecht wie gewöhnlich, die andere wird auf den Kopf gestellt, hinter jede eine Lichtquelle. Außerdem stehen beide schräg und in solchem Abstand von einer zwischen ihnen aufgestellten Linse, daß sie gerade aufeinander abgebildet werden. In der Abbildung ist die Linse von 15 cm Brennweite genommen worden, um eine übersichtliche Zeichnung zu erhalten. Beim Versuch nimmt man besser die Linse von 60 cm Brennweite, denn je weiter die beiden Glasperlenfiguren auseinanderstehen, um so besser können die Zuschauer beobachten. Nachdem man, wie angegeben, eingestellt hat, zieht man die Linse ein wenig zur Seite, so daß die Bilder zwar noch auf

die Holzplatten, aber nicht mehr auf die Glaskugeln fallen. Dann löscht man beide Lampen und bedeckt die Platte

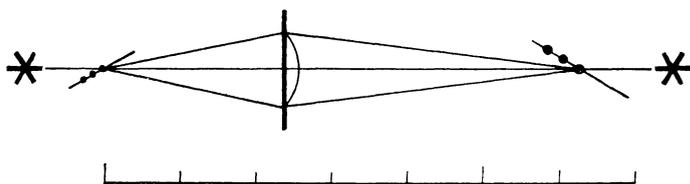


Abb. 18. Umkehrbarkeit des Lichtweges.

der verkehrten Eins mit einem übergehängten Blatt Papier. Diese Vorbereitungen sind in Abwesenheit der Schüler zu treffen. Zum Versuch beleuchtet man die aufrechte Eins und zeigt ihr Bild auf dem Papier, löscht die Lampe, hängt das Papier über die Platte der aufrechten Eins, beleuchtet die andere und zeigt ihr Bild auf dem Papier. Nun nimmt man das Papier weg und läßt beide Lampen leuchten. Darauf schiebt man ganz langsam die Linse wieder auf die Achse und zeigt, daß nun Gegenstand und Bild für die eine Richtung mit Bild und Gegenstand für die andere Richtung zusammenfallen.

Der Schüler wird vielleicht geneigt sein, den eben beschriebenen Versuch nicht ernst zu nehmen, sondern ihn als ein Taschenspielerstückchen zu werten. Er empfindet es als eine starke Zumutung, daß er das Ding und das Bild gewissermaßen als gleichwertig ansehen soll. Der Versuch soll gar nicht als ein Beweis für eine im wesentlichen geometrische Beziehung gelten, sondern er soll, wie übrigens die meisten Unterrichtsversuche, Anlaß und Hilfe geben zur Bildung einer neuen Vorstellung. Macht man noch die Bemerkung, daß es für diesen Versuch oder, um es gröber auszudrücken, für die Linse nur auf die *optischen* Kennzeichen ankommt, in denen Ding und Bild ja übereinstimmen, und nicht auf die sonstigen, die uns erst darüber belehren, daß dem Ding eine höhere Wertung zukommt, als dem Bilde, so wird die neue Vorstellung dadurch ihrem Inhalte nach gefestigt und ihr Geltungsbereich abgegrenzt. Die Bemerkung führt aber auch aus dem engen Bereich der Optik und selbst dem der Physik hinaus auf Gedanken von allgemeiner Bedeutung.

Die Abbildungsversuche gelingen mit den drei Linsen, solange der Abstand zwischen Gegenstand und Schirm groß genug ist. Verkleinert man den Abstand, so versagt zunächst die flachste der drei Linsen. Wir wollen aber gleich den Abstand auf etwa 1 m verringern, so daß auch die mittelstarke Linse versagt. In diesem Fall pflegt man nun das Auge hinter die Linse zu bringen und aus dem, was man sieht, den Begriff des virtuellen Bildes abzuleiten. Wir wollen zwar auch das Auge hinter die Linse bringen und erzählen, daß wir die arabische

Eins deutlich sehen, auch wohl einen Schüler das bestätigen lassen, dann aber gleich darauf hinweisen, daß wir durch das Hineinbringen des Auges die optische Versuchsanordnung geändert haben. Es wird kurz daran zu erinnern sein, daß die Ärzte im Auge eine Linse und eine auffangende Fläche gefunden haben. Was wir durch das Hineinbringen des Auges erreicht haben, wollen wir versuchen, nun auch mit unseren Linsen und einem Blatt Papier zustande zu bringen. Abb. 19

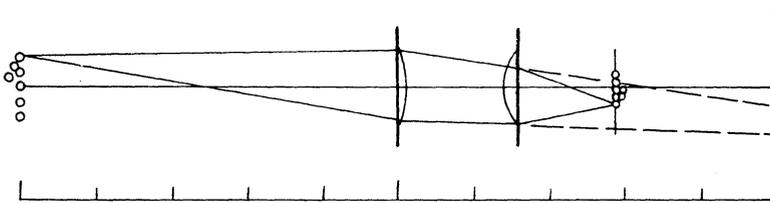


Abb. 19. Abbildung durch Hilfslinse (Auge).

zeigt die Anordnung unter Benutzung der mittleren und der starken Linse. Hierbei kann nun der Einwand gemacht werden, daß die starke Linse für sich allein in diesem Abstand ein Bild des Gegenstands gibt und die andere also überflüssig für das Ergebnis des Versuches sei. Der Einwand ist zwar nicht ganz stichhaltig, das Bedenken soll aber doch zerstreut werden, deshalb zeigt man nach Abb. 20, daß auch die beiden schwächeren der drei Linsen, die beide für

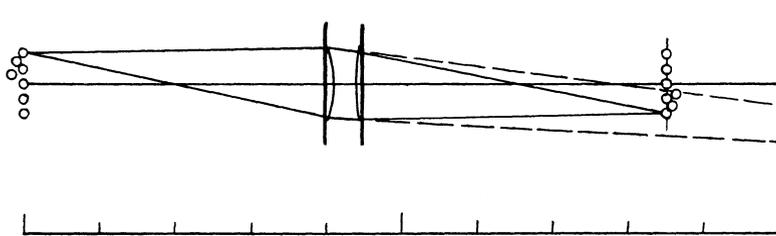


Abb. 20. Abbildung durch Hilfslinse.

sich bei 1 m Abstand zwischen Gegenstand und Schirm kein Bild geben, gemeinsam dazu instande sind. Das Modell des Auges, das wir durch diese Versuche gewonnen haben, werden wir im folgenden Abschnitt weiter ausbauen.

Ich lege großen Wert darauf, den Begriff des virtuellen Bildes vorläufig zu vermeiden. So nützlich er dem rechnenden Optiker ist, in die experimentelle Optik gehört er nicht hinein. Der rechnende Optiker muß an jeder Fläche haltmachen, und das Ergebnis seiner Rechnung ist entweder: das Licht sammelt sich nun zu einem *Bilde* an angebbarem Ort, oder: das Licht geht nun so weiter, als ob es von einem anderen als dem wirklichen *Ding* käme. Dieses *scheinbare Ding* wird *virtuelles Bild* genannt. Beim Experiment gibt es nicht zwei positive Resultate, sondern entweder findet man ein reelles Bild an bestimmter Stelle, oder man findet keins, und mehr ist in diesem Fall aus dem Versuch nicht abzuleiten. Strahlenverfolgungen sind nicht Versuche im Sinne der hier beschriebenen, sondern trotz der anderen Hilfsmittel inhaltlich eine Nachahmung des Rechenverfahrens. Während für den Rechner jede optische Anordnung von selbst in so viel Teile zerfällt, als Räume

durch brechende oder spiegelnde Flächen voneinander getrennt sind, werden wir zusammenfassen, was zwischen Ding und reellem Bild oder einem und einem folgenden reellen Bild liegt. Um so etwas kurz benennen zu können, möge es eine *vollständige optische Anordnung* heißen. Um diesen Ausdruck weiter zu erläutern, sei vorweggenommen, daß für uns ein Keplersches Fernrohr in folgende zwei Teile zerfällt: 1. Ding, Fernrohrobjektiv und von ihm entworfenen Bild; 2. dieses Bild, Okular, Auge und Bild auf der Netzhaut. Später wird auch für uns der Anlaß kommen, unvollständige optische Anordnungen zu betrachten, dann erst wird es Zeit sein, den Begriff des virtuellen Bildes einzuführen. Dem Rechner sind reelles und virtuelles Bild eng verwandte Begriffe, beides *Bilder*, nur durch ein Vorzeichen verschieden. Dem Experimentator sind sie ganz Verschiedenes, das eine ein *Bild* und etwas *Wirkliches*, das andere eine *Täuschung* über Ort und Größe eines vorgelegten *Dinges*.

In den hier vorgetragenen Gedankengang paßt der Begriff des virtuellen Bildes nicht hinein. Man hat nicht ganz unrecht, wenn man vermutet, daß der Wunsch, das virtuelle Bild zu vermeiden, gestaltenden Einfluß auf die Darstellung gehabt hat. Das reelle Bild ist ein anschaulicher Begriff, der leicht vom Schüler erfaßt wird, aber das virtuelle Bild ist eine Abstraktion, mit der nur selten ein Schüler etwas anzufangen weiß. Werden diese beiden Begriffe, wie herkömmlich, in derselben Stunde gelehrt, so vermögen die meisten nicht, sie auseinanderzuhalten. Mehr als die Hälfte der Studenten im Anfängerpraktikum der Hochschulen sucht das virtuelle Bild mit einem Blatt Papier aufzufangen, wenn man nicht durch besondere Anleitung und Warnung dem vorbeugt.

Wer in der Experimentalphysik das virtuelle Bild zeitig einführt, der erkennt das Auge nicht als einen Teil der Versuchsanordnung an, und doch kann er ohne den Gebrauch des Auges keine Erfahrung machen, die ihn zu diesem Begriff führt. Es ist eine fehlgehende Gewissenhaftigkeit, wenn man beim ebenen Spiegel vom Auge nichts sagen will, weil die Reihenfolge: Spiegelung, Brechung, Linse, Auge im Physikbuch üblich ist. Diese Reihenfolge ist sehr passend für den theoretischen Physiker, der ein ausreichendes Maß von Erfahrung voraussetzen darf, und nun die Aufgabe hat, die Zusammenhänge dieser Erfahrungen aus einer möglichst geringen Zahl gedanklich einfacher Voraussetzungen mathematisch aufzubauen. Die Schule, die erst einmal die Erfahrungsvoraussetzungen zusammenzubringen hat, muß mit dem Nächstliegenden anfangen und ihre Ordnung unbekümmert um die Endresultate der Grundlagenforschung aufstellen. Sieht man die Sache so an, dann gehört der ebene Spiegel in der Reihenfolge hinter das Auge, denn für sich allein entwirft er kein Bild, mit dem Auge zusammen aber tut er es. Daß der Besitzer des Auges, wenn ihm Vorhandensein oder Wirkung des Spiegels unbekannt ist, das Ding an falscher Stelle sucht, ist eine Sache für sich.

Nicht nur um möglichst schnell zum Modell des Auges zu gelangen, habe ich in den bisherigen Versuchen weder eine Brennweite bestimmt, noch Bildweite und Gegenstandsweite auf eine der Linse eigentümliche Größe zurückzuführen gesucht. Ich bin vielmehr der Ansicht, daß diese Dinge in die Anfangserfahrungen nicht gehören und erst nach einer viel weitergeführten Untersuchung der Linseneigenschaften gebracht werden können. Das eine Ende der Brennweite (gemeint ist die Brennweite der Linsenmitte), nämlich die Spitze der Kaustik, kann man zwar sehr zutreffend bestimmen, sowohl wenn man im Hellen mißt, wie auch wenn man im

Dunkeln mit geeigneten Objekten arbeitet. Für das andere Ende der Brennweite fehlt aber die Definition. Mißt man bis zur Linse, so ist es bei der Bikonvexlinse in jedem Fall falsch. Die Plankonvexlinse gibt im parallelen Licht, das ungebrochen durch die ebene Fläche einfällt, den richtigen, in der umgekehrten Richtung einen um zwei Drittel der Linsendicke falschen Wert. Bei unserer stärksten Linse ist das auf 15 cm Brennweite 15 mm Fehler. Das Schlimmste dabei ist, daß die Linse in beiden Richtungen um ein Zehntel verschiedene Stärke zu haben scheint. Die Messungen mögen noch so schön ausgeführt werden und unter sich noch so schön stimmen, sie entbehren der Grundlage der zutreffenden Deutung und sind deshalb verfrüht, sie sind irreführend, sowohl bezüglich ihres optischen Inhaltes, wie als Schulung in der Meßkunst überhaupt.

Allerdings läßt sich die gelegentliche Nennung des Wortes Brennweite kaum umgehen, da es ganz üblich ist, Linsen, besonders in der Lichtbildkunst, durch die Brennweite zu kennzeichnen. Auch den Schülern, mindestens soweit sie photographisches Gerät haben, wird dieses Wort bereits bekannt sein. Man kann bei Erwähnung der Brennwirkung einer Linse einen vorläufigen, verschwommenen Begriff der Brennweite einführen, tut aber gut, darauf hinzuweisen, daß sich zunächst noch gar nicht feststellen läßt, ob überhaupt eine scharfe Begriffsbestimmung möglich ist, und daß erst später sich zeigen wird, unter welchen Einschränkungen der Begriff scharf gefaßt werden kann. Wirkliche Bedeutung hat der Begriff ja erst, wenn er als geeignet zur einfachen Darstellung der Lagebeziehungen erkannt wird, und das ist erst im dritten Abschnitt dieser Anleitung möglich.

### Gerät zu den Versuchen über Abbildung durch Linsen.

5 Klemmfüße *C* (oder *A*).

2 Glühlampen auf Stiel.

2 Pappschirme (oder Lampengehäuse).

Große arabische Eins aus Glaskugeln, auf Stiel.

Kleine arabische Eins aus Glaskugeln, auf Stiel.

Linsen 10  $\varnothing$  15, 10  $\varnothing$  30, 10  $\varnothing$  60 in Fassung auf Stiel.

Schirm, stehend oder hangend.

Hilfsschirm (Papierblatt).

(Abstellklotz für Linsen.)

(Statt der Klemmfüße sind auch Winkelfüße mit je einem 10 bis 20 cm langen Stiel und einer Rohrmuffe verwendbar.)

### 3. Modell des Auges, Brillen.

Im letzten Versuch hatten wir ein Modell des Auges gewonnen, bestehend aus einer Linse und einem Blatt Papier. Wir wollen nun unserem Augenmodell eine bestimmtere Gestalt geben, um seinen Nutzen für den Unterricht zu steigern. Für diesen Zweck ist eine Linse, gleich der stärksten der drei bisher benutzten, auch oben mit einem kurzen Stiel versehen. Diese Linse wird von einem Klemmfuß getragen, der in Abb. 21 nicht angedeutet ist. Auf den oberen Stiel wird eine Rohrmuffe gesteckt und in ihre obere Querbohrung ein Stab von etwa 40 cm Länge geschoben. Auf das eine Ende dieses Stabes, das nur

wenige Zentimeter aus der Muffe ragt, kommt eine zweite Rohrmuffe, die bei vielen Versuchen eine zweite Linse, die Brille oder die Lupe, trägt, wie das punktiert in der Abbildung angedeutet ist. Diese Muffe bezeichne ich bisweilen als die Nase meines Augenmodelles, um durch diese scherzhafte Benennung die Zusammensetzung des Modelles dem Gedächtnis fester einzuprägen. Auf das lange Ende des Stabes wird ein Blatt Schreibpapier als Netzhaut geschoben. Das dafür nötige Loch kann man mit Hilfe des Stabes und der Rohrmuffe ausstanzen, indem man das Papierblatt mit zwei Fingern über das Loch der Muffe spannt und das Stabende mit einem raschen Ruck hindurchstößt. Beiderseits des Papieres werden Kopierklammern als Akkommodationsgrenzen auf den Stab gesetzt. Es ist zweckmäßig,

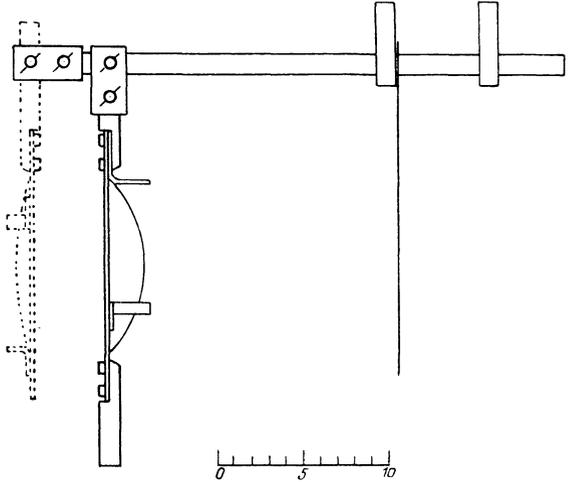


Abb. 21. Modell des Auges (mit Lupe).

die gewölbte Seite dem Papier zuzuwenden. Die Linse zeichnet zwar, soweit die Mitte des Bildes in Betracht kommt, in der umgekehrten Stellung besser, aber die Ausdehnung des brauchbaren Bildes ist sehr viel größer bei der Stellung der Linse, wie sie die Abbildung zeigt. Abb. 22 gibt eine Ansicht des aufgestellten Augenmodelles.

Durch den auf die Linse aufgesetzten wagerechten Stab soll die Zusammengehörigkeit der Teile eindringlich hervorgehoben werden. Nicht nur Linse und Netzhaut gehören zusammen, vielmehr sind, wenn wir an dem im vorigen Abschnitt entwickelten Gedanken der vollständigen optischen Anordnung festhalten, die Brille, die Lupe, das Okular nicht nur als Ergänzung, sondern geradezu als Bestandteil des Auges aufzufassen. Geht in dieser Hinsicht das Modell des Auges über das hinaus, was der Physiologe und der Anatom wünschen, so bleibt es in anderer Beziehung dahinter zurück. Das menschliche Auge paßt sich der Entfernung nicht durch Verschiebung der Netzhaut, sondern durch Änderung der Linsenform an.



Abb. 22. Modell des Auges.

Für unseren Zweck kommt es nicht darauf an, wie die Anpassung erfolgt, sondern was aus ihrer Begrenztheit folgt. Genau so, wie ein bildlicher Ausdruck nur in einer Hinsicht zum Gleichnis taugt und wie jeder Vergleich hinkt, so kann man auch vom Modell nur fordern, daß eine einzige Beziehung zutreffend dargestellt wird. Für das Herausheben und Verstehen dieser einen Beziehung ist es sogar oft wichtig, daß in jeder anderen Hinsicht das Modell von der Vorlage abweiche. Modell ist

eben etwas anderes als Nachbildung. Wen aber die Abweichung vom Mechanismus der Akkommodation im Menschengenauge zu sehr stört, der mag die Aufmerksamkeit zunächst auf das allgemeinere Tierauge lenken. Im Tierreich wird die Anpassung oft durch Veränderung der Form des Augapfels unterstützt, und nach einer Mitteilung, die auf einer Naturforscherversammlung gemacht wurde, hat das Krokodil eine starre Augenlinse und akkommodiert nur durch Längenänderung des Augapfels.

Den ersten Versuch mit dem Augenmodell stellt man folgendermaßen an: An das eine Ende des Tisches wird die beleuchtete arabische Eins gesetzt, am anderen wird das Augenmodell vor den Schülern zusammengesetzt. Es ist ein ganz zufälliges Auge, von dem wir annehmen, daß die Tischlänge gerade die größte Entfernung sei, in der es gut sehen kann. Die Netzhaut (Papierblatt) wird also scharf eingestellt, und unmittelbar davor, d. h. der Linse zugewandt, wird eine Kopierklammer auf den Stab gesetzt. Die andere Kopierklammer wird willkürlich drei Finger breit hinter das Blatt gesetzt. Wir rücken nun das Auge dem „Ding“ um etwa einen halben Meter näher und stellen fest, daß die durch die Stellung der Kopierklammern gegebene Anpassungsmöglichkeit ausreicht, um ein scharfes Bild auf der Netzhaut zu erhalten. Die Annäherung kann mehrere Male wiederholt werden, schließlich wird aber der Punkt überschritten, bei dem gerade noch Scharfstellung des Bildes möglich ist, indem Papier und hintere Klammer sich berühren, und wir rücken das Modell auf diesen Nahepunkt zurück.

Was wir zu tun haben, wenn wir trotz Überschreitung des Nahepunktes und ohne Verschiebung der Akkommodationsgrenze (Kopierklammer) ein scharfes Bild auf der Netzhaut haben wollen, das kann der Schüler wohl selbst finden, wenn er an den Versuch zurückdenkt, der zur Einführung des Augenmodelles den Anlaß gab (Abb. 19 und 20). Wir müssen dem Auge eine Linse hinzufügen und nehmen dazu der Reihe nach die schwächste, mittlere und stärkste der drei Linsen, mit denen die früheren Versuche ausgeführt wurden. Abb. 21 zeigt die Anbringung der Linse am Augenmodell gestrichelt. Dabei kann auch gezeigt werden, daß die Wirkung der Hilfslinse um so größer ist, je näher sie der Augenlinse steht.

Bei der Annäherung des Augenmodelles an den Gegenstand wurde das Netzhautbild schrittweise größer und größer. Im Nahepunkt war die größte Abbildung erreicht, die das unbewaffnete Auge leisten kann. Dadurch, daß die Zusatzlinse eine noch größere Annäherung ermöglicht, wirkt sie als Vergrößerungsglas. Daß wir mit zunehmender Vergrößerung eine Abnahme des überblickten Gebietes, aber auch eine Abnahme des brauchbaren Bildfeldes auf der Netzhaut in Kauf nehmen müssen, ist zu beachten und wird den Schüler kaum befremden, sollte aber doch nicht als selbstverständlich oder belanglos abgetan werden.

Die hier gegebene Deutung der Benennung Vergrößerungsglas steht im Gegensatz zur üblichen Definition der Vergrößerung einer Lupe, ist aber darum noch nicht unrichtig. Hier wird die Linse danach gewertet, was sie dem einzelnen Auge nützt, bei der Definition der Vergrößerung wird sie mit einer Linse von 25 cm Brennweite

verglichen. Verwirrung wird nur angerichtet durch die unglückliche und anscheinend unausrottbare Benennung „deutliche Sehweite“ für 25 cm. Auch sprachlich ist der Name schlecht und steht der reitenden Artilleriekaserne gleich. Die Weite des deutlichsten Sehens ist für jedes Auge durch seinen Nahpunkt gegeben. Man kann an unserem Augenmodell sehr schnell feststellen, daß die Vergrößerung, die die Zusatzlinse erlaubt, um so geringer wird, je näher das unbewaffnete Auge erfolgreich an den Gegenstand herankommen kann. Es ist dazu nur nötig, durch Versetzen der hinteren Kopierklammer verschiedene Nahepunkte anzunehmen und jedesmal den Versuch auszuführen.

Die übliche Anleitung zur Messung der Lupenvergrößerung kommt darauf hinaus, daß man fragt: Was nützt dem auf 25 cm Abstand akkommodierten Auge die Lupe? Genau soviel nützt die Lupe wirklich einem Auge, dessen Nahepunkt 25 cm vom Auge liegt. Im praktischen Gebrauch stellt der geübte Lupenbenutzer sein Auge aber nie auf den Nahepunkt oder auf 25 cm Abstand ein, sondern auf den Fernpunkt, denn dieser entspricht der Ruhestellung des Auges. Beim normalen Auge, dessen Fernpunkt ja im Unendlichen liegt, ist im praktischen Gebrauch die Lupenvergrößerung also um eine Vergrößerungseinheit geringer, als bei 25 cm Vergleichsabstand gemessen wird. Mindert man dem zuliebe in der Formel die Vergrößerung um eine Einheit, so kommt man für Linsen von mehr als 25 cm Brennweite zu einer Verkleinerung. Das beweist nur, daß diese Behandlung der Formel unzweckmäßig ist.

Für die Empfindung von der vergrößernden Wirkung kommt noch in Betracht, daß es von großer Bedeutung ist, ob man weiß, daß der betrachtete Gegenstand sehr nah dem Auge sich befindet.

Bei der Behandlung des Auges tritt ziemlich regelmäßig die Frage auf, wie es denn zu verstehen sei, daß der Mensch das verkehrte Netzhautbild richtig auf die aufrechten Gegenstände der Umwelt bezieht. Hier muß erläutert werden, daß der Sehvorgang ja an der Netzhaut keineswegs sein Ende erreicht, sondern im Gehirn, wo die Nervenenden räumlich gepackt sind, so daß eine einfache geometrische Beziehung gar nicht mehr besteht, vielmehr die Beziehung zwischen der Ordnung in dieser Registratur und der Außenwelt erst durch die Erfahrung erlernt werden muß. Dem entspricht auch die Erfahrung an solchen Blindgeborenen, die zwar sehtüchtige Augen haben, sie aber wegen einer undurchsichtigen Schicht nicht benutzen können. Es war mehrfach möglich, solche hindernden Schichten durch Operation zu beseitigen. Denen, die nun sehen konnten, war der Anblick von Gegenständen, die sie nach dem Tasten genau kannten, völlig rätselhaft, und sie mußten erst lernen, was er bedeute.

Der Fernpunkt unseres Augenmodells war um Tischlänge von ihm entfernt. Es wird nun gelehrt, daß man als normal ein Auge bezeichnet, dessen Fernpunkt im Unendlichen liegt, und daß man bei jedem endlichen Fernpunktsabstand das Auge kurzsichtig nennt. Unser Augenmodell war also das Modell eines kurzsichtigen Auges. Sogleich wird ein Fall stärkerer Kurzsichtigkeit gezeigt, indem man beide Kopierklammern in ungeändertem gegenseitigen Abstand um einige Zentimeter nach hinten (von der Linse weg) setzt. Ferner wird gelehrt, daß es auch vorkommt, daß beide Akkommodationsgrenzen so sind, daß schon zwischen ihnen Einstellung auf Unendlich erreicht wird, daß ein Teil

der Akkommodation also nutzlos ist, und daß solche Augen übersichtig genannt werden. Stellen wir die beiden Kopierklammern um einige Zentimeter näher an die Linse als beim ersten Aufbau, so erhalten wir ein Akkommodationsgebiet, das in dem uns zur Verfügung stehenden Raum der Tischplatte nicht ausgenutzt werden kann und darum nutzlos ist. Eine Verschiebung von nahezu 3 cm wird ungefähr ausgeglichen durch die schwächste unserer drei Linsen als Brille ( $f = 60$  cm).

Daß bei Übersichtigkeit eine Konvexlinse als Brille anzuwenden ist, liegt nach den Lupenversuchen wohl so nahe, daß die Schüler es leicht selbst finden. Die Abhilfe für die Kurzsichtigkeit durch eine Konkavlinse könnte wohl auch aus dem Bisherigen erschlossen werden, liegt aber für die größtenteils kurzsichtigen Brillenträger in der Klasse als eigene Erfahrung näher. Zum Versuch rückt man die Kopierklammern um ungefähr 3 cm aus der Stellung der ersten Versuche dieses Abschnittes nach hinten und gleicht dies mit einer Konkavlinse von 60 cm Brennweite aus.

Da diese „Brille“ die erste Konkavlinse ist, die bei unseren Versuchen vorkommt, so ist es zweckmäßig, sie nach Abb. 23 als Zerstreuungslinse zu erweisen.

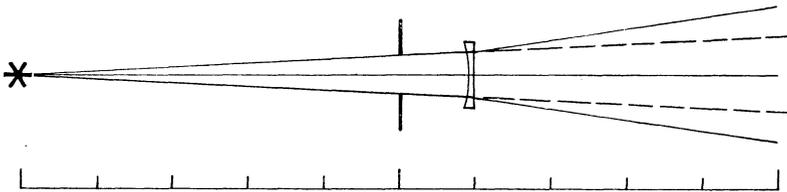


Abb. 23. Zerstreuende Wirkung durch Blende gezeigt.

Die Zeichnung ist der größeren Deutlichkeit wegen für eine doppelt so starke Konkavlinse ausgeführt, die erst viel später gebraucht wird, die aber natürlich auch hier verwendet werden kann, wenn man Wert darauf legt, noch ein zweites, kurzsichtigeres Auge zu zeigen und durch eine Brille zu berichtigen, oder wenn man den Ankauf einer Linse sparen will.

Die volkstümliche Benennung „weitsichtig“ ist durchaus zu vermeiden, weil sie sich zu einer klaren Unterscheidung nicht eignet. Sie wird nie verschwinden, weil sie an den für Berufsarbeit wichtigen Nahepunkt anknüpft.

Wichtig ist ein Eingehen auf die Alterssichtigkeit, die auf dem Nachlassen des Akkommodationsvermögens beruht. Bis zum 50. Lebensjahr rückt im allgemeinen nur der Nahepunkt, der beim 10jährigen Kinde in etwa 7 cm Abstand liegt, bis auf einen halben Meter hinaus. Dann beginnt der Fernpunkt näherzurücken und mit zunehmender Geschwindigkeit wird das Auge für Nähe und Ferne immer weniger brauchbar. Für ursprünglich übersichtige oder kurzsichtige Augen tritt die Alterssichtigkeit auch ein, nur verschieben sich die Zahlenwerte entsprechend.

Brillengläser wurden früher nach der Brennweite in Zollen bestimmt, jetzt gibt man ihre Stärke, d. h. den Kehrwert der Brennweite an. Als Einheit gilt die Dioptrie, das ist der Kehrwert von 1 m oder 40 Zoll Brennweite.

Im Klassenzimmer wird man das Netzhautbild in dem Augenmodell stets allen Schülern zeigen können, indem man das Papierblatt ein wenig um seine senkrechte Mittellinie dreht. Das Papier ist durchscheinend, so daß man von vorn und hinten das Bild betrachten kann. In einem großen Saal stellen sich Schwierigkeiten ein, die man mit einem Spiegel überwindet, der schräg dicht hinter dem Augenmodell aufgestellt wird. Er erhält einen Stiel, mit dem er in einem niedrigen Klemmfuß befestigt werden kann.

Für die physiologische Optik sei auf das Buch von E. PAULI und R. PAULI (Fischer, Jena) hingewiesen, in dem die zum Teil leicht mißlingenden Versuche sehr genau beschrieben sind.

Die Anatomie des Auges wird besser an einer großen Tafel als an einem kleinen Modell erläutert, nur für die Muskeln zur Bewegung des Auges ist ein räumliches Modell erwünscht.

### Gerät zu den Versuchen über Modell des Auges, Brillen.

3 Klemmfüße *C* (oder *A*).

Große arabische Eins aus Glaskugeln, auf Stiel.

Glühlampe in Fassung auf Stiel.

Pappschild (oder Lampengehäuse).

2 Rohrmuffen.

Stab 30—50 cm lang.

2 Kopierklammern.

Papierblatt mit Loch.

Linse 10  $\varnothing$  15 mit oberem Stiel, Linsen 10  $\varnothing$  15, 10  $\varnothing$  30, 10  $\varnothing$  60 plankonvex, 10  $\varnothing$  60 konkav (und 9  $\varnothing$  30 plankonkav) in Fassung auf Stiel.

Blendscheibe mit 6-cm-Loch, auf Stiel.

Punktlicht in Gehäuse mit Stiel.

Widerstand zum Punktlicht.

(Spiegel auf Stiel.)

(Klemmfuß *A*.)

(Abstellklotz.)

(Statt der Klemmfüße sind auch Winkelfüße mit je einem 10 bis 20 cm langen Stiel und Rohrmuffe verwendbar.)

### 4. Vergrößerungsrohre (Fernrohr und Mikroskop).

Beim Keplerschen Fernrohr und dem Mikroskop wird nicht der Gegenstand selbst, sondern sein von einer Linse entworfenes Bild mit der Lupe betrachtet. Daß es im ersten Falle das verkleinerte Bild eines fernen Gegenstandes, im zweiten Falle das vergrößerte Bild eines nahen Gegenstandes ist, welches man mit der Lupe beseht, wird als unterscheidendes Merkmal für die Benennung benutzt. Sachlich ist der Unterschied ziemlich belanglos, schwache Mikroskope zur Betrachtung von Gegenständen, denen man sich nicht beliebig nähern kann, und Fernrohr für kurze Beobachtungsabstände gehen geradezu ineinander über.

Wir werden deshalb unser Modell so aufstellen, daß eine mäßige Verschiebung des Objektivs aus dem Fernrohr ein Mikroskop macht. Auf die besonderen Eigenschaften der starken Mikroskopobjektive einzugehen, hat an dieser Stelle keinen Nutzen.

Die bezifferte Teilung der Abb. 24 deutet an, daß etwa 90 cm von der beleuchteten Glaskugelleins die mittelstarke Plankonvexlinse 10 Ø 30 ihren Platz finden wird und 60 cm weiter das Augenmodell. Will man die schwächste Linse als Objektiv nehmen, so werden diese Abstände etwa 180 und 105 cm, doch wird dann das Netzhautbild des unbewaffneten Augenmodelles unbequem klein.

In der angegebenen Entfernung wird zunächst das Augenmodell aufgestellt und scharf eingestellt. An dieser Stellung und Einstellung wird nachträglich nichts geändert. Dann befestigt man die starke Linse als Lupe vor dem Auge. Die in der Abbildung dargestellte Stellung der Linse, nämlich Krümmung der Augenlinse zugewandt, gibt ein etwas größeres Gesichtsfeld, die umgekehrte

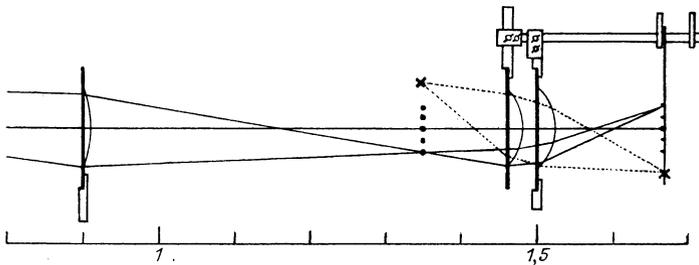


Abb. 24. Modell des KEPLERSchen Fernrohres.

Stellung ist aber nicht viel schlechter, man wird sie sogar vorziehen, wenn man nachher rasch zur Kollektivlinse (Abbildung 25) übergehen will. Darauf wird die Ob-

jektivlinse auf besonderem Fuß an ihren Platz gestellt und verschoben, bis das Netzhautbild wieder scharf ist.

Um nun die Wirkung des Fernrohres recht deutlich zu zeigen, lockert man die Schraube der vorhin als Nase bezeichneten Rohrmuffe, die den wagerechten Stab umfaßt, so daß man die Lupe (das Okular) beiseite klappen kann. Man klappt mit der einen Hand diese Linse und gleichzeitig mit der anderen Hand das Objektiv, es über zwei Füße seines Statives kippend, aus dem Strahlengang und hat nun das Netzhautbild des unbewaffneten Auges und unmittelbar darauf, indem man beide Linsen wieder in den Strahlengang klappt, die Fernrohrwirkung. Gerade, daß man in schnellem Wechsel beides zeigen kann, trägt viel dazu bei, Nutzen und Wirkungsweise des Fernrohres anschaulich zu machen.

Es sei an dieser Stelle nochmals auf den Gedanken der vollständigen optischen Anordnung hingewiesen. Für uns, im einführenden Schulversuch, zerfällt das Fernrohr in die beiden Teile: 1. Gegenstand — Objektivlinse — Bild, 2. Bild — Okularlinse — Augenlinse — Netzhautbild. Wir entgehen dadurch der Notwendigkeit, jetzt schon den Begriff des virtuellen Bildes einzuführen, was wir tun müßten, wenn wir Objektiv und Okular zusammenfassen und vom Auge trennen wollen. Der Nutzen dieses Begriffes kann jetzt noch nicht für uns wirksam werden, seine vorzeitige Einführung wäre unbegründet und störend.

Man kann bei der Erläuterung des Keplerschen Fernrohres auch etwas anders vorgehen. Man stellt zunächst nur die mittelstarke Linse auf und in passendem Abstand dahinter einen bildauffangenden Schirm, der durchscheinend genug ist, damit man das Bild in der Durchsicht betrachten kann. Dieses Bild kann man, statt mit bloßem Auge, auch mit der Lupe ansehen, wobei man als Lupe die starke Linse verwendet. Darauf ersetzt man das Auge durch das Augenmodell, an dem die Lupe, wie wir es sonst gemacht haben, befestigt wird, und nimmt schließlich den Papierschirm weg. Ein Nachteil dieser Art, den Versuch zu entwickeln, ist, daß man das Auge nicht so einstellen kann, daß nach Wegnahme von Objektiv und Okular das unbewaffnete Augenmodell ein scharfes Netzhautbild erhält.

Statt des Papierschirmes zum Auffangen des ersten Bildes kann man auch einen Mullschirm nehmen, dann entsteht schon vor seiner Wegnahme ein sehr helles Netzhautbild im Augenmodell. Ein Mullschirm wird sehr schnell durch Staub grau und unansehnlich. Man muß ihn entweder in einer Schachtel oder Tüte aufbewahren oder den Stoff abnehmbar anbringen, so daß er gewaschen werden kann. Eine Größe von 20 cm im Quadrat genügt.

Im Keplerschen Fernrohr ist es möglich, ein Fadenkreuz oder eine Teilung so anzubringen, daß sie gleichzeitig mit dem Gegenstand sichtbar wird. Es ist nur nötig, diese Marken in der Ebene anzubringen, in der das von der Objektivlinse entworfene reelle Bild liegt. Bei Betrachtung aus der Nähe können die Maschen des Mullschirmes dazu dienen, diese Möglichkeit zu erweisen. Besser aber ist es, sich eines leuchtenden Gegenstandes zu bedienen. In einfacher und eindrucksvoller Weise erreicht man den Zweck, indem man an die in Abb. 24 mit einem Kreuz bezeichnete Stelle ein brennendes Zündholz hält. Seine Flamme bildet sich gleichzeitig mit der Glasperleneins hell und deutlich auf der Netzhaut des Augenmodelles ab.

Rückt man die Objektivlinse aus der in Abb. 24 angegebenen Stellung um etwa 45 cm näher an die Glasperleneins, so ist aus dem Fernrohrmodell ein Mikroskopmodell geworden. Mit einem eingeschobenen Papierblatt zeigt man, daß nun das vergrößerte Bild mit einer Lupe besehen wird.

Es darf nicht unterlassen werden, nun die Schüler die beiden Linsen auch unmittelbar als Fernrohr benutzen zu lassen. Die stärkere wird dicht vors Auge gehalten, die schwächere ungefähr auf Armlänge entfernt. Als Gegenstand dient ein Plakat oder eine großgedruckte Zeitungsseite aus dem Anzeigenteil. Das Mikroskop läßt sich in dieser Art mit den großen Linsen nicht machen, weil die Armlänge nicht ausreicht. Teils aus diesem Grunde, teils auch, um gleichzeitig mehrere Schüler beobachten zu lassen, wird man zu gleichem Zweck Brillengläserpaare von etwa 6 und 12 cm Brennweite ausgeben. Auch die Linsen von 3 und 6 cm Durchmesser, die später (bei der Projektion) gebraucht werden, sind hierfür geeignet. Als Gegenstand für die Mikroskopbetrachtung ist ein aufgeschlagenes Buch geeignet. Es sei auch auf Abb. 8 und 9 meiner *Praxis*

der Linsenoptik<sup>1)</sup> und auf Abb. 217 und 223 in HAHNS *Freihandversuchen*<sup>2)</sup>, Bd. 3, hingewiesen.

Beim Modell des Mikroskopes kann mit Vorteil in derselben Weise, wie es beim Fernrohr angegeben ist, durch Ausklappen von Objektiv und Okular aus dem Strahlengang die Wirkung anschaulich gemacht werden. Ferner ist, wie dort, das brennende Zündholz anwendbar, um den Gebrauch des Okularmikrometers zu erläutern.

Die Bildgüte auf der Netzhaut des Augenmodelles läßt beim Mikroskopmodell sehr zu wünschen übrig, und das Gesichtsfeld erweist sich als unbequem klein. Eine außerordentliche Verbesserung tritt ein, sobald man nach Abb. 25 die Kollektivlinse einschaltet. Man kann sich damit begnügen, den Nutzen der Kollektivlinse zu zeigen, man kann auch mit einem Blatt Papier, das man dicht vor die Okularlinse hält, sowohl in der Aufstellung ohne, wie mit Kollektivlinse, zeigen, daß im zweiten Falle von Okularlinse und Augenlinse nur die Mitteln benutzt sind. Man kann auch noch weitergehen und darauf hinweisen, daß bei der ersten Aufstellung Okular und Augenlinse eine Doppelaufgabe zu leisten

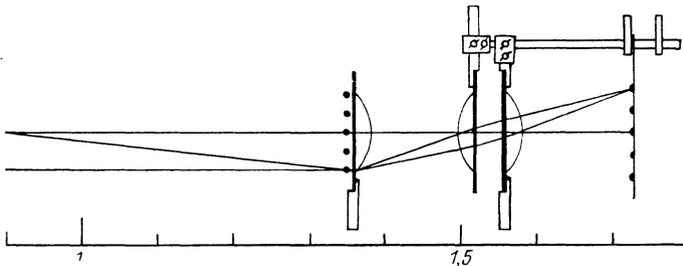


Abb. 25. Okular mit Kollektiv und Auge.

hatten, nämlich eine bedeutende Ablenkung der Strahlen und die Abbildung, während ihnen die erste Aufgabe nun durch die Kollektivlinse abgenommen wird.

Diese Hinweise

greifen Späterem vor, sind aber, kurz genug gefaßt, hier doch schon von Nutzen.

Abb. 25 zeigt die Einrichtung des RAMSDEN-Okulares; man kann in derselben Weise die Einrichtung des HUYGENSSCHEN Okulares zeigen, wenn man eine große Linse von ungefähr 25 cm Brennweite besitzt, etwa die später zu erwähnende Beleuchtungslinse zum Bildwurf vom großen Glasbild.

Die Wirkung der Kollektivlinse besteht darin, daß sie die Objektivlinse auf die Linse des Auges abbildet. Wir haben nun zwei miteinander verflochtene Abbildungsfolgen. Die erste, der wir bisher schon die Aufmerksamkeit zugewandt hatten, umfaßt die Teile: Ding, Objektiv, Bild und Bild, Okularlinse + Augenlinse, Bild. Für die zweite, hier nur aus einer Abbildung bestehenden Folge ist die Objektivlinse der ersten Folge das Ding, und ihr Bild wird an den Ort der Linse oder Linsengruppe der nächsten Teilabbildung der ersten Folge gesetzt. Im Schema ( $D = \text{Ding}$ ,  $B = \text{Bild}$ ,  $L = \text{Linse}$ ):

<sup>1)</sup> Berlin: Gebr. Borntraeger 1910.

<sup>2)</sup> Berlin: Salle 1912.

erste Folge  $D_1 \quad L_1 \quad B_1 \quad L_1 \quad B_1 \quad L_1 \quad B_1$  } usw.  
 zweite Folge  $D_2 \quad L_2 \quad B_2 \quad L_2 \quad B_2 \quad L_2$  }

oder, um das Bild der Verflechtung hervorzuheben, nach Abb. 26.

Verflochtene Abbildungen werden vielfach angewandt. Beleuchtungslinsen müssen in der Regel so eingefügt werden, z. B. beim Bildwerfer. Auch wenn die Abbildung durch enge Öffnungen oder lange Röhren weitergetragen werden muß, bedient man sich verflochtener Abbildung. Beispiele dafür sind die ärztlichen Instrumente zur Besichtigung des Magens und anderer Körperhöhlen.

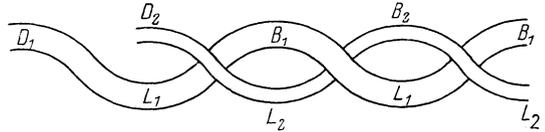


Abb. 26. Schema der verflochtenen Abbildung.

Entspricht die Lage der Linsen nicht genau dem obigen Schema, so ist man genötigt, diese Linsen größer zu nehmen. Ein Beispiel hierfür ist die Kollektivlinse im HUYGENSSchen Okular, die nicht am Bildort, sondern beträchtlich vorher eingeschaltet ist.

Es ist wohl möglich, aber nicht sonderlich lohnend, auch ein Modell des terrestrischen Fernrohres aufzustellen. Ohne Kollektivlinsen kommt man zu recht kümmerlichen Bildern und kleinem Gesichtsfeld. Nur für diesen Versuch mehr Linsen anzuschaffen, als man sonst nötig hat, wird man sich kaum entschließen. Es genügt wohl, wenn man sagt, beim terrestrischen Fernrohr wird das vom Objektiv entworfene Bild mit einem schwachen Mikroskop betrachtet.

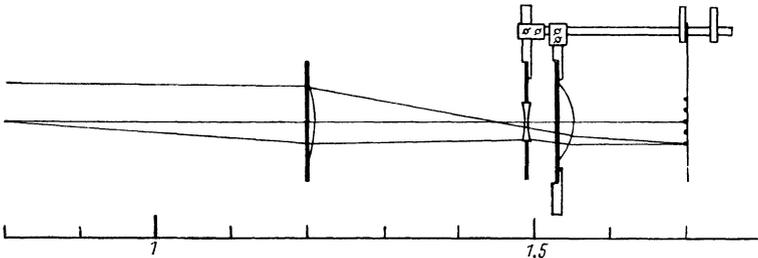


Abb. 27. Modell des holländischen Fernrohres.

Im Anschluß daran läßt man den aus einem Touristenfernrohr ausgeschraubten Okularzug als schwaches Mikroskop benutzen. Man kann auch durch Ausschrauben des in der Regel zweilinsigen Umkehrsystems das terrestrische Fernrohr in ein KEPLERSches umwandeln und die dadurch bewirkte bedeutende Verkürzung des Rohres zeigen.

Das Modell des holländischen Fernrohres wird nach Abb. 27 aufgestellt, und die Wirkung wird wieder durch Ausklappen der Konkavlinse und des Objektivs gezeigt. Die Konkavlinse hat 5 cm Durchmesser und 10 cm Brennweite, das Objektiv ist wieder die mittelstarke Plankonvexlinse 10 Ø 30. Beide Linsen lassen sich auch sehr gut subjektiv als Fernrohr benutzen, was als Ergänzung zu dem abgebildeten Versuch jedenfalls ausgeführt werden sollte.

Daß das holländische Fernrohr gänzlich anders aufzufassen ist als das KEPLERSche, zeigt man zunächst dadurch, daß kein reelles Bild außerhalb des Auges mit einem Papierblatt aufgefangen werden kann. Nach unserer Regel vom vollständigen optischen Aufbau ist demnach auch das Objektiv als zum Auge gehörig anzusehen. Will man das auch im Versuch ausdrücken, so muß man das Modell nach Abb. 28 gestalten. Der Stab und die Linsenteile sind durch Kreuzmuffen miteinander verbunden.

Die Konkavlinse des holländischen Fernrohres schaltet die Wirkung der Augenlinse mehr oder weniger genau aus. Es wird ungefähr die gleiche Wirkung erzielt, wenn man aus dem Augenmodell die Linse herausnimmt, so daß nur das Loch der leeren Fassung bleibt. Ganz etwas Ähnliches ist es, wenn der Augenarzt die getrübbte Linse bei der als grauer Star bezeichneten Augenkrankheit entfernt. Es bleibt zwar noch die Linsenwirkung der Hornhaut, sie reicht aber nicht aus, und es muß eine starke Linse (Starbrille) vorgesetzt werden, damit auf der Netzhaut ein Bild ent-

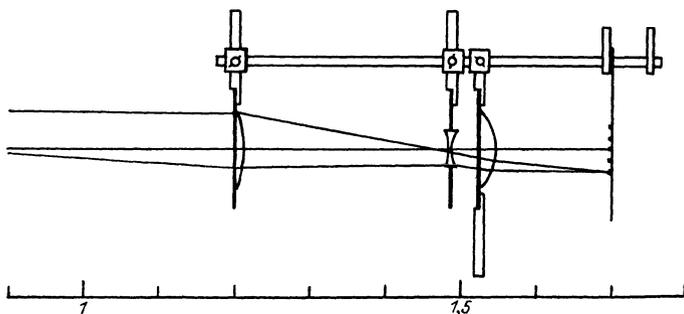


Abb. 28. Holländisches Fernrohr.

steht. Vgl. dazu CZAPSKI, *Grundzüge der Theorie der optischen Instrumente*, 2. Aufl., S. 393, wo dieser zuerst wohl von LANDSBERG gemachte Vorschlag, das holländische Fernrohr mit der Starbrille zu vergleichen, Zustimmung findet.

Die Gesichtsfelder des KEPLERSchen Fernrohres (mit Kollektiv) und des holländischen Fernrohres unterscheiden sich in ganz auffälliger Weise. Beim KEPLERSchen ist die Helligkeit im Gesichtsfeld gleichmäßig, beim holländischen ist ein heller Kreis in der Mitte gleichmäßig, und der breite Rand fällt nach außen hin an Helligkeit ab. Durch eine eigentümliche Täuschung hält man oft die Mitte für weniger hell als die Umgebung. Es ist das eine Täuschung gleicher Art wie die scheinbare Aufhellung der Mitte eines Kernschattens, der von breitem Halbschatten umgeben ist.

Fährt man dicht vor dem Objektiv eines holländischen Fernrohres mit dem Finger oder einem Bleistift entlang, so gleitet ein unscharfer Schatten durch das Gesichtsfeld. Tut man dasselbe beim KEPLERSchen Fernrohr, Abb. 24, so ist kein solcher Schatten bemerkbar, sondern nur eine gleichmäßige Verdunklung des Gesichtsfeldes. Auch in den Aufstellungen nach Abb. 25, 27 und 28 läßt sich das zeigen.

In beiden Erscheinungen kommt der Vorteil zum Ausdruck, den die verflochtene Abbildung für die Lichtführung gewähren kann. Die Abbildung des Objektivs des KEPLERSchen Fernrohres in der Pupille des Auges erlaubt eine völlige Ausnutzung des Objektivs für jeden Punkt des Bildes auf der Netzhaut.

Beim holländischen Fernrohr aber hat das vom Objektiv zu einem Bildpunkt gehende Lichtbündel am Ort der Augenpupille einen Durchmesser, der weit größer als die Pupille ist; für jeden Bildpunkt ist daher ein anderer Teil des Objektivs wirksam. Pupille und Objektivrand sind beim holländischen Fernrohr zwei hintereinanderliegende Durchblicköffnungen, die sich gegenseitig stören. Beim KEPLERSchen Fernrohr dagegen sind sie durch Abbildung mit Hilfe der Kollektivlinse aufeinandergelegt und behindern sich nicht mehr.

#### Gerät zu den Versuchen über Vergrößerungsrohre.

5 Klemmfüße *C* (oder *A*).

Große arabische Eins aus Glaskugeln, auf Stiel.

Glühlampe in Fassung auf Stiel.

Pappschirm (oder Lampengehäuse).

2 Rohrmuffen.

Stab, 30—50 cm lang.

2 Kopierklammern.

Papierblatt mit Loch.

Linse 10  $\varnothing$  15 in Fassung auf Stiel, mit oberem Stiel.

2 Linsen 10  $\varnothing$  15, eine 10  $\varnothing$  30 in Fassung auf Stiel.

Konkavlinse 5  $\varnothing$  10 in Fassung auf Stiel.

Zündhölzer.

(Spiegel auf Stiel.)

(Klemmfuß *A*.)

(Abstellklotz für Linsen.)

(Statt der Klemmfüße sind auch Winkelfüße mit je einem Stiel von 10 bis 20 cm Länge und Rohrmuffe verwendbar.)

#### 5. Bildwerfer.

Beim Bildwerfer handelt es sich um ein Gerät, das nicht nur im optischen Unterricht Gegenstand der Unterweisung, sondern auch im gesamten Schulbetrieb Hilfsmittel der Unterweisung ist. Dieser Umstand gibt Anlaß dazu, eine Reihe von Betrachtungen in diesen Abschnitt einzufügen, die nicht auf den optischen Unterricht berechnet sind, sondern dem Sammlungsverwalter eine Hilfe bieten sollen, Bildwurfteinrichtungen zu beurteilen. Dabei wird sich zeigen, daß die Aufgaben und die Arbeitsbedingungen der verschiedenen Bildwurfteinrichtungen recht verschieden, ja zum Teil widersprechend sind. Schon aus diesem Grunde können die festen Sammelgeräte, in denen alle Bildwurfarten vereinigt sind, nicht den Ansprüchen auf die beste Weise genügen. Für die Schule sind sie weiter ungeeignet wegen ihrer Unübersichtlichkeit und weil sie ihrer Größe und ihres Gewichtes wegen einen festen Platz beanspruchen. Es können aber nicht alle Unterrichtsfächer, die des Bildwurfes bedürfen, sich in ein Zimmer teilen, das läßt schon der Stundenplan nicht zu. Für die experimentellen Fächer sind diese Universalbildwerfer völlig ungeeignet, denn in diesen

Fächern ist das die Hauptsache, was in der Bildwurfeinrichtung steht und was der Lehrer daran tut, dagegen ist das Bild auf dem Schirm nur die Ergänzung. Hier muß also die Bildwurfeinrichtung vor den Schülern stehen und der Schirm seitwärts (vgl. Abb. 16), eine Anordnung, mit der man in Erdkunde und Kunstgeschichte nie zufrieden sein wird. Es bleibt also das allerbeste, statt eines Sammelapparates für die Schule handliche Einzelgeräte anzuschaffen, damit jedes Unterrichtsfach in der ihm am besten dienenden Weise ausgerüstet wird. Dadurch wird die Einrichtung keineswegs verteuert. Denn ein nur einem Zweck dienendes Gerät kann auf viel einfachere Weise zu guter Leistung gebracht werden als eins, das den widersprechendsten Forderungen gleichzeitig einigermaßen genügen soll.

Wenn in diesem Abschnitt eingehender, als es für den optischen Unterricht nötig ist, auf die verschiedenen Projektionsweisen eingegangen wird, so soll doch auf die Beschreibung der verschiedenen Formen der im Handel befindlichen

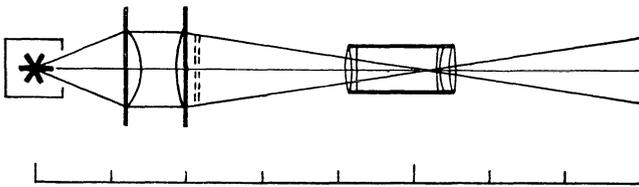


Abb. 29. Bildwurf vom Glasbild mit Petzval-Objektiv.

Bildwurfgeräte völlig verzichtet werden. Es können hier nur die Grundsätze der Anordnung der optisch wirksamen Teile Gegenstand der Betrachtung sein.

Der Bildwerfer für undurchsichtige Gegenstände, das Episkop<sup>1)</sup>, ist im wesentlichen eine Vorrichtung, um den Gegenstand recht hell zu beleuchten, ohne daß er zu heiß wird. Zum Abbilden benutzt man möglichst lichtstarke Objektive. Wenn die Kosten nicht ins ungeheure wachsen sollen, ist man auf mäßige Brennweiten, also auch auf mäßige Schirmabstände angewiesen. Diese unbequeme Bedingung wird also auch jedem Epidiaskop, d. h. jeder Vereinigung von Bildwerfern für Glas- und Papierbilder, unnötigerweise aufgezwungen.

Das Licht geht von dem beleuchteten Gegenstand im Episkop ebenso nach allen Richtungen wie von einem selbstleuchtenden. Diese Art des Bildwurfes entspricht also ganz der Abbildung der Glasperleneins mit Hilfe einer Linse auf einen Schirm. Im Gegensatz dazu könnte man die folgenden Bildwurfweisen, bei denen ein ins gerichtete Licht gestellter Gegenstand abgebildet wird, als Schattenwurf bezeichnen. In der Tat nannte man früher das Gerät dazu ein Skioptikon, was aus dem Griechischen ins Deutsche übertragen Gerät zur Schattenschau heißt.

Den Aufbau des üblichen Bildwerfers für Glasbilder zeigt Abb. 29. Auf die Lichtquelle folgt unsere stärkste Linse von 10 cm Durchmesser und 15 cm Brennweite in solchem Abstand, daß das Licht als ungefähr paralleles Bündel aus ihr austritt. Dann folgt die zweite Beleuchtungslinse, die dem abbildenden Objektiv in der Brennweite ungefähr angepaßt sein muß. Gezeichnet ist die

<sup>1)</sup> M. v. ROHR bemerkt zu dem Wort, daß es im Deutschen schon in der Form „Bischof“ vorkommt; eine Bemerkung, die man auch im Unterricht erwähnen sollte.

mittelstarke Linse  $10 \text{ } \varnothing \text{ } 30$ , sie bildet die Lichtquelle im Objektiv ab. Dicht hinter ihr steht die Vorrichtung zum Halten und Auswechseln der Glasbilder. Als abbildende Linse ist ein PETZVALSches Porträtobjektiv gezeichnet, weil die meisten Bildwerfer mittleren Preises ein solches enthalten (Abb. 30).

Die Linsen, die eben als Beleuchtungslinsen angegeben wurden, sind zu klein für das normale Glasbild für Bildwurf (vgl. Anhang Abbildung 83), sie genügen nur für eine quadratische Fläche von 7 cm Seitenlänge. Dennoch wird man in der Physik im allgemeinen mit dieser Größe auskommen können. Es sei noch erwähnt, daß man auf Gelatine mit einer Nadel leicht Bilder einritzen kann, deren Striche ohne Einfärben auf dem Schirm tiefschwarz erscheinen. Die Gelatineblätter legt man für den Gebrauch zwischen zwei Glasplatten, die durch einen Papier- oder Stoffstreifen aufklappbar zusammengefügt sind. Beim Zeichnen und beim Gebrauch ist die Gelatine vor Fingerspuren zu hüten. Das Durchpausen einer Zeichnung oder graphischen Darstellung auf Gelatine nimmt nur wenige Minuten in Anspruch, es ist unvergleichlich bequemer und besser, als das Zeichnen auf ausfixierten Trockenplatten oder mit Eiweiß überzogenen Glasplatten.

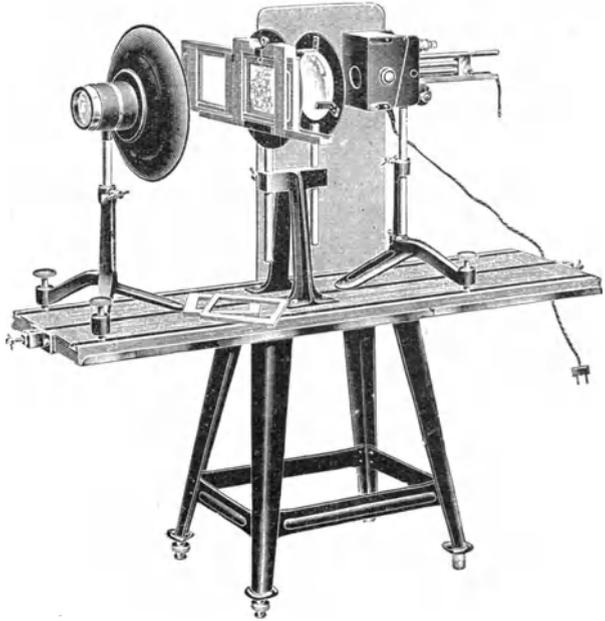


Abb. 30. Bildwurf vom Glasbild mit Petzval-Objektiv.

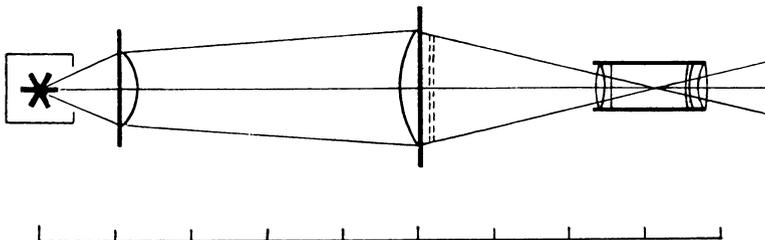


Abb. 31. Bildwerfer für große Glasbilder.

Wünscht man den Bildwerfer für Glasbilder von der Größe  $85 : 100 \text{ mm}$  oder  $90 : 120 \text{ mm}$  einzurichten, so genügt es, die zweite Beleuchtungslinse 115 oder 150 mm groß zu nehmen und in einigen Abstand von der ersten zu stellen, so daß eine mäßige Divergenz des aus der ersten Linse austretenden Lichtes genügt, um die zweite Linse völlig zu beleuchten. Abb. 31 zeigt diese Anord-

nung. Beim geschlossenen Bildwerfer nur für Glasbilder vermeidet man diesen langen Aufbau und nimmt lieber auch die erste Linse in der Größe der zweiten. Bei kleiner Lichtquelle ist es lohnend, die Beleuchtungslinsen durch einen vorgesetzten Meniskus weiter zu verstärken.

Bei einem vorhandenen Bildwerfer kann die Frage gestellt werden, ob er für eine gasgefüllte Lampe höherer Spannung brauchbar ist. Hat man elektrischen Wechselstrom, so ist immer die Herabsetzung der Spannung durch einen Transformator zu bevorzugen, denn erstens ist bei gleicher Wattzahl die Lichtausbeute der Niederspannungslampe und die Lebensdauer bedeutend größer, und zweitens gibt die kleine Lichtquelle der Niederspannungslampe immer ein schärferes Bild als die große Lichtquelle der Lampe für Netzspannung. Bei Gleichstrom steht aber dieses Mittel der Spannungserniedrigung nicht zur Verfügung. Da ist dann die Hauptfrage, wie groß die Lichtquelle sein darf, um noch ganz ausgenutzt zu werden. Um dies zu erfahren, stellt man den Bildwerfer auf und rückt das Objektiv so, daß das Bild auf dem Schirm scharf wird; dann hängt man vor das Objektiv ein weißes Blatt Papier, nimmt die Lampe aus dem Bildwerfer und stellt sie vor das Objektiv,

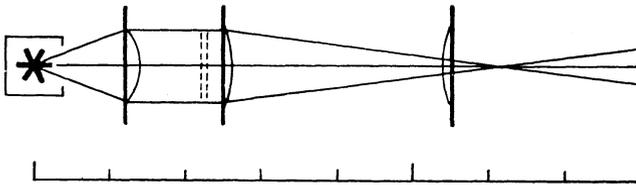


Abb. 32. Bildwurf vom Glasbild mit „Ramsdenokular“.

so daß sie das Papier stark beleuchtet. Nun kann man im Bildwerfer, dort, wo die Lampe hingehört, mit einem Papierstück die Stelle aufsuchen, an der das Licht auf den engsten Raum vereinigt ist. In der

Regel ist das ein recht scharf begrenzter Kreis, nämlich das von den Beleuchtungslinsen entworfene Bild der Objektivblende. Seine Größe gibt das Größtmaß der ausnutzbaren Lichtquelle an. Eine noch größere heizt nur stärker, ohne hellere Bilder zu geben. Dieses Verfahren ist eine Anwendung des Satzes von der Umkehrbarkeit des Lichtweges. Aus diesem Grunde kann es lohnend sein, das Verfahren im Unterricht zu zeigen oder es an einer alten Laterna magica als Übungsaufgabe ausführen zu lassen.

Das Petzvalobjektiv ist immerhin ein teures Stück, dessen Ankauf ein sparsamer Physiklehrer gern vermeidet. Er wird deshalb den Bildwerfer nach Abb. 32 aufbauen. Die zweite Beleuchtungslinse wird umgedreht und tauscht den Platz mit dem Glasbilde. Als abbildende Linse dient eine, die der zweiten Beleuchtungslinse gleich ist und ihr die gewölbte Seite zuwendet. Das Licht wird so geführt, daß es etwas hinter der letzten Linse sich überkreuzt. Auf diese Weise wird mit einfachen Mitteln ein bemerkenswert gutes Bild gewonnen, dessen schmale Farbensäume aus der Entfernung nicht zu sehen sind. Da von der letzten Linse nur ein kleines Stück wirklich gebraucht wird, ist es nicht nötig, daß sie denselben Durchmesser hat wie die andern, es genügt hier ein plankonvexes Brillenglas, dessen Brennweite nahezu mit der der zweiten Beleuchtungslinse übereinstimmt.

Die beiden auf das Glasbild folgenden Linsen bilden zusammen ein Ramsdenokular, denn Art und Stellung der Linsen und Strahlengang sind ebenso. Die gute

Wirkung erklärt sich folgendermaßen: Die beiden Linsen wirken in bezug auf Farbänderer entgegengesetzt. Es wird zwar nicht eine Wiedervereinigung der Farben erreicht, aber sie treten aus der zweiten Linse parallel aus, so daß der Farbensaum nicht breiter wird, als er an der letzten Linse ist, und das ist so schmal, daß man aus einiger Entfernung nichts davon merkt. Die Überkreuzung der Strahlen findet nahe am natürlichen Blendenort statt, von dem später gezeigt werden wird, daß die Strahlen, die sich in ihm überkreuzen, ein sehr flaches, von Astigmatismus freies

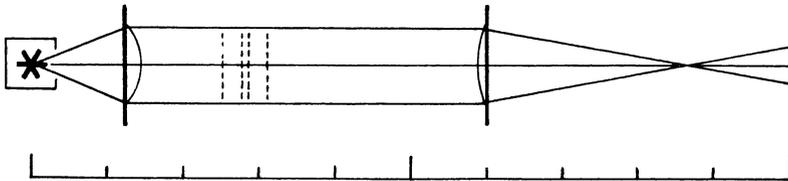


Abb. 33. Bildwerfer für kleine Versuchsgeräte.

Bild liefern. Dieses Bild wird durch die dem Glasbild folgende Linse weiter geebnet. Verfolgt man den Strahlengang genauer, so sieht man, daß die gewölbte Fläche der letzten Linse schwach zerstreudend wirkt. Bei anderer Lichtführung wäre das nicht der Fall.

In der Physik, auch in der Chemie und Biologie, handelt es sich in der Regel nicht um Glasbilder, sondern um kleine Apparate, Vorgänge in Gläsern, Lebewesen oder sonstige Dinge, die nicht nur gezeigt, sondern an denen die Wirkung gewisser Eingriffe beobachtet werden soll. Da ist es denn nötig, daß die Eingriffe selbst auch beobachtet werden, die Bewegungen der Hände des Experimentators und was sonst noch sich ändert. Diese Forderung ist nur zu erfüllen, wenn das Objekt recht frei, weit von allen Linsen entfernt, in der Bildwurfeinrichtung steht. Eine weitere Forderung ist die einer großen Tiefenschärfe; sie ist um so besser erfüllt, je kleiner die Lichtquelle ist. Einen bewährten Aufbau

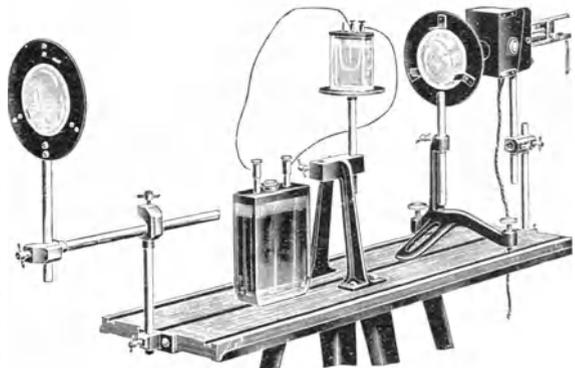


Abb. 34. Aufbau zur Demonstration der Bildung des Saturnbaumes.

zeigen Abb. 33 und 34. Die Linse  $10 \text{ } \varnothing \text{ } 15$  gibt ein angenähert paralleles Lichtbündel. In beliebigem Abstand von ihr steht der durch vier gestrichelte Linien angedeutete Gegenstand, z. B. ein luftiges Drahtknäuel, und im passenden Abstand folgt die Linse  $10 \text{ } \varnothing \text{ } 30$ . Der Unkundige ist erstaunt, daß mit einer unabgeblendeten Plankonvexlinse, deren Durchmesser ein Drittel der Brennweite ist, ein so scharfes Bild und eine Tiefenschärfe, die sich auf etwa 6 cm im Gegenstand erstreckt, erzielt wird. Tatsächlich geschieht die Abbildung aber mit sehr kleiner Blende. Die Strahlen durchkreuzen sich nämlich ungefähr 30 cm hinter

der abbildenden Linse in einem Bild der Lichtquelle. Wenn dieses auch zweimal so groß ist als die Lichtquelle selbst, so bleibt es, wenn diese klein genug ist, immer noch sehr klein im Verhältnis zur Brennweite der abbildenden Linse. Sein Rand stellt die wirksame Blende dar, und man kann, ohne daß sich an der Abbildung etwas ändert, hierher eine Pappe mit einem Loch dieser Größe stellen. Die weit vorgeschobene Vorderblende bewirkt natürlich, da sie im Sinne der Lichtrichtung Hinterblende ist, eine kissenförmige Verzeichnung; da der Durchmesser des Gegenstandes aber viel kleiner als die Brennweite ist, macht sie sich nicht störend bemerkbar. Bei Abb. 34 ist die Linse  $10 \text{ } \varnothing \text{ } 60$  benutzt.

Beim Bildwurf in der eben beschriebenen Art genügt immer eine 12- bis 15fache Vergrößerung, so daß man im unverdunkelten Zimmer mit einer Lichtquelle von 300 bis 1000 Kerzen sehr bequem auskommt, wenn die Anordnung nach Abb. 16 auf S. 17 getroffen ist. Es wird nur das am Experimentiertisch liegende Fenster verdunkelt, allenfalls am folgenden mit einem leichten Sonnenvorhang das Licht gedämpft. Hat man nur die kleinere Wechselstrompunktlichtlampe, so kann man

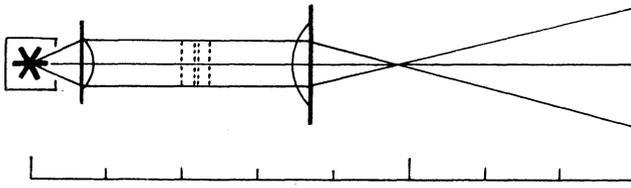


Abb. 35. Bildwerfer für sehr kleine Versuchsanordnungen.

die erste Beleuchtungslinse durch Zufügen einer Meniskuslinse verstärken.

Daran, daß die Bilder umgekehrt sind, gewöhnen sich die Schüler sehr schnell. Es gibt aber auch viele Fälle, in denen man

des Bildwurfes mit Linsen gar nicht bedarf, sondern mit den scharfen Schatten auskommen kann, welche die 100kerzige Punktlichtlampe wirft. Ein Elektroskop, eine kleine Apothekerwaage, sogar eine auf Glas gezeichnete Millimeterskala lassen sich so recht gut zeigen.

Sind die Gegenstände etwa halb so groß als der Durchmesser des parallelen Lichtbündels in Abb. 33, so wird die ganze Einrichtung einfach in kleinerem Maßstabe hergerichtet, wie Abb. 35 das zeigt. Als Beleuchtungslinse ist eine Plankonvexlinse von 6 cm Durchmesser und 9 cm Brennweite genommen, und die Linse  $10 \text{ } \varnothing \text{ } 15$ , die vorher Beleuchtungslinse war, dient nun als abbildende Linse. Von ihr wird nur der mittlere Teil in Anspruch genommen. Sie steht weit genug vom Gegenstand entfernt, um für keinen Zuschauer etwas zu verdecken, es ist daher nicht nötig, eine kleinere Linse derselben Brennweite anzuschaffen, die sich natürlich zierlicher ausnehmen würde.

Es ist ratsam, diese Projektion auch einmal mit zwei wassergefüllten Stehkolben oder Rundkolben auszuführen. Der kleinere dient als Beleuchtungslinse, der größere als abbildende Linse. Drahtkörper von 3 cm Seitenlänge zu PLATEAUS Seifenhautversuchen lassen sich so recht gut zeigen.

Für noch kleinere Gegenstände, z. B. TRAUBESCHE Zellen, kleine Wassertiere, geht man in der Verkleinerung des Gerätes noch weiter und verwendet, wie Abb. 36 zeigt, eine Linse  $3 \text{ } \varnothing \text{ } 4,5$  als Beleuchtungslinse und die Beleuchtungslinse  $6 \text{ } \varnothing \text{ } 9$  der vorigen Anordnung oder ein plankonvexes Brillenglas von

10 bis 12 Dioptrien als abbildende Linse. Man braucht nicht zu befürchten, daß die kleine der Lampe nahe stehende Linse durch die Hitze gesprengt wird. Ich benutze seit 25 Jahren solche Linsen  $3 \text{ } \varnothing \text{ } 4,5$  vor einer Gleichstrombogenlampe von 5 Amp., und mir ist noch nie eine Linse geplatzt. Zur Vorsicht achte ich darauf, daß die Linsen locker in der Fassung sitzen und darin ein wenig klappern.

Mit der eben beschriebenen Einrichtung erhält man bereits eine 50fache Vergrößerung, ohne daß man genötigt wäre, das Zimmer zu verdunkeln. Es ist einfach dieselbe Lichtmenge wie zuvor zur Beleuchtung eines kleineren Feldes verwendet worden. Ferner ist der Aufbau einfach und übersichtlich geblieben. Es ist ein schwerer Mangel der Universalprojektionsapparate, daß man das große Lampenhaus und die großen Beleuchtungslinsen nicht loswerden kann. Kleine Apparate kommen dabei in den zusammenlaufenden Lichtkegel dicht an die Beleuchtungslinsen, so daß sie völlig verdeckt sind, und es fehlt an jeder Möglichkeit, übersichtlich aufzustellen und sich verschiedenen Aufgaben anzupassen. Man ist stehen geblieben bei dem, was zu den Zeiten des alten Skioptikons mit Petroleumlampe das einzig mögliche war. Jene großflächigen Lichtquellen erlaubten noch nicht die übersichtlichen Anordnungen unserer Abb. 33 bis 36, erlaubten nicht die Anwendung kleiner Beleuchtungslinsen und langbrennweitiger Abbildungslinsen. Im Skioptikon waren die damaligen Hilfsmittel auf das vollkommenste ausgenutzt. Wenn man aber jetzt bei derselben Anordnung stehenbleibt, so ist das ein gedankenloses Nachahmen oder ein Beweis

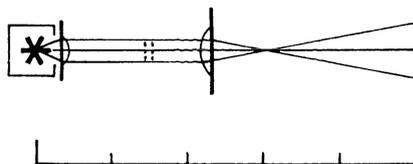


Abb. 36. Bildwerfer für kleinste Versuchsanordnungen.

für mangelnde Einsicht. Beim Nichtphysiker kann man diese Einsicht nicht verlangen, und er wird immer wieder durch geschickte Vorführung eines Universalprojektionsapparates sich täuschen lassen. Für den Physiker ist dann oft die einzige Rettung, daß er erklären kann: Ich bin an der Projektionseinrichtung nicht interessiert, ich mache, was ich nötig habe, mit meinen Linsen für die Linsenoptik. Damit entgeht er dann wenigstens den beiden Belästigungen, daß ihm das Ungeheuer in sein Unterrichtszimmer gesetzt wird und daß er für die andern das Gerät, das er selbst nicht brauchen kann, in Ordnung halten muß. Das ist aber das Verhalten des Physikers im äußersten Notfall; zuvor wird er versuchen, die anderen Lehrer davon zu überzeugen, daß bescheidene Einzelbildwerfer für jedes Fach besser sind als ein anspruchsvolles Sammelgerät, dessen Universalität auf die Dauer darin besteht, daß es alle ärgert, die es benutzen wollen.

Wenn man über die 50fache Vergrößerung hinausgehen muß, etwa, um ein grobes Beugungsgitter vor den Schülern auszumessen oder ein Kapillarrohr, oder um einen Wasserfloh zu zeigen, so daß die Bewegung des Herzens zu sehen ist, kommt man mit dem Verfahren, das wir nun dreimal angewendet haben, nicht mehr zurecht. Eine wesentlich größere Annäherung der Beleuchtungslinse an die Lichtquelle ist nicht mehr möglich; ein kleiner Umweg aber führt zum Ziel. Abb. 37 zeigt die Beleuchtungslinse  $3 \text{ } \varnothing \text{ } 4,5$  in solcher Stellung, daß die Lichtquelle in 20 bis 25 cm Entfernung abgebildet wird. Hier steht eine Linse, die ein verkleinertes Bild der Beleuchtungslinse auf das abzubildende Objekt

wirft. Mit der Brennweite dieser Linse hat man es ganz in der Gewalt, wie groß das beleuchtete Feld sein soll. Die Abbildung, die im doppelten Maßstab der vorigen gehalten ist, zeigt ein beleuchtetes Feld von etwa 13 mm Durchmesser, das mit einem Ramsdenokular von 24 mm Brennweite abgebildet wird. Hiermit kann im unverdunkelten Zimmer mit 5-Amp.-Bogenlampe eine 120fache oder im verdunkelten Zimmer mit der Punktlichtlampe eine 250fache Vergrößerung erzielt werden. Dieses Verfahren gibt noch bei 10 mm Brennweite des Ramsdenokulares und 3 mm Gesichtsfeld gute Ergebnisse. Im verdunkelten Zimmer mit Bogenlampe kann man bis zu 500facher Vergrößerung gehen. Das Bild bleibt, aus der Nähe gesehen, an Schärfe hinter dem zurück, das ein Mikroskopobjektiv liefert, hat aber größere Tiefenschärfe und größeres brauchbares Gesichtsfeld. Ein auf den Strahlengang der Abb. 37 gegründetes handliches Projektionsmikroskop mit auswechselbaren Vergrößerungen wird vom Mechaniker L. Preuschoff, Berlin S 42, Luisenufer 11, gebaut.

Die Leistungsfähigkeit der Mikroprojektion wird in der Regel sehr überschätzt. Das aus durchschnittlich 5 m Entfernung angesehene Projektionsbild ist zu ver-

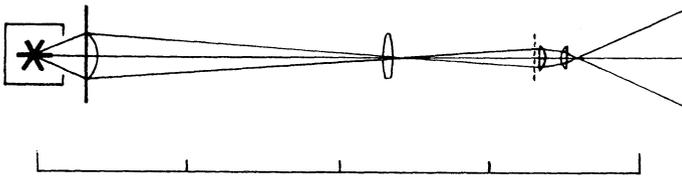


Abb. 37. Mikroprojektion.

gleichenen mit dem auf 25 cm Abstand bezogenen Bild beim Blick ins Mikroskop. Eine 400fache Vergrößerung auf dem Schirm zeigt also dasselbe, wie eine 20fache

Vergrößerung beim Blick ins Mikroskop. Dafür würde man bei subjektiver Beobachtung ein Objektiv von 30 mm Brennweite und der numerischen Apertur 0,1 anwenden, dessen brauchbares Gesichtsfeld etwa 5 mm groß ist. Die Beleuchtung geschehe ganz in der Weise der Abb. 37 mit einer Linse, die 6 cm entfernt ist. Zur wirksamen Beleuchtung eines jeden Bildfeldpunktes kann nur ein 12 mm großes Stück dieser Linse dienen, denn dann hat der beleuchtende Lichtkegel gerade die Apertur 0,1. Was darüber wäre, würde die Fassung, aber nicht mehr die Linse des Objektivs treffen. 12 mm groß kann also auch das Bild der Lichtquelle sein, das auf dieser Linse entworfen wird, was darüber ist, wird nicht ausgenutzt. Die Beleuchtungslinse  $3 \text{ } \varnothing \text{ } 4,5$  ist 6mal so groß als das 5 mm große Bild von ihr, sie steht also 36 cm von der angenommenen Zwischenlinse entfernt. Die Lichtquelle steht 4,5 cm von der Beleuchtungslinse, ihr 12 mm großes Bild 36 cm von derselben Linse. Das Bild ist also 8fach vergrößert und gehört zu einer 1,5 mm großen Kraterfläche der Lampe. Eine solche Fläche gibt bei einer guten Bogenlampe 200 Kerzen, und diese vermögen, in dem von der ersten Beleuchtungslinse bestimmten Winkelraum ausgenutzt, ein Feld auf dem Schirm von 1,8 m Durchmesser mit 30 Lux zu beleuchten, wenn man die Lichtverluste auf den Linsenflächen auf ein knappes Drittel veranschlagt. (Zu fast demselben Ergebnis kommt man, wenn man die Rechnung für ein Objektiv von 5 mm Brennweite, 0,67 mm Gesichtsfeld und der numerischen Apertur 0,75 durchführt. Für stärkere Objektive wird es ungünstiger, weil das brauchbare Gesichtsfeld schneller abfällt.) Die Vergrößerung des 5 mm großen

Feldes ist also 360fach, entsprechend einer 18fachen bei subjektiver Beobachtung, während man das angewandte Objektiv, allerdings in kleinerem Gesichtsfeld, mit stärkeren Okularen subjektiv bis zur 56fachen Vergrößerung benutzt. Man kann also in der Projektion, weil unsere Lichtquellen nicht genügende Flächenhelligkeit haben, nicht annähernd das erreichen, was die subjektive Beobachtung bietet. Nun wäre es an sich möglich, für die Projektion die Objektive in größeren Dimensionen zu bauen und dadurch dieselben Gesichtsfelder, die jetzt mit kleiner Apertur gezeichnet werden, mit großer Apertur und daher mit gesteigerter Helligkeit abzubilden. Dabei würde aber die Tiefenschärfe sehr abnehmen, und die befriedigt jetzt schon nicht bei der Projektion. Bei subjektiver Beobachtung kann man durch Gebrauch der Feinstellschraube die verschiedenen Schichten nacheinander absuchen, bei der Projektion ist dieses Verfahren doch nur sehr beschränkt anwendbar und wird als unzulänglich empfunden. Eine Einbuße an Tiefenschärfe ist also nicht erträglich. Ausgesucht dünne, stark gefärbte Präparate sind geeignet, über den Wert der Projektion mit starken Objektiven zu täuschen.

### Gerät zu den Versuchen über Bildwerfer.

5 Klemmfüße *C* (oder *A*).

Bogenlampe in Gehäuse<sup>1)</sup>.

Widerstand zur Bogenlampe<sup>1)</sup>.

2 Linsen 10  $\varnothing$  15 in Fassung auf Stiel.

Bildhalter.

Projektionsobjektiv auf Stiel.

Bildschirm, stehend oder hangend.

Linse 10  $\varnothing$  30, in Fassung auf Stiel.

Zweite Linse 10  $\varnothing$  30 oder dritte Linse 10  $\varnothing$  15.

Tischchen auf Stiel.

Linsen 6  $\varnothing$  9 und 3  $\varnothing$  4,5 in Fassung auf Stiel.

Ramsden-Okular in Halter.

Präparatenklemme.

(Linse 11,5  $\varnothing$  22 mit Bildhalter.)

(Projektionsbank, dann 2 Klemmfüße weniger.)

(Abstellklotz für Linsen.)

## 6. Das virtuelle Bild.

Bei den bisherigen Versuchen und Veranschaulichungen haben wir auf eine vollständige optische Anordnung Wert gelegt. Wir verstanden darunter die Zusammenfassung alles dessen zu einer nicht zu teilenden Einheit, was zwischen dem Ding und seinem reellen Bild oder zwischen zwei aufeinanderfolgenden reellen Bildern desselben Dinges liegt. Demgemäß betrachteten wir Lupe, Brille und Okular als eine Ergänzung, ja geradezu als einen Teil des Auges, und deshalb sahen wir auch einen Versuch, der nicht zu einem reellen Bilde führte, als erfolglos an und erklärten, daß unter diesen Umständen die Linse kein Bild zu

<sup>1)</sup> Bei Wechselstrom Punktlicht mit Widerstand und Gehäuse.

geben vermag. Dieser Standpunkt, der für die Einführung in das Verständnis der optischen Instrumente gewiß der rechte ist, wird aber unter Umständen doch unbequem. Für den Hersteller von Lupen, Mikroskopen und Fernrohren ist es offenbar ein unnützer Zeitaufwand, jedesmal von neuem den Gang des Lichtes im Auge mit durchzudenken, und er wird nach einer vereinfachenden Auffassung suchen. Der Berechner ist gar in der unangenehmen Lage, daß er weder die optischen Eigenschaften der durchsichtigen Baustoffe des Auges, noch die Gestalt der Grenzflächen mit der Genauigkeit angeben kann, die bei seinen übrigen Rechnungen selbstverständlich ist.

Für den optischen Rechner ist die Lage sogar noch ungünstiger. Sieht man von einigen zusammenfassenden Formeln ab, die für den ersten Entwurf von Nutzen sind, so kann der Rechner überhaupt nicht das zusammenfassen, was wir eine vollständige Anordnung genannt haben. Er muß vielmehr an jeder Grenzfläche zweier durchsichtiger Stoffe haltmachen und mit Berechnungen, die eine ganze Seite füllen, die neuen Wege des Lichtes aufsuchen. Die Richtung dieser Wege bezeichnet er am bequemsten durch die Angabe des Punktes, an dem sie sich schneiden. Liegt der Schnittpunkt in der Richtung voraus, so stimmt er überein mit dem, was wir das Bild nannten. Dem Mathematiker macht es aber auch nichts aus, die Strahlen rückwärts zu verfolgen. In seiner Rechnung wird das durch ein negatives Vorzeichen ausgedrückt und der Unterschied ist für ihn so geringfügig, daß ihm gar kein Bedenken kommen kann, auch den rückwärts verfolgten Schnittpunkt ein Bild zu nennen. Der Zusatz virtuell genügt für ihn vollkommen, um eine Verwechslung mit dem eigentlichen Bild zu vermeiden. Das negative Vorzeichen oder (wenn er statt in Formeln einmal in Worten spricht) der Ausdruck „virtuelles Bild“ ist dem Rechner eine Abkürzung für den langen Satz, der das Ergebnis einer Seite Rechnungen zusammenfaßt: „Das Licht geht von dieser Fläche ab so, als ob es von den errechneten Punkten her käme.“

Für den, der seine ersten Erfahrungen auf diesem Gebiet zu einer klaren Übersicht ausbauen will, ist der Schein, die Unwirklichkeit nicht stark genug ausgedrückt. Was er zu sehen meint, z. B. in einem ebenen Spiegel, das liegt dort, wo er seiner Erfahrung nach das Ding zu suchen hat; wenn er aber dort nachsucht, so ist nichts zu finden. Diesem Erlebnis entspricht der Ausdruck „vorgetäushtes Ding“ besser als „virtuelles Bild“.

Sprachlich bezeichnet „Bild“ wohl vor allem im Gegensatz zum Ursprünglichen das Nachgebildete, wobei zuerst an Nachbilden aus Ton und anderen Stoffen, dann erst an Nachzeichnen zu denken ist. Für das Spiegelbild, das ruhige Wasserlachen dem Menschen ja seit Urzeiten gezeigt haben, benutzt die alte Tierfabel das jetzt fast vergessene Wort „Schemen“, das vom griechischen Skia = Schatten sich ableiten soll. Unserem Bedarf an unterscheidenden Worten genügt die Sprache nicht, wenn sie nur zwei Ausdrücke: Ding und Bild, zur Verfügung stellt. Wir haben drei Stufen zu unterscheiden: 1. das Ding, dessen Vorhandensein durch Auge und Tastgefühl feststellbar ist; 2. das reelle Bild, dessen Vorhandensein durch Auge und photographische Platte erwiesen wird; und 3. das vorgetäuschte Ding, das an seinem Orte eben nicht vorhanden ist. Immerhin ist auch dieses Unwirkliche nicht bedeutungslos, es kann geometrisch erschlossen und sein Sinn in einem Bedingungs-satz ausgedrückt werden. Durch bloße Negation wird man ihm nicht gerecht.

Sowenig hiernach der Begriff des virtuellen Bildes der Erfahrungsphysik angehört, man ist doch imstande, durch den Versuch einen Weg zu gehen, der dem Gedankengang des Rechners nahe verwandt ist. Auch im Versuch kann man das Licht rückwärts verfolgen, wenn man von der Umkehrbarkeit des Lichtweges Gebrauch macht. Ganz leicht für das Verständnis ist der Versuch freilich nicht, und er veranschaulicht wohl mehr die Berechtigung des Rechners zu seinem Verfahren, als das Zustandekommen der Vorstellung, daß dort, wo in Wirklichkeit nichts ist, etwas zu suchen sei. Abb. 38 gibt Anleitung zu diesem Versuch. Vor das für etwa 0,75 m Dingabstand eingestellte Augenmodell setzt man die Linse 10  $\varnothing$  30, an deren Stiel ein Stab angebracht ist, der eine kleine Glaskugel-Eins und ein Lämpchen trägt. Diese Stücke sind in der Abbildung nur mit Punkten gezeichnet. Die Abstände auf diesem Stab sind so abgepaßt, daß auf der Netzhaut des Augenmodelles ein scharfes Bild entsteht. Die Einstellung des Auges auf geringen Dingabstand darf nicht etwa geändert werden, um das Bild scharf zu bekommen. Hinter die Netzhaut stellt man eine

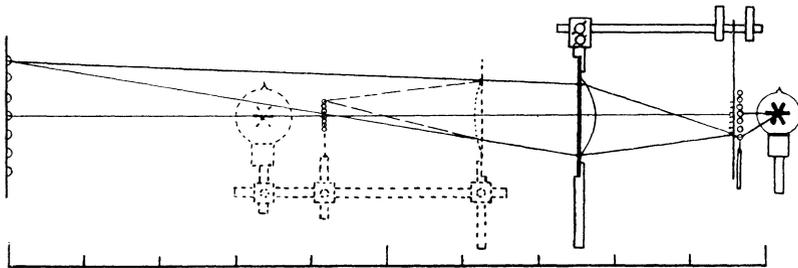


Abb. 38. Virtuelles Bild, durch Umkehrung des Lichtweges erläutert.

Glaskugel-Eins, die man, wenn genaue Übereinstimmung wichtig erscheint, genau zum Netzhautbild passend anfertigt. Sie steht natürlich auf dem Kopf. Die Lampe zu ihrer Beleuchtung bleibt vorläufig dunkel. Bis jetzt handelt es sich um den schon bekannten Fall, daß das Auge mit einer Lupe ein nahes kleines Ding betrachtet. Nun soll der Lichtweg rückwärts verfolgt werden, und zwar durch die Linse des Auges hindurch, aber nicht mehr durch die Linse 10  $\varnothing$  30 hindurch, sondern so, als ob dort Luft wäre. Im Versuch läßt sich das nur so machen, daß man da wirklich Luft schafft, d. h. die Linse und alles, was an ihr befestigt ist, wegnimmt (aber noch ist es dafür zu früh). Der Mathematiker ist in der glücklicheren Lage, daß er einfach von dem Vorhandenen abstrahieren kann und nur ein Vorzeichen umzudrehen braucht. Zunächst wird die Lampe hinter der auf dem Kopf stehenden Eins hell gemacht und gezeigt, daß sie Lichtpünktchen auf dem als Netzhaut dienenden Papier aufleuchten läßt. Nun nimmt man alles, was in der Abbildung in Punkten gezeichnet ist, weg, nimmt auch die lichtverschluckende Netzhaut weg, indem man sie abreißt oder nach oben schwenkt und über die Klammern legt. Dann nimmt man ein Blatt Papier und sucht damit das Bild auf, das man etwa 75 cm vor dem Augenmodell findet. Nun erinnern wir uns wieder dessen, daß wir einen umgekehrten Lichtweg ver-

folgt haben, also Bild nennen müssen, was jetzt Ding ist, und Ding nennen müssen, was jetzt Bild ist. Da, wo wir jetzt ein Bild gefunden haben, glaubte also das Auge einen Gegenstand zu sehen, der in Wirklichkeit gar nicht da war. Dieses ist das virtuelle Bild, das die weggenommene Linse von dem weggenommenen Ding entworfen hatte.

Es läßt sich wohl nicht bestreiten, daß das, was der Rechner in der einfachsten Weise durchführen kann, in der Nachbildung durch den Versuch ein recht verwickelter Denkvorgang wird. Deshalb soll diese Form der Darstellung nicht auf andere Fälle ausgedehnt werden. Wir weichen vielmehr nun vom Wege des Rechners völlig ab und folgen einem anderen Leitgedanken: Wenn auf verschiedene Weise das gleiche Bild auf der Netzhaut erzeugt werden kann, so wird, wenn nicht besonderer Anlaß zum Mißtrauen da ist, der Beobachter auf Grund früherer Erfahrung annehmen, daß das Bild auf die ihm gewohnte Weise entstanden ist. Der Beobachter wird also getäuscht, weil er die Vieldeutigkeit des Netzhautbildes nicht kennt oder nicht beachtet.

Abb. 39 ist absichtlich möglichst übereinstimmend mit der vorhergehenden gezeichnet, um den Gegensatz der beiden Verfahren, von denen das erste auf

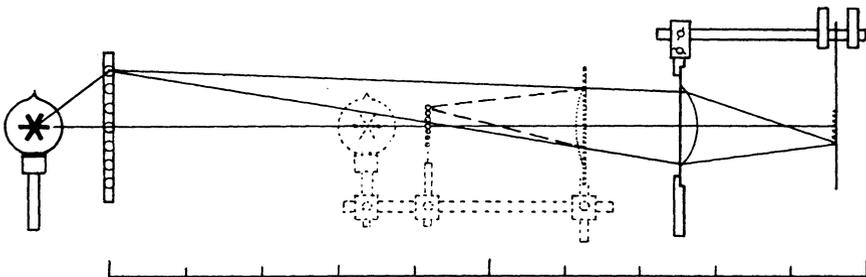


Abb. 39. Virtuelles Bild durch Mehrdeutigkeit des Netzhautbildes erläutert.

dem geometrischen Prinzip der Umkehrbarkeit des Lichtweges, das zweite auf der Unsicherheit des Urteils wegen der Vieldeutigkeit des Bildes beruht, recht hervortreten zu lassen. Der erste Teil des Versuches ist so, wie zuvor. Das Augenmodell betrachtet ein kleines Ding mit Hilfe der Lupe  $10 \times 30$ . Nun wird die Lupe mit allem, was daran befestigt ist, beiseite gesetzt und eine große Glaskugel-Eins nebst zugehöriger Lampe so aufgestellt, daß auf der Netzhaut ein scharfes Bild davon entsteht. Wir haben nacheinander gleiche Netzhautbilder erhalten von einem kleinen Ding mit einer Lupe und von einem großen Ding mit unbewaffnetem Auge. Der letzte Fall ist uns geläufiger, deshalb glauben wir auch im ersten Falle einen großen und weiter entfernten Gegenstand zu sehen. Statt nun zuzugeben, daß wir uns getäuscht haben, behaupten wir, es sei doch etwas da, und zwar gerade dort, wo wir es vergeblich gesucht haben; zwar kein Ding, aber doch ein Bild, auch kein wirkliches Bild, sondern nur eins, das da sein könnte, ein virtuelles Bild. Das ist eine Abwehr gegen das Bewußtsein der Vieldeutigkeit, denn wenn wir diese als Regel gelten lassen, verlieren wir das Zutrauen zu unseren Beobachtungen. Die vorliegende Darstellung ist im Gegensatz hierzu und betont die Vieldeutigkeit.

Dasselbe, was Abb. 39 uns bietet, leistet Abb. 40 in bequemerer Form. Dadurch, daß die Lupe klein genommen ist, kann man gleichzeitig ein Ding durch die Lupe und Augenlinse, und ein Ding an anderer Stelle durch die Augenlinse allein abbilden. Als Augenlinse dient, wie schon früher, die Linse  $10 \times 15$  mit oberem Stiel, als Lupe die Plankonvexlinse  $6 \times 9$ , die als Beleuchtungslinse oder abbildende Linse bei der Projektion kleiner Gegenstände oft gebraucht wird, als Ding eine kleine Glühlampe von 4 Volt 1 Amp., etwa in der Form der Abb. 8. Das Ding für die Abbildung durch die Augenlinse allein ist durch ein Kreuz angedeutet, es kann aus einem brennenden Streichholz oder einem zweiten Glühlämpchen bestehen. Man bewegt es, bis man den Abstand gefunden hat, bei dem sein Bild auf der Netzhaut scharf ist. Aus dem Netzhautbilde allein kann nicht erschlossen werden, ob es einem

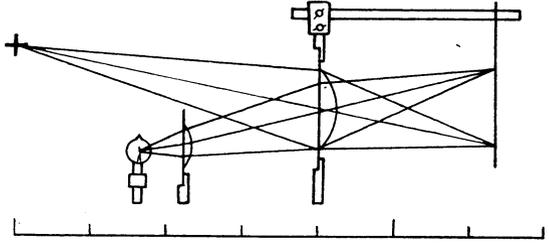


Abb. 40. Virtuelles Bild an der Sammellinse.

unmittelbar oder einem durch Lupe besehenen Ding zugehört, die Lupe bewirkt also, daß man statt des hinter ihr liegenden Dinges ein größeres in der durch das Kreuz angegebenen Entfernung zu sehen meint, sie wirkt als Vergrößerungsglas.

In derselben Weise kann die Wirkung einer Zerstreuungslinse gezeigt werden. In Abb. 41 ist die Plankonkavlinse  $9 \times 30$  benutzt, die später zur Hebung der sphärischen Abweichung dienen wird. Sie eignet sich gut für diesen Versuch, weil ihre schmale Fassung nicht unnötig viel verdeckt. Ein Brillenglas von 20–30 cm negativer Brennweite ist aber in Ermangelung dieser Linse auch gut zu brauchen. Das Augenmodell ist sehr lang angenommen, um zu einer übersichtlichen Zeichnung zu gelangen. Will man dies, nämlich daß es ein kurzsichtiges Auge darstellt, vermeiden, so wird der Aufbau länger. Die Wirkung der Linse ist, daß man einen kleineren und näheren Gegenstand zu sehen meint. Die Zerstreuungslinse wirkt also als Verkleinerungslinse.

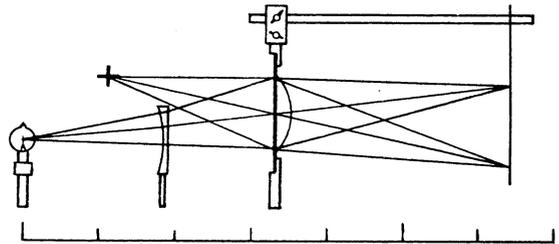


Abb. 41. Virtuelles Bild an der Zerstreuungslinse.

Sehr einfach und übersichtlich wird die Darstellung der virtuellen Bilder an Spiegeln, wenn man unbelegte, also durchsichtige Gläser anwendet. Abb. 42 zeigt die Wirkung des ebenen Spiegels im Aufriß. Es sind zwei gleiche Glasperlensinsen aufgestellt; die hinter dem Spiegel aber seitenverkehrt. Man läßt abwechselnd die eine und die andere Eins leuchten und zeigt, daß sie beide dasselbe Bild auf der Netzhaut geben. Der Beobachter, den wir uns zu dem Auge zu denken haben, ist außerstande zu unterscheiden, welcher von beiden Fällen

zutritt und nimmt deshalb in beiden Fällen an, das Ding liege gerade vor ihm, dort, wo die seitenverkehrte Eins steht.

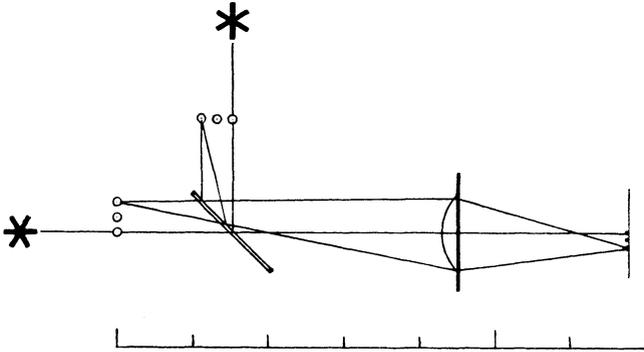


Abb. 42. Virtuelles Bild am ebenen Spiegel.

Als gewölbter Spiegel dient in Abb. 43 ein sogenanntes Uhrglas. Der Durchmesser ist gleichgültig, eine schwache Wölbung ist einer starken vorzuziehen.

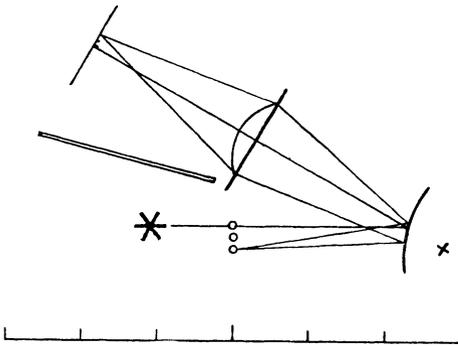


Abb. 43. Virtuelles Bild am gewölbten Spiegel.

Für die Zeichnungen ist 12 cm Durchmesser und 15 cm Halbmesser der Krümmung angesetzt worden, weil ein solches Glas sich bei den Versuchen recht brauchbar erwies. Als Ding diente die Glaskugel-Eins, das Kreuz bezeichnet wieder die Stelle, an die das zweite Ding, das Zündholz, zu bringen ist. Auch diese Abbildung zeigt den Aufriß der Versuchsanordnung.

Dasselbe Uhrglas dient für den Hohlspiegelversuch, der nach Abb. 44 aufgestellt wird. Als Ding dient hier das kleine Lämpchen, Abb. 8; es wird gegen die Linse durch einen schmalen Pappstreifen abgeblendet und steht

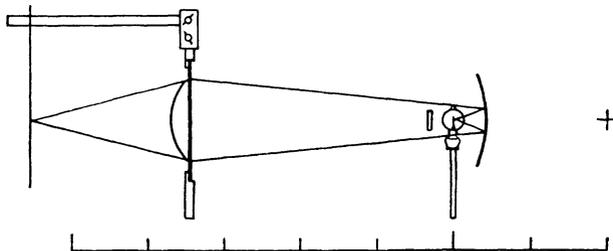


Abb. 44. Virtuelles Bild am Hohlspiegel.

nicht vor der Mitte des Spiegels, sondern ein wenig seitlich, weil sonst der Pappstreifen auch das Bild abblendet.

Die Ergänzung dieser objektiven Versuche durch subjektive, die mit Brillengläsern, Glasplatten und kleinen Uhrgläsern ausgeführt werden können,

liegt in diesem Abschnitt wohl besonders nahe. Vielleicht verwendet man sogar besser die beschriebenen Versuche mit dem Augenmodell als Ergänzung zu Versuchen mit dem Auge selbst.

Das virtuelle Bild macht im Unterricht stets besondere Schwierigkeiten. Geht man rechnend vor, so läßt sich zwar die Definition leicht aussprechen, in der Anschauung verschwimmen aber reelles und virtuelles Bild derartig, daß die meisten auch ein virtuelles Bild mit einem Stück Papier aufzufangen suchen. Der erfahrungsmäßigen Optik ist das virtuelle Bild fremd. Es hat deshalb nicht an Vorschlägen gefehlt, den Begriff überhaupt auszumerzen. Dem muß aber entgegengehalten werden, daß die rechnende Optik diesen Begriff durchaus nötig hat und daß er auch außerhalb der rechnenden Optik zu einer kurzen und bestimmten Beschreibung des Strahlenganges recht nützlich ist. Schädlich ist es nur, wenn der Begriff vorzeitig eingeführt wird, auf einer Stufe, auf der er noch nicht verwertet werden kann und als nutzloser Ballast störend wirkt.

Bisweilen wird auch der Gegensatz zwischen virtuellem und reellem Bild falsch dargestellt. Wenn wir die optische Anordnung, die zu einem reellem Bilde führt, willkürlich zerlegen, so können wir die Wirkung des ersten Teils durch die Angabe eines virtuellen Bildes beschreiben und die Wirkung des zweiten Teiles mit der Behauptung erklären, er entwerfe von dem virtuellen Bilde, das der erste Teil erzeugt hat, ein reelles Bild. Man stößt aber gelegentlich auf die Vorstellung, ein virtuelles Bild sei etwas so Geringwertiges und Entartetes, daß das Bild davon nicht wieder zu dem Werte eines reellem Bildes aufsteigen könne. Dieses Vorurteil wird auch festgehalten beim Auffangen des reellem Endbildes mit einem Papierblatt.

Auch die Versuche, in denen durch einen Kunstgriff das virtuelle Bild sichtbar gemacht wird, bringen, vorzeitig angestellt, die Gefahr einer Vermischung der Begriffe. In der vorliegenden Darstellung ist versucht, dieser Gefahr dadurch auszuweichen, daß erstens das virtuelle Bild anhangsweise nach der Besprechung vollständiger optischer Anordnungen unter dem Kennwort „unvollständige optische Anordnungen“ gebracht wird, und daß zweitens die Darstellung beschränkt wird auf die beobachtbaren Fälle, d. h. die Fälle, in denen das Auge oder ein Modell des Auges die Ergänzung zur vollständigen optischen Anordnung herstellt. Eine freiere Benutzung des Begriffes des virtuellen Bildes wird auf die rechnende Optik verschoben.

### Gerät zu den Versuchen über das virtuelle Bild.

6 Klemmfüße *C* (oder *A*).

2 große arabische Einsen aus Glaskugeln, auf Stielen.

Kleine arabische Eins aus Glaskugeln, auf Stiel.

2 Lampen in Fassung auf Stiel (4 Volt, 15 Watt).

2 Lampengehäuse.

Rohrmuffe.

Stab, 30—50 cm lang.

2 Kopierklammern.

Papierblatt mit Loch.

Stab, 50 cm lang.

3 Kreuzmuffen.

Linsen 10  $\times$  15 mit oberem Stiel, 10  $\times$  30, 6  $\times$  9 in Fassung auf Stiel.

Konkavlinse 9  $\times$  30 (oder Brillenglas).

Ebene Glasplatte (Spiegelglas).

Plattenklemme.

Uhrglasschale (etwa 12 cm Durchmesser).

Pappschirm.

Lämpchen, 4 Volt, Abb. 8.

Stromquelle dafür.

Zündhölzer.

(Spiegel auf Stiel.)

(Klemmfuß *A.*)

(Linsenabstellklotz.)

(Statt der Klemmfüße sind auch Winkelfüße mit je einem 10 bis 20 cm langen Stiel und Rohrmuffe verwendbar.)

---

## Zweiter Teil.

### Die Linsenfehler und ihre Berichtigung.

#### 7. Die Wahrnehmung der Linsenfehler.

Durch die bisherigen Versuche war gezeigt, daß unsere drei Linsen zu einer Fülle von nützlichen Verwendungen geeignet sind. Dabei hatten wir aber geflissentlich die Erfolge dadurch beschönigt, daß wir die Versuche im möglichst hellen Zimmer anstellten. Einen Argwohn werden die Schüler dabei kaum gehabt haben, da man ja sonst Dinge, an denen etwas zu verbergen ist, nicht ins helle Licht stellt. Man darf aber das Verfahren nicht als einen Betrug werten, sondern es bezweckt nur eine Zerlegung der Aufgabe. Erst sollte die Verwendbarkeit der Linsen zu nützlichen optischen Geräten überhaupt gezeigt und dabei die Ablenkung auf anderes vermieden werden. Jetzt ist unsere Aufgabe, die vorher übersehenen und verheimlichten Störungen kennenzulernen, vor allem die Bedingungen ihres Auftretens zu erforschen, mit dem Ziel, ihr Auftreten vermeiden zu lernen. Man kann wohl sagen, wir haben uns die Aufgabe im Gegensatz zu unserer Erfahrung gestellt, denn wir verlangen von den Linsen Besseres als das, dessen sie sich in den früheren Versuchen fähig gezeigt haben. Mag uns der Weg immerhin gewiesen sein durch eine Überschätzung der Linsen, die wir durch das Arbeiten im Hellen selbst verschuldet haben, wenn er uns nur vorwärts führt!

Wir greifen zurück auf Abb. 13, benutzen aber als Gegenstand die Glaskugeln. Nachdem aufgestellt ist, wobei auch die Linse einen Klemmfuß erhält und nicht, wie früher, frei in der Hand gehalten wird, läßt man das Zimmer verdunkeln. Jetzt wird recht auffällig, daß nur ein bescheidener Teil des Lichtes in den Bildpunkten sich zusammenfindet und viel Licht die Umgebung als störender Schein erhellt. Für die Verwendungen, die wir kennengelernt haben, ist das ein schwerer Nachteil, und wir wünschten wohl, daß es besser wäre. Aber wir wollen nicht dabei stehenbleiben, bedauernd festzustellen, daß es nicht besser ist, sondern einmal versuchen, was herauskommt, wenn wir die Linse umdrehen. Das Bild wird wesentlich schlechter! Das ist zunächst ein Mißerfolg, aber doch immerhin eine Bereicherung unserer Einsicht, denn wir sehen, daß es nicht nur auf die Stärke der Linse, sondern auch auf ihre Gestalt ankommt. Das nächste ist nun, daß wir statt der eben verwendeten Linse 10  $\varnothing$  30 die stärkere 10  $\varnothing$  15 und die schwächere 10  $\varnothing$  60 zu den gleichen beiden Versuchen anwenden. Das Ergebnis ist, daß die stärkere schlechtere und die schwächere bessere Bilder

liefert. Diese Erfahrung hat man schon zeitig gemacht und sie war Anlaß, in den ersten anderthalb Jahrhunderten nach Erfindung der Fernrohre diese, besonders, wenn sie zu Himmelsbeobachtungen dienen sollten, aus sehr schwachen Linsen, folglich auch sehr lang zu bauen. In manchen Sammlungen befinden sich noch aus jener Zeit Fernrohre von 3—5 m Länge bei 3—5 cm Durchmesser, deren Rohr und Züge aus Pappe hergestellt und mit Ringen aus harten Hölzern, Knochen oder Elfenbein verstärkt sind. Mit diesen Rohren sind immerhin recht beachtenswerte Beobachtungen gemacht worden, und der Fortschritt gegenüber der fernrohrlosen Zeit war gewaltig. Es lohnt sich auch jetzt für die Schüler, aus einem guten Brillenglas von 1 m Brennweite als Objektiv und zweien von 10 cm Brennweite als Okular ein Fernrohr zusammenzupappen.

Nachdem die Bildgüte bei Benutzung der drei Linsen verglichen ist, kommt es darauf an, für dieses verschiedene Verhalten einen Grund zu finden. Zu dem Zweck stellt man nach diesen Versuchen die drei Linsen noch einmal so auf, wie Abb. 11 es zeigt, und läßt die drei Schattenbilder der Abb. 12 betrachten. Die Schüler werden dann wohl selbst erkennen, daß die starke Linse einen viel größeren Abschnitt einer Kugel darstellt, als die mittlere oder gar die schwache, und daß ein gerechter Vergleich erfordert, daß die Ränder der stärkeren Linsen soweit verdeckt werden, daß von allen drei Kugeln ein im Zentriwinkel gemessen gleich großer Abschnitt verwendet wird. Die Benutzung der durch diesen Gedankengang nacherfundenen Blende bestätigt die Vermutung, daß nun Bilder von gleicher Güte erscheinen. Durch diesen Versuch erfährt man, daß die verschiedenen Zonen der Linse in ihrer Wirkung nicht ganz übereinstimmen, und das führt zu dem Entschluß, zwei eng genug begrenzte voneinander beträchtlich entfernt liegende Zonen miteinander in ihrer Wirkung zu vergleichen. Dabei drängt sich auch der Begriff der optischen Achse der Linse auf, nach der die Ringblenden und Lochblenden ausgerichtet werden, und die Beschränkung der Beobachtungen zunächst auf die Punkte der Achse.

Die Benennung der Abweichung, in deren Betrachtung diese Versuche einführen, bereitet einige Unbequemlichkeiten. Die herkömmlichen Namen: „Sphärische Aberration“ und „Kugelgestaltsfehler“ sind ja nicht gerade glücklich gewählt; sie beruhen auf einer Überschätzung des Wertes der Strahlenvereinigung, die durch Brechung am Ellipsoid und an den Kartesischen Ovalen in Einzelfällen erreicht werden kann. Für die Erfüllung zusammengesetzterer Forderungen ist die Kugel doch immer die brauchbarste brechende Fläche. Auf Grund des Versuches mit der umgedrehten Plankonvexlinse, der den ersten Hinweis auf den Einfluß der Gestalt der Linse gab, kann man vielleicht die Benennung Gestaltsfehler gelten lassen. Im Rahmen des hier gezeichneten Gedankenganges ist aber eine Benennung vorläufig überhaupt noch nicht nötig, sondern das Bedürfnis wird erst eintreten, wenn verschiedene Fehlerarten sich voneinander abgrenzen. Für das Abfragen mag es einen Vorteil bieten, die Benennungen und Definitionen an den Anfang zu setzen. Für das Verständnis

des Werdens von Erfahrung und Lehre wird mehr gewonnen, wenn man die Namen erst prägt, wann sie gebraucht werden.

In der rechnenden Optik ist es leider üblich geworden, von Zonen des Objektivs zu reden, wenn man Zonenfehler meint. Das griechische Wort heißt zu Deutsch der Gürtel und bezeichnet, auf eine Linse angewandt, einen ringförmigen Teil von ihr, dessen Grenzkreise ihre Mittelpunkte auf der Achse haben. Bei der unberichtigten Linse ist die Wirkung aller Zonen verschieden. In einer Linsenfolge kann man zwei Zonen zu gleicher Wirkung bringen, die übrigen Zonen haben dann immerhin verminderte Abweichung von der gewünschten gemeinsamen Wirkung. Es gilt nun, die beiden Zonen für übereinstimmende Wirkung so auszuwählen, daß die Gesamtwirkung aller Zonenfehler möglichst gering bleibt. Hat man z. B. zwei Fernrohrobjektive von 60 cm Brennweite herzustellen, von denen das eine 5, das andere 8 cm Durchmesser hat, so wird man nicht beiden die gleichen Krümmungen geben, sondern für das kleinere zwei kleinere Zonen zur Übereinstimmung bringen als für das große. Demgemäß werden auch bei dem kleineren die Fehlerreste geringer sein; es können stärkere Okulare mit Nutzen angewandt werden als bei dem größeren. Dieses wird nur mäßige Vergrößerung zulassen, aber den Vorzug besonderer Helligkeit haben, so daß es noch bei schlechtem Licht verwendbar ist. Der rechnende Optiker pflegt zu sagen, das 8-cm-Objektiv habe größere Zonen als das 5-cm-Objektiv. Damit meint er aber nicht, daß man bei ihm Zonen größeren Halbmessers für den Ausgleich gewählt habe, sondern er meint, daß die Fehler der unvollkommen berichtigten Zonen einen größeren Betrag erreichen als beim kleineren Objektiv. Es handelt sich also bei diesem Gebrauch des Wortes Zonen nicht um eine sinnvolle Abkürzung, sondern um eine Verstümmelung des Wortes aus bloßer Bequemlichkeit. Man könnte es hingehen lassen, wenn nicht Unklarheit dadurch entstünde, da das aber der Fall ist, muß man dieser Nachlässigkeit durchaus entgegenreten.

### Gerät für die Versuche zur Wahrnehmung der Linsenfehler.

3 Klemmfüße *C* (oder *A*).

Glühlampe.

Fassung auf Stiel.

Gehäuse oder Pappschild.

Arabische Eins aus Glaskugeln.

Punktlichtlampe im Gehäuse nebst Widerstand.

Linse 10  $\varnothing$  15, 10  $\varnothing$  30, 10  $\varnothing$  60.

Lochblenden, 48 und 24 mm.

4 Kopierklammern.

Schild, stehend oder hangend.

(Abstellklotz für Linsen.)

(Statt der Klemmfüße sind auch Winkelfüße mit je einem 10 bis 20 cm langen Stiel und Rohrmuffe verwendbar.)

### 8. Auf der Achse, Wirkung von Rand und Mitte.

Um die Versuche durchzuführen, zu deren Plan der vorige Abschnitt geleitet hatte, Versuche, bei denen die Wirkung zweier Zonen der Linse miteinander verglichen werden soll, fertigen wir aus schwacher Pappe oder Aktendeckel drei Blenden an, deren Gestalt in Abb. 45 gezeigt ist. Die in der Mitte der Abbildung dargestellte Doppelblende hat ein Kreisloch von 15 mm Halbmesser und ein Ringloch von 42 mm innerem und 45 mm äußerem Halbmesser. Die Flächen dieser beiden Durchbrüche sind ungefähr gleich groß, lassen also ungefähr dieselbe Lichtmenge hindurch. Die übrigen Abmessungen ergeben sich aus dem beigezeichneten Maß, das 10 cm bedeutet. Die Doppelblende wird mit zwei Kopierklammern an der Linsenfassung befestigt, und dann wird entweder die Mitte durch die Kreisscheibe, oder das Ringloch durch die Ringblende abgedeckt. Die Deckblenden werden mit ihren Drähten, die oben umgebogen sind,

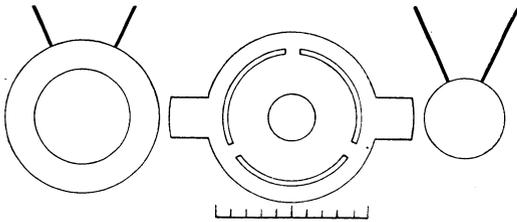


Abb. 45. Blenden für Mitte und Rand von Einzellinsen.

auf den Rand der Linsenfassung gehängt. Durch die Anwendung der Doppelblende mit den Deckblenden wird erreicht, daß beim Übergang vom Rand zur Mitte und umgekehrt die Zentrierung nicht verloren geht. Das genaue Ausrichten von Blenden beim

Auswechseln würde ohne diesen Kunstgriff sehr zeitraubend und, weil man die Linsen zwischen den anderen Teilen der Versuchsanordnung stehenlassen muß, kaum ausführbar sein.

Als Lichtquelle für diese Versuche eignet sich am besten ein luftleeres Glühlämpchen von 4 Volt mit aufgerolltem Glühdraht (Abb. 9). Man richtet die Achse der Schraubenwindungen in die optische Achse der Linsen, das scharfe Bild des Lämpchens ist dann ein kleiner heller Kreis, dessen scharfe Einstellung besser beurteilt werden kann als die eines hellen Punktes. Die dunkle Mitte bietet hier eine bemerkenswerte Hilfe. Weniger geeignet sind gasgefüllte Lämpchen, weil bei ihnen die Endwindungen bei weitem nicht so hell sind wie die mittleren. Infolgedessen wird das Bild verwickelter: ein mäßig heller Ring ist umgeben von helleren Rändern, die daher stammen, daß die Windungen sich nicht genau und vollständig decken. Das täuscht leicht eine unscharfe Einstellung vor und beeinträchtigt die Sicherheit des Versuches. Selbst die Punktlichtlampe, die für einige Versuche allerdings geeigneter ist, steht für diese Versuche der kleinen Glühlampe nach.

Die Aufstellung des ersten Versuches zeigt Abb. 46. Zuerst wird der Rand verdeckt und für die Mitte der Linse auf einen etwa 3 m entfernten Schirm scharf eingestellt. Nachdem die Randbedeckung abgenommen und die Mitte bedeckt ist, sieht man, daß der Rand der Linse kein scharfes Bild des Lämpchens gibt. Man kann nun zwar die Linse rücken, bis die Schärfe am besten geworden

ist, aber die Verschiebung der Linse ist so gering, daß die Schüler ihren Betrag nicht abzuschätzen vermögen. Deshalb ist es viel besser, die Linse und den Schirm an ihrem Platze stehen zu lassen und das näher gelegene Bild, das von den Randstrahlen entworfen wird, mit einem Papierblatt aufzusuchen. Der Abstand dieses Blattes vom Schirm wird geschätzt oder grob gemessen.

Es folgt sogleich derselbe Versuch mit umgekehrter Linse gemäß Abb. 47. Wieder wird mit der aufgedeckten Mitte auf den Schirm scharf eingestellt und

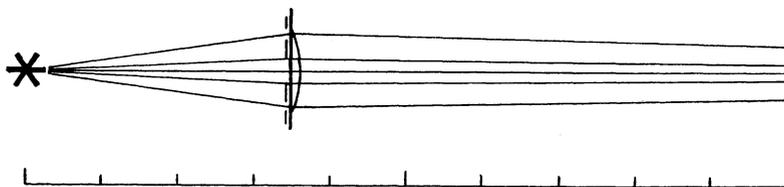


Abb. 46. Wirkung von Rand und Mitte. Die Linse in der Stellung der kleineren Abweichung.

dann die Blende vertauscht und mit einem Blatt das Bild gesucht. Das Bild der Randstrahlen ist jetzt merklich schlechter als zuvor, und der Abstand des Blattes vom Schirm sehr viel größer. Rand und Mitte stimmen also in ihrer Wirkung noch schlechter überein als zuvor.

Aus diesen Versuchen ergibt sich, daß es keineswegs gleichgültig ist, in welcher der beiden möglichen Stellungen man eine Linse verwendet. Hat man also einmal eine Linsenfolge, etwa ein Projektionsobjektiv zum Zweck der Reinigung auseinanderzunehmen, so soll man sich sorgfältig merken oder aufzeichnen, in welcher Reihenfolge die Linsen aufeinanderfolgen und welche Seiten sie

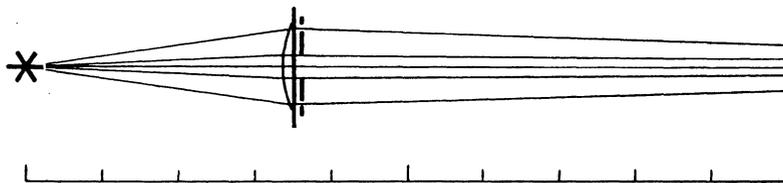


Abb. 47. Wirkung von Rand und Mitte. Die Linse in der Stellung der größeren Abweichung.

einander zuwenden. Versäumt man das, so kann man erleben, daß nach dem Wiederaussetzen das Glas klägliche Bilder gibt. Danach durch Ausschauen aus allen möglichen Stellungen der Linsen die richtige wiederzufinden, ist ein sehr zeitraubendes Geschäft, auch werden die Linsen vom häufigen Herausnehmen und Einsetzen keineswegs besser.

Hat man es nicht mit Linsenfolgen zu tun, die auf Grund der Berechnung Form, Stellung und Abstand voneinander erhalten haben, sondern will man mit den gerade vorhandenen Linsen für irgendeinen Zweck eine möglichst geeignete Zusammenstellung schaffen, so tut eine Gedächtnisregel gut, die einem hilft, von vornherein die günstigste Stellung zu finden. Die Gedächtnisregel ist reichlich grob, aber anschaulich. Um sie aufzufinden, vergleiche man die Abb. 46 mit 47. In Abb. 47 erleidet das Licht an der ersten gekrümmten Fläche

bei weitem den größten Teil der Brechung, während das nahezu parallele Licht fast ungebrochen durch die zweite ebene Fläche tritt. Bei Abb. 46 hingegen treffen die Strahlen schräg auf die ebene Fläche und werden beträchtlich gebrochen; an der nun folgenden gekrümmten Fläche tritt abermals eine Brechung in demselben Sinne ein und macht die Strahlen annähernd parallel. Was also im Fall der Abb. 47 eine Fläche leisten muß, daran beteiligen sich im Fall der Abb. 46 beide Flächen in etwa gleichem Maße.

Die Gedächtnisregel knüpft nun an die Erfahrung an, daß man eine bessere Arbeit erwarten kann, wenn zwei sich darein teilen, als wenn der eine müßig ist und der andere sich überanstrengt. So wird man auch von der Linse Besseres erwarten können, wenn beide Flächen möglichst gleich stark an der Wirkung beteiligt sind, als wenn eine allein oder fast allein wirksam ist. Gemäß dieser Gedächtnisregel werden wir, wenn nicht andere Rücksichten dagegen sprechen, die Linsen immer so stellen, daß die Brechung auf beide Flächen möglichst gleich verteilt wird.

Durch Verfügung über die Gestalt der Linse kann man das Zusammenarbeiten von Rand und Mitte ganz wesentlich beeinflussen, aber dieses Mittel ist (bei Beschränkung auf Kugelflächen) nicht wirksam genug, um bei einer Sammellinse oder einer Folge von Sammellinsen völlige Übereinstimmung herbeizuführen. Um dies zu erreichen, muß man schon einen Umweg einschlagen, und der ist nun nicht mehr schwer zu finden.

Wirken bei Sammellinsen Rand und Mitte verschieden, so wird es wohl bei Zerstreuungslinsen auch so sein, und haben wir bei Sammellinsen diesen Unterschied in weitem Maße durch die Linsenform in der Gewalt, so wird es wohl bei Zerstreuungslinsen auch so sein. Wenn wir nun eine Sammellinse in der Stellung geringster Abweichung zusammenfügen mit einer schwächeren Zerstreuungslinse in der Stellung größter Abweichung, die ja, bezogen auf die Abweichung der Sammellinse, entgegengesetztes Vorzeichen hat, so wird es vielleicht möglich sein, dahin zu kommen, daß die Abweichungen sich gerade ausgleichen, daß aber von der Sammelwirkung doch noch ein beträchtlicher Teil übrigbleibt. Die Erfahrung bestätigt nun diese Vermutung durchaus. Für den Versuch bietet es eine große Erleichterung, daß eine Linse als Zusatz zu einer anderen schwächer wirkt, wenn man sie von ihr abrückt. Wir sind daher nicht auf Linsen eines bestimmten Stärkeverhältnisses angewiesen, sondern können z. B. mit einer Plankonvexlinse und einer Plankonkavlinse von gleicher Krümmung unsere Vermutung bestätigen.

Zu dem angedeuteten Versuch werden wir Linsen von 30 cm Brennweite, sowohl gewölbt wie hohl, beide aber auf einer Seite eben, benutzen. Die im Schulzimmer verfügbaren Längen erlauben es nicht mehr, mit diesen Linsen den Versuch so auszuführen, daß ein Achsenpunkt im Endlichen abgebildet wird. Wir werden deshalb gleich für Abbildung im Unendlichen, also für Erzeugung eines parallelen Strahlenbüschels aufstellen, und daraus dann weitere Vorteile ziehen. Zunächst aber müssen wir uns noch ein Blendenpaar mit Deckblenden herstellen,

das gemäß Abb. 48 geknickte Stützen hat, so daß es über der Wölbung der Linse steht, wenn die Endflächen mit Kopierklammern an der Fassung befestigt sind. Die Deckblenden haben kürzere Drahthaken, als die der bisher benutzten Doppelblende und werden nicht über die Linsenfassung, sondern über den Blendenrand gehängt. Die Doppelblende macht man aus hell gefärbtem Aktendeckel, um Lichtspuren darauf erkennen zu können. Ferner ist das Loch nicht offen gelassen, sondern als Ringblende mit einem inneren Durchmesser von 25 mm ausgebildet. Im übrigen stimmt Abb. 48 mit 45 überein. Die Deckblenden sind übrigens nicht gerade nötig, es ist aber bisweilen angenehm, sie zu haben, und ihre Anfertigung macht ja nicht viel Mühe. Die Doppelblende wird außerdem noch einmal in derselben Größe und einmal in genau halber Größe in weiße Pappe oder starkes Zeichenpapier geschnitten, wobei der Rand quadratisch 15 : 15 cm und 10 : 10 cm bleibt.

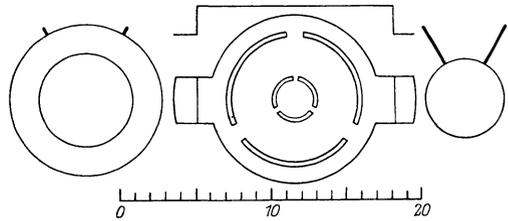


Abb. 48. Doppelblende und Deckblenden für das Linsenpaar.

Abb. 49 zeigt den Aufbau zu dem Versuch. Daß die Sammellinse, die in der Stellung geringster Abweichung stehen soll, der Lampe die ebene Seite zuwendet, ist nach der angegebenen Gedächtnisregel ohne weiteres als richtig anzuerkennen. Die Stellung der Zerstreuungslinse ist nicht so einfach zu übersehen. Unzweifelhaft wirken in der gezeichneten Stellung beide Flächen brechend, wenn auch nicht gleich stark. In dieser Aussage ist aber übersehen, daß die

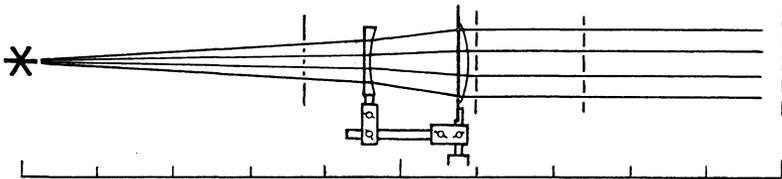


Abb. 49. Aufhebung der sphärischen Abweichung.

erste Brechung eine sammelnde, die zweite eine zerstreue ist, die erste Fläche wirkt also der zweiten entgegen, so daß diese nicht nur die ganze Zerstreuung leisten, sondern obendrein, was die erste Fläche getan hat, noch rückgängig machen muß. Die Stellung der Linse ist demnach mit unserer Regel im Einklang. Die Zerstreuungslinse, die 9 cm Durchmesser und kurzen Stiel hat, wird mit Stabmuffe und Rohrmuffe oder mit zwei Rohrmuffen und kurzem Stab an der Sammellinse befestigt. Auf die Sammellinse folgt die mit zwei Kopierklammern an ihrer Fassung befestigte Doppelblende nach Abb. 48. Man kann sich bei dieser Anordnung, die sorgfältig auf die Achse ausgerichtet werden muß, nicht auf die aus der Zeichnung abzulesenden Maße verlassen. Ein ziemlich geringer Unterschied in den Krümmungsradien beider Linsen bewirkt, daß der Abstand beträchtlich anders genommen werden muß, um den Ausgleich zu

erzielen. Ist der Abstand der Linsen zu groß, so bleibt eine „Unterkorrektion“. Dann laufen die Randstrahlen noch zusammen, wenn die engere Ringblende schon einen genauen Lichtzylinder gibt, oder diese inneren Strahlen laufen noch auseinander, wenn der Rand einen Zylinder gibt. Ist aber der Abstand der Linsen zu klein, so haben wir „Überkorrektion“. Dann laufen die Randstrahlen auseinander, wenn die inneren einen Zylinder geben, oder die inneren zusammen, wenn die äußeren einen Zylinder geben. Die Möglichkeit der Überkorrektion ist nicht unwichtig. Durch die Zerstreuungslinse wird die Wirkung der Sammellinse abgeschwächt, es liegt also der Einwand nahe, daß gar nicht eine Aufhebung der Abweichung erreicht werde, sondern nur infolge der langen Brennweite die Abweichung sehr gering sei und deshalb nicht bemerkt werde. Diesem Einwand kann nur durch das Aufzeigen der Überkorrektion begegnet werden. Nun zur Ausführung des Versuches!

Als Lichtquelle wird am besten die Punktlichtlampe genommen. Ihre überlegene Helligkeit ist hier sehr wertvoll, und der Vorteil des gerollten Fadens kommt, da wir keine Abbildung herstellen, nicht zur Geltung. Bei der Wechselstrompunktlichtlampe werden beide Kugeln hintereinandergestellt, also nur eine wirklich benutzt, damit keine Doppelränder entstehen. Von den Blenden wird außer der an der Linse befestigten zunächst nur die gleich große auf quadratischer weißer Pappe benutzt. Sie wird wenigstens 2 m entfernt aufgestellt (in der Abbildung aus Platzmangel bei 1 m angedeutet), und das Licht muß sich nun genau durch die beiden Ringblenden hindurchfinden und zwei Kreise auf dem Schirm zeichnen. Es ist eine sorgfältige Ausrichtung nötig, damit das zustande kommt. Kleine Neigungen und Verdrehungen der Linsen bewirken schon ziemlich schiefe Lage der beiden Zylinder, so daß man nur bei guter Aufstellung beide gleichzeitig durch die Blendenschlitze hindurchbringt. Nachdem das gelungen ist (man wird das vor der Unterrichtsstunde erledigen), stellt man die Blendenplatte halber Größe zwischen Lampe und Zerstreuungslinse und sucht die Stellung auf, in der sie gerade die Kegel hindurchläßt, die (als Zylinder) von den beiden Blenden hinter der Sammellinse durchgelassen werden. Hat man die an der Linse angeklammerte Blendenplatte aus schwarzer Pappe gemacht, so ist dieses Suchen recht schwierig, weil man auf der schwarzen Pappe die Lichtspuren kaum sieht. Besteht aber diese Doppelblende aus heller Pappe, so findet man nach den hier sichtbaren Lichtspuren sehr schnell die richtige Stellung der kleinen Blendenplatte.

Durch die kleine Blendenplatte sind die Kegel ausgesondert, die den Zylindern hinter den Linsen entsprechen. Wir können nun auf die von GAUSS erdachte Ersetzung der ganzen Linsenfolge durch eine Fläche, an der die Strahlen eine Knickung erleiden, übergehen. Verlängern wir die Kegel ohne Rücksicht auf die Linsen, so werden sie in der doppelten Entfernung der kleinen Blendenplatte vom Licht gerade die ihnen zugeordneten Zylinder durchdringen. Diesen Gedanken führt man im Versuch so aus: Wir nehmen das Linsenpaar weg, lassen aber den Fuß stehen, um bei Bedarf den richtigen Platz für die Linsen schnell

wieder zu finden, um aber auch nach Wegnahme der Linsen ihren Ort noch zu kennzeichnen. Dann rücken wir die in der Ferne stehende große Blendenplatte heran, bis die von der kleinen bestimmten Lichtkegel gerade durch die Schlitze hindurchgehen (in der Abbildung bei 0,74 m angedeutet). Die große Blendenplatte steht nun dort, wo Kegel und Zylinder sich durchdringen. Sie gibt uns jetzt den Ort der GAUSSischen Ersatzfläche an. Die Punkte dieser Fläche, in denen je ein Kegelstrahl in einen Zylinderstrahl übergeht, wollen wir die Knickpunkte nennen. Der Abstand von Brennpunkt und Knickpunkt ist die Brennweite; der Begriff ist jetzt erst genau definierbar.

Die Einführung der GAUSSischen Ersatzfläche bedarf einer näheren Begründung, hier wohl noch mehr als in der rechnenden Optik. Doch glaube ich, daß auch dort nicht jedem ihr Nutzen sogleich klar wird. Dieselben Kegel und Zylinder, die nach Abb. 49 mit Hilfe der Sammell- und Zerstreuungslinsen  $10 \text{ } \varnothing \text{ } 30$  aufeinander bezogen wurden, können offenbar auch durch andere Linsenfolgen miteinander in Beziehung gebracht werden. Sehen wir für den Augenblick von der Forderung ab, daß die verschiedenen Linsenzonen gleich wirken sollen, richten wir unsere Aufmerksamkeit z. B. nur auf den äußeren Zylinder, indem wir mit der kleineren Deckblende den inneren Ring verdecken, so muß es auch einfache Linsen, die in ihrer Form noch verschieden sein können, geben, die denselben Kegel demselben Zylinder zuordnen. Die übereinstimmende Leistung aller dieser Linsen und Linsenfolgen kennzeichnet die GAUSSische Ersatzfläche oder wenigstens der Teil von ihr, der durch unsere Ringblende bezeichnet ist. Alle Brechungen an den verschiedenen wirklichen Linsenflächen sind ersetzt durch eine Knickung an einer einzigen Fläche. In diesen Knickpunkten haben wir nun eindeutig bestimmte Anfangspunkte für die Messung der Strecken, die im Bildpunkt ihr Ende haben. Ich rede ganz absichtlich von einer Knickung, nicht von einer Brechung an der Ersatzfläche, um der immer wieder vorkommenden falschen Vorstellung zu begegnen, als ob die Knickung an dieser Fläche irgend etwas mit dem SNELLIUSSchen Brechungsgesetz zu tun hätte. In dem besonderen Fall der Abb. 49 fällt der Achsenpunkt der Ersatzfläche mit dem dingseitigen Hauptpunkt zusammen. Nehmen wir nun einmal umgekehrten Strahlengang an und verlangen wir, daß die Linsenfolge als Fernrohrobjektiv gut sein soll, dann bedeutet das nicht nur, daß alle Linsenzonen das Bild etwa des Saturn an derselben Stelle zeichnen sollen, sondern auch, daß sie es in gleicher Größe zeichnen sollen. Das ist der Fall, wenn die Ersatzfläche eine mit der Brennweite um den Brennpunkt gezogene Kugelfläche ist. Die zusammenlaufenden Strahlen stehen da also senkrecht auf der Knickfläche. Es kann schon aus dem Grunde für die Knickfläche kein Brechungsgesetz aufgestellt werden, weil sie gar nicht Gebiete verschiedener Brechungszahl voneinander trennt.

Machen wir uns die Vorstellung, daß bei dem vierten und achten Dezimeter des unter die Abb. 49 gezeichneten Maßstabes ebene Glaswände wären, die einen Kasten abschließen, in dem, für uns unzugänglich, die Linsenfolge sich befindet, so haben wir doch mit Hilfe unserer Blenden feststellen können, wie die Linsenfolge wirkt. Den genauen Gang des Lichtes kennen wir nicht, aber wir wissen, er ist gleichwertig einem, der bis an die Knickfläche als Kegel läuft und dort plötzlich in einen Zylinder übergeht. Bei einem solchen Kasten würden wir

auch nicht merken, daß diese Fläche, die uns die Linsenfolge ersetzen soll, in unserem Falle tatsächlich weit außerhalb von ihr liegt. Wir haben früher festgestellt, daß Dingabstand durch Bildabstand geteilt immer etwa dasselbe gab, wie Dinggröße durch Bildgröße geteilt. Genaue Feststellung war deshalb nicht möglich, weil die Angabe der Entfernung von der Linse mit der Unsicherheit behaftet war, daß kein bestimmter Linsenpunkt als geeigneter Ausgangspunkt für die Zählung angegeben werden konnte. Zählen wir aber vom Knickpunkt, an dem der dingsseitige Lichtkegel den bildseitigen durchdringt, so stimmt jene Beziehung immer ganz genau.

### **Gerät zu den Versuchen über Wirkung von Rand und Mitte der Linse (auf der Achse).**

4 Klemmfüße *C* (oder *A*).

Lämpchen, 4 Volt, mit gerolltem Faden.

Stromquelle (Batterie oder Transformator) hierzu.

Lampenfassung auf Stiel.

2 Rohrmuffen.

Stab (Stiel), 15 cm lang.

Linse 10  $\varnothing$  30 in Fassung auf Stiel.

Konkavlinse 9  $\varnothing$  30 mit kurzem Stiel.

2 Doppelblenden mit je 2 Deckblenden.

2 Kopierklammern.

Doppelblende in ganzer und in halber Größe, quadratisch.

2 Klemmen für diese Blenden.

Schirm, stehend oder hangend.

Hilfsschirm (Papierblatt).

Punktlicht in Gehäuse und Widerstand.

(Abstellklotz für Linsen.)

(Statt der Klemmfüße sind auch Winkelfüße mit je einem 10 bis 20 cm langen Stiel und Rohrmuffe verwendbar.)

### **9. Farbenabweichung.**

Die Farbenabweichung tritt bei den Versuchen mit schmaler Ringblende am Rande recht deutlich hervor. Der Gedankengang, der uns zum Ausgleich des Kugelgestaltsfehlers geführt hat, gibt uns das Vorbild für eine entsprechende Überlegung bezüglich des Farbenfehlers. Dabei erweist es sich, daß alles darauf ankommt, ob es möglich ist, Linsen verschiedener Stärke von gleich großem Farbfehler herzustellen. Solange man diese Möglichkeit glaubte verneinen zu müssen, war auch keine Hoffnung vorhanden, diesen schlimmsten Fehler zu beseitigen. Dieser Irrtum hat immerhin das Gute gehabt, daß die Spiegelfernrohre entwickelt wurden. Man kann mit einer plankonvexen Hohllinse, die mit Zimtsäureäthyläther gefüllt wird, sehr auffällig zeigen, daß Linsen etwa gleicher Stärke mit einer unserer Glaslinsen und mit sehr viel größerer Farben-

abweichung möglich sind. Es scheint mir aber nicht die Kosten dieser Anschaffung zu lohnen. Die Sache ist so glaubhaft, daß besondere Versuche nicht nötig sind, um die Ausführbarkeit zu zeigen, da der Gedankengang ja dem bei Beseitigung des Kugelgestaltsfehlers ganz entspricht. Das Ergebnis läßt sich an jedem in der Sammlung befindlichen Fernrohr, Mikroskop oder Lichtbildgerät aufzeigen. Ferner sind bei der Besprechung des Spektrums achromatische Prismenpaare üblich, die wohl in den meisten Sammlungen vorhanden sind. Es ist aus diesen Gründen davon abgesehen worden, im Rahmen dieser Versuche eine Beseitigung des Farbenfehlers durchzuführen. Dem Aufwand hätte das Ergebnis nicht recht entsprochen, und auch der Zeitaufwand für die Versuche schien nicht gerechtfertigt, da neue Gedanken und Vorstellungen kaum zu bilden sind.

Es dürfte aber den Zeitaufwand wert sein, dem Grundgedanken dieser Art der Berichtigung nachzugehen und Beispiele für seine Anwendung auch außerhalb der Optik aufzusuchen. Die unerwünschte Wirkung oder, wie wir kurz sagen, den „Fehler“ selbst benutzen wir zu seinem Ausgleich. In der Hauptvorrichtung (hier der Sammellinse) halten wir ihn möglichst klein im Verhältnis zur Gesamtwirkung, im Korrektionsglied (hier der Zerstreuungslinse) sorgen wir dafür, daß er möglichst stark und im umgekehrten Sinne in Erscheinung tritt, damit wir mit einer geringen Gesamtwirkung der Ausgleichsvorrichtung auskommen. Beim Rostpendel wird das gleiche Verfahren angewandt, die Hauptstäbe werden aus einem Stoff mit geringer Wärmedehnung, die Kompensationsstäbe aber aus einem mit großer Wärmedehnung genommen. Auch der Vorschaltwiderstand der Nernstlampe gehört hierher, seine starke Widerstandszunahme bei Erwärmung gleicht die Widerstandsabnahme des Nernststiftes, eines Leiters zweiter Klasse, aus, ohne daß der Gesamtwiderstand zu sehr erhöht wird. Man kann auch den Begriff des idealen Gases, der ja einen der wichtigsten Beweise der Thermodynamik trägt, hierher rechnen. Denn er wird dadurch gerechtfertigt, daß es für jeden engen Temperaturbereich möglich ist, ein Gasgemisch (Gemische sind bei jener Ableitung zulässig) derart anzugeben, daß die Abweichungen der Einzelgase vom idealen Gas sich gerade ausgleichen. Auch auf Beispiele außerhalb der Physik wird hinzuweisen sein.

### **10. Schräg zur Achse. Astigmatismus, Bildfeldwölbung, Koma.**

Beim Fernrohr und Mikroskop sind Ding und Bild bedeutend kleiner als die Abstände von den Linsen, alle Strahlenbüschel haben also nur geringe Neigung gegen die Achse. Beim Bildwurf und Bildfang aber (auf „deutsch“ Projektion und Photographie) ist die Bildausdehnung nicht viel kleiner, oft ebenso groß, ja gelegentlich größer als der Linsenabstand. Der größte Teil des Bildes wird also von Licht gezeichnet, das sehr schräg zur Achse durch die Linsen geht. Bei der ungeheuren Bedeutung, die vor allem das Bildfanggerät für die verschiedensten Berufe hat, muß die Schule ihm unbedingt mehr Zeit widmen, als sie bisher getan hat.

Für diese Versuche wird der Stiel der Linse am besten wagerecht gelagert, damit man von den Plätzen der Schüler aus die Schrägstellung der Linse gegen die Achse beurteilen kann. Eine einzelne Muffe gibt eine mangelhafte Lagerung, wenn man aber nach Abb. 50 eine Rohrmuffe und eine Winkel­muffe verwendet, so wird die Handhabung der so gelagerten Linse sehr bequem. In Ermange­lung einer Winkel­muffe kann man auch zwei Rohrmuffen auf einem Stab befestigen und diesen mit einer Rohrmuffe oder einer Kreuzmuffe oder einer Stab­muffe halten (Abb. 51). Wir nehmen zuerst wieder die Linse  $10 \text{ } \varnothing \text{ } 30$ , klemmen darauf die Doppel­blende (Abb. 45) an und decken den Randschlitz zu. Die Deck­blende kann hierbei untergeschoben werden, da eine Blendenwechsel nicht beabsichtigt ist. Zunächst wird dem Licht die ebene Seite zugewandt und auf den einige Meter entfernten Schirm scharf eingestellt. Die Lampe mit gerolltem Faden ist hierfür am besten. Dann gibt man der Linse eine Neigung von etwa  $10^\circ$ , die mit Fadenlot und Transporteur leicht einzustellen ist. Das Bild

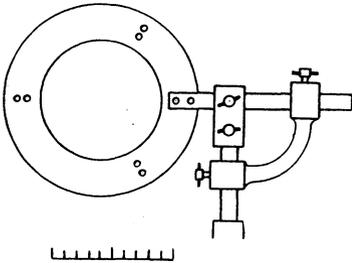


Abb. 50. Aufstellung für Neigung der Linsenachse (mit Winkel­muffe).

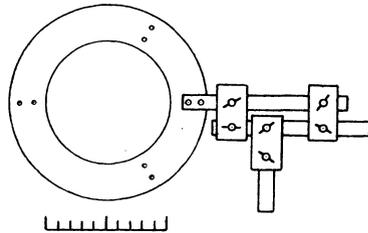


Abb. 51. Aufstellung für Neigung der Linsenachse (mit 3 Rohrmuffen).

auf dem Schirm wird etwas undeutlich, es ist offenbar von oben nach unten etwas gezerzt. Nehmen wir ein Blatt Papier zur Hand, so finden wir etwa 30 cm vor dem Schirm die beste Abbildung, sie ist aber nicht annähernd so klar wie das Bild bei ungekippter Linse.

Wir gehen zur Neigung  $20^\circ$  über. Nun bekommen wir überhaupt keine Abbildung mehr, die den Kreis erkennen läßt, sondern dort, wo das Licht am engsten gesammelt ist, einen birnenförmigen hellen Fleck. Dagegen wird eine neue auffällige Erscheinung sichtbar: Etwa 30 cm vom Schirm ist der helle Kreis zu zwei sehr scharfen senkrechten Strichen ausgezogen, und fast auf halbem Weg zur Linse tritt ein wagerechter, fast zu einem Strich zusammenlaufender Doppelstrich auf. An diesen Stellen wird zwar nicht der ganze Kreis, aber zwei gegenüberliegende Randstücke von ihm werden schärfer abgebildet als an jeder anderen Stelle. Die Abbildung ist zerfallen, das von einem Punkt kommende Licht wird nicht mehr in einem Punkt, sondern in zwei zueinander senkrechten Strichen in verschiedenen Entfernungen von der Linse abgebildet. Die Erscheinung führt den Namen Astigmatismus. Die deutsche Übersetzung dieses griechischen Wortes ist Unpünktlichkeit, ein Wort, das wir nur in zeitlichem Sinne zu benutzen pflegen, das wir aber ganz gut hier auch im räumlichen Sinne

anwenden können. Eine Linsenneigung von  $30^\circ$  zeigt dieselbe Erscheinung in so verstärktem Maße, daß wir das Papier schon in der zur Linse entgegengesetzten Richtung sehr schräg halten müssen, um das senkrechte Strichpaar auf ganzer Länge scharf zu erhalten.

Die Richtung der Striche zeigt, daß zwei Ebenen ausgezeichnet sind, die zueinander senkrecht stehen. Die bei unserer Versuchsanordnung senkrechte Ebene enthält die optische Achse der Linse, sie heißt der erste Hauptschnitt, auch Meridional- oder Tangentialschnitt; die dazu senkrechte, in unserer Anordnung also die wagerechte Ebene, heißt der zweite Hauptschnitt, auch Äquatorial- oder Sagittalschnitt. Wir schieben jetzt die um etwa  $25^\circ$  geneigte Linse der Lampe näher, bis das senkrechte Strichpaar auf dem Schirm möglichst scharf ist, und fahren mit einem wagerecht gehaltenen Bleistift von oben nach unten über die Blende. Im Doppelstrich auf dem Schirm wandert ein Schatten in umgekehrter Richtung, nämlich von unten nach oben. Das beweist, daß das Licht, welches von den verschiedenen Linsenpunkten des Meridionalschnittes kommt, sich vorher, nämlich im wagerechten Strich, überkreuzt hat. Nun rücken wir die Linse noch näher an die Lampe, bis der wagerechte Strich auf dem Schirm steht, und bewegen einen senkrechten Bleistift vor der Blende vorbei. Der

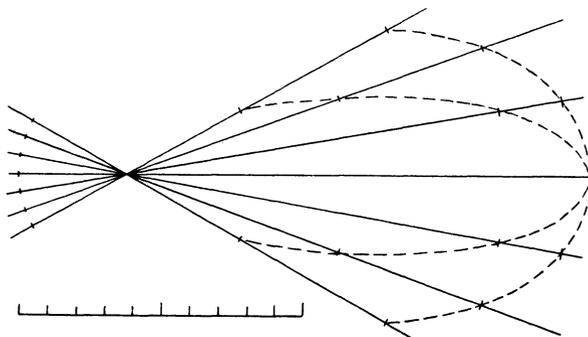


Abb. 52. Bildfeldwölbung.

Schatten im Lichtstrich bewegt sich im gleichen Sinne, ein Zeichen dafür, daß das von den Linsenpunkten der Sagittalebene herkommende Licht sich noch nicht überkreuzt hat, sondern erst in dem entfernteren senkrechten Strich sich sammeln wird.

Die Zerfällung jedes Punktes in zwei weit voneinanderliegende Striche beeinträchtigt die Verwendung unserer Linse für ausgedehntere Bilder sehr; fast noch schlimmer aber ist die ungeheuer starke Krümmung der beiden Flächen, auf denen diese Striche liegen. Diese Flächen sind sehr leicht zu bestimmen. Man braucht nur bei unverändertem Platz des Linsenstieles für einige Linsen- neigungen den Abstand der senkrechten und wagerechten Strichscharfe zu messen und verkleinert auf Linien abzutragen, die um gleiche Winkel gegen die Mittellinie der Zeichnung geneigt sind. Abb. 52 zeigt das Ergebnis solcher Messungen, wobei der Abstand zwischen Lampe und Schirm 2 m war. Da die Mitte der Blende ihren Abstand von der Lichtquelle unverändert behielt, bedeutet diese ein auf einer Kugelfläche ausgebreitetes Ding, das Bild zerfällt in zwei scharf gekrümmte Flächen, so daß mit einer ebenen Platte kein einigermaßen ausgedehntes Bild aufgenommen werden kann. Der Maßstab unter der Zeichnung bedeutet 100 cm.

Dieselben Versuche können mit umgekehrter Linse, Wölbung dem Licht zugewandt, angestellt werden. Im einzelnen wird manches anders, im großen und ganzen aber ergibt sich ungefähr dasselbe in weniger klarer Form.

Wir wollen nun versuchen, welche Erscheinungen unter denselben Versuchsbedingungen der Rand der Linse hervorbringt. Das Mittelloch wird also verdeckt und der Rand freigegeben. Die Linse erhält eine Neigung von etwa  $15^\circ$ , nachdem bei senkrechter Linsenstellung scharf eingestellt war. Darauf nähert man die Linse der Lampe. Auf dem Schirm erscheinen nacheinander Figuren, die ungefähr der Abb. 53 entsprechen, und, wenn man die Linse umdreht, noch verwickeltere. Es sind dies die Anteile, die der Rand zu einer Erscheinung liefert, die man als Koma bezeichnet. Daß diese Lichtverirrungen eine Abbildung gänzlich veriteln, ist offenbar.

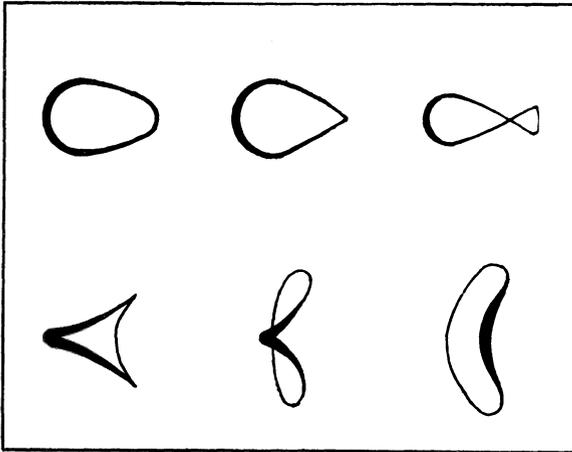


Abb. 53. Koma.

Die Mittel, mit denen man diese Fehler überwinden kann, sind nun nicht so aus unseren Versuchen abzulesen, wie es im vorigen Abschnitt möglich war. Es ist aber immerhin wichtig, die Fehler getrennt aufzuzeigen, damit man mit diesen häufig gebrauchten Namen einen Begriff verbinden kann.

Bei Verwendung der Linse  $10 \text{ } \varnothing \text{ } 15$  treten naturgemäß alle diese Fehler noch stärker hervor. Um so überraschender wirkt der folgende Versuch, bei dem durch eine bloße Verschiebung der Blende eine wunderbare Verbesserung erreicht wird.

Abb. 54 zeigt die Linse  $10 \text{ } \varnothing \text{ } 15$  in der Stellung, die eben als die schlechtere befunden wurde, mit einer von der ebenen Fläche um etwa 35 mm entfernten Blende von 2 cm Durchmesser. Kippt man nun die Linse um ihren Stiel, so bleibt das Bild klar und scharf, selbst über  $30^\circ$  Neigung hinaus. Es tritt schließlich ein Zerfall in die Farben auf; für die einzelne Farbe aber bleibt das Bild recht gut. Astigmatismus und Koma sind verschwunden, und die Bildfeldkrümmung ist zurückgegangen auf die Krümmung einer um den Linsenmittelpunkt gelegten Kugel, wenn auch das Ding auf einer Kugel um den Linsenmittelpunkt liegt. Dabei hat die Blende die sehr beträchtliche Größe von  $f/7,5^1$ .

Die Abbildung deutet an, daß das Bild beim Kippen der Linse ein Stück weit von der Stelle wegrückt, an der es vor dem Kippen der Linse stand.

<sup>1)</sup> Genaueres hierüber bei A. GLEICHEN, Photographische Optik (1905, Leipzig, Göschen) Kap. 9: Die natürliche Blende.

Man wird geneigt sein zu vermuten, daß diese Wanderung ausbleibt, wenn man den Stiel in der Ebene der Blende anbringt. Das ist leicht ausführbar, denn mit einer Parallelmuffe kann man am Linsenstiel gerade in 35 mm Abstand einen Stab gleichlaufend anbringen. Der Versuch zeigt jedoch, daß die Wanderung dann noch größer wird. Bringt man durch umgekehrte Stellung der Muffe den Stiel vor dem Linsenscheitel an, so

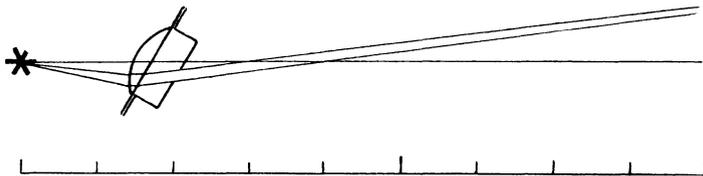


Abb. 54. Der natürliche Blendennort.

wandert das Bild in entgegengesetzter Richtung, kommt dann zum Stillstand und wandert für weiteres Kippen im früheren Sinn. Dazwischen liegt eine Stelle für den Stiel, die dadurch ausgezeichnet ist, daß für kleine Kippungen das Bild unbewegt bleibt. Jetzt weist der Stiel auf den dingseitigen Knotenpunkt der Linse, genauer des Linsenmittelstückes.

### Gerät zu den Versuchen:

#### Schräg zur Achse, Astigmatismus, Bildfeldwölbung, Koma.

2 Klemmfüße.

Lämpchen, 4 Volt, mit gerolltem Faden.

Stromquelle (Batterie oder Transformator), 4 Volt.

Lampenfassung auf Stiel.

Doppelblende mit Deckblenden.

Blende mit 2-cm-Loch, auf Stützen.

2 Kopierklammern.

Stab, 25 cm.

Rohrmuffe.

Winkelmuffe (oder 2 Rohrmuffen und Stab).

Linse 10  $\varnothing$  15 und 10  $\varnothing$  30 in Fassung auf Stiel.

Dünner Stab (Bleistift).

Schirm, stehend oder hangend.

Hilfsschirm (Papierblatt).

Bandmaß, 5 m lang.

(Parallelmuffe mit Stab.)

(Abstellklotz für Linsen.)

(Statt der Klemmfüße sind auch Winkelfüße mit je einem 10 bis 20 cm langen Stiel und Rohrmuffe verwendbar.)

## 11. Verzeichnung.

Der Nutzen der photographischen Verfahren wird wesentlich beeinträchtigt, wenn das Bild gegenüber der Vorlage verzerrt ist. Außer solchen Verzerrungen, die durch schiefe Stellung der Platte oder Vorlage gegen die Achse der Linsen

entstehen, sind vor allem die Verzeichnungen für uns wichtig, die durch falschen Blendenort hervorgebracht werden. Bei der Prüfung von Projektionsobjektiven werden diese bisweilen zu Unrecht beanstandet, während falsche Lichtführung an dem verzeichneten Bild schuld ist. Die Stelle, an der sich das

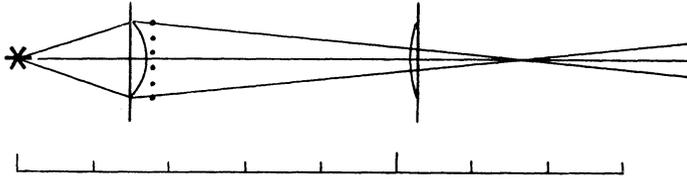


Abb. 55. Abbildung ohne Verzeichnung.

Licht überkreuzt, wirkt wie eine enge Blende; falsche Lichtführung und falscher Blendenort sind also dasselbe. Die Ver-

zeichnung kommt dann zustande, wenn der Maßstab der Abbildung vom Achsabstand des Bildpunktes abhängig ist.

Um die Tatsache der Verzeichnung und die Abhängigkeit vom Blendenort zu zeigen, dienen drei Versuche, bei denen Beleuchtungslinse, Ding, abbildende Linse und Schirm unverändert stehenbleiben und nur die Stellung der Lampe geändert oder eine zweite Beleuchtungslinse eingeschoben wird. Das Ding besteht aus einer Glas-

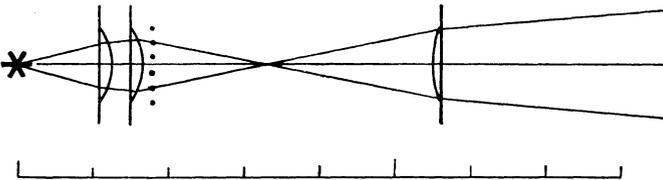


Abb. 56. Tonnenförmige Verzeichnung.

platte mit schwarzer Netzteilung von 1 cm Strichabstand. Man kann sich diese Platte sehr leicht selbst machen, indem man

auf eine ausfixierte Trockenplatte oder eine mit Eiweiß begossene und dann getrocknete Platte mit schwarzer Tusche Striche aufzeichnet. Auch in ein Gelatineblatt geritzte Striche erfüllen den Zweck.

Bei Abb. 55 ist das Licht einer möglichst punktförmigen Lichtquelle mit Hilfe der Linse 10 Ø 15 so geführt, daß es ziemlich bald hinter der Linse 10 Ø 30 sich überkreuzt. Genau läßt sich der Ort nicht angeben, da infolge der sphäri-

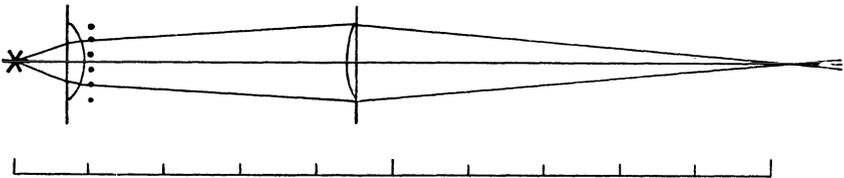


Abb. 57. Kissenförmige Verzeichnung.

schen Abweichung der Beleuchtungslinse ein einheitliches Bild der Lichtquelle nicht entsteht. Es kommt aber für unseren Zweck auf einige Zentimeter Abweichung auch nicht an. Das Ergebnis ist in Abb. 58 links dargestellt.

Stellt man noch eine Linse 10 Ø 15 zwischen Lampe und Beleuchtungslinse, so rückt das Bild der Lichtquelle, also die wirksame Blende, zwischen Ding und abbildende Linse. Der Erfolg dieser durch Abb. 56 dargestellten Anordnung,

eine tonnenförmige Verzeichnung, ist in Abb. 58 in der Mitte dargestellt. Das abgebildete Feld ist wesentlich kleiner als im vorigen Fall, es würde größer sein, wenn die abbildende Linse größeren Durchmesser hätte. Die Lichtführung der Abb. 56 hätte auch dadurch erzielt werden können, daß die Lampe sehr weit abgerückt wird, aber dann wäre das Bild zu dunkel geworden.

Rückt man nach Entfernung der Hilfslinse die Lampe sehr nah an die Beleuchtungslinse, wie das Abb. 57 andeutet, so rückt die wirksame Blende (Bild der Lichtquelle) weit jenseits der abbildenden Linse, und es kommt die kissenförmige Verzeichnung heraus, die rechts in Abb. 58 dargestellt ist. Wieder ist das Gesichtsfeld klein, weil der Durchmesser der Linse  $10 \text{ } \varnothing \text{ } 30$  bei weitem nicht genügt, um das gesamte Licht zu fassen.

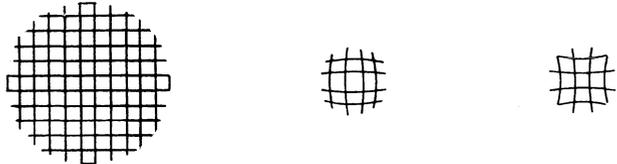


Abb. 58. Richtige Zeichnung, tonnenförmige und kissenförmige Verzeichnung.

In einer ganz erstaunlichen Weise kann man die kissenförmige Verzeichnung mit einem guten, starken Mikroskopobjektiv zeigen. Der Versuch ist dann anzuraten, wenn Anlaß zu einer gründlicheren Besprechung des Mikroskopes vorliegt. Er hat den Vorzug, daß zwischen einer wichtigen Eigenschaft des Mikroskopobjektives und dem Maß der Verzeichnung eine einfache Beziehung besteht. Der Versuch ist nichts anderes, als eine Umkehrung des von ERNST ABBE erdachten Prüfverfahrens auf Vorhandensein der erwähnten Eigenschaft.

Abb. 59 zeigt, etwas vergrößert, den Querschnitt eines Mikroskopobjektives von der numerischen Apertur 0,85. Dicht über ihm ist ein Stückchen Drahtnetz von etwa  $\frac{1}{2}$  mm Maschenweite angebracht. In manchen Fällen läßt es sich nach Abschrauben der oberen Fassung einfach einlegen, in anderen muß man sich irgendwie ein Zwischenstück oder Einsatzstück machen, um das Netz anbringen zu können. Das so ausgerüstete Objektiv wird an den Tubus angeschraubt und dieser wagerecht gelagert. Dicht vor das Oberende des Tubus setzt man die Punktlichtlampe, die nach den anderen Seiten abgeblendet ist. Etwa 3 cm vor der kleinen Linse des Objektives stellt man eine Mattscheibe von 20 cm Größe auf. Das Bild des Drahtnetzes auf der Mattscheibe sieht etwa so aus, wie Abb. 60 verkleinert darstellt.

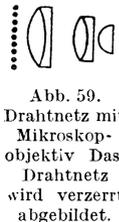


Abb. 59. Drahtnetz mit Mikroskopobjektiv. Das Drahtnetz wird verzerrt abgebildet.

Zur Erklärung dieses Ergebnisses dient Abb. 61. Ein Mikroskopobjektiv muß vor allem so berichtigt sein, daß ein Ding *C* im Bilde *A* von allen Zonen am gleichen Ort und in gleicher Größe abgebildet wird. Diese Eigenschaft ist in Abb. 61 dadurch dargestellt, daß die einander entsprechenden Strahlen, von *A* und *C* aus gezogen, zwei Hilfskreise in übereinstimmenden Achsabständen treffen. Es entspricht das der Erfüllung der Sinusbedingung, von der im Abschnitt über optische Rechnungen die Rede sein wird. Zu dieser Eigenschaft des Objektives kommen nun die Versuchsbedingungen, die dadurch bestimmt

sind, daß in *A* eine punktförmige Lampe und in *B* das abzubildende Drahtnetz angebracht ist. Die gezeichneten Linien geben etwa die Schatten der Drähte an, und man sieht, wie in *D* die Verzeichnung zustande kommt. Verzeichnungsfrei wäre die Abbildung,

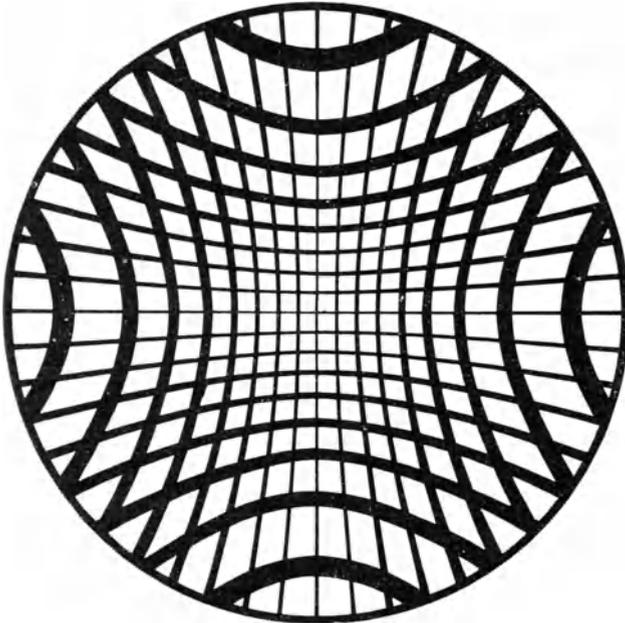


Abb. 60. Das verzerrte Bild des Drahtnetzes.

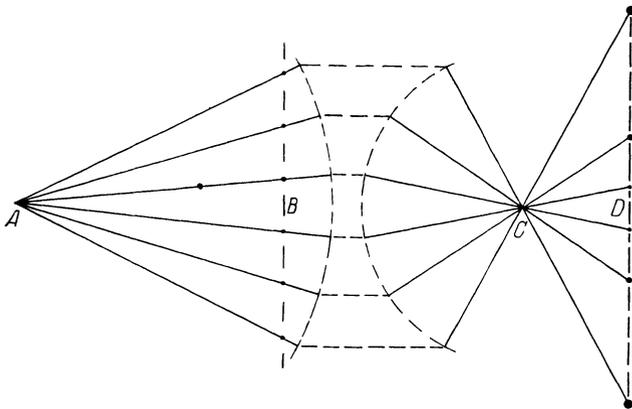


Abb. 61. Entstehung der Verzeichnung.

wenn das Verhältnis der trigonometrischen Tangenten der Winkel, die dingsseitiges und bildseitiges Strahlenbündel mit der Achse machen, für alle Bildpunkte dasselbe wäre. Durch die Eigenschaften, die das Objektiv für den Lichtpunkt und sein Bild hat, ist aber diesen Strahlenbündeln Konstanz des Sinusverhältnisses aufgezwungen. Die Abb. 60 beruht also auf der Vertauschung von Tangens und Sinus. Über die Verwendung dieser Zeichnung zur Prüfung der Mikroskopobjektive auf Erfüllung der Sinusbedingung vgl. S. CZAPSKI, *Grundzüge der Theorie der optischen Instrumente*, 3. Aufl. S. 164, und W. VOLKMANN, *Praxis der Linsenoptik*, S. 147. Über eine auf derselben Grundlage beruhende Zeichnung zur Messung der numerischen Apertur von Trockensystemen, die als Aperturscheibe bei Leppin & Masche, Berlin, Engelufer 27, käuflich ist, vgl. W. VOLKMANN, *Anleitung zu den wichtigsten physikalischen Schulversuchen*, S. 194.

**Gerät zu den Versuchen über Verzeichnung.**

- 5 Klemmfüße *C* (oder *A*).
- Punktlicht mit Zubehör.

2 Linsen 10  $\varnothing$  15 in Fassung auf Stiel.

Linse 10  $\varnothing$  30 in Fassung auf Stiel.

Bildhalter auf Stiel.

Netzteilung auf Glas.

Mikroskopobjektiv mit Drahtnetz und Tubus.

Mattscheibe.

Halter für die Mattscheibe.

(Abstellklötze für Linsen.)

(Statt der Klemmfüße sind auch Winkelfüße mit je einem 10 bis 20 cm langen Stiel und Rohrmuffe verwendbar.)

## 12. Spiegelflecke.

An jeder Linsenfläche wird ein Teil des Lichtes zurückgeworfen. Auf diese Weise kommen Spiegelbilder zustande, die unter Umständen in unangenehmer Weise stören. Vermeiden läßt sich die Entstehung der Spiegelbilder nicht. Aber ihre Anzahl kann dadurch vermindert werden, daß man aufeinanderfolgende Linsen zusammenkittet. Das bedingt, daß aufeinanderfolgende Flächen denselben Krümmungs-Halbmesser bekommen. Man hat also die Verfügung über die Linsenform geopfert, um die Spiegelung zu vermeiden. Zugleich hat man die Verfügung über die Linsenabstände geopfert, und dafür kann nicht durch die Linsendicken allein Ersatz geschaffen werden. Man kann den Luftraum zwischen zwei Linsen geradezu als eine Luftlinse auffassen, die beim Verkitten eingebüßt wird. Was an Verbesserungen mit zwei getrennt stehenden Linsen erreicht werden kann, erfordert 3—4 verkittete Linsen. Bei sehr großen Linsen und bei Linsensätzen, die starker Erwärmung ausgesetzt werden müssen, ist das Verkitten deshalb nicht angängig, weil die verschiedenen Glasarten sich beim Erwärmen verschieden ausdehnen. Einigermaßen unschädlich kann man die Spiegelungen dadurch machen, daß man vermeidet, Spiegelbilder in die Nachbarschaft der Stellen zu bekommen, die beobachtet oder benutzt werden.

Mit unseren Linsen lassen sich leicht einige Fälle darstellen, die in der Photographie besonders störend sind und als sogenannte Spiegelflecke ein Glas geradezu unbrauchbar machen. Bei Abb. 62 wirkt die ebene Fläche der Linse 10  $\varnothing$  30 als Spiegel, und 2mal kommt die Linsenwirkung der gekrümmten Fläche zur Geltung. Daher stimmt die Ebene, in der das Lämpchen steht und zugleich abgebildet wird, überein mit der Einstellebene für sehr entfernte, rechts von der Linse liegende Dinge. Nehmen wir nun an, das Lämpchen sei nicht als greifbares Ding da, sondern sei das reelle Bild einer rechts von der Linse stehenden Lampe oder gar der Sonne, so wird es die Platte an dieser Stelle so stark beleuchten, daß viel Licht den in Abb. 62 gezeichneten Weg nimmt und ein zweites

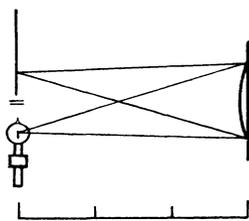


Abb. 62. Spiegelfleck durch Bild eines Bildpunktes.

Bild am achsensymmetrischen Ort auf der Platte entsteht. Die Aufnahme ist durch dieses zweite Bild natürlich verdorben.

Eine zweite Art von Spiegelflecken wird durch Abb. 63 erläutert. Die Linse 10  $\times$  30 steht mit der ebenen Seite zum einfallenden Licht gewandt, das Lämpchen, diesmal eine Punktlampe, etwa 4,5 cm vor der Linse. Das an der ersten Fläche gespiegelte Licht gelangt nicht hinter die Linse. Die Spiegelung an der gekrümmten Fläche zusammen mit zweimaliger Brechung an der ebenen Fläche gibt ein helles Spiegelbild weit vor der Linse, das durch die nach links gehenden Strahlen angedeutet ist. Uns geht aber das Licht an, das nach der Brechung an der Ebene und Spiegelung an der Kugelfläche abermals von der Ebene gespiegelt und dann von der Kugelfläche gebrochen wird. Es bildet die Lampe recht scharf und immer noch auffällig hell 30 cm hinter der Linse ab. Hier müßte die Platte stehen, wenn eine Aufnahme der links von der Linse befindlichen Ferne beabsichtigt wäre. Es sei nun an der Stelle, an der beim Versuch die Lampe steht, eine enge Blende, so wird sie von hellen Teilen der aufzunehmenden Gegend, insbesondere also von hellen

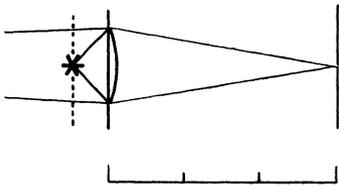


Abb. 63. Spiegelfleck durch Bild der Blende.

Wolken, Licht erhalten. In welcher Richtung dieses Licht auch durch die Blende fallen mag, ein sehr merklicher Teil davon wird auf dem beschriebenen Wege die Blende mitten auf der Platte abbilden als einen recht scharfen, hellen Fleck, der die Aufnahme empfindlich stört.

Eine ungewöhnlich deutliche Abbildung der verschiedenen Spiegelungen hat E. GOLDBERG auf S. 33 seines Buches: *Der Aufbau des photographischen Bildes* (W. Knapp, Halle 1922) mitgeteilt. Auf den folgenden Seiten desselben Buches entwickelt der Verfasser ein Verfahren, die Gesamtwirkung der Spiegelungen, die sich in einer Minderung der Helligkeitsunterschiede der Einzelheiten des Bildes ausdrückt, zahlenmäßig zu erfassen. Auf diesem GOLDBERGSchen Verfahren beruht der folgende Versuch:

Ein Episkop ist auf einen Kasten gesetzt, dessen Inneres schwarz ausgekleidet ist und dessen Deckelwand ein Loch von 1 cm im Quadrat hat. Dieses Loch stellt ein vollkommenes Schwarz dar. Von außen ist diese Wand bis auf das Loch mit sehr weißem Papier belegt. Das Bild dieses vollkommen schwarzen Quadrates erscheint nun auf dem Schirm keineswegs schwarz, sondern nur grau, denn es ist aufgehellt durch das gespiegelte Licht. Man kann das Grau messen, indem man das Bild des schwarzen Loches auf ein recht weißes Papier von gerade passender Größe fallen läßt und das Bild der rein weißen Umgebung des Loches auf graues Papier. Das graue Papier ersetzt man so lange durch helleres, bis beide Flächen gleich hell erscheinen. Ein genau passendes Grau wird man kaum haben, es genügt aber ein Eingrenzen zwischen zwei Grauwerte. In den Ostwaldschen Graupapieren hat man billige Papiere von hinreichend genau bestimmtem Zurückwerfungsvermögen. Man wird erstaunt sein, wie sehr das Schwarz aufgehellt ist, und wird verstehen, daß nur kontrastreiche Bilder sich

zum Bildwurf vom Papierbild eignen und daß völlige Verdunkelung des Raumes nötig ist.

In derselben Weise kann man die Aufhellung beim Bildwurf vom Glasbild messen, indem man eine Glasscheibe, auf die ein undurchsichtiges Fleckchen von 0,5 bis 1 cm im Quadrat geklebt ist, in die Bildbühne setzt.

#### Gerät zu den Versuchen über Spiegelflecke.

3 Klemmfüße *C* (oder *A*).

Lämpchen, 4 Volt, mit gerolltem Faden.

Stromquelle (Batterie oder Transformator), 4 Volt.

Punktlichtlampe im Gehäuse.

Widerstand.

Mattscheibe oder Papierschirm mit Stiel.

Kleiner Blendschirm mit Halter.

Kasten mit Loch (vollkommenes Schwarz).

Episkop.

Weißer und graue Blätter (OSTWALDS Graustufen).

Bildwerfer.

Glasplatte mit undurchsichtigem Feld.

(Statt der Klemmfüße sind auch Winkelfüße mit je einem 10 bis 20 cm langen Stiel und Rohrmuffe verwendbar.)

## Dritter Teil.

### Rechnende Optik.

#### 13. Vorbemerkungen zur rechnenden Optik.

In den früheren Abschnitten, die sich gänzlich auf Versuch und Erfahrung mit gerade vorhandenen Linsen stützten, war die Kenntnis des Brechungsgesetzes nicht notwendig, von jetzt ab muß sie aber vorausgesetzt werden. Damit ist auch gesagt, daß man, was jetzt folgt, erst auf einer Unterrichtsstufe bringen kann, auf der die Winkelfunktionen ein hinlänglich geläufiges Arbeitsmittel sind.

Gewöhnlich wird als Ziel der optischen Rechnungen angesehen, Formeln zu finden, die alle Eigenschaften und Leistungen einer Linse durch wenige bequem zu messende Größen ausdrücken. Mit großen Erwartungen wird ein umfassender Ansatz gemacht, bald kommt eine Einschränkung nach der andern, und die Formeln gelten dann nur für unendlich kleine, unendlich dünne Linsen und für einen der Achse unendlich nahe liegenden fadenförmigen Raum. Diesen nicht ganz mühelosen und wegen der vielen Näherungsbetrachtungen für den Schüler nicht ungefährlichen Weg können wir uns sparen, denn wir haben die Erfahrung gemacht, daß die verschiedenen Teile einer beliebigen Linse verschieden wirken. Es kann also auch keine zutreffende Formel geben, die gleichzeitig für verschiedene Teile jeder Linse gilt. Im Besitz dieser Erkenntnis werden wir von vornherein darauf verzichten, zusammenfassen zu wollen, was im allgemeinen nicht zusammenfaßbar ist. Wir werden nicht einen beliebigen Strahl mit dem in der Achse verlaufenden vergleichen, wie das sonst üblich ist, sondern wir werden jeden Strahl mit dem zur Achse symmetrischen zusammenfassen oder auch die Strahlen eines zur Achse symmetrischen Kegels, der durch eine schmale Ringblende ausgesondert ist.

Andererseits haben wir gefunden, daß es durch zweckmäßige Wahl der Gestalt und des Stoffes der Linsen, ihrer Abstände und der Stellung der Blenden möglich ist, Linsenfolgen herzustellen, bei denen ein ausgezeichnetes Zusammenarbeiten sehr verschiedener Linsenteile erreicht wird. Es ist nicht Aufgabe der Schule, solche Linsenfolgen zu errechnen. Es genügt, die Möglichkeit solchen Erfolges erkannt zu haben. Aber die Durchrechnung eines einzelnen Strahlenkegels gewinnt an Wert, wenn man weiß, daß sie in den ausgewählten Fällen abgeglichener Linsenfolgen gleichzeitig die Gesamtwirkung dieser darstellt.

Es darf nicht unterlassen werden, darauf hinzuweisen, daß ein gewisses Maß der Abweichung von genauer Vereinigung einerseits wegen der Beugung unvermeidlich, andererseits wegen der Struktur der Netzhaut und der photographischen Platte auch unschädlich ist. Da die Berechnungen erst auf der Oberstufe möglich sind, handelt es sich bei diesen Bemerkungen um Zurückgreifen auf Bekanntes.

Die Berechnungen, die wir ausführen werden, beruhen auf geometrischen Beziehungen, die aus Figuren abzulesen sind. Da aber gewisse Linien Lichtstrahlen bedeuten, besteht zunächst in diesen Linien, dann aber auch in der ganzen Zeichnung ein Unterschied von Vorwärts und Rückwärts. Es mag vielleicht anfänglich einfacher erscheinen, hiervon abzusehen, früher oder später erweist es sich aber als ein Fehler, denn die Formeln werden, weil ein vorhandener Unterschied nicht ausgedrückt ist, um eine mögliche Aussage ärmer; sie werden mehrdeutig, verleiten zu Verwechslungen, ihr Wert ist gemindert. Es ist deshalb zweckmäßig, von vornherein das wesentliche Merkmal der Richtung mit aufzunehmen. Wenn dadurch manche Formel ein etwas anderes Aussehen bekommt als in der Planimetrie, so mag das als erwünschte Erinnerung daran gelten, daß es sich hier nicht um mathematische Übungsaufgaben, sondern um praktische Verwendung des in der Mathematik Gelernten handelt.

Alle Zeichnungen werden so entworfen, daß das Licht von links nach rechts geht. Wird durch Spiegelung diese Richtung umgekehrt, so bleibt doch in der ganzen Zeichnung die ursprüngliche Lichtrichtung für die Vorzeichenbestimmung entscheidend. Die Richtung von links nach rechts erhält das positive Vorzeichen. Die Strecken werden von den brechenden Flächen an gerechnet, demgemäß hat eine nach links gewölbte Fläche einen positiven, eine nach rechts gewölbte einen negativen Radius. Strecken, die nicht an einer brechenden Fläche anfangen, werden im allgemeinen als Unterschied zweier an einer brechenden Fläche anfangenden Strecken bestimmt. Abstände von der Zeichnungsachse werden nach oben positiv, nach unten negativ gerechnet. Was daraus für das Vorzeichen von Winkeln folgt, ergibt sich aus dem Vorzeichen der Seiten des Dreieckes, in dem der Winkel liegt. Es sind auch andere Vorzeichenfestsetzungen möglich und tatsächlich im Gebrauch gewesen, die hier gegebene hat sich aber allmählich durchgesetzt und wird heute fast allgemein in der rechnenden Optik angewendet.

#### 14. Die Brechung an einer Kugelfläche.

Die Abb. 64, die wir der ersten Berechnung zugrunde legen, hat den Vorzug, daß alle in Betracht zu ziehenden Strecken positiv sind. Diesem Vorteil zuliebe ist die optisch nicht ganz einfache Voraussetzung gemacht, daß zusammenlaufendes Licht zur Verfügung steht. Eine Lichtquelle kann das unmittelbar nicht geben, sondern so beschaffenes Licht kann nur von einer sammelnden Linse oder einem sammelnden Spiegel herkommen. Zur Ergänzung wird dann die Rechnung für andere Fälle wiederholt werden.

Durch eine schmale Ringblende fällt ein nach  $O$  zusammenlaufender Lichtkegel auf die Kugelfläche, deren Mittelpunkt  $C$  auf der Kegelachse liegt. Die

Kugelfläche trennt zwei Gebiete mit den Brechungszahlen  $n$  und  $n'$  voneinander,  $n'$  ist größer als  $n$ . Die Brechung an der Kugel bewirkt, daß der Lichtkegel schon in  $O'$  zusammenläuft. Da  $C$ ,  $O$  und  $O'$  rechts vom Scheitel  $S$  der Kugelfläche liegen, sind ihre Abstände  $r$ ,  $s$  und  $s'$  positiv anzusetzen. In den Dreiecken  $CBO$  und  $CBO'$  ist, weil sich die Seiten wie die Sinus der Gegenwinkel verhalten:

$$\frac{s-r}{p} = \frac{\sin i}{\sin \varphi} \quad \text{und} \quad \frac{s'-r}{p'} = \frac{\sin i'}{\sin \varphi},$$

multipliziert man beiderseits in den Gleichungen mit

$$n \quad \text{und} \quad n'$$

und setzt nach dem Brechungsgesetz:

$$n \cdot \sin i = n' \cdot \sin i',$$

so wird:

$$n \frac{s-r}{p} = n' \frac{s'-r}{p'}. \quad 1)$$

Wiederholen wir diese Überlegung an der Abb. 65, so ändert sich im Dreieck  $CBO'$  nichts, im Dreieck  $CBO$  werden  $s$  und  $p$  negativ, für die Differenz der Schnittweite  $SO$  und des Radius tritt nun ihre Summe ein, die sich aber, weil  $s$  negativ ist, als  $r-s$  schreibt, es ist aber

$$\frac{r-s}{-p} = \frac{s-r}{p},$$

also ebenso wie zuvor.

Bei der Abb. 66, die eine virtuelle Abbildung an zerstreuer Fläche darstellt, sind sämtliche Strecken negativ. Zähler und Nenner haben dieselbe Form wie im

ersten Beispiel, bis auf die negativen Vorzeichen, die nach Erweiterung sämtlicher Brüche mit  $-1$  verschwinden.

In Abb. 67 ist abweichend von den anderen Fällen angenommen, daß  $n$  größer ist als  $n'$ , so daß die Trennfläche Sammelwirkung hat. Für Dreieck  $CBO$

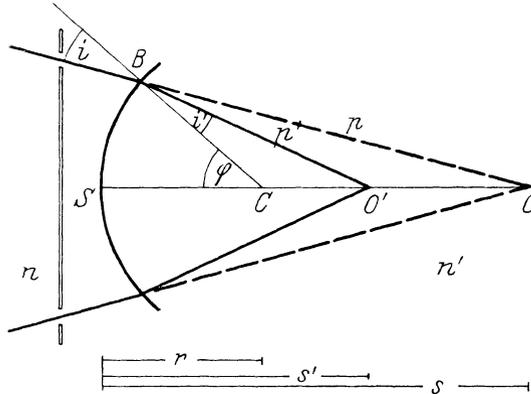


Abb. 64. Brechung an einer Kugelfläche I.

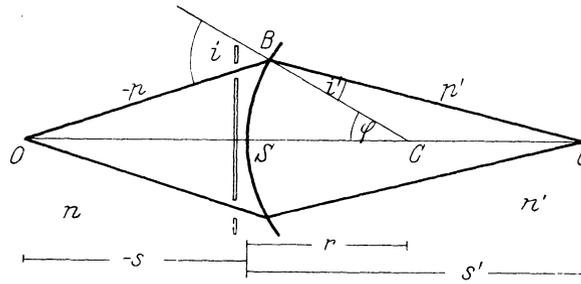


Abb. 65. Brechung an einer Kugelfläche II.

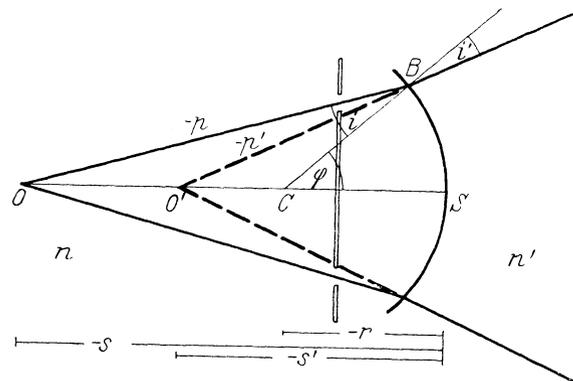
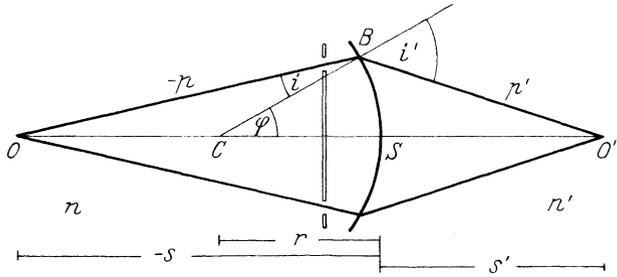


Abb. 66. Brechung an einer Kugelfläche III.

ist es wie im vorigen Beispiel, für Dreieck  $CBO'$  kommt die Summe der Schnittweite und des Radius in Betracht; sie hat, weil  $r$  negativ ist, die Form  $s' - r$ , ist also in Übereinstimmung mit Beispiel 1.

Diese und die weiteren möglichen Fälle führen infolge der vereinbarten Vorzeichenwahl auf genau die gleiche Formel. Dieser große Vorteil wäre nicht erreicht worden, wenn wir, wie sonst in der Planimetrie, alle Dreieckseiten positiv gerechnet hätten. Die Formel hat noch einen weiteren Vorteil. Die Trennungsfläche, also auch ihren Radius, können wir beiden Gebieten zurechnen, dann kann man sagen: Die linke Seite der Gleichung enthält nur Angaben über den Lichtverlauf vor der Brechung, die rechte nur Angaben über den Lichtverlauf nach der Brechung. Ferner stimmen beide Seiten der Gleichung in der Form genau überein.



Die Gleichung läßt sich natürlich auf weitere Brechungen anwenden, so daß der Lichtkegel allmählich durch eine ausgerichtete Linsenfolge (zentriertes Linsensystem sagte man früher) hindurch verfolgt werden kann. Zwischen je zwei Anwendungen der Formel sind aber aus den Werten für  $s' - r$  und  $p'$ , die von der zuletzt betrachteten Fläche aus gezählt waren, die Werte für  $s - r$  und  $p$ , gezählt von der neuen Fläche aus, zu berechnen. Es ist nicht möglich, diese Zwischenrechnung mit Formel 1) zu einer einzigen übersichtlichen Formel zusammenzufassen, die den Dingraum vor der ersten Brechung mit dem Bildraum nach der letzten Brechung in Beziehung setzt. Einschränkende Festsetzungen, zu deren Einführung jetzt aber noch keine Veranlassung vorliegt, können erst die Formel so vereinfachen, daß diese Zusammenfassung möglich ist.

### 15. Vergrößerung bei Abbildung durch eine Kugelfläche.

In einem Abstände  $+y$  von der Achse der Zeichnung, die durch den Mittelpunkt  $C$  der trennenden Kugelfläche geht, liegt ein Lichtpunkt. Sein Abbild nach der Brechung wird einen Abstand  $y'$  haben, über dessen Vorzeichen noch nichts gesagt werden kann. Das Verhältnis  $y' : y$  heißt die Vergrößerung; ein positives Vorzeichen gibt aufrechtes, ein negatives umgekehrtes Bild an.

Der Achsabstand  $y$  ist für die Anschauung etwas abstrakt, wir wollen zur Erleichterung der Anschauung einen zweiten hellen Punkt im Achsabstand  $-y$  zu Hilfe nehmen, der dem gegebenen Punkt genau gegenüber liegt (Abb. 68). Es sind nun die beiden Punkte abzubilden, und es ist dann festzustellen, welcher Abstand  $2y'$  der Bilder dem Abstand  $2y$  der hellen Punkte entspricht. (Nach unserer Vorzeichenfestsetzung ergibt sich  $2y$  so: vom Endpunktsabstand  $+y$

ist der Anfangsabstand  $-y$  abzuziehen; für das Bild ergibt sich dann  $-2 y'$ . Mit demselben Recht kann man Ende und Anfang umgekehrt ansetzen und erhält dann  $-2 y$  und  $+2 y'$ .) Wir überlegen nun, daß die Achse der Zeichnung optisch nichts voraus hat vor jeder anderen durch  $C$  gelegten Geraden. Wir können demnach sowohl die Abbildung des gegebenen, wie die des zugefügten Lichtpunktes durch Kegel bewirken, deren Achsen optische Achsen der Kugelfläche sind, und wir können durch eine Ringblende, deren Mittelpunkt in  $C$  liegt, die Lichtkegel für beide Abbildungen zugleich aussondern<sup>1)</sup>. Diese Blende und die

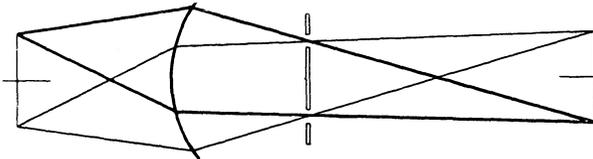


Abb. 68. Abbildung durch eine Kugelfläche I.

Lichtkegel, die von ihr durchgelassen werden, sind in der Abbildung gezeichnet, und zwar für den ursprünglich gegebenen Punkt mit dicken, für den

Hilfspunkt mit dünneren Linien. Beide Abbildungen sind nun in einer Weise hergestellt, die durchaus der Abb. 65 entspricht.

Für die Berechnung brauchen wir nur einen dieser Strahlen und einige Hilfslinien. Um die Abbildung damit nicht zu belasten, benutzen wir eine neue Zeichnung, Abb. 69, die der bequemerem Vorzeichen wegen für den Hilfspunkt ausgeführt ist. Die Achse der vorigen Zeichnung ist hier in unterbrochenem

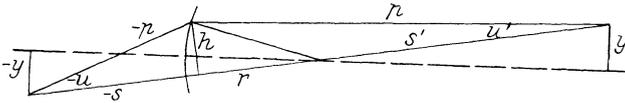


Abb. 69. Abbildung durch eine Kugelfläche II.

Strich durchgeführt,  $-p$  und  $p'$  sind Strahlen des Hilfspunktes,  $-s$ ,  $r$  und  $s'$  ist die Achse des zur Abbildung des

Hilfspunktes benutzten Kegels,  $-y$  und  $y'$  sind die Achsabstände des Hilfspunktes und seines Bildes. Die Zeichnung ergibt unter Weglassung der zunächst den Zählern vorzusetzenden Minuszeichen:

$$\frac{y}{y'} = \frac{s - r}{s' - r},$$

letzteres ist aber nach 1)

$$= \frac{n' p}{n p'},$$

also ist:

$$\frac{n \cdot y}{p} = \frac{n' \cdot y'}{p'},$$

multipliziert man beiderseits mit  $h$ , so ergibt sich:

$$n \cdot y \cdot \sin u = n' \cdot y' \cdot \sin u'. \tag{2}$$

In dieser Formel sind Dingraum und Bildraum reinlich voneinander getrennt, es kommt kein Stück mehr vor, das beiden gemeinsam ist, wie etwa  $r$

<sup>1)</sup> Die Lichtkegel werden hierdurch, genau genommen, als elliptische ausgeblendet. Ist  $y$  so groß, daß diese Elliptizität merklich wird, so kann man vorsichtiger wie bei Abb. 70 verfahren.

in Formel 1). Dieser Umstand zusammen mit der Invariantenform lassen hoffen, daß sie geeignet sei, über beliebig viele Brechungen hinweg den Dingraum vor der ersten Brechung mit dem Bildraum nach der letzten Brechung in Beziehung zu bringen. Aber der Weg, auf dem die Formel 2) erhalten wurde, erlaubt uns nicht, die unveränderte Geltung dieser Formel für weitere Brechungen zu behaupten, denn von den weiteren Lichtkegeln kann nur einer den Krümmungsmittelpunkt der nächsten Fläche enthalten. Wir wollen nachträglich diese Beschränkung loszuwerden suchen; ohne Opfer wird das aber nicht gehen, wir werden eine andere Beschränkung dafür eintauschen.

In der Abb. 70 ist zu den beiden Punkten im Achsenabstand  $y$  und  $-y$  noch ein Punkt auf der Achse gefügt, der denselben Abstand von der brechenden Fläche hat wie diese. Für jeden der drei Punkte ist ein Lichtkegel gezeichnet, der den Krümmungsmittelpunkt  $C$  der brechenden Fläche auf seiner Achse hat. Die Lichtkegel sind diesmal gesondert ausgeblendet, um dem Bedenken zu begegnen, daß eine gemeinsame Blende, wie sie in Abbildung 68 angewandt ist, genau genommen keine Kreiskegel, sondern elliptische Kegel ausblendet.

Bildseitig sind zwei Kegel nicht bis zum Bildpunkt durchgeführt, um die Hilfslinien klarer hervortreten zu lassen, auf denen die Schlüsse

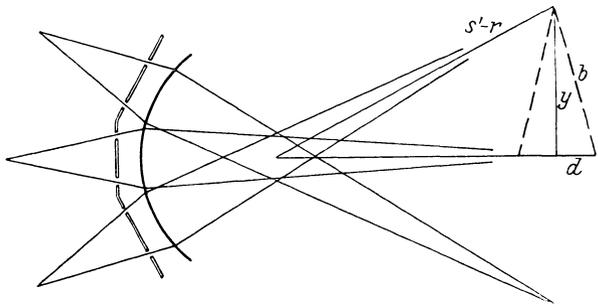


Abb. 70. Abbildung durch eine Kugelfläche III.

beruhen. Unser Ziel ist, die Beweislast, wenn auch in eingeeengter Form, von den beiden Kegeln, die nur für eine Brechung axial sind, auf den einen Kegel zu übertragen, der bei allen weiteren Brechungen axial bleibt. Der auf der Achse der Zeichnung liegende Bildpunkt liegt um die Strecke  $d$  von der Ebene entfernt, in der die beiden anderen Bildpunkte liegen. Dieser Abstand  $d$  ist das Hindernis, das überwunden werden muß, denn wenn wir etwa die zweite brechende Fläche erst hinter den Bildpunkten haben, so liegt der axiale Bildpunkt dieser Fläche näher als die beiden andern. Es ist offenbar, daß das zweite Bild des Achsenpunktes dann von der Ebene, in der die zweiten Bilder der beiden anderen Punkte liegen, noch weiter abrücken muß. Allgemein also widerspricht die Strecke  $d$  der Übertragung des Schlusses von einer auf beliebig viele Brechungen, und es kommt darauf an, zu zeigen, daß unter Umständen dieses widerspenstige  $d$  vollkommen unschädlich wird.  $d$  ist die halbe Grundlinie eines gleichschenkligen Dreiecks mit den beiden Schenkeln  $b$ , und dieses Dreieck ist ähnlich einem, das  $b$  zur Grundlinie und  $(s' - r)$  zu Schenkeln hat. Es ist also:

$$(s' - r) : b = b : 2d$$

oder:

$$d = \frac{1}{2} \frac{b^2}{(s' - r)}.$$

Nun kann  $b^2$  höchstens gleich  $2y^2$  sein, nämlich für den Zentriwinkel  $90^\circ$ . Es ist also

$$\frac{1}{2} b^2 < y^2 < b^2.$$

Aus diesen beiden Beziehungen ergibt sich:

$$d < \frac{y^2}{s' - r}.$$

Diese Formel besagt: Wenn wir, von einer vorläufigen Annahme über die Größe von  $y'$  ausgehend, dieses, sagen wir, auf  $1/10$  seines Wertes verkleinern, so hat das zur Folge, daß  $d$  nicht nur auch auf  $1/10$ , sondern auf weniger als  $1/100$  abnimmt. Diese Eigenschaft von  $d$  ist nun für unsere Schlüsse von entscheidender Bedeutung. Unser Bedenken war ja, daß dieses  $d$  von Brechung zu Brechung allmählich anwachsen kann. In dieser mehr als quadratischen Abnahme haben wir das Mittel, unter allen Umständen nicht nur den Fehler des ersten  $d$ , sondern auch den Gesamtfehler nach beliebig vielen Brechungen unter jedes

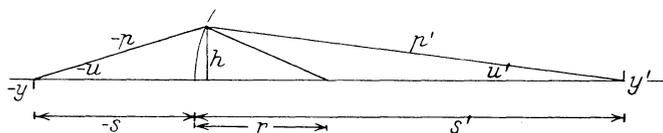


Abb. 71. Abbildung durch eine Kugelfläche IV.

vorgeschriebene Maß zu bringen, ohne daß gleichzeitig  $y$  auf annähernd gleiche Kleinheit herabsinkt.

Auf Grund der Abb. 68 und 69 abgeleitet, war die Formel für große  $y$ , aber nur für eine Brechung gültig, jetzt gilt sie für beliebig viele Brechungen, aber nur für kleine  $y$ . Damit ist der Vorteil, den wir erreicht haben, und das Opfer, mit dem wir ihn erkaufte haben, ausgedrückt.

Die Überlegungen für  $y$  sind die gleichen wie für  $y'$ .

Es ist ratsam, diese Grenzbetrachtung, die einzige, die in der Reihe dieser Überlegungen vorkommt, in aller Ruhe und Umständlichkeit durchzuführen und sich nicht darauf zu verlassen, daß der Sinn des Verfahrens vom mathematischen Unterricht her bekannt ist. Den meisten Schülern macht eine Grenzbetrachtung solche Schwierigkeiten, daß sie erst nach wiederholten Anläufen dieses Hindernis richtig zu nehmen wissen. Die ersten Male kommen sie wohl mit einiger Nachhilfe hinüber, aber ohne recht zu wissen, wie. Es genügt auch nicht, wenn mehrfache Ausführung der Rechnung nach demselben Schema den Mut zu dem Sprung ins Ungewisse steigert, bei dem man sonderbarerweise immer richtig auf die Füße fällt. Sondern Sinn, Zweck und Notwendigkeit des Verfahrens und die Bedingungen seiner Ausführbarkeit müssen wirklich begriffen werden, und das braucht nicht nur Einsicht, sondern auch Gewöhnung.

Bei Beschränkung auf kleine  $y$  und  $y'$  können wir also die Abb. 68 nun ersetzen durch Abb. 71. Mit dieser Einschränkung ihres Geltungsbereiches ist die Formel

$$n \cdot y \cdot \sin u = n' \cdot y' \cdot \sin u' \quad 2)$$

auch für jede folgende Brechung und damit für eine ganze ausgerichtete Linsenfolge gültig. Die Beschränkung auf kleine  $y$  beeinträchtigt den Wert der Formel

fast gar nicht. Für Linsen, bei denen weder die verschiedenen Zonen gleich große Bilder zeichnen, noch verschieden große Dinge von einer Zone mit derselben Vergrößerung abgebildet werden, ist ein Zusammenfassen der Formel ohnehin nicht möglich, und für Linsenfolgen, die so abgeglichen sind, daß die Wirkung aller Teile einheitlich ist, gilt die Formel eben unbeschränkt.

Aus der Formel 2) kann zunächst die wichtige Folgerung gezogen werden, daß eine Linsenfolge dann mit allen Zonen gleiche Vergrößerung liefert, wenn für jede Größe des Winkels  $u$  das Verhältnis  $\sin u : \sin u'$  denselben Wert hat. Diese als Sinusbedingung benannte Beziehung hat große Bedeutung für Mikroskopobjektive, weil bei ihnen die Winkel  $u$  bis über  $60^\circ$  hinaus benutzt werden, und für astronomische Fernrohre, weil bei ihnen das Bild mit sehr starken Okularen betrachtet wird, aber auch für photographische Objektive großer Öffnung.

Die Formel 2) spricht eine für die Optik ungemein wichtige Lehre aus, sie bedeutet für die Optik ungefähr dasselbe, wie die sogenannte goldene Regel der Mechanik (der Satz von der Erhaltung der Arbeit) für die Technik. Fängt die erste Linse einer Linsenfolge von einem Ding der Größe  $y$  einen Lichtkegel von der Öffnung  $u$  auf, so kann ein größeres Bild  $y'$  immer nur gewonnen werden, indem die Lichtkegel einen kleineren Öffnungswinkel  $u'$  erhalten, und eine Konzentration des Lichtes, also  $u'$  größer als  $u$ , ist nur möglich, wenn das Bild  $y'$  kleiner wird als das Ding  $y$ . Es ist dagegen genau so wenig etwas zu machen, wie dagegen, daß man in der Mechanik an Kraft einbüßt, was man am Wege gewinnt oder am Weg einbüßt, was man an Kraft gewinnt. Da nun nicht der Winkel selbst, sondern sein Sinus das richtige Maß für diese Beziehung ist, nennt man den auf den Randstrahl bezogenen  $\sin u$  die numerische Apertur der Linsenfolge.

Als Beispiel für diesen wichtigen Satz sei seine Anwendung auf die Mikroprojektion angeführt. Der Einfachheit wegen setzen wir das ältere Verfahren, das NEUHAUSS anwandte, voraus, bei dem die Lichtquelle im Objekt abgebildet wird, bemerken aber, daß das KÖHLERSche Verfahren verflochtener Abbildung zwar in anderer Hinsicht, aber nicht in der Lichtausnutzung Vorteile gewährt. Es sei ein normales Mikroskopobjektiv von der numerischen Apertur 0,75 angenommen, ein solches hat ein brauchbares Gesichtsfeld von  $\frac{2}{3}$  mm Durchmesser. Das Objekt wie das Bild befinde sich in Luft,  $n$  und  $n'$  sind dann gleich 1 zu setzen. Also ist  $y \cdot \sin u = \frac{2}{3} \cdot 0,75 = 0,5$ . Um das Gesichtsfeld zu beleuchten, braucht man ein  $\frac{2}{3}$  mm großes Bild der Lichtquelle und wird es so einrichten, daß dieses mit einer Apertur der ankommenden Lichtstrahlen entworfen wird, die der Apertur des Objektivs 0,75 gleichkommt. Bei geringerer Apertur wird das Objektiv nicht ganz ausgenutzt, bei größerer wird das Licht nicht ganz vom Objektiv aufgenommen. Die der Lampe zunächststehende Beleuchtungslinse nehme einen Lichtkegel von der Apertur 0,4 auf, was einem Winkel  $u$  von fast  $24^\circ$  entspricht, dann ergibt sich aus  $y \cdot \sin u = 0,5 = 0,4 \cdot 1,25$ , daß ein 1,25 mm großes Stück der Leuchtfläche der Lampe ausgenutzt werden kann. Es hat also gar keinen Sinn, eine Bogenlampe von 10 oder noch mehr Ampere Stromstärke anzuwenden, das Bild auf dem Schirm wird um nichts heller, man heizt nur

Objekt und Mikroskop stärker, als wenn man eine Lampe von 3 oder 4 Amp. anwendet. Rechnet man den Quadratmillimeter des Bogenlampenkraters zu 150 Kerzen und das 1,25 mm große Stück = 1,23 qmm = 185 Kerzen, rechnet man ferner  $\frac{1}{3}$  Verlust durch Reflexe, so stehen etwa 120 Kerzen wirklich zur Verfügung. Um nun zu finden, wie groß die beleuchtete Schirmfläche wird, wenn wir 30 Lux auf dem Schirm fordern, nehmen wir zunächst an, daß die Lampe den Schirm unmittelbar beleuchtet. Auf dem 1 m entfernten Schirm geben 120 Kerzen 120 Lux, auf dem 2 m entfernten also 30 Lux. Nun war vorausgesetzt, daß ein Lichtkegel von der numerischen Apertur 0,4 ausgenutzt wird. Das ergibt eine Fläche von rund 1,7 m Durchmesser, deren Rand etwas weniger, deren Mitte etwas mehr als 30 Lux aufweist. Zu derselben Größe können wir auch das Mikroprojektionsbild bringen, und seine hellsten Stellen, dort, wo das Präparat ganz durchsichtig ist, werden 30 Lux aufweisen. 1,7 m Durchmesser bedeutet eine 2550fache Vergrößerung des  $\frac{2}{3}$  mm großen Feldes. Betrachtet man dieses Bild aus 6 m Entfernung, was einem Klassenzimmer als Durchschnittsentfernung entspricht, so wirkt es wie ein 102fach vergrößertes Bild in 25 cm Abstand vom Auge. Für 102fache Vergrößerung würde bei subjektiver Beobachtung niemand die Apertur 0,75 anwenden, sondern etwa 0,25. Man sieht daraus, daß die Mikroprojektion viel dünnere und flachere Objekte verlangt als die subjektive Beobachtung, die obendrein noch das Absuchen der Schichten mit der Feinverstellung zur Verfügung hat. Angesichts dieser Rechnung wird man

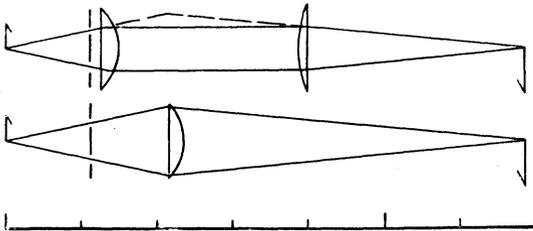


Abb. 72. Gleiche Abbildung auf zweierlei Art.

sich nicht mehr wundern, daß die Mikroprojektion so oft enttäuscht. Die Feinheit des Bildes kann aus der Entfernung nicht ausgenutzt werden, und die Tiefenschärfe genügt nicht.

Es ist vielleicht nützlich, ein Beispiel dafür zu geben, daß dieselbe Abbildung bei gleichem Abstand von Ding und Bild in verschiedener Weise hervorgebracht werden kann, daß dabei aber immer die Gleichung 2) erhalten bleibt. Abb. 72 zeigt zu unterst, wie mit der Linse 10  $\varnothing$  15 eine zweifache Vergrößerung erhalten wird. Man läßt nun Ding, Blende und Schirm stehen, verschiebt die Linse gegen die Blende und fügt die Linse 10  $\varnothing$  30 ein. Solange die Verschiebung der Linse nicht zu groß gewesen ist, findet man immer eine Stellung der zugefügten Linse, bei der genau dieselbe Vergrößerung zustande kommt wie bei der ursprünglichen Aufstellung. Die Größe des Gesichtsfeldes ist allerdings verschieden, die Vergleichung ist deshalb mit einem Ding von mäßiger Größe auszuführen. Weil die Blende stehengeblieben ist, hat  $u$  sich nicht geändert. Aber auch  $u'$  ist ungeändert geblieben. Bei dieser Feststellung ist das Ding bis auf einen Lichtpunkt abzublenden. Denkt man sich die Strahlen vor und nach den Brechungen vorwärts und rückwärts bis zum Schnitt miteinander verlängert, so ergeben sich in all diesen Fällen dieselben Knickpunkte als Ersatz für die Brechung.

Ob wir die Strahlen bis dahin verlängern, wo sie sich treffen, oder vorher schon bei gleichem Achsabstand  $h$  abbrechen, ist gleichgültig, solange wir es mit einem einzigen Fall der Abbildung zu tun haben. Werden Abbildungen verschiedenen Dingabstandes durch dieselbe Linsenfolge miteinander verglichen, so entsteht die Frage, welche Lichtkegel man miteinander vergleichen soll, wo man also die für beide Lichtkegel gemeinsame Blende hinstellen soll und ob eine solche gemeinsame Blende überhaupt angenommen werden kann. Wir werden später auf diese Frage noch einmal zurückkommen.

### 16. Die Brennweite.

Für den Grenzfall unendlicher Entfernung rückt das Bild in den Brennpunkt. Die Brennweite messen wir auf dem Lichtstrahl (nicht, wie die Kollineationslehre das tut, auf der Achse).

Zunächst sei wieder nur eine brechende Fläche vorhanden, auf die ein Strahlenzylinder vom Halbmesser  $h$  so auffällt, daß seine Achse auf den Krümmungsmittelpunkt gerichtet ist (Abb. 73). Der Einfallswinkel ist gleich dem Zentriwinkel  $\varphi$ , der Brechungswinkel heiße  $\varphi'$ . In dem Dreieck  $CBO'$  sind  $BO' = f'$  und  $CO' = s' - r$  die Gegen-

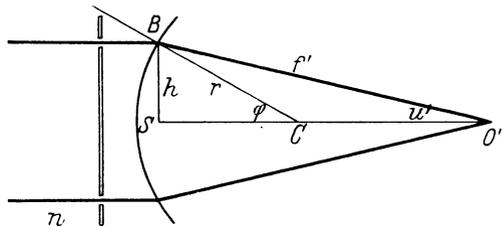


Abb. 73. Die Brennweite.

seiten der Winkel  $180^\circ - \varphi$  und  $\varphi'$ .

Es ist also:

$$f' : (s' - r) = \sin \varphi : \sin \varphi',$$

ferner nach dem Brechungsgesetz:

$$\sin \varphi : \sin \varphi' = n' : n,$$

also:

$$f' : (s' - r) = n' : n. \tag{3}$$

Diese Beziehung ermöglicht eine bequeme Konstruktion für die Brennweiten, die zu den verschiedenen Zentriwinkeln gehören. In der Abb. 74 sei  $SC = r$  und der Punkt  $F'_0$  so bestimmt, daß  $SF'_0 : CF'_0 = n' : n$  ist. Der Kreis mit dem Halbmesser  $r$  um  $C$  ist ein Querschnitt der brechenden Fläche, der Kreis mit dem Halbmesser  $SF'_0$  um  $F'_0$  ist eine Hilfslinie. Für alle Dreiecke, die  $CF'_0$  zur Grundlinie und ihre Spitze  $P$  auf dem Hilfskreis haben, ist  $F'_0P' : CF'_0 = n' : n$ . Wir haben nun zu diesen Dreiecken ähnliche zu zeichnen, die ihre Spitze  $P$  auf dem Kreis um  $C$  an der Stelle haben, wo  $CP'$  ihn schneidet. Die Grundlinie der Dreiecke bleibt in der Richtung  $CF'_0$ , und durch den Schnittpunkt  $P$  wird eine Parallele zu  $P'F'_0$  gezogen. Die Figur zeigt die Abhängigkeit des  $f'$  von  $\varphi$  sehr deutlich und gibt eine Vorstellung von der Kaustik. Für dieselbe Fläche bei umgekehrter Stellung ist die Konstruktion in Abb. 75 durchgeführt. Bei Abb. 74 war  $n = 1$  und  $n' = 1,5$  angenommen, jetzt ist  $n = 1,5$

und  $n' = 1$  gesetzt. Zugleich stellt Abb. 75 die Kaustik einer Plankonvexlinse dar, in deren ebene Fläche die parallelen Strahlen ungebrochen einfallen. Der untergezeichnete Maßstab bezieht die Figur auf die Linse 10  $\varnothing$  15 und beginnt an der ebenen Fläche der Linse. Der Randstrahl tritt streifend aus der Linse aus.

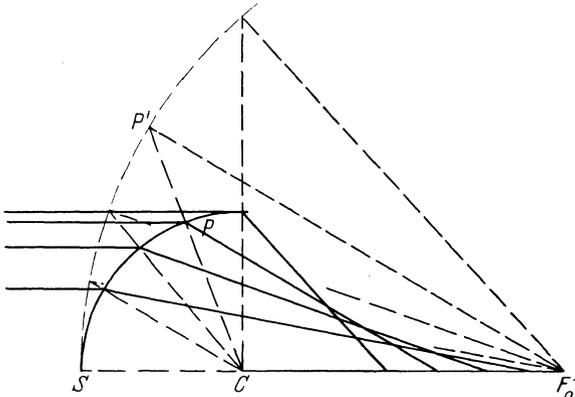


Abb. 74. Brechung paralleler Strahlen an einer Kugelfläche.

Die Strahlen lassen sich natürlich auch rechnerisch verfolgen, man hat:

$$\begin{aligned} \frac{h}{r} &= \sin \varphi \\ \sin \varphi' &= \frac{n}{n'} \sin \varphi = \frac{n}{n'} \frac{h}{r} . \\ u' &= \varphi - \varphi' \\ f' &= \frac{h}{\sin u'} . \end{aligned}$$

Die Formeln 1) und 2)

können wir nicht unmittelbar für den Fall unendlichen Dingabstandes brauchen, weil

die linken Seiten vieldeutig werden. Es ist also nötig, die Ableitung der Formel für diesen besonderen Fall von Grund auf neu zu machen. In Abb. 76 und 77, die den Abb. 68 und 69 nahe verwandt sind, werden zwei Sterne durch eine brechende Fläche abgebildet. Der gegenseitige Abstand der Sterne ist nicht angebar, ihr Winkelabstand  $2 \varepsilon$  kann aber leicht festgestellt werden. Eine in C

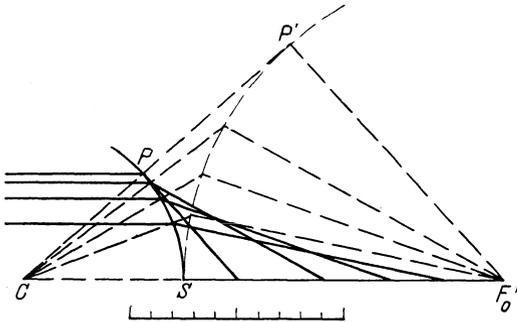


Abb. 75. Brechung paralleler Strahlen an einer Kugelfläche (und in der Plankonvexlinse).

angebrachte Ringblende bewirkt, daß von dem Licht jedes Sternes nur ein zylindrischer Mantel vom Radius  $h$  benutzt wird. Diesem dingseitigen Radius  $h$  entspricht bildseitig der Winkel  $u'$  nebst der Brennweite  $f'$ . Den Zusammenhang dieser drei Größen gibt die Formel

$$h : f' = \sin u' .$$

Die Bilder der beiden Sterne haben den Abstand  $2 y'$  voneinander, und ihre Entfernung vom Schnittpunkt C der Achsen der beiden Strahlenzylinder ist  $s' - r$ . Nach der Figur ist:

$$-y' = (s' - r) \cdot \sin(-\varepsilon) .$$

Durch eine Überlegung, die genau so an Abb. 78 geknüpft wird, wie es bei Abb. 71 geschah, beschränken wir die Ableitung nun auf sehr kleine  $\varepsilon$ , es ist dann

$$y' = (s' - r) \cdot \varepsilon .$$

Es war:

$$n : n' = (s' - r) : f',$$

also ist:

$$n \varepsilon = \frac{n' \varepsilon (s' - r)}{f'} = \frac{n' y'}{f'}$$

$$n \varepsilon h = \frac{n' y' h}{f'} = n' y' \sin u'.$$

Die rechte Seite bleibt nach 2) bei beliebig vielen Brechungen erhalten:

$$n \varepsilon h = n^* y^* \sin u^*.$$

Diese Beziehung gibt Anlaß, die beiden Größen,  $h$  im Dingraum und  $\sin u^*$  nach der letzten Brechung miteinander zu verknüpfen durch die Definition:

$$f^* = \frac{h}{\sin u^*} \quad 4)$$

und  $f^*$  die Brennweite der ausgerichteten Linsenfolge zu nennen.

Diese Definition der Brennweite stimmt vollkommen überein mit der, die wir am Anschluß an den durch Abb. 49 dargestellten Versuch (Aufhebung der sphärischen Abweichung) aufgestellt hatten. Die Gesamtheit aller Brechungen eines Strahles ist mit dieser Definition für die Rechnung durch eine Knickung ersetzt.

Aus den Gleichungen 1) und 3), die nur für eine Fläche gelten, erkennt man, daß es möglich ist, statt des Brechungsverhältnisses die Brennweite einzuführen. Vorläufig kann daraus aber kein Nutzen gezogen werden.

### 17. Die Konvexlinse.

Die Ergebnisse der früheren Abschnitte sollen nun auf das wichtigste Gebilde der praktischen Optik, die Konvexlinse angewendet werden. Die Linse grenze beiderseits an Luft und das Brechungsverhältnis von Glas gegen Luft sei kurz mit  $n$  bezeichnet.

Die beiden Brennweiten einer Zone von dem Halbmesser  $h$  sind

$$f = h/\sin u \quad \text{und} \quad f' = h/\sin u'$$

Im allgemeinen sind diese beiden voneinander verschieden, davon kann man sich leicht überzeugen, wenn man den Rand einer Plankonvexlinse betrachtet. Abb. 79 zeigt, daß wir im Schnitt den Rand als kleines Prisma auffassen können. Von der einen (linken) Seite her geht das Licht durch eine Fläche ungebrochen, von der andern Seite her aber geht es so, daß beide Flächen im gleichen Sinn brechend wirken. Der zweite Fall steht dem symmetrischen Lichtdurchgang,

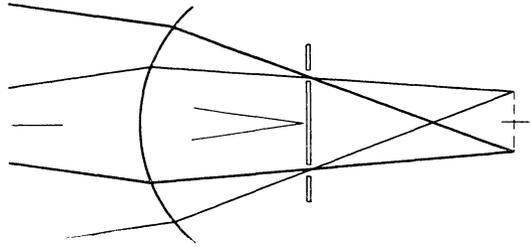


Abb. 76. Brennweite, scheinbare Größe des Dinges und Bildgröße.

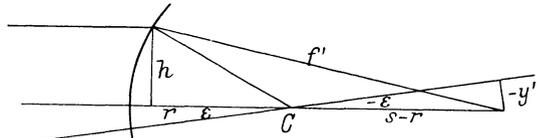


Abb. 77. Brennweite und Bildgröße.

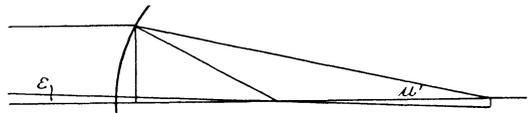


Abb. 78. Definition der Brennweite.

also dem Minimum der Ablenkung näher als der erste, er ergibt also einen kleineren Winkel  $u$  und eine größere Brennweite als der erste Fall.

Rückt man vom Linsenrand her der Linsenmitte näher, so wird offenbar der Unterschied der Brennweiten immer geringer, andererseits wird es aber

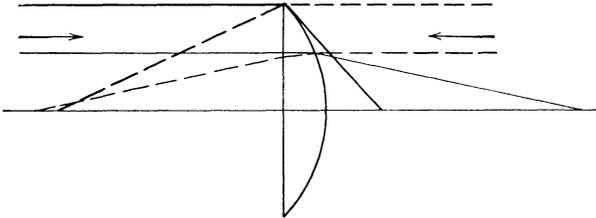


Abb. 79. Die Brennweite einer einseitig gewölbten Linse.

schwierig, oder sagen wir, einigermaßen der Willkür anheimgestellt, was eine Linsenzone sein soll. Abbildung 80 zeigt eine einseitig gewölbte Linse, auf die ein achsenparalleler Lichtstrahl fällt, und zwar wird die gewölbte Seite zu-

erst getroffen. Eine dingseitig angebrachte Blende, die diesen Strahl aussondert, kann in beliebige Entfernung von der Linse gestellt werden, immer ergibt sich dasselbe. Die Linsenzone scheint also ganz eindeutig definiert zu sein. Sobald wir aber ein Ding in endlicher Entfernung haben, weiß man nicht mehr, wo man die Blende hinstellen soll. An

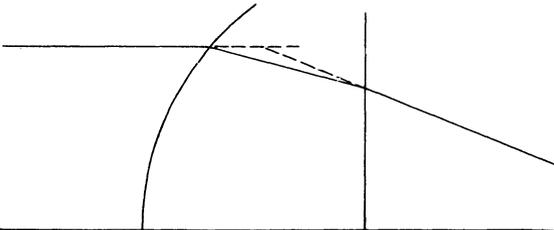


Abb. 80. Knickpunkte in der einseitig gewölbten Linse.

jedem Ort sondert sie einen anderen Strahlenkegel aus und definiert damit eine andere Linsenzone. In keinem einzigen Fall wird die Zone ebenso ausgeschnitten, wie durch den achsenparallelen Strahl. In Abb. 80 sind die Strahlver-

längerungen eingezeichnet, die für achsenparallel einfallendes Licht zu den Knickpunkten führen. Dasselbe ist in Abb. 81 für eine beiderseits gleichgewölbte Linse dargestellt. Für umgekehrte Lichtrichtung ergibt sich statt

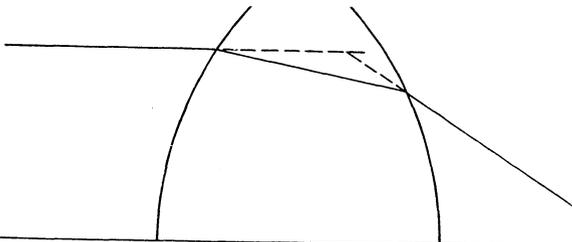


Abb. 81. Knickpunkte in der beiderseits gleich gewölbten Linse.

also Zusammenfallen von Brechung und Knickung. Jeder dieser beiden Knickpunkte ist durch eine der beiden Brennweiten bestimmt, und sie haben, weil Brennpunkte keine konjugierten Punkte sind, zunächst nichts miteinander zu tun.

Andererseits sind die Knickpunkte aber doch durch den zur Achse parallelen Strahl bestimmt, und das bringt es mit sich, daß jeder dieser beiden Strahlen erst durch den Knickpunkt des anderen geht und dann erst den Knickpunkt erreicht, an dem er selbst umbiegt. Diese Bemerkung leitet über

zu dem Versuch, die Zone durch diese beiden Knickpunkte zu definieren. Rechnet man einen Strahl, der von einem in endlichem Abstand liegenden Achsenpunkt zum näheren Knickpunkt zielt, durch, so entspricht ihm ein Strahl auf der Bildseite, dessen rückwärtige Verlängerung nahezu auf den zweiten Knickpunkt zielt. Aber genau stimmt dieser Zusammenhang leider nicht, die Abweichung bleibt klein bis zu ziemlich beträchtlichen Neigungen gegen Achse und Brennweite, so daß sie oft für das ganze Gebiet reeller Abbildung geringfügig ist. Im Gebiet virtueller Abbildung werden die Abweichungen sehr groß.

Der Versuch, allgemeingültige Beziehungen zwischen den durch eine Linsenzone vermittelten verschiedenen Abbildungen aufzufinden, ist also gescheitert, ja, es ist nicht einmal gelungen, den Begriff der Linsenzone in einer befriedigenden Schärfe zu fassen. Das einzige Ergebnis sind Hinweise darauf, daß in der Nachbarschaft der Achse die Verhältnisse sich vereinfachen. Für die Linsenmitte werden die Brennweiten gleich groß, alle Strahlenneigungen verkleinern sich sehr, und die verwickelte Beziehung zwischen verschiedenen Abbildungen strebt einem einfachen Grenzwert zu. Wir werden uns daher weiterhin notgedrungen mit dem Studium der Abbildung sehr kleiner Dinge in nächster Nähe der Achse und durch sehr kleine Linsen begnügen. Man bezeichnet dieses Gebiet als das paraxiale.

### 18. Paraxiales Gebiet.

Wir haben bisher einige Zusammenhänge aufgefunden, die teils nur für eine Fläche, teils auch für eine beliebige Zahl ausgerichteteter Flächen gelten. Schon bei der Ableitung dieser Formeln mußten wir gewisse Einschränkungen ihres Geltungsbereiches in Kauf nehmen, um nach anderer Richtung ihre Geltung ausdehnen zu können. Dennoch kamen wir immer bald an Grenzen der Möglichkeit, in übersichtlicher Form zusammenzufassen, was an aufeinanderfolgenden Flächen geschieht. Man hat dann immer wieder die Wahl, entweder mit Hilfe von Rechentafeln im Einzelfall von Fläche zu Fläche vorzurücken oder weitere Einschränkungen des Geltungsbereichs als Kaufpreis für Vereinfachungen der Formeln zuzugestehen, damit wieder ein Zusammenfassen möglich wird. Der Versuch, die Sammellinse mit unseren Formeln zu meistern, hat uns wieder vor einen solchen Entschluß gestellt, und es sind dabei Zumutungen aufgetaucht, die eigentlich entmutigend sind. Wir haben nämlich gesehen, daß die Vereinfachungen der Formeln, die wir brauchen, erst eintreten, wenn wir uns mit einem fadenförmigen Raumstück rund um die Achse begnügen. Hat das nun überhaupt noch Sinn? Lohnt es sich, mühsam Formeln abzuleiten, wenn nur noch ein winziger Bildausschnitt in Betracht kommt, der von dem kümmerlichen Lichtrest entworfen wird, den eine fast völlig zugedeckte Linse hindurchläßt? Man muß zugeben, daß eine Hoffnung auf Formeln von allgemeiner Bedeutung nun nicht mehr besteht, und doch ist die Bemühung um Formeln für das Paraxialgebiet nicht nutzlos. Wir haben bei den Versuchen gesehen, daß es möglich ist, Linsenfolgen so auszuwählen, daß eine recht gute Übereinstimmung der Wirkung aller Zonen erreicht wird, ebenso fanden wir Wege, um dem Bilde in

großer Ausdehnung eine recht befriedigende Schärfe zu geben, und erfuhren, daß man das Bild auch bei richtiger Auswahl der Gläser zu ebenen vermag. Bei so abgeglichenen Linsenfolgen ist es zur Festlegung der Lagebeziehungen offenbar gleichgültig, welchen Strahl man zur Herleitung der Formeln benutzt, und da wird man natürlich den bequemen Achsenstrahl wählen. Die Errechnung abgeglicherer Linsenfolgen ist nicht unsere Aufgabe, es genügt für uns, daß man sie kaufen kann, und daß für diese die Beziehungen, die allgemein nur im Paraxialgebiet gelten, eine erweiterte Bedeutung haben.

Eine gewisse Bedeutung dieser Ableitungen kann man auch aus dem Umstand entnehmen, daß man das paraxiale Gebiet um so ausgedehnter annehmen darf, je geringere Genauigkeit die Natur der vorliegenden optischen Aufgabe erfordert. Indessen darf man diese Rechtfertigung auch nicht in ihrer Bedeutung überschätzen, denn für rohe Versuche braucht man keine sorgsam abgeleiteten Formeln.

Man darf nicht vergessen, daß wir nur aus Not ins paraxiale Gebiet geflüchtet sind, weil zu allgemeinerer Lösung die mathematischen Hilfsmittel nicht langen. Deshalb war es auch richtig, nicht vorschnell diesen Beschränkungen sich zu unterwerfen, sondern soweit als möglich auf breiterer Grundlage vorzurücken. Es ist um so nötiger, diesen Gedanken hervorzuheben, weil oftmals geradezu als ein Ideal hingestellt wird, was wir vom Standpunkt der praktischen Optik nur als kümmerlichen Notbehelf werten können.

Aus der Formel für die Brechung an einer Kugelfläche

$$n \frac{s-r}{p} = n' \frac{s'-r}{p'} \quad 1)$$

wird durch  $p_0 = s_0$  und  $p'_0 = s'_0$ :

$$\begin{aligned} n - n \frac{r}{s_0} &= n' - n' \frac{r}{s'_0} \\ \frac{n'}{s'_0} - \frac{n}{s_0} &= \frac{n' - n}{r} \end{aligned} \quad 1 a)$$

In derselben Weise vereinfacht sich durch  $f'_0 = s'_0$  die Brennweitenformel:

$$f' : (s' - r) = n' : n ; \quad 3)$$

nur ist es da zweckmäßiger, nicht  $s'_0$ , sondern  $f'_0$  in der Formel zu behalten; wir schreiben also:

$$\begin{aligned} f'_0 n &= (f'_0 - r) n' = f'_0 n' - r n' \\ f'_0 &= \frac{r n'}{n' - n} \end{aligned} \quad 3 a)$$

Die andere Brennweite ergibt sich in derselben Weise als:

$$f_0 = - \frac{r n}{n' - n} \quad 3 b)$$

Formt man 1 a) um in:

$$\frac{r n'}{(n' - n) s'_0} - \frac{r n}{(n' - n) s_0} = 1,$$

so kann man aus 3a) und 3b) die Brennweiten einführen und erhält:

$$\frac{f'_0}{s'_0} + \frac{f_0}{s_0} = 1.$$

Die Beschränkung auf das paraxiale Gebiet hat es ermöglicht, jede beliebige Abbildung, die bei einer brechenden Kugelfläche vorkommen kann, durch die Brennweiten auszudrücken. Der Radius und das Brechungsverhältnis brauchen nicht mehr bekannt zu sein.

C. NEUMANN, der 1866 eine einfache Ableitung der Formeln der geometrischen Optik des Paraxialgebietes gab (*Die Haupt- und Brennpunkte eines Linsensystems*, 2. Aufl. B. G. Teubner 1893), geht von einer im wesentlichen unserer Abb. 65 entsprechenden Zeichnung aus und setzt gemäß der Reihenentwicklung

$$\sin \varphi = \varphi - \frac{\varphi^3}{1 \cdot 2 \cdot 3} + \frac{\varphi^5}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5} - +$$

die Sinus kleiner Winkel gleich den Winkeln selbst, verwendet also das Brechungsgesetz in der Näherungsform, die schon KEPLER in Ermanglung genauere Kenntnis benutzte:

$$n : n' = i' : i.$$

In Wirklichkeit läßt sich aber für das paraxiale Gebiet eine bestimmte Form des Brechungsgesetzes gar nicht angeben. A. GLEICHEN führt in seinem *Lehrbuch der geometrischen Optik* (S. 92. Teubner 1902) einige von sehr vielen möglichen Formen an, die das Brechungsgesetz haben könnte, ohne daß im Paraxialgebiet eine Formel anders würde.

Die Rechnungen mögen hier abgebrochen werden, denn die Ableitung weiterer Formeln wäre eine bloße Wiederholung dessen, was in zahlreichen Büchern steht<sup>1)</sup>. Einige vom Herkömmlichen abweichende Gedanken knüpfen aber an die Zeichnungen an, die sich auf das paraxiale Gebiet beziehen.

E. REUSCH, der zur Ergänzung von C. NEUMANN'S Ableitungen die graphische Behandlung derselben Aufgaben dargestellt hat (*Konstruktionen zur Lehre von den Haupt- und Brennpunkten eines Linsensystems*. B. G. Teubner 1870), sagt:

„Hierbei bleibt aber die Schwierigkeit, daß verschwindend kleine Strecken vorkommen, mit denen graphische Operationen nicht ausgeführt werden können. Es ist aber leicht, diesen Übelstand zu beseitigen: Denkt man sich nämlich, es werden, mit Beibehaltung der Achsstrecken oder Abszissen, alle Ordinaten in einem  $m$  mal größeren Maßstabe aufgetragen, wobei  $m$  eine außerordentlich große Zahl bedeuten mag, so erhalten wir eine schematische Figur, in welcher nun die Ordinaten greifbare Größen sind.“

Das ist eine klare und zweckmäßige Anleitung, die seitdem bei solchen Zeichnungen tatsächlich immer befolgt worden ist, aber leider stillschweigend, so daß die Zeichnungen oft bedenklich falsch aufgefaßt worden sind. Es kann

<sup>1)</sup> Hingewiesen sei auf P. GRUNER: Leitfaden der geometrischen Optik. 148 Seiten, 13 Abb. Bern: Paul Haupt 1921. — Leider ist in dem Buch über die Vorzeichen in anderer als der üblichen Weise verfügt.

nur empfohlen werden, diese Anleitung von REUSCH ungekürzt den Zeichnungen voranzuschicken.

Wir wollen nun noch weitere Folgerungen aus dieser Anleitung ziehen:

In Abb. 82 ist zunächst die Abb. 71 wiederholt und darunter die entsprechende Zeichnung für das paraxiale Gebiet gesetzt, in der, wie REUSCH sagt, die Ordinaten stark vergrößert aufgetragen sind. Wir werden zeigen, daß an die verzerrte Zeichnung mit einer verzerrten Rechnung anzuknüpfen ist, um richtige Ergebnisse zu erhalten.

Durch die Überhöhung wird der Kreisbogen mit dem Halbmesser  $r$  zu einer Geraden ausgereckt, die auf der Achse senkrecht steht. Damit wird das

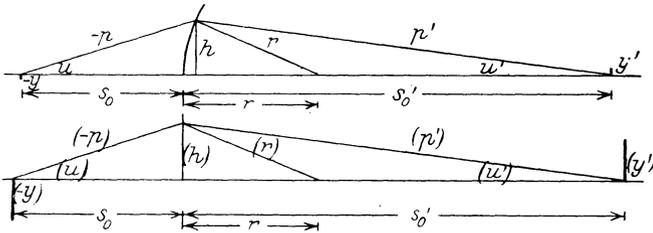


Abb. 82. Übergang zum Paraxialgebiet.

schräge( $r$ ) so verzerrt, daß wir es nicht mehr aus der Zeichnung für die Rechnung entnehmen dürfen, sondern nur noch seine Projektion auf die Achse, nämlich  $r$ . Genau so dürfen wir

nicht mehr die verzerrten ( $p$ ) und ( $p'$ ) aus der Zeichnung entnehmen, sondern müssen dafür die Projektionen  $s$  und  $s'$  einsetzen. ( $h$ ) ist als  $mh$  aufgetragen und fällt gänzlich mit dem ausgereckten Kreisbogen zusammen.

Die aus Abb. 71 wiederholte Zeichnung gehörte zu der Formel

$$n \cdot y \cdot \sin u = n' \cdot y' \cdot \sin u'$$

oder, wenn wir die Winkelfunktionen durch die Dreiecksseiten darstellen,

$$n \cdot y \frac{h}{p} = n' \cdot y' \frac{h}{p'}$$

Gehen wir nun zur Zeichnung für das Paraxialgebiet über, so müssen wir

statt ( $p$ ) einsetzen  $s$ ,  
 statt ( $p'$ ) einsetzen  $s'$ ,

dagegen brauchen wir statt ( $h$ ) =  $mh$  nicht  $h$  zu setzen, weil die Multiplikation beider Seiten der Gleichung mit  $m$  ja belanglos ist, es darf also ( $h$ ) stehen bleiben, und dann ergibt sich:

$$n \cdot y \frac{(h)}{s} = n' \cdot y' \frac{(h)}{s'}$$

Das ist aber, wenn wir wieder die Winkelfunktionen einsetzen:

$$n \cdot y \cdot \tan(u) = n' \cdot y' \cdot \tan(u'). \tag{2 a)}$$

Wir müssen also mit der HELMHOLTZ-LAGRANGESCHEN Gleichung der Kollineationslehre rechnen, wenn wir an die überhöhte Figur von REUSCH anknüpfen wollen. Dementsprechend tritt auch an die Stelle der richtigen Brennweitenformel:

$$f = h/\sin u \tag{4)}$$

für das paraxiale Gebiet bei Anknüpfung an die überhöhte Zeichnung die GAUSSISCHE Brennweitenformel der Kollineationslehre:

$$f = h/\tan(u), \quad 4a)$$

die nicht auf dem Strahl den Abstand zwischen Brennpunkt und Knickpunkt, sondern auf der Achse den Abstand zwischen Brennpunkt und Hauptpunkt mißt. Genau so, wie REUSCH mit Recht eine planmäßige Verzerrung der Figur vornimmt, um die Beziehungen zwischen Strecken ganz verschiedener Größenordnung anschaulich zeichnen zu können, so darf auch die Rechnung an diese Figuren anknüpfen, wenn sie nur durch eine in der richtigen Weise verzerrte Algebra jene Verzerrung der Geometrie wieder ausgleicht.

Die Schreibweise der Formeln 2a) und 4a) täuscht eine Abhängigkeit von dem Winkel ( $u$ ) vor. Setzt man aber die Seitenverhältnisse für die Winkelfunktionen ein, so sieht man, daß ( $h$ ) beiden Seiten der Gleichung 2a) gemeinsam ist und tatsächlich nur  $s$  und  $s'$ , also vom Winkel ( $u$ ) unabhängige Größen die Abbildung beherrschen.

Die Abhängigkeit der allgemeingültigen Formel 2) von  $u$  bedeutete, daß jede Zone und bei Punkten außer der Achse gar jedes Linsenstückchen anderswo das Bild entwerfen will. Die Unabhängigkeit von ( $u$ ) bedeutet eine eindeutige Abbildung nach Formel 1a) für jeden Achsenpunkt und nach Formel 2a) auch für jeden Punkt außerhalb der Achse.

### 19. Kollineation.

Wir haben die beiden Formeln hergeleitet:

$$\frac{f_0}{s_0} + \frac{f'_0}{s'_0} = 1$$

$$n \cdot y \cdot \tan(u) = n' \cdot y' \cdot \tan(u'),$$

die erste durch Beschränkung auf das Paraxialgebiet, die andere als eine im Paraxialgebiet gültige Anpassung an einen Kunstgriff der zeichnerischen Darstellung. Im Gegensatz dazu wollen wir jetzt feststellen, welche allgemeine mathematische Bedeutung diese Formeln haben. Ohne weiteres läßt sich übersehen, daß sie zwei Räume aufeinander punktweise eindeutig abbilden. Die besondere Art der Abbildung kann folgendermaßen erkannt werden: Verschiebt man die Koordinatenanfänge im Dingraum und im Bildraum in die Brennpunkte, indem man neue Abszissen  $x$  und  $x'$  einführt, so erhalten die Gleichungen die Formeln:

$$x x' = f_0 f'_0$$

$$y' / y = -f_0 / x = -x' / f'_0.$$

Drei Punkte  $x_1 y_1$ ,  $x_2 y_2$ ,  $x_3 y_3$  liegen in einer Geraden, wenn

$$\frac{x_1 - x_2}{y_1 - y_2} - \frac{x_1 - x_3}{y_1 - y_3} = 0$$

ist. Ausgerechnet ergibt das:

$$y_1 x_2 - y_1 x_3 - y_2 x_1 + y_2 x_3 + y_3 x_1 - y_3 x_2 = 0.$$

Für die konjugierten Punkte  $x'_1 y'_1, x'_2 y'_2, x'_3 y'_3$  gibt

$$\frac{x'_1 - x'_2}{y'_1 - y'_2} = \frac{x'_1 - x'_3}{y'_1 - y'_3},$$

nachdem man mit Hilfe der beiden Abbildungsgleichungen die gestrichenen  $x$  und  $y$  durch die ungestrichenen ersetzt hat, beim Ausrechnen genau denselben sechsgliedrigen Ausdruck, also gleichfalls Null. Das heißt, auch die drei Bildpunkte liegen auf einer geraden Linie.

Damit ist erwiesen, daß die beiden Abbildungsgleichungen, die für uns nach ihrer Herkunft nur als Grenzformen ganz anderer Gleichungen Bedeutung haben, mathematisch für den unbegrenzten Raum die kollineare Abbildung vermitteln. Diese Feststellung darf aber nicht dahin führen, daß man die allgemeine mathematische Bedeutung dieser Formeln verwechselt mit ihrer sehr beschränkten Verwendbarkeit als Näherungsformeln in der Optik.

Die Kollineationslehre hat in der Optik lange Zeit eine übertriebene Wertschätzung gefunden, und ihr Verhältnis zur Optik ist nicht immer zutreffend dargestellt worden. So finden sich noch in der zweiten Auflage von CZAPSKIS *Grundzügen der Theorie der optischen Instrumente nach ABBE* zahlreiche Sätze, die um so schädlicher gewirkt haben, als dieses Werk anerkanntermaßen das grundlegende in diesem Gebiet ist. Z. B. wird S. 29 von den Sätzen der Kollineationslehre gesagt, „daß sie nichts anderes sind, als der Ausdruck mathematisch notwendiger Beziehungen, die sich überall da vorfinden müssen, wo auf irgendeine Weise zwei Raumgebiete in solche Beziehungen zueinander treten, daß eine optische Abbildung des einen in das andere stattfindet“. Auch daß in der Mathematik die Kollineation zeitweise den Namen optische Abbildung führte, beruht auf dieser Verwechslung. Es ist nicht mehr nötig, gegen solche Übertreibungen anzukämpfen, da sie aus der dritten Auflage von CZAPSKIS Buch sorgsam entfernt sind. Es ist aber immer noch nötig, darauf hinzuweisen, da die meisten im Gebrauch befindlichen Darstellungen auf den beiden ersten Auflagen beruhen.

Sehr treffend kennzeichnet P. GRUNER auf S. 15 seines *Leitfadens* das Verhältnis einer übertriebenen Wertschätzung der Kollineationslehre zu ihrer sinnvollen Verwendung als Rechnungsbehelf mit den Worten:

„Nach der ABBESchen Theorie sieht man die kollineare Abbildung als die normale und einzig richtige an, hat sie deshalb auch mathematisch vollständig ausgebaut, ohne Rücksicht darauf, ob sie eigentlich physikalisch verwirklicht werden könne. Die in Wirklichkeit stets auftretenden Aberrationen, Astigmatismus usw. betrachtet man als Fehler oder Abweichungen der idealen Abbildung und behandelt sie mathematisch als Störungen der kollinearen Abbildung, die nun in der Praxis korrigiert werden müssen. In der Praxis führt diese Auffassungsweise in den meisten Fällen zu sehr guten Resultaten, sie ist aber grundsätzlich unrichtig, indem die sog. Fehler in der Natur der physikalischen Abbildung begründet sind und nicht nur etwa sekundäre Erscheinungen bedeuten.“

An die Konstruktionen des Strahlenganges knüpft auch ein Mißverständnis an, vor dem zwar in jedem besseren optischen Buch gewarnt wird, das aber durch die zu knappe Darstellung in vollgepfropften Schulbüchern immer wieder genährt wird. Die für die Konstruktion bequemsten Linien werden für Strahlen gehalten, ja für die wichtigsten oder gar die allein wichtigen, von denen die Abbildung abhängt. Besonders bequem für Konstruktion der Bilder im Paraxialgebiet sind Strahlen, die durch den Brennpunkt gehen. Es mag wohl vor einem halben Jahrhundert im Physikunterricht beliebter gewesen sein, solche Konstruktionen von den Schülern zeichnen zu lassen, als ihnen optische Versuche zu zeigen. Sicher auf solchem Wege war ein geistvoller und kenntnisreicher Jurist, FELIX EBERTY<sup>1)</sup>, zu der Ansicht gekommen, daß alle an einer Abbildung mitwirkenden Strahlen sich im Brennpunkt durchkreuzen. Als ein Mann, dem die umfassendsten Gedanken wichtig sind, zieht er aus dieser Vorstellung weitgehende Schlüsse. Er sagt: Da hier alles, was für die Abbildung eines Raumgebietes wesentlich ist, sich in einem Punkte vereinigt, kann Dreidimensionales in vollständiger Weise durch Eindimensionales dargestellt werden. Daran, meint er, werde nichts geändert, wenn unsere Unvollkommenheit uns hindert, im Brennpunkt diese Vielheit zu entwirren, und uns nötigt, außerhalb des Brennpunktes zu beobachten, wo das Gesammelte sich wieder gesondert hat. Diese besonders scharfe Ausprägung eines Mißverständnisses wird hier nicht erwähnt, um den längst verstorbenen EBERTY herabzusetzen oder seine Bewunderer, die nach einem Menschenalter den Neudruck veranlaßt haben. Es muß vielmehr mit tiefer Betrübnis erfüllen, daß ein Mann von solchem Wissensdrang von seinen Lehrern und den ihm zugänglichen Büchern so gründlich irreführt wurde. Die Sucht, auf möglichst wenig Seiten möglichst viel zu erwähnen, hat es dahin gebracht, daß manche Schulbücher sich von großen Handbüchern fast nur noch dadurch unterscheiden, daß sie schwerer verständlich sind.

## 20. Rechnung und Wirklichkeit.

Die physikalische Voraussetzung unserer Rechnungen, das Brechungsgesetz, ist schließlich aus den Formeln gänzlich verschwunden. Wir haben auch schon die Folgerung aus dieser Tatsache abgelehnt, daß die physikalischen Bedingungen etwas Unwesentliches seien, daß wir also die Grundlage unnötig breit gewählt hätten. Wir wollen nun noch die Frage erörtern, ob wir denn die Grundlage für jeden Bedarf breit genug gewählt haben.

Gewiß haben wir auf der angenommenen Grundlage Schlüsse von nicht geringer praktischer Bedeutung erhalten. Der Wert der Formeln war sogar dadurch erhöht, daß wegen der Beugung und der Struktur von Netzhaut und photographischer Platte praktisch nur eine angenäherte Richtigkeit gefordert wird. Wenn aber die Linsenoptik mehr liefern soll als einige praktisch brauch-

<sup>1)</sup> FELIX EBERTY, Die Gestirne und die Weltgeschichte, Gedanken über Raum, Zeit und Ewigkeit. Berlin: I. M. Spaeth, Neudruck 1924. — Leider beruhen die meisten Schlüsse des geistvollen Verfassers auf Mißverständnissen ähnlicher Art.

bare Rechenformeln, wenn sie zur Einsicht in physikalisches Geschehen helfen soll, darf man an der Frage nicht vorbeigehen, ob das Brechungsgesetz grundlegend und umfassend ist. Eine allen Ansprüchen genügende Behandlung dieser Frage gehört nicht auf die Schule, es muß genügen, von einem Einzelfall aus Einblick in die Sache zu gewinnen.

∴ Schichtet man zwei Flüssigkeiten, etwa kaltes und warmes Wasser oder Salzwasser und reines Wasser oder Wasser und Alkohol, übereinander, so bildet sich nach angemessener Wartezeit eine Diffusionsschicht aus, die einen stetigen Übergang herstellt. Die Dichte und andere Eigenschaften, so auch die Lichtbrechungszahl sind in wagerechter Richtung überall gleich, in senkrechter aber stetig verschieden. Wird nun ein wagerechtes Lichtbündel in eine solche Schicht geleitet, so krümmt es sich je nach Umständen aufwärts oder abwärts. Das Brechungsgesetz kann diesen Erfolg nicht voraussagen, es ist also nicht umfassend genug, um in diesem Fall die richtige Antwort geben zu können. In der Tat enthält das Brechungsgesetz die stillschweigende Voraussetzung, daß es nur auf Unterschiede in der Strahlrichtung ankomme, aber nicht auf Unterschiede quer zum Strahl. Man kann auch sagen, das Brechungsgesetz enthält die Annahme, daß die Strahlen unabhängig voneinander seien. Sobald man aber das HUYGENSSCHE Prinzip und die Wellenfläche zur Grundlage der Überlegung macht, ergibt sich die Krümmung des Lichtbündels in der Diffusionsschicht nebst allen Besonderheiten (Fata Morgana, Kimmung, Bildumkehr usw.) ohne Schwierigkeiten (vgl. *Zeitschr. f. d. phys. u. chem. Unterricht* 28, 258—260. 1915).

Dieselbe Voraussetzung der gegenseitigen Unabhängigkeit der Nachbarstrahlen läßt Fehlaussagen in allen Randgebieten entstehen. Wie breit das Randgebiet zu rechnen ist, das hängt wesentlich davon ab, wie genau man die Wirklichkeit verfolgen will. Bei genauester Prüfung ist alles Randgebiet.

Als die ersten genaueren Beobachtungen über diese Erscheinungen in den Randgebieten (GRIMALDI) bekannter wurden, empfand man als Ausnahme und geradezu als Ungehörigkeit, was eigentlich das Wesen der Lichtausbreitung darstellt. Das Wort Beugung ist höchst unpassend gewählt, denn es entspricht der Vorstellung, daß dem Lichtstrahl Gewalt angetan sei, in Wirklichkeit ist er befreit worden von der einengenden Wirkung der Nachbarstrahlen und kann nun seine eigentliche Natur entfalten. In den letzten Jahrzehnten ist auch die rechnende Optik dazu übergegangen, ihre Grundlage zu verbreitern und auch die Beugung in Betracht zu ziehen, zunächst in Betrachtungen, die als Ergänzung zur alten geometrischen hinzutreten. Gründlich hat A. GULLSTRAND das Verfahren geändert, indem er eine Berechnungsweise anwendet, die den Strahl ständig mit seiner Nachbarschaft vergleicht. Das erfordert aber mathematische Hilfsmittel, die der Schule nicht zur Verfügung stehen. Natürlich führen auch diese vervollkommenen Betrachtungsweisen für die einfachen Grenzfälle wieder auf die alten Formeln, aber sie zeigen mit einer Schärfe, die früher nicht erkennbar war, unter welchen Bedingungen und in welchen Grenzen sie gelten. Für die Schule ergibt sich aus dieser Entwicklung die Forderung, die Beugung anders

zu behandeln, als es früher üblich war. Einst galten die Beugungserscheinungen als Absonderlichkeiten, die man am Schluß zeigte — wenn man Zeit übrigbehielt. Jetzt müssen sie zu den wichtigsten Grunderscheinungen der ganzen Schuloptik gezählt werden.

Noch einen Mangel weist die alte Grundlage der Schuloptik, der geradlinige Lichtstrahl, auf. Von der Phase ist nicht die Rede, alle Interferenzen bleiben daher unbeachtet. Nicht nur die Beugung gibt zu Interferenzen Anlaß, sondern auch andere Ursachen können Durchdringung kohärenter Strahlen herbeiführen. Erinnerung sei an Interferenzspiegel, Interferenzprisma und dünne Blättchen. Aber auch die sphärische Abweichung führt zu ringförmigen Interferenzen, und von ähnlicher Natur sind störende Erscheinungen, die von Aberrationsresten herrühren und besonders in der Mikroskopie neben den durch Ablendung von Beugungsstrahlen verursachten Scheinstrukturen auftreten.

Es ist nötig, bisweilen sich darüber Rechenschaft zu geben, wie wenig von der Fülle des Geschehens in bequemen Formeln ausgedrückt werden kann.

## Anhänge.

### 21. Das Verhältnis der vorliegenden Darstellung zur üblichen.

Der hier vorgetragene Gedankengang nimmt die optische Linse als etwas Gegebenes und macht daran Erfahrungen, ohne daß die geringsten Kenntnisse von optischen Dingen vorausgesetzt werden. Das ist möglich, denn optische Linsen sind heute in Gestalt von Brillen, Lesegläsern, Lupen und als Bestandteile von Bildwerfern, Fernrohren usw. so verbreitet, daß jedes Kind sie schon gesehen hat. Das war nicht immer so, klagt doch KEPLER, daß er viele in seiner Dioptrik entwickelten Gedanken nicht durch den Versuch nachprüfen konnte, weil er die kostbaren Linsen nicht anschaffen konnte. Damals hätte man nicht die Linse als etwas Bekanntes an den Anfang stellen dürfen.

Das Absehen von irgendwelchen optischen Kenntnissen macht es möglich, die Linsenoptik ohne Beziehung zum übrigen Physikunterricht einzuschieben, wo gerade Zeit dafür ist. Der erste Teil, in dem die Modelle des Auges und der optischen Instrumente entwickelt werden, stellt so geringe Ansprüche an Auffassung und Nachdenken der Schüler, daß er recht wohl schon auf einer frühen Altersstufe gebracht werden kann. Wenn man bedenkt, daß unser Auge das wichtigste Mittel ist, die Umwelt zu erkennen und Erfahrung zu sammeln, dürfte eine frühzeitige Bekanntschaft mit seiner Einrichtung und seiner Wirkungsweise sowie mit den künstlichen Vorrichtungen zur Steigerung seiner Leistung willkommen sein. Auch der Umstand, daß die optischen Geräte, das photographische, das Mikroskop, das Fernrohr und der Bildwerfer, in sehr vielen Berufen durchaus gebraucht werden, in anderen wenigstens sehr wesentliche Hilfen gewähren und mehr verwendet werden sollten, als es bisher geschieht, sprechen dafür, diese Versuche unter die frühzeitig zu zeigenden zu setzen.

Der zweite Teil, der die Verfeinerung der optischen Hilfsmittel behandelt, kann bei weitem nicht in demselben Maße als der erste zu dem für jeden Menschen nötigen Wissen gezählt werden, er ist aber jedem nötig, der die optischen Geräte selbständig anwenden will und deshalb die Bedingungen und die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit einigermaßen kennen muß. Bei der weiten Verbreitung photographischer Apparate und der zunehmenden Anwendung des Mikroskopes und des Bildwurfgerätes sind das nicht wenige. Es ist daher wünschenswert, auch diese Dinge auf eine frühe Stufe zu bringen und die Darstellung mit den einfachsten Mitteln durchzuführen. Aus diesem Grunde dürfte es wertvoll sein, daß auch dieser Abschnitt außer den Erfahrungen des ersten durchaus nichts voraussetzt.

Wird durch die Einfachheit der Darstellung weiteren Kreisen ein Einblick in die Linsenoptik gegeben, als es mit der üblichen, etliche Kenntnisse voraussetzenden Art möglich war, so wird doch manchem es nicht genügen, nur Erfahrungen aneinandergereiht zu haben, er wird den Dingen mehr auf den Grund zu gehen trachten. Hier soll der dritte Teil, die rechnende Optik, ergänzend eintreten. Von ihm ist aber meiner Ansicht nach auf der Schule nur sparsam Gebrauch zu machen, denn viel ist ihm mit den mathematischen Mitteln der Schule nicht abzugewinnen. Dieser Abschnitt kann nur für die Oberstufe in Betracht kommen, wenn man Zeit dafür erübrigen kann. Gedanken von allgemeiner, über die Physik hinausschauender Bedeutung bringt er wenige. Es ist fast nur die Invarianz  $n \cdot y \cdot \sin u$  dahin zu zählen. Nicht sein Inhalt, sondern die mathematischen Hilfsmittel schieben ihn auf die Oberstufe. Er gehört mehr der Fachbildung als der Bildung an, darum sparsam damit sein auf der Schule! Immerhin hoffe ich, daß die hier gegebene Darstellung dem Physikalischen wesentlich besser gerecht wird und den Sinn der Einschränkungen besser hervortreten läßt als die übliche, auf einer Überschätzung der Kollineationslehre beruhende Mathematisierung des Gebietes, die ich nur als ganz unfruchtbar für die Schule bezeichnen kann.

Die ganze Linsenoptik gehört, gemessen an den Gedanken von allgemeinsten Bedeutung, zu den ärmsten Gebieten der Physik und kann sich in dieser Hinsicht mit der sogenannten physikalischen Optik oder etwa mit der Mechanik oder Wärmelehre nicht messen. Nicht ihr unmittelbarer Bildungswert ist es, der ihr die Stelle im Schulunterricht anweist. Daß sie aber unser wichtigstes Erkenntnismittel, das Auge, verstehen lehrt, macht sie unentbehrlich. Weiter aber ist sie eins der dankbarsten Mittel zur Einführung in eine selbständige Experimentierkunst und deshalb berufen, in den Schülerübungen eine größere Rolle zu spielen als bisher. Endlich ist sie die Grundlage für die physiologische Optik, die ohne Bekanntschaft mit Einrichtung und Wirksamkeit des Auges nicht getrieben werden kann und die auf der Schule noch nicht in dem Maße beachtet wird, wie es ihrer Bedeutung für Erkenntnis und Irrtum entspricht.

Alle diese Erwägungen lassen es nicht nur nützlich erscheinen, die Oberstufe von der Linsenoptik zu befreien und sie möglichst früher Unterstufe zugänglich zu machen, sondern sie erweisen diese Umstellung geradezu als nötig.

Die übliche Darstellung der geometrischen Optik krankt daran, daß sie sich in ganz unnötiger Weise von der rechnenden Optik abhängig macht. Eine völlige Verkennung von Geltungsbereich und Sinn der Kollineationslehre bringt es zuwege, daß als Folgerung aus dem Brechungsgesetz dargestellt wird, was in Wirklichkeit daraus folgt, daß man im paraxialen Raum von der Geltung eines bestimmten Brechungsgesetzes absehen und an seine Stelle eine rechnerisch bequemere Abbildungsbeziehung einführen kann. So quält man sich denn vielfach mit Strahlengangsversuchen ab, um empirisch die Geltung der Formeln für die Gebiete nachzuweisen, in denen sie eben nicht gelten. Diese Versuche sind nichts anderes als die Nachahmung der Erläuterungsfiguren der rechnenden Optik. Während es aber nicht viel auf sich hat, wenn man der Deutlichkeit wegen diese Zeichnungen verzerrt, da ja die Rechnung immer an die Einschränkungen gebunden bleibt, die bei der Einführung der Näherungen gemacht sind, kommt ein vollkommener Unsinn heraus, wenn man diese verzerrten Zeichnungen als Experimentieranweisungen auffaßt. Für den Demonstrationsversuch vor einer größeren Klasse werden die „Lichtstrahlen“ reichlich massiv genommen, und die verwaschene Lichtfigur scheint aus der Entfernung mit der Figur an der Tafel oder im Lehrbuch übereinzustimmen. So grobe Experimentiermittel bedeuten dasselbe wie ein Rechnen mit roher Näherung. Je sauberer man den Versuch auszuführen sucht, um so weniger gelingt er im Sinne der Anleitung zum Apparat, und so kommt es, daß bei den optischen Versuchen ein sorgsamer und aufmerksamer Lehrer dauernd vom schlechten Gewissen geplagt wird oder, was noch schlimmer ist, an seiner Experimentierkunst verzweifelt. Die Wahrheit ist, daß solche an die falschen Formeln angelehnte Versuche nicht gelingen können, wenn sie sauber durchgeführt werden.

Zu den eben gekennzeichneten Apparaten gehören die weitverbreiteten optischen Scheiben. Sie sind durchaus dem Gedankengang des Rechners angepaßt, der aus einigen allgemeinen Sätzen alle Einzelheiten herleitet. Daß diese allgemeinen Sätze zunächst selbst an der Scheibe verifiziert werden (man kann auch die Zeichnungen auf einer dieser Scheiben dazu mißbrauchen, dem Schüler vorzutäuschen, er habe das Brechungsgesetz entdeckt), ändert daran nichts. Die optischen Scheiben erzeugen mit Lichtstrahlen die Figuren, die den Text einer theoretischen Optik erläutern. Auf solchen Wegen kommt die Experimentierkunst sehr in Gefahr, in eine Künstelei auszuarten.

Zu dem üblichen Sammlungsbestand gehört ein Kasten, oft auch mehrere, mit Linsen von sechs verschiedenen Formen. Versuche kann man mit ihm nicht machen, die Querschnittsformen werden durch Zeichnung besser verdeutlicht.

Mit recht großen Erwartungen wird auch in der Regel eine optische Bank mit vielem Zubehör für einige hundert Mark gekauft. Nach einigen Jahren steht sie unbenutzt und als lästiges Hindernis in der Sammlung herum. Zu subjektiven Versuchen hat sie sehr beschränkten Wert, für den Unterricht ist sie nahezu wertlos, ein Teil des Zubehörs ist ohne die optische Bank zu allerlei Versuchen brauchbar, die ganze Zusammenstellung aber mehr oder weniger eine Verlegen-

heitskonstruktion der Fabrikanten, die von ihren Bestellern statt einer vernünftigen Anleitung nur die Forderung erfahren, daß man mit der Bank alle optischen Versuche machen wolle.

Blicken wir noch einmal zurück, so fällt auf, daß das, womit man gemeinhin anfängt, bei der hier gegebenen Darstellung nahezu an den Schluß kommt. Im Grunde genommen ist dem, womit man bisher anfang, eine Vorstufe gegeben worden, die von Einzelerfahrungen zu Zusammenhängen aufsteigt. Dies geschieht aber nicht durch Hinzufügung von neuem Stoff, sondern durch andere Ordnung und Darstellung des vorhandenen. Die Absicht war, an die Stelle der jetzigen Darstellung, die schon oft als zu abstrakt empfunden worden ist, eine anschaulichere und wirksamere zu setzen.

## 22. Das Format der Glasbilder für Bildwurf.

Die erste Plattengröße für Glasbilder zum Bildwurf, die weitere Verbreitung fand, war 85 : 85 mm, die Hälfte der damals gebräuchlichen Stereoskopplatte. Die Beleuchtungslinsen hierfür hatten 103 mm Durchmesser, das Bild wurde mit abgerundeten Ecken 5 mm breit umrandet. Etwas später wurde die Platte 85 : 100 mm eingeführt, um einen 15 mm breiten Rand zur Beschriftung und Erläuterung des Bildes zu gewinnen. Bald darauf verzichtete man wieder auf den Schriftrand, nutzte diese Platte zu einem Bilde von 75 : 90 mm mit abgerundeten Ecken aus und wendete Beleuchtungslinsen von 115 mm Durchmesser an. Dann erklärte man die abgerundeten Ecken für unschön und fing an, Ausnutzung der Platten bis in die Ecken zu fordern. 115 mm Linsendurchmesser reichte nun nur noch für die Platte 85 : 85 mm, und für 85 : 100 mm wurde 120 mm Linsendurchmesser gefordert und auch eingeführt. Das alles geschah in einer Zeit, in der man, von Ausnahmen abgesehen, auf Lichtquellen von bescheidener Leuchtdichte angewiesen war. Bei solchen Lichtquellen bedeutet die Vergrößerung der Beleuchtungslinsen einen Vorteil, der besonders von denen erkannt wurde, die den Bildwerfer auf Wandervorträgen benutzten. Diese erfanden, um ihr Licht, also ihre Beleuchtungslinse, recht auszunutzen, zum 120-mm-Kondensator die Platte 120 : 120 mm, mit der sie in der Regel runde Bilder zeigten.

Etwa ein Jahrzehnt nach Erfindung der Trockenplatte einigte man sich in Deutschland über Plattengrößen der Aufnahmeapparate, wobei gegen starken Widerspruch auch die Größe 90 : 120 mm anerkannt wurde, die später besonders große Verbreitung fand. Das führte dazu, auch diese Platte zum Bildwurf zu benutzen, und hatte die Einführung von 150 und 160 mm großen Beleuchtungslinsen zur Folge. Zur völligen Ausnutzung dieser Linsen wurde dann noch die Platte 160 : 160 mm vorgeschlagen, die in der Tat einer großen Bildersammlung zugrunde gelegt ist. Hochschulinstitute legten eine Zeitlang Wert darauf, auch die Platte 130 : 180 mm zum Bildwurf benutzen zu können, und schafften Bildwerfer mit 220 mm großen Linsen an. Für den gewöhnlichen Bedarf ist das natürlich eine Verirrung. Der Sonderfall, daß man Röntgenaufnahmen im Original zeigen will, scheidet für unsere Betrachtung aus.

Inzwischen hat sich die Lichttechnik erstaunlich entwickelt und stellt uns heute Lichtquellen verschiedener Art von so großer Leuchtdichte zur Verfügung, daß wir für den größten Saal mit Glasbildern auskommen können, die nicht viel größer als eine Briefmarke sind, wie uns jede Kinovorführung beweist. Dadurch ist sozusagen jede Plattengröße für den Bildwurf brauchbar geworden, solange es sich um den Eigenbedarf des einzelnen handelt.

Denkt man aber an den Austausch der Bilder verschiedener Herkunft und an die Sicherheit der Vorführung etwa in einer Fachversammlung, wo die Vortragenden oft wenige Minuten vor Beginn der Sitzung dem Vorführer ihr Bilderpäckchen (die Verkleinerungsform ist nicht immer berechtigt) in die Hand drücken, so ist die vernünftige Folgerung aus der Möglichkeit, jede Plattengröße zum Bildwurf zu benutzen, daß man sich auf eine Einheitsplatte einigt. Bei solcher Einigung muß am meisten Rücksicht auf die Anwendungsgebiete genommen werden, die am ärgsten durch unvermeidliche Rücksichten eingeengt sind.

Auf Grund langer Beratungen, zu denen Vertreter aller mit Bildwurf arbeitenden Gruppen geladen waren, ist das Normenblatt DIN 108<sup>1)</sup> aufgestellt worden, das in Abb. 83 verkleinert wiedergegeben ist und für Technik und Unterricht Geltung hat. Im folgenden seien die Erwägungen wiedergegeben, die im Lauf der Beratungen den entscheidenden Einfluß gewannen.

Weder äußerste Ausnutzung der Platte noch äußerste Ausnutzung der Beleuchtungslinsen ist zweckmäßig, denn beide Forderungen widersprechen sich. Bei Vermeidung dieser Einseitigkeit kann man Platte und Beleuchtungslinse gleichzeitig in befriedigender Weise ausnutzen.

Bildformat und Plattenformat sind etwas Verschiedenes. Die Handhabung des Bildwerfers erfordert ein einheitliches Plattenformat, dagegen ist es nicht möglich, ein einheitliches Bildformat zu fordern. Es geht nicht an, Kunstwerke in einem anderen Bildausschnitt zu zeigen als dem, den der Künstler gewählt hat. Mikrophotogramme werden in der Regel kreisrund begrenzt, durch die Eigenschaften der Aufnahmelinsen war das bis in die neueste Zeit fast notwendig. Kennlinien muß man oft in quadratischem Ausschnitt zeigen; gleichseitige Hyperbeln würden in anderem Ausschnitt geradezu verzerrt erscheinen. Die Nebeneinanderstellung von „Alt“ und „Neu“, „Richtig“ und „Falsch“ erfordert eine im Verhältnis zur Höhe beträchtliche Gesamtbreite usw.

Das Breitbild ist dem Hochbild gegenüber zu bevorzugen. Vergleicht man solche Bilder ähnlicher Art, z. B. Einzelbild und Gruppe, Schlucht und offene Landschaft, enge Straße und Markt, so ist das Hochbild immer ärmer an Einzelheiten als das Breitbild. Es ist deshalb gerechtfertigt, dem Hochbild einen geringeren Flächenraum auf dem Schirm zu geben als dem Breitbild. Dazu kommt, daß man in vielen Sälen hinsichtlich der Höhe des Schirmes beschränkt ist, nicht aber in bezug auf die Breite. Macht man nun der Plattenausnutzung wegen

<sup>1)</sup> DIN ist das amtlich eingetragene Schutzzeichen der deutschen Normen, es ist Abkürzung von: Deutsche Industrie-Norm.

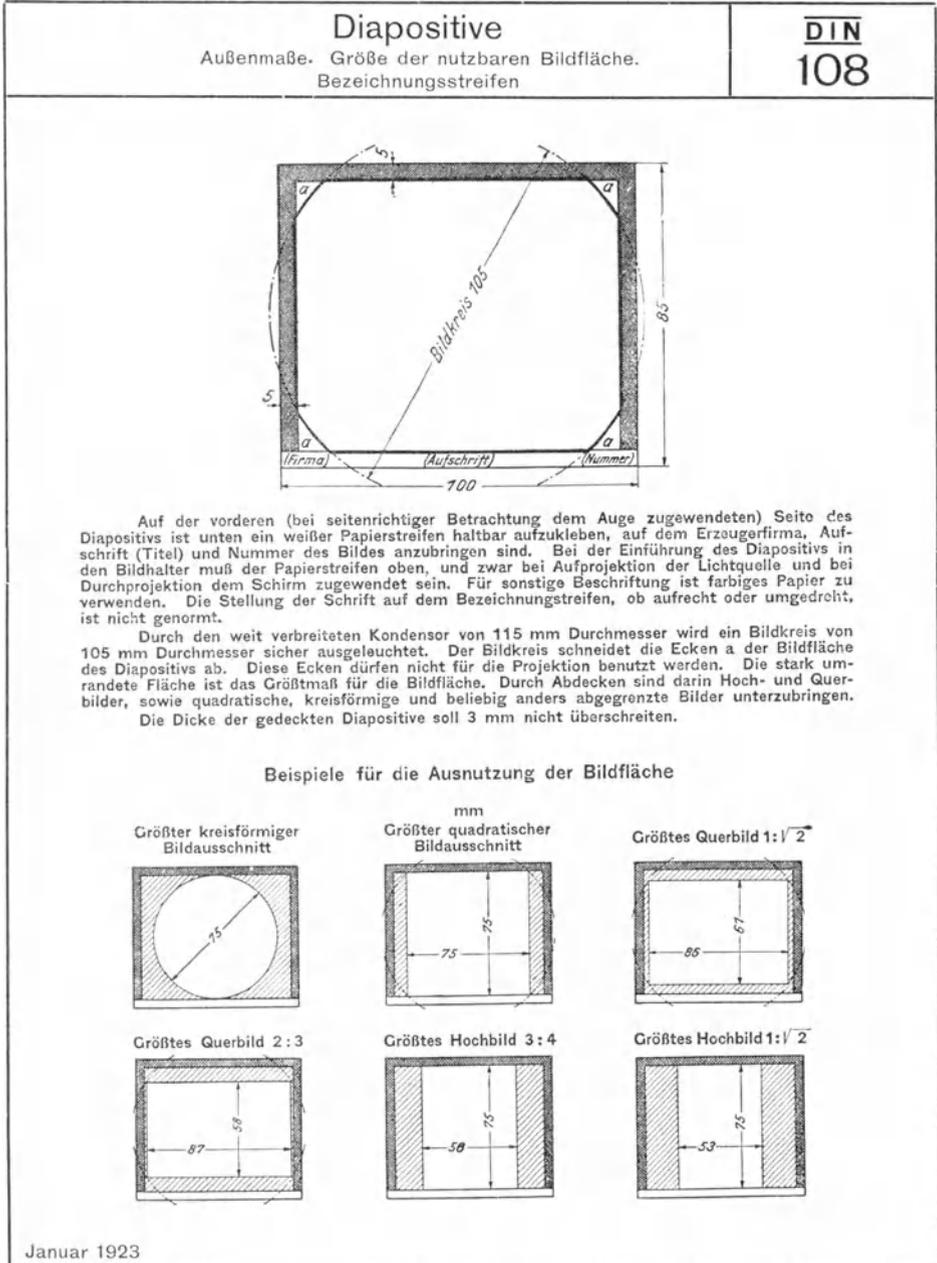


Abb. 83. Normblatt DIN 108.  
 Diapositive. Außenmaße, Größe der nutzbaren Bildfläche. Bezeichnungstreifen.

die Hochbilder auf hochgestellter Platte und stellt den Bildwerfer so auf, daß bei diesen Bildern die Schirmhöhe ausgenutzt wird, so kann man bei den Breitbildern die Schirmhöhe nicht ausnutzen. Um also die Hochbilder größer zeigen

zu können, als nötig ist, zeigt man die Breitbilder kleiner, als erwünscht ist. Diese Unzweckmäßigkeit verbietet das Normenblatt.

Die Platten sollen nicht unnötig groß sein, denn mit der Größe wachsen Kosten, Gewicht und Bruchgefahr. Andererseits ist es nicht zweckmäßig, auf die Kleinheit herunterzugehen, die das Plattenkorn noch erlauben würde, weil dann winzige Plattenfehler schon stören, weil das Anlegen mit Farben zu schwierig wird und weil das Decken und Umrahmen so kleiner Platten mühsamer und deshalb teurer ist als bei etwas größeren. Auch auf die Farbrasterplatten muß Rücksicht genommen werden.

Auf die vorhandenen Bestände an Bildern und Bildwerfern muß Rücksicht genommen werden. Es wurde festgestellt, daß bei Bildern für Unterrichtszwecke die Platte 85 : 100 mm bei weitem die häufigste ist, und daß die Schulen meist Bildwerfer von 115 mm Linsendurchmesser haben.

Von den beiden schließlich allein in Betracht kommenden Plattengrößen 85 : 100 mm und 90 : 120 mm wurde die kleinere gewählt, die sich in vielfacher Erfahrung als groß genug erwiesen hat. Die größere wäre in den sehr verbreiteten Bildwerfern von 115 mm Linsengröße nicht verwendbar gewesen, während die kleinere Platte auch im größeren Bildwerfer noch verwendbar bleibt.

Demgemäß kommen für die Schule Bilder von 85 : 100 mm, die nach der Vorschrift des Normenblattes Din 108 gemacht sind, und Klassenbildwerfer von 115 mm Linsendurchmesser in Betracht. Für den Festsaal ist aber mit Rücksicht auf die 90 : 120 mm großen Bilder des Alpenvereins und einiger anderer Vereine ein Bildwerfer mit 150 mm großen Beleuchtungslinsen, verschiebbarer Bildbühne und auswechselbaren Objektiven vom Brennweitenverhältnis 3 : 4 bis 4 : 5 erwünscht.

Bei Selbstherstellung von Bildwurfbildern kopiert man auf 85 : 100 mm entweder von einer bis zum Rand ausgenutzten Aufnahmeplatte von 90 : 65 mm, oder, was vorsichtige Lichtbildner lieber tun, man nutzt die Platte 90 : 120 mm grundsätzlich nicht bis zum äußersten Rande aus. Werden die Diapositive nicht durch Kontaktdruck, sondern durch Verkleinerung hergestellt, so ist man von der Aufnahmegröße unabhängig. Bei Tabellen hüte man sich, zuviel auf die Platte zu bringen. Man muß sich gegenwärtig halten, wie klein das Schirmbild trotz seiner Größe dem entfernten Beschauer erscheint.

Vor dem Decken und Umranden muß man die Glasbilder durch Erwärmen auf etwa 50° gut austrocknen, sonst zieht die Innenseite der Deckplatte die Feuchtigkeit aus der Gelatine an sich und wird im Lauf weniger Monate trübe.

### 23. Das Schirmbild beim Bildwurf.

Ein häufiger Fehler ist es, daß für den gegebenen Zuschauerraum das Schirmbild zu groß gemacht wird. Dadurch gehen Bildwirkung und Übersicht verloren. Gibt man jemand eine Postkarte mit schöner Ansicht zur Betrachtung, so wird man sehen, daß er sie zwischen 40 und 50 cm vom Auge hält und keineswegs auf die gewöhnlich angenommene Entfernung von 25 cm vom Auge bringt. Ein

perspektivisch richtiger Eindruck ist so allerdings nicht möglich, der würde aber in vielen Fällen eine Annäherung auf 15 cm erfordern. Vom Standpunkt des Künstlers muß man sagen, daß fast immer mit zu kurzer Brennweite im Verhältnis zur Plattenbreite photographiert wird.

Beim Bildwurf in der Klasse werden die entferntesten Schüler 8—9 m vom Schirm sitzen. Der nächste sollte keineswegs weniger als 3 m vom Schirm entfernt sein, denn auch von da aus ist es schon schwer, Übersicht zu gewinnen. Für diese nächsten Beschauer ist ein 3 m breites Bild jedenfalls viel zu breit, ein 2 m breites erträglich, und dieses ist für die 6 m entfernten gerade gut, für die 9 m entfernten ausreichend.

Das Schirmbild soll in den hellsten Stellen 30 bis 50 Lux bei Glasbildern, 10 bis 15 Lux bei Papierbildern haben. Der Unterschied ist darin begründet, daß bei Glasbildern noch Helligkeitsverhältnisse von 1 : 30 gut ausnutzbar sind, während Papierbilder an sich nur bestensfalls 1 : 14, Rasterdrucke sogar nur 1 : 9 aufweisen, was durch die von den Linsenreflexen herrührende Aufhellung auf 1 : 11 und 1 : 7 herabgesetzt wird. Epidiaskope zeigen häufig den Fehler, daß das Glasbild im Verhältnis zum Papierbild allzu hell gezeigt wird. Zu dunkle Bilder ermüden die Augen durch Anstrengung, zu helle durch Blendung.

Man darf nicht projizieren wollen, nachdem unmittelbar vor dem Bildwurf noch helles Tageslicht oder gar Sonnenlicht ins Klassenzimmer geschienen hat. Die zum Schutz gegen Blendung eng eingezogene Pupille erweitert sich nur allmählich. Das Auge wird anfangs die Bilder als zu dunkel und nach 10 Minuten vielleicht schon als unnötig hell empfinden. Im Unterricht muß man zwischen zwei Bildern die Tafel benutzen können. Es darf weder die Tafel durch den Schirm verhängt sein, noch darf die Tafelbeleuchtung und die für Nachzeichnen der Tafelskizzen nötige Zimmerbeleuchtung irgendwie blenden. Ein Unterricht mit Bildwurf ist etwas ganz anderes als ein Lichtbildervortrag. Das Bild soll die Unterweisung nicht beherrschen, sondern ihr dienen.

Sehr verkehrt ist es, im mangelhaft verdunkelten Zimmer den Bildwurf auszuführen, soweit es sich nicht um die einfachen Konturen physikalischer Apparate handelt, sondern um wirkliche Bilder. Nach dem FECHNERSchen Gesetz sind es nicht die Helligkeitsunterschiede, sondern die Helligkeitsverhältnisse, die das Auge beurteilt, und diese werden durch Nebenlicht immer vermindert und entstellt. Auch durch einen ungeheuren Mehraufwand von Licht läßt sich dieser Nachteil nicht völlig ausgleichen.

Die Anordnung der Sitze im Bildwurfszimmer und der Ort und die Stellung des Bildschirmes sind den Eigenschaften des Bildwurfgerätes anzupassen. Die einfachste und beste Art ist, die Bildwerfer für Glasbild und Papierbild völlig voneinander zu trennen, weil die Bedingungen ihrer Wirksamkeit völlig verschieden sind, ja sich geradezu widersprechen. Der Bildwurf vom Papierbild wird bei allen jetzigen Apparaten über einen Oberflächenspiegel ausgeführt, um die Seitenvertauschung der Bilder zu vermeiden. Das erlaubt eine freiere Wahl für den Ort des Schirmes und ermöglicht es, ohne aufsteigende Bänke

auszukommen, wie das Abb. 84 zeigt. Auf dem vordersten Schülertisch ist der handliche Bildkessel<sup>1)</sup> von Schmidt & Haensch gezeichnet, das erste wirksame Glühlampenepiskop, dessen überraschende Leistung auf dem weißen Anstrich der Innenfläche beruht. In der Ausnutzung der in die Lampen geführten elektrischen Energie steht es immer noch an erster Stelle. Der Schirm ist ein Stück Rollenzeichpapier von 2 m Breite und 1,6 m Höhe. Es ist schräg über der Tafel angebracht, so daß der Mittelstrahl vom Bildkessel senkrecht darauf fällt. Den Bildwurf vom Glasbild kann man auf demselben Wege mit dem Untersatz zum Bildkessel ausführen, oder man verwendet einen der billigen, für die Klasse völlig ausreichenden Glühlampenbildwerfer, der hinter dem Schüler auf einer Konsole oder im LIESEGANGSchen Klappschrank aufgestellt ist. Das Objektiv muß der Länge des Raumes angepaßt sein. Als Schirm dient entweder der schräge oder ein Stück der weißen Wand.

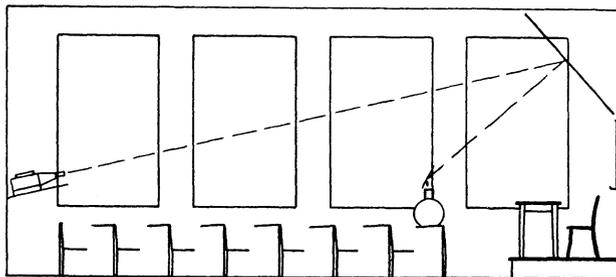


Abb. 84. Bildwurfzimmer ohne ansteigende Sitzreihen.

Die jetzt sehr verbreiteten Epidiaskope, die auf dem Irrtum beruhen, daß durch die Vereinigung eine Vereinfachung und Ersparnis erzielt werde, verlangen einen Bildschirm in der ungefähren Höhe des Objektivs. Da der Bildwurf vom Papierbild lichtstarke Objektive verlangt, die man der Kosten wegen nur mit mäßiger Brennweite anwenden kann, ist nur ein mäßiger Schirmabstand möglich. Die Folge davon ist, daß man stark ansteigende Sitze, mindestens von der dritten Reihe an, in das Bildwurfzimmer einbauen muß, wie das Abb. 85 andeutet.

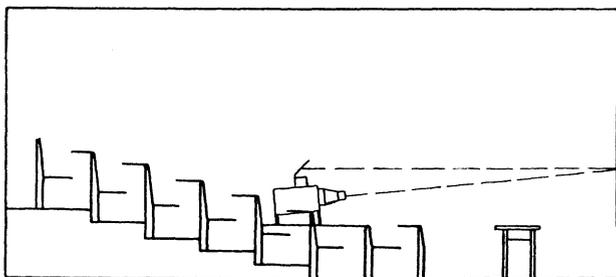


Abb. 85. Bildwurfzimmer mit ansteigenden Sitzreihen.

Die jetzt sehr verbreiteten Epidiaskope, die auf dem Irrtum beruhen, daß durch die Vereinigung eine Vereinfachung und Ersparnis erzielt werde, verlangen einen Bildschirm in der ungefähren Höhe des Objektivs. Da der Bildwurf vom Papierbild lichtstarke Objektive verlangt, die man der Kosten wegen nur mit mäßiger Brennweite anwenden kann, ist nur ein mäßiger Schirmabstand möglich. Die Folge davon ist, daß man stark ansteigende Sitze, mindestens von der dritten Reihe an, in das Bildwurfzimmer einbauen muß, wie das Abb. 85 andeutet.

<sup>1)</sup> Diese treffende Verdeutschung für Kugelepiskop hat HERMANN HAHN geprägt.

## Stichwortverzeichnis.

- ABBE** 67, 90.  
Abbildung 19.  
— im Unendlichen 56.  
Abweichung, chromatische 60.  
—, sphärische 52.  
Achromatisch 60.  
Akkommodation 25.  
Alterssichtig 28.  
Anordnung, vollständige optische 23, 25, 30, 49.  
Apertur 42, 79.  
Äquatorialschnitt 63.  
Astigmatismus 61, 62.  
Aufhellung 70.  
Auge 21, 24.  
**Bank**, optische 95.  
Beugung 92.  
Bild 21, 44.  
Bildfeldwölbung 61, 63.  
Bildwerfer 35.  
Bildwerfer, sein Platz 17.  
Bildwurf 11, 36, 96.  
Blende 11, 17, 18, 52, 54, 66, 70.  
Blendenort, natürlicher 64.  
Blendenstellung 20, 66.  
Bogenlampe 11.  
Brechungsgesetz 3, 59, 72, 87, 92.  
Brennpunkt 59, 81, 91.  
Brennweite 23, 28, 59, 81.  
Brille 24.  
Bunsenstativ 10.  
**CZAPSKI** 34, 68, 90.  
**Diaphragma** 18.  
Diffusionsschicht 92.  
Ding 12, 19, 21, 26.  
—, scheinbares 22.  
Dioptrie 28.  
Doppelblende 54.  
Drahtnetz 67.  
**EBERTY** 91.  
Eins, arabische 19.  
Epidiaskop 38, 101.  
Episkop 38, 70, 101.  
Ersatzfläche nach **GAUSS** 59.  
Fadenkreuz 31.  
Farbenabweichung 60.  
Fehler 51, 61.  
Fehlerausgleich 61.  
Fehlerreste 52.  
Feinstellzeug 9.  
Fernpunkt 27.  
Fernrohr 29, 31, 52, 59.  
Freihandversuch 8, 32.  
**GAUSS** 59, 89.  
Gegenstand 19.  
Gelatine 37.  
Glaskugeln 12, 19, 51.  
**GLEICHEN** 64, 87.  
Gleichrichter 12.  
Glühlampe 11, 12, 38.  
**GOLDBERG** 70.  
**GRIMALDI** 92.  
**GRUNER** 87, 90.  
**GULLSTRAND** 92.  
**HAHN** 9, 32, 101.  
Hauptpunkt 59.  
**HELMHOLTZ** 88.  
Hilfsblatt 16.  
Hilfslinse 22, 26.  
Hohlspiegel 48.  
Holländisch 33.  
**HUYGENS** 32, 92.

- Interferenz 93.  
**K**AUFMANN 3.  
 Kaustik 23, 81.  
 KEPLER 29, 87, 93.  
 Klemmfuß 9.  
 Knickpunkt 59, 84.  
 Knotenpunkt 65.  
 Kollektivlinse 30, 32.  
 Kollineation 4, 89.  
 Koma 61, 64.  
 Konkav 8, 28.  
 Kontrast 70.  
 Konvex 8, 15, 83.  
 Kopierklammer 10, 25.  
 Korrektur 57.  
 Kreisblende 16.  
 Kreuzmuffe 10.  
 Kugelfläche 73.  
 Kugelgestaltsfehler 52.  
 Kurzsichtig 27.  
**L**AGRANGE 88.  
 Lampe 11, 12.  
 Leuchtdichte 11.  
 Lichtquelle 11.  
 Lichtstrahlen 95.  
 Linse 8, 12, 18.  
 Linsen, Verwendung der 13.  
 Linsenfassung 8.  
 Linsenfehler 51.  
 Linsenform 8, 25, 51, 95.  
 Löcherpfeil 20.  
 Lupe 25.  
 Lux 42.  
**M**eniskus 40.  
 Meridionalschnitt 63.  
 Meßkunst 24.  
 Mikroprojektion 42, 79.  
 Mikroskop 29, 31.  
 Mikroskopobjektiv 30, 67.  
 Mitte der Linse 23, 54.  
 Modell des Auges 24.  
 Mullschirm 31.  
 Nahepunkt 26.  
 Nase 25.  
 Netzhaut 25.  
**N**EUMANN 87.  
 Normalsichtig 27.  
**O**bjekt 12.  
 Objektiv 30, 36, 59.  
 Okular 25.  
**O**STWALD 71.  
**P**appen 10.  
 Parallelmuffe 10.  
 Paraxialgebiet 4, 85.  
**P**AULI 21.  
 Pfeil 19.  
 Phase 93.  
 Punktlichtlampe 11, 58.  
**R**AMSDEN 32, 38, 42.  
 Rand der Linse 54.  
**R**EUSCH 87.  
 Rohrmuffe 10, 62.  
 Rundkolben 40.  
 Sagittalschnitt 63.  
 Sammellinse 8, 56.  
 Sammelwirkung 15.  
 Schattenbild 9, 15.  
 Schattenwurf 36, 40.  
 Scheibe, optische 95.  
 Scheinwerferlampe 11.  
 Schirm 15, 99.  
 Schräg zur Achse 61.  
**S**CHWALBE 8.  
 Sehweite 27.  
 Sinnbilder 12.  
 Sinusbedingung 59, 67, 79.  
 Sphärische Abweichung 52.  
 Spiegel 23, 47.  
 Spiegelfleck 69.  
 Starbrille 34.  
 Stiel 10.  
**T**angentialschnitt 63.  
 Terrestrisch 33.  
 Tiefenschärfe 11, 39.  
 Transformator 11.  
**Ü**berkorrektur 58.  
 Übersichtig 28.  
 Umkehrbarkeit des Lichtweges 20, 45.  
 Universalbildwerfer 35, 41.  
 Unterkorrektur 58.

- |  |                                  |
|--|----------------------------------|
| Verflochtene Abbildung 32.                         | Wechselstrom 11.                 |
| Vergrößerung 26, 41, 47, 75.                       | Weitsichtig 28.                  |
| Vergrößerungsrohr 29.                              | Wellenfläche 92.                 |
| Verzeichnung 40, 65.                               | Winkelfuß 10.                    |
| Vieldeutigkeit des Bildes 46.                      | Winkelmuffe 10, 62.              |
| Virtuell 21, 30, 43.                               | Zerstreuungslinse 8, 28, 47, 56. |
| Vollständige optische Anordnung 23, 25,<br>30, 43. | Zonen 53.                        |
| Vorzeichen 20, 73.                                 | Zündholz 31.                     |
-

**Abhandlungen zur Didaktik und Philosophie der Naturwissenschaft.** Herausgegeben von **F. Poske** in Berlin, **A. Höfler** in Prag und **E. Grimsehl** in Hamburg. (Sonderhefte der „Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht.“) Erscheinen in zwanglosen Heften. Band I (Heft 1—6). RM 14.20

I. Heft. **Die elektrische Glühlampe im Dienste des physikalischen Unterrichts.** Von **E. Grimsehl**, Professor an der Oberrealschule auf der Uhlenhorst in Hamburg. 60 Seiten. 1904. RM 2.—

II. Heft. **Zur gegenwärtigen Naturphilosophie.** Von Dr. **Alois Höfler**, o. ö. Professor an der Deutschen Universität in Prag. 136 Seiten. 1904. RM 3.60

III. Heft. **Der naturwissenschaftliche Unterricht — insbesondere in Physik und Chemie — bei uns und im Auslande.** Von Dr. **Karl F. Fischer**, a. o. Professor der Technischen Hochschule in München. 72 Seiten. 1905. RM 2.—

IV. Heft. **Wie sind die physikalischen Schülerübungen praktisch zu gestalten?** Von **Hermann Hahn**, Oberlehrer am Dorotheenstädtischen Realgymnasium zu Berlin. 67 Seiten. 1905. RM 2.—

V. Heft. **Strahlengang und Vergrößerung in optischen Instrumenten.** Eine Einführung in die neueren optischen Theorien. Von Dr. **Hans Keferstein**, Professor an der Oberrealschule auf der Uhlenhorst in Hamburg. 42 Seiten. 1905. RM 1.60

VI. Heft. **Über die Erfahrungsgrundlagen unseres Wissens.** Von Dr. **A. Meinong**, o. ö. Professor an der Universität Graz. 113 Seiten. 1906. RM 3.—

Band II (Heft 7—11).

I. Heft. **Elementare Messungen aus der Elektrostatik.** Von Professor Dr. **Karl Noack**, Oberlehrer a. D. 55 Seiten. 1906. RM 2.—

II. Heft. **Experimentelle Einführung der elektromagnetischen Einheiten.** Von Professor **E. Grimsehl**, Oberlehrer an der Oberrealschule auf der Uhlenhorst zu Hamburg. 41 Seiten. 1907. RM 1.60

III. Heft. **Die Zentrifugalkraft.** Ein Beitrag zur Revision der Newtonschen Bewegungsgesetze. Von Dr. **F. Poske**, Professor am Askaniischen Gymnasium in Berlin. 80 Seiten. 1909. RM 3.—

IV. Heft. **Magnetische und magnetisch-elektrische Messungen im Unterricht.** Von Dr. **W. Bahrdt**, Oberlehrer an der Oberrealschule in Großlichterfelde. Mit 46 Textfiguren. 55 Seiten. 1910. RM 2.40

V. Heft. **Beiträge zur Behandlung der elektromagnetischen Lichttheorie und der Lehre von den elektrischen Schwingungen.** Nebst einem Anhang über die Geschwindigkeit der Elektrizität. Von Dr. **Heinrich Lüdtke**, Professor am Reform-Real-Gymnasium in Altona (Elbe). 120 Seiten. 1911. RM 4.—