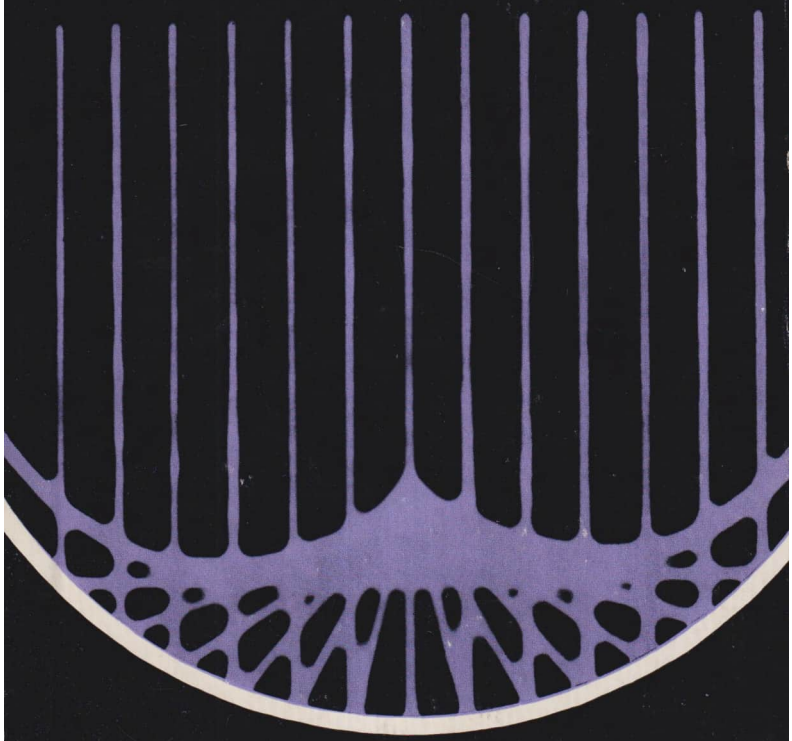
Physikalische Schulversuche 7

Strahlenoptik



Physikalische Schulversuche

Siebenter Teil
Strahlenoptik

Herausgegeben von Georg Sprockhoff
Verfaßt von Helmut Roth

7. Auflage

Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin 1982

Verfaßt von

Dr. Helmut Roth

Redaktion: Willi Wörstenfeld

© Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin 1979
Die 1. bis 5. Auflage erschien unter der Bestellnummer 022107
Lizenz-Nr. 203 · 1000/81 (DN 022147-7)
LSV 0644
Einband: Manfred Behrendt
Zeichnungen: Heinrich Linkwitz
Typografische Gestaltung: Atelier VWV
Printed in the German Democratic Republic
Gesamtherstellung: VEB Druckerei „Thomas Müntzer", 5820 Bad Langensalza
Schrift: 9/10p Extended Monotype
Redaktionsschluß: 10. 8. 1981
Bestellnummer: 707163 1
DDR 9,80 M

Inhalt

Einleitung 11

1. Hilfsmittel für die Durchführung optischer Versuche — Optische Abbildungsverfahren 15

1.0. Allgemeine Vorbemerkungen 15

1.1. Lichtquellen 18
1.1.1. Glühlampen 18
1.1.2. Kohlebogenlampen 19
1.1.3. Spektralröhren 20
1.1.4. Spektrallampen 20
1.1.5. Ultraviolettlampen 21

1.2. Unterrichtsmittel für die Optik 21
1.2.1. Optische Bänke 21
1.2.2. Geräte zur ebenen geometrischen Optik 25
1.2.3. Einsatz optischer Geräte 27

1.3. Selbstanfertigung von optischen Aufbauteilen und Geräten 29
1.3.1. Selbstanfertigung von Zusatzteilen zur optischen Bank 29
1.3.2. Selbstanfertigung von Zusatzteilen für die Geräte zur ebenen geometrischen Optik 37
1.3.3. Selbstanfertigung von Zusatzteilen zur Verwendung in Verbindung mit dem Tageslichtschreibprojektor 39
1.3.4. Selbstanfertigung von optischen Geräten für Schüler- und Hausexperimente 40
1.3.5. Verspiegeln von Glas 41

1.4. Optische Abbildungsverfahren 42
1.4.1. Erzeugung divergenten Lichtes — Schattenwurf 42
1.4.2. Erzeugung parallelen Lichtes 43

1.4.3. Reelle Abbildung selbstleuchtender oder beleuchteter flächenhafter Objekte . . . 44
1.4.4. Reelle Abbildung durchleuchteter flächenhafter Objekte . . . 44
1.4.5. Häufig verwendete Projektionsanordnungen . . . 47

2. Geradlinige Ausbreitung, Reflexion, Brechung und Totalreflexion des Lichtes . . . 51

2.0. Methodische Bemerkungen . . . 51

2.1. Geradlinige Ausbreitung des Lichtes . . . 54
2.1.1. Untersuchung der Lichtdurchlässigkeit von Körpern . . . 54
2.1.2. Demonstration der geradlinigen Ausbreitung des Lichtes . . . 55
2.1.3. Demonstration des Übergangs vom Lichtbündel zum Lichtstrahl . 57
2.1.4. Demonstration der Schattenwürfe . . . 58
2.1.5. Demonstration des Strahlenverlaufes beim Schattenwurf . . . 60
2.1.6. Demonstration der Entstehung von Sonnen- und Mondfinsternis . . 60
2.1.7. Demonstration des Strahlenverlaufes bei der Entstehung von Sonnen- und Mondfinsternis . . . 62
2.1.8. Nachweis der geradlinigen Ausbreitung des Lichtes und Erzeugung von Bildern mit Hilfe einer Lochkamera . . . 63
2.1.9. Fotografieren mit Hilfe einer Lochkamera . . . 65

2.2. Reflexion des Lichtes am ebenen Spiegel . . . 66
2.2.1. Demonstration der Reflexion des Lichtes an Spiegeln und matten Flächen . . . 66
2.2.2. Herleitung bzw. Bestätigung des Reflexionsgesetzes . . . 67
2.2.3. Demonstration der Lage von einfallendem und reflektiertem Strahl bei der Reflexion am ebenen Spiegel . . . 69
2.2.4. Beobachtung der Bilder an einem ebenen Spiegel . . . 70
2.2.5. Demonstration des Strahlenverlaufes bei der Bildentstehung am ebenen Spiegel . . . 72
2.2.6. Demonstration der Reflexion des Lichtes an Winkelspiegeln . . . 73
2.2.7. Beobachtung von Bildern an Winkelspiegeln . . . 74

2.3. Reflexion des Lichtes an gewölbten Spiegeln . . . 75
2.3.1. Demonstration des Strahlenverlaufes an einem Hohl- bzw. Wölbspiegel . . . 75
2.3.2. Demonstration der Reflexion von Parallel-, Brennpunkt-, Mittelpunkt- und Scheitelstrahlen am Hohl- bzw. Wölbspiegel . . . 77
2.3.3. Demonstration des Strahlenverlaufes bei der Abbildung eines Punktes mit Hilfe eines Hohl- bzw. Wölbspiegels . . . 78
2.3.4. Erzeugung reeller Bilder mit Hilfe eines Hohlspiegels . . . 79
2.3.5. Bestätigung der Abbildungsgleichung und der Gleichung für den Abbildungsmaßstab bei der Bilderzeugung mit Hilfe eines Hohlspiegels . . . 81
2.3.6. Beobachtung von virtuellen Bildern am Hohl- bzw. Wölbspiegel . . 82
2.3.7. Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Autoscheinwerfers . . . 83

2.4. **Brechung und Totalreflexion des Lichtes** 84
2.4.1. Freihandversuche zur Demonstration der Brechung des Lichtes . . 84
2.4.2. Demonstration der Brechung des Lichtes beim Übergang von einem lichtdurchlässigen Stoff in einen anderen 86
2.4.3. Herleitung bzw. Bestätigung des Brechungsgesetzes 87
2.4.4. Demonstration der Totalreflexion des Lichtes 90
2.4.5. Demonstration der Wirkungsweise eines Lichtleiters 92

2.5. **Durchgang des Lichtes durch planparallele Platten und Prismen** . . . 93
2.5.1. Demonstration der Parallelverschiebung des Lichtes an einer planparallelen Platte 93
2.5.2. Demonstration des Strahlenverlaufes an einer planparallelen Platte . 94
2.5.3. Demonstration des Strahlenverlaufes durch ein Prisma 95
2.5.4. Demonstration der Totalreflexion an einem gleichschenklig-rechtwinkligen Prisma 98
2.5.5. Demonstration des Strahlenverlaufes bei der Totalreflexion am gleichschenklig-rechtwinkligen Prisma 99

3. **Durchgang des Lichtes durch Linsen sowie Bau und Wirkungsweise optischer Geräte** 101

3.0. **Methodische Bemerkungen** 101

3.1. **Durchgang des Lichtes durch Linsen und Abbildung mit Hilfe von Linsen** 105
3.1.1. Demonstration des Strahlenverlaufes in Linsen 105
3.1.2. Demonstration der Sammelwirkung von Linsen 108
3.1.3. Demonstration der Abhängigkeit der Brennweite einer Linse von der Linsenkrümmung 109
3.1.4. Demonstration des Einflusses der Umgebung auf die Linsenwirkung 110
3.1.5. Demonstration der Brechung von Parallel-, Brennpunkt- und Mittelpunktstrahlen an Sammel- und Zerstreuungslinsen 111
3.1.6. Demonstration des Strahlenverlaufes bei der reellen Abbildung eines Punktes durch eine Sammellinse 112
3.1.7. Erzeugung reeller Bilder mit Hilfe einer Sammellinse 113
3.1.8. Herleitung bzw. Bestätigung der Linsengleichung und der Gleichung für den Abbildungsmaßstab 116
3.1.9. Vergleich der virtuellen Bilder von Sammel- und Zerstreuungslinsen 117
3.1.10. Beobachtung der virtuellen Bilder an Sammel- und Zerstreuungslinsen 119
3.1.11. Bestimmung der Brennweite von dünnen Sammellinsen 120
3.1.12. Bestimmung der Brennweite von dünnen Zerstreuungslinsen . . . 122

3.2. **Nachweis der Fehler bei der Abbildung mit Hilfe von Linsen** 124
3.2.1. Demonstration der hauptsächlichen Fehler bei der Abbildung durch Linsen 124

3.2.2. Demonstration der chromatischen Aberration einer Sammellinse . . 125
3.2.3. Nachweis der chromatischen Aberration einer dünnen Sammellinse 126
3.2.4. Demonstration der Entstehung der chromatischen Aberration einer Sammellinse 128
3.2.5. Demonstration der sphärischen Aberration einer Sammellinse . . . 129
3.2.6. Demonstration der Entstehung der sphärischen Aberration einer Sammellinse 130
3.2.7. Demonstration des Astigmatismus schiefer Bündel 131
3.2.8. Demonstration der astigmatischen Abbildung eines Kreuzgitters . . 132
3.2.9. Demonstration der Komafiguren durch Randstrahlen 133
3.2.10. Demonstration der Entstehung der Koma 134
3.2.11. Demonstration der Bildfeldwölbung 135
3.2.12. Demonstration der tonnen- und kissenförmigen Verzeichnung bei der Abbildung durch Sammellinsen bei falscher Pupillenlage 136

3.3. Demonstration von Bau und Wirkungsweise von Projektor, fotografischer Kamera und menschlichem Auge 138
3.3.1. Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Projektors für durchsichtige Bilder 138
3.3.2. Demonstration der Anwendung der Durchlichtprojektion im Tageslichtschreibprojektor und im Vergrößerungsgerät 141
3.3.3. Demonstration des Strahlenverlaufes in einem Projektor 142
3.3.4. Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Projektors für undurchsichtige Bilder 143
3.3.5. Demonstration von Bau und Wirkungsweise einer fotografischen Kamera 145
3.3.6. Demonstration des Strahlenverlaufes in einer fotografischen Kamera 146
3.3.7. Demonstration des Einflusses der Brennweite eines Kameraobjektives auf den Bildausschnitt 148
3.3.8. Demonstration von Bau und Wirkungsweise des menschlichen Auges 149
3.3.9. Demonstration des Strahlenverlaufes im menschlichen Auge 151
3.3.10. Demonstration der Akkommodation der Augenlinse 153
3.3.11. Demonstration der Korrektur von Fehlsichtigkeit 154
3.3.12. Demonstration des Strahlenverlaufes bei der Korrektur von Fehlsichtigkeit 156
3.3.13. Ermittlung der Abhängigkeit des Sehwinkels von der Gegenstandsentfernung 158

3.4. Demonstration von Bau und Wirkungsweise optischer Geräte zur Nah- und Fernbeobachtung 161
3.4.1. Freihandversuche zum Erlernen des Gebrauchs der Lupe 161
3.4.2. Demonstration der Wirkungsweise und der Vergrößerung einer Lupe 162
3.4.3. Ermittlung der Vergrößerung einer Lupe 164
3.4.4. Demonstration der Wirkungsweise eines Diapositivbetrachters . . . 165
3.4.5. Demonstration der Vergrößerung einer Lupe mit Hilfe des Tageslichtschreibprojektors 166

3.4.6. Demonstration des Strahlenverlaufes beim Gebrauch der Lupe . . 166
3.4.7. Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Keplerschen Fernrohres 167
3.4.8. Demonstration des Strahlenverlaufes in einem Keplerschen Fernrohr 170
3.4.9. Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Fernrohres mit Umkehrlinse 172
3.4.10. Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Prismenfernrohres 174
3.4.11. Demonstration der subjektiven Beobachtung mit einem Fernrohr . 175
3.4.12. Ermittlung der Vergrößerung eines Fernrohres 176
3.4.13. Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Galileischen Fernrohres 178
3.4.14. Demonstration des Strahlenverlaufes in einem Galileischen Fernrohr 179
3.4.15. Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Spiegelteleskopes 180
3.4.16. Demonstration des Strahlenverlaufes in einem Spiegelteleskop . . . 182
3.4.17. Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Mikroskopes . . 183
3.4.18. Demonstration des Strahlenverlaufes in einem Mikroskop 185
3.4.19. Ermittlung der Vergrößerung eines Mikroskopes 187
3.4.20. Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Spektralapparates 188

4. Spektrale Zerlegung des Lichtes und Farbmischung 191

4.0. Methodische Bemerkungen 191

4.1. Spektrale Zerlegung des Lichtes 193
4.1.1. Demonstration der spektralen Zerlegung des Lichtes 193
4.1.2. Demonstration des Strahlenverlaufes bei der spektralen Zerlegung des Lichtes 198
4.1.3. Demonstration der Entstehung eines Regenbogens 199
4.1.4. Demonstration des Strahlenverlaufes bei der Entstehung eines Regenbogens 201
4.1.5. Nachweis der Unzerlegbarkeit der Spektralfarben 201
4.1.6. Vergleich von Stoffen unterschiedlicher spezifischer Dispersion . . 202
4.1.7. Demonstration der Wirkungsweise von achromatischen Prismen und Geradsichtprismen 203
4.1.8. Nachweis des ultravioletten Lichtes im Spektrum einer Bogenlampe bzw. einer Quecksilberdampflampe 204
4.1.9. Nachweis des ultraroten Lichtes im Spektrum einer Bogenlampe bzw. einer Glühlampe 207
4.1.10. Demonstration der Reflexion von ultrarotem Licht und Vorführung der Durchlässigkeit von Stoffen für Wärmestrahlen 208
4.1.11. Beobachtung von diskontinuierlichen Emissionsspektren 210
4.1.12. Demonstration von Absorptionsspektren fester, flüssiger und gasförmiger Stoffe 212

4.1.13. Beobachtung der Absorption von Natriumlicht durch Natriumdampf 213
4.1.14. Nachweis der Fraunhoferschen Linien im Sonnenspektrum 214
4.1.15. Demonstration der Umkehrung der Natriumlinien 215

4.2. Farbmischung 217
4.2.1. Demonstration der Vereinigung aller Spektralfarben zu Weiß 217
4.2.2. Demonstration der additiven Farbmischung einzelner Spektralfarben zu Weiß 220
4.2.3. Vereinigung der Restfarben eines Spektrums 221
4.2.4. Demonstration der additiven Farbmischung 222
4.2.5. Demonstration der subtraktiven Farbmischung 225
4.2.6. Beleuchtung farbiger Körper mit farbigem Licht und fluoreszierender Stoffe mit UV-Licht 226
4.2.7. Demonstration farbiger Schatten 227

5. Ausgewählte Versuche zur Fotometrie 229

5.0. Methodische Bemerkungen 229

5.1. Fotometrie 230
5.1.1. Subjektiver Vergleich der Lichtstärken zweier Lichtquellen 230
5.1.2. Objektiver Vergleich der Lichtstärken zweier Lichtquellen. 233
5.1.3. Experimentelle Ermittlung des Lambertschen Entfernungsgesetzes . 234
5.1.4. Experimentelle Ermittlung der Lichtverteilungskurve einer Glühlampe 236

6. Ausgewählte Blackbox-Versuche zur geometrischen Optik 238

6.0. Methodische Bemerkungen 238

6.1. Blackbox-Versuche zur geometrischen Optik 239
6.1.1. Blackbox-Versuche zur Reflexion 239
6.1.2. Blackbox-Versuche zur Brechung 240
6.1.3. Blackbox-Versuche zum Durchgang des Lichtes durch Linsen . . . 240
6.1.4. Blackbox-Versuche mit teleskopischem Strahlengang 241
6.1.5. Blackbox-Versuche mit Input-Output-Übereinstimmung 242
6.1.6. Blackbox-Versuch zur Brechung und Totalreflexion des Lichtes am gleichseitigen Prisma 245

Register 246

Einleitung

1. Das vorliegende Buch ist eine Neubearbeitung des bereits mehrfach aufgelegten 7. Teils der Physikalischen Schulversuche. Es enthält im ersten Kapitel Hinweise zu den Unterrichtsmitteln für die Durchführung von Versuchen zur geometrischen Optik, Empfehlungen zur Selbstanfertigung einfacher Zusatzteile für die Aufbaugeräte zur Optik und eine Zusammenstellung einiger für den Physikunterricht wichtigen optischen Abbildungsverfahren. Im zweiten Kapitel sind Versuche zur geradlinigen Ausbreitung, zur Reflexion und zur Brechung des Lichtes aufgeführt. Versuche zum Durchgang des Lichtes durch Linsen sowie zum Bau und zur Wirkungsweise optischer Geräte bringt das dritte Kapitel. Im vierten Kapitel sind Versuche zur spektralen Zerlegung des Lichtes und zur Farbmischung beschrieben. Im fünften Kapitel sind Versuche zur Fotometrie und im letzten Kapitel einige Blackbox-Versuche zusammengestellt.
2. Die methodischen Grundsätze, die für die anderen Teile des Werkes bestimmend waren, wurden beibehalten. Gegenüber früheren Ausgaben werden in diesem Buch den einzelnen Versuchen „Methodische Hinweise" vorangestellt.
   Wie die anderen Teile der Buchreihe will auch dieser Teil nicht als Lehrbuch verstanden sein. Er wendet sich nicht an Schüler, sondern an die Physiklehrer selbst und setzt die Kenntnis der physikalischen Fakten und Zusammenhänge voraus. Aufgabe des Buches soll es sein, den Physiklehrern eine Hilfe bei der Auswahl und Durchführung von Experimenten zu geben. Wer sich darüber hinaus über bestimmte physikalische Einzelheiten und Zusammenhänge genauer informieren will, muß zu den bekannten Lehrbüchern für die Physik greifen. Wurden einzelnen Versuchsbeschreibungen Herleitungen beigefügt, so geschah es, um dem Leser Hinweise über die methodische Behandlung zu geben. Auch die den einzelnen Versuchsbeschreibungen beigefügten Meßwerttabellen sollen lediglich zeigen, wie man den betreffenden funktionalen Zusammenhang aus den Versuchsergebnissen unter Anwendung der experimentellen Methode gewinnen kann und welche Genauigkeit mit den angegebenen Versuchsanordnungen erreichbar ist. Selbstverständlich müssen die im Unterricht gefundenen Meßwerte nicht mit den im Beispiel angeführten Werten übereinstimmen. Im übrigen stammen die im Buch angegebenen Werte sämtlich aus durchgeführten Versuchsreihen.
3. Auch in diesem Buch wird jedes Kapitel durch „Methodische Bemerkungen" eingeleitet. Dabei wird auf grundlegende allgemeinmethodische Fragen nicht eingegangen, weil das nicht der Aufgabenstellung dieses Buches entspricht. Die „Methodischen Bemerkungen" in diesem Buch beziehen sich vielmehr auf die in den betreffenden Kapiteln behandelten Versuche, sie geben Hin-

weise allgemeiner Art, die für das Gelingen der Versuche zu beachten sind und die dem Lehrer bei der Auswahl und Durchführung der Experimente nützlich sein können.

4. Der sachliche Inhalt, auf den sich die Experimente beziehen, geht über die Anforderungen der zehnklassigen allgemeinbildenden polytechnischen Oberschule und teilweise auch der Abiturstufe hinaus. Dadurch kann das Buch auch von Arbeitsgemeinschaften, im fakultativen Unterricht der Erweiterten Oberschule, an Berufsschulen, Fachschulen und teilweise auch an Hochschulen und Universitäten, besonders in der Ausbildung von Fachlehrern für Physik, genutzt werden.
   Das Buch will den Benutzern keinesfalls einen ganz bestimmten methodischen Weg aufzwingen. Diesem Umstand wird dadurch Rechnung getragen, daß zu ein und demselben Sachverhalt meist mehrere Varianten angegeben werden und die Versuche nicht nach methodischen, sondern nach fachlichen Gesichtspunkten gegliedert sind, so daß sich die Reihenfolge der Darstellung der Experimente in diesem Buch keinesfalls mit der Reihenfolge der unterrichtlichen Behandlung deckt. Es bleibt weitgehend dem Physiklehrer überlassen, aus den zusammengestellten Experimenten entsprechend seiner fachlichen und erzieherischen Zielsetzungen eine zweckmäßige Folge von Lehrer- und Schülerexperimenten auszuwählen. Dabei sollte aber unbedingt beachtet werden, daß das Buch zwar alle in den Lehrplänen für die zehnklassige allgemeinbildende polytechnische Oberschule und die Abiturstufe als verbindlich aufgeführten Experimente zur geometrischen Optik berücksichtigt, darüber hinaus aber weit mehr Versuche zu jeder Unterrichtseinheit anbietet, als im Unterricht überhaupt demonstriert werden können. Dem Lehrer soll eine große Palette möglicher physikalischer Experimente vorgelegt werden, aus der er gemäß seinen Bildungs- und Erziehungsabsichten und unter Beachtung der Möglichkeiten der ihm zur Verfügung stehenden Unterrichtsmittel diejenigen Versuche auswählen kann, die sich am besten eignen und mit hoher Effektivität im Unterricht einzusetzen sind. Es wäre falsch, den Schülern etwa alle im vorliegenden Buch zu einem Stoffgebiet beschriebenen Versuche vorzuführen. Wenige, aber gut vorbereitete und durchgeführte und von den Schülern in allen Einzelheiten verstandene Versuche sind wirkungsvoller als eine Fülle mit unzureichenden Mitteln ausgeführter Versuche.

5. Bei der Auswahl und der Beschreibung der Versuche war der Verfasser bemüht, in erster Linie die Experimente darzustellen, die mit solchen Unterrichtsmitteln durchgeführt werden, wie sie im allgemeinen an den Schulen vorhanden sind. Dem Gedanken der Durchführung der Versuche unter Verwendung von Aufbauteilen wird schon von der Konstruktion der wichtigsten Unterrichtsmittel zur geometrischen Optik entsprochen, die vorwiegend als Aufbaugeräte vorliegen. Trotz der großem Leistungsfähigkeit der von der Lehrmittelindustrie der DDR entwickelten Lehrer- und Schülerexperimentiergeräte zur Optik, wird in einer Reihe von Versuchen auf selbstgefertigte Einzelteile zurückgegriffen. Das geschieht vorwiegend aus methodischen Gründen. Dabei werden zur Selbstanfertigung hauptsächlich sehr einfach herzustellende Ergänzungsteile zu den handelsüblichen Unterrichtsmitteln vorgeschlagen. Gleichzeitig sollen damit den Lesern Anregungen gegeben werden, die Einsatzmöglichkeiten der an den Schulen vorhandenen Unterrichtsmittel erheblich zu erweitern.

Auch auf ganz einfache Versuche und Freihandversuche wird großer Wert gelegt, um Anregungen für effektive Schülerexperimente und besonders auch für Hausexperimente zu geben.

6. Damit den Lesern, die nicht im Besitz der schon erschienenen Teile sind, die Benutzung des Buches erleichtert wird, sei auf folgende Einzelheiten hingewiesen:
Jede Versuchsbeschreibung ist in sich abgeschlossen und mit einer laufenden Nummer versehen. Diese besteht aus drei durch Punkte getrennte Zahlen. Die erste Zahl gibt das Kapitel, die zweite den Abschnitt und die dritte den Versuch an.
Das der Versuchsüberschrift oder bei mehreren Varianten der Geräteliste in eckigen Klammern beigefügte Zeichen [SE] bringt zum Ausdruck, daß der Versuch als Schülerexperiment geeignet ist. Selbstverständlich kann dieser Versuch auch als Lehrerexperiment ausgeführt werden.
Durch ein der Überschrift beigefügtes Kennzeichen wird der Verdunklungsgrad angegeben, in dem sich der Exerimentierraum befinden muß, soll der Versuch gut beobachtbar sein. Es bedeuten:

◑ halbverdunkelter Raum,
● vollständig verdunkelter Raum.

Jede Versuchsbeschreibung beginnt mit der Aufzählung sämtlicher zum Versuch verwendeter Geräte und Unterrichtsmittel. Sie sind mit einer laufenden Nummer versehen, die — falls zur besseren Kennzeichnung erforderlich — auch in den Abbildungen wiederkehrt.
Es wurde darauf verzichtet, die für den mechanischen Aufbau verwendeten Teile des Stativmaterials, die notwendigen Energiequellen und die Leiter zur Herstellung elektrischer Verbindungen einzeln in der Geräteliste aufzunehmen, weil es selbstverständlich erscheint, daß dieses Material an allen Schulen ausreichend vorhanden ist und vom Lehrer sachgemäß genutzt wird. Außerdem sind für den mechanischen Aufbau gleicher Versuchsanordnungen in den meisten Fällen verschiedene Varianten möglich.
Die in der Geräteliste angegebenen Gerätedaten sind bis auf wenige Ausnahmen Richtwerte und nicht als verbindlich zu betrachten. Die Angaben dienen zur Orientierung. Die Geräte können durch andere gleichartige oder ähnliche ersetzt werden.
Das hinter einem Gerät stehende Zeichen Ⓢ bedeutet, daß dieses Gerät für die Selbstherstellung empfohlen wird. Die dahinter in Klammern stehende Nummer weist auf den Abschnitt des Buches hin, in dem die Selbstbauanleitung zu finden ist.
Sämtliche Längen in den Gerätelisten und in den Abbildungen sind entweder in Metern oder in Millimetern angegeben.
Die in die Versuchsbeschreibungen eingefügten „Methodischen Hinweise" beziehen sich auf die jeweiligen Versuche. Sie sollen die Auswahl der Experimente erleichtern, zu ihrer effektiven methodischen Gestaltung beitragen oder auf besondere erzieherische Potenzen der Experimente hinweisen.
Zusätzliche Ausführungen, die über die Versuchsbeschreibung hinausgehen, erscheinen unter der Überschrift „Bemerkungen".
Bei Hinweisen auf andere Versuche des Buches wird der Versuchsnummer das Zeichen V vorgesetzt, z.B. V 3.2.8. Bei Hinweisen auf „Methodische Bemerkungen" ist das Zeichen MB unter Hinzufügen der Nummer des Abschnitts,

z.B. MB 2.0.3., angegeben. Auf „Methodische Hinweise" verweisen die Zeichen MH, z.B. vergleiche MH Nr. 2 V 3.2.1.!

Bei der Verwendung der Bezeichnungen für Größen aus der geometrischen Optik und der Bezeichnung von Punkten und Strecken in Skizzen zu Strahlenverläufen hält sich das Buch an die Empfehlungen der Normblätter. Abweichungen gibt es in den Bezeichnungen für den Einfallswinkel α, den Reflexionswinkel α' und den Brechungswinkel β sowie in der Kennzeichnung des Krümmungsmittelpunktes für den Hohlspiegel mit 2 F, eines Gegenstandspunktes mit G und eines Bildpunktes mit B.

1. Hilfsmittel für die Durchführung optischer Versuche — Optische Abbildungsverfahren

1.0. Allgemeine Vorbemerkungen

1.0.1. Will man in der Schule optische Versuche durchführen, so muß man vor allem über eine *Lichtquelle* von hinreichender Leuchtkraft verfügen. Zerstreutes Tageslicht reicht für die meisten Versuche nicht aus; es läßt meist nur subjektive Beobachtungen zu. Direktes Sonnenlicht ist nicht immer und nicht überall vorhanden; es erfordert außerdem die Verwendung eines *Heliostaten*, der aber den Versuchsaufbau unnötigerweise erschwert und die Schüler leicht ablenkt. Die Beschaffung einer leicht zu bedienenden lichtstarken Lichtquelle bildet heute kein Problem mehr, nachdem von der Glühlampenindustrie *Glühpunkt-* und *Glühfadenlampen* für Kleinspannungen von 6 V und 12 V bei einer Leistungsaufnahme von 5 W, 30 W, 50 W und 100 W geschaffen worden sind. Bei den Glühpunktlampen ist die Glühwendel so gewickelt, daß sie nur einen ganz kleinen Bereich ausfüllt und nahezu als eine punktförmige Lichtquelle gelten kann. Glühfadenlampen hingegen besitzen eine langgestreckte Wendel. Durch den Einbau dieser Lampen in ein lichtdichtes Gehäuse und durch das Ausstatten oder Kombinieren mit einem Kondensor entstehen Leuchten für divergentes, paralleles und konvergentes Licht von hinreichender Helligkeit. Sie sind in den meisten Sammlungen vorhanden und werden in diesem Buch Optik- bzw. Experimentierleuchte genannt. Der große Vorzug dieser Lichtquellen ist darin zu sehen, daß sie ein geringes Gewicht haben, daß sie leicht und gefahrlos zu bedienen sind, daß sie schnell und sicher auf der optischen Bank montiert und mit Hilfe eines Stieles in jeder Lage an einem Stativ befestigt werden können. Infolgedessen sind sie zum Durchführen optischer Schulversuche ausgezeichnet geeignet.
Dadurch soll aber keineswegs die Bedeutung einer guten *Bogenlampe* für den physikalischen Unterricht geschmälert werden. Man wird sie bei Versuchen bevorzugen, bei denen es auf eine besondere Helligkeit ankommt, so bei allen Versuchen zur Wellenoptik und bei den meisten Versuchen zur Farbenzerlegung. Die *Kleinbogenlampen*, die heute für Schulzwecke geliefert werden, sind hinsichtlich ihrer äußeren Abmessungen und ihres Gewichtes durchaus den besonderen Bedürfnissen der Schule angepaßt. Sie zünden bei einer Spannung von etwa 60 V, die rasch auf etwa 40 V absinkt; die Betriebsstromstärke beträgt nicht mehr als 5 A. Diese Kleinbogenlampen sind über einen passenden Widerstand oder einen Transformator bzw. eine Drossel unmittelbar an das Gleichspannungs- bzw. Wechselspannungsnetz anzuschließen und fast ebenso leicht zu handhaben wie die vorher erwähnten Optikleuchten.
Es sei noch kurz auf die Forderung nach *parallelem* Licht eingegangen, die nur noch große Bedeutung bei der Verwendung der optischen Scheibe besitzt. Sie

ist strenggenommen nur zu erfüllen, wenn es sich um eine Lichtquelle von verschwindend kleiner Ausdehnung handelt und wenn die Lichtquelle im Brennpunkt einer von Linsenfehlern freien Linse steht. Die Lichtstrahlen, die die Linse verlassen, laufen dann nahezu parallel. Bei einer Lichtquelle von einer merklich wahrnehmbaren, wenn auch sehr geringen Ausdehung, zum Beispiel bei dem Krater einer Bogenlampe oder bei der Glühwendel einer Glühpunktlampe, liegen die Verhältnise anders. Die von den einzelnen Punkten der Lichtquelle herkommenden Lichtstrahlen sind zwar nach dem Durchlaufen der Linse auch parallel. Im ganzen betrachtet aber divergieren sie etwas; die Grenzfläche des aus der Linse austretenden Lichtbündels ist nicht zylindrisch, sondern kegelförmig. Auf die zylindrische Begrenzung des Lichtbündels, wenigstens innerhalb der Strecke der Versuchsanordnung, kommt es aber in der Regel mehr an als darauf, daß die einzelnen Lichtstrahlen zueinander parallel laufen. Dies kann man dadurch erreichen, daß man die Linse ein klein wenig von der Lichtquelle fortrückt. Man kann auf diese Weise in einer Entfernung von 1 m ... 1,5 m hinter der Linse einen Lichtfleck erzeugen, der denselben Durchmesser hat wie die Linse. Sämtliche Lichtstrahlen verlaufen dann zwischen der Linse und dem Bild der Lichtquelle innerhalb eines Zylinders, womit die Forderung nach parallelen Strahlen im übertragenen Sinne erfüllt ist (vgl. Abb. 1.4.2./1).

1.0.2. Für den Unterricht in der Optik ist die *optische Bank* ein oft benutztes Hilfsmittel. Eine optische Bank ist für solche Versuche erforderlich, bei denen sich die optische Achse der Versuchsanordnung trotz Verschiebens der zu ihr gehörenden Einzelteile nicht verändern darf. Dies ist nur zu erreichen, wenn alle Zubehörteile der optischen Bank aufs genaueste justiert sind. Erfüllt die optische Bank diese Forderung, so hat sie für ein gutes Gelingen sehr vieler Versuche eine hohe Bedeutung.
Es ist nicht zu leugnen, daß in der grundsätzlichen und uneingeschränkten Verwendung der optischen Bank für optische Schulversuche gewisse Gefahren liegen. Die Schüler können leicht zu der Meinung veranlaßt werden, man könne optische Erscheinungen nur an der optischen Bank beobachten. Es könnte ihnen darüber der Sinn für das Beobachten optischer Erscheinungen in ihrer Umwelt und in der Natur verlorengehen. Man wird die optische Bank nur dort verwenden, wo sie methodisch günstig ist. Das ist z.B. der Fall bei Versuchen zur Demonstration der Bildentstehung an gewölbten Spiegeln und an Linsen, zum Bau und zur Funktion der optischen Geräte sowie zur spektralen Zerlegung des Lichtes.
Hingewiesen sei noch darauf, daß ein Lehrer beim Verwenden einer optischen Bank gewissermaßen *Aufbauphysik* treibt, weil er immer wieder aus den gleichen zur optischen Bank gehörenden Aufbauteilen vor den Augen seiner Schüler die einzelnen Versuchsanordnungen entwickelt. Ganz besonders deutlich kommt der Gedanke an die Aufbauphysik in dem System der Schülerexperimentiergeräte (SEG Ebene geometrische Optik, Geometrische Optik und Wellenoptik) und in der neuen optischen Bank des VEB Polytechnik Karl-Marx-Stadt zum Ausdruck.
Es sei ausdrücklich betont, daß in diesem Buche die Versuche auf die eben erwähnten optischen Bänke für Lehrer- und Schülerexperimente abgestimmt sind. Trotzdem können alle in diesem Buch beschriebenen Versuche auch mit anderen Typen von optischen Bänken durchgeführt werden.
Neben der optischen Bank sind in den letzten Jahren Gerätesätze zur Darstellung von Strahlengängen in einer Ebene entwickelt worden, und zwar für Demonstra-

tionsversuche zur Arbeit in der vertikalen Ebene einer Manipermhafttafel und für Schülerexperimente in der horizontalen Ebene eines auf dem Tisch liegenden Zeichenblattes. Diese Gerätesätze verdrängen auf Grund ihrer Vielseitigkeit und Leistungsfähigkeit weitgehend die optischen Scheiben, besonders die Scheibe nach Hartl. Ihr methodischer Vorteil liegt darin, daß man die zeichnerischen Darstellungen des Strahlenverlaufs unmittelbar aus dem Experiment auf die Zeichenebene bringen kann. Sie sind besonders geeignet zur Herleitung des Reflexions- und Brechungsgesetzes und der sich daraus ergebenden Gesetzmäßigkeiten der Bildentstehung und gestatten, die Strahlenverläufe in optischen Geräten überzeugend zu demonstrieren. Die entsprechenden Versuche in diesem Buch sind ebenfalls auf diese Demonstrationsgeräte abgestimmt.

1.0.3. Im Abschnitt 1.3. werden Hinweise und Anregungen zur Selbstanfertigung von Zusatz- und Ergänzungsteilen zu den optischen Gerätesätzen für die Lehrer- und Schülerexperimente gegeben. Es handelt sich dabei um Teile, die die Einsatzmöglichkeiten der handelsüblichen Geräte oft erheblich erweitern und mit verhältnismäßig einfachen Mitteln bei einigem handwerklichen Geschick ohne zu großem Arbeits- und Zeitaufwand selbst anzufertigen sind, z.B. um einfache Blenden aus Pappe, um durchscheinende und durchsichtige Objekte, die meist als Dia zu rahmen sind, um Blendscheiben und Blendrahmen zur Aufnahme optischer Bauteile, die meist aus Pappe anzufertigen sind. Das akkommodationsfähige Augenmodell verlangt allerdings größere handwerkliche Fertigkeiten in der Herstellung und sollte von einem Fachmann hergestellt werden, ebenso der vorgeschlagenen Polystyrolkörper für die Haftoptik. Alle anderen Zusatzteile für die ebene geometrische Optik sind einfach zu fertigen. Die zunehmende Bedeutung des Tageslichtschreibprojektors als Experimentierprojektor macht die Selbstherstellung einfacher Zusatzteile wie Spalte, Masken und Halterungen, fast ausschließlich aus Pappe, erforderlich, aber die neuartigen mit dem Tageslichtschreibprojektor vorzuführenden Versuche zur Optik lohnen diese Mühe.
Wir beziehen uns in unseren Angaben für den Selbstbau auf die optischen Bänke und die Geräte zur ebenen geometrischen Optik vom VEB Polytechnik Karl-Marx-Stadt. Durch Änderung der Abmessungen und der Form sind die Zusatzteile aber leicht an die Normen anderer Gerätesätze anzupassen.

1.0.4. Im Abschnitt 1.4. überschreitet das Buch bewußt den engen Rahmen des Unterrichts in der Optik. Die dargestellten Abbildungsverfahren sind vielmehr über die Belange der Optik hinaus für den gesamten Physikunterricht von Bedeutung. Da man vielfach noch falschen Ansichten und Unkenntnis über die zweckmäßige Wahl von Strahlenverläufen begegnet, glaubte der Verfasser des Buches, einiges über optische Abbildungsverfahren in das Buch aufnehmen zu müssen. Es wird Grundlegendes über die Erzeugung von divergentem Licht und über den Schattenwurf gesagt, auch mit dem Ziel, einige Hinweise für die Schattenprojektion zu geben. Die Erzeugung von parallelem Licht hat durch die Einführung der neuen Geräte zur ebenen geometrischen Optik etwas an Bedeutung verloren, ist aber bei Anwendung von optischen Scheiben älterer Bauweise noch sehr wichtig, es wird deshalb kurz auf die Erzeugung parallelen Lichtes eingegangen.
Hauptsächlich werden Verfahren zur reellen Abbildung flächenhafter selbstleuchtender und beleuchteter sowie durchleuchteter Objekte beschrieben, wobei auch Hinweise auf den Strahlengang für Lichtzeigerprojektion und auf die Fraun-

hofersche Anordnung gegeben werden. Abschließend werden einige häufig im Unterricht angewendete Projektionsanordnungen zusammengestellt.

1.1. Lichtquellen

Von den zahlreichen Lichtquellen für technisch-wissenschaftliche Zwecke sind im folgenden nur diejenigen angegeben, die für den Unterricht im Stoffgebiet Optik Bedeutung haben.

1.1.1. Glühlampen

Für Optik- und Experimentierleuchten sowie für Projektionseinrichtungen geringer Leistung sind Glühpunktlampen sehr geeignet. Sie besitzen eine Wendel, die auf sehr kleinem Raum zusammengedrängt ist und einen kleinen, nahezu quadratischen Leuchtfleck bildet (Abb. 1.1.1./1a). Optikleuchten werden heute auch mit den lichtstarken Halogendampflampen ausgerüstet, bei denen das Verdampfen des Glühfadenmetalls durch Halogendämpfe eingeschränkt wird.
Zur Erzeugung schmaler Lichtbündel und Lichtspuren, wie es für die ebene geometrische Optik von Bedeutung ist, werden die Haft- oder Heftleuchten, aber auch die Optikleuchten mit Glühfadenlampen ausgerüstet. Sie besitzen eine langgestreckte, dünne Wendel (Abb. 1.1.1./1b).

Abb. 1.1.1./1 Glühwendel einer Glühpunkt- (a) und einer Glühfadenlampe (b)

Projektoren größerer Leistung sind mit Projektionslampen bestückt, bei denen die Wendel mehrfach hin und her geführt ist und eine senkrechte Leuchtfläche bildet.
Alle Glühlampen sind mit einem genormten Sockel ausgestattet, der entweder ein Schraubgewinde oder einen Steck- bzw. Bajonettverschluß trägt.
Glühlampen für fotometrische Zwecke mit genau angegebenem Lichtstrom stehen im Handel nicht zur Verfügung. Für 220 V-Glühlampen kann man, vorausgesetzt, daß sie mit der vorgeschriebenen Spannung betrieben werden, den Lichtstrom etwa wie folgt angeben: Glühlampen von 15 W haben einen Lichtstrom von 135 lm ... 140 lm, von 40 W 475 lm ... 480 lm, von 60 W 840 lm ... 860 lm und von 100 W Leistung 1450 lm ... 1600 lm. Bei Nitraphotlampen, die mit Überspannung brennen und infolgedessen eine verkürzte Lebensdauer haben, ist der Lichtstrom oft auf dem Sockel angegeben. Alle Lampen können zum Zwecke der größeren Lichtausbeute auf Kosten der Lebensdauer mit höherer als der Nennspannung betrieben werden.

1.1.2. Kohlebogenlampen

Die *elektrische Bogenlampe* (Abb. 1.1.2./1) wird wegen ihrer großen Helligkeit als Lichtquelle für optische Schulversuche, insbesondere für solche an der optischen Bank, allgemein bevorzugt. Beim Betrieb einer Bogenlampe mit *Gleichstrom* entsteht ein ruhiger und heller brennender Krater als beim Verwenden von *Wechselstrom*. Deshalb wird man den Gleichstrom dem Wechselstrom vorziehen. Dem Lichtbogen ist ein Widerstand vorzuschalten, der die Stromstärke begrenzt und zugleich den Bogen beruhigt. Der Betrag des Widerstandes richtet sich nach der gewünschten Helligkeit. Man arbeitet meist mit einer Stromstärke von 5 A. Der Vorwiderstand beträgt bei einer Wechselspannung von 220 V etwa 30 Ω bis 40 Ω, er soll bis etwa 1 kW belastbar sein. Am Lichtbogen liegen dann etwa 40 V ... 60 V.

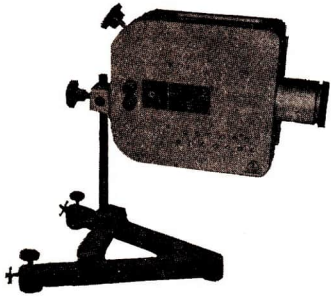


Abb. 1.1.2./1 Kohlebogenlampe mit Gehäuse

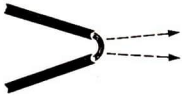


Abb. 1.1.2./2 Anordnung der Kohlen in einer Wechselstrombogenlampe

Die *Leuchtdichte* verändert sich mit der Stromstärke nur wenig und beträgt etwa 18000 cd · cm^{-2}. Der Krater wird mit zunehmender Stromstärke größer. Bei einer Stromstärke von 5 A hat er einen Durchmesser von etwa 3 mm.
Die zwei *Kohlen* werden bei Gleichstrombetrieb so angeordnet, daß die positive Kohle waagerecht liegt, während die negative Kohle lotrecht steht. An der positiven Kohle bildet sich ein leuchtender Krater aus, der die eigentliche Lichtquelle ist. Da die positive Kohle schneller abbrennt als die negative, machte man sie früher etwa $1^1/_2$mal so dick wie die negative. Heute wählt man die positive Kohle dünner, dafür aber wesentlich länger als die negative. Sie wird dementsprechend schneller nachgeführt. Dadurch erzielt man einen ruhigeren Abbrand und die Begrenzung des Kraters auf einen engen Raum.
Speist man die Bogenlampe mit *Wechselstrom*, so bilden sich auf beiden Kohlen Krater. Verwendet man zwei gleich dicke Kohlen, deren Durchmesser etwa dem der Gleichstrompositivkohlen entspricht, so werden diese wie in Abbildung 1.1.2./2 angeordnet. Die Kohlen können aber auch so wie bei der Gleichstrombogenlampe angeordnet sein. Dann wird für die horizontale Kohle, deren Krater

die Lichtquelle ist, zweckmäßigerweise eine dochtlose Kohle mit einem Durchmesser von 4 mm verwendet. Als lotrechte Kohle muß man eine Effektkohle mit einem Durchmesser von etwa 5 mm benutzen.
Wechselstrombogenlampen können auch über einen Transformator an das Wechselstromnetz angeschlossen werden. Die Sekundärspannung beträgt 40 V ... 60 V.

1.1.3. Spektralröhren

Spektralröhren sind besonders geformte *Geißlersche Röhren*. Die Leuchtkraft der Füllgase reicht im allgemeinen nicht zur Projektion der auftretenden Linien- und Bandenspektren aus. Man betrachtet deshalb diese Spektren im Spektroskop, wobei man meist Spektralröhren der üblichen langgestreckten Form verwendet (Abb. 1.1.3./1).

Abb. 1.1.3./1 Langgestreckte Spektralröhre

Die Röhren werden mit einer Spannung von etwa 3000 V betrieben.
Als Spannungsquellen sind Funkeninduktoren, Hochspannungstransformatoren und bei kurzzeitigem Betrieb auch Teslatransformatoren geeignet. Beim Verwenden eines Hochspannungstransformators ist, entsprechend der Belastbarkeit der Röhre (10 mA), der Röhre ein Widerstand vorzuschalten. Die Lehrmittelindustrie liefert Röhren mit folgenden Füllungen: H_2, CO_2, N_2, Na, He, A, Hg, Kr, Xe. Die Röhren werden mit gummiüberzogenen Klemmen gehalten oder zwischen Holtzschen Klemmen eingespannt.

1.1.4. Spektrallampen

Spektrallampen werden zur Projektion von *Linienspektren* verwendet. Ihre Leuchtwirkung wird durch Stromdurchgang in einem gasgefüllten Glaskolben hervorgerufen. Die Gasfüllungen und die Lichtstärken einiger Lampentypen sind aus der folgenden Tabelle zu ersehen.

Typ	Füllung	Betriebsstromstärke in A	Lichtstärke in cd	Vorwiderstand in Ω
NAE 24	Natrium	1,3	16	160
HQE 50	Quecksilber (UV)	1,15	100	160
KAE 18	Kalium	2	0,1	110
NEE 40	Neon	1,5	2	140

Die Lampen werden über eine Drossel oder einen Vorwiderstand an eine Wechselspannung von 220 V gelegt. Man kann sich eine Drossel mit Hilfe eines U-Kerns,

einer Spule von 1500 Wdg. und eines durch eine Spannvorrichtung befestigten Joches herstellen.
Der Kino-Einsteck-Sockel, mit dem diese Lampen ausgestattet sind, paßt in die Fassungen der Kleinbildprojektoren. Die Lampen sind stets lotrecht stehend anzuordnen.
Bei den mit UV gekennzeichneten Lampen müssen die Augen der Beobachter vor den Strahlen geschützt werden.

1.1.5. Ultraviolettlampen

Ein einfach zu betreibender *Ultraviolettstrahler*, mit dem *Fluoreszenz*, *Phosphoreszenz* und *typische Farbänderungen von Gegenständen bei* UV-*Beleuchtung* nachgewiesen werden können, ist die Type HQV 300. Die Lampe hat den Sockel und das Aussehen einer gewöhnlichen Glühlampe. Der Kolben aus Spezialglas läßt die UV-Strahlung ungehindert hindurchtreten, das sichtbare Licht dagegen kaum. Die Lampe wird an eine Wechselspannung von 220 V über eine Drossel, z.B. Spule von 1500 Wdg. mit U-Kern und Joch, angeschlossen; diese ist so bemessen, daß durch sie ein Strom mit einer Stärke von 0.7 A fließen kann. Beim Verwenden von Gleichstrom muß man der Lampe einen Widerstand von etwa 150 Ω vorschalten. Die Lampe hat eine elektrische Leistung von 75 W. Ihre Lichtausbeute im UV-Bereich ist größer als die von Glühlampen und Bogenlampen. Die mittlere Lebensdauer beträgt 1000 Stunden. Die Brennlage ist beliebig. Die Lampe bringt man in einem selbstgefertigten Gehäuse unter.

1.2. Unterrichtsmittel für die Optik

1.2.1. Optische Bänke

Eine optische Bank muß bestimmte technische und methodische Anforderungen erfüllen, wenn sie mit Erfolg im Unterricht eingesetzt werden soll. Die Führungsschiene muß stabil und verwindungsfrei sein, so daß sich die optische Achse ohne große Justierarbeiten einhalten läßt. Die Aufbauteile müssen sich leicht auswechseln lassen, dabei muß ein sicherer Sitz erreicht und eine leichte Verschiebbarkeit längs der optischen Achse gewährleistet sein. Die optische Bank muß bezüglich der Länge der Schiene an die experimentellen Erfordernisse anzupassen sein, sich durch einfaches Zusammensetzen verlängern lassen und durch Anbringen einer Gelenkverbindung um eine Drehachse schwenken lassen, wobei möglichst genau in dieser Achse ein optisches Bauelement fixiert werden kann. Eine optische Bank sollte mit einer Leuchte versehen sein, die möglichst gute Justierbarkeit und Auswechselbarkeit der Lichtquelle erlaubt und durch die Wahl der Helligkeit der Lichtquelle die Sichtbarkeit vieler optischer Versuche auch im schwach verdunkelten Raum ermöglicht. Durch zweckmäßige Konstruktion der Reiter muß eine raumsparende Anordnung der Linsen, Blenden, Filter usw. gewährleistet sein. Eine gute Sichtbarkeit der Demonstrationsversuche wird auch im nichtansteigenden Klassenraum durch eine hoch über der Tischfläche liegende optische Achse erreicht. Schließlich fordert man auch eine einfache,

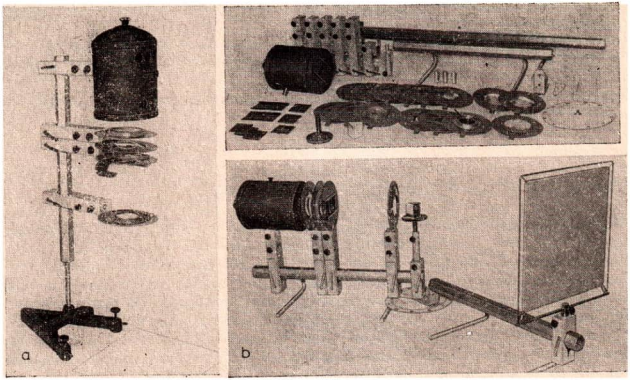


Abb. 1.2.1./1 Oben rechts: Optische Bank (Grundausstattung) ohne Schirm und Meßleisten vom VEB Polytechnik Karl-Marx-Stadt
Abb. 1.2.1./2 Versuchsaufbau mit der optischen Bank, (a) vertikale und (b) horizontale Anordnung

aber exakte Meßbarkeit der Entfernungen der Aufbauteile, um eine Reihe von Versuchen auch quantitativ auswerten zu können.
Diese Grundgedanken sind in einer vom VEB Polytechnik Karl-Marx-Stadt entwickelten optischen Bank (Abb. 1.2.1./1) in geradezu idealer Weise verwirklicht. Die Bank besteht aus einem verwindungsfreien Stahlrohr mit Sechskantprofil und wird in waagerechter Gebrauchslage von zwei Füßen getragen. Die Schiene kann unter Verwendung von 13 mm-Stativmaterial auch in lotrechter Stellung gebraucht werden (Abb. 1.2.1./2a). Eine Schwenkverbindung ermöglicht Strahlenverläufe mit abgewinkelter optischer Achse (Abb. 1.2.1./2b). Die magnetisch an den Reitern haftende Meßleiste ermöglicht durch ihre schwarzweiß abgestufte Teilung gute Sichtbarkeit und Ablesbarkeit. Hohe Klemmreiter dienen zur Befestigung der Aufbauteile an der Führungsschiene. Sie können mit einem Exzenterhebel schnell und sicher an der Sechskantschiene festgeklemmt werden. In zwei Schlitzen und einer 13 mm-Bohrung mit Einsatz lassen sich bis zu drei Einzelteile auf einem Reiter anordnen. Reiter mit Bauelementen sind längs der optischen Achse verschiebbar. Zur zusätzlichen Erhöhung der Stabilität können mehrere Reiter durch einen 13 mm dicken Stativstab fixiert werden, außerdem lassen sich dadurch auch weitere Aufbauteile mit Hilfe von Stativmaterial befestigen.
Kleine Klemmreiter dienen zur Befestigung der Schwenkverbindung, der Aufstellung des Bildschirms und unter Verwendung des Verlängerungsstücks eines Prismentischs und anderer Bauelemente. Das Grundgerät ist mit einer Optikleuchte mit Glühpunktlampe (12 V/50 W) ausgerüstet, für besonders lichtstarke

Versuche kann bei guter Kühlung eine Glühpunktlampe (12 V/100 W) bzw. über ein Adapterstück eine Halogendampflampe (12 V/100 W) verwendet werden. Die Lampe läßt sich durch Rändelschrauben sehr einfach justieren.
Zur Abschirmung des Nebenlichtes sind Linsen, Spiegel und Blenden in große runde Blendscheiben gefaßt. Sie werden durch Klemmfedern in den Schlitzen der großen Klemmreiter gehalten. Alle schnell auswechselbaren Teile wie Spalte, Lochblenden, Farbfilter und Objekte sind im Format 50 mm × 50 mm gehalten und können im Schiebe- oder Klemmschacht der Optikleuchte oder einer Blendscheibe untergebracht werden.
Die optische Achse dieser optischen Bank liegt 280 mm über der Tischfläche und gewährleistet dadurch und durch die günstigen Abmessungen der Aufbauteile eine ausgezeichnete Sichtbarkeit.
Noch vorhandene ältere Typen von optischen Bänken, wie in Abbildung 1.2.1./3 dargestellt, erfüllen hinsichtlich Justierbarkeit, Genauigkeit, Lichtstärke und gute Sichtbarkeit nicht mehr die Ansprüche der modernen Experimentiertechnik, jedoch lassen sich mit ihnen eine große Anzahl der beschriebenen Versuche noch zufriedenstellend ausführen.
Eine optische Bank für Schülerexperimente enthält das SEG *Optik* mit dem Grundgerät *Geometrische Optik* (Abb. 1.2.1./4). Sie übertrifft in ihrer Präzision die in Abbildung 1.2.1./3 dargestellte optische Bank älteren Typs. Die optischen Elemente sind in rechteckige Blendrahmen gefaßt und können mit einem kurzen 10 mm-Zapfen in die T-Füße gesteckt werden (Abb. 1.2.1./5). Ein T-Fuß kann bis zu drei Bauelemente aufnehmen. Die T-Füße haben auf ihrer Unterseite Nuten und können damit auf einem auf dem Tisch liegenden Stativstab geführt werden. Das Gerät ist mit einer Experimentierleuchte ausgerüstet, die eine Glühfadenlampe (6 V/5 W) als Lichtquelle besitzt, eine einsetzbare Kondensorlinse aufnimmt und in die Führungsnut vor dem Kondensor Loch- und Spaltblenden einzuschieben gestattet. Alle schnell auswechselbaren Teile wie Blenden, Farbfilter, Objekte sind im Format 50 mm × 50 mm gehalten und können im Schiebe- bzw. Klemmschacht eines Blendrahmens untergebracht werden.

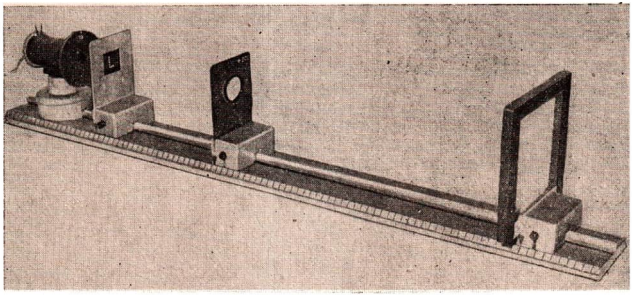
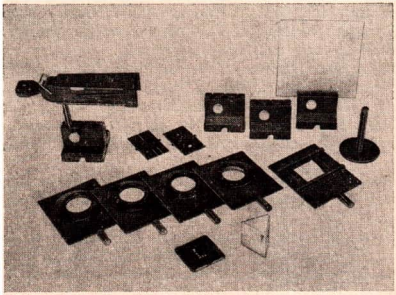
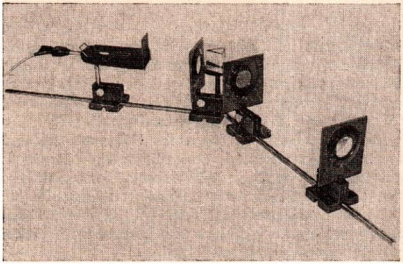


Abb. 1.2.1./3 Versuchsaufbau mit einer optischen Bank älteren Typs





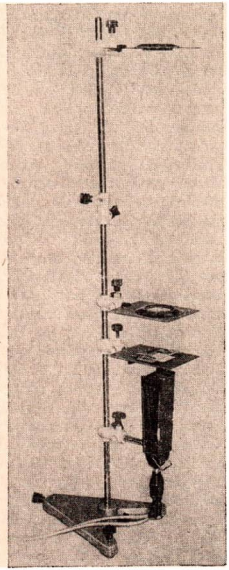


Abb. 1.2.1./4 Schülerexperimentiergerät Geometrische Optik (oben links)
Abb. 1.2.1./5 Horizontaler Versuchsaufbau mit dem Schülerexperimentiergerät Geometrische Optik (unten links)
Abb. 1.2.1./6 Vertikaler Versuchsaufbau mit dem Schülerexperimentiergerät Geometrische Optik (rechts)

Sollen einzelne Bauelemente starr fixiert werden oder wird ein lotrechter Versuchsaufbau erforderlich, können die Lichtquelle und die Blendrahmen auch mit Kreuzklemmen an einem Stativstab befestigt werden (Abb. 1.2.1./6). Auch für Versuche zur Strahlenoptik macht sich ab und zu die Verwendung eines zusätzlichen T-Fußes, des Handapparates, des feinen Spaltes sowie der Farbfilter aus dem Zusatzgerät Wellenoptik des SEG Optik erforderlich.

1.2.2. Geräte zur ebenen geometrischen Optik

Zur Demonstration der Strahlengänge bei der geradlinigen Ausbreitung, der Schattenwürfe, der Reflexion und der Brechung, der Strahlenverläufe durch Platten, Prismen und Linsen sowie in optischen Geräten zur Nah- und Fernbeobachtung und neuerdings auch zur Vorführung von Versuchen mit Blackbox-Charakter hat sich die Lichtspurdarstellung in einer Ebene bewährt. Die für diese Zwecke entwickelten älteren Geräte, wie die runde optische Scheibe nach Hartl oder die optischen Scheiben als Zusatzgeräte zu optischen Bänken (Abb. 1.2.2./1), werden immer mehr verdrängt durch die großzügigeren und leistungsfähigeren Geräte zur Haftoptik. Durch die Entwicklung von Heftleuchten wurde diese Experimentiertechnik auch für Schülerexperimente erschlossen.
Das in den letzten Jahren vom VEB Polytechnik Karl-Marx-Stadt entwickelte Gerät zur Haftoptik ist ein modernes, leistungsfähiges Unterrichtsmittel (Abb. 1.2.2./2). Die einzelnen Teile wie Haftleuchten, Linsenkörper, Blenden, Spiegel usw. werden mit armierten Manipermkernen bzw. mit Manigumflächen

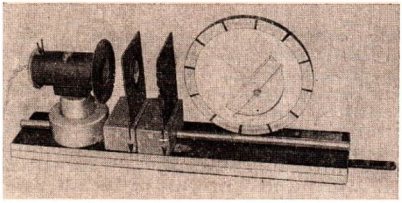


Abb. 1.2.2./1
Optische Scheibe nach Hartl

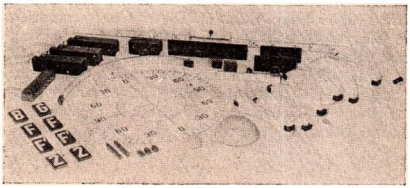


Abb. 1.2.2./2
Gerätesatz zur Haftoptik

an einer Hafttafel verschiebbar und drehbar befestigt. Die magnetisch haftenden Aufbauteile lassen sich rasch durch andere auswechseln. Die großen quaderförmigen Haftleuchten erzeugen mittels ihrer Glühfadenlampe, einer Kondensorlinse und einem Spalt bei guter Parallelstellung von Wendel und Spalt und richtiger Justierung eine saubere, in sich paralelle Lichtspur über die ganze Länge einer ebenen Hafttafel. Ein divergentes Lichtbündel läßt sich mit der kleinen Haftleuchte erzeugen, die keine Kondensorlinse enthält. Bedingung für gute Sichtbarkeit der Lichtspuren ist in erster Linie eine ausreichend ebene Tafelfläche der Hafttafel. Die Tafel sollte einen möglichst hellen (z.B. mattgrauen) Anstrich aufweisen, damit werden die Lichtspuren besser sichtbar als auf den dunkel-

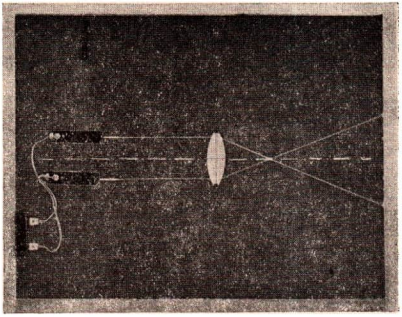


Abb. 1.2.2./3
Versuchsaufbau mit dem Gerätesatz zur Haftoptik

grünen Tafeln (Abb. 1.2.2./3). Man kann aber auch so arbeiten, daß man zum Hervorheben besonderer Stellen des Strahlenverlaufs auf der Hafttafel dünnen weißen Zeichenkarton mit Manipermsteinen anbringt.
Der große Vorteil der Anwendung der Geräte zur Haftoptik besteht darin, daß die Lichtspuren an der Tafel sofort mit Kreide nachgezogen werden können. Werden noch die Umrisse der wirksamen optischen Bauteile skizziert, können unmittelbar aus dem Versuch Tafelzeichnungen gewonnen werden. Die Skizzen sind auch mit Hilfe von Lineal und Winkelmesser sofort quantitativ auswertbar. Damit übertrifft die Haftoptik die bisher verwendeten optischen Scheiben erheblich und schränkt deren Einsatz im Unterricht ein.
Ebenfalls vom VEB Polytechnik Karl-Marx-Stadt hergestellt wird das Teilgerät *Ebene geometrische Optik* des SEG *Optik* (Abb. 1.2.2./4). Dieses Gerät entspricht in seiner Funktion und seinem Einsatz dem Gerätesatz zur Haftoptik, allerdings erfolgt die Anordnung auf einem auf der Tischfläche liegenden Blatt Zeichenkarton, direkt im Heft oder auf dem Arbeitsblatt des Schülers (Abb. 1.2.2./5). Die mit einer auswechselbaren Blende und einer einsetzbaren Kondensorlinse ausgerüstete Heftleuchte erzeugt mit der kleinen Glühfadenlampe je nach Lampenstellung parallele, divergente und konvergente Lichtspuren oder aber auch ein volles Lichtbündel.

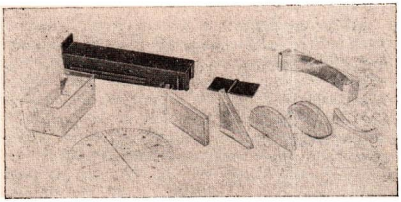


Abb. 1.2.2./4
Schülerexperimentiergerät Ebene geometrische Optik

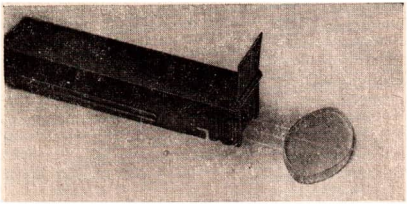
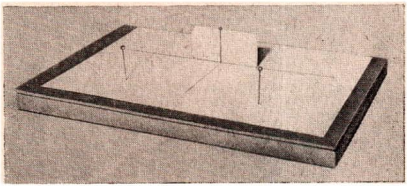


Abb. 1.2.2./5
Versuchsaufbau mit dem Schülerexperimentiergerät Ebene geometrische Optik



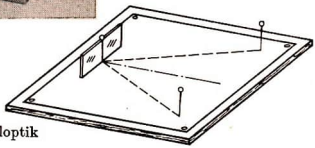


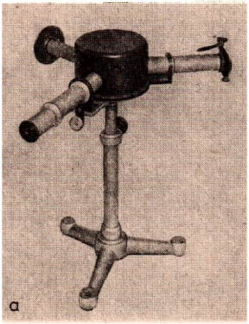
Abb. 1.2.2./6 Versuchsaufbau zur Stecknadeloptik

Flachglaskörper, Spiegelkombination, Kreisscheibe mit Winkelteilung und Küvette ergänzen den Gerätesatz. Er bietet wie das Gerät zur Haftoptik die Möglichkeit des Nachzeichnens des Strahlenganges und der Gewinnung und Ausmessung von Skizzen direkt aus dem Experiment.
Die *Heftoptik* hat wegen ihrer einfachen und überzeugenden Experimentierweise weitgehend die „Stecknadeloptik" verdrängt. Trotzdem werden in diesem Buch noch eine Reihe von Versuchen als Versuche zur „Stecknadeloptik" beschrieben, einmal weil damit gezeigt wird, auf welch einfache Art und Weise sogar quantitative Beziehungen mit relativ hoher Genauigkeit ermittelt werden können und zum anderen, um Anregungen für Hausexperimente zu geben (Abb. 1.2.2./6).

1.2.3. Einsatz optischer Geräte

Neben der Verwendung von optischen Bänken und Aufbaugeräten zur ebenen geometrischen Optik sollten auch handelsübliche optische Geräte im Unterricht zum Einsatz gelangen, einmal um mit ihrer Hilfe physikalische Erkenntnisse zu gewinnen, zum anderen, um neben der Demonstration der Wirkungsweise und des Aufbaus eines optischen Gerätes auch das fertige Gerät vorzuführen

und schließlich, um die vorzügliche optische Güte einiger Geräte für den Unterricht nutzbar zu machen und durch den fertigen Aufbau die Vorbereitungsarbeiten für den Lehrer rationeller zu gestalten.
Obwohl, wie in V 3.4.20. dargestellt, mit den Mitteln der Aufbauphysik aus einer optischen Bank sowohl für Lehrer- als auch für Schülerexperimente ein gebrauchsfähiger Spektralapparat zusammenzusetzen ist, ersetzt er hinsichtlich der Präzision und der Leistungsfähigkeit natürlich keinen handelsüblichen Spektralapparat, nicht einmal das einfache Schulspektroskop. Es ist also empfehlenswert, für Versuche zur Spektraluntersuchung einen Spektralapparat zu benutzen (Abb. 1.2.3./1a). Viele Versuche zur spektralen Zerlegung des Lichtes lassen sich sehr einfach mit einem Handspektroskop ausführen (Abb. 1.2.3./1b).



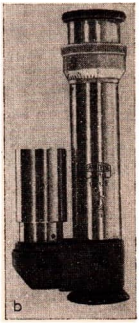


Abb. 1.2.3./1
Schulspektralapparat (a)
und Handspektroskop (b)

Wegen der großen Lichtstärke und der Möglichkeit, eine Reihe von Versuchen schnell und einfach aufbauen zu können, verwenden erfahrene Physiklehrer häufig dann, wenn es um einen Strahlengang zur reellen, vergrößerten Abbildung eines Objektes geht, fertige Projektionsgeräte, wie z.B. den Kleinbildprojektor und neuerdings den Tageslichtschreibprojektor. Natürlich sind die damit zu verwirklichenden Strahlengänge auch mit Hilfe einer optischen Bank realisierbar, die Verwendung des fertigen Gerätes bringt aber neben der meist besseren Lichtausbeute und Sichtbarkeit den Vorteil einer rationelleren experimentellen Vorbereitung.
Die in diesem Buch an vielen Stellen aufgenommenen Versuchsanordnungen unter Verwendung des Tageslichtschreibprojektors und des Kleinbildprojektors sollen deren Einsatzmöglichkeiten auch bei Versuchen, wo deren Verwendung nicht so klar auf der Hand liegt, zeigen und den Lehrer zum vielseitigen Einsatz dieser Geräte anregen.

1.3. Selbstanfertigung von optischen Aufbauteilen und Geräten

1.3.1. Selbstanfertigung von Zusatzteilen zur optischen Bank

Lichtquellen. Für eine Reihe von Versuchen ist die Optikleuchte ungeeignet, es empfiehlt sich deshalb, für bestimmte Zwecke auch andere Lichtquellen zu benutzen.
Zur Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Projektors (V 3.3.1.) ist eine Glühpunktlampe (30 V/5 A) auf einem 13 mm Stativstab geeignet. Man klebt an die Lampenfassung mit Zweikomponentenkleber eine M 8-Mutter und kann dann leicht den Stativstab einschrauben (Abb. 1.3.1./1a).
Zur Messung der Lichtstromverteilung einer Glühlampe (V 5.1.4.) wird eine Glühpunkt- oder Glühfadenlampe einfach mit zwei starren angelöteten Drähten versehen, wie die Abbildung 1.3.1./1b zeigt. Die Befestigung erfolgt dann mit Hilfe von Stativmaterial.
Eine Blendscheibe mit einer Lampenfassung oder mit einem bzw. neun befestigten Glühlämpchen wird beispielsweise für die Versuche 2.1.8. und 5.1.3. benötigt. Die Scheibe wird aus 1 mm dickem Kunststoff angefertigt, und ein kurzer 13 mm Rundstab aus Metall oder Holz wird angenietet oder angeleimt. Es genügt aber auch, die Scheibe straff in den Schlitz des 13 mm-Einsatzes der Klemmreiter zu schieben (Abb. 1.3.1./2a, b und c). Eine halbe Blendscheibe mit drei Glühlämpchen nach Abbildung 1.3.1./2d eignet sich gut als selbstleuchtendes Objekt zur Erzeugung von Hohlspiegelbildern (V 2.3.4.).

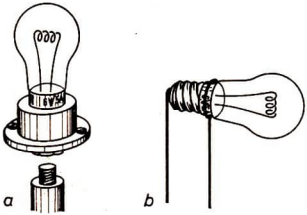


Abb. 1.3.1./1
Selbstgefertigte Halterungen für Glühpunkt- bzw. Glühfadenlampen zum Einschrauben eines kurzen Stativstabes (a) und mit angelöteten Zuleitungsdrähten (b)

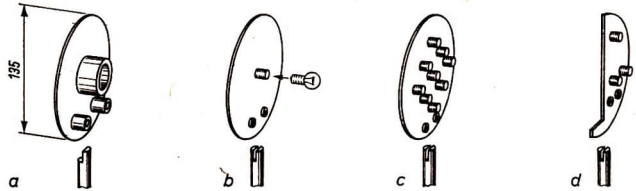


Abb. 1.3.1./2 Selbstgefertigte Blendscheiben mit Lampenfassungen E 27 (a), E 10 (b,c) und halbe Blendscheibe (d)

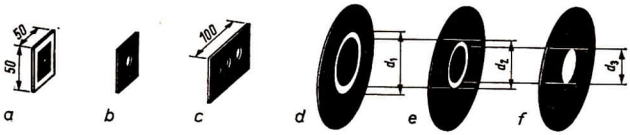


Abb. 1.3.1./3 Selbstgefertigte Blenden zum Einschieben in den Schiebeschacht (a, b und c) und Blendscheiben mit ringförmigen (d, e) und kreisförmigen (f) Öffnungen

Blenden und Blendenschutz. *Lochblenden*, wie sie z. B. für die V 2 1.8., 2.1.9. und 3.2.9 benötigt werden, stellt man aus dünnem, schwarzem Fotopapier oder geschwärztem Film her. Man sticht in das Material mit einer glühenden Nadel ein feines Loch ein und rahmt es dann als Dia (Abb. 1.3.1./3a). Größere Löcher schlägt man mit einem Locheisen in kräftige Pappe ein oder bohrt man in Kunststoffscheiben (Abb. 1.3.1./3b), die entweder im Format 50 mm × 50 mm oder bei einem Lochblendstreifen 50 mm × 100 mm (Abb. 1.3.1./3c) zum Einschieben in den Schiebeschacht eines Blendrahmens gefertigt werden. Sie können auch als Blendscheiben mit einem Durchmesser von 135 mm bzw. als Blendrahmen (90 mm × 105 mm) für das Schülerexperimentiergerät hergestellt werden.

Ringblenden, wie sie für Versuche zum Nachweis von Linsenfehlern benötigt werden (V 3.2.2., 3.2.5. und 3.2.9.), stellt man in der gleichen Weise wie Lochblenden her, hinterklebt das Loch mit einer durchsichtigen Folie und klebt in die Mitte den Kern wieder ein. Ein Satz Ringblenden, die drei flächengleiche Zonen ausblenden, hat für gefaßte Linsen von etwa 70 mm Durchmesser die Durchmesser $d_1 = 65$ mm, $d_2 = 53$ mm und $d_3 = 38$ mm, für die Linsen des Schülerexperimentiergerätes die Durchmesser 36 mm, 29 mm und 21 mm (Abb. 1.3.1./3d bis f).

Spaltblenden gewinnt man, wenn man in eine Papp- oder Kunststoffscheibe von 50 mm × 50 mm einen groben Spalt einschneidet oder einsägt und ihn dann mit zwei halben Rasierklingen überdeckt (Abb. 1.3.1./4a). Solche Spalte benötigt man beispielsweise für die Versuche V 3.4.20., 4.1.1., 4.1.5., 4.1.6., 4.2.1.

Kreuzblenden für Versuche zum Astigmatismus schiefer Bündel (V 3.2.7.) stellt man sich aus Pappe im Format 50 mm × 50 mm oder als Blendscheibe bzw. Blendrahmen her (Abb. 1.3.1./4b und d).

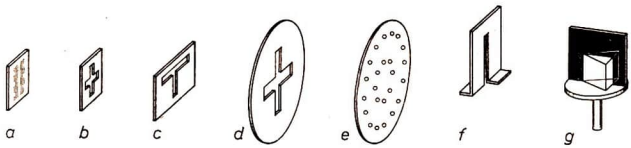


Abb. 1.3.1./4 Selbstgefertigte Blenden zum Einbringen in den Schiebeschacht (a, b, c), Blendscheiben als Kreuzblende (d) und mit konzentrischen Lochreihen (e) sowie selbststehende Pappblende (f) und Pappblende für ein Prisma (g)

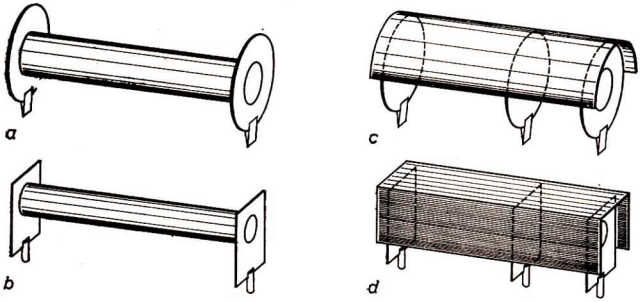


Abb. 1.3.1./5 Selbstgefertigte Abblendrohre (a, b) oder Deckblenden (c, d) aus Pappe zum Fernhalten des Seitenlichtes bei Versuchsanordnungen auf der optischen Bank

Blenden zum Nachweis der Summe der Linsenfehler (V 3.2.1.) stellt man, dem Durchmesser der Linse angepaßt, aus Pappe her, in die man auf konzentrischen Kreisen eine Reihe von Löchern stanzt und dann mit Klebestreifen an der Linse befestigt (Abb. 1.3.1./4e).

Blenden besonderer Art für V 4.1.1., 4.1.3. u. a. stellt man nach Abbildung 1.3.1./4c, f und g aus Pappe her.

Lichtschutz hindert störendes Seitenlicht. Dazu empfiehlt es sich bei einer Reihe von Versuchen, den Strahlengang durch ein straff in der kreisförmigen Sicke der Linsenfassung sitzendes Papprohr zu schützen. Für die große optische Bank benötigt man dazu ein Papprohr mit einem Innendurchmesser von 62 mm, für das Schülerexperimentiergerät ein solches mit einem Durchmesser von 42 mm (Abb. 1.3.1./5a und b).
Mit geformten oder gebogenen Pappen, die man über die Blendscheiben bzw. Blendrahmen stülpt (Abb. 1.3.1./5c und d), kann man ebenfalls störendes Seitenlicht fernhalten.
Die beiden Hälften des Papierfotometers nach Bouguer-Weber (Abb. 5.1.1./1b) müssen durch eine lange Trennpappe lichtdicht gegeneinander abgeschirmt werden.

Durchsichtige, durchscheinende und undurchsichtige Objekte. Man stellt die *undurchsichtigen Objekte* am besten aus weißem steifem Karton in den erforderlichen Abmessungen her und versieht sie gegebenenfalls mit einer Teilung (Abb. 1.3.1./6a).
Das *undurchsichtige Objekt* für die Epiprojektion (V 3.3.4.) ist am besten ein auf ein Pappstück von 50 mm × 50 mm geklebtes farbiges Bild (große Briefmarke) (Abb. 1.3.1./6b).
Durchscheinende, *transparente Objekte* stellt man aus gerahmtem Transparentpapier mit und ohne Strich- oder Rasterzeichnung als Dias her, eventuell rahmt man transparentes Millimeterpapier (Abb. 1.3.1./6c und d). Solche Objekte werden zum Beispiel für V 3.1.7., 3.1.8. und 3.2.8. benötigt, während man für V 3.1.11.

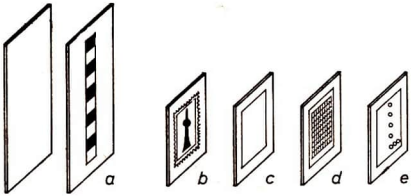


Abb. 1.3.1./6 Selbstgefertigte Markierungsrahmen (a) und undurchsichtige bzw. transparente und durchsichtige (b bis e) Objekte mit Strichzeichnungen oder Markierungen

ein *Transparentobjekt* 50 mm × 50 mm braucht, das nur die Hälfte der freien Öffnung des Blendrahmens mit Schiebeschacht einnimmt. Die andere Hälfte dient als undurchsichtiger Schirm, weshalb man das Objekt am besten aus kräftiger weißer Pappe herstellt (Abb. 1.3.1./6e).
Benötigt man größere Transparentobjekte (V 3.2.11.), so hinterklebt man eine mit einer großen kreisförmigen Öffnung versehene Blendscheibe oder einen Blendrahmen mit Transparentpapier, auf das man mit Tusche die Radien und Kreise zeichnet (Abb. 1.3.1./7a und b).

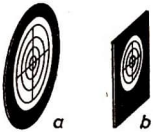


Abb. 1.3.1./7 Selbstgefertigte größere Transparentobjekte

Sehr häufig und für vielerlei Zwecke benötigt man auch *durchsichtige* Objekte als Dia gerahmt, zum Beispiel für V 3.2.12., 3.3.1., 3.3.2. und 3.4.17. Farbdias, Negative oder zwischen Folien eingebrachte mikroskopische Präparate. Für V 3.1.10., 3.2.8. und 3.4.7. verwendet man gerahmte durchsichtige Folie, auf die man mit Tusche oder Faserstift Marken, Fadenkreuze, mm-Teilungen, Kreuzgitter oder einfach einen undurchsichtigen Punkt zeichnet (Abb. 1.3.1./8a bis e).
Für subtraktive Farbmischung (V 4.2.5.) können einander teilweise überdeckende Farbfolien gerahmt werden (Abb. 1.3.1./8f). Durchsichtige *Farbfolien* kann man auch gleich so zuschneiden, daß sie in den Schacht der Experimentierleuchte des Schülerexperimentiergerätes passen. Für den Versuch zur Ermittlung der Abhängigkeit des Sehwinkels von der Entfernung (V 3.3.13.) wird eine größere cm- bzw. mm-Teilung hinter eine Blendscheibe oder einen Blendrahmen mit entsprechendem Ausschnitt geklebt (Abb. 1.3.1./9a und b).

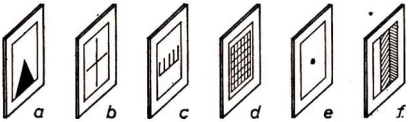


Abb. 1.3.1./8 Als Dia gerahmte durchsichtige Objekte

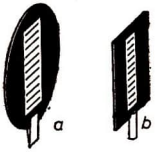


Abb. 1.3.1./9 Blendscheibe und Blendrahmen mit Teilung

Blendscheiben, Blendrahmen und Halterungen. *Blendscheiben* mit einem Durchmesser von 135 mm für die große optische Bank und Blendrahmen mit den Abmessungen 90 mm × 105 mm zur Aufnahme unterschiedlicher Bauteile stellt man aus dicker Pappe, Kunststoff oder Metall von etwa 1 mm Dicke her. Zur Befestigung können die Scheiben und Rahmen mit einem kurzen 13 mm- bzw. 10 mm-Stativstab aus Metall oder Hartholz versehen werden (Abb. 1.3.1./10a und d). Auf die Blendscheiben kann man auch eine Lasche aufkleben oder aufnieten, um sie in die Führungsschlitze der Klemmreiter einstecken zu können (Abb. 1.3.1./10b). Es genügt aber auch, die bloßen Scheiben entweder straff in den geschlitzten Einsatz des Klemmreiters zu pressen oder die Rahmen in die Längsnut des T-Fußes zu klemmen (Abb. 1.3.1./10c und e). Um Linsen, Halblinsen, Hohllinsen, Hohlspiegel und Brillengläser wie zu den Versuchen V 3.1.7., 3.1.10. und 3.3.11. zu befestigen, schneidet man eine Öffnung in den Blendrahmen, die ein wenig kleiner ist als das zu haltende Bauelement, und klebt mit Zweikomponentenkleber oder einem nicht vollständig aushärtenden Kitt die zu verbindenden Teile zusammen (Abb. 1.3.1./11a und e). Ähnlich kann man große ebene Spiegel auf Blendscheiben befestigen (Abb. 1.3.1./11b und c). Ein einfaches Fotometer nach Bunsen oder Töpler zu Versuch 5.1.1., Variante a, fertigt man aus einer Blendscheibe mit großer zentraler Öffnung an, über die man Transparentpapier gespannt hat. Das Transparentpapier wird in der Mitte mit einem Tropfen Wachs beträufelt, der nach Erhärten wieder zu entfernen ist (Abb. 1.3.1./11d). An-

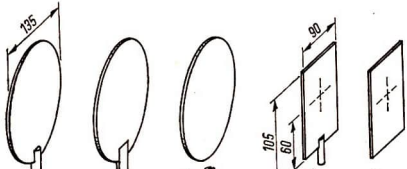


Abb. 1.3.1./10
Möglichkeiten der Befestigung von Blendscheiben und Blendrahmen mit kurzem Stativstab 13 mm bzw. 10 mm mit Klemmfeder oder direkt zur Aufnahme in den Einsatz des Klemmreiters oder des T-Fußes

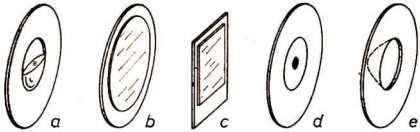


Abb. 1.3.1./11
Selbstgefertigte Blendscheiben mit Halblinsen, Linsen und Hohlspiegel (a bis c und e) und mit Fettfleckfotometer (d)

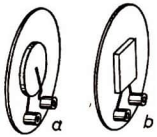


Abb. 1.3.1./12
Selbstgefertigte Blendscheiben mit Fotoelement (a) bzw. Thermoelement (b)

stelle des Fettfleckfotometers eignet sich auch eine dreilagige Schicht Transparentpapier, deren mittlere zentral ein Loch ausgestanzt enthält. Für die Versuche V 5.1.2., 5.1.3. u. a. befestigt man ein großes Selenfotoelement oder ein Thermoelement an der Blendscheibe, die man aus einem isolierenden Plast anfertigt, um die Geräteklemmen gleich an der Blendscheibe anbringen zu können (Abb. 1.3.1./12a und b).
Ein großes Papierfotometer (V 5.1.1., Variante b, und 5.1.3.) mit den Abmessungen von 150 mm × 300 mm besteht aus einem stabilen Holz- oder Plastrahmen, der mit Transparentpapier bespannt ist. Auf das Transparentpapier wird vorher mit der Schreibmaschine ein Text geschrieben (Abb. 1.3.1./13a).

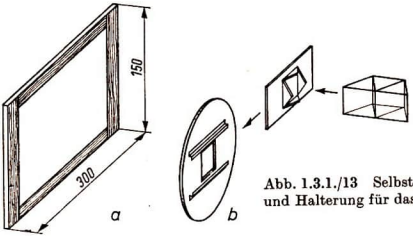


Abb. 1.3.1./13 Selbstgefertigtes Papierfotometer (a) und Halterung für das Geradsichtprisma (b)

Zur Halterung eines Geradsichtprismas schneidet man in dicke Pappe von 50 mm mal 100 mm die Diagonalen des Querschnitts des Geradsichtprismas aus und ritzt die Quadratseiten an. Schiebt man den Pappstreifen in einen Schiebeschacht, kann man das Geradsichtprisma lichtdicht haltern (Abb. 1.3.1./13b).

Spiegel und Glasplatten. Für viele Versuche, wie z. B. 2.2.7., 3.1.11., 3.1.12., 3.3.2. und 3.4.15., benötigt man zur Umlenkung des Strahlenganges Spiegel. Man schneidet sie aus dünnem verspiegeltem Glas mit einem Glasschneider in den notwendigen Abmessungen von 50 mm × 50 mm, 50 mm × 100 mm, 25 mm × 50 mm zum Einschieben in den Schiebe- oder Klemmschacht der Blendscheibe oder des Blendrahmens oder in größeren Abmessungen zum Aufkitten auf Blendscheiben bzw. Blendrahmen. Für V 4.2.3. ist eine Klarglasscheibe sehr nützlich, die man sich aus gutem Fensterglas, besser aber aus Spiegelglas, zuschneidet oder zuschneiden läßt und in der Mitte mit einem schmalen Hindernis versieht (aufgeklebter Zeichenkarton oder befestigte Aluminiumfolie).

Fertigung von Zusatzteilen zur optischen Bank. Für V 3.1.4. und 3.3.10. wird eine akkommodationsfähige *Linse* benötigt. Man läßt sie sich am besten anfertigen. Sie besteht aus einem etwa 20 mm dicken Metall- oder Plastring von 135 mm Außen- und 60 mm bis 70 mm Innendurchmesser. Beide Seiten werden mit durchsichtiger Folie (Folie für den Tageslichtschreibprojektor) bespannt und mit zwei Ringscheiben von gleichen Abmessungen wie der Hohlkörper entweder durch Schraubverbindung oder durch Klebeverbindung gehalten. Zum Aufstellen auf den Klemmreiter erhält der Hohlkörper ein M 8-Sacklochgewinde, oben zusätzlich eine Bohrung zur Aufnahme einer metallischen Schlaucholive. Unter Wasser gebracht, wirkt die Luftlinse mit Überdruck wie eine Zerstreuungslinse, mit Unterdruck wie eine Sammellinse. Mit Wasser gefüllt, kann ebenfalls durch zusätzliche Unter- oder Überdruckerzeugung eine Linse veränderlicher Brennweite simuliert werden (Abb. 1.3.1./14a).

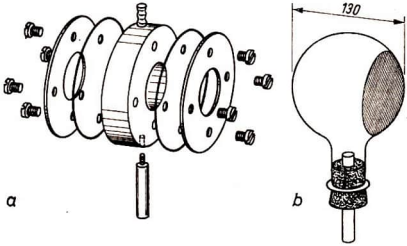


Abb. 1.3.1./14
Selbstgefertigte akkommodationsfähige Linse (a in Explosivdarstellung) und Glaskörper zum runden optischen Augenmodell (b)

Um ein der Wirklichkeit nahekommendes Augenmodell aufbauen zu können (V 3.3.8., 3.3.11., 3.4.2. und 3.4.11.), benötigt man einen kurzhalsigen Rundkolben von 130 mm Durchmesser. Der Rundkolben wird seitlich durch Aufrauhen eines Teils der Kugeloberfläche (etwa 100 cm²) mit grobem und feinem Sandpapier mattiert. Diese Fläche dient als Schirm zum Auffangen des „Netzhaut"bildes. Der Kolben wird mit abgekochtem oder destilliertem Wasser spuntvoll gefüllt, mit einem passenden durchbohrten Stopfen verschlossen und mit einem in die Bohrung eingebrachten Stück Stativstab auf dem kleinen Reiter zur optischen Bank befestigt (Abb. 1.3.1./14b).

Zur Demonstration von Versuchen zur Faseroptik (V 2.4.5.) benötigt man einen *Lichtleiter*. Man verwendet entweder einen käuflich erworbenen (Modellbahnbedarf!) oder setzt sich aus 30 bis 50 Fasern einer glasklaren dickeren Angelschnur von 250 mm—500 mm Länge selbst einen Lichtleiter zusammen. An den Enden werden die dichtliegenden Fasern mit dünnem Bindfaden zusammengebunden und danach mit einem scharfen Messer oder einer Rasierklinge sauber und gleichmäßig beschnitten. Zur Halterung auf der optischen Bank werden die Enden mit durchbohrtem und geschlitztem Gummistopfen in entsprechende zentrale Bohrungen der Blendscheiben befestigt (Abb. 1.3.1./15).

Um die Wirkungsweise eines Prismenfernrohres vorführen zu können (V 3.4.10.), müssen zwei rechtwinklig gleichschenklige Prismen mit der Hypotenusenlänge l ($l = 50 \ldots 60$ mm) an einer Blendscheibe befestigt werden. Das geschieht nach

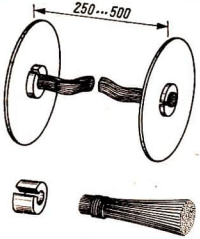


Abb. 1.3.1./15
Zur Selbstherstellung eines Lichtleiters

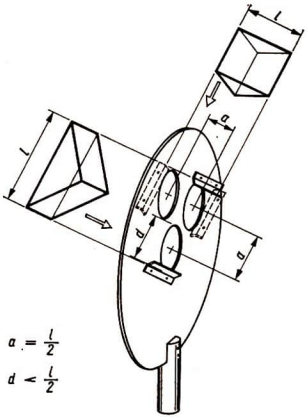


Abb. 1.3.1./16
Blendscheibe mit Halterung für zwei rechtwinklig, gleichschenklige Prismen zur Bildumkehrung im Prismenfernrohr

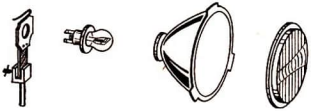


Abb. 1.3.1./17
Zerlegter Autoscheinwerfer mit angebrachtem Kunststoffstreifen zur Halterung mit Stativmaterial

Abbildung 1.3.1./16 mittels je zweier aufgenieteter Führungsstreifen aus einem thermoplastischen Werkstoff. So werden die Prismen nicht beschädigt. Die Blendscheibe versieht man entsprechend der Abbildung 1.3.1./16 mit drei Bohrungen, deren Durchmesser ein wenig kleiner ist als die halbe Hypotenusenlänge und deren Abstand voneinander genau $\frac{l}{2}$ entspricht.

Zur Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Autoscheinwerfers, V 2.3.7., präpariert man einen handelsüblichen Autoscheinwerfer nach Abb. 1.3.1./17. Dazu löst man das meist eingekittete Scheinwerferglas vorsichtig vom Reflektor ab. An den abnehmbaren Teil der Lampenfassung nietet oder schraubt man einen Kunststoffstreifen, um den wieder zusammengesetzten Autoscheinwerfer in eine Drehklemme des Stativmaterials einspannen zu können. Das Scheinwerferglas wird mit Paketgummis befestigt.

Für viele Versuche nützlich ist eine einfache *Gelenkverbindung* für das Schülerexperimentiergerät. Durch seine Verwendung wird ein exaktes Abwinkeln bei allen Strahlengängen zur Beobachtung eines Spektrums erreicht (V 4.1.1. und 4.2.1.). Mit der aus Kunststoff und zwei eingepreßten 10 mm Rundstiften nach Abbildung 1.3.1./18 hergestellten Verbindung ist das erreicht.

Für eine Reihe von Versuchen, die nicht sehr lichtstarke Bilder liefern, leistet ein *undurchsichtiger Schirm*, der mit Mikroluxfolie bezogen ist, ausgezeichnete Dienste. Man paßt die Abmessungen dem Schirm der optischen Bank an.

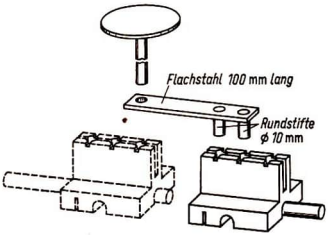


Abb. 1.3.1./18
Zur Selbstherstellung einer Schwenkverbindung für die optische Bank für Schülerexperimente

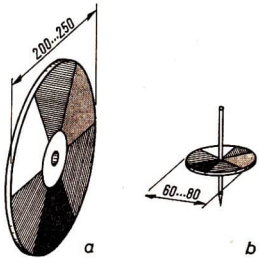


Abb. 1.3.1./19
Selbstgefertigte Farbkreisel mit durchsichtigen Farbsegmenten (a) und Segmenten aus Körperfarbe (b)

Für V 4.2.2. werden *Farbkreisel* benötigt, die man sich zum Beispiel aus einer durchsichtigen farblosen Zelluloidscheibe von 200 mm bis 250 mm Durchmesser herstellt und mit sechs oder vier Farbfolien beklebt (Abb. 1.3.1./19a). Die Bohrung dient zum Befestigen der Scheibe am Experimentiermotor. Einen kleinen Farbkreisel stellt man aus einer etwa 60 mm bis 80 mm großen Kreisscheibe aus festem weißem Zeichenkarton her, der mit vier bis sechs Sektoren mit Pigmentfarbe eingefärbt ist. Als Achse dient ein Streicholz (Abb. 1.3.1./19b).

1.3.2. Selbstanfertigung von Zusatzteilen für die Geräte zur ebenen geometrischen Optik

Glaskörper, wie man sie zu V 3.1.1. und 4.1.4. benötigt, stellt man sich aus 15 mm dickem Polystyrol oder Piacryl her (Abb. 1.3.2./1a und b). Man schneidet mit einer Laubsäge die gewünschte Form aus, bearbeitet die Schnittflächen mit Feile, Sand- und Schmirgelpapier bis zu den feinsten Körnungen und erzielt eine Feinpolitur mit Hilfe von Polierrot. Der kreisförmige Körper kann auch gedreht werden. Zur Haftung benutzt man die im Gerät zur Haftoptik vorhandenen

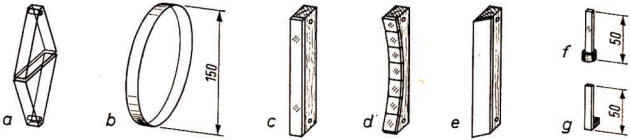


Abb. 1.3.2./1 Selbstgefertigte Einzelteile zum Gerätesatz Haftoptik: Polystyrol- oder Piacrylkörper (a und b), Holzkörper mit spiegelnden und matten Flächen (c bis e) sowie Spiegelstreifen und Eisenblech mit Manipermkernen (f und g)

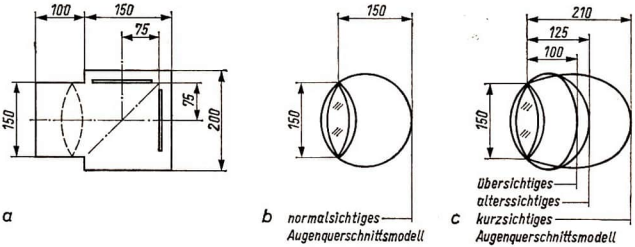


Abb. 1.3.2./2 Selbstgefertigtes Querschnittmodell aus Zeichenkarton zur fotografischen Kamera (a), für das normalsichtige und das fehlsichtige Auge (b, c)

armierten Magnete, die man in entsprechende Bohrungen eindrückt. Holzleisten von 15 mm × 20 mm versieht man mit Bohrungen zum Einstecken der armierten Haftmagnete und beklebt die Seitenflächen mit Glas-, Mattglas- oder Milchglas-, Metall- und Kartonstreifen (Abb. 1.3.2./1c), um die reguläre und diffuse Reflexion vorzuführen. Ganz ähnlich ist ein kleiner schräg zur Tafelfläche stehender, mit Zeichenpapier bespannter Schirm gebaut (Abb. 1.3.2./1e), der für V 4.1.2. und 4.1.4. benötigt wird. Ein konkav ausgearbeitetes Holzstück mit kleinen quadratischen Spiegelstücken von 15 mm × 20 mm ergibt einen zusammengesetzten Hohlspiegel (Abb. 1.3.2./1d) für V 2.3.1. Zum Ausblenden von Farbanteilen aus dem Spektrum für V 4.2.3. und 4.3.4. empfiehlt sich die Herstellung schmaler 4 mm bis 5 mm breiter und 30 mm bis 50 mm hoher Spiegelstreifen, die an ihrer Stirnseite auf kleinen Manipermmagneten festgekittet sind (Abb. 1.3.2./1f).
Eine kleine Blende aus Eisenblech mit einem Manipermkern für V 4.2.3. stellt man sich leicht nach Abbildung 1.3.2./1g her. Für V 2.2.3., 2.4.2. und die Blackbox-Versuche V 6.1.1. bis V 6.1.6. sind Haft- bzw. Abdeckbleche erforderlich. Sie werden aus etwa 1 mm dickem Eisenblech in den erforderlichen Abmessungen zurechtgeschnitten und als Haftbleche mattweiß und als Abdeckbleche für die Blackbox-Versuche in der Wandtafelfarbe getrichen.
Zur Demonstration des Strahlenverlaufes in der fotografischen Kamera und dem menschlichen Auge (V 3.3.6., 3.3.9. und 3.3.12.) empfiehlt es sich, aus Zeichenkarton

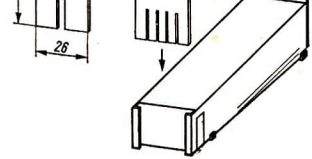


Abb. 1.3.2./3
Selbstgefertigte Blenden für die Heftleuchte

Querschnitte nach den Abbildungen 1.3.2./2a bis c herzustellen, die mit Manipermkernen an der Hafttafel befestigt werden.
Um die volle Breite der Öffnung der Heftleuchte für Schülerexperimente ausnutzen zu können (z.B. für V 2.3.1., 3.1.1. und 3.2.10.), ist eine Vier- bzw. Fünfspaltblende geeigneter als eine Dreispaltblende, für manche Versuche hingegen ist eine Zweispaltblende oder eine breite Einspaltblende günstiger. Aus dünnem Plast oder Blech fertigt man 26 mm breite und etwa 50 mm lange Streifen an, in die man mit einer feinen Säge 10 mm bis 15 mm lange Schnitte anbringt (Abb. 1.3.2./3).

1.3.3. Selbstanfertigung von Zusatzteilen zur Verwendung in Verbindung mit dem Tageslichtschreibprojektor

Die große Lichtstärke des Tageslichtschreibprojektors kann für viele Versuche zur Optik (V 2.5.2., 2.5.4., 3.1.9., 3.4.5., 4.1.1., 4.1.3., 4.2.1., und 4.2.5.) genutzt werden, wenn man einige Zusatzteile, hauptsächlich *Masken* für die Projektionsfläche, anfertigt. Aus dicker Pappe stellt man sich beispielsweise einen schmalen, etwa 1 mm breiten Spalt her, dessen scharfes Bild wegen der Lage der langgestreckten Glühwendel der Halogendampflampe waagerecht projiziert werden muß. Der Spalt kann auch breiter gemacht werden und wird lediglich durch Auflegen eines steifen Pappstreifens auf die gewünschte Breite eingestellt. In ähnlicher Weise stellt man sich eine Maske mit 5 parallelen Spalten oder mit zwei kreisförmigen Öffnungen her (Abb. 1.3.3./1a bis c). Für die Vorführung der subtraktiven Farbmischung eignet sich eine Maske mit vier quadratischen Öffnungen und einer dreieckigen Öffnung (Abb. 1.3.3./1d). Die Öffnungen werden, wie im V 4.2.5. angegeben, mit einander teilweise überdeckenden Farbfolien überklebt. Nach Abbildung 1.3.3./1e wird ein kleiner *Spiegel* mit einer 45°-Papphalterung angefertigt.

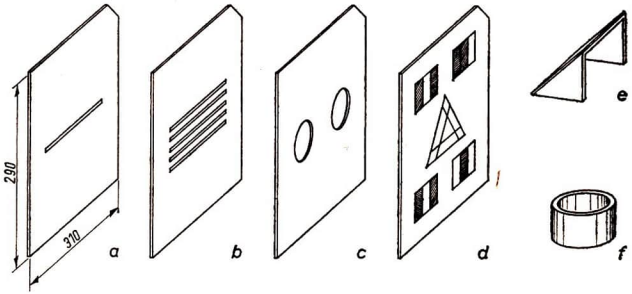


Abb. 1.3.3./1 Selbstgefertigte Masken für den Tageslichtschreibprojektor mit Spalten und Löchern (a bis c) und mit Farbfolien überdeckten Öffnungen zur Vorführung der subtraktiven Farbmischung (d) sowie Spiegelhalterung (e) und Distanzring (f)

Distanzringe zum Auflegen von Linsen auf die Projektionsfläche für V 3.1.9. und 3.4.5. schneidet man sich am besten aus Papp- oder Plastrohr zurecht (Abb. 1.3.3./1f).

1.3.4. Selbstanfertigung von optischen Geräten für Schüler- und Hausexperimente

Aus zwei gut ineinander passenden Papprohren fertigt man eine *Lochkamera* (V 2.1.8.) an. Das Ende des einen Papprohres wird mit Transparentpapier verschlossen, das Ende des anderen mit Karton, in dessen Mitte mit einer Nadel ein feines Loch eingebrannt ist (Abb. 1.3.4./1).
Zur Ermittlung des Brechungsgesetzes mit einfachen Mitteln (V 2.4.3.) präpariert man ein schlierenfreies Becherglas oder eine schlierenfreie große runde Flasche, wie die Abbildung 1.3.4./2 zeigt. Die eine Hälfte der Mantelfläche ist mit schwarzem Papier beklebt, das einen feinen lotrechten Spalt freiläßt. Die gegenüberliegende Mantelfläche ist mit Transparentpapier bespannt und mit einer Winkelteilung versehen. Zur Durchführung des Versuches wird das Becherglas halb mit Wasser gefüllt.

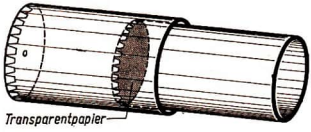


Abb. 1.3.4./1 Selbstgefertigte Lochkamera

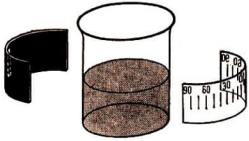


Abb. 1.3.4./2 Zur Präparierung eines Becherglases als Gerät zur Ermittlung des Brechungsgesetzes

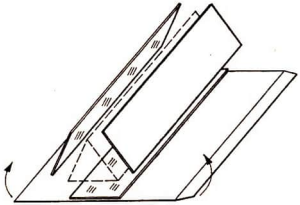


Abb. 1.3.4./3 Zur Selbstherstellung eines einfachen Kaleidoskopes

Drei Spiegelstreifen von 30 mm × 200 mm setzt man an den Längsflächen, nach innen spiegelnd, zu einem gleichseitigen *Prisma* zusammen und umklebt sie zur Fixierung mit Zeichenkarton (Abb. 1.3.4./3). Die eine Stirnseite verschließt man mit Pappe, in die ein kleines Loch gestanzt ist, die andere Seite mit straffem Transparentpapier, nachdem man einige bunte, farbige Glasstücke eingebracht hat. Man schüttelt, damit sich die bunten Glasstücke auf dem Transparentpapier verteilen, und blickt durch die Lochblende in das *Kaleidoskop*, das man gegen eine

gut beleuchtete weiße Unterlage auf der Tischfläche richtet. Soll das Kaleidoskop auch in waagerechter Lage zu benutzen sein, so muß man aus durchsichtigem Material hinter dem Transparentpapier eine flache Kammer schaffen, in die man die farbigen Glasstücke bringt.

1.3.5. Verspiegeln von Glas

Bisweilen ist es angebracht, eine Glasfläche selbst zu verspiegeln. Man braucht dazu drei Lösungen, die man auf folgende Weise herstellt:

Lösung I: Man löst 5 g Zucker in 50 ml destilliertem Wasser, setzt 0,6 g Weinsäure zu, kocht die Lösung 10 Minuten lang und läßt sie dann abkühlen. Danach fügt man 10 ml Äthylalkohol (abs.) zu und füllt mit destilliertem Wasser auf 100 ml auf.

Lösung II: Man löst 4 g Silbernitrat (krist.) in 100 ml Wasser, ebenso 6 g Ammoniumnitrat (chem. rein) in 100 ml Wasser. Nachdem beide Substanzen gut aufgelöst sind, gießt man die beiden Lösungen zusammen.

Lösung III: Man löst 10 g Natriumhydroxid in 100 ml Wasser auf.

Die Lösungen werden jede für sich aufbewahrt. Dabei ist für die Lösung II eine dunkle Flasche zu verwenden.
Das zu verspiegelnde Glas wird sehr sorgfältig mit Salpetersäure gereinigt und anschließend erst mit Leitungswasser und dann mit destilliertem Wasser abgespült. Die Glasfläche muß ganz fettfrei sein. Man faßt deshalb das gereinigte Glas nur an den Rändern an, indem man es zwischen den Fingerspitzen hält. Noch besser verwendet man dazu eine Pinzette. Ist die Politur des Glases geringfügig beschädigt, so kann man diese durch leichtes Nachpolieren mit Polierrot etwas auffrischen.
Zum Verspiegeln gießt man in eine flache Schale zu einem Teil der Lösung I zwei Teile der Lösung II und fügt sofort einen Teil der Lösung III zu. Man muß diese Reihenfolge des Ineinandergießens einhalten, weil sich sonst explosives Knallsilber bilden kann. Sofort nach dem Eingießen der Lösung III legt man das zu verspiegelnde Glas in die Schale. Die zu verspiegelnde Glasfläche muß vollständig in die Lösung eintauchen. Das Verspiegeln erfolgt unter dauerndem Schwenken der Schale. Bei Zimmertemperatur dauert die Bildung des Spiegelniederschlages etwa 30 Minuten. Danach wird die Fläche gut abgespült. Ein noch verbleibender grauer Belag wird mit einem Wattebausch unter leichtem Druck abgerieben.

Bemerkungen

1. Zum Vermeiden eines Silberniederschlages auf beiden Seiten des Glases kann man leichte Glasscheiben, beispielsweise Mikroskop-Objektträger oder Deckgläser, auf der Lösung schwimmen lassen
2. Es gelingt auch nach dem angegebenen Verfahren, das Glas halbdurchlässig zu versilbern; man muß nur das Versilbern genau beobachten und beim Erreichen der gewünschten Dicke des Belages das Glas aus der Lösung nehmen.
3. Man gieße stets nur so viel von den Lösungen zusammen, wie man für den Einzelfall braucht, da einmal zusammengegossene Lösungen später nicht mehr verwendet werden können.

1.4. Optische Abbildungsverfahren

1.4.1. Erzeugung divergenten Lichtes — Schattenwurf

Für viele Versuche, z.B. V 2.1.4. und 2.1.6., oder zur Beleuchtung von Versuchsteilen oder zur Schattenprojektion benötigt der Lehrer Lichtbündel unterschiedlicher Divergenz. Man verwendet dazu möglichst lichtstarke und nahezu punktförmige Lichtquellen sowie Sammellinsen. Plankonvexe Linsen setzt man dabei stets so ein, daß die beiden Seiten möglichst gleichmäßig an der Brechung des Lichtbündels beteiligt sind. Die Planseite der Linse ist dabei der Lichtquelle zugekehrt.
Vor eine Kohlebogenlampe oder eine Glühpunktlampe wird eine Lochblende oder eine Irisblende gestellt. Der divergente Lichtkegel der Lichtquelle wird auf eine Projektionswand gerichtet. Seine Öffnung wird mit Hilfe der Lochblende durch Verändern des Abstandes zwischen der Lochblende und der Lichtquelle oder durch Verstellen der Irisblende geregelt. Zwischen die Lichtquelle und die Projektionswand wird ein schattenwerfender undurchsichtiger Körper gebracht. Damit man recht scharfe Schatten erhält, darf man den Körper nicht zu nahe an die Lichtquelle stellen (Abb. 1.4.1./1a).
Benötigt man Lichtbündel geringer Divergenz, so fügt man eine Sammellinse in den Strahlengang. Das Ändern der Entfernung Lichtquelle—Linse im Raum innerhalb der einfachen Brennweite bewirkt eine Änderung des Öffnungswinkels. Dabei ist es möglich, nahezu paralleles Licht zu erzeugen (Abb. 1.4.1./1b).
Ist die Ausdehnung der Lichtquelle zu groß, so daß die Schatten unscharf werden, oder ist die bestrahlte Fläche zu ungleichmäßig ausgeleuchtet, so verwendet man als Projektionszentrum eine Loch- oder Irisblende, auf der mit Hilfe einer kurzbrennweitigen Linse das reelle Bild des hellsten Teiles der Lichtquelle etwa gleich groß abgebildet worden ist (Abb. 1.4.1./1c). Die Öffnung des Lichtkegels läßt sich durch Ändern der Stellung von Lichtquelle und Linse zur Blende ein wenig beeinflussen. Durch Vorsetzen einer zweiten Sammellinse läßt sich die Divergenz des Lichtbündels in weiten Grenzen variieren (Abb. 1.4.1./1d). Wird eine solche Anordnung zum Schattenwurf verwendet, so achte man darauf, den Gegenstand nicht zu dicht an das Projektionszentrum heranzubringen.

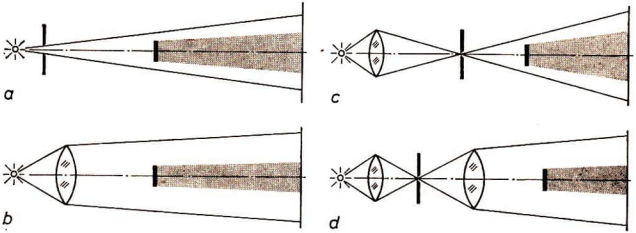


Abb. 1.4.1./1 Strahlenverlauf bei der Erzeugung divergenten Lichtes für den Schattenwurf in direkter Beleuchtung (a), unter Zwischenschaltung einer Linse (b) sowie bei Verwendung einer beleuchteten Lochblende als Sekundärlichtquelle (c und d)

1.4.2. Erzeugung parallelen Lichtes

Über die Erzeugung von parallelem Licht und seiner Verwendung im Physikunterricht ist das Wichtigste bereits in 1.0.1. gesagt worden. Es wurde darauf hingewiesen, daß es im Unterricht meistens nur auf die Parallelität der Mantellinien des zylindrischen Lichtbündels ankommt. Dies erreicht man, wenn man ein Bild der Leuchtfläche der Lichtquelle erzeugt, dessen Durchmesser gleich dem der Linse ist. Liegt das Bild etwa 1 m ... 1,5 m von der Linse entfernt, so kann man die Versuchsanordnung ohne Schwierigkeit längs dieser Strecke unterbringen. Es ergibt sich somit die in Abbildung 1.4.2./1a wiedergegebene einfache Anordnung zum Erzeugen quasiparallelen Lichtes.
Weit besser wird die Forderung nach parallelem Licht durch die folgende Anordnung erfüllt, bei der man vor die als Lichtquelle dienende Kohlebogenlampe oder Glühpunktlampe einen Doppelkondensor mit einer Brennweite von 60 mm ... 100 mm stellt. Man ordnet Lichtquelle und Doppelkondensor so an, daß das reelle Bild der Lichtquelle etwa 150 mm bis 200 mm hinter dem Doppelkondensor entsteht. Man stellt in den Strahlengang etwa 70 mm hinter dem Kondensor eine Bikonvexlinse mit einer Brennweite von 100 mm. Dadurch rückt der reelle Bildpunkt der Lichtquelle näher an die Linse heran. In den divergenten Teil des Strahlenbündels bringt man eine weitere Sammellinse mit einer Brennweite von etwa 100 mm, durch die man die Strahlen parallel richtet (Abb. 1.4.2./1b).
Zur Erzeugen paralleler Lichtstreifen, wie man sie zum Veranschaulichen von Strahlengängen an der optischen Scheibe braucht, verwendet man als Lichtquelle zweckmäßigerweise eine Glühfadenlampe, bei der die Glühwendel gewissermaßen in einer Geraden angeordnet ist. Man stellt eine Sammellinse oder noch besser eine Zylinderlinse mit einer Brennweite von 100 mm ... 150 mm so auf, daß der Glühfaden der Lampe in der Brennebene der Zylinderlinse liegt. Der Glühfaden und die Zylinderachse der Linse müssen parallel zueinander liegen (Abb. 1.4.2./1c). Beide ordnet man senkrecht zur Ebene der optischen Scheibe an.

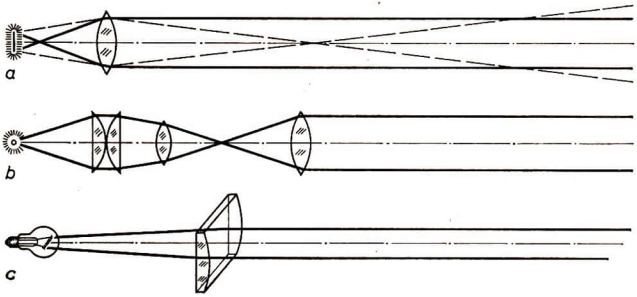


Abb. 1.4.2./1 Strahlenverlauf bei der Erzeugung parallelen Lichtes mit einer Sammellinse (a), unter Verwendung eines Dreifachkondensors und einer Sammellinse (b) und bei Verwendung einer Zylinderlinse (c)

1.4.3. Reelle Abbildung selbstleuchtender oder beleuchteter flächenhafter Objekte

Sehr oft muß bei den Versuchen zur geometrischen Optik ein selbstleuchtendes oder ein beleuchtetes, meist transparentes Objekt verkleinert, gleich groß oder vergrößert abgebildet werden. Man ordnet dann eine Kerze oder etwa eine Kohlefadenlampe außerhalb der einfachen Brennweite einer Objektivlinse an und erzeugt auf einem Schirm oder einer Projektionswand ein scharfes reelles Bild des Gegenstandes (Abb. 1.4.3./1a).

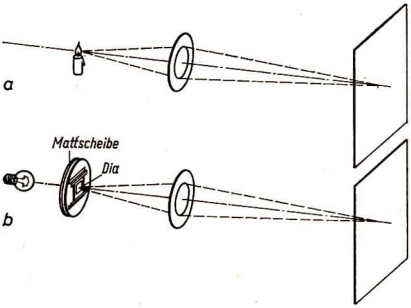


Abb. 1.4.3./1 Abbildung eines selbstleuchtenden (a) und beleuchteten transparenten Körpers (b) mit Hilfe einer Sammellinse

Ganz ähnlich verfährt man mit Loch -und Buchstabenblenden, die transparent hinterlegt sind, oder mit größeren Transparentobjekten, die gegebenenfalls noch mit Strichzeichnungen versehen sind. Diese werden von einer kräftigen Lichtquelle beleuchtet. Die Streuung des Lichtes an der Mattglas- oder Transparentpapierschicht bewirkt, daß die Blende oder die Öffnung als selbstleuchtender Körper fungiert (Abb. 1.4.3./1b).
Da die Helligkeit des Projektionsbildes von dem die Linse durchsetzenden Licht bestimmt wird, ist das Bild um so heller, je heller das Objekt und je größer der Durchmesser der Linse ist. Man verwendet als Objektivlinse eine Linse mit großem Durchmesser.

1.4.4. Reelle Abbildung durchleuchteter flächenhafter Objekte

Sollen kleine oder große flächenhafte durchleuchtete Gegenstände abgebildet werden (z.B. wie in V 3.2.12. und 3.3.1.), sind einige physikalische Besonderheiten zu berücksichtigen. Das die Blende durchsetzende Lichtbündel muß in seinem vollen Querschnitt die Objektivlinse treffen, oder die Objektivlinse muß Eintritts- und Austrittspupille der Projektionsanordnung zugleich sein.
Kleine flächenhafte Gegenstände lassen sich so abbilden, daß durch geeignete Stellung der Lichtquelle das divergente, die Blende durchsetzende Lichtbündel voll auf die Fläche der Linse auftrifft. Die Lichtquelle darf also nicht so nahe

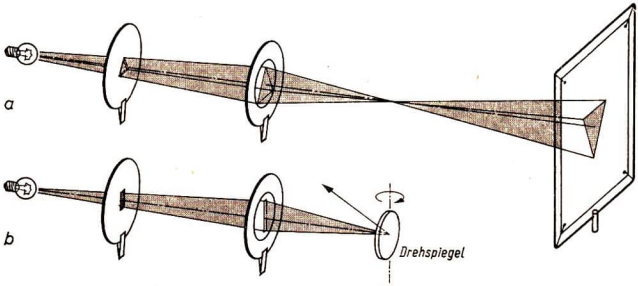


Abb. 1.4.4./1 Reelle Abbildung eines durchleuchteten Körpers (a) mit Hilfe einer Sammellinse und Ausnutzung des Strahlengangs zur Abbildung eines Lichtzeigers über einen Drehspiegel (b)

am durchsichtigen Objekt stehen, daß das vom Objekt begrenzte Lichtbündel beim Auftreffen auf das Objektiv einen größeren Querschnitt als die Linse hat (Abb. 1.4.4./1a). Bei einer solchen kondensorlosen Abbildung durchleuchteter Gegenstände liegt zwischen Objektiv und Projektionsschirm an der Stelle des reellen Bildes der Lichtquelle eine starke Bündeleinschnürung. Die Besonderheit dieses Strahlenganges kann man sich beispielsweise zunutze machen, wenn man über einen Drehspiegel einen Lichtzeiger abbilden will. Man justiert dann den Strahlengang so, daß das reelle Bild der Lichtquelle direkt auf dem Drehspiegel zu liegen kommt. Damit ist für die Lichtzeigerprojektion die volle Lichtstärke der Versuchsanordnung nutzbar (Abb. 1.4.4./1b).

Die eben beschriebene Versuchsanordnung versagt, wenn der durchleuchtete Gegenstand die Größe der Linse hat oder sogar noch größer ist als diese. In diesem Fall ist die zusätzliche Aufstellung einer Beleuchtungslinse erforderlich. Diese muß im Durchmesser etwas größer sein als der zu projizierende durchsichtige Gegenstand. Dicht vor den durchleuchteten Gegenstand, etwa einem Diapositiv, stellt man eine einfache oder doppelte Kondensorlinse. Den Abstand zwischen Lichtquelle und Kondensorlinse wählt man so, daß das reelle, von der Kondensorlinse erzeugte Bild der Glühwendel der Lichtquelle genau im Objektiv liegt, wovon man sich leicht mit Hilfe eines vorgehaltenen Stücks Transparentpapier überzeugen kann. Die Brennweite der einfachen bzw. doppelten Beleuchtungslinse wählt man zweckmäßigerweise etwa halb so groß wie die Brennweite der Objektivlinse (Abb. 1.4.4./2a).

Für den Strahlengang in Spektralapparaten und auch bei Beugungs- und Interferenzversuchen wird oft die Fraunhofersche Anordnung verwendet. Es ist eine Projektionsanordnung, bei der das Objektiv aus zwei teilweise in erheblichem Abstand voneinander aufgestellten Sammellinsen besteht, zwischen denen der Strahlengang parallel verläuft. Die beiden Linsen unterscheiden sich meist noch in ihrer Brennweite. Die Linse mit der kürzeren Brennweite ist dem Objekt, meist einem Spalt, zugekehrt, das genau in der Brennebene dieser Linse steht. Die langbrennweitige Linse vereinigt die zwischen den Linsen parallel verlaufenden Strahlen wieder in ihrer Brennebene, in der ein Projektionsschirm angeordnet

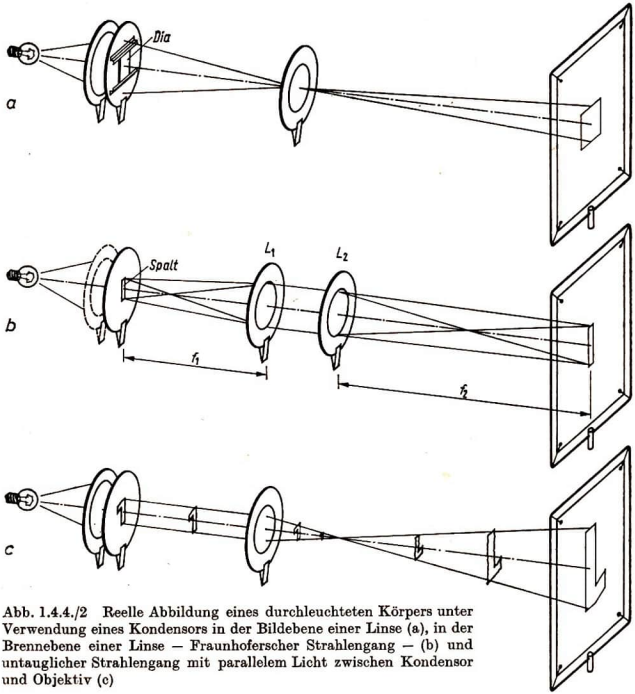


Abb. 1.4.4./2 Reelle Abbildung eines durchleuchteten Körpers unter Verwendung eines Kondensors in der Bildebene einer Linse (a), in der Brennebene einer Linse – Fraunhoferscher Strahlengang – (b) und untauglicher Strahlengang mit parallelem Licht zwischen Kondensor und Objektiv (c)

oder ein Okular aufgestellt wird (Abb. 1.4.4./2b). Dicht vor dem Objekt kann noch ein Kondensor aufgestellt werden. Die Lichtquelle wird dann so angeordnet, daß das reelle, vom Kondensor erzeugte Bild der Glühwendel zwischen den beiden Objektivlinsen entsteht.

Einem dem Prinzip der Fraunhoferschen Anordnung ähnlicher Versuchsaufbau wird fälschlicherweise oft zur Abbildung durchleuchteter Gegenstände verwendet. Loch-, Buchstaben- oder Pfeilblenden werden mit parallelem Licht von der Kondensorline durchstrahlt. Man erhält dann nahezu unabhängig von der Gegenstandsentfernung der abbildenden Linse ein hinreichend scharfes, reelles Bild nur in der Brennebene der Linse (Abb. 1.4.4./2c). Wegen des dingseitig telezentrischen Strahlenganges hat aber der Bündelquerschnitt hinter der Linse überall die Form des durchleuchteten Gegenstandes. Man erhält also bei jeder Stellung

des Schirmes und bei jeder Stellung des Gegenstandes ein verschwommenes „Bild" des Gegenstandes. Häufig wundert sich der in optischen Dingen Unerfahrene, daß mit einer solchen Anordnung keine Werte zur Bestätigung der Linsengleichung zu gewinnen sind.

1.4.5. Häufig verwendete Projektionsanordnungen

Im Physikunterricht sind zum besseren Beobachten von Versuchsabläufen, zur deutlichen Sichtbarmachung kleiner Teile, zum sicheren Ablesen bestimmter Meßgeräte usw. vielfach vergrößerte Projektionen der Anordnungen und Abläufe erforderlich. Es sollen deshalb im folgenden einige Hinweise zum Einsatz und zum Gebrauch der *Projektionseinrichtungen* gegeben werden.
Aus komplexen Aufbauteilen unter Verwendung von Stativmaterial bzw. mit den Mitteln der optischen Bank lassen sich einfache Projektionsanordnungen für *Horizontal- und Vertikalprojektion* zusammenstellen.
Das vom VEB Polytechnik Karl-Marx-Stadt produzierte Projektionsgerät gestattet z.B. die Projektion eines Elektrometers oder eines Stromfadengerätes nach Pohl. Das zu projizierende Objekt darf nicht größer sein als der Durchmesser der Kondensorlinsen. Mit Hilfe eines Objektives, dessen Brennweite man der gewünschten Vergrößerung und der Schirmentfernung anpassen muß, wird das Objekt scharf auf einem Schirm abgebildet. Man stellt so ein, daß das reelle Bild der Lichtquelle in der Objektivlinse liegt (Abb. 1.4.5./1). Bei der Vertikalprojektion ist über der Linse noch ein Umlenkprisma oder ein Umlenkspiegel anzuordnen.

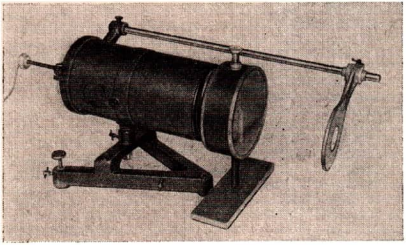
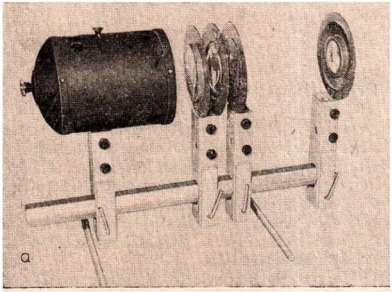


Abb. 1.4.5./1
Projektionseinrichtung
in horizontaler Anordnung

Leistungsfähige Projektionsanordnungen sind auch mit der neuen optischen Bank zu realisieren (Abb. 1.4.5./2a und b).
Sollen Feldlinienbilder oder Wellen auf Flüssigkeitsoberflächen projiziert werden, so bedient man sich häufig des Wasserwellen-, Strömungs- und Projektionsgerätes WSP 220 vom VEB Polytechnik Karl-Marx-Stadt. Über der Projektionsfläche können entweder eine Wellenwanne, eine Strömungswanne oder Geräte zur Erzeugung elektrischer bzw. magnetischer Felder angeordnet werden. Die Wellen, die Strömungen und die magnetischen bzw. elektrischen Feldlinienbilder werden auf einer Projektionswand scharf abgebildet. Der Strahlengang wird durch einen



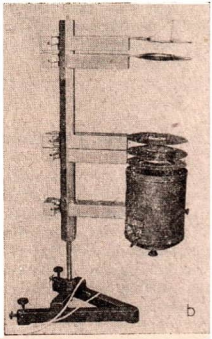


Abb. 1.4.5./2 Projektionseinrichtung unter Verwendung der optischen Bank in horizontaler (a) als auch in vertikaler (b) Anordnung

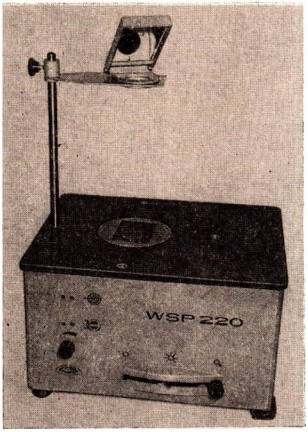
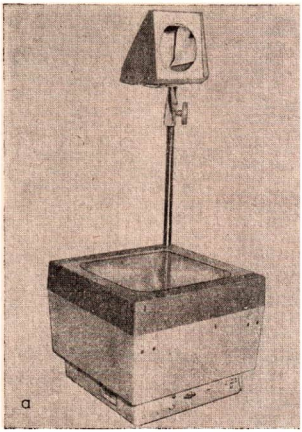
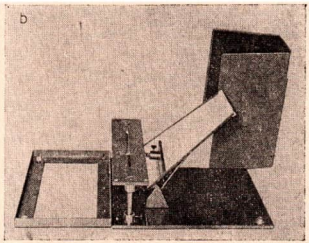


Abb. 1.4.5./3 Wasserwellen-, Strömungs-und Projektionsgerät „WSP 220“

Spiegel über dem Objektiv abgelenkt (Abb. 1.4.5./3). Das Gerät verfügt über eine Stroboskopscheibe, so daß die Projektionseinrichtung mit intermittierendem Licht versorgt werden kann.

Ein leistungsfähiges Gerät ist der Tageslichtschreibprojektor „Polylux I“ vom VEB Polytechnik Karl-Marx-Stadt (Abb. 1.4.5./4a). Er kann nicht nur als Schreib-





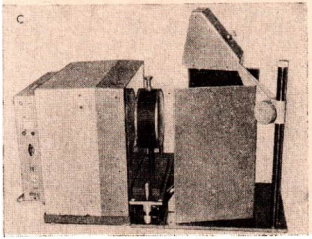


Abb. 1.4.5./4 Tageslichtschreibprojektor „Polylux" für Vertikalprojektion (a) und für Horizontalprojektion (c) in Verbindung mit der Kippeinrichtung (b)

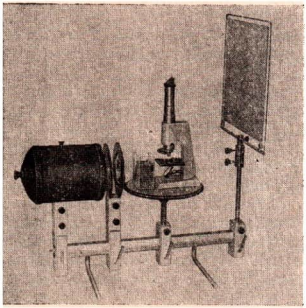
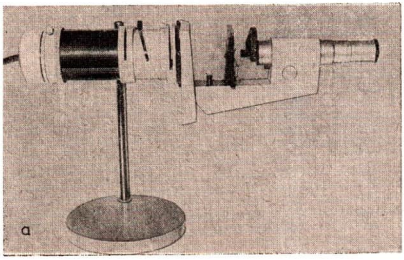
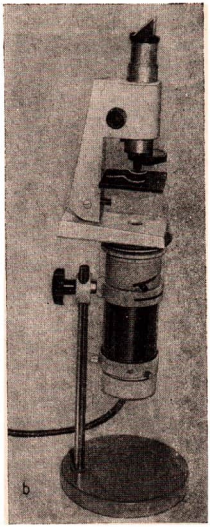


Abb. 1.4.5./5 Anordnung zur Mikroprojektion unter Verwendung der optischen Bank und eines Schülermikroskopes

projektor und zur Abbildung von Folien verwendet werden, er eignet sich wegen seiner Lichtstärke und der Größe der Projektionsfläche auch als Experimentierprojektor für mechanische, elektrische, thermische und optische Versuche. Der Nachteil, nur Versuche in der horizontalen Projektionsebene ausführen zu können, wird dadurch behoben, daß neuerdings ein Kippgerät zum Tageslichtschreib-

Abb. 1.4.5./6 Mikroprojektionsanordnung mit horizontaler (a) und vertikaler (b) Tubusstellung





projektor angeboten wird, das auch vertikal stehende Versuche oder Geräte (z.B. Elektrometer, Gerät zur kinetischen Gastheorie) vergrößert abzubilden erlaubt (Abb. 1.4.5./4b und c).

In einigen Fällen ist im Physikunterricht zum objektiven Beobachten mikroskopisch kleiner Teile eine Mikroprojektion erforderlich. Dazu kann jedes Mikroskop verwendet werden. Wie Abbildung 1.4.5./5 zeigt, wird das Licht einer Optikleuchte mittels eines Kondensors oder eines Doppelkondensors über den Beleuchtungsspiegel in das Objektiv gelenkt. Zum Schutze des Mikroskops gegen Beschädigung durch starkes Erwärmen wird eine Küvette mit 0,33%iger Kupfersulfatlösung in den Strahlengang gestellt. Das reelle Bild der Glühwendel soll im Objektiv des Mikroskops liegen. Die Mikroprojektion kann durch ein schwach vergrößerndes Okular, aber auch ohne Okular erfolgen. Damit der Strahlengang wieder horizontal gerichtet wird, ordnet man auf dem oberen Tubusende oder auf dem Okular ein gleichschenklig-rechtwinkliges Prisma an. Das Scharfeinstellen erfolgt durch Betätigen des Grob- und des Feintriebes. Zur vollen Ausleuchtung des Bildes kann man, wenn nötig, die Stellung der Lichtquelle noch etwas korrigieren. Der Aufbau gestaltet sich sehr einfach, wenn man fertige handelsübliche Mikroprojektionsanordnungen zum Schülermikroskop verwendet. Damit ist eine horizontale und eine vertikale Anordnung (Abb. 1.4.5./6a und b) möglich.

2. Geradlinige Ausbreitung, Reflexion, Brechung und Totalreflexion des Lichtes

2.0. Methodische Bemerkungen

2.0.1. Die in diesem Kapitel beschriebenen Versuche dienen vorwiegend der experimentellen Untermauerung bei der Gewinnung grundlegender Kenntnisse auf dem Gebiet der Optik. Die Versuche sind dementsprechend einfach gehalten und bedürfen in den meisten Fällen keines umfangreichen Instrumentariums und keines großen Experimentiergeschicks. Für alle grundlegenden Erscheinungen — Lichtdurchlässigkeit, geradlinige Ausbreitung, Reflexion an ebenen und gewölbten Spiegeln, Brechung und Totalreflexion an der Grenzfläche zweier Medien, Parallelverschiebung an planparallelen Platten und Ablenkung an Prismen — sind neben den Lehrerexperimenten auch einfache Schülerexperimente beschrieben, die teilweise als Freihandversuche dem Lehrer eine Auswahlmöglichkeit für Hausexperimente bieten.

Nach einer einführenden Untersuchung über die Lichtdurchlässigkeit von Körpern und Stoffen im V 2.1.1. werden im V 2.1.2. mehrere Varianten zur Demonstration der geradlinigen Ausbreitung des Lichtes angeboten. Dabei sollte vermieden werden, die Geradlinigkeit von vornherein und ausschließlich durch Visieren nachweisen zu wollen, weil man damit das, was bewiesen werden soll, schon als Beweismittel verwendet. Dem Stecknadelversuch zur Lichtausbreitung wird beispielsweise erst dadurch Beweiskraft verliehen, daß man die Einstichstellen nach Anlegen eines Lineals durch eine Gerade verbunden hat. Die Einführung des Begriffes Lichtstrahl stellt an die Schüler erfahrungsgemäß erhebliche Anforderungen. Die Abstraktion vom dreidimensionalen Lichtbündel zum eindimensionalen Lichtstrahl ist im strengen Sinne nicht experimentell darstellbar. Es ist deshalb zu empfehlen, diesen schwierigen Abstraktionsvorgang nicht unmittelbar an den Anfang des Unterrichts in der Optik zu stellen, sondern erst zu vollziehen, wenn sich die zwingende Notwendigkeit ergibt, Strahlenverläufe zeichnerisch darzustellen. Mit V 2.1.3. soll dieser Abstraktionsvorgang unterstützt werden.

Im engen Zusammenhang mit der geradlinigen Ausbreitung des Lichtes wird der Schattenwurf erarbeitet. Mit der Unterscheidung der Schattenarten und des Strahlenverlaufes beim Schattenwurf befassen sich V 2.1.4. und 2.1.5. Als besondere Fälle der Schattenbildung werden im V 2.I.6. die Entstehung von Mond- und Sonnenfinsternis veranschaulicht. Bei der Durchführung dieser Versuche sollte man bestrebt sein, die natürlichen Größenverhältnisse einigermaßen zu wahren. Dem steht allerdings hinderlich entgegen, daß die Erde und erst recht der Mond gegenüber der Sonne und der Entfernung Sonne—Erde sehr kleine Abmessungen annehmen. Empfehlenswert ist, zur Simulierung des Sonnenlichtes paralleles

oder schwach divergentes Licht zu verwenden, das vom Kondensor einer Optikleuchte herkommt. Man muß allerdings dafür in Kauf nehmen, daß keine Halbschatten entstehen. Im V 2.1.7. wird bei Vernachlässigung der natürlichen Größenverhältnisse lediglich der Strahlenverlauf bei der Entstehung der Finsternisse demonstriert.
Mit V 2.1.8. und 2.1.9. zur Lochkamera eröffnen sich weitere Möglichkeiten zur Bestätigung der Geradlinigkeit der Lichtausbreitung, aber auch zur Beschäftigung mit der Optik über den normalen Schulstoff hinaus, beispielsweise in der Untersuchung der Abhängigkeit der Bildgröße von der Lochkameralänge bei konstanter Gegenstandsweite oder in den Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses der Lochgröße auf die Abbildungsschärfe usw. Auch das Fotografieren mit Hilfe einer Lochkamera gehört zu den weiterführenden Möglichkeiten. Weil der Versuch nicht nur eindrucksvoll, sondern auch weniger bekannt ist, wurde die „negative" Lochkamera im V 2.1.8. mit aufgenommen.

2.0.2. Einige experimentelle Varianten zur Unterscheidung von regulärer und diffuser Reflexion bietet V 2.2.1. In den folgenden Versuchen 2.2.2. und 2.2.3. sind Möglichkeiten beschrieben, das Reflexionsgesetz herzuleiten bzw. zu bestätigen. Dabei sind auch Vorschläge enthalten, den Nachweis zu führen, daß einfallender Strahl, Lot und reflektierter Strahl in einer Ebene liegen. Zur Darstellung des Strahlenverlaufes bei der Reflexion und später natürlich auch bei der Brechung und bei den optischen Geräten eignen sich besonders die Gerätesätze zur Haftoptik für die Lehrerdemonstration und zur ebenen geometrischen Optik für die Schülerbeobachtung. Sie sind in ihrer Handhabung sehr einfach, verlangen keine langwierigen Vorbereitungen und ermöglichen, jederzeit den Strahlenverlauf nachzuzeichnen, so daß Tafelskizzen oder Heftzeichnungen direkt aus dem Experiment entstehen.
Zur Beobachtung der Bilder am ebenen Spiegel wird im V 2.2.4. die Verwendung einer großen Glasscheibe empfohlen, weil sie den Vorteil gegenüber einem Spiegel bietet, Ort und Lage des virtuellen Bildes durch Aufstellen eines dem Gegenstand identischen Körpers hinter der Glasscheibe zu markieren. Zur Demonstration des Strahlenverlaufes bei der Bildentstehung am ebenen Spiegel sind Varianten vom Lehrer- zum Schülerversuch bis zu dessen Einsatz als Hausexperiment im V 2.2.5. enthalten.
Abgeschlossen wird dieser Abschnitt mit Versuchen zur Beobachtung der Reflexion des Lichtes und des Strahlenverlaufes an Winkelspiegeln in den Versuchen 2.2.6. und 2.2.7.

2.0.3. Mit einem aus vielen kleinen ebenen Spiegelstücken zusammengesetzten Hohlspiegel wird im V 2.3.1. der Übergang von der Reflexion des Lichtes am ebenen Spiegel zur Reflexion des Lichtes an gewölbten Spiegeln vollzogen und damit gleichzeitig deutlich gemacht, daß das Reflexionsgesetz auch für gekrümmte Flächen gültig ist. Grundlegende Erkenntnisse über die Reflexion von Parallel-, Brennpunkt-, Mittelpunkt- und Scheitelstrahlen sind mit den Anordnungen des V 2.3.2. zu erarbeiten. Mit V 2.3.3. zur reellen Abbildung eines Punktes durch einen Hohlspiegel soll auch gezeigt werden, daß für die vereinfachte zeichnerische Darstellung der Bildentstehung an gewölbten Spiegeln, die in Wirklichkeit durch ein volles von der Spiegelöffnung begrenztes Lichtbündel erzeugt wird, ausgewählte Lichtspuren bzw. Lichtstrahlen benutzt werden können. V 2.3.4. und 2.3.5. dienen zur Beobachtung von reellen Bildern am Hohlspiegel und dem Nach-

weis der Gültigkeit der Abbildungsgleichung und der Gleichung für den Abbildungsmaßstab. Dabei ist mit V 2.3.4. ein Versuch aufgenommen worden, der plastische, scheinbar im Raum schwebende reelle Hohlspiegelbilder eines gut beleuchteten Gegenstandes zu beobachten gestattet. Eine interessante Möglichkeit, virtuelle Bilder am Hohl- und Wölbspiegel zu betrachten und ihren Ort sowie ihre Größe zu bestimmen, bietet V 2.3.6. Bau und Wirkungsweise eines Autoscheinwerfers und das Zusammenwirken von Parabolreflektor und Scheinwerferglas bei Abblend- und Fernlicht können im V 2.3.7. demonstriert werden.

2.0.4. Die mit dem Übergang des Lichtes von einem durchsichtigen Medium in ein anderes verbundenen optischen Erscheinungen der Brechung und Totalreflexion sind für die Schüler meist neuartig, obwohl sie im täglichen Leben häufig beobachtet werden können. Eine gezielte Einführung und Motivation der Schüler vor der Bearbeitung von Einzelheiten der Brechung ist deshalb wichtig. Im V 2.4.1. sind deshalb einige Freihandversuche zur Beobachtung der Erscheinung der Brechung dargestellt. Trotz ihrer Einfachheit und ihrer überzeugenden Ergebnisse sind sie aber nicht einfach zu erklären. Es ist deshalb beispielweise günstiger, anstelle der Beobachtung der scheinbaren Hebung einer Münze im Wasser, die scheinbare Hebung einer Lichtquelle bzw. einer als Lichtquelle fungierenden, gut durchleuchteten Öffnung zu betrachten, weil der von der Lichtquelle ausgehende Strahlenverlauf vom Schüler leichter zu erfassen ist.
Um qualitative Aussagen über den Verlauf des Lichtes beim Übergang von einem durchsichtigen Stoff in einen anderen machen zu können, ist V 2.4.2. aufgenommen. Die sich anschließenden Versuche zur Herleitung bzw. Bestätigung des Brechungsgesetzes enthalten auch eine Variante, die vorzüglich als Hausexperiment geeignet ist; allerdings werden zur quantitativen Auswertung eine Reihe notwendiger geometrischer Kenntnisse vorausgesetzt, so daß der Versuch erst von Schülern höherer Klassenstufen durchgeführt werden kann.
Mehrere Versuche zur Vorführung der Totalreflexion werden im V 2.4.4. vorgestellt. Die Demonstration einer modernen Anwendung der Totalreflexion im Lichtleiter erfolgt im V 2.4.5. Gleichzeitig soll der Versuch zeigen, mit welch einfachen Mitteln die anschauliche Vorführung von Erscheinungen der Faseroptik möglich ist.

2.0.5. In diesem Abschnitt werden Versuche zum Durchgang des Lichtes durch planparallele Platten und Prismen dargestellt. V 2.5.1. und 2.5.2. bringen jeweils mehrere Varianten zum Nachweis der Parallelverschiebung und zur Vorführung des Strahlenverlaufes beim Durchgang des Lichtes durch eine planparallele Platte. Bei den Versuchen zur Demonstration des Strahlenganges in einem Prisma (V 2.5.3.) wird von der spektralen Zerlegung des Lichtes abgesehen. Durch Verwendung von Filterlicht kann in diesen Versuchen die Dispersion weitgehend unterdrückt werden. Eine Variante dieses Versuches zeigt, wie über den Schulstoff hinausgehende Zusammenhänge auf einfache Weise experimentell ermittelt werden können. Versuche zum Strahlenverlauf bei der Totalreflexion werden in V 2.5.4. und 2.5.5. beschrieben und schließen den Abschnitt und auch das Kapitel der grundlegenden Versuche zur Strahlenoptik ab.

2.1. Geradlinige Ausbreitung des Lichtes

2.1.1. Untersuchung der Lichtdurchlässigkeit von Körpern

Zu Variante a

1. Tageslichtschreibprojektor
2. verschiedene Körper unterschiedlicher Lichtdurchlässigkeit (Scheiben aus Kunststoff, Milchglas, Mattglas, Farbglas, Metall, Bogen verschiedener Papiersorten u. a.), Abmessungen etwa 50 mm × 50 mm
3. 3 Küvetten (40 mm × 65 mm × 30 mm)
4. verschiedene Farbstoffe (Tinte, Tusche, Anilinfarben)
5. verschiedene Trübungsmittel (alkoholische Lösung von Dammar- oder Mastixharz oder von Phenolphthalein oder Fluoreszein)

Zu Variante b [SE]

Geräte 2., 3. (nur einmal), 4., 5., außerdem.

6. Experimentierleuchte (ohne Kondensor)
7. 2 T-Füße
8. Blendrahmen mit Schiebeschacht
9. Tischchen

Methodische Hinweise

1. In der Variante a ersetzt im Vergleich zur sonst bei diesem Experiment üblichen subjektiven Beobachtung das Objektiv des Tageslichtschreibprojektors gewissermaßen die Augenlinse und das Projektionsbild das Netzhautbild, so daß man an diesem Bild die Lichtdurchlässigkeit der auf die Projektionsfläche aufgelegten Körper beurteilen kann.
2. Ein großer Vorteil der Versuchsanordnung der Variante a ist die Möglichkeit der gleichzeitigen Projektion mehrerer nebeneinandergelegter Körper, deren Lichtdurchlässigkeit sofort miteinander zu vergleichen ist.

Variante a

Versuch 1: Abhängigkeit der Lichtdurchlässigkeit von der Beschaffenheit von festen Körpern

Auf die Schreibfläche eines Tageslichtschreibprojektors wird eine durchsichtige Folie gelegt und darauf nebeneinander eine Glas-, eine Milchglas- und eine Metallscheibe. Man stellt das Projektionsbild auf die Struktur des Fresnel-Doppelkondensors ein. Im Projektionsbild erkennt man die Lichtdurchlässigkeit der Glas- und der Milchglasscheibe und die Undurchlässigkeit der Metallscheibe.
Durch die Abbildung der Glasscheibe hindurch kann man die Struktur der Fresnellinse erkennen, durch die Milchglasscheibe nicht; so daß bezüglich der Erkennbarkeit von Strukturen hinter einem Körper auch in durchsichtige, durchscheinende und undurchsichtige Körper eingeteilt werden kann. Auf dem noch freien Teil der Projektionsfolie können Texte gestaltet werden, die sich auf den Versuch beziehen.

Versuch 2: Abhängigkeit der Lichtdurchlässigkeit von der Schichtdicke

Dazu legt man nebeneinander auf den Tageslichtschreibprojektor z.B. Transparentpapier in unterschiedlichen Lagen (z.B. 1, 2, ... 5) und beobachtet das Projektionsbild. Anstelle des Transparentpapiers kann man ein rechtwinklig dreieckiges, parallel zu einer Kathete zieharmonikaartig zusammengefaltetes Stück einer durchsichtigen Folie verwenden.

Versuch 3: Abhängigkeit der Lichtdurchlässigkeit von der Beschaffenheit von Flüssigkeiten

Man bringt drei Küvetten auf die Projektionsfläche und füllt sie gleichhoch mit den in Frage kommenden Flüssigkeiten.
Es läßt sich auch die Abhängigkeit der Lichtdurchlässigkeit von der Schichtdicke untersuchen und zusätzlich die Abhängigkeit der Lichtdurchlässigkeit von der Konzentration einer Lösung oder Aufschlämmung. Dazu füllt man entweder die Küvetten in unterschiedlicher Höhe mit der gleichen Flüssigkeit bzw. in gleicher Höhe mit Lösungen oder Aufschlämmungen unterschiedlicher Konzentration.

Variante b

Die Untersuchung von Körpern auf Lichtdurchlässigkeit kann in der gleichen Reihenfolge wie bei Variante a erfolgen. Das räumliche Nebeneinander der Demonstration muß jedoch in ein zeitliches Nacheinander verwandelt werden. Die Beobachtung ist subjektiv, der Schüler blickt direkt in die Lichtquelle, die zur Vermeidung von Blendungen am besten mit Unterspannung betrieben wird, und bringt zwischen Auge und Lichtquelle den zu untersuchtenden Stoff (Abb. 2.1.1./1).

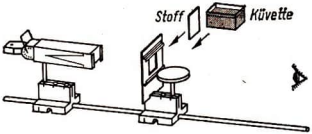


Abb. 2.1.1./1 Versuchsanordnung zur Untersuchung der Lichtdurchlässigkeit fester und flüssiger Stoffe im Schülerexperiment

Zur Untersuchung der Lichtdurchlässigkeit von Flüssigkeiten wird die Küvette auf das Tischchen gesetzt. Die Untersuchung der Abhängigkeit der Lichtdurchlässigkeit von der Schichtdicke gestaltet sich dabei sehr einfach, indem man die mit dem Farbstoff gefüllte Küvette einmal längs und einmal quer in den Strahlengang bringt.

2.1.2. Demonstration der geradlinigen Ausbreitung des Lichtes ◑

Zu Variante a ◑

1. Hafttafel
2. Haftleuchte
3. kleine Haftleuchte
4. Meßstab

Zu Variante b [SE] ◑

5. Kerze
6. Gartenschlauch (60 cm lang)

Zu Variante c [SE]

7. Holz- oder Wellpappunterlage
8. Stecknadeln
9. Lineal

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 2.0.1.!
2. Während bei der Variante a die Geradlinigkeit der Lichtspuren mit einem Lineal festgestellt wird, handelt es sich bei den Varianten b und c um die Ermittlung der Geradlinigkeit der „Visierlinie". Es ist zu empfehlen, bei der Auswahl der Versuche für den Unterricht einen Versuch aus den Varianten zu berücksichtigen.

Variante a

Die Lichtspur einer Haftleuchte wird längs der Hafttafel verfolgt. Durch Anlegen eines Tafellineals stellt man die Geradlinigkeit der Lichtausbreitung fest. Man kann natürlich auch die Lichtspur mit Kreide nachziehen, um sich von der Geradlinigkeit der Lichtausbreitung zu überzeugen (Abb. 2.1.2./1a).

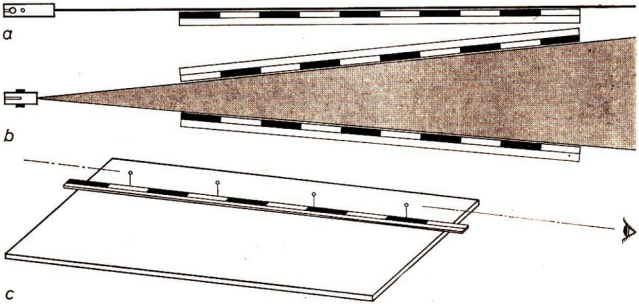


Abb. 2.1.2./1 Anordnung zur Demonstration der Geradlinigkeit der Lichtausbreitung mit Hilfe einer Lichtspur (a), eines divergenten Lichtbündels (b) oder mit den Mitteln der Stecknadeloptik (c)

Es ist auch möglich, mit der kleinen Haftleuchte ein divergentes Lichtbündel auf der Hafttafel zu erzeugen. Die Bündelbegrenzungen sind geradlinig, sie können leicht mit Kreide und Lineal nachgezogen werden (Abb. 2.1.2./1b).

Variante b

Die Schüler erhalten den Auftrag, eine Kerzenflamme durch einen Schlauch hindurch anzuvisieren. Das gelingt nur, wenn der Schlauch straff ausgespannt auf die Flamme gerichtet wird.

Variante c

In eine Holz- oder Wellpappunterlage werden zwei Stecknadeln so weit wie möglich voneinander entfernt eingestochen. Zwei weitere Stecknadeln werden zwischen die bereits eingesteckten eingefluchtet (Abb. 2.1.2./1c). Die Einstichstellen

markiert man mit einem Bleistift. Die Verbindungslinie der Einstichstellen ist eine Gerade.

Bemerkung

Unter Verwendung der Heftleuchte mit der Einspaltblende kann der Versuch, Variante a, auch als Schülerexperiment durchgeführt werden.

2.1.3. Demonstration des Übergangs vom Lichtbündel zum Lichtstrahl ◑

Zu Variante a

1. Manipermtafel
2. kleine Haftleuchte
3. Linsenkörper bikonvex ($f = +100$ mm)
4. 2 Blenden

Zu Variante b [SE]

5. Meßstab
6. Heftleuchte
7. 2 Blenden aus Pappe ⑧
8. weiße Unterlage

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 2.0.1.!
2. In dem Versuch soll der Übergang vom breiten Lichtbündel bis zur Abstraktion des Lichtstrahles als Modell für ein sehr schmales Lichtbündel demonstriert werden.

Variante a

Die kleine Haftleuchte wird so an der Manipermtafel befestigt, daß der Hauptstrahl des divergenten Bündels waagerecht verläuft. Mit Hilfe des bikonvexen Linsenkörpers wird das Bündel parallel gemacht (Abb. 2.1.3./1a). Die Bündelbegrenzungen können mit Kreide nachgezogen werden. Durch Einsetzen der beiden magnetisch haftenden Blenden wird der Bündelquerschnitt sukzessive eingeengt, wobei

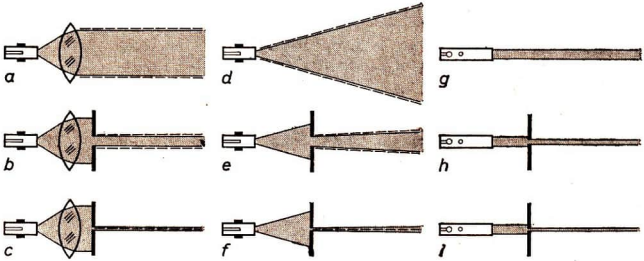


Abb. 2.1.3./1 Zur Demonstration des schrittweisen Übergangs vom Lichtbündel zum Lichtstrahl im Lehrerexperiment unter Verwendung eines parallelen (a bis c) bzw. eines divergenten (d bis f) Lichtbündels und im Schülerexperiment (g bis i).

die Bündelgrenzen abermals nachgezogen werden können (Abb. 2.1.3./1b). Schließlich wird ein ganz schmales Bündel ausgeblendet und nur noch die Bündelachse, der Hauptstrahl des Bündels, eingezeichnet (Abb. 2.1.3./1c). Die sukzessive Einengung eines Lichtbündels kann auch am divergenten Bündel der kleinen Haftleuchte vorgeführt werden (Abb. 2.1.3./1d bis f).

Variante b

Die methodische Schrittfolge ist bei der Durchführung des Schülerexperimentes die gleiche wie bei der Variante a. Experimentiert wird mit dem vollen parallelgerichteten Lichtbündel der Heftleuchte. Man läßt die Bündelbegrenzungen, beim schmalen Lichtbündel lediglich den Hauptstrahl, von den Schülern mit dem Bleistift nachziehen. Zur Abblendung des Lichtes benutzt man einfache Pappblenden (Abb. 2.1.3./1g bis i).

2.1.4. Demonstration der Schattenwürfe ●

1. 2 Sechskantschienen (1 m; 0,5 m)
2. 2 Optikleuchten
3. 3 große Klemmreiter
4. kleiner Klemmreiter
5. Holzkugel auf Stativstab (∅ etwa 40 mm bis 50 mm) Ⓢ (siehe 1.3.1.)
6. transparenter oder undurchsichtiger Schirm
7. Milchglasscheibe (100 m × 100 m) Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Methodischer Hinweis

Die Experimente zum Schattenwurf sind so einfach, daß z.B. bei Verwendung von Kerzen als Lichtquellen die Versuche auch als Hausexperimente durchführbar sind.

Versuch 1

Auf der optischen Bank werden die Optikleuchte, die Holzkugel und der Schirm hintereinander angeordnet (Abb. 2.1.4./1a). Nach Einschalten der Glühlampe beobachten wir einen scharf begrenzten Schlagschatten auf dem Bildschirm. Betrachtet man den Körper, so kann man die beleuchtete Kugelkappe und die dunkle, im Eigenschatten liegende Kappe unterscheiden und erkennen, daß sich der Schatten des Körpers hinter ihm in den Raum erstreckt.

Versuch 2

Kern- und Halbschatten lassen sich scharf und deutlich durch Beleuchtung der Holzkugel mit zwei voneinander getrennt aufgestellten Glühpunktlampen erzeugen (Abb. 2.1.4./1b). Man geht am besten entwickelnd vor. Man entwirft vorerst die von den beiden Lichtquellen erzeugten Schatten einzeln auf dem Schirm und schaltet erst danach beide Lichtquellen gleichzeitig ein. Beim Näherrücken des Schirmes an den schattenwerfenden Gegenstand verschmelzen die beiden Halbschatten teilweise zum Kernschatten.

Versuch 3

Wird nur eine Glühlampe verwendet, aber zusätzlich eine mit Stativmaterial gehaltene Milchglasscheibe (Abb. 2.1.4./1c) davorgesetzt, so erscheint der vorher

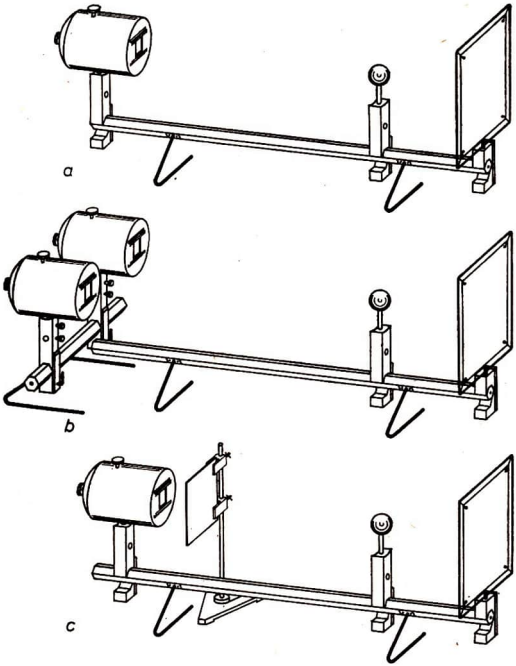


Abb. 2.1.4./1 Versuchsanordnungen zum Nachweis des Schattenwurfes für eine (a) und zwei (b) punktförmige Lichtquellen sowie für eine ausgedehnte Lichtquelle (c)

scharf begrenzte Schlagschatten verändert; um einen dunklen Kernschatten herum liegt ein sich nach außen immer stärker aufhellendes Halbschattengebiet. Die bestrahlte Milchglasscheibe wirkt als ausgedehnte Lichtquelle.

Bemerkungen

1. Die Versuche 1 und 2 können ohne Schwierigkeit mit dem SEG als Schülerexperiment durchgeführt werden. Als schattenwerfenden Körper kann man eine Streichholzschachtel auf dem Tischchen liegend verwenden.
2. Verfügt man für die Durchführung von Versuch 2 nicht über zwei Optikleuchten, so können auch zwei Experimentierleuchten aus dem SEG verwendet werden.

2.1.5. Demonstration des Strahlenverlaufes beim Schattenwurf [SE] ◑

1. Manipermtafel
2. 2 kleine Haftleuchten
3. große Halbkugel, magn. haftend
4. großer quaderförmiger Manipermkern als schattenwerfender Körper

Methodischer Hinweis

Zum Verständnis für die Schattenentstehung, ganz besonders aber für die Schattenkonstruktion, sind neben V 2.1.4. Strahlenverläufe unerläßlich.

Versuch 1

Mit der Haftleuchte wird ein divergentes Lichtbündel erzeugt. In den Strahlenkegel bringt man den schattenwerfenden Körper. Hinter dem Körper ist der Schattenraum zu beobachten. Die Schattenbegrenzung kann mit Kreide nachgezogen werden (Abb. 2.1.5./1a). Verwendet man als schattenwerfenden Körper eine Halbkugel, läßt sich auch noch der Körperschatten beobachten (Abb. 2.1.5./1b).

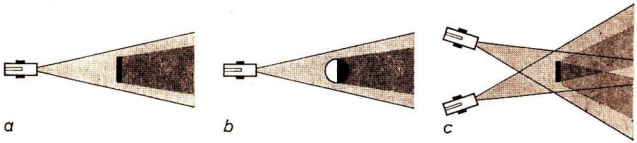


Abb. 2.1.5./1 Demonstration des Strahlenverlaufes beim Schattenwurf mit einer Lichtquelle (a), unter Beachtung des Körperschattens (b) und mit zwei Lichtquellen (c)

Versuch 2

Zur Erzeugung von Halb- und Kernschatten wird der schattenwerfende Körper von den zwei kleinen Haftleuchten beleuchtet. Es werden zunächst die Schatten des Körpers von jeder Lichtquelle einzeln erzeugt und erst danach beide Lichtquellen zugleich eingeschaltet. Die Lage von Kern- und Halbschatten kann nachgezeichnet werden (Abb. 2.1.5./1c).

Bemerkung

Beide Versuche können bei Verwendung von Heftleuchten aus dem SEG auch als Schülerexperiment durchgeführt werden.

2.1.6. Demonstration der Entstehung von Sonnen- und Mondfinsternis ●

Zu Variante a

1. Sechskantschiene (1 m)
2. Sechskantschiene (0,5 m)

3. Optikleuchte
4. 2 große Klemmreiter
5. kleiner Klemmreiter
6. Blendscheibe mit Linse ($f = +120$ mm)
7. 2 Holzkugeln (∅ 45 mm und 15 mm) Ⓢ
8. undurchsichtiger Schirm
9. Draht

Zu Variante b [SE]

10. Experimentierleuchte
11. 2 T-Füße
12. Tischchen
13. Tischtennisball
14. Holz- oder Plastillinkugel (∅ 10 mm) Ⓢ
15. Draht

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 2.0.1.!
2. Die Vorführung der Entstehung der Finsternisse wird von einem Bezugssystem außerhalb unseres Planetensystems betrachtet. Dabei bereitet es den Schülern erfahrungsgemäß Schwierigkeiten, die Entstehung und die Beobachtung der Finsternisse von der Erdoberfläche aus in Übereinklang zu bringen.
3. Der Versuch hat einen erkenntnisbildenden Wert, besonders, wenn die Größenverhältnisse von Erd- und Monddurchmesser und Mondabstand möglichst eingehalten werden. Dadurch gestalten sich auch Erd- und Mondschatten verhältnisgleich.

Variante a

Auf der kleinen Schiene zur optischen Bank montiert man die Optikleuchte und die Kondensorlinse von 120 mm Brennweite mit der Planseite zur Lichtquelle. Das Lichtbündel soll nur sehr schwach divergent die Kondensorlinse verlassen. 2,5 m bis 3 m entfernt von der Kondensorlinse wird auf der langen Schiene unter Verwendung von Stativmaterial eine Art Tellurium aufgebaut. Die als *Erde* fungierende Holzkugel wird mit einer Sacklochbohrung versehen auf den Stativstab gesteckt, die *Mond*-Kugel mit Draht am Stativmaterial befestigt (Abb. 2.1.6./1a).

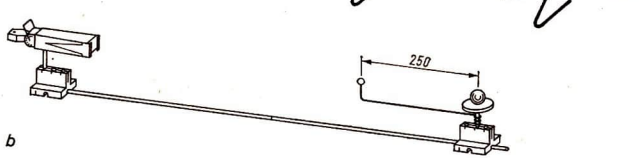


Abb. 2.1.6./1 Versuchsanordnung zur Vorführung der Entstehung von Sonnen- und Mondfinsternis im Lehrer- (a) und Schülerexperiment (b)

Zur Demonstration der Entstehung der Finsternisse dreht man den „Mond" um die „Erde". Dabei zeigt sich bei richtiger Stellung auf der „Erde" ein kleiner Schatten von etwa 15 mm bis 20 mm Durchmesser. Bringt man den „Mond" in den Schattenbereich der „Erde", so kann man die Entstehung der Mondfinsternis demonstrieren. Das Eintreten des „Mondes" in den „Erd"schatten beobachtet man am besten auf einem hinter die Anordnung gestellten Schirm.

Variante b

An beiden Enden der zusammengesteckten Stativstäbe steht je ein T-Fuß; der eine bestückt mit der Experimentierleuchte, der andere mit dem Tischchen, auf dem ein Tischtennisball als „Erde" liegt und um dessen Stiel ein Draht gewunden ist, der die kleine „Mond"-Kugel trägt und um die „Erde" zu drehen gestattet (Abb. 2.1.6./1b). Die Experimentierleuchte ist so eingestellt, daß ein sehr schwach divergenter Lichtkegel die Leuchte verläßt. Der Ablauf des Versuches gestaltet sich wie bei Variante a.

Bemerkungen

1. Die Zahlenwerte sind auf den Kondensordurchmesser von 70 mm und die übliche Länge eines Experimentiertisches abgeglichen. Dadurch fallen die Abmessungen von „Erde" und „Mond" etwas klein aus. Die Schüler sind gezwungen, den Versuch aus der Nähe zu beobachten. Steht eine größere Lichtquelle zur Verfügung, so können die Abmessungen der Modellhimmelskörper den tatsächlichen Größenverhältnissen entsprechend etwas größer gewählt werden. Die Größe der Durchmesser der Erde, des Mondes und der Sonne und der Entfernungen der Erde vom Mond und von der Sonne muß man den Schülern mitteilen.
   Den Durchmesser der Sonne und die Entfernung der Sonne von der Erde kann man im Unterrichtsraum nicht maßstäblich wiedergeben, wenn das Erdmodell nicht zu klein ausfallen soll.
2. Übersicht über die Abmessungen der drei Himmelskörper und ihre Größenverhältnisse, bezogen auf den Erddurchmesser:

mittlerer Durchmesser der Erde d_E	=	12740 km =	1	d_E
mittlerer Durchmesser des Mondes	=	3470 km ≈	0,27	d_E
mittlerer Abstand Erde—Mond	=	384000 km ≈	30	d_E
mittlerer Durchmesser der Sonne	=	1390000 km ≈	110	d_E
mittlere Entfernung Sonne—Erde	=	149600000 km ≈	11700	d_E

2.1.7. Demonstration des Strahlenverlaufes bei der Entstehung von Sonnen- und Mondfinsternis ◑

1. Manipermtafel
2. kleine Haftleuchte
3. 2 Halbkugeln, klein und groß, magnetisch haftend

Methodischer Hinweis

Es ist empfehlenswert, im Zusammenhang mit einem Versuch zur Demonstration der Finsternisse auch den Strahlenverlauf vorzuführen. Dabei ist mitzuteilen,

daß die Betrachtung von einem Bezugssystem außerhalb unseres Planetensystems erfolgt.

Versuch

Mit der kleinen Haftleuchte wird ein divergentes Lichtbündel über die Hafttafel gerichtet. Etwa 500 mm von der Lichtquelle entfernt schlägt man einen Kreis von 200 mm Radius, wobei das Zentrum des Kreises in der Mitte des Lichtbündels

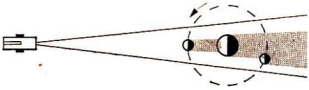


Abb. 2.1.7./1 Strahlenverlauf bei der Entstehung der Sonnen- und Mondfinsternis

liegt. Im Kreismittelpunkt wird die große Halbkugel als „Erde" geheftet, die kleine Halbkugel wird als „Mond" auf der Kreisbahn um die „Erde" geführt. Für die Fälle, daß „Erde" und „Mond" in Konjuktion bzw. Opposition zur „Sonne", der Lichtquelle, stehen, treten die entsprechenden Finsternisse ein (Abb. 2.1.7./1).

2.1.8. Nachweis der geradlinigen Ausbreitung des Lichtes und Erzeugung von Bildern mit Hilfe einer Lochkamera ●

Zu Variante a ●

1. Sechskantschiene (0,5 m)
2. Optikleuchte
3. 2 große Klemmreiter
4. kleiner Klemmreiter
5. Blendscheibe mit Schiebeschacht
6. Irisblende
7. transparenter Schirm
8. Transparentobjekt
9. feine Lochblenden (gerahmt; 50 mm × 50 mm) Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Zu Variante b ●

Geräte 1., 3. bis 5., außerdem

10. Glühlampe mit großflächig aufgespannter Wendel (40 W bis 60 W)
11. Blendscheibe mit Lampenfassung Ⓢ (siehe 1.3.1.)
12. Glas oder Folie mit feinem Hindernis (gerahmt; 50 mm × 50 mm) Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Zu Variante c [SE]

13. Lochkamera Ⓢ (siehe 1.3.4.)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 2.0.1.!
2. Die Varianten a und b gestatten die übliche Demonstration der Lochkamera, aber auch ihrer Umkehrung, der „negativen" Lochkamera. Sie sind in ihrer gemeinsamen Demonstration sehr lehrreich.

3. Mit einer selbstgebauten Lochkamera können unterschiedliche Versuche als Hausexperimente durchgeführt werden.

Variante a: Benutzen einer Optikleuchte

Nach Abbildung 2.1.8./1a werden die Optikleuchte, die Irisblende und der transparente Schirm auf einer kleinen Schiene zur optischen Bank montiert. In den Schiebeschacht der Leuchte bringt man das Transparentobjekt. Auf dem Schirm beobachtet man ein umgekehrtes, reelles Bild des Objektes. Die Schärfe des Loch-

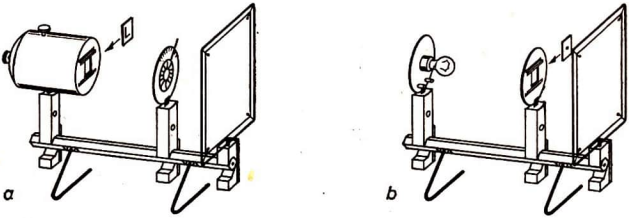


Abb. 2.1.8./1 Anordnungen zur Beobachtung der Lochkamerawirkung (a) und zur Vorführung einer „negativen Lochkamera" (b)

kamerabildes ist in weiten Grenzen durch die Öffnung der Irisblende bestimmt. Ändert man die Entfernung des Schirms zur Irisblende, so verkleinert sich das Bild beim Nähern und vergrößert sich beim Entfernen.
Der Versuch kann dahingehend abgewandelt werden, daß man die Irisblende gegen eine Blendscheibe mit Schiebeschacht auswechselt und feine Blenden unterschiedlichen Durchmessers und unterschiedlicher Form einbringt. Man kann dann leicht zeigen, daß die Abbildung mit einer Lochkamera von der Form des Loches unabhängig ist.

Variante b: Benutzen einer Glühlampe

Im Versuch nach Variante a ersetzt man die Optikleuchte durch eine Glühlampe mit möglichst großflächig aufgespannter Glühwendel und die Lochblende durch ein kleines, undurchsichtiges Hindernis (Tuschefleck auf einer durchsichtigen Folie). Die Versuchsanordnung zeigt Abbildung 2.1.8./1b. Man beobachtet dann auf dem Schirm einen umgekehrten Schatten der Glühwendel. Deshalb wird diese Anordnung auch „negative" Lochkamera genannt.

Variante c: Benutzen einer selbstgebauten Lochkamera

Die selbstgebaute Lochkamera (Abb. 1.3.4./1) wird möglichst so gestaltet, daß die Lochblenden auswechselbar sind und die Kameralänge verändert werden kann. Als Hausexperimente lassen sich dann Untersuchungen der Abhängigkeit der Bildqualität von der Größe und Form der Blende sowie der Abhängigkeit der Bildgröße von der Kameralänge durchführen. Als selbstleuchtendes Objekt dient am besten eine Kerzenflamme.

2.1.9. Fotografieren mit Hilfe einer Lochkamera [SE]

1. Fotografische Kamera mit auswechselbarer Optik
2. Lochblenden aus schwarzem Kartonpapier ® (siehe 1.3.1.)
3. Belichtungsmesser
4. Fotofilm

Methodische Hinweise

1. Lochkameras, wie sie im V 2.1.6. beschrieben worden sind, eignen sich nicht zur fotografischen Aufnahme des Kamerabildes, weil die Befestigung und die lichtdichte Unterbringung eines Fotofilms anstelle der Mattscheibe nicht ohne weiteres möglich sind.
2. Fotografische Aufnahmen mit der Lochkamera sind sehr reizvoll. Da die Vorbereitung und Durchführung jedoch recht zeitaufwendig sind, eignet sich dieser Versuch vornehmlich für die außerunterrichtliche Arbeit oder als Hausexperiment.

Versuch

Man verwendet als Lochkamera eine fotografische Kamera mit auswechselbarem Objektiv, indem man das Objektiv durch eine Lochblende ersetzt. Diese stellt man selbst her, indem man in eine Scheibe aus schwarzem Kartonpapier mit einer glühenden Nadel ein feines Loch sticht. Die so erhaltene Blende befestigt man an einem Zwischenring. Der Film wird wie üblich eingelegt. Da die Belichtungszeiten einige Sekunden bis Minuten betragen, muß die Kamera auf einem Stativ befestigt werden. Man muß die Belichtungszeiten überschläglich bestimmen. Dazu muß man die relative Blendenöffnung als Quotienten des Öffnungsdurchmessers der Blende und der Entfernung der Blende vom Film ermitteln. Der reziproke Wert der relativen Blendenöffnung ist die Blendenzahl. Die Belichtungszeit entnimmt man dann einer Belichtungstabelle.
Ist beispielsweise der Lochdurchmesser 0,8 mm und beträgt der Abstand der Lochblende zum Film 90 mm, so ist die Blendenzahl $\frac{90}{0{,}8} \approx 113$. Die Belichtungszeit beträgt dann etwa 12 s.

Bemerkungen

1. Am besten eignet sich eine 6 cm × 6 cm-Kamera mit auswechselbarem Objektiv. Bei einer Kleinbildkamera ist das Filmformat etwas klein; jedoch ist sie beim Benutzen eines kleineren Lochdurchmessers durchaus verwendbar.
2. Sehr gut sind 9 cm × 12 cm-Plattenkameras geeignet, bei denen man das Objektiv herausschrauben kann.
3. Die Beugung macht sich bei Lochdurchmessern über 0,2 mm im allgemeinen noch nicht bemerkbar.

2.2. Reflexion des Lichtes am ebenen Spiegel

2.2.1. Demonstration der Reflexion des Lichtes an Spiegeln und matten Flächen ◑ [SE]

Zu Variante a

1. Manipermtafel
2. 3 Haftleuchten
3. kleine Haftleuchte
4. Linsenkörper ($f = 100$ mm)
5. Spiegelstreifen
6. diverse Glas-, Mattglas-, Metall-, Kartonstreifen usw. Ⓢ (siehe 1.3.2.) magnetisch haftend

Zu Variante b [SE]

7. Heftleuchte
8. Einspalt-, Dreispaltblende
9. Spiegelkombination
10. weiße Unterlage

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 2.0.2.!
2. Die Versuche eignen sich zur Einführung in die Behandlung der Reflexion des Lichtes.

Variante a, Versuch 1

Man befestigt nebeneinander in großem Abstand drei Haftleuchten so an der Manipermtafel, daß ihre Lichtspuren schräg über die Tafel streifen. Dann reflektiert man die Lichtspuren durch einen Spiegelstreifen, einen Glasstreifen und einen Streifen aus weißem Karton. Man kann nebeneinander die vollständige und teilweise reguläre und diffuse Reflexion beobachten (Abb. 2.2.1./1).
Weitere Beobachtungsreihen ergeben sich beispielsweise bei Verwendung von Spiegel, polierter Metallfläche und Glas sowie Spiegel, Mattglas und weißem Karton.

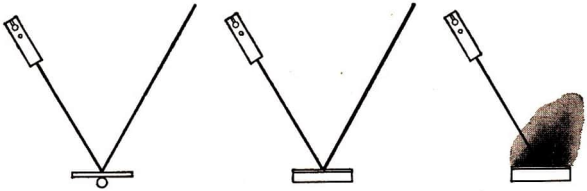


Abb. 2.2.1./1 Zur Demonstration des Strahlenverlaufes bei der Reflexion am ebenen Spiegel an Körpern unterschiedlichen Reflexionsvermögens

Variante a, Versuch 2

In einer völlig anders gestalteten Versuchsreihe kann der Erhalt der Bündelstruktur bei der regulären Reflexion an einem Spiegel gezeigt werden. Dazu richtet man das divergente Lichtbündel einer kleinen Haftleuchte unter einem Winkel von 30° bis 40° auf einen ebenen Spiegelstreifen und beobachtet, daß die Divergenz

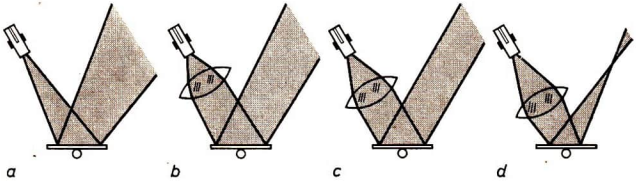


Abb. 2.2.1./2 Reflexion am ebenen Spiegel bei divergentem (a und b), parallelem (c) und konvergentem (d) Lichteinfall

des Bündels bei der Reflexion erhalten bleibt (Abb. 2.2.1./2a). Durch Vorsetzen des bikonvexen Linsenkörpers verringert man die Divergenz des Bündels (Abb. 2.2.1./2b) oder aber macht es parallel bzw. konvergent (Abb. 2.2.1./2c und d). Dabei ist zu erkennen, daß divergente Lichtbündel divergent, parallele parallel und konvergente konvergent reflektiert werden, die Struktur des Bündels bei der Reflexion also nicht geändert wird.

Variante b

Mit der Heftleuchte wird eine schmale Lichtspur erzeugt und ihre Reflexion an der spiegelnden und matten Seite der Spiegelkombination untersucht.
Nach Entfernen der Blende erzeugt man ein volles Lichtbündel, das man je nach Stellung der Lichtquelle parallel, divergent oder konvergent gestaltet und dessen Reflexion an der spiegelnden Seite der Spiegelkombination untersucht wird.

2.2.2. Herleitung bzw. Bestätigung des Reflexionsgesetzes ◑

Zu Variante a ◑

1. Manipermtafel
2. Haftleuchte
3. ebener Spiegelstreifen
4. Papierscheibe mit Kreisteilung
5. Manipermkerne

Zu Variante b [SE] ◑

6. Heftleuchte
7. Einspaltblende
8. Spiegelkombination
9. Kreisscheibe mit Winkelteilung
10. weiße Kartonunterlage

Zu Variante c [SE]

Gerät 10., außerdem

11. Holz- oder Wellpappunterlage
12. Winkelmesser
13. Stecknadeln
14. Spiegelstreifen
15. Knetmasse

Methodische Hinweise

1. Vergleiche 2.0.2.!
2. Die Schülerexperimente, Varianten b und c, zur Herleitung oder Bestätigung des Reflexionsgesetzes sind sehr einfach und liefern bei sorgfältiger Arbeit sehr überzeugende Ergebnisse. Die Variante c eignet sich bei Verwendung eines Taschenspiegels auch als Hausexperiment.

Variante a

An der Hafttafel befestigt man die Kreisteilung mit einigen Manipermkernen. Der Spiegelstreifen wird genau über der Mitte der Kreisteilung in waagerechter Stellung angeordnet, daß er in Richtung der 90°-Markierungen der Kreisteilung

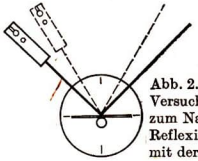


Abb. 2.2.2./1
Versuchsanordnung zum Nachweis des Reflexionsgesetzes mit der Haftoptik

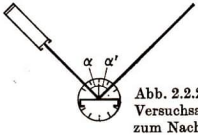


Abb. 2.2.2./2
Versuchsanordnung zum Nachweis des Reflexionsgesetzes mit der Heftoptik

verläuft. Die Lichtspur einer Haftleuchte richtet man auf den Spiegel, wobei der Auftreffpunkt genau im Zentrum der Kreisteilung liegen muß (Abb. 2.2.2./1). Einfallswinkel α und Reflexionswinkel α' werden an der Kreisteilung abgelesen und nach folgendem Muster in eine Tabelle eingetragen:

Beispiel einer Meßreihe

Einfallswinkel α in Grad	Reflexionswinkel α' in Grad
15	15
30	30
45	45
60	60
75	75

Der Versuch wird mehrfach mit geändertem Einfallswinkel wiederholt. Abschließend zeigt man die Reflexion bei den beiden Extremstellungen: $\alpha = 0°$ und $\alpha = 90°$.

Variante b

Die Lichtspur der Heftleuchte mit Einspaltblende richtet man genau auf den Mittelpunkt der Winkelteilung auf der Kreisscheibe. Die ebene Seite der Spiegelkombination wird an der Verbindungslinie der 90°-Markierungen angelegt. Man mißt Einfalls- und Reflexionswinkel. Durch Drehen der Scheibe kann man den Einfallswinkel leicht verändern (Abb. 2.2.2./2).

Variante c

Auf einer Holz- bzw. Wellpappunterlage mit aufgelegtem Zeichenkarton stellt man den Spiegelstreifen erforderlichenfalls unter Verwendung von Knetmasse senkrecht auf. Eine Stecknadel sticht man dicht an der Spiegelfläche ein, eine zweite seitlich versetzt vor dem Spiegel. Man sucht das Spiegelbild der zuletzt eingestochenen Nadel, fluchtet es mit der am Spiegel stehenden Stecknadel ein und fixiert die Richtung durch Einstechen einer dritten Nadel (Abb. 1.2.2./6). Man markiert die Spiegelfläche, verbindet über die Einstichstellen einfallenden und reflektierten Strahl und errichtet im Auftreffpunkt das Lot. Mit dem Winkelmesser werden α und α' gemessen. Man stellt ihre Übereinstimmung fest. Der Versuch kann mehrfach mit geänderter Stellung der Nadeln wiederholt werden.

2.2.3. Demonstration der Lage von einfallendem und reflektiertem Strahl bei der Reflexion am ebenen Spiegel ◑

Zu Variante a

1. Haftleuchte
2. ebener Spiegel (50 mm × 50 mm) Ⓢ (siehe 1.3.2.)
3. 2 weißlackierte Eisenbleche (1 mm dick; 250 mm × 500 mm) Ⓢ (siehe 1.3.2.)
4. Lot (Faden und Spitze eines Faserstiftes) Ⓢ
5. Klebefilm
6. Manipermkerne
7. Meßstab

Zu Variante b [SE]

8. Heftleuchte
9. Einspaltblende
10. Spiegelkombination
11. weiße Kartonunterlage (in der Mitte gefalzt)
12. dickes Buch als Unterlage

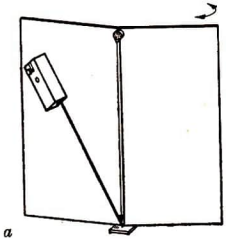
Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 2.0.2.!
2. Es ist ein Vorzug des Versuches, daß er die Schüler ohne vorgefaßte Meinung an die Zusammenhänge heranführt. Das Verschmelzen der durch den einfallenden Strahl, den reflektierten Strahl und das Lot gegebenen beiden Ebenen wird auf experimentellem Wege gewonnen. Erst nach Festigen dieser Tatsache werden die beiden Tafeln durch eine ersetzt.

Variante a

Die beiden Eisenblechtafeln werden an ihrer Längsseite mit Klebefilm klappbar zusammengesetzt und unter Verwendung von Stativmaterial lotrecht so aufgestellt, daß zwischen Blech und Tischfläche genügend Zwischenraum zum Unterschieben des ebenen Spiegels bleibt. Danach befestigt man mit Manipermkernen

ein einfaches Lot aus einem dünnen Faden und der abgeschnittenen Spitze eines unbrauchbaren Faserstiftes so, daß es fast bis zum Spiegel reichend möglichst dicht genau vor der Stoßkante der beiden Bleche verläuft. Notfalls justiert man etwas nach.
Nunmehr kann man die Lichtspur einer an der feststehenden Blechtafel befestigten Haftleuchte auf den Spiegel im Lotpunkt richten. Das vom Spiegel reflektierte Bündel ist nur dann über die volle Breite der beweglichen Blechtafel sichtbar, wenn beide Tafeln in einer Ebene liegen, womit der Nachweis erbracht ist, daß bei der Reflexion am ebenen Spiegel einfallender Strahl, Lot und reflektierter Strahl in einer Ebene liegen (Abb. 2.2.3./1a).
Daß der Einfallswinkel und der Reflexionswinkel gleich sind, prüft man nach, indem man den Abstand der Lichtspur des einfallenden Strahles vom Lot mit dem Abstand des reflektierten Strahles vom Lot in der gleichen Höhe nachmißt.



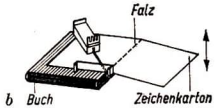


Abb. 2.2.3./1 Versuchsanordnung zum Nachweis, daß einfallender Strahl, Lot und reflektierter Strahl in einer Ebene liegen im Lehrerexperiment (a) und im Schülerexperiment (b)

Variante b

Ein in der Mitte gefalzter Zeichenkarton wird so auf ein dickes Buch gelegt, daß der Falz genau mit einer Buchkante übereinstimmt und im unteren Teil des Buches ein Stück frei bleibt (Abb. 2.2.3./1b). Dorthin legt man die Spiegelkombination, wie es die Abbildung zeigt. Die Lichtspur der Heftleuchte richtet man so auf den Spiegel, daß sie genau am Falz den Spiegel erreicht. Hebt oder senkt man die frei über das Buch hinausragende Kartonblatthälfte, kann man die Lichtspur des reflektierten Lichtes nur dann über die ganze Breite des Kartonblattes streifen sehen, wenn beide Hälften in einer Ebene liegen.

2.2.4. Beobachtung der Bilder an einem ebenen Spiegel

1. Großer, ebener Spiegel (etwa 400 mm × 500 mm)
2. große, ebene Glasscheibe (etwa 400 mm × 500 mm)
3. 3 gleich große Kerzen
4. hoher Standzylinder
5. 3 weite Bechergläser
6. Meßstab oder langer weißer Kartonstreifen

Methodischer Hinweis

Die Beobachtung von virtuellen Spiegelbildern am ebenen Spiegel und an einer Glasscheibe lassen die Zusammenhänge von Größe, Art und Ort des Bildes für die Schüler sehr anschaulich und deutlich werden.

Versuch

Ein ebener Spiegel und eine ebene Glasscheibe werden mit Stativmaterial nebeneinander lotrecht aufgestellt. Dabei ist darauf zu achten, daß der Meßstab bzw. der Kartonstreifen zwischen Spiegel und Tischfläche sowie Glasscheibe und Tischfläche hindurchgeschoben werden kann.
Man stellt vor den Spiegel und vor die Glasscheibe je eine entzündete Kerze und beobachtet die Spiegelbilder. Sie liegen scheinbar hinter dem Spiegel (Abb. 2.2.4./1). Eine dritte, nicht entzündete Kerze bringt man hinter der Glasscheibe mit dem Spiegelbild der brennenden Kerze zur Deckung. Spiegelbild und Gegenstand sind gleich groß. Mit dem Meßstab ermittelt man die Entfernung von Gegenstand und Bild. Das Bild steht genauso weit hinter dem Spiegel wie der Gegenstand davor.

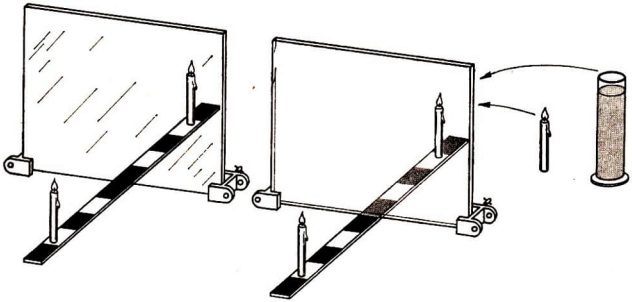


Abb. 2.2.4./1 Versuchsanordnung zur Beobachtung von virtuellen Bildern am ebenen Spiegel und an einer ebenen Glasplatte

Ersetzt man die Kerze hinter der Glasscheibe durch einen wassergefüllten Standzylinder, so scheint eine Kerze (das Spiegelbild) im Zylinder unter Wasser zu brennen.
Wie man sich auch mit Hilfe eines Spiegelbildes orientieren kann, zeigt man, indem man je ein Becherglas vor und hinter den Spiegel (an den Ort des virtuellen Bildes) setzt, in den Spiegel blickt und, ohne das Becherglas hinter dem Spiegel zu sehen, einfach durch Orientierung mit Hilfe des Spiegelbildes Wasser genau in das Becherglas gießt.

2.2.5. Demonstration des Strahlenverlaufes bei der Bildentstehung am ebenen Spiegel ◑

Zu Variante a ◑

1. Manipermtafel
2. kleine Haftleuchte
3. ebener Spiegelstreifen

Zu Variante b [SE] ◑

4. Heftleuchte
5. Dreispaltblende
6. Spiegelkombination
7. weiße Unterlage

Methodischer Hinweis

Der Versuch dient dem Verständnis der Bildentstehung und Bildkonstruktion am ebenen Spiegel. Es empfiehlt sich, diesen Versuch nach V 2.2.4. vorzuführen.

Variante a

Auf den an der Tafel befestigten Spiegelstreifen wird das divergente Lichtbündel der kleinen Haftleuchte gerichtet. Die Bündelbegrenzungen vor und nach der Reflexion werden mit Kreide eingezeichnet, ebenso die Lage des Spiegels und die Verlängerungen des reflektierten Bündels hinter dem Spiegel. Deren Schnittpunkt liefert das virtuelle Bild der Lichtquelle. Man vergleicht den Abstand der Lichtquelle und des Bildpunktes von der Spiegelebene und stellt Gleichheit fest (Abb. 2.2.5./1a).

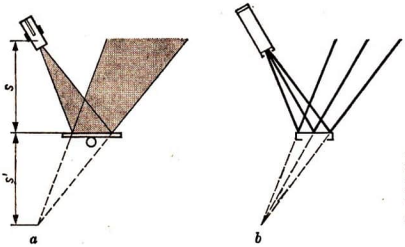


Abb. 2.2.5./1 Strahlenverlauf zur Demonstration der Entstehung von Bildern am ebenen Spiegel mit der Haftoptik (a) und der Heftoptik (b)

Variante b

Die Heftleuchte mit Dreispaltblende richtet man so aus, daß ein divergentes Lichtbündel schräg auf die polierte Fläche der Spiegelkombination trifft (Abb. 2.2.5./1b). Die Lichtspuren und deren rückwärtige Verlängerungen werden mit Bleistift nachgezogen. Man findet leicht den Ort des Spiegelbildes und die Gleichheit von Gegenstands- und Bildentfernung. Entfernt man die Blende, kann man wie bei Variante a mit einem vollen Lichtbündel arbeiten.

Bemerkung

Mit den Mitteln der Stecknadeloptik läßt sich der Versuch auch als Hausexperiment durchführen. Man verfährt wie beim Versuch 2.2.2., Variante c, steckt aber dicht am Spiegel 3 Stecknadeln nebeneinander ein.

2.2.6. Demonstration der Reflexion des Lichtes an Winkelspiegeln ◑

1. Manipermtafel
2. 2 Haftleuchten
3. 2 ebene Spiegel
4. Farbfilter

Methodischer Hinweis

Im Zusammenhang mit den Ergebnissen des Versuches bieten sich Möglichkeiten der Anwendung (z.B. Grabenspiegel, Spiegelwinkelmesser, Umkehrspiegel, Spiegelsextant).

Versuch

Etwa in der Mitte der Hafttafel erzeugt man mit zwei Haftleuchten zwei waagerechte parallele Lichtspuren. In den Strahlengang bringt man einen Spiegelstreifen, der die Spuren genau um 90° ablenkt.
Bringt man einen zweiten, parallel zum ersten ausgerichteten Spiegel in die reflektierten Lichtspuren, ist eine Parallelverschiebung der Spuren ohne Veränderung ihrer gegenseitigen Anordnung festzustellen (Abb. 2.2.6./1a).

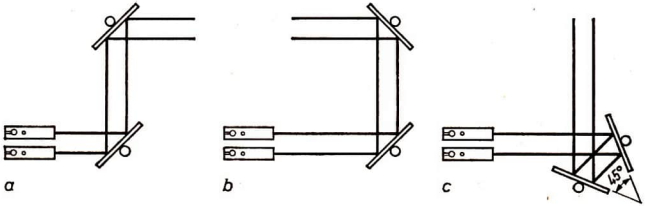


Abb. 2.2.6./1 Strahlenverlauf bei der Reflexion des Lichtes an zwei Spiegeln bei paralleler Stellung (a) und bei einem Spiegelwinkel von 90° (b) bzw. 45° (c)

Wird der zweite Spiegel jedoch so angeordnet, daß er senkrecht zum ersten steht, werden die Lichtspuren nach der zweimaligen Reflexion in die Richtung zurückgeworfen, aus der sie gekommen sind. Die Anordnung der Strahlen ist untereinander vertauscht (Abb. 2.2.6./1b).
Ordnet man beide Spiegel so, daß sie einen Winkel von 45° einschließen, schneiden nach zweimaliger Reflexion die reflektierten Strahlen die einfallenden unter einem Winkel von 90° (Abb. 2.2.6./1c).
Zur besseren Unterscheidung der Lage der beiden Strahlen vor und nach der zweimaligen Reflexion kann man die eine der beiden Lichtspuren mit Hilfe eines schwachen Farbfilters färben.

Bemerkung

Der Versuch kann mit den Geräten des SEG leicht als Schülerexperiment durchgeführt werden. Dabei ist es zweckmäßig, die Heftleuchte mit einer selbstgefertigten Zweispaltblende auszurüsten.

2.2.7. Beobachtung von Bildern an Winkelspiegeln

Zu Variante a

1. Großer veränderlicher Winkelspiegel
2. Kerze
3. Winkelteilung

Zu Variante b [SE]

4. 2 Spiegel (50 mm × 50 mm) Ⓢ (siehe 1.3.1.)
5. Kreisscheibe mit Winkelteilung
6. durchsichtiges Klebeband
7. kleine Kerze

Zu Variante c [SE]

8. Kaleidoskop, fertig oder Ⓢ (siehe 1.3.4. und Abb. 1.3.4./3)

Abb. 2.2.7./1 Versuchsanordnung zur Beobachtung von Bildern am Winkelspiegel

Methodischer Hinweis

Die Beobachtung von Spiegelbildern am Winkelspiegel ist sehr einfach und kann unter Verwendung von zwei Taschenspiegeln auch als Hausexperiment durchgeführt werden mit der Aufgabenstellung der Ermittlung der Abhängigkeit der Anzahl der entstehenden Bilder vom Winkel, den die beiden Spiegel einschließen.

Varianten a und b

Der Winkelspiegel oder die beiden mit durchsichtigem Klebeband zusammengesetzten Spiegel (Abb. 2.2.7./1, rechts) werden so auf die Winkelteilung gestellt, daß die Schnittkante der beiden Spiegelfächen genau über dem Mittelpunkt der Teilung liegt. Zwischen die beiden Spiegel wird eine Kerze oder ein anderer schmaler Gegenstand gestellt (Abb. 2.2.7./1). Man stellt den Winkel zwischen den Spiegeln auf verschiedene Werte ein, z.B. auf 120°, 90°, 72°, 60°, 45°, 36° und 30°, und beobachtet zusätzlich zum Gegenstand noch 2, 3, 4, 5, 7, 9 bzw. 11 Bilder. Man findet, daß die Anzahl k der zu beobachtenden Bilder stets

$$k = \frac{360°}{\alpha} - 1$$

ist, wenn α den Winkel zwischen den Spiegeln kennzeichnet.

Bemerkung

Verwendet man statt der Kerze farbige Papierschnitzel, so erhält man bei einer Spiegelstellung von 60° eine Vorstellung von der Wirkungsweise eines Kaleidoskops.

Variante c

Das Kaleidoskop wird gegen den hellen Himmel oder eine helle Wand gerichtet. Von den bunten Glas- oder Kunststoffstücken, die sich beweglich vor den drei langen, zu einem gleichseitigen Prisma zusammengesetzten Spiegelstreifen befinden, beobachtet man in wabenförmiger Anordnung mindestens 12 Bilder. Durch leichtes Drehen oder Schütteln werden die Glas- bzw. Kunststoffstückchen umgeordnet, und es ist jeweils ein anderes, farbenprächtiges Bild zu beobachten.

Bemerkung

Kaleidoskopbilder können projiziert werden. Dazu muß man das transparente Fenster durch ein durchsichtiges ersetzen und die Lochblende erheblich vergrößern oder ganz entfernen. Man ordnet das Kaleidoskop genau in der optischen Achse einer Projektionseinrichtung an und bildet mit Hilfe des Objektivs durch das Kaleidoskop hindurch die farbigen Glas- bzw. Kunststoffstückchen scharf auf einem Schirm ab.

2.3. Reflexion des Lichtes an gewölbten Spiegeln

2.3.1. Demonstration des Strahlenverlaufes an einem Hohl- bzw. Wölbspiegel ◑

Zu Variante a

1. Manipermtafel
2. 3 Haftleuchten
3. biegsamer Spiegelstreifen
4. Hohlspiegelmodell, aus kleinen ebenen Spiegelstücken zusammengesetzt ⓢ (siehe 1.3.2.)

Zu Variante b [SE]

5. Heftleuchte
6. Fünfspaltblende ⓢ (siehe 1.3.2.) oder Dreispaltblende
7. Spiegelkombination

Methodischer Hinweis

Es erscheint empfehlenswert, vor der Verwendung einer gekrümmten Spiegelfläche ein aus mehreren kleinen, ebenen Spiegelstücken zusammengesetztes Modell zu benutzen, um überzeugend die Gültigkeit des Reflexionsgesetzes auch an gekrümmten Spiegelflächen nachzuweisen und einen organischen Übergang vom ebenen zum gekrümmten Spiegel zu gewährleisten.

Variante a

An der Hafttafel mit vorgezeichneter optischer Achse werden mit drei Haftleuchten drei achsenparallele Lichtspuren erzeugt, die vorerst auf einen aus kleinen ebenen Spiegelstücken zusammengesetzten Hohlspiegel treffen. Man beobachtet das Sammeln der Strahlen nach der Reflexion in einem Punkt (Abb. 2.3.1./1a).
Nunmehr wird das Hohlspiegelmodell durch einen biegsamen Spiegelstreifen ersetzt, der konkav gekrümmt an der Hafttafel befestigt wird. Die reflektierten Lichtspuren werden wiederum in einem Punkt gesammelt (Abb. 2.3.1./1b).
Durch kräftiges konkaves Durchbiegen des Spiegelstreifens zeigt man die Abhängigkeit der Brennpunktlage von der Spiegelkrümmung (Abb. 2.3.1./1c).
Wölbt man schließlich den Spiegelstreifen konvex, verlaufen die Lichtspuren nach der Reflexion divergent. Ihre rückwärtigen Verlängerungen, die man mit Kreide an der Tafel nachzeichnet, schneiden einander in einem Punkt hinter dem Spiegel (Abb. 2.3.1./1d und e).

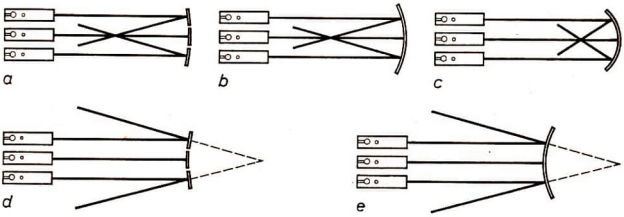


Abb. 2.3.1./1 Strahlenverlauf bei der Reflexion des Lichtes an gewölbten Spiegeln für zusammengesetzte Spiegel (a, d), für Hohl- bzw. Wölbspiegel (b, c, e)

Bemerkung

Sticht man einen Wandtafelzirkel auf einem markierten Punkt der optischen Achse ein und schlägt einen Kreis darum, läßt sich zeigen, daß achsenparallele Strahlen von einem der Krümmung des Kreises angepaßten biegsamen Spiegelstreifen in der Mitte zwischen Krümmungsmittelpunkt und Spiegelscheitel gesammelt werden: $f \approx \frac{r}{2}$.

Variante b

Der Schülerversuch kann in ganz ähnlicher Weise wie der bereits beschriebene Lehrerversuch durchgeführt werden. Nach Einschieben der Spaltblende in die Heftleuchte werden parallele Lichtspuren auf einer weißen Unterlage erzeugt. Man bringt die Spiegelkombination mit dem konkav eingespannten Spiegelstreifen in den Strahlengang und beobachtet das Sammeln der reflektierten Strahlen in einem Punkt. Nach Entfernen der Spaltblende läßt sich der Verlauf des vollen parallelen Strahlenbündels verfolgen (Abb. 2.3.1./2).

Abb. 2.3.1/2 Versuchsanordnung und Strahlenverlauf im Schülerexperiment

Krümmt man den Spiegelstreifen durch Druck mit den Fingern im Verlaufe des Versuches immer stärker, kann das Annähern des Brennpunktes an den Spiegel gut beobachtet werden.
Wird der Spiegelstreifen konvex in die Kombination eingeklemmt, beobachtet man die Divergenz der Lichtspuren nach der Reflexion.
Die Lage des Spiegels und des Brennpunktes sowie der Verlauf der Lichtspuren können in allen Versuchen mit Bleistift markiert und nachgezogen werden, so daß sich anschließend auch Brennweiten ausmessen lassen.

Bemerkung

Bei Verwendung des vollen Lichtbündels ist die Katakaustik gut zu beobachten (Abb. 2.3.1./2), sie wird noch deutlicher bei leicht divergentem Licht, wenn die gesamte Öffnung des Spiegelstreifens genutzt wird.

2.3.2. Demonstration der Reflexion von Parallel-, Brennpunkt-, Mittelpunkt- und Scheitelstrahlen am Hohl- bzw. Wölbspiegel ◑

1. Manipermtafel
2. Haftleuchte
3. biegsamer Spiegelstreifen

Methodische Hinweise

1. In Vorbereitung der Konstruktion von Bildern an gewölbten Spiegeln kommt dem Versuch zur Untersuchung des Verlaufs der ausgezeichneten Strahlen große Bedeutung zu.
2. Der Versuch ist geeignet, den Satz von der Umkehrbarkeit des Lichtweges abzuleiten oder erneut zu bestätigen.
3. Ein direkter Vergleich mit den Ergebnissen des V 3.1.5. ist möglich.

Versuch

Nach V 2.3.1. bestimmt man an der Hafttafel mit vorgezeichneter optischer Achse die Lage des Brennpunktes des konkav bzw. konvex gebogenen Spiegelstreifens. Mit Kreide markiert man den Brennpunkt, den Krümmungsmittelpunkt und den Scheitelpunkt.
Dann richtet man als Parallelstrahl die Lichtspur einer Haftleuchte auf den Spiegelstreifen und stellt fest, daß der Strahl durch den Brennpunkt reflektiert wird (Abb. 2.3.2./1a).

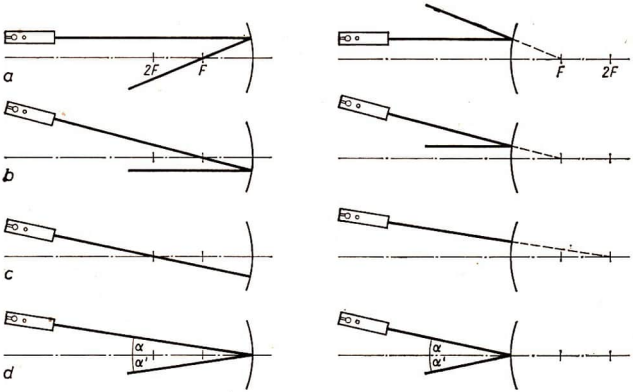


Abb. 2.3.2./1 Strahlenverlauf bei der Demonstration der Reflexion von Parallel- (a), Brennpunkt- (b), Mittelpunkt- (c) und Scheitelstrahlen (d)

Ein Brennpunktstrahl wird parallel zur optischen Achse reflektiert (Abb. 2.3.2./1b).
In gleicher Weise zeigt man, daß ein Mittelpunktstrahl in sich selbst reflektiert wird und ein Scheitelstrahl vor und nach der Reflexion gleiche Winkel mit der optischen Achse bildet (Abb. 2.3.2./1c und d).

Bemerkung

Der Versuch wird als Schülerexperiment zum Nachweis der Reflexion von Parallel-, Brennpunkt-, Mittelpunkt- und Scheitelstrahlen am Hohl- und Wölbspiegel analog zum Lehrerexperiment durchgeführt. Markante Punkte werden auf der weißen Unterlage mit Bleistift gekennzeichnet. Die Heftleuchte wird mit der Einspaltblende verwendet.

2.3.3. Demonstration des Strahlenverlaufes bei der Abbildung eines Punktes mit Hilfe eines Hohl- bzw. Wölbspiegels ◑

1. Manipermtafel
2. 2 Haftleuchten
3. kleine Haftleuchte
4. biegsamer Spiegelstreifen

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 2.0.3.!
2. Bei der Vorführung des Versuches sollte nicht versäumt werden, den Schülern die Entstehung eines reellen oder virtuellen Bildpunktes unter Beteiligung eines vollen Lichtbündels vorzuführen.
3. Der Versuch soll als Vorstufe für die Abbildung eines ausgedehnten Gegenstandes durch einen Hohl- bzw. Wölbspiegel dienen.

Versuch

Auf der Hafttafel mit vorgezeichneter optischer Achse wird der biegsame Spiegelstreifen konkavgekrümmt befestigt. Nach V 2.3.1. bestimmt man die Lage des Brennpunktes. Brennpunkt und Krümmungsmittelpunkt werden markiert.
Parallel zur optischen Achse richtet man die Lichtspur einer Haftleuchte auf den Spiegel. Der reflektierte Strahl muß bei richtiger Justierung durch den Brennpunkt gehen.
Die Lichtspur einer zweiten Haftleuchte richtet man so ein, daß sie den Parallelstrahl außerhalb der doppelten Brennweite schneidet und über den Brennpunkt dann auf den Spiegel trifft. Die reflektierten Strahlen schneiden einander zwischen einfacher und doppelter Brennweite. Bildpunkt und Gegenstandspunkt werden markiert (Abb. 2.3.3./1a).
Danach ändert man die Richtung der Lichtspur der zweiten Haftleuchte, daß der Schnittpunkt mit dem Parallelstrahl zwischen einfacher und doppelter Brennweite liegt und die Spur als Brennpunktstrahl auf den Spiegel trifft (Abb. 2.3.3./1b). Bild- und Gegenstandspunkt werden ebenfalls markiert. Schließlich verändert man die Lichtspur der zweiten Haftleuchte so, daß der Schnittpunkt mit dem Parallelstrahl innerhalb der einfachen Brennweite liegt und die Spur den Spiegel als Scheitelstrahl trifft (Abb. 2.3.3./1c). Zur Konstruktion des Bildpunktes sind die reflektierten Lichtspuren rückwärts zu verlängern.

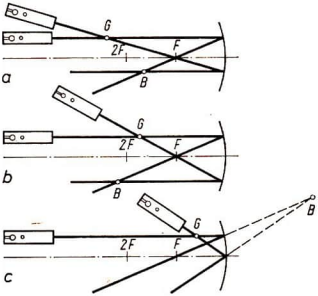


Abb. 2.3.3./1 Strahlenverlauf bei der reellen (a, b) und virtuellen (c) Abbildung eines Punktes mit Hilfe eines Hohlspiegels

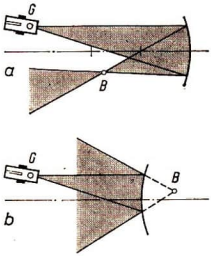


Abb. 2.3.3./2 Strahlenverlauf bei der Abbildung eines Punktes durch einen Hohlspiegel (a) bzw. einen Wölbspiegel (b)

Will man das ganze an der Abbildung beteiligte Lichtbündel zeigen, ordnet man die kleine Haftleuchte etwas außerhalb der optischen Achse an und richtet ihr divergentes Lichtbündel auf den Hohlspiegel. Das reflektierte Bündel konvergiert im Bildpunkt (Abb. 2.3.3./2a).
In ähnlicher Weise läßt sich auch die Bildentstehung am Wölbspiegel zeigen (Abb. 2.3.3./2b).

Bemerkung

Im Schülerexperiment verwendet man die Heftleuchte ohne Kondensor und richtet das divergente Lichtbündel auf den konkav oder konvex in die Spiegelkombination eingesetzten Spiegelstreifen. Die Bündelgrenzen vor und nach der Reflexion werden mit Bleistift nachgezogen und somit Gegenstands- und Bildpunkt ermittelt.

2.3.4. Erzeugung reeller Bilder mit Hilfe eines Hohlspiegels ●

Zu Variante a

1. Sechskantschiene (1 m)
2. 2 große Klemmreiter
3. kleiner Klemmreiter
4. Blendscheibe mit Hohlspiegel
5. halbe Blendscheibe mit 3 Lämpchen ⓢ (siehe 1.3.1.) oder Prismentisch mit Kerze
6. transparenter Schirm
7. Irisblende
8. Meßleiste (1 m)
9. 3 Meßleistenhalter mit Markierungsreitern

Zu Variante b

10. 2 Optikleuchten
11. großer Hohlspiegel (notfalls Gerät 4.)
12. farbige Weihnachtsbaumkugel

Methodischer Hinweis

Die Versuche zeigen sehr eindrucksvoll die reellen Bilder am Hohlspiegel. Variante b liefert plastische Bilder, die im Raum zu schweben scheinen. Der überzeugende Eindruck wiegt den Nachteil der subjektiven Betrachtung weitgehend auf.

Variante a

Am Ende einer langen optischen Bank wird der Hohlspiegel auf einem Klemmreiter befestigt. Die Blendscheibe mit den drei unsymmetrisch montierten farbigen Lämpchen wird so auf den Reiter aufgesteckt, daß die Lämpchen einseitig außerhalb der optischen Achse stehen. Der auf dem kleinen Reiter montierte Schirm wird ebenfalls unsymmetrisch, aber zur anderen Seite hin eingespannt (Abb. 2.3.4./1).

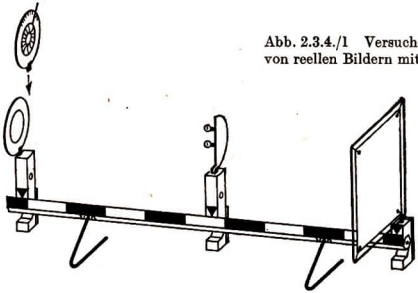
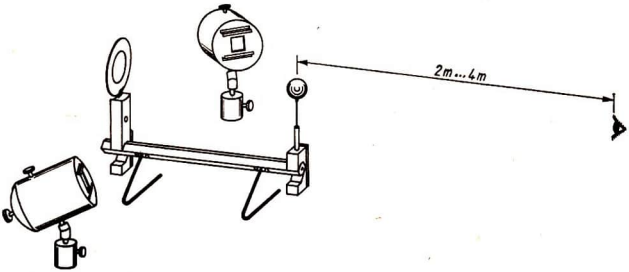


Abb. 2.3.4./1 Versuchsanordnung zur Erzeugung von reellen Bildern mit Hilfe eines Hohlspiegels

Durch Verschieben der Lämpchen und/oder des Schirmes kann man verkleinerte, nahezu gleich große und vergrößerte, reelle, umgekehrte Bilder des Objektes erzeugen. Größe, Lage und Art der Bilder in bezug auf den Gegenstand können gemessen und in einer Tabelle zusammengefaßt werden.
Sollte sich der sphärische Fehler des Spiegels wegen der Reflexion schiefer Bündel sehr stark bemerkbar machen, bringt man direkt vor den Spiegel eine Irisblende und blendet den Spiegel soweit ab, bis sich die Qualität der Abbildung verbessert hat. Leider nimmt dabei die Helligkeit des Bildes stark ab.
Der Versuch gelingt auch, wenn man anstelle der 3 Lämpchen als Objekt eine Kerze verwendet.

Variante b

Vor einem möglichst in Augenhöhe des Betrachters aufgestellten großen Hohlspiegel wird etwa in dessen doppelter Brennweite ein plastisches, farbiges Objekt (etwa



2.3.4./2 Versuchsanordnung zur subjektiven Beobachtung scheinbar im Raum schwebender reeller, mit einem Hohlspiegel erzeugter Bilder

eine farbige Weihnachtsbaumkugel) aufgestellt. Das Objekt wird von zwei seitlich unterhalb des Hohlspiegels stehenden Lichtquellen beleuchtet (Abb. 2.3.4./2). Blickt man aus einer Entfernung von 2 m ... 4 m in den Hohlspiegel, so sieht man das reelle Bild des beleuchteten Gegenstandes im Raum schweben. Bewegt man den Gegenstand ein Stück auf den Hohlspiegel zu, so vergrößert sich das reelle Bild und wandert vom Spiegel weg. Entfernt man den Gegenstand vom Hohlspiegel über die doppelte Brennweite hinaus, so verkleinert sich das reelle Bild und wandert auf den Spiegel zu.

2.3.5. Bestätigung der Abbildungsgleichung und der Gleichung für den Abbildungsmaßstab bei der Bilderzeugung mit Hilfe eines Hohlspiegels ●

Geräte wie bei V 2.3.4., Variante a

Methodischer Hinweis

Die im Versuch gemeinsam aufgeführten Meßwerte von Gegenstands- und Bildweite sowie von Gegenstands- und Bildgröße können natürlich auch in getrennten Meßreihen ermittelt werden. Man kann auch eine der beiden Meßreihen fortlassen.

Versuch

Der Aufbau der Versuchsanordnung erfolgt wie im V 2.3.4., Variante a, beschrieben. An den Klemmreitern werden die Meßleistenhalter magnetisch befestigt. Die Meßleiste wird eingeklemmt. Die genaue Lage des Objektes, des Spiegels und des Schirmes werden durch Markierungsreiter gekennzeichnet.
Für mehrere unterschiedliche Stellungen des Objektes zwischen der einfachen und doppelten Brennweite und außerhalb der doppelten Brennweite werden jeweils Gegenstands- und Bildweite sowie Gegenstands- und Bildgröße gemessen und nach dem beigefügten Muster in eine Tabelle eingetragen.

In Auswertung der Ergebnisse bestätigt man die Abbildungsgleichung $\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$ bzw. die Gleichung für den Abbildungsmaßstab $\frac{y}{y'} = \frac{s}{s'}$.

Beispiel einer Meßreihe

Gegenstandsweite s in m	Bildweite s' in m	Gegenstandsgröße y in m	Bildgröße y' in m	$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$ in m^{-1}	Brennweite f in m	$\frac{s}{s'}$	$\frac{y}{y'}$
0,75	0,29	0,04	0,015	4,8	0,21	2,60	2,70
0,60	0,32	0,04	0,022	4,8	0,21	1,90	1,80
0,50	0,36	0,04	0,029	4,8	0,21	1,40	1,40
0,40	0,44	0,04	0,044	4,8	0,21	0,91	0,91
0,35	0,52	0,04	0,058	4,8	0,21	0,67	0,69
0,30	0,65	0,04	0,088	4,9	0,20	0,46	0,45
0,28	0,88	0,04	0,122	4,7	0,21	0,32	0,33

Bemerkung

Zur Scharfeinstellung empfiehlt es sich, über den Spiegel einen schmalen Pappstreifen zu hängen. Auf dem Schirm beobachtet man dann zwei Bilder nebeneinander, die sich bei Scharfeinstellung genau decken.

2.3.6. Beobachtung von virtuellen Bildern am Hohl- bzw. Wölbspiegel

1. Großes Uhrglas (⌀ 150 mm ... 200 mm)
2. großer Kork mit Schlitz ⑧
3. 2 Kerzenstümpfe (ein großer dicker von einer Haushaltskerze und ein kleiner dünner von einer Spielzeugkerze)
4. Meßstab oder Lineal

Methodischer Hinweis

Die Beobachtung von virtuellen Spiegelbildern an gewölbten Flächen unter Verwendung von unversilberten (oder nur durchlässig versilberten) Uhrgläsern erlaubt wie im V 2.2.4. das Aufsuchen des Ortes der Bildentstehung und somit auch die Messung der Bildweite. Wenn sich auch virtuelle Bilder naturgemäß nicht objektiv festhalten lassen, so ist dieser Versuch doch als Schülerexperiment sehr zu empfehlen. Er erleichtert den Schülern das Verstehen des Zustandekommens eines virtuellen Bildes.

Versuch

Man stellt das Uhrglas, mit der konkaven Seite dem Beschauer zugewendet, mittels eines geschlitzten Korkens lotrecht auf den Tisch. Davor stellt man innerhalb der einfachen Brennweite, nicht weit vom Uhrglas entfernt, die kleine Kerze auf. Hinter das Uhrglas stellt man die große Kerze und verschiebt sie so weit,

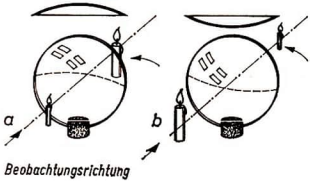


Abb. 2.3.6./1
Versuchsanordnung zur Beobachtung von virtuellen Bildern am Hohlspiegel (a) und am Wölbspiegel (b)

bis sie sich mit dem virtuellen, vergrößerten Bild der kleinen Kerze zu decken scheint (Abb. 2.3.6./1a). Durch Abmessen der Entfernung vom Uhrglas ermittelt man die Stellung der Kerze, bei der sie in bezug auf Größe und Dicke einigermaßen mit dem Bild übereinstimmt. Wird die konvexe Seite des Uhrglases zum Beschauer hin gerichtet, so verwendet man die große Kerze als Gegenstand, während man die kleine mit dem virtuellen Bild zur Deckung bringt (Abb. 2.3.6./1b).
Mißt man die Werte für die Gegenstands- und die Bildweite und setzt sie in die Abbildungsgleichung ein, erhält man, innerhalb der Fehlergrenzen, einen nahezu konstanten Wert.

Bemerkung

Das Beobachten kann dadurch erleichtert werden, wenn man das Uhrglas halbdurchlässig versilbert. Siehe dazu 1.3.5.!

2.3.7. Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Autoscheinwerfers ●

1. Autoscheinwerfer (Reflektor mit abnehmbarem Scheinwerferglas) Ⓢ (siehe 1.3.1.)
2. Zweifadenlampe (für Fern- und Abblendlicht), 6 V bzw. 12 V

Methodische Hinweise

1. Der Versuch erlaubt die schrittweise Demonstration der Bündelung des Lichtes mit einem Parabolspiegel und des Zusammenwirkens von Reflektor und Scheinwerferglas, das zur Erzeugung der asymmetrischen Beleuchtung die Wirkung einer Zonenlinse hat.
2. Der Versuch ist auf die Anwendung orientiert. Da sowohl Reflexion als auch Brechung die Lichtbündelung und Lichtverteilung bewirken, eignet er sich auch zur vertiefenden Wiederholung im Physikunterricht.

Versuch

Mit Stativmaterial wird der Reflektor mit der eingesetzten Zweifadenlampe lotrecht aufgestellt und auf eine 2 m bis 3 m entfernte Wandtafel gerichtet (Abb. 2.3.7./1).
Nach Einschalten des Fernlichtfadens der Lampe beobachtet man auf der Tafel einen kreisförmigen, hellen Lichtfleck, den man mit Kreide nachzeichnen kann (Abb. 2.3.7./1, Nebenbild). Brennt hingegen der Abblendfaden, wird das Licht

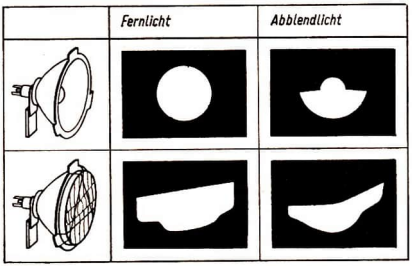


Abb. 2.3.7./1 Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Autoscheinwerfers. Lichtflecke auf der Wandtafel bei unterschiedlichen Versuchsbedingungen

im wesentlichen in der unteren Hälfte des markierten Lichtflecks konzentriert (Abb. 2.3.7./1, Nebenbild).
Beide Teilversuche wiederholt man bei vorgesetztem Scheinwerferglas, das beispielsweise durch Paketgummis in der vorgeschriebenen Lage gehalten wird. Die Lichtflecke an der Tafel erscheinen stark verbreitert und asymmetrisch verzerrt. Die Grundhelligkeit hat durch das Vorsetzen des Scheinwerferglases zugenommen (Abb. 2.3.7./1, Nebenbilder unten).

2.4. Brechung und Totalreflexion des Lichtes

2.4.1. Freihandversuche zur Demonstration der Brechung des Lichtes

Zu Variante a

1. Glas- oder Kunststoffbecher oder Becherglas
2. Trinkröhrchen

Zu Variante b

3. Tageslichtschreibprojektor
4. Pappmaske mit zwei kreisförmigen Öffnungen Ⓢ (siehe 1.3.3.)
5. 2 gleichartige, durchsichtige Tröge (z. B. Kühlschrankboxen)

Zu Variante c [SE]

6. 2 gleichartige Gefäße, auch Küvetten
7. 2 Münzen

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 2.0.4.!
2. Die Varianten a und c eignen sich zur Einführung und Motivation in den Themenkreis der Brechung. Eine Erklärung der beobachteten Erscheinungen ist jedoch erst nach abgeschlossener Behandlung der Brechung möglich.

3. Von den Varianten b und c zur scheinbaren Hebung eines Gegenstandes im Wasser ist Variante b für die Erklärung der beobachteten Erscheinung günstiger. Sie läßt sich dann unter Hinweis auf die von der scheinbar gehobenen leuchtenden Fläche ausgehenden Strahlenbündel verständlicher erklären und besser verfolgen. Die Variante c ist auch als Hausexperiment durchführbar.
4. Alle Varianten des Experimentes eignen sich zur Problemstellung im Unterricht.

Variante a: Versuch mit Trinkhalm und Glas

In ein mit Wasser gefülltes Glas stellt man schräg einen Trinkhalm. Blickt man seitlich von oben in den Becher, erscheint der Halm an der Eintauchstelle abgeknickt (Abb. 2.4.1./1).

Abb. 2.4.1./1 Scheinbare Knickung eines Stabes im Wasserglas

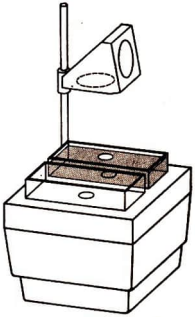


Abb. 2.4.1./2 Versuchsanordnung zur scheinbaren Hebung einer beleuchteten Kreisblende im Wasser

Variante b: Versuch mit zwei Trögen

Auf die Projektionsfläche eines Tageslichtschreibprojektors wird eine Pappmaske mit zwei kreisförmigen Öffnungen gelegt und scharf auf der Projektionswand abgebildet. Auf die Öffnungen wird je ein Trog gestellt, einer davon mit Wasser gefüllt (Abb. 2.4.1./2). Das Projektionsbild bleibt unverändert.
Blickt man jedoch schräg auf die beiden Glaströge, erscheint die leuchtende Öffnung im wassergefüllten Trog gegenüber der anderen gehoben und verschoben.

Variante c: Versuch mit Schalen und Münzen

In zwei gleichartige Gefäße (Topf, Kühlschrankbox, Trinkbecher oder Küvette aus dem SEG usw.) legt man zwei gleichartige Münzen an den hinteren Rand. Gießt man in eines der beiden Gefäße Wasser ein, kann man beobachten, wie die Münze im Behälter mit Wasser scheinbar gehoben wird. Mit zunehmender Flüssigkeitshöhe wird die Erscheinung immer deutlicher.

2.4.2. Demonstration der Brechung des Lichtes beim Übergang von einem lichtdurchlässigen Stoff in einen anderen ◑

Zu Variante a

1. Haftleuchte
2. Glastrog (Aquarium)
3. weißlackiertes Eisenblech, 1 mm (250 mm × 500 mm) ⓢ passend zu 2.
4. Färbemittel (Fluoreszein oder Lebensmittelfarbe)
5. ebener Spiegel (50 mm × 50 mm) oder Taschenspiegel ⓢ (siehe 1.3.1.)

Zu Variante b

Gerät 1., außerdem

6. Manipermtafel
7. Glaskörper, planparallel
8. Blende

Methodischer Hinweis

Die Versuche dienen neben den im V 2.4.1. beschriebenen noch zur Einführung der Schüler in das Stoffgebiet der Brechung des Lichtes. Sie zeigen anschaulich den Strahlenverlauf des Lichtes beim Übergang von einem lichtdurchlässigen Stoff in einen anderen und bereiten die Versuche zur Herleitung bzw. Bestätigung des Brechungsgesetzes vor.

Variante a

In den mit leicht gefärbtem Wasser gefüllten Trog wird die Eisenblechtafel hochkant gestellt und mit Hilfe von Stativmaterial gehalten. Die Lichtspur einer an der Blechtafel befestigten Haftleuchte wird schräg auf die Wasseroberfläche gerichtet. Man beobachtet eine Richtungsänderung der Lichtspur an der Grenze zwischen Luft und Wasser (Abb. 2.4.2./1a). Durch Versetzen der Haftleuchte kann der Lichteinfall verändert werden.
Zur Demonstration des Überganges des Lichtes vom optisch dichten in ein optisch dünnes Medium legt man unter die Blechtafel im Trog einen kleinen ebenen Spiegel

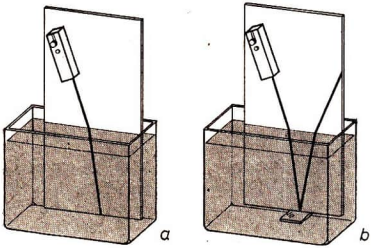


Abb. 2.4.2./1
Versuchsanordnung zur Demonstration des Strahlenverlaufes beim Übergang einer Lichtspur von Luft in Wasser (a) und nach Reflektion auf der Bodenfläche wieder zurück von Wasser in Luft (b)

und richtet den Strahlengang so ein, daß die Lichtspur auf den Spiegel trifft, reflektiert wird und wieder vom Wasser in die Luft austritt (Abb. 2.4.2./1b).

Variante b

An der Hafttafel wird der planparallele Glaskörper mit seiner Längskante in waagerechter Richtung befestigt. Die Lichtspur einer Haftleuchte richtet man schräg gegen die obere Glasfläche. Man beobachtet die Richtungsänderung der Lichtspur an der Grenzfläche Luft—Glas. Mit Hilfe einer magnetisch haftenden

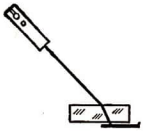


Abb. 2.4.2./2 Zur Demonstration der Lichtbrechung beim Übergang von Luft in Glas

Blende wird der Lichtaustritt aus der unteren Glasfläche verhindert. Der Einfallswinkel ist in großen Grenzen veränderlich (Abb. 2.4.2./2).

Bemerkung

Analog zu Variante b kann ein Schülerexperiment mit den Mitteln der Heftoptik gestaltet werden.

2.4.3. Herleitung bzw. Bestätigung des Brechungsgesetzes

Zu Variante a ◑

1. Manipermtafel
2. Haftleuchte
3. Linsenkörper, halbrund
4. Papierscheibe mit Winkelteilung
5. Manipermkerne

Zu Variante b [SE] ◑

6. Heftleuchte
7. Einspaltblende
8. Flachglaskörper, halbrund
9. Kreisscheibe mit Winkelteilung
10. weiße Unterlage

Zu Variante c [SE] ◑

11. weites Becherglas (500 ml) oder große, runde, dünnwandige Glasflasche
12. Klebefilm
13. Transparentpapier
14. schwarzes Papier
15. Kerze

} Ⓢ (Abb. 1.3.4./2)

Methodischer Hinweis

Die Varianten a und b sind zum synchronen Experimentieren von Lehrer und Schülern geeignet. Sie können auch unabhängig voneinander durchgeführt werden.

Die Variante c ist wegen ihrer Einfachheit und der geringen erforderlichen Mittel auch als Hausexperiment geeignet, setzt aber die Kenntnis des Satzes über den Peripherie- und Zentriwinkel voraus.

Variante a

An der Hafttafel wird mit Manipermkernen die Papierscheibe mit der aufgedruckten Winkelteilung so befestigt, daß die Verbindungslinie der 90°-Markierungen waagerecht liegt. In der unteren Hälfte der Scheibe wird der halbrunde Linsenkörper so angebracht, daß er zentriert ist. Die Lichtspur einer Haftleuchte wird auf die ebene Fläche des Linsenkörpers gerichtet, daß sie ihn genau im Mittelpunkt der Winkelteilung trifft. Die in den Körper eintretende Lichtspur wird gebrochen. Beim Austritt trifft der Strahl auf die Halbrundfläche stets senkrecht auf, so daß keine weitere Richtungsänderung erfolgt (Abb. 2.4.3./1a).

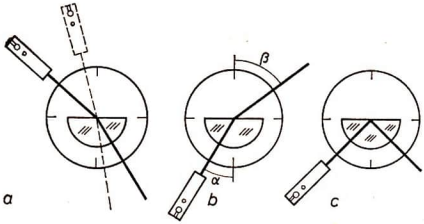


Abb. 2.4.3./1
Versuchsanordnung zur Haft- und Heftoptik zum Nachweis des Brechungsgesetzes mit einem Halbrundkörper beim Übergang von Luft in Glas (a) und von Glas in Luft (b) sowie der Totalreflexion nach Überschreiten des Grenzwinkels (c)

Man mißt den Einfallswinkel α und den Brechungswinkel β und faßt die Werte in einer Tabelle zusammen. Der Versuch wird mehrfach mit verändertem Einfallswinkel wiederholt. Schließlich zeigt man die beiden Grenzfälle für $\alpha = 0°$ und $\alpha = 90°$.
Nunmehr befestigt man die Haftleuchte unterhalb der Winkelteilung und läßt die Lichtspur an der Halbrundfläche eintreten (Abb. 2.4.3./1b). Dabei erfolgt keine Brechung. Erst wenn der Lichtstrahl aus dem Linsenkörper an der ebenen Fläche wieder austritt, tritt Brechung auf. Man mißt wiederum Einfalls- und Brechungswinkel und trägt die Werte in eine Tabelle ein. Wiederholt man den Versuch mit zunehmendem Einfallswinkel, so überschreitet man schließlich den Grenzwinkel, bei dem keine Brechung, sondern nur noch Totalreflexion stattfindet (Abb. 2.4.3./1c). Der Grenzwinkel der Totalreflexion kann ermittelt werden.

Variante b

Die Lichtspur einer Heftleuchte mit Einspaltblende wird genau über den Mittelpunkt der Winkelteilung auf der Kreisscheibe geführt. In den vorgezeichneten Raum legt man den Flachglaskörper. Durch Drehen der Scheibe mit dem aufgelegten Flachglaskörper kann man die Einfallswinkel beliebig variieren, man muß nur stets kontrollieren, daß der einfallende Strahl auch genau über den Mittelpunkt verläuft.
Die Versuchsdurchführung gestaltet sich dann genau so wie bei Variante a.

Beispiel einer Meßreihe

Übergang	Einfallswinkel α in Grad	Brechungswinkel β in Grad	$\sin \alpha$	$\sin \beta$	$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$
von Luft in Glas	10	7	0,174	0,122	1,43*
	20	13	0,342	0,225	1,52
	30	20	0,500	0,342	1,46
	40	25	0,643	0,423	1,52
	50	31	0,766	0,515	1,49
	60	35	0,866	0,574	1,51
	70	38	0,940	0,616	1,53
	80	41	0,985	0,656	1,50
von Glas in Luft	10	15	0,174	0,259	0,67
	20	31	0,342	0,515	0,66
	30	50	0,500	0,766	0,65
	40	78	0,643	0,978	0,66
	42	90	0,669	1,000	0,67
	Totalreflexion				

* Die Quotienten sind in der zweiten Stelle nach dem Komma fehlerhaft, weil die Brechungswinkel β auf volle Grad gerundet sind.

Damit ergibt sich als Mittelwert für die Brechungszahl des Glases $n \approx 1{,}5$.

Variante c

Das Becherglas oder die Flasche wird mit einem Gürtel umgeben, der zur Hälfte aus schwarzem Papier und zur anderen Hälfte aus Transparentpapier besteht. Das schwarze Papier erhält in der Mitte einen etwa 1 mm breiten lotrechten Spalt. Auf das Transparentpapier wird von der Mitte aus beidseitig eine dem Durch-

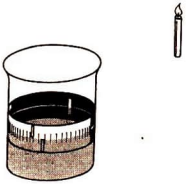


Abb. 2.4.3./2 Versuchsanordnung zur Ermittlung des Brechungsgesetzes unter Verwendung eines Becherglases

messer des Gefäßes angepaßte Gradteilung von 0° bis 90° angebracht. Der Gürtel wird mit Klebefilm um das Becherglas oder die Flasche geklebt, wobei man darauf achtet, daß Spalt und 0°-Markierung der Teilung einander genau gegenüberstehen (vergleiche 1.3.4. und Abbildung 1.3.4./2).
Das Becherglas oder die Flasche wird so weit mit Wasser gefüllt, daß der Wasserspiegel die Gradteilung halbiert. Vor das Becherglas oder die Flasche bringt man eine Kerze. Man beobachtet das Spaltbild auf der Transparentteilung und liest die unterschiedlichen Winkel oberhalb und unterhalb des Wasserspiegels ab

(Abb. 2.4.3./2). Die gemessenen Werte stellen Zentriwinkel dar; ihre entsprechenden Peripheriewinkel und damit der Einfalls- und Brechungswinkel sind jeweils halb so groß.
Dreht man das Becherglas ein wenig, ändern sich beide Winkel.
Man kann die jeweils zusammengehörigen Werte in einer Tabelle zusammenfassen und das Brechungsgesetz bestätigen.

2.4.4. Demonstration der Totalreflexion des Lichtes ●

Zu Variante a ●

1. Sechskantschiene (0,5 m)
2. Optikleuchte (mit Glühpunktlampe)
3. 3 große Klemmreiter
4. 2 Blendscheiben mit Linse ($f = +120$ mm)
5. Blendscheibe mit Glashaken (poliert)
6. Blendscheibe mit Glashaken (mattiert, aufgerauht)
7. Diarähmchen mit Transparentpapier Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Zu Variante b ●

Geräte 1. bis 4., außerdem

8. kleiner Klemmreiter
9. Glasflasche mit Seitentubus
10. Glastrog (Aquarium)
11. Wasserschlauch

Zu Variante c [SE]

12. weites Becherglas
13. Reagenzglas
14. schwarze Unterlage

Methodische Hinweise

1. Während die Varianten a und b für objektive Beobachtung vorgesehen sind, kann die Beobachtung der Variante c subjektiv erfolgen.
2. Die Variante c ist so einfach, daß sie beispielsweise unter Verwendung eines Trinkglases und eines Tablettenröhrchens auch als Hausexperiment durchgeführt werden kann.

Variante a

Auf der kleinen optischen Bank werden Optikleuchte, Doppelkondensor und Blendscheibe mit Glashaken so aufgebaut, daß auf der Schnittfläche des am Ende der Bank stehenden Glashakens die Glühwendel der Lichtquelle durch den Doppelkondensor scharf abgebildet wird (Abb. 2.4.4./1). Im verdunkelten Raum erkennt man, daß das in den Glasstab eintretende Licht allen Biegungen des Stabes

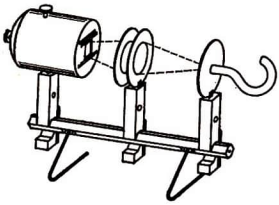


Abb. 2.4.4./1 Versuchsanordnung zur Demonstration der Totalreflexion des Lichtes in einem Glashaken

infolge fortgesetzter Totalreflexion folgt und nur am Ende des Stabes in die Luft austritt. Dies zeigt man, indem man schräg vor das Ende des Stabes einen kleinen transparenten Schirm hält.
Als Gegensatz zu dieser Erscheinung wird der gleiche Versuch mit einem gebogenen Glashaken mit mattierter Oberfläche durchgeführt. Der Stab leuchtet im ersten Teil hell, weil er infolge der Mattierung der Oberfläche das Licht nach allen Seiten streut. Das Ende des Stabes ist dunkel.

Variante b

Der Versuchsaufbau ist ähnlich wie bei der Variante a. Anstelle des Glashakens ist jedoch mit Hilfe von Stativmaterial eine Glasflasche mit Seitentubus so aufgestellt worden, daß der Konvergenzpunkt des vom Kondensor kommenden Lichtbündels genau in der Ausflußöffnung liegt (Abb. 2.4.4./2). Man füllt das Gefäß mit Wasser und läßt das Wasser in einen Trog fließen. Über einen Schlauch läßt man ständig die Menge Wasser nachfließen, die durch die Öffnung abfließt. Schaltet man die Lichtquelle ein, so glänzt der Wasserstrahl im verdunkelten Zimmer hell und leuchtet besonders dort auf, wo die Strömung turbulent wird und die Aufspaltung in Tröpfchen eintritt.

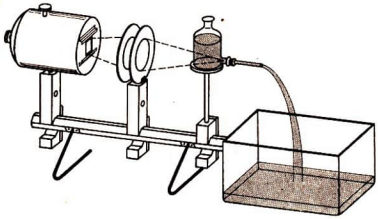


Abb. 2.4.4./2 Versuchsanordnung zur Demonstration der Totalreflexion des Lichtes in einem Wasserstrahl

Fängt man den Strahl mit einem Becherglas auf, unter dessen Boden ein Stück weißes Papier gehalten wird, dann erscheint die Stelle, an der der Strahl auftrifft, hell erleuchtet.
Einen sehr schönen Effekt erzielt man auch, wenn man das Wasser durch etwas Milch trübt.

Abb. 2.4.4./3 Beobachtung der Totalreflexion des Lichtes bei einem in Wasser eingetauchten luftgefüllten Reagenzglas

Variante c

In ein auf einer schwarzen Unterlage stehendes wassergefülltes Becherglas wird schräg ein Reagenzglas gehalten. Blickt man von oben in das Becherglas, so erscheint wegen der Totalreflexion das luftgefüllte Reagenzglas hellglänzend (Abb. 2.4.4./3).

2.4.5. Demonstration der Wirkungsweise eines Lichtleiters ●

1. Sechskantschiene (1 m)
2. Optikleuchte
3. 5 große Klemmreiter
4. 2 Blendscheiben mit Linse ($f = +120$ mm)
5. Blendscheibe mit Linse ($f = +50$ mm)
6. Blendscheibe mit Schiebeschacht
7. Lichtleiter mit Blendscheiben Ⓢ (siehe 1.3.1.)
8. Diarähmchen mit Transparentpapier Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Methodischer Hinweis

Die Demonstration der Lichtleitung mit Hilfe eines Faserbündels eröffnet gute Möglichkeiten zur Wiederholung der Kenntnisse über die Totalreflexion und erlaubt Hinweise über die technische Anwendung in der Medizin, in der Technik und im Militärwesen.

Versuch

Auf der optischen Bank werden die Optikleuchte und der Dreifachkondensor (aus den beiden Sammellinsen mit je 120 mm Brennweite und der dritten Linse von 50 mm Brennweite) aufgebaut. Eine Blendscheibe mit Schiebeschacht wird so längs der optischen Achse verschoben, daß der Konvergenzpunkt des Licht-

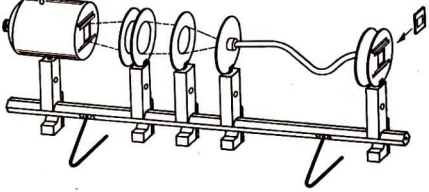


Abb. 2.4.5./1 Versuchsanordnung zur Demonstration der Wirkungsweise eines Lichtleiters

bündels in der Ebene der Blendscheibe liegt. Zur Einstellhilfe kann man Transparentpapier benutzen. Der Lichtleiter, den man als Meterware gekauft oder aus einem Bündel von 30 bis 50 Stücken Kunststoffangelschnur nach 1.3.1. selbst hergestellt hat (Abb. 1.3.1./15), wird mit den Blendscheiben auf zwei großen Klemmreitern befestigt (Abb. 2.4.5./1). Erforderlichenfalls muß die Lampe nachjustiert werden, so daß der Lichtleiter genau von den konvergenten Strahlen getroffen wird. Dann kann man das Licht durch Verbiegen des Lichtleiters in jede gewünschte Richtung lenken. Einen langen Lichtleiter kann man sogar verknoten.
Die Lichtleitung erkennt man an dem Lichtfleck, der auf einem kleinen transparenten Schirm dicht hinter der Stirnseite des Faserbündels erzeugt wird.

Bemerkung

Bei Verwendung eines geordneten Faserbündels gelingt über den Lichtleiter auch eine Bildübertragung.

2.5. Durchgang des Lichtes durch planparallele Platten und Prismen

2.5.1. Demonstration der Parallelverschiebung des Lichtes an einer planparallelen Platte

Zu Variante a ◑

1. Tageslichtschreibprojektor
2. Pappblende mit breitem Spalt Ⓢ (siehe 1.3.3.)
3. dicke planparallele Glasplatte oder Piacrylstreifen
4. Unterlegklötze, klein

Zu Variante b

5. großer Glastrog (Aquarium, notfalls großes Kühlschrankgefäß)

Methodische Hinweise

1. Es ist für das Verständnis der optischen Vorgänge bei der Parallelverschiebung des Lichtes an einer planparallelen Platte wertvoll, neben einem Versuch zur Demonstration des Strahlenverlaufes (V 2.5.2.) den Schülern einen subjektiven Eindruck von der Verschiebung zu vermitteln.
2. Durch die Verwendung des Tageslichtschreibprojektors kann die Erscheinung der Parallelverschiebung des Lichtes beim Durchgang durch eine planparallele Platte überzeugend vorgeführt werden. Die Projektionsoptik ersetzt dabei etwa das menschliche Auge und macht die Beobachtung gleichzeitig einem großen Schülerkreis sichtbar.

Variante a

Auf die Projektionsfläche wird eine große Pappblende mit dem etwa 5 mm breiten und 150 mm langen, in der Mitte angeordneten Spalt gelegt, der scharf als waagerechter Lichtstreifen auf der Projektionswand erheblich vergrößert abgebildet wird.

Die Mitte des Spaltes deckt man durch die planparallele Glasplatte oder den Piacrylstreifen ab. Am Projektionsbild hat sich bis auf die Markierung der Begrenzung der planparallelen Platte nichts geändert. Hebt man die Glasplatte einseitig an, so ist im Projektionsbild eine um so größere Versetzung der Mitte des Spaltbildes zu beobachten, je stärker die Platte angehoben wird. Durch Unterlegen von Holzklötzchen kann die Platte in der Schräglage fixiert werden.

Variante b

Ein vertikal stehender Stativstab wird durch einen möglichst in Augenhöhe des Beobachters angebrachten, wassergefüllten und schräg zur Beobachtungsrichtung gestellten Trog betrachtet (Abb. 2.5.1./1).

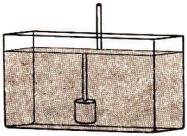


Abb. 2.5.1./1 Versuchsanordnung zur Beobachtung der Parallelverschiebung an einem wassergefüllten Trog

Es empfiehlt sich, die Versuchsanordnung bei der Lehrerdemonstration etwa auf ein Brett zu stellen und dieses langsam auf dem Tisch zu drehen. Dadurch wird für alle Schüler nacheinander die günstigste Blickrichtung hergestellt, ohne daß sie die Plätze verlassen müssen.

2.5.2. Demonstration des Strahlenverlaufes an einer planparallelen Platte ◑

Zu Variante a ◑

1. Manipermtafel
2. Haftleuchte
3. Platte, planparallel

Zu Variante b [SE] ◑

4. Heftleuchte
5. Einspaltblende
6. Flachglaskörper, planparallel, oder Küvette
7. weiße Unterlage

Methodischer Hinweis

Die vorgeschlagenen Varianten lassen Verbindungen zum Mathematikunterricht zu. Nach erfolgter Fixierung des Strahlenverlaufes an der Tafel oder im Heft kann eine Überprüfung durch Parallelverschiebung erfolgen.

Variante a

Längs einer Hafttafel erzeugt man mit einer Haftleuchte eine lange Lichtspur. Senkrecht zur Lichtspur bringt man die planparallele Platte in den Strahlengang. Das Licht verläuft ohne Parallelverschiebung durch die Platte. Wird die Platte gedreht, kann man mit zunehmendem Einfallswinkel eine immer größer werdende

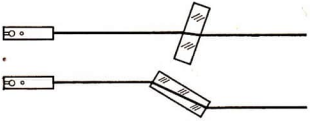


Abb. 2.5.2./1 Versuch zur Demonstration des Strahlenverlaufes bei der Parallelverschiebung des Lichtes an einer planparallelen Platte

Parallelverschiebung des austretenden Lichtbündels erkennen (Abb. 2.5.2./1). Die Lichtspuren können nachgezeichnet und ihre Parallelität kann geprüft werden.

Variante b

Der Versuch wird mit den Mitteln der Schülerexperimentiergeräte analog zur Variante a durchgeführt. Anstelle des planparallelen Flachglaskörpers kann auch eine mit Wasser gefüllte Küvette in den Strahlengang gebracht werden.

2.5.3. Demonstration des Strahlenverlaufes durch ein Prisma

Zu Variante a ◑

1. Manipermtafel
2. 2 Haftleuchten
3. Prismenkörper, 90°
4. Prismenkörper, gleichseitig ⑧ (siehe 1.3.4.)

Zu Variante b [SE] ◑

5. Heftleuchte
6. Einspalt-, Zweispaltblende ⑧ (siehe 1.3.1.)
7. Flachglaskörper, rechtwinklig, gleichschenklig
8. Prisma, gleichseitig
9. Kreisscheibe mit Winkelteilung
10. weiße Unterlage

Zu Variante c [SE]

Geräte 8. und 10., außerdem

11. Holz- bzw. Wellpappunterlage
12. Stecknadeln
13. Zirkel

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 2.0.5.!
2. Es empfiehlt sich, zum besseren Verständnis der zweimaligen Brechung des Lichtes beim Durchgang durch ein Prisma und zur Einstellung auf das Minimum der Ablenkung bei symmetrischem Strahlengang mit dem gleichseitigen Prisma zu arbeiten.

Variante a: Versuch mit Geräten zur Haftoptik

Der gleichseitige Glaskörper wird so an der Hafttafel befestigt, daß seine Basis waagerecht liegt. Die Lichtspur einer Haftleuchte wird auf eine brechende Fläche gerichtet. Die zweimalige Brechung der Lichtspur um die Basis beim Durchgang durch den prismatischen Glaskörper wird beobachtet. Der Versuch gelingt auch bei Verwendung des Prismenkörpers, 90° (Abb. 2.5.3./1a). Eine Änderung des Einfallswinkels durch Versetzen der Haftleuchte führt zu einer Änderung der Lage des zweimal gebrochenen Strahles.
Dreht man bei waagerecht liegender Lichtspur den gleichseitigen Glaskörper langsam um seine eigene Achse, kann man eine Stellung finden, bei der die Ablenkung ein Minimum ist (Abb. 2.5.3./1b).

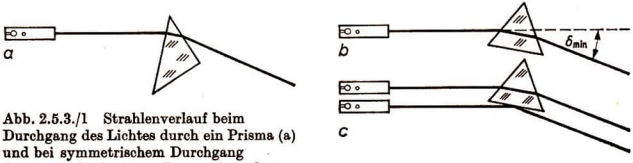


Abb. 2.5.3./1 Strahlenverlauf beim Durchgang des Lichtes durch ein Prisma (a) und bei symmetrischem Durchgang durch ein gleichseitiges Prisma (b und c)

Man zeigt, daß dies bei symmetrischem Strahlengang der Fall ist. Dazu richtet man die Lichtspur einer zweiten Haftleuchte parallel zur ersten auf die Basisfläche des Prismas. Das reflektierte Licht verläuft parallel zum zweimal gebrochenen Lichtbündel (Abb. 2.5.3./1c).
Will man zeigen, daß die Ablenkung außer vom Einfallswinkel auch vom brechenden Winkel des Prismas abhängt, bringt man (nacheinander) das 45°-Prisma und das 60°-Prisma bei gleichem Einfallswinkel von 45° in den Strahlenverlauf der Lichtspur und vergleicht die Ergebnisse miteinander.

Variante b: Versuch mit Geräten zur Heftoptik

Die Variante b kann in gleicher Weise wie die Variante a durchgeführt werden.
Eine mögliche Weiterführung ist die experimentelle Ermittlung der Abhängigkeit des Ablenkungswinkels δ vom Einfallswinkel α. Dazu legt man das 45°- oder das 60°-Prisma mit der brechenden Kante genau auf den Mittelpunkt der Winkelteilung der Kreisscheibe und mit der brechenden Fläche längs der 90°-Markierung. Die Lichtspur der Heftleuchte richtet man so auf die brechende Kante, daß sie

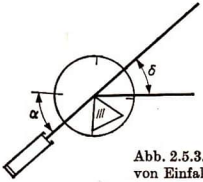


Abb. 2.5.3./2 Versuchsanordnung zur gleichzeitigen Messung von Einfalls- und Ablenkungswinkel

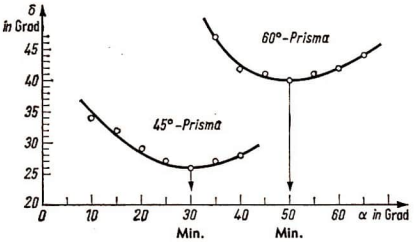


Abb. 2.5.3./3 Grafische Darstellung der Abhängigkeit des Ablenkungswinkels vom Einfallswinkel für ein 45°- und ein 60°-Prisma

zum Teil das Prisma durchsetzt und zum Teil an ihm vorbeistreift (Abb. 2.5.3./2). Dadurch kann man auf der Winkelteilung sofort den Einfallswinkel α und durch Differenzbildung den Ablenkungswinkel δ ermitteln. Gemessene Werte für unterschiedliche Einfallswinkel an beiden Prismen sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt. Gleichzeitig ist die Abhängigkeit der Ablenkung vom Einfallswinkel grafisch dargestellt (Abb. 2.5.3./3).

Beispiel einer Meßreihe

45°-Prisma		60°-Prisma	
Einfallswinkel α in Grad	Ablenkungswinkel δ in Grad	Einfallswinkel α in Grad	Ablenkungswinkel δ in Grad
10	34	35	47
15	32	40	42
20	29	45	41
25	27	50	40←Min.
30	26←Min.	55	41
35	27	60	42
40	28	65	44

Variante c: Stecknadelversuch

Auf die Holz- bzw. Wellpappunterlage wird ein Bogen Zeichenkarton gelegt. Darauf werden die Umrisse des 60°-Prismas gezeichnet. Um die brechende Kante wird ein Kreisbogen geschlagen, der die brechenden Flächen schneidet (Abb.

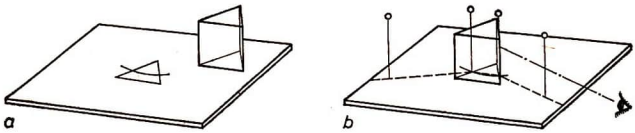


Abb. 2.5.3./4 Versuchsanordnung zur Untersuchung des Strahlenverlaufes am Prisma durch einen Stecknadelversuch.
Zur Festlegung der Einstichpunkte (a); Versuchsdurchführung (b)

2.5.3./4a). Nach Auflegen des Prismas werden in diese Schnittpunkte zwei Stecknadeln eingestochen. Diese werden von beiden Seiten her so anvisiert, daß sie mit einer weiteren, vor dem Prisma eingestochenen Stecknadel in Flucht erscheinen (Abb. 2.5.3./4b).
Nach Entfernen des Prismas verbindet man die Einstichpunkte und die Schnittpunkte mit der Umrißzeichnung zur vollständigen Darstellung des Strahlenverlaufes. Die Verlängerungen des einfallenden und des zweimal gebrochenen Strahles liefern den Ablenkungswinkel δ. Mißt man ihn und den brechenden Winkel $\varkappa$ des Prismas, kann man die Brechungszahl des Prismenglases, da ein symmetrischer Strahlengang vorliegt, mit der Beziehung

$$n = \frac{\sin \frac{\varkappa + \delta}{2}}{\sin \frac{\varkappa}{2}}$$

ermitteln.

2.5.4. Demonstration der Totalreflexion an einem gleichschenklig-rechtwinkligen Prisma ◑

1. Tageslichtschreibprojektor
2. rechtwinklig-gleichschenkliges Glasprisma, möglichst groß
3. Spiegelstück von der Größe der Hypotenusenfläche des Prismas Ⓢ (siehe 1.3.3.)
4. Papphalterung zum Aufstellen des Spiegels Ⓢ (siehe 1.3.3.)

Methodischer Hinweis

Der Versuch gestattet den Vergleich der Totalreflexion an der Hypotenusenfläche eines rechtwinklig-gleichschenkligen Prismas mit der Reflexion am ebenen Spiegel und wirkt dadurch sehr überzeugend.

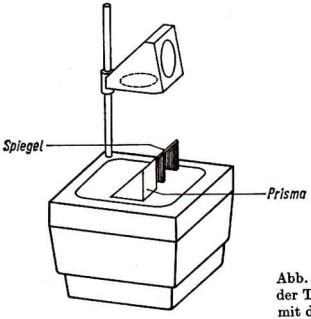


Abb. 2.5.4./1 Versuchsanordnung zum Vergleich der Totalreflexion an einem Prisma mit der Reflexion am ebenen Spiegel

Versuch

Die Projektionsfläche eines Tageslichtschreibprojektors wird scharf auf der Projektionswand abgebildet. Nunmehr werden nacheinander ein rechtwinklig-gleichschenkliges Glasprisma mit einer Kathetenfläche und ein mit einer Papphalterung um 45° geneigter Spiegel auf die Projektionsfläche des Tageslichtschreibprojektors gelegt (Abb. 2.5.4./1). Das von der Hypotenusenfläche des Prismas und das vom Spiegel reflektierte Licht erscheint jeweils als Lichtfleck unter dem Projektionsbild, in dem Prisma und Spiegel als dunkle Flecken scharf abgebildet werden.

Bemerkung

Legt man vorher auf die Projektionsfläche des Tageslichtschreibprojektors eine durchsichtige Folie, so kann man sie mit Hinweisen zum Versuch beschriften oder den Strahlenverlauf skizzieren.

2.5.5. Demonstration des Strahlenverlaufes bei der Totalreflexion am gleichschenklig-rechtwinkligen Prisma ◑

1. Manipermtafel
2. 2 Haftleuchten
3. Prisma, 90°
4. Farbfilter

Methodischer Hinweis

Da in den Versuchen zur Demonstration des Strahlenverlaufes bei der Totalreflexion am Prisma nicht nur die Ablenkung, sondern auch die Lage der Strahlen zueinander, z.B. für die Anwendung als Umkehrprisma, von Bedeutung ist, empfiehlt es sich, eine der beiden Lichtspuren leicht zu färben.

Versuch

Mit zwei Haftleuchten erzeugt man zwei parallele Lichtspuren. Durch Einbringen des Farbfilters kann eine der beiden Spuren gefärbt werden. Die Lichtspuren

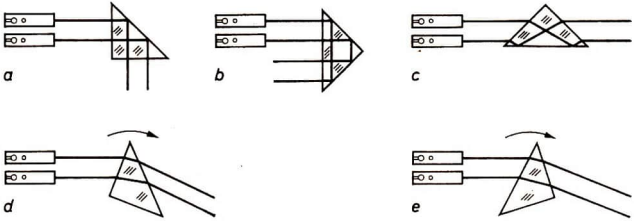


Abb. 2.5.5./1 Strahlenverlauf des Lichtes beim Durchgang durch ein rechtwinklig. gleichschenkliges Prisma mit einmaliger Totalreflexion (a), zweimaliger Totalreflexion (b) und zweimaliger Brechung und Totalreflexion (c), dazu die Stellungen (d und e), die den Übergang von der Totalreflexion zur Brechung kennzeichnen

treffen auf das Prisma und werden je nach dem Auftreffen senkrecht auf eine Katheten- bzw. Hypotenusenfläche ein- bzw. zweimal totalreflektiert oder bei Lichteinfall parallel zur Hypotenuse zweimal gebrochen und einmal totalreflektiert (Abb. 2.5.5./1a bis c).
Der Versuch läßt sich so abwandeln, daß man den Übergang von der Totalreflexion zur Brechung vorführen kann. Wenn man für die beiden Fälle des senkrechten Lichteinfalls auf die Katheten- bzw. Hypotenusenfläche das Prisma leicht dreht, kann dieser Übergang sichtbar gemacht werden (Abb. 2.5.5./1d und e).

Bemerkung

Mit den Mitteln der Schülerexperimentiergeräte (Zweispaltblende aus dem Selbstbau) läßt sich der Versuch als Schülerexperiment durchführen.

3. Durchgang des Lichtes durch Linsen sowie Bau und Wirkungsweise optischer Geräte

3.0. Methodische Bemerkungen

Die in diesem Kapitel angegebenen Versuche machen die Schüler mit wichtigen Anwendungen der Brechung des Lichtes und der Abbildung durch Linsen, den Abbildungsfehlern und den vielen Möglichkeiten der Kombination von unterschiedlichen Linsen und der Kombination von Linsen und Spiegeln in optischen Geräten vertraut. Die Versuche zu den optischen Geräten erstrecken sich vom Projektor für durchsichtige und undurchsichtige Bilder über die fotografische Kamera bis zu den Geräten für die Nah- und Fernbeobachtung, den Mikroskopen, Fernrohren und Teleskopen sowie den Spektralapparaten. Eingeschoben sind Versuche zum Verständnis der optischen Vorgänge im menschlichen Auge und, wegen der besonderen Bedeutung für alle optischen Geräte für subjektive Beobachtung, auch Versuche zur Lupe. Besonders betont werden sollte, daß ein großer Teil der Versuche auch als Schülerexperimente geeignet ist, so daß sich viele Möglichkeiten eröffnen, wichtige Kenntnisse über Linsen und optische Geräte unter Ausnutzung der erzieherischen Vorteile der aktiven experimentellen Schülertätigkeiten zu gewinnen.
Die Versuchsbeschreibungen zu den optischen Geräten in den Abschnitten 3.3. und 3.4. sind so angelegt, daß die Erarbeitung von Bau und Wirkungsweise in einer entwickelnden methodischen Schrittfolge vorgeschlagen wird. Ausgangspunkt ist stets die wesentliche optische Funktion des Gerätes in ihrer einfachsten Lösung. Durch Hinzufügen weiterer optischer Bauteile entsteht schließlich ein leistungsfähiges optisches Gerät. Der Lehrer muß natürlich im Unterricht nicht alle Einzelschritte gehen, sondern kann seiner Zielsetzung entsprechend bestimmte Schritte auswählen. Wenn es gilt, das analytische Denken der Schüler besonders zu entwickeln, kann man die Reihenfolge auch umkehren, vom fertigen komplexen Gerät ausgehen und unter Fortlassung von Einzelteilen bis zum einfachen physikalischen Prinzip vorstoßen. Die vorgeschlagenen Wege sollen dem Lehrer Möglichkeiten eröffnen und eine breite Auswahl anbieten, keinesfalls aber sein schöpferisches Arbeiten einengen.

3.0.1. Zur Demonstration des Lichtdurchganges durch Linsen erfolgt im V 3.1.1. ein Übergang des Strahlenverlaufes in Prismen zum Strahlenverlauf in Linsen. Neben der zweidimensionalen Darstellung mit den Hilfsmitteln der ebenen geometrischen Optik wird die Sichtbarmachung des räumlichen Lichtbündels hinter der Linse in einem getrübten Mittel vorgeschlagen. Die Sammelwirkung von Linsen wird immer wieder eindrucksvoll mit den auch als Freihandversuchen vorführbaren Versuchen nach V 3.1.2. demonstriert. Die Vorführung der Wärme-

wirkung im Brennpunkt ist für die Schüler stets sehr überzeugend. Dabei läßt sich auch zeigen, daß die Lage des Brennpunktes von der Linsenkrümmung abhängt, eine Erkenntnis, die auch aus V 3.1.3. zu gewinnen ist. Man sollte nicht versäumen, den Einfluß der Umgebung auf die Linsenwirkung zu demonstrieren, denn die zerstreuende Wirkung einer bikonvexen Luftlinse in Wasser, wie im V 3.1.4. beschrieben, verblüfft immer wieder.
Parallelen zum V 2.3.2. können nach V 3.1.5. bei der Untersuchung der Brechung von Parallel-, Brennpunkt- und Mittelpunktstrahlen an Sammel- und Zerstreuungslinsen hergestellt werden. Bei der Beobachtung der reellen Abbildung eines Punktes durch eine Sammellinse im V 3.1.6., der Erzeugung reeller Bilder durch Sammellinsen nach V 3.1.7. sowie der Herleitung oder Bestätigung der Linsengleichung und der Gleichung für den Abbildungsmaßstab nach V 3.1.8. sollten unbedingt Vergleiche zu den äquivalenten Erscheinungen am Hohlspiegel angestellt werden. Zur anschaulichen Gegenüberstellung empfiehlt sich, parallel zu den genannten Versuchen die entsprechenden Versuche nach V 2.3.3. bis 2.3.5. vorzuführen. Der Versuch 3.1.8. enthält eine interessante Variante zur Herleitung der Linsengleichung in der Newtonschen Form.
Im Unterricht kommt oft die Behandlung der virtuellen Bilder an Linsen etwas zu kurz. Abhilfe sollen die unter V 3.1.9. und 3.1.10. vorgeschlagenen Versuche schaffen. V 3.1.9. bringt einen interessanten Vergleich der virtuellen Bilder von Sammel- und Zerstreuungslinse, bei dem das Objektiv eines Tageslichtschreibprojektors das menschliche Auge ersetzt und gewissermaßen durch die Linsen „blickt" und in der Projektion ein „Netzhautbild" erzeugt. Die Beobachtung und Ausmessung der virtuellen Bilder an Sammel- und Zerstreuungslinsen läßt sich mit Hilfe einer geschickt ausgedachten Versuchsanordnung ermöglichen und bietet erneut Möglichkeiten, die Linsengleichung experimentell zu bestätigen. V 3.1.11. und 3.1.12. dienen der Bestimmung der Brennweite von Sammel- und Zerstreuungslinsen, wobei jeweils mehrere Varianten angegeben werden. Besonders die Variante d liefert schnell und sicher und ohne Rechnung die Brennweite einer Sammellinse oder eines sammelnden Linsensystems.

3.0.2. Mit den Versuchsbeschreibungen im Abschnitt 3.2. sollen neben der Gesamtheit der Abbildungsfehler besonders die chromatische und sphärische Aberration, der Astigmatismus schiefer Bündel, die Koma, die Bildfeldwölbung und die tonnen- bzw. kissenförmige Verzeichnung bei falscher Pupillenlage behandelt werden.
Es sind keine Versuche angegeben, die sich auf die *Beseitigung von Abbildungsfehlern* beziehen. Man muß sich in der Schule damit begnügen, die Ursachen für die Abbildungsfehler aufzudecken. Ihre Beseitigung setzt weitgehende technische Spezialkenntnisse voraus, die über den Rahmen der Schule hinausgehen. Es ist versucht worden, in den wiedergegebenen Versuchsvorschlägen mit einer möglichst geringen Anzahl von Linsen auszukommen. Als besonders brauchbar für diese Versuche hat sich eine Plankonvexlinse mit einer Brennweite von 120 mm erwiesen. In einigen Fällen muß man aus dem vorhandenen Linsenvorrat diejenige Linse aussuchen, die den betreffenden Abbildungsfehler am stärksten hervortreten läßt.
Man sollte mit dem Versuch 3.2.1. beginnen, um die hauptsächlichen Abbildungsfehler in ihrer Gesamtheit und ihrem Zusammenwirken zu demonstrieren und die Behandlung der Abbildungsfehler damit auch zu motivieren. Die zu beobachtenden Erscheinungen sind sehr eindrucksvoll und farbenprächtig. Sie

können besonders deutlich unter Verwendung des Fresneldoppelkondensors eines Tageslichtschreibprojektors vorgeführt werden.
Sehr einfach läßt sich die chromatische Aberration nachweisen. Die Versuche 3.2.2. und 3.2.3. zeigen diese Erscheinung deutlich — auch bei Verwendung dünner Linsen —, während V 3.2.4. die Entstehung der chromatischen Aberration aus dem Strahlengang verständlich macht.
Verhältnismäßig einfach ist auch die sphärische Aberration zu veranschaulichen. Die Erscheinung wird mit V 3.2.5. beobachtet, der Strahlenverlauf aber mit V 3.2.6. deutlich gemacht.
Weit schwieriger ist die Behandlung und Vorführung des Astigmatismus. Als einführender Versuch empfiehlt sich eine Anordnung nach V 3.2.7., wobei der Astigmatismus in einem mit Trübungsmittel versetzten Medium gezeigt wird.
Man beschränkt sich dabei auf die Strahlen in der meridionalen Ebene, die durch die Achse des schiefen Strahlenbündels und durch die optische Achse der Linse festgelegt ist, und auf die Strahlen in der sagittalen Ebene, die die Achse des schiefen Strahlenbündels enthält und auf der meridionalen Ebene senkrecht steht.
Die Strahlen werden in beiden Ebenen an verschiedenen Stellen gesammelt, und zwar in der meridionalen Ebene näher an der Linse als in der sagittalen Ebene.
Demgegenüber zeigt eine Variante von V 3.2.7. die astigmatischen Bilder einer Lochblende. Ihr Bild erscheint in der Meridionalebene als ein in dieser liegender Strich und in der Sagittalebene als ein in der Sagittalebene liegender Strich. Dazwischen lassen sich als Übergangsformen des astigmatischen Lochblendenbildes Ellipsen in der meridionalen und in der sagittalen Ebene nachweisen, zwischen denen als Grenzfall ein Kreis liegt.
Auch der Versuch 3.2.8. zur astigmatischen Abbildung eines Kreuzgitters zeigt diese Zusammenhänge sehr überzeugend.
Im engen Zusammenhang mit dem Astigmatismus steht auch die Koma. Durch Randstrahlen erzeugte Komafiguren werden nach V 3.2.9. vorgeführt. Die Entstehung der Koma weist man mit einem Versuch nach V 3.2.10. mit den Mitteln der Haft- und der Heftoptik nach.
Die Versuche 3.2.11. zur Bildfeldwölbung und 3.2.12. zur Demonstration der tonnen- und kissenförmigen Verzeichnung bei falscher Pupillenlage schließen den Abschnitt über die Abbildungsfehler ab. Beide Erscheinungen sind leicht mit Hilfe des Astigmatismus zu erklären.
Eine gewisse Schwierigkeit besteht bei der Behandlung der Abbildungsfehler darin, daß sie sich mit dem üblichen Linsenmaterial nur selten isoliert zeigen lassen.

3.0.3. Der Abschnitt 3.3. enthält Versuche zum Bau und zur Wirkungsweise eines Projektors, einer fotografischen Kamera und zum Strahlenverlauf in diesen Geräten und im menschlichen Auge. Viele Versuche zu den optischen Geräten begegnen erfahrungsgemäß großem Interesse bei den Schülern.
In einer entwickelnden Schrittfolge wird in V 3.3.1. eine Versuchsreihe zum Projektor für durchsichtige Bilder (Diaskop) beschrieben. Es ist Wert darauf zu legen, daß die grundlegenden Erkenntnisse über den Projektor vertieft werden durch die Anwendung des Prinzips etwa im Tageslichtschreibprojektor oder im Vergrößerungsgerät (V 3.3.2. und 3.3.3.). Ergänzt werden die Erkenntnisse durch V 3.3.4. über Bau und Wirkungsweise eines Projektors für undurchsichtige Bilder (Episkop).
Der Versuch 3.3.5. stellt Bau und Wirkungsweise einer fotografischen Kamera dar und veranschaulicht in eindrucksvoller Weise die Scharfeinstellung des Bildes

auf der Mattscheibe durch Verschieben des Kameraobjektives sowie das Ändern der Schärfentiefe und der Lichtmenge durch Verstellen der Blende.
Der Versuch wird ergänzt durch die Vorführung des Strahlenverlaufes nach V 3.3.6. Der Versuch 3.3.7. erlaubt einen guten Einblick in die Abhängigkeit des Bildausschnittes von der Brennweite der Kameraoptik und simuliert damit in einfacher Form eine Kamera mit Weitwinkel- oder Teleobjektiv. Die restlichen Versuche dieses Abschnitts dienen der Darstellung von optischen Vorgängen im menschlichen Auge. Im Versuch 3.3.8. werden mehrere Varianten von Augenmodellen vorgestellt, mit deren Hilfe die Funktion des menschlichen Auges simuliert werden kann. Besonders günstig davon ist die Variante a, bei der durch die Verwendung eines wassergefüllten Rundkolbens die optische Wirkung des Glaskörpers im menschlichen Auge verdeutlicht wird. Parallel zu den Versuchen mit einem Augenmodell sollte der Strahlenverlauf im menschlichen Auge nach V 3.3.9. bei Einstellung auf den Fern- und auf den Nahpunkt vorgeführt werden. Sehr instruktiv ist die Demonstration der Akkommodation der Augenlinse mit Hilfe einer selbsthergestellten akkommodationsfähigen Linse. Die Durchführung dieses Versuches ist in V 3.3.10. beschrieben.
Die Versuche zur Optik des menschlichen Auges werden ergänzt durch V 3.3.11. und V 3.3.12., die sich mit der Demonstration der Korrektur von Augenfehlern und des bei der Korrektur auftretenden Strahlenverlaufes befassen.
Die Abhängigkeit des Sehwinkels von der Gegenstandsentfernung kann mit dem Versuch 3.3.13. ermittelt werden.

3.0.4. Weil für alle optischen Geräte zur Nah- und Fernbeobachtung mit Okular die Anwendung der Lupe von größter Bedeutung ist, sind die ersten Versuche dieses Abschnitts dem Gebrauch, der Anwendung und der Vergrößerung einer Lupe gewidmet sowie dem Strahlengang in der Lupe und deren Zusammenwirken mit dem menschlichen Auge. Man versäume bei der Behandlung der Lupe nicht, die Schüler den richtigen Gebrauch einer Lupe üben zu lassen, denn es kann immer wieder festgestellt werden, daß sogar Personen, die häufig mit der Lupe arbeiten, den Abstand des Auges von der Lupe viel zu groß wählen. In den Gebrauch der Lupe kann man die Schüler durch die Freihandversuche nach V 3.4.1. einführen. Das Zusammenspiel von Lupe und menschlichem Auge wird am besten nach einer Anordnung von V 3.4.2. simuliert, gleichzeitig kann dabei die Vergrößerung einer Lupe experimentell ermittelt werden. Subjektiv bestimmt man die Vergrößerung einer Lupe nach V 3.4.3. Die Anwendung der Lupe als Diabetrachter kann im Experiment nach V 3.4.4. erprobt werden. Ähnlich wie im Versuch 3.1.9. wird im Versuch 3.4.5. das menschliche Auge beim Gebrauch der Lupe durch das Objektiv eines Tageslichtschreibprojektors ersetzt und das „Netzhautbild" an die Wand projiziert. Mit der Darstellung des Strahlenverlaufs in einer Lupe nach V 3.4.6. wird die Behandlung der Lupe abgerundet.
Als Geräte zur Fernbeobachtung werden in den Versuchen 3.4.7. bis 3.4.16. das Keplersche Fernrohr, das Keplersche Fernrohr mit Umkehrlinse, das Prismenfernrohr, das Galileische Fernrohr und zwei Typen von Spiegelteleskopen beschrieben. Für den Aufbau von Fernrohren und Mikroskopen eignet sich in vorzüglicher Weise die optische Bank, da sie den Lehrer des mühsamen Justierens aller optischen Bauteile enthebt. Es ist beim Aufbau vieler optischer Instrumente nicht nur auf die richtige Stellung der Linsen, sondern auch der Blenden zu achten. Meist wird eine Irisblende als Gesichtsfeldblende am Ort des reellen Zwischenbildes genügen. Zur Unterstützung des Auges bei der Beobachtung durch ein

Okular empfiehlt es sich stets, dicht hinter die Okularlinse in der Nähe der Austrittspupille eine Lochblende anzubringen. In den Versuchen 3.4.7., 3.4.9., 3.4.10., 3.4.13. und 3.4.15. werden auf der optischen Bank die entsprechenden Fernrohr- bzw. Teleskopmodelle aufgebaut. Der Strahlenverlauf im Fernrohr bzw. im Teleskop wird in den Versuchen 3.4.8., 3.4.14. und 3.4.16. mit Hilfe der ebenen geometrischen Optik demonstriert. Instruktiv ist auch — unter Verwendung eines Augenmodells —, das Zusammenspiel von optischem Gerät und menschlichem Auge nach V 3.4.11. zu untersuchen. Versuch 3.4.12. gibt mehrere Möglichkeiten an, die Vergrößerung eines Fernrohres oder eines Fernrohrmodells zu bestimmen.
In welcher Weise Bau und Funktion eines Mikroskopes wiederum in einer methodischen Schrittfolge erarbeitet werden können, ist im Versuch 3.4.17. wiedergegeben. Es empfiehlt sich, den Versuch durch die Vorführung des Strahlenganges im Mikroskop zu ergänzen. V 3.4.18. zeigt dafür eine Möglichkeit. Schließlich läßt sich nach einer Anordnung des Versuches 3.4.19. die Vergrößerung eines handelsüblichen Mikroskops in relativ einfacher Weise ermitteln.
Abschließend werden im Versuch 3.4.20. Bau und Wirkungsweise eines einfachen Spektralapparates erörtert. Das fertig zusammengestellte Gerät ist so leistungsfähig, daß damit ein Großteil der Versuche der Abschnitte 4.1. und 4.2. sowohl als Lehrerexperiment als auch als Schülerexperiment durchgeführt werden kann. Der Strahlengang in einem Spektralapparat kann nach V 4.1.2. gezeigt werden, um damit die Kenntnisse über Bau und Funktion dieses Gerätes abzurunden.

3.1. Durchgang des Lichtes durch Linsen und Abbildung mit Hilfe von Linsen

3.1.1. Demonstration des Strahlenverlaufes in Linsen ◑; ●

Zu Variante a ◑

1. Manipermtafel
2. 3 Haftleuchten
3. 2 Prismenkörper mit geringem brechendem Winkel Ⓢ (siehe 1.3.1.)
4. Linsenkörper, bikonvex
5. Linsenkörper, bikonkav

Zu Variante b [SE] ◑

6. Heftleuchte
7. Zweispaltblende Ⓢ (siehe 1.3.1.)
8. Flachglaskörper, rechtwinklig, gleichschenklig
9. Flachglaskörper, bikonvex
10. Flachglaskörper, bikonkav

Zu Variante c ●

11. Sechskantschiene (1 m)
12. Optikleuchte
13. 4 große Klemmreiter
14. kleiner Klemmreiter
15. Blendscheibe mit Linse ($f = +120$ mm)
16. Blendscheibe mit Linse ($f = +150$ mm)
17. Blendscheibe mit Linse ($f = -200$ mm)
18. großer Spiegel auf Stiel
19. Irisblende
20. großer Glastrog (Aquarium)
21. Fluoreszein oder Trübungsmittel

Zu Variante d [SE] ●

22. Experimentierleuchte
23. Blendrahmen mit Linse ($f = +50$ mm)
24. Blendrahmen mit Linse ($f = -100$ mm)
25. Tischchen
26. Küvette
27. Trübungsmittel
28. Lochblende
29. 2 T-Füße

Methodischer Hinweis

Während die Varianten a und b nur den Strahlenverlauf durch Linsen in einer Ebene zeigen, kann bei den Varianten c und d das gesamte Strahlenbündel betrachtet werden. Es empfiehlt sich, mehrere Varianten miteinander zu koppeln.

Variante a

An der Hafttafel werden zwei oder drei parallele waagerechte Lichtspuren erzeugt. In den Strahlengang bringt man die zwei an der Basis zusammengesetzten Prismen, eventuell unter Zwischenschaltung einer passenden planparallelen Platte. Die Strahlen werden in einem Punkt gesammelt.
Zum gleichen Ergebnis kommt man, wenn man die Prismen durch einen bikonvexen Linsenkörper ersetzt (Abb. 3.1.1./1a und b).
Zur Demonstration des Überganges von einer Prismenkombination zur Zerstreuungslinse setzt man die Prismen mit der brechenden Kante zusammen und er-

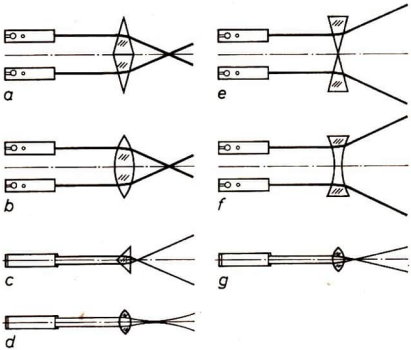


Abb. 3.1.1./1
Strahlenverlauf durch zusammengesetzte Prismen (a und e) und Sammel- bzw. Zerstreuungslinsen (b und f) sowie ähnliche Versuchsreihe im Schülerexperiment (c und g) und bei Beobachtung der Diakaustik (d)

mittelt den Schnittpunkt der rückwärtigen Verlängerungen der gebrochenen Strahlen. Danach zeigt man, daß mit einem bikonkaven Körper die gleiche Wirkung erzielt wird (Abb. 3.1.1./1e und f).

Variante b

Mit der Heftleuchte und eingeschobener Zweispaltblende werden zwei parallele Lichtspuren auf einer weißen Unterlage erzeugt. Nacheinander werden der rechtwinklige, gleichschenklige Flachglaskörper, der bikonvexe (Abb. 3.1.1./1c und g) und der bikonkave Flachglaskörper in den Strahlengang gebracht. Die sammelnde bzw. zerstreuende Wirkung wird beobachtet. Für den bikonvexen und den bikonkaven Flachglaskörper wiederholt man den Versuch, indem man nach Entfernen der Zweispaltblende das volle parallele Lichtbündel nutzt (Abb. 3.1.1./1d). Beim bikonvexen Flachglaskörper wird dabei schon die Diakaustik sichtbar. Sie läßt sich erheblich verstärken, wenn man mit einem schwach divergenten Lichtbündel arbeitet, das die ganze Linse erfaßt.

Variante c

Das Licht der Optikleuchte wird mit Hilfe der Kondensorlinse parallel gerichtet und gelangt so auf die Sammellinse von +150 mm Brennweite oder auf die Zerstreuungslinse von −200 mm Brennweite. Dicht hinter der jeweiligen Linse wird mit Stativmaterial der Glastrog aufgestellt, über den ein Spiegel unter 45° montiert wird. Das Lichtbündel ist in dem mit Fluoreszeinlösung versetzten Wasser im Trog sichtbar. Man blickt von oben über den Spiegel in den Trog und kann so das volle Lichtbündel erfassen (Abb. 3.1.1./2a). Je nachdem welche Linse verwendet wird, beobachtet man ein konvergentes bzw. ein divergentes Lichtbündel.

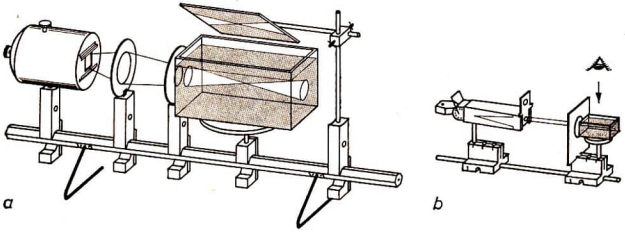


Abb. 3.1.1./2 Versuchsanordnung zur Beobachtung des räumlichen Verlaufs der Lichtbündel beim Durchgang des Lichtes durch Linsen im Lehrerexperiment (a) und im Schülerexperiment (b)

Variante d

Einen Versuch ähnlich der Variante c kann man als Schülerexperiment durchführen, wenn man das Licht der Experimentierleuchte parallel durch die Lochblende auf eine Sammellinse von +50 mm Brennweite oder eine Zerstreuungslinse von −100 mm Brennweite richtet und dahinter im getrübten Wasser das Lichtbündel verfolgt (Abb. 3.1.1./2b).

Feuer

3.1.2. Demonstration der Sammelwirkung von Linsen

Zu Variante a

1. Kondensorlinse oder Leselupe
2. Seidenpapier
3. Zündhölzer

Zu Variante b ◑

4. Sechskantschiene (0,5 m)
5. Optikleuchte
6. 4 große Klemmreiter
7. 2 Blendscheiben mit Linse ($f = +120$ mm)
8. Blendscheibe mit Linse ($f = +50$ mm)
9. Blendscheibe mit Schiebeschacht
10. Thermometer (0 ° bis 100 °C), bewußt
11. Paketgummi

Zu Variante c [*SE*] ◑

Geräte 10. und 11., außerdem

12. Experimentierleuchte
13. Blendrahmen mit Linse ($f = +50$ mm)
14. Handapparat
15. 3 T-Füße

Methodische Hinweise

1. Die Sammelwirkung von Linsen und die Vereinigung der Strahlen in einem Punkt sollte mit Hilfe einer der genannten Varianten vorgeführt werden, wobei der Freihandversuch nach Variante a am überzeugendsten ist und den Schülern den Begriff „Brennpunkt" sehr augenfällig verdeutlicht.
2. Eine Variante sollte im Unterricht unbedingt gezeigt werden, um zu demonstrieren, daß auch „Wärmestrahlen" genauso wie die „Lichtstrahlen" gebrochen werden können.

Variante a: Entzünden von Seidenpapier

Man läßt Sonnenlicht senkrecht auf eine große Sammellinse fallen und sucht mit einem Papierstück die engste Bündeleinschnürung. Nach kurzer Zeit entzündet sich das Seidenpapier. An die Stelle des Seidenpapiers kann man auch den Zündkopf eines Zündholzes bringen, der nach kurzer Zeit entflammt.

Variante b: Erwärmen einer Thermometerkugel (Lehrerexperiment)

Auf der kurzen optischen Bank werden dicht vor der Optikleuchte die Klemmreiter mit den beiden Kondensorlinsen und der Sammellinse $f = +50$ mm aufgestellt. Mit einem Paketgummi befestigt man das Thermometer an der Blendscheibe mit Schiebeschacht, so daß die berußte Thermometerkugel genau in der optischen Achse zu liegen kommt (Abb. 3.1.2./1a und b). Man verschiebt das Thermometer

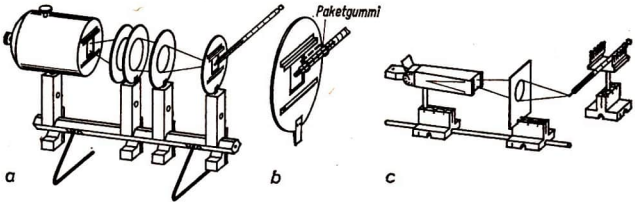


Abb. 3.1.2./1 Versuchsanordnungen zur Demonstration der Sammelwirkung von Linsen im Lehrerexperiment (a) und im Schülerexperiment (c). Befestigung des Thermometers an der Blendscheibe (b)

solange längs der optischen Achse, bis die Thermometerkugel im Brennpunkt steht. Schon nach kurzer Zeit beobachtet man einen Temperaturanstieg.

Variante c: Erwärmen einer Thermometerkugel (Schülerexperiment)

Das konvergente Licht der Experimentierleuchte wird mit der Linse $f = +50$ mm in einem Punkt gesammelt. In den Brennpunkt wird die berußte Thermometerkugel des mit einem Paketgummi am Handapparat befestigten Thermometers gebracht (Abb. 3.1.2./1c).

Bemerkung

Die Vorratskugel des Thermometers kann bei größter Vorsicht durch schnelles Drehen über einer Kerzenflamme berußt werden.

3.1.3. Demonstration der Abhängigkeit der Brennweite einer Linse von der Linsenkrümmung ◑

1. Manipermtafel
2. 2 bis 6 Haftleuchten
3. 2 Linsenkörper, plankonvex
4. 2 Linsenkörper, bikonvex, unterschiedliche Krümmung

Methodischer Hinweis

Die Teilversuche können nacheinander demonstriert werden, indem man eine Linse geringer Krümmung durch eine stärkerer Krümmung ersetzt und die Lage des Brennpunktes jeweils markiert. Sie können aber auch gleichzeitlich durchgeführt werden, indem man an der Hafttafel untereinander die Linsen unterschiedlicher Krümmung anbringt und die Brennweiten auf diese Weise miteinander vergleicht.

Versuch

Auf der Hafttafel mit einer oder mehreren vorgezeichneten optischen Achsen werden achsensymmetrisch je zwei parallele Lichtspuren erzeugt. In den Strahlen-

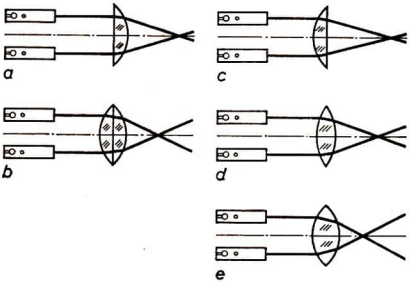


Abb. 3.1.3./1 Versuchsreihen zur Demonstration der Abhängigkeit der Brennweite von der Linsenkrümmung

gang bringt man den plankonvexen Linsenkörper mit der Planseite zu den Haftleuchten und markiert die Brennpunktlage. Ein zweiter plankonvexer Linsenkörper wird befestigt, so daß ein bikonvexer Linsenkörper zusammengesetzt wird. Der Brennpunkt wird ebenfalls markiert. Er liegt näher als bei Verwendung des einen plankonvexen Linsenkörpers allein (Abb. 3.1.3./1a und b).
Ein weiterer Vergleich kann zwischen dem plankonvexen Linsenkörper und den beiden bikonvexen Linsenkörpern unterschiedlicher Krümmung erfolgen. Man findet leicht, daß mit zunehmender Linsenkrümmung die Brennweite immer kürzer wird (Abb. 3.1.3./1c bis e).

3.1.4. Demonstration des Einflusses der Umgebung auf die Linsenwirkung ●

1. Sechskantschiene (0,5 m)
2. Optikleuchte
3. 3 große Klemmreiter
4. kleiner Klemmreiter
5. Blendscheibe mit Linse ($f = +120$ mm)
6. großer Glastrog (Aquarium)
7. großer Spiegel auf Stiel
8. Luftlinse Ⓢ (siehe 1.3.1.)
9. Fluoreszein oder Trübungsmittel

Methodischer Hinweis

Die Vorführung des Strahlenverlaufes des Lichtes in einer von Wasser umgebenen Luftlinse führt für die Schüler nicht nur zu einem überraschenden Ergebnis, sondern regt sie auch an, physikalische Erscheinungen kritisch zu betrachten.

Versuch

Auf einer kurzen optischen Bank wird nach V 3.1.1. (Abb. 3.1.1./2a) die Optikleuchte mit vorgesetzter Kondensorlinse so aufgebaut, daß ein nahezu parallelstrahliges Lichtbündel entsteht, dessen Weg man in einem mit getrübtem Wasser gefüllten Trog verfolgen kann. Zur besseren Beobachtung des Bündelquerschnittes ordnet man noch einen um 45° geneigten Spiegel über dem Trog an.

Bringt man im Trog eine aus zwei Uhrgläsern verkittete bikonvexe Luftlinse in das Parallellichtbündel, kann man eine Zerstreuung des Lichtes beobachten.

Bemerkung

Als Luftlinse eignet sich auch das Modell der akkommodationsfähigen Augenlinse (Abb. 1.3.1./14a); im Flüssigkeitstrog wirkt sie bei Überdruck wie eine Zerstreuungslinse, bei Unterdruck wie eine Sammellinse.

3.1.5. Demonstration der Brechung von Parallel-, Brennpunkt- und Mittelpunktstrahlen an Sammel- und Zerstreuungslinsen ◑

Zu Variante a ◑

1. Manipermtafel
2. Haftleuchte
3. Linsenkörper, bikonvex ($f = +150$ mm)
4. Linsenkörper, bikonkav ($f = -150$ mm)

Zu Variante b ◑ [*SE*]

5. Heftleuchte
6. Einspaltblende
7. Flachglaskörper, bikonvex
8. Flachglaskörper, plankonkav
9. weiße Unterlage

Methodische Hinweise

1. Da Kenntnisse über den Verlauf der ausgezeichneten Strahlen vor und nach der Brechung für das Verständnis der Bildentstehung an Linsen unerläßlich sind, empfiehlt es sich, die Variante b synchron mit der Variante a durchzuführen. Der Strahlenverlauf kann dabei direkt im Heft der Schüler erzeugt und mit Bleistift nachgezeichnet werden.
2. Die Ergebnisse können mit denen des V 2.3.2. verglichen werden.

Variante a

An die Hafttafel mit vorgezeichneter optischer Achse wird ein bikonvexer Linsenkörper gebracht. Seine einfachen und doppelten Brennweiten werden markiert.
Zuerst beobachtet man die Brechung eines Parallelstrahles. Anschließend demonstriert man, daß ein Brennpunktstrahl nach der Brechung parallel zur optischen Achse verläuft. Schließlich zeigt man, daß ein Strahl über den Linsenmittelpunkt die Linse ungebrochen passiert (Abb. 3.1.5./1a bis c).
In ähnlicher Weise verfährt man bei der Demonstration des Strahlenverlaufes an der Zerstreuungslinse, wobei man besonders darauf aufmerksam macht, daß die Verlängerungen der Brennpunktstrahlen jeweils durch den auf der anderen Seite der Linse liegenden virtuellen Brennpunkt verlaufen (Abb. 3.1.5./1d bis f).

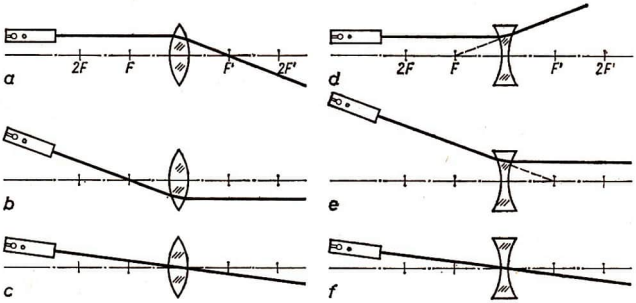


Abb. 3.1.5./1 Strahlenverlauf bei der Brechung von Parallel- (a, d), Brennpunkt- (b, e) und Mittelpunktstrahlen (c, f) an Sammel-und Zerstreuungslinsen

Variante b

Man kann genau so verfahren wie bei Variante a. Man zeichnet die optische Achse auf eine weiße Unterlage, legt den bikonvexen oder bikonkaven Flachglaskörper auf, markiert die Brennpunkte und läßt mit der Heftleuchte eine Lichtspur entweder als Parallel- oder als Brennpunkt- oder als Mittelpunktstrahl auf die Linse fallen und beobachtet den Verlauf des gebrochenen Lichtbündels.

3.1.6. Demonstration des Strahlenverlaufes bei der reellen Abbildung eines Punktes durch eine Sammellinse ◑

1. Manipermtafel
2. kleine Haftleuchte
3. 3 Haftleuchten
4. Linsenkörper, bikonvex ($f = +150$ mm)

Methodischer Hinweis

Es ist methodisch wünschenswert, vor der Abbildung eines ausgedehnten Gegenstandes die Abbildung eines Punktes durch eine Sammellinse zu demonstrieren. Dabei sollte erst das volle an der Abbildung beteiligte Lichtbündel gezeigt werden, ehe man zur Demonstration der Bildentstehung durch ausgezeichnete Strahlen übergeht.

Versuch

Auf der Hafttafel mit vorgezeichneter optischer Achse wird der bikonvexe Linsenkörper befestigt. Die einfache und doppelte Brennweite werden beiderseits der Linse markiert, und ein Gegenstandspunkt wird außerhalb der doppelten Brennweite in geringer Entfernung von der optischen Achse eingezeichnet.

Über diesen Punkt befestigt man die kleine Haftleuchte und richtet den vollen divergenten Lichtkegel auf die Linse. Der Konvergenzpunkt des gebrochenen Lichtbündels liegt als Bildpunkt zwischen der einfachen und der doppelten Brennweite auf der anderen Seite der Linse (Abb. 3.1.6./1a). Dieser Bildpunkt wird markiert. Markiert werden auch die Begrenzungsstrahlen der Lichtbündel beiderseits der Linse.

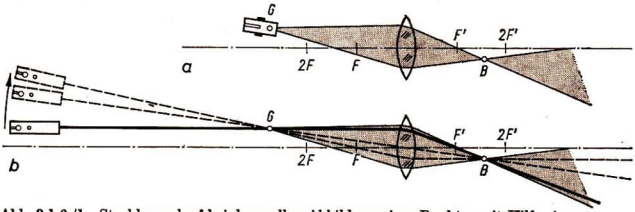


Abb. 3.1.6./1 Strahlenverlauf bei der reellen Abbildung eines Punktes mit Hilfe einer Sammellinse mit einem vollen Lichtbündel (a) und bei Kennzeichnung durch drei Lichtspuren (b)

Man bringt vorerst nur eine Haftleuchte so an der Tafel an, daß ihre Lichtspur über den markierten Gegenstandspunkt als Parallelstrahl verläuft. Man beobachtet den Verlauf der Spur nach der Brechung; die Spur verbleibt im markierten Lichtbündel und geht durch den Bildpunkt (Abb. 3.1.6./1b). Durch Verrücken der Haftleuchte demonstriert man nacheinander den Weg der Lichtspur als Mittelpunkt- bzw. Brennpunktstrahl und zeigt deren Anteil an der Bildentstehung. Gleiches kann man für jeden beliebigen Strahl innerhalb des Lichtbündels vorführen.
Schließlich werden zwei oder drei Haftleuchten so ausgerichtet, daß ihre Lichtspuren als ausgezeichnete Strahlen durch den Gegenstandspunkt verlaufen und ihre Vereinigung im Bildpunkt beobachtet, um Verständnis für die Bildkonstruktion bei der Abbildung durch Linsen bei den Schülern zu wecken.

Bemerkung

Bei Verwendung der Heftleuchte ohne Kondensor und bikonvexen Glaskörper kann die Abbildung mit einem vollen Lichtbündel auch als Schülerexperiment durchgeführt werden. Dabei ist es auch möglich, mit feinen Lichtspuren den Verlauf der ausgezeichneten Strahlen zu verfolgen.

3.1.7. Erzeugung reeller Bilder mit Hilfe einer Sammellinse

Zu Variante a

1. 2 Sechskantschienen (1 m und 0,5 m)
2. Optikleuchte
3. 4 große Klemmreiter
4. kleiner Klemmreiter
5. Blendscheibe mit Schiebeschacht
6. Blendscheibe mit Linse ($f = +100$ mm ... 150 mm)
7. Blendscheibe mit Linse ($f = +120$ mm)
8. transparenter Schirm
9. Transparentobjekt
10. Meßleiste (1 m)
11. 3 Meßleistenhalter mit Markierungsreiter

Zu Variante b

Geräte 1. bis 11., außerdem

12. Blendscheibe mit halber Linse ($f = +100$ mm) Ⓑ (siehe 1.3.1.)

Zu Variante c [*SE*]

13. 3 T-Füße
14. Blendrahmen mit Linse ($f = +100$ mm)
15. Schirm
16. Tischchen
17. Kerze
18. Meßstab

Methodische Hinweise

1. Bei der Durchführung des Versuches ist nicht die Linse zur Änderung der Gegenstandsweite zu verschieben, sondern der Gegenstand immer näher bis kurz vor dem Brennpunkt an die Linse heranzurücken und durch Nachführen des Schirmes ein scharfes Bild einzustellen.
2. Der Variante b kann eine Fragestellung vorausgehen, die die Schüler zur Bildung von Vermutungen und Prognosen veranlaßt.

Variante a

Auf der kleinen Schiene zur optischen Bank werden die Optikleuchte und die Kondensorlinse von 120 mm Brennweite so aufgebaut, daß ein schwach diver-

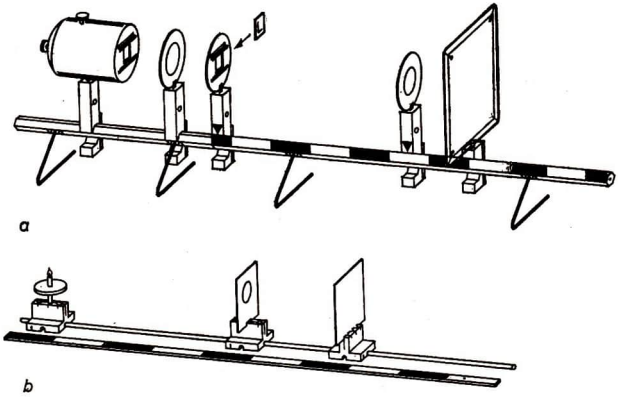


Abb. 3.1.7./1 Versuchsanordnung zur Erzeugung reeller Bilder mit Hilfe einer Sammellinse im Lehrerexperiment (a) und im Schülerexperiment (b)

genter Lichtkegel erzeugt wird. Genau in der Mitte der langen optischen Bank wird die Linse $f = +100$ mm auf einen Klemmreiter gesetzt. Auf der einen Seite der Linse ordnet man die Blendscheibe mit Schiebeschacht und eingesetztem Transparentobjekt an, auf der anderen Seite den transparenten Schirm. Die Meßleiste wird mit drei magnetischen Haltern an den Reitern befestigt. Die Blättchen zur Markierung der einfachen und der doppelten Brennweite werden aufgehängt. Schließlich setzt man die beiden Schienen so zusammen, daß das Transparentobjekt gut beleuchtet wird (Abb. 3.1.7./1a).
Man beginnt die Versuchsreihe mit einer Stellung des Gegenstandes außerhalb der doppelten Brennweite. Zur Scharfeinstellung des umgekehrten, reellen und verkleinerten Bildes muß der Schirm zwischen die einfache und doppelte Brennweite gebracht werden. In der Weiterführung des Versuches wird das Objekt immer näher an die Linse gerückt. Die Bilder werden jeweils scharf eingestellt. Art, Lage und Größe des Bildes sind zu bestimmen und die Ergebnisse in eine Tabelle einzutragen.

Tabelle: Zuordnung von Gegenstandsweite und Bildweite bei Linsenbildern

Gegenstandsweite s	Bildweite s'	Art, Lage und Größe des Bildes
$s > 2f$	$2f' > s' > f'$	reell, umgekehrt, verkleinert
$s = 2f$	$s' = 2f'$	reell, umgekehrt, gleich groß
$2f > s > f$	$s' > 2f'$	reell, umgekehrt, vergrößert
$s = f$	$s' \to \infty$	kein Bild

Variante b

Der Aufbau des Versuches erfolgt genau wie bei Variante a. Anstelle der ganzen Sammellinse wird eine Blendscheibe mit einer halben Sammellinse verwendet. Es kann beobachtet werden, daß auch eine halbe Linse das Objekt genauso vollständig abbildet wie die ganze Linse; lediglich die Bildhelligkeit ist geringer.

Variante c

In der Mitte der zusammengesteckten Stativstäbe wird die Linse $f = +100$ mm aufgestellt. Zu beiden Seiten werden das Tischchen mit der Kerze (Flamme in Höhe der optischen Achse) und der transparente Schirm angeordnet. Längsseits legt man den Meßstab, auf dem man mit Kreide die einfache und die doppelte Brennweite markiert (Abb. 1.3.7./1b). Für verschiedene Gegenstandsweiten ermittelt man wie bei Variante a die Bildweiten und beurteilt Art, Lage und Größe des Bildes.

Bemerkungen

1. Die Versuche der Varianten a und b lassen sich sehr einfach zusammenfassen, wenn die ganze und die halbe Linse die gleiche Brennweite haben. Der einfache Austausch genügt dann, um ohne Nachstellen ein scharfes Bild zu erhalten.
2. Wer nicht über eine halbe Linse verfügt, kann auch mit einer Pappblende einfach die Hälfte der ganzen Linse abdecken.
3. Mit den Geräten des SEG Optik läßt sich der Versuch analog als Schülerexperiment durchführen.

4. Zur Verbesserung der Scharfeinstellung kann über die Linse ein schmaler Pappstreifen gehängt werden. Von den beiden Linsenhälften wird dann jeweils ein Bild des Gegenstandes erzeugt. Beide Bilder überdecken einander vollständig, wenn die richtige Bildweite eingestellt ist.

3.1.8. Herleitung bzw. Bestätigung der Linsengleichung und der Gleichung für den Abbildungsmaßstab

Geräte 1. bis 11. wie beim V 3.1.7., Variante a, außerdem 12. Lineal

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 3.0.1.!
2. Vergleiche Bem. Nr. 1 zu V 3.1.7.!
3. Die hier zusammengefaßten Wertetabellen für die Gegenstands- und Bildweite sowie die Gegenstands- und Bildgröße können natürlich getrennt voneinander aufgenommen werden.

Versuch

Die Durchführung des Versuches erfolgt wie im V 3.1.7. Es werden jedoch nicht nur Gegenstands- und Bildgröße miteinander verglichen und die Lage von Gegenstand und Bild beurteilt, sondern die Größen s, s', y und y' werden gemessen und in einer Tabelle zusammengefaßt. Der Versuch wird für mehrere Gegenstandsweiten wiederholt, wobei man den ganzen Bereich bis in die Nähe des Brennpunktes ausnutzt.

Meßwerttabelle (aus einem Schülerexperiment)

Gegenstandsweite s in m	Bildweite s' in m	$\frac{1}{s}+\frac{1}{s'}$ in m^{-1}	$\frac{1}{f}$ in m^{-1}	Gegenstandsgröße y in m	Bildgröße y' in m	$\frac{s}{s'}$	$\frac{y}{y'}$
0,500	0,125	10	10	0,035	0,009	4,0	3,9
0,450	0,128	10	10	0,035	0,010	3,5	3,5
0,400	0,134	10	10	0,035	0,012	3,0	2,9
0,350	0,140	10	10	0,035	0,014	2,5	2,5
0,300	0,150	10	10	0,035	0,018	2,0	1,9
0,250	0,166	10	10	0,035	0,023	1,5	1,5
0,200	0,200	10	10	0,035	0,035	1,0	1,0
0,150	0,300	10	10	0,035	0,070	0,5	0,5

Die Auswertung der Versuchsergebnisse bestätigt die Linsengleichung

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{s}+\frac{1}{s'}$$

und die Gleichung für den Abbildungsmaßstab

$$\frac{s}{s'}=\frac{y}{y'}.$$

Bemerkungen

1. Für die Ermittlung der Linsengleichung gibt es noch eine interessante Variante: man mißt statt der Gegenstands- und der Bildweite die Entfernung Gegenstand—Brennpunkt $z = s - f$ und die Entfernung Bild—Brennpunkt $z' = s' - f'$.

Meßwerttabelle

Entfernung Gegenstand — Brennpunkt z in m	Entfernung Bild — Brennpunkt z' in m	$z \cdot z'$ in m²
0,400	0,025	0,01
0,350	0,028	0,01
0,300	0,034	0,01
0,250	0,040	0,01
0,200	0,050	0,01
0,150	0,066	0,01
0,100	0,100	0,01
0,050	0,200	0,01

Man findet: $z \cdot z' =$ konst.
Das ist die Newtonsche Form der Linsengleichung: $z \cdot z' = f \cdot f'$.
Setzt man für $f' = f$ und $z = s - f$ bzw. $z' = s' - f$, so nimmt die Gleichung die Form $(s - f)(s' - f) = f^2$ an. Nach Umformen gewinnt man daraus die Linsengleichung

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

2. Der Versuch kann völlig analog zum Demonstrationsversuch mit den Geräten 13. bis 18. des Versuches 3.1.7., Variante c, als Schülerexperiment durchgeführt werden.

3.1.9. Vergleich der virtuellen Bilder von Sammel- und Zerstreuungslinsen ◑

Zu Variante a

1. Tageslichtschreibprojektor
2. Projektionsfolie mit Raster
3. Sammellinse, ungefaßt ($f = +50$ mm ... 150 mm)
4. Zerstreuungslinse, ungefaßt ($f = -50$ mm ... 150 mm)
5. 2 Distanzringe aus Pappe, passend zu den Linsen ⑧ (siehe 1.3.3.)

Zu Variante b

Gerät 1., außerdem

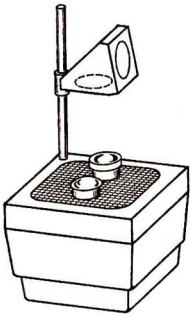
6. großer Fünffachspalt aus Pappe ⑧ (Spaltlänge 100 mm, Spaltbreite 2 mm, Spaltabstand 8 mm) (siehe 1.3.3.)
7. Linsenkörper, verschiedene Brennweiten, bi- oder plankonvex
8. Linsenkörper, bikonkav

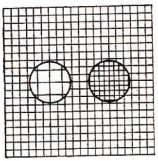
Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 3.0.1.!
2. In diesem Versuch übernimmt gewissermaßen die Projektionsoptik die Funktion des menschlichen Auges und „betrachtet" durch die Linsen hindurch die virtuellen Bilder. Der sonst nur in Einzelbeobachtung durchführbare Vergleich gestaltet sich mit Hilfe dieser Versuchsanordnung sehr überzeugend und effektiv und ist frei von subjektiven Einflüssen.

Variante a

Auf die Projektionsfläche des Tageslichtschreibprojektors bringt man die Rasterfolie, deren Rasterstrichabstand etwa 5 mm betragen sollte. Darauf legt man nebeneinander die beiden Distanzringe aus Pappe; ihr Durchmesser soll dem der ungefaßten Linsen entsprechen, die Höhe der Ringe wählt man etwa zu $^1/_3$ des Absolutwertes der Brennweite der Linsen. Nachdem man die ungefaßten Linsen auf die Distanzringe gebracht hat, stellt man das Projektionsbild so ein, daß der Raster wie auch das vergrößerte bzw. verkleinerte Rastermuster im Inneren der projizierten Linsenflächen gleich scharf erscheint (Abb. 3.1.9./1). Man beobachtet in der Gegenüberstellung die vergrößernde Wirkung der Sammellinse und die verkleinernde der Zerstreuungslinse.





Nebenbild

Abb. 3.1.9./1 Versuchsanordnung zum Vergleich der virtuellen Bilder von Sammel- und Zerstreuungslinsen. Nebenbild: Zu beobachtendes Bild an der Projektionswand

Variante b

Die Fünffachblende wird mit dem Tageslichtschreibprojektor vergrößert auf der Projektionswand abgebildet. Die bi- oder plankonvexen und der bikonkave Linsenkörper werden mit ihren Schmalseiten quer zur Spaltrichtung symmetrisch auf die Spaltblende gelegt. An der Projektionswand kann man die vergrößernde bzw. verkleinernde Wirkung beobachten.

3.1.10. Beobachtung der virtuellen Bilder an Sammel- und Zerstreuungslinsen [SE]

1. Blendscheibe mit halber Sammellinse Ⓢ (siehe 1.3.1.)
2. Blendscheibe mit halber Zerstreuungslinse Ⓢ (siehe 1.3.1.)
3. 2 Diarähmchen mit Meßmarken Ⓢ (siehe 1.3.1.)
4. 3 T-Füße
5. Blendrahmen mit Schiebeschacht
6. Handapparat
7. Lineal

Methodischer Hinweis

Der Versuch zur Beobachtung von virtuellen Bildern an Sammel- und Zerstreuungslinsen eignet sich wegen der subjektiven Beobachtung vorwiegend als Praktikumsexperiment. Er gestattet, Art und Ort des Bildes in bezug auf den Gegenstand zu bestimmen und die Abbildungsgleichung zu bestätigen.

Versuch

Auf einer kurzen optischen Bank werden in Beobachtungsrichtung die halbe Sammel- bzw. Zerstreuungslinse, der Blendrahmen mit Schiebeschacht und der Handapparat in der angegebenen Reihenfolge aufgebaut. Die zwei Diarähmchen mit den genau bis zur Mitte reichenden Meßmarken werden eingeschoben, so daß bei der Verwendung der Sammellinse die erste Marke unterhalb, die zweite oberhalb der optischen Achse steht. Bei Verwendung der Zerstreuungslinse ist die umgekehrte Reihenfolge einzuhalten (Abb. 3.1.10./1).

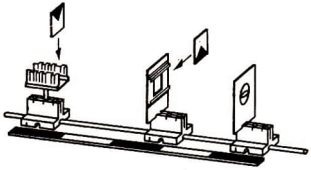


Abb. 3.1.10/1 Versuchsanordnungen zur Beobachtung und Ausmessung von virtuellen Bildern an Sammel- und Zerstreuungslinsen

Das Auge blickt in Höhe der optischen Achse durch die Linse. Es wird das virtuelle Bild der unteren Meßmarke mit der über der Schnittfläche liegenden oberen Meßmarke verglichen. Man beobachtet zweckmäßigerweise nur mit einem Auge und schließt das andere. Bewegt man das Auge in gleichbleibender Höhe von links nach rechts, so ändert sich die Stellung der Meßmarken zueinander. Durch Verschieben einer der beiden Meßmarken kann eine Stelle gefunden werden, an der beim Bewegen des Auges keine Verschiebung der Meßmarken gegeneinander erfolgt. Dies ist der Fall, wenn die obere Meßmarke genau am Ort des virtuellen Bildes der unteren Meßmarke steht.
Es ist möglich, Gegenstands- und Bildweite zu messen, den Versuch bei geänderter Stellung der Meßmarken zu wiederholen und die Ergebnisse in einer Tabelle

zusammenzufassen. Auswertend kann die Brennweite der Sammel- oder Zerstreuungslinse ermittelt werden.

Meßwerttabelle

Linse	Gegenstandsweite s in m	Bildweite s' in m	Brennweite f in m
Sammellinse $f = +140$ mm	0,050	−0,078	0,14*
	0,075	−0,160	0,14
	0,090	−0,260	0,14
	0,100	−0,350	0,14
Zerstreuungslinse $f = -225$ mm	0,500	−0,155	−0,22
	0,400	−0,145	−0,23
	0,300	−0,130	−0,23
	0,250	−0,120	−0,23

*Die Werte sind stark gerundet.

Feuer

3.1.11. Bestimmung der Brennweite von dünnen Sammellinsen ◑, ●

Zu Variante a

1. Sechskantschiene (0,5 m)
2. großer Klemmreiter
3. kleiner Klemmreiter
4. Blendscheibe mit Sammellinse unbekannter Brennweite
5. transparenter Schirm
6. Spiegel auf Stiel
7. Meßleiste (0,5 m)
8. 3 Meßleistenhalter mit Markierungsreitern

Zu den Varianten b und c ◑ ; ●

Geräte 1. (1 m), 2. (3mal), 3. bis 5., 8., außerdem

9. Meßleiste (1 m)
10. Optikleuchte
11. Blendscheibe mit Schiebeschacht
12. Transparentobjekt

Zu Variante d ◑ ; ●

Geräte 1., 2. (3mal), 4., 7., 8., 10., 11. (2mal), außerdem

13. Diarähmchen mit Transparentobjekt und kleinem Bildschirm Ⓢ (siehe 1.3.1.)
14. Spiegel (50 mm × 50 mm) Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Methodischer Hinweis

Soll bei der Bestimmung der Brennweite von Linsen die Abbildungsgleichung geübt und angewendet werden, empfiehlt sich die Variante b oder c. Ist hingegen

ein größerer Vorrat von Linsen zu prüfen und sind die Brennweiten möglichst schnell und ohne Rechenaufwand zu bestimmen, dann ist die Variante d am besten geeignet.

Variante a

Die Sammellinse unbekannter Brennweite und der transparente Schirm werden hintereinander auf der optischen Bank aufgebaut. Mit Hilfe von Stativmaterial wird der Spiegel im Schiebeschacht der Blendscheibe in Höhe der optischen Achse montiert. Man richtet die gesamte Anordnung gegen die Sonne und spiegelt das parallele Sonnenlicht auf die Linse. Nunmehr wird der transparente Schirm so weit längs der optischen Achse verschoben, bis ein scharfes Bild der Sonne kurzzeitig eingestellt ist. (Achtung! Brandgefahr! Eventuell Wärmefilter — Küvette mit Kupfersulfatlösung — in den Strahlengang bringen!) Die Entfernung Linse—Schirm mißt man an der Meßleiste. Die gemessene Länge ist die Brennweite der Sammellinse (Abb. 3.1.11./1a).

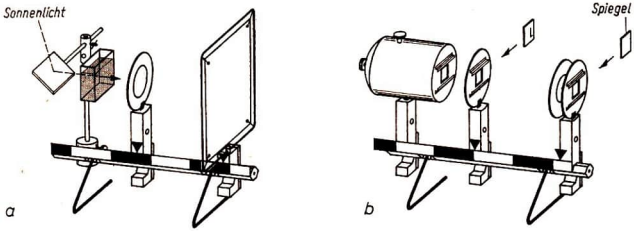


Abb. 3.1.11./1 Versuchsanordnungen zur Bestimmung der Brennweite von dünnen Sammellinsen bei Verwendung von Sonnenlicht (a) oder bei Verwendung einer Spiegelanordnung für den doppelten Lichtdurchgang durch die Linse (b)

Variante b

An den beiden Enden der langen optischen Bank, aber mindestens in einer Entfernung der vierfachen Brennweite der untersuchten Linse, werden die Optikleuchte und der transparente Schirm aufgestellt. Dicht vor der Leuchte wird das Transparentobjekt im Schiebeschacht der Blendscheibe untergebracht. Zwischen Objekt und Schirm wird die Sammellinse unbekannter Brennweite solange verschoben, bis ein vergrößertes, reelles, umgekehrtes Bild auf dem Schirm abgebildet wird. Zur Scharfeinstellung kann über die Linse ein schmaler Pappstreifen gehängt werden (V 3.1.7.). Gegenstands- und Bildweite werden gemessen. Die Brennweite wird unter Verwendung der Abbildungsgleichung berechnet.

Variante c

Das Verfahren nach Bessel ist ähnlich wie Variante b. Ist das reelle, vergrößerte Bild des Objektes auf dem Schirm scharf eingestellt, wird die Stellung der Linse markiert. Nunmehr verschiebt man die Linse auf den Schirm zu um die Strecke a,

bis auf dem Bild das scharfe reelle, verkleinerte Bild des Objektes zu beobachten ist. Gemessen wird noch die Entfernung e vom Objekt bis zum Schirm. Die Brennweite berechnet sich dann nach der Gleichung

$$f = \frac{1}{4}\left(e - \frac{a^2}{e}\right).$$

Variante d

Auf der optischen Bank wird die Optikleuchte aufgestellt. Dicht davor ordnet man eine Blendscheibe mit Schiebeschacht an, in den man ein Diarähmchen einschiebt, das in der einen Hälfte ein Transparentobjekt, in der anderen einen kleinen Bildschirm enthält.
Man sorgt für gute Beleuchtung des Transparentobjektes. Auf einem Klemmreiter ordnet man gemeinsam die Blendscheibe mit der Sammellinse unbekannter Brennweite und eine zweite Blendscheibe mit Schiebeschacht an. In dem Schiebeschacht wird ein ebener Spiegel untergebracht, der das die Linse durchsetzende Licht wieder zur Linse reflektiert.
Verschiebt man diesen Reiter langsam längs der optischen Achse, so findet man leicht eine Stellung, bei der das reelle, umgekehrte und gleich große Bild des Transparentobjektes auf dem Schirm neben dem Objekt scharf abgebildet wird. Man mißt die Entfernung Linse—Objekt und hat damit die Brennweite ermittelt (Abb. 3.1.11./1b).

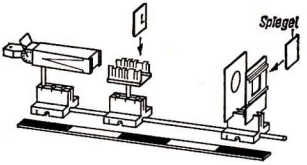


Abb. 3.1.11./2 Versuchsanordnung zur Bestimmung der Brennweite von dünnen Sammellinsen nach Variante d im Schülerexperiment

Bemerkung

Sämtliche Varianten dieses Versuches sind mit SEG als Schülerexperiment ausführbar. Für die Varianten b und c gestaltet man den Versuchsaufbau wie in Abb. 3.1.7./1b, während für die Variante d ein Aufbau nach 3.1.11./2 empfohlen wird.

3.1.12. Bestimmung der Brennweite von dünnen Zerstreuungslinsen ◑; ●

Zu Variante a

Geräte 1. bis 8. wie bei V 3.1.11., jedoch anstelle von

4. Zerstreuungslinse mit unbekannter Brennweite

Zu Variante b ◑; ●

Geräte wie bei V 3.1.11., Varianten b, c oder d, jedoch anstelle von

4. Sammellinse bekannter Brennweite und Zerstreuungslinse unbekannter Brennweite

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 3.1.11.!
2. Die Variante a bietet Möglichkeiten der Anwendung von Kenntnissen aus der Geometrie (2. Strahlensatz).
3. In der Variante b wird die Zerstreuungslinse mit einer Sammellinse kombiniert, so daß insgesamt ein sammelndes System entsteht und dann wie eine Sammellinse zu behandeln ist. Die Brennweite der Zerstreuungslinse muß dann berechnet werden. Die Wahl der Methoden b oder c oder d aus V 3.1.11. hängt von den mathematischen Kenntnissen und Fertigkeiten der Schüler ab.

Variante a

Der Versuchsaufbau erfolgt ähnlich wie beim V 3.1.11., Variante a. Anstelle der Sammellinse bringt man eine Zerstreuungslinse in den Strahlengang. Auf dem transparenten Schirm beobachtet man eine Kreisfläche mit dem Durchmesser D, der größer ist als der Durchmesser d der Linsenöffnung. Mißt man beide und dazu den Abstand e von der Linse zum Schirm, so läßt sich die Brennweite der Zerstreuungslinse berechnen nach der Beziehung

$$|f'| = e\frac{d}{D-d}.$$

Einfacher gestaltet sich die Messung, wenn auf dem transparenten Schirm eine Kreisfläche mit dem Durchmesser $D = 2d$ gezeichnet wird und der Schirm so lange längs der optischen Achse verschoben wird, bis sich der Zerstreuungskreis und der gezeichnete Kreis decken. Dann ist $|f'| = e$.

Variante b

Der Versuchsaufbau und die -durchführung erfolgen genau wie bei den Varianten b oder c oder d des V 3.1.11. Anstelle der Sammellinse unbekannter Brennweite wird jedoch eine Sammellinse bekannter Brennweite mit einer Zerstreuungslinse unbekannter Brennweite so dicht wie möglich zusammengesetzt in den Strahlengang gebracht. (Die Linsenkombination muß aber noch sammelnde Wirkung zeigen.) Man bestimmt die Gesamtbrennweite f_g der Linsenkombination und berechnet die Brennweite der Zerstreuungslinse unter Verwendung der bekannten Brennweite der Sammellinse.
Weil die Linsen dicht zusammenstehen, kann der Abstand d der beiden kombinierten Linsen vernachlässigt werden. Es gilt dann in erster Näherung:

$$f_- = \frac{f_g \cdot f_+}{f_+ - f_g}.$$

Können die Linsen aus irgendwelchen Gründen nicht dicht zusammengesetzt werden, so erfolgt die Berechnung nach der Gleichung

$$f_- = \frac{f_g(f_+ - d)}{f_+ - f_g}.$$

Hierin bedeuten:

f_- ... Brennweite der Zerstreuungslinse
f_g ... Gesamtbrennweite der Linsenkombination
f_+ ... Brennweite der Sammellinse
d ... Abstand der beiden Linsen

3.2. Nachweis der Fehler bei der Abbildung mit Hilfe von Linsen

3.2.1. Demonstration der hauptsächlichen Fehler bei der Abbildung durch Linsen ●

1. Sechskantschiene (1 m)
2. Optikleuchte
3. großer Klemmreiter
4. 2 kleine Klemmreiter
5. große, plankonvexe Kondensorlinse, gefaßt, Durchmesser 150 mm bis 200 mm oder Doppelkondensorlinse (Fresnellinse aus einem Tageslichtschreibprojektor)
6. Blende mit konzentrischen Lochreihen bzw. große Blende mit konzentrischen Lochreihen, passend zu 5. Ⓢ (siehe 1.3.1.)
7. transparenter Schirm

Methodischer Hinweis

Der Versuch zeigt gleichzeitig eine Vielzahl von Abbildungsfehlern (chromatische und sphärische Aberration, Astigmatismus, Koma).
Da die entstehenden Figuren sehr farbenprächtig sind, eignet sich dieser Versuch ganz besonders zur Einführung der besonderen Erscheinungen der Abbildungsfehler durch Linsen.

Versuchsvorbereitungen

Aus Pappe fertigt man eine Blende mit zwei konzentrischen Lochreihen (mit Locheisen gestanzt). Der äußere Lochkranz hat einen Durchmesser, der nur wenig kleiner ist als die freie Linsenöffnung; der innere Lochkranz hat einen Durchmesser von etwa einem Drittel des Linsendurchmessers. Die Löcher der beiden Lochreihen stehen am besten auf Lücke. Mit Klebefilm wird die Blende an der Linsenfassung befestigt. Unter Verwendung von Stativmaterial wird die Linse auf einem kleinen Klemmreiter befestigt und möglichst gut zentriert.

Versuchsaufbau und -durchführung

Auf der langen Sechskantschiene ordnet man an einem Ende die Optikleuchte an. In die Mitte bringt man die vorbereitete Linse mit der befestigten Blende; bei Verwendung einer Plankonvexlinse kehrt man die Planseite der Lichtquelle zu, bei Verwendung der Doppel-Fresnellinse die etwas konkav gewölbte Seite. Ganz dicht hinter der Linse wird der transparente Schirm aufgestellt (Abb. 3.2.1./1). Man beobachtet ein Bild wie im Nebenbild a. Die Lichtpunkte der inneren Lochreihe zeigen noch keinen, die Lichtpunkte der äußeren Lochreihe schon einen deutlichen Farbfehler.

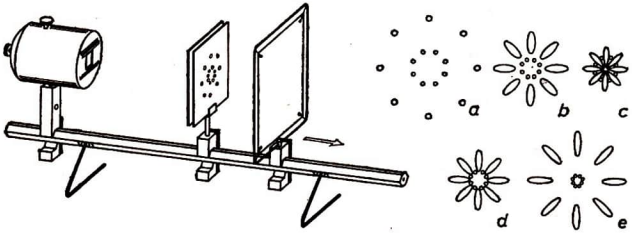


Abb. 3.2.1./1 Versuchsanordnung zum Nachweis der hauptsächlichsten Fehler bei der Abbildung durch Linsen. Nebenbild: Zu beobachtende farbenprächtige Figuren

Entfernt man den Schirm langsam von der Linse, so wandern die Lichtpunkte auf die optische Achse zu. Die Punkte der äußeren Lochreihe werden kometenschweifartig deformiert und weisen spektrale Zerlegung des Lichtes auf, innen blau, außen rot; chromatische Aberration, Nebenbild b.
Beim weiteren Entfernen überholen die Lichtschweife der äußeren Lochreihe die spektral noch wenig zerlegten Lichtpunkte der inneren Reihe und vereinigen sich zuerst zu einem blauen und dann zu einem roten Bildpunkt; chromatische Aberration, Nebenbild c.
Schließlich vereinigen sich die achsennahen Lichtpunkte auch zu einem leicht farbgestörten Bildpunkt, während sich die kometenartig verzeichneten Lichtpunkte der achsenfernen Lochreihe in umgekehrter Farbfolge vom Mittelpunkt entfernen; sphärische Aberration, Nebenbilder d und e.
Wiederholt man den Versuch bei leicht gegen die optische Achse verdrehter Linse, beeobachtet man die von den Randstrahlen erzeugten, eigenartig verschlungenen Komafiguren (Koma), während die achsennahen Strahlen sich überhaupt nicht mehr in einem Punkt sammeln lassen (Astigmatismus).

Bemerkungen

1. Dreht man die Linsen um 180°, so läßt sich zeigen, daß die Abbildungsfehler erheblich geringer werden. Das gilt besonders für den sphärischen Fehler.
2. Anstelle der sehr großen Kondensorlinse bzw. Doppel-Fresnellinse kann auch eine kleinere, plankonvexe Kondensorlinse verwendet werden. Die Deutlichkeit der Erscheinungen ist dabei jedoch geringer.

3.2.2. Demonstration der chromatischen Aberration einer Sammellinse ●

1. Sechskantschiene (1 m)
2. Optikleuchte
3. 3 große Klemmreiter
4. Kondensorlinse ($f = +120$ mm)
5. Irisblende
6. kleiner Klemmreiter
7. transparenter Schirm
8. Ringblende aus Pappe Ⓢ (siehe 1.3.1.)

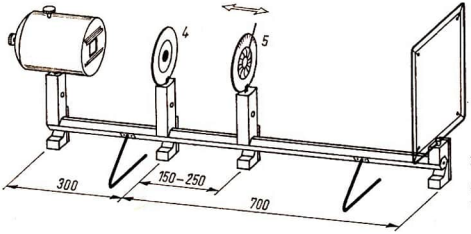


Abb. 3.2.2./1
Versuchsanordnung zur Demonstration der chromatischen Aberration

Methodischer Hinweis

Der Versuch zeigt den Farbfehler einer Sammellinse sehr deutlich und überzeugend, sollte aber zum besseren Verständnis für das Zustandekommen gemeinsam mit V 3.2.4. vorgeführt werden.

Versuch

Wie die Abbildung 3.2.2./1 zeigt, werden Lichtquelle, Linse, Irisblende und transparenter Schirm aufgestellt. Die Planseite der Kondensorlinse ist der Lichtquelle zuzukehren. Die Leuchte wird ohne Kondensorlinse verwendet. Dicht vor die Linse wird die Ringblende gestellt, deren Außendurchmesser etwa der Linsenöffnung entspricht. Im einfachsten Fall genügt es schon, mit Klebefilm eine Kreisscheibe auf der Linse zu befestigen, die einen äußeren Linsenring frei läßt. Mit der hinter der Linse aufgestellten Irisblende kann je nach Entfernung von der Linse der blaue oder der rote Anteil ausgeblendet werden; auf dem transparenten Schirm wird dementsprechend ein blauer oder ein roter Ring abgebildet. Man kann den Schirm auch an die Stelle der Irisblende rücken. Dann erscheint auf dem Schirm entweder ein blauer Kreis mit roter Mitte oder ein roter Kreis mit blauer Mitte.

Bemerkung

Mit den Geräten des SEG Optik kann der Versuch auch als Schülerexperiment durchgeführt werden. Anstelle der Irisblende verwendet man einen Lochblendstreifen aus Pappe (mit ausgestanzten Löchern unterschiedlichen Durchmessers), der in einem Blendrahmen mit Schiebeschacht untergebracht wird.

3.2.3. Nachweis der chromatischen Aberration einer dünnen Sammellinse ●

1. Sechskantschiene (1 m)
2. Optikleuchte
3. 4 große Klemmreiter
4. kleiner Klemmreiter
5. 2 Kondensorlinsen ($f = +120$ mm)
6. Blendscheibe mit Linse ($f = +150$ mm)
7. Blendscheibe mit Schiebeschacht
8. Bildschirm, undurchsichtig
9. Spalt (50 mm × 50 mm; 1 mm breit)
10. Transparentpapier

Methodische Hinweise

1. Der Versuch läßt den sonst kaum wahrnehmbaren Farbfehler einer dünnen Sammellinse sichtbar werden.
2. Es empfiehlt sich, zum besseren Verständnis des Zustandekommens der chromatischen Aberration den Versuch gemeinsam mit V 3.2.4. vorzuführen.

Versuch

Optikleuchte und Doppelkondensor werden an einem Ende der optischen Bank aufgebaut, der Bildschirm am anderen. Dicht vor den Kondensor wird der Spalt gebracht. Mit der Linse bildet man dann den Spalt vergrößert und scharf auf dem Bildschirm ab. Um die höchste Lichtstärke zu erreichen, bildet man mit der Kondensorlinse die Glühwendel der Lichtquelle in der Linse ab, wovon man sich durch Vorhalten eines Stückes Transparentpapier vor die Linse überzeugen kann (Abb. 3.2.3./1). Nunmehr dreht man den Schirm so, daß er nur noch einen

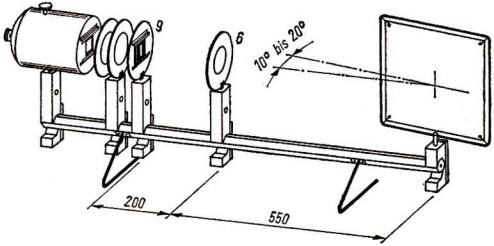


Abb. 3.2.3./1 Versuchsanordnung zum Nachweis der chromatischen Aberration einer dünnen Sammellinse

kleinen Winkel mit der optischen Achse einschließt und das Licht fast streifend auf ihn fällt. Das Spaltbild ist nunmehr stark verbreitert und zeigt deutlich einen roten und einen blauen Saum.

Bemerkungen

1. Der Versuch kann abgewandelt werden: Man bringt zusätzlich ein Blaufilter in den Strahlengang und bildet den Spalt scharf auf einem transparenten Schirm ab. Danach wechselt man es gegen ein Rotfilter aus. Um wiederum ein scharfes Bild zu erhalten, muß man bei unveränderter Gegenstandsweite den Schirm verrücken. Das heißt aber, daß die Linse für rotes und blaues Licht unterschiedliche Brennweiten besitzt.
2. Mit Hilfe des SEG Optik kann der Versuch als Schülerexperiment durchgeführt werden. Man bildet dazu den in die Experimentierleuchte eingeschobenen Spalt mit der Linse $f = +100$ mm leicht vergrößert auf dem außerhalb des Stativstabsstehenden Schirm scharf ab und dreht danach den Schirm.

3.2.4. Demonstration der Entstehung der chromatischen Aberration einer Sammellinse ◑

Zu Variante a

1. Manipermtafel
2. 2 Haftleuchten
3. Linsenkörper, bikonvex ($f = +90$ mm)
4. weißes Zeichenblatt, A 4
5. Manipermkerne

Zu Variante b [SE]

6. Heftleuchte (ohne Kondensorlinse)
7. Zweispaltblende ⓢ (siehe 1.3.1)
8. weiße Unterlage
9. Flachglaskörper, bikonvex

Methodischer Hinweis

Im Gegensatz zu V 3.2.2. und 3.2.3. zeigt dieser Versuch die Entstehung der chromatischen Aberration sehr anschaulich, besonders wenn man hierzu noch die Dispersion des Lichtes am Prisma zeigt.

Variante a

Auf der Hafttafel werden das A 4-Blatt mit Manipermkernen und der Linsenkörper befestigt. Zwei parallele Lichtspuren treffen den Linsenkörper dicht an dem Linsenrand als achsenferne Strahlen. Im Konvergenzbereich der gebrochenen

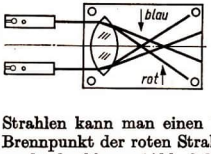


Abb. 3.2.4./1 Versuchsanordnung zum Nachweis der Entstehung der chromatischen Aberration bei Sammellinsen

Strahlen kann man einen blauen Kern und einen roten Saum beobachten; der Brennpunkt der roten Strahlen liegt weiter entfernt von der Linse als der Brennpunkt der blauen (Abb. 3.2.4./1).

Variante b

In die Heftleuchte ohne Kondensorlinse wird die Zweispaltblende eingeschoben. Es werden zwei leicht divergente Strahlen auf den Flachglaskörper gerichtet. Man findet im Konvergenzbereich der gebrochenen Strahlen ebenfalls einen blauen Kern und einen roten Saum.

3.2.5. Demonstration der sphärischen Aberration einer Sammellinse

1. Sechskantschiene (1 m)
2. Optikleuchte
3. 2 große Klemmreiter
4. kleiner Klemmreiter
5. Blendscheibe mit Linse ($f = +100$ mm)
6. transparenter Schirm
7. 2 Ringblenden aus Pappe ⑧ (siehe 1.3.1.)
8. Transparentobjekt

Versuch

Die Optikleuchte mit eingeschobenem Transparentobjekt und der Bildschirm werden jeweils am Ende einer langen optischen Bank aufgebaut. Zwischen beiden ordnet man auf einem Klemmreiter die Linse mit einer Brennweite von 100 mm gemeinsam mit einer Ringblende, die nur die Randstrahlen freigibt, an. Durch Verschieben der Linse längs der optischen Achse stellt man das reelle vergrößerte

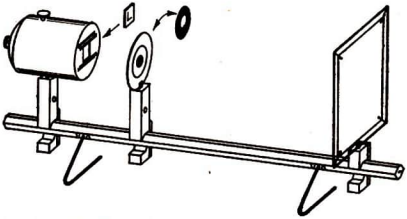


Abb. 3.2.5./1 Versuchsanordnung zur Demonstration der sphärischen Aberration einer Sammellinse

Bild des Objektes ein (Abb. 3.2.5./1). Danach wechselt man die Ringblende gegen eine Lochblende aus, die zur Abbildung nur die achsennahen Strahlen freigibt. Das Bild auf dem Schirm ist unscharf geworden. Man muß den Schirm um eine kleine Strecke bei sonst unveränderten Bedingungen von der Linse entfernen, um wiederum ein scharfes Bild des Gegenstandes auf dem Schirm abzubilden.

Bemerkung

Die Abmessungen für die Blenden bei der Demonstration mit drei verschiedenen Linsenzonen können dem Abschnitt 1.3.1. entnommen werden. Sollen nur zwei Zonen ausgeblendet werden, beträgt der Ring- bzw. Lochdurchmesser 0,71 d, wobei d die freie Linsenöffnung ist.

3.2.6. Demonstration der Entstehung der sphärischen Aberration einer Sammellinse ◑

Zu Variante a ◑

1. Manipermtafel
2. 4 Haftleuchten
3. Linsenkörper, bikonvex ($f = +90$ mm)
4. Linsenkörper, bikonkav

Zu Variante b [SE] ◑

5. Heftleuchte
6. Vierspaltblende Ⓢ (siehe 1.3.1.)
7. Flachglaskörper, bikonvex
8. weiße Unterlage

Methodischer Hinweis

Während V 3.2.5. lediglich die Ergebnisse der sphärischen Aberration zeigt, ist mit diesen Varianten zur Haft- bzw. Heftoptik die Entstehung zu veranschaulichen.

Variante a

An der Hafttafel mit vorgezeichneter optischer Achse wird der Linsenkörper befestigt. Man richtet zuerst zwei achsennahe Lichtspuren parallel zur optischen Achse auf den Linsenkörper und markiert den Konvergenzpunkt hinter der Linse mit Kreide. Danach werden zusätzlich zwei weitere Haftleuchten befestigt, ihre Lichtspuren werden als achsenferne Parallelstrahlen eingerichtet. Der Konvergenzpunkt fällt nicht mit dem bereits markierten zusammen, sondern liegt näher an der Linse (Abb. 3.2.6./1a). Ersetzt man den bikonvexen Linsenkörper durch einen bikonkaven, läßt sich zeigen, daß auch Zerstreuungslinsen sphärische Aberration zeigen (Abb. 3.2.6./1b).

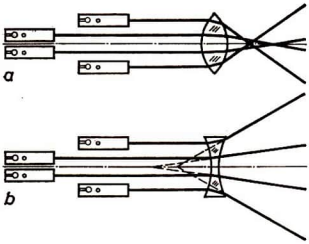


Abb. 3.2.6./1 Versuchsanordnung zur Demonstration des Strahlenverlaufes bei der Entstehung der sphärischen Aberration an Sammel- (a) und Zerstreuungslinsen (b)

Variante b

In die Heftleuchte wird die Vierspaltblende eingeschoben. Auf der weißen Unterlage werden parallellaufende Lichtspuren erzeugt. Bringt man den Flachglaskörper in den Strahlengang, beobachtet man die unterschiedliche Brennpunktlage für achsennahe und achsenferne Strahlen.
Entfernt man die Vierspaltblende und richtet das volle Lichtbündel auf den Flachglaskörper, kann man die durch die sphärische Aberration verursachte Diakaustik beobachten.

Bemerkungen

1. Nach Abbildung 3.2.6./1 können mit den vorgeschlagenen Anordnungen auch andere Linsenkörper untersucht werden.
2. Stehen nicht 4 Haftleuchten zur Verfügung, so können die achsennahen und die achsenfernen Lichtspuren (Variante a) auch nacheinander untersucht werden.

3.2.7. Demonstration des Astigmatismus schiefer Bündel ●

Zu Versuch 1

1. Sechskantschiene (0,5 m)
2. Optikleuchte
3. 4 große Klemmreiter
4. kleiner Klemmreiter
5. 2 Kondensorlinsen ($f = +120$ mm)
6. Kreuzblende ⑧ (siehe 1.3.1.)
7. großer Spiegel auf Stiel
8. großer Glastrog (Aquarium)
9. Fluoreszein oder Trübungsmittel

Zu Versuch 2

Geräte 1. bis 4., 5. (nur einmal), außerdem

10. transparenter Schirm
11. Irisblende
12. Blendscheibe mit Schiebeschacht
13. Diarähmchen mit Transparentpapier ⑧ (siehe 1.3.1.)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 3.0.2.!
2. Von den beiden Versuchen hat Versuch 1 den Vorteil, das gesamte Lichtbündel hinter der Linse zu erfassen und somit einen Eindruck von der Entstehung des Astigmatismus zu vermitteln. Der Versuch 2 zeigt sehr überzeugend, daß es bei der Abbildung durch schiefe Bündel mit einer nicht korrigierten Linse nicht gelingt, einen Gegenstandspunkt wieder als Bildpunkt abzubilden.

Versuch 1

Der Versuch wird ähnlich wie V 3.1.1., Variante c, aufgebaut (Abb. 3.1.1./2a). Mit der ersten Kondensorlinse wird das Licht der Lichtquelle nahezu parallel bis ganz leicht divergent gemacht und so auf die zweite Kondensorlinse gerichtet. An der Blendscheibe dieser Linse ist mit Klebefilm eine Kreuzblende von 8 mm bis 10 mm Spaltbreite befestigt. Dicht hinter der Linse steht der Glastrog längs im Strahlengang. Er wird mit Hilfe von Stativmaterial auf die Höhe der optischen Achse gebracht. Der Trog ist mit Wasser gefüllt, das mit Fluoreszeinlösung oder einem Trübungsmittel versetzt wurde. Über dem Trog ist ein Spiegel mit Stiel

befestigt, der, um 45° geneigt, den Betrachtern den Einblick in den Trog von oben gestattet. Wenn die Linse senkrecht zur optischen Achse steht, sind die Konvergenzpunkte des in der Flüssigkeit sichtbaren Lichtbündels im Trog von der Seite und im Spiegel von oben betrachtet übereinstimmend.
Verdreht man die Linse etwa bis zu 30° gegen die optische Achse, so ändert sich die Lage der Konvergenzpunkte. Der Schnittpunkt der in der Meridionalebene gesammelten Strahlen liegt näher an der Linse als der Schnittpunkt der in der Sagittalebene gesammelten Strahlen.

Versuch 2

Vor der Optikleuchte werden auf einem Klemmreiter die Blendscheibe mit dem Schiebeschacht und die Irisblende gemeinsam aufgebaut. In den Schacht wird ein Diarähmchen mit Transparentpapier geschoben. Etwa in einer Entfernung, die der doppelten Brennweite entspricht, wird die als Abbildungslinse dienende Kondensorlinse aufgestellt. Auf dem Schirm wird das scharfe Bild des Gegenstandes, der etwa bis auf 2 mm geschlossenen Irisblende, aufgefangen.
Nach Drehen der Linse um 20° bis 30° gegen die optische Achse erscheint das ehemals scharfe Bild des Gegenstandes verschwommen. Verschiebt man den Schirm längs der optischen Achse, wird in einer bestimmten Stellung die Lochblende als lotrechter Strich, in einer anderen Stellung weiter von der Linse entfernt als waagerechter Strich abgebildet. Dazwischen entstehen lotrecht oder waagerecht liegende Ellipsen.

3.2.8. Demonstration der astigmatischen Abbildung eines Kreuzgitters ●

1. Sechskantschiene (1 m)
2. Optikleuchte
3. 2 große Klemmreiter
4. kleiner Klemmreiter
5. Kondensorlinse ($f = +120$ mm)
6. transparenter Schirm
7. Diarähmchen mit Transparentpapier und aufgezeichnetem Kreuzgitter Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Methodischer Hinweis

Der Versuch stellt eine Abwandlung des Versuches 3.2.7., Versuch 2, dar. Er ist besonders eindrucksvoll, weil er den Einfluß der Abbildung durch schiefe Bündel auf einen flächenhaften Gegenstand sichtbar macht.

Versuch

Das im Schiebeschacht der Optikleuchte untergebrachte Diarähmchen mit dem auf Transparentpapier gezeichneten Kreuzgitter wird mit der Kondensorlinse scharf auf dem Schirm abgebildet, so daß etwa ein gleich großes oder nur schwach vergrößertes, reelles Bild entworfen wird (Abb. 3.2.8./1). Dreht man nunmehr die Linse um 20° bis 30° gegen die optische Achse, ist die Schärfe des Bildes verlorengegangen. Nähert man bei sonst unveränderten Bedingungen den Schirm langsam der Linse, findet man eine Stellung, in der die waagerechten Striche

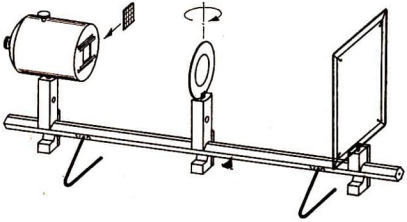


Abb. 3.2.8./1
Versuchsanordnung zur Beobachtung der astigmatischen Abbildung eines Kreuzgitters

scharf abgebildet werden. Bewegt man den Schirm noch weiter auf die Linse zu, so findet man eine Stellung, in der die lotrechten Striche scharf erscheinen.

Bemerkungen

1. Die Abbildung wird etwas verbessert, wenn man die Linse wie im Versuch 3.2.7 mit einer Kreuzblende versieht.
2. Verfügt man über einen Anastigmaten oder einen Doppelanastigmaten, so kann man den gleichen Versuch mit einem solchen korrigierten System vorführen. Noch bei Neigungen von etwa 45° gegen die Vertikale bildet der Anastigmat das Kreuzgitter unverzerrt und scharf ab.
3. Der Versuch kann mit dem SEG auch als Schülerexperiment durchgeführt werden, zur astigmatischen Abbildung des Kreuzgitters verwendet man die Sammellinse von $f = 50$ mm Brennweite.

3.2.9. Demonstration der Komafiguren durch Randstrahlen ●

1. Sechskantschiene (1 m)
2. Optikleuchte
3. 3 große Klemmreiter
4. kleiner Klemmreiter
5. Kondensorlinse ($f = +120$ mm)
6. Irisblende
7. Blendscheibe mit Schiebeschacht
8. transparenter Schirm
9. Diarähmchen mit Transparentpapier
   ⓢ (siehe 1.3.1.)
10. Ringblende
    ⓢ (siehe 1.3.1.)

Methodischer Hinweis

Der Astigmatismus ist mit Hilfe der verschlungenen Komafiguren am eindruckvollsten zu zeigen.

Versuch

Die mit Transparentpapier hinterlegte Irisblende wird von der Lichtquelle gut beleuchtet. In einer Entfernung, die etwa der doppelten Brennweite entspricht wird die abbildende Linse — versehen mit einer Ringblende zur Nutzung der Randstrahlen (vergleiche V 3.2.5.) — in den Strahlengang gebracht. Auf dem Schirm wird das reelle Bild der Lochblende aufgefangen (Abb. 3.2.9./1).

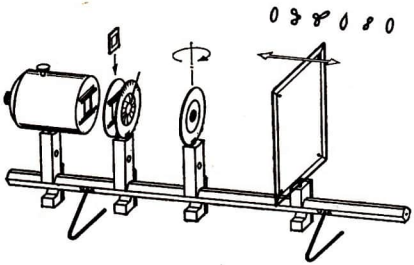


Abb. 3.2.9./1
Versuchsanordnung zur Beobachtung der Komafiguren

Nunmehr verdreht man die Linse um 20° bis 30° gegen die optische Achse. Die Lochblende wird nicht mehr scharf abgebildet. Je nachdem in welcher Entfernung von der Linse der Schirm gebracht wird, entstehen die verschlungenen Komafiguren, die meist außerdem noch mit einem Farbfehler behaftet sind.

Bemerkungen

1. Will man die Komafiguren einem größeren Kreis von Betrachtern vorführen, kann man der größeren Helligkeit wegen anstelle der Lochblende auch gleich die Glühwendel einer Glühpunktlampe abbilden.
2. Der Versuch gelingt sehr überzeugend bei Verwendung der großen Fresnellinse eines Tageslichtschreibprojektors.
3. Will man die Komafiguren im Schülerexperiment beobachten, bildet man den Glühfaden der Glühlampe in der Experimentierleuchte (ohne Kondensor) mit einer Sammellinse von $f = 100$ mm Brennweite mit Ringblende scharf auf dem Schirm ab, dreht die Linse um 20° bis 30° und verschiebt danach den Schirm.

3.2.10. Demonstration der Entstehung der Koma ◑

Zu Variante a ◑

1. Manipermtafel
2. 3 bis 4 Haftleuchten
3. Linsenkörper, bikonvex ($f = +90$ mm)

Zu Variante b ◑ [*SE*]

4. Heftleuchte
5. Fünfspaltblende Ⓢ (siehe 1.3.1.)
6. Flachglaskörper, bikonvex
7. weiße Unterlage

Methodischer Hinweis

Der Versuch zeigt anschaulich durch Lichtspuren das Zustandekommen der nicht punktförmigen Abbildung schiefer Bündel.

Variante a

An der Hafttafel mit vorgezeichneter optischer Achse wird der Linsenkörper befestigt und von drei bis vier achsenparallelen Lichtspuren getroffen.

Nach der Brechung sammeln sich die Spuren nahezu in einem Punkt. Verrückt man unter Beibehaltung der Parallelität die Haftleuchten so, daß der Lichteinfall einen Winkel von 10° bis 15° mit der optischen Achse einschließt, konvergieren die gebrochenen Strahlen außerhalb der optischen Achse nicht in einem Punkt sondern in einem ganzen Bereich, wobei die Entstehung der Koma deutlich zu sehen ist (Abb. 3.2.10./1a).

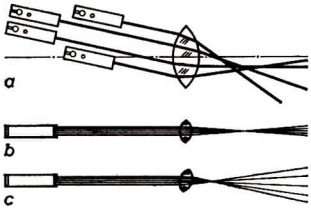


Abb. 3.2.10./1 Strahlenverlauf bei der Entstehung der Koma, dargestellt mit den Mitteln der Haftoptik (a) und der Heftoptik (b und c)

Variante b

Fünf zueinander parallele Spuren der Heftleuchte werden auf den Flachglaskörper gerichtet. Bei symmetrischem Strahlengang schneiden die gebrochenen Strahlen einander in einem Punkt. Verdreht man die Linse ein wenig, kann man sehr gut die Entstehung der Koma beobachten (Abb. 3.2.10./1b und c).

3.2.11. Demonstration der Bildfeldwölbung ●

1. Sechskantschiene (1 m)
2. Optikleuchte
3. 3 große Klemmreiter
4. kleiner Klemmreiter
5. Kondensorlinse ($f = +120$ mm)
6. Blendscheibe mit großer, transparentpapierbespannter Öffnung und Tuschezeichnung ⑧ (siehe 1.3.1.)
7. transparenter Schirm

Methodische Hinweise

1. Der Versuch zeigt schon bei Verwendung einfacher bikonvexer Linsen die Bildfeldwölbung überraschend deutlich.
2. Wie im V 3.2.1. ist die Demonstration der Bildfeldwölbung noch mit anderen Abbildungsfehlern behaftet, wovon der Farbfehler am deutlichsten hervortritt.

Versuch

Die Blendscheibe mit einer kreisförmigen Öffnung von etwa 100 mm und einer Strichzeichnung auf Transparentpapier (Abb. 3.2.11./1b) wird gut beleuchtet

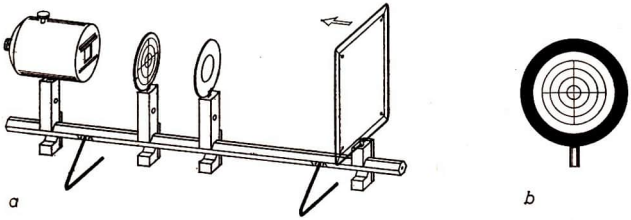


Abb. 3.2.11./1 Versuchsanordnung zum Nachweis der Bildfeldwölbung

und von der Kondensorlinse, Planseite zum Objekt, auf dem Schirm so abgebildet, daß der mittlere Kreis scharf gezeichnet wird (Abb. 3.2.11./1a). Rückt man bei unveränderter Stellung aller anderen Bauteile den Schirm langsam näher auf die Linse zu, kann man nacheinander die Kreise mit immer größerem Radius scharf auf den Bildschirm einstellen. Um auch den äußersten Kreis scharf abzubilden, muß man den Schirm um eine ganz erhebliche Strecke verschieben.
Die Radien und die Kreise werden dabei nicht an den gleichen Stellen scharf abgebildet; die Kreise sind dort scharf, wo die meridionalen Lichtbündel als Strich erscheinen, die Radien dort, wo die sagittalen Bündel ihre Striche zeichnen.

Bemerkungen

1. Man kann den Versuch auch ohne Bildschirm auf einer kurzen optischen Bank aufbauen, die auf einem fahrbaren Tisch oder Wagen montiert ist. Man muß dann den Wagen ein ganzes Stück auf die Projektionswand zu bewegen, wenn man beginnend vom innersten Kreis die äußeren scharf abbilden möchte.
2. Stellt man die Plankonvexlinse so auf, daß ihre Konvexseite zur Blende hin gerichtet ist, so ist das Bildfeld nicht so stark gewölbt wie vorher. Wegen der großen sphärischen Aberration erscheinen aber die äußeren Kreise verwaschen.
3. Durch Einengen des Strahlenganges mit Hilfe einer Irisblende kann man zeigen, daß diese kaum einen Einfluß auf die Größe der Bildfeldwölbung hat.
4. Als Schülerexperiment gelingt der Versuch bei Verwendung eines gut beleuchteten Transparentobjekts nach Abb. 1.3.1./7 und einer Linse von $f = +100$ mm Brennweite.

3.2.12. Demonstration der tonnen- und kissenförmigen Verzeichnung bei der Abbildung durch Sammellinsen bei falscher Pupillenlage ●

Zu Variante a

1. Sechskantschiene (1 m)
2. Optikleuchte
3. 3 große Klemmreiter
4. kleiner Klemmreiter
5. Blendscheibe mit Linse ($f = +150$ mm)
6. Irisblende
7. Diarähmchen mit Transparentpapier mit aufgezeichnetem Kreuzgitter ⑧ (siehe 1.3.1.)
8. transparenter Schirm

Zu Variante b

Geräte 1., 2., 3. (4mal), 4., 5., 8., außerdem

9. 2 Kondensorlinsen ($f = +120$ mm)
10. Blendscheibe mit Linse ($f = +100$ mm)
11. Blendscheibe mit Schiebeschacht
12. Diarähmchen mit durchsichtiger Folie und aufgezeichnetem Kreuzgitter Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Methodischer Hinweis

Der Versuch bietet die Möglichkeit, den Schülern zu zeigen, daß bei der optischen Abbildung nicht allein Spiegel und Linsen die Bildqualität bestimmen, sondern auch die richtige Pupillenlage, beispielsweise die richtige Anordnung der Blenden oder der Linsen.

Variante a

Das im Schiebeschacht der Optikleuchte untergebrachte Diarähmchen mit einem auf Transparentpapier gezeichneten Kreuzgitter wird mit Hilfe der Linse gleich groß oder leicht vergrößert auf dem Schirm abgebildet. Dann bringt man zum Nachweis der tonnenförmigen Verzeichnung die Irisblende zwischen Objekt und Linse (Stellung I), zum Nachweis der kissenförmigen Verzeichnung zwischen Linse und Schirm (Stellung II) in den Strahlengang (Abb. 3.2.12./1a).

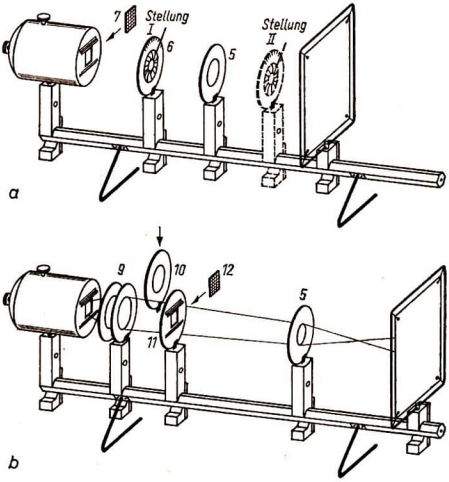


Abb. 3.2.12./1 Versuchsanordnung zur Demonstration der kissen- und tonnenförmigen Verzeichnung durch falsche Pupillenlage für die Abbildung eines transparenten (a) bzw. durchsichtigen (b) Körpers

Variante b

Der Aufbau erfolgt ähnlich wie bei Variante a. Anstelle des Transparentpapiers mit Kreuzgitter wird die durchsichtige Folie mit Kreuzgitter in den Schiebeschacht einer Blendscheibe gebracht und leicht vergrößert auf dem Schirm abgebildet. Zwischen Kreuzgitter und Optikleuchte bringt man noch den Doppelkondensor (Abb. 3.2.12./1b).
Man zeigt, daß das Bild nicht verzeichnet ist, wenn das reelle Bild der Glühwendel direkt im Objektiv liegt. Man kann sich durch Vorhalten eines Stückes Transparentpapier leicht davon überzeugen.
Nähert man die Lichtquelle dem Kondensor — das reelle Bild der Glühwendel wandert auf den Schirm zu — (das Bild liegt hinter der Linse), dann erscheint das Bild des Kreuzgitters kissenförmig verzeichnet.
Entfernt man die Lichtquelle vom Kondensor (das Bild liegt zwischen Linse und Objekt), so erscheint das Bild auf dem Schirm tonnenförmig verzeichnet. Dieser Effekt wird erheblich verstärkt, wenn man zusätzlich eine weitere Kondensorlinse von +100 mm hinzufügt.

3.3. Demonstration von Bau und Wirkungsweise von Projektor, fotografischer Kamera und menschlichem Auge

3.3.1. Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Projektors für durchsichtige Bilder ●

Zu Variante a

1. Sechskantschiene (1 m)
2. 5 große Klemmreiter
3. kleiner Klemmreiter
4. Glühpunktlampe (6 V; 5 A) auf 13 mm-Stiel ⓢ (siehe 1.3.1.)
5. 2 Kondensorlinsen ($f = +120$ mm)
6. Blendscheibe mit Linse ($f = +100$ mm)
7. Blendscheibe mit Linse ($f = +50$ mm)
8. Blendscheibe mit Schiebeschacht
9. Blendscheibe mit Hohlspiegel ($f = +35$ mm) ⓢ (siehe 1.3.1.)
10. transparenter Schirm
11. Farbdiapositiv, schwach gedeckt ⓢ
12. Deckblende aus Pappe ⓢ (siehe 1.3.1.)

Zu Variante b [SE]

Gerät 11., außerdem

13. Experimentierleuchte
14. 4 T-Füße
15. Blendrahmen mit Schiebeschacht
16. Blendrahmen mit Linse ($f = +100$ mm)
17. transparenter Schirm

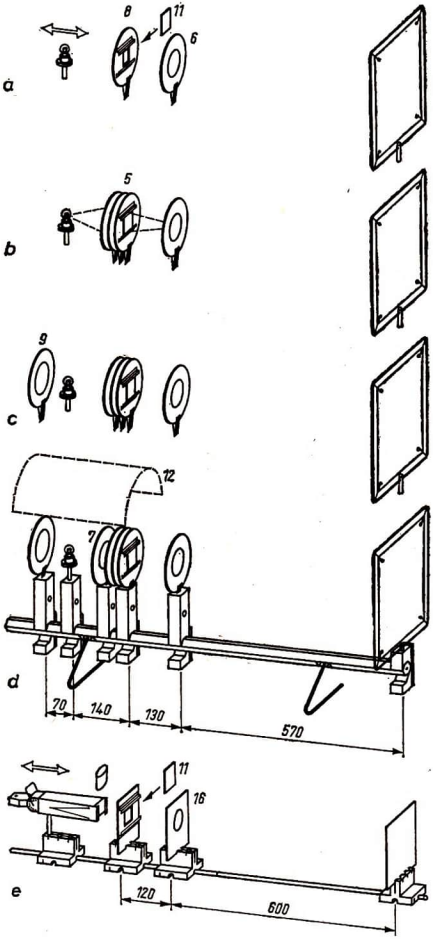


Abb. 3.3.1./1
Versuchsanordnung für die schrittweise Demonstration der Wirkungsweise eines Projektors im Lehrerexperiment (a bis d) und im Schülerexperiment (e)

Methodische Hinweise

1. Mit der dargestellten Schrittfolge wird beabsichtigt, Bau und Wirkungsweise eines Diaprojektors entwickelnd zu behandeln. Dabei bleibt es dem Lehrer überlassen, die Reihenfolge seinen methodischen Absichten entsprechend zu variieren, z.B. Schritte zusammenzufassen, zu überspringen oder auszulassen.
2. Um bei der schrittweisen Demonstration die Lage der Bauteile zueinander nicht dauernd ändern zu müssen, ordnet man den unveränderlichen Teil des Versuchsaufbaus (Objekt, Objektiv, Schirm) so an, daß vor dem Farbdiapositiv soviel Platz verbleibt, um Kondensor, Glühpunktlampe und Spiegel aufzubauen.
3. Der Versuch bietet die Möglichkeit, die Schüler auf die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten der Diaprojektion hinzuweisen.

Variante a

Etwa 300 mm vom Ende der optischen Bank entfernt wird das im Schiebeschacht untergebrachte Diapositiv aufgestellt. Objektivlinse ($f = +100$ mm) und Schirm werden so aufgebaut, daß der noch verbleibende Teil der optischen Bank voll genutzt und das Farbdiapositiv scharf auf dem Schirm abgebildet wird. Man durchleuchtet das Diapositiv mit einer anfangs dicht davor aufgestellten Glühpunktlampe. Auf dem Schirm wird nur der zentrale Ausschnitt des Diapositives abgebildet. Entfernen der Glühpunktlampe vom Diapositiv vergrößert zwar den Ausschnitt, vermindert aber die Bildhelligkeit (Abb. 3.3.1./1a).
Der Doppelkondensor wird zwischen Lampe und Objekt, dicht an das Objekt herangerückt, gebracht. Nunmehr wird das gesamte Diapositiv abgebildet. Man zeigt, daß der günstigste Strahlenverlauf dann erreicht wird, wenn durch Verschieben der Lampe deren vom Kondensor entworfenes reelles Bild genau in der Objektivlinse liegt. Bei anderer Lage gibt es Verzeichnungen des Bildes (Abb. 3.3.1./1b).
Durch Hinzufügen eines Hohlspiegels, dessen Mittelpunkt in der Glühwendel der Lampen liegt, wird die Bildhelligkeit abermals erheblich verbessert. Das zeigt man, indem man kurzzeitig zwischen Spiegel und Lampe eine Pappe bringt und die damit verbundene Verringerung der Bildhelligkeit beobachtet (Abb. 3.3.1./1c).
Schließlich kann man durch Einbringen einer dritten Kondensorlinse mit einer Brennweite von +50 mm zwischen Lampe und Doppelkondensor die Lichtausbeute abermals erhöhen (Abb. 3.3.1./1d). Um Blendungen der Schüler beim Beobachten zu vermeiden, kann man vor die Lampe einen Blendschutz aus Pappe bringen.

Variante b

Auf dem langen Stativstab werden Experimentierleuchte, Schiebeschacht mit Farbdiapositiv, die Objektivlinse und der transparente Schirm in der aufgeführten Reihenfolge so angeordnet, daß die gesamte Länge der Bank genutzt und das Diapositiv scharf auf dem Schirm abgebildet wird (Abb. 3.3.1./1e).
Man entfernt die Kondensorlinse aus der Experimentierleuchte und durchleuchtet das Farbdia. Auf dem Schirm wird nur das Zentrum scharf abgebildet.
Nach Einsetzen der Kondensorlinse wird das Farbdia vollständig abgebildet, wenn die Leuchte dicht an den Blendrahmen mit Schiebeschacht herangerückt wurde und das reelle Bild der Glühwendel in der Objektivlinse liegt.
Weitere Teilschritte können mit dem SEG Optik nicht durchgeführt werden.

Bemerkungen

1. Anstelle des kurzbrennweitigen Hohlspiegels bei Variante a kann eine Kombination aus einem Hohlspiegel mit der Brennweite von ungefähr 200 mm und einer dicht davorstehenden Sammellinse mit einer Brennweite von 150 mm verwendet werden.
   Noch einfacher ist es, die Rückseite der Glühpunktlampe mit einem passenden Stück Aluminiumfolie (Haushaltfolie) zu belegen, die man durch Glätten mit dem Fingernagel möglichst gut an die Wölbung der Lampe anpaßt.
2. Der Aufbau der Anordnung in Variante a kann auch auf der kleinen Schiene erfolgen, wenn man das Bild an einer Projektionswand entwirft.

3.3.2. Demonstration der Anwendung der Durchlichtprojektion im Tageslichtschreibprojektor und im Vergrößerungsgerät ●

Zu Variante a

1. Sechskantschiene (0,5 m)
2. Optikleuchte
3. 4 große Klemmreiter
4. 2 Kondensorlinsen ($f = +120$ mm)
5. Blendscheibe mit Linse ($f = +200$ mm)
6. Blendscheibe mit Linse ($f = +250$ mm)
7. Blendscheibe mit Schiebeschacht
8. Spiegelstreifen (50 mm × 100 mm) Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Zu Variante b [SE]

9. Experimentierleuchte
10. Blendrahmen mit Schiebeschacht
11. Blendrahmen mit Linse ($f = +50$ mm)
12. Diarähmchen mit schwach gedecktem Negativ Ⓢ (siehe 1.3.1.)
13. weißes Papier, A 5

Methodischer Hinweis

Bei der Vorführung einzelner Anwendungsmöglichkeiten der Durchlichtprojektion sollte man stets die Gelegenheit nutzen, neben den aus den Aufbauteilen der optischen Bank zusammengesetzten Geräten ein industriemäßig gefertigtes vorzustellen. Dabei ergeben sich Anknüpfungspunkte, auf die Leistungsfähigkeit der optischen Industrie einzugehen.

Variante a

Mit Tischklemme und kurzem Stativstab wird die Sechskantschiene lotrecht aufgebaut. Man befestigt möglichst dicht über der Tischfläche die Optikleuchte und darüber den Doppelkondensor. Etwa 120 mm über der Kondensorlinse wird die Objektlinse mit einer Brennweite von +200 mm und abermals 70 mm darüber der in den Schiebeschacht eingebrachte und um 45° zur optischen Achse gedrehte

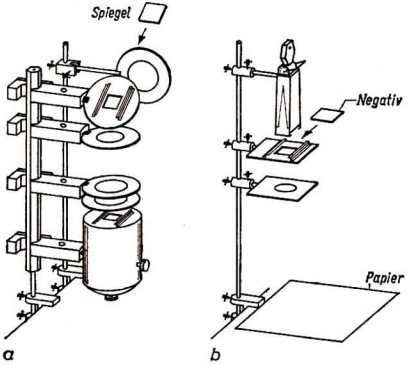


Abb. 3.3.2./1
Versuchsanordnungen zur Vorführung der Wirkungsweise eines Tageslichtschreibprojektors im Lehrerexperiment (a) sowie eines Vergrößerungsapparates im Schülerexperiment (b)

ebene Spiegel angeordnet. Die zweite Objektivlinse mit +250 mm Brennweite wird mit Hilfe von Stativmaterial lotrecht in Höhe des Spiegels eingespannt und neben die Anordnung gestellt (Abb. 3.3.2./1a).
Mit Fettstift oder Faserschreiber wird die ebene Fläche der Kondensorlinse beschriftet. Die Abbildung erfolgt an einer Projektionswand.

Variante b

Ein Stativstab wird mit einer Tischklemme lotrecht befestigt. Am oberen Ende bringt man die Experimentierleuchte an, dicht darunter den Blendrahmen mit Schiebeschacht und die Objektivlinse. Auf den Tisch legt man ein Stück weißes Papier unter die Anordnung. Darauf wird das schwach gedeckte Negativ im Schiebeschacht scharf abbildet (Abb. 3.3.2./1b).

Bemerkung

Wie man das Modell eines Vergrößerungsgerätes für den Lehrerversuch aufbauen kann, zeigt Abb. 1.2.1./2a.

3.3.3. Demonstration des Strahlenverlaufes in einem Projektor ◑

1. Manipermtafel
2. 2 Haftleuchten
3. kleine Haftleuchte
4. Linsenkörper, plankonvex
5. 2 Linsenkörper, bikonvex

Methodischer Hinweis

Nach der Vorführung eines Versuches zur Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Projektors (V 3.3.1.) oder als integrierter Teilschritt eines solchen Versuches sollte die Vorführung des Strahlenverlaufes in einem Projektor er-

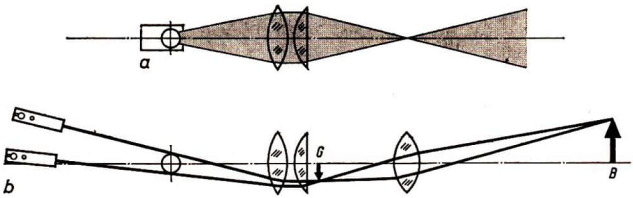


Abb. 3.3.3./1 Vorversuch (a) und Hauptversuch (b) bei der Demonstration des Strahlenverlaufes am Projektor

folgen. Da dieser Versuch anspruchsvoll ist, z.B. hinsichtlich der Justierung der Haftbauelemente, empfiehlt sich eine entwickelnde Gestaltung nur, wenn in einem Vorversuch (Abb. 3.3.3./1a) die gegenseitige Lage der Teile ermittelt und auf der Hafttafel markiert wurde.

Versuch

An einer Hafttafel sind eine ausgedehnte Lichtquelle als Kreis und eine optische Achse vorgezeichnet. Der dünne bikonvexe Linsenkörper und der plankonvexe Linsenkörper werden zu einem Doppelkondensor zusammengesetzt und auf der Tafel befestigt. Die beiden, die vorgezeichnete Lichtquelle tangierenden Lichtspuren sollen sich kurz hinter der Kondensorlinse in einem Gegenstandspunkt schneiden. Mit Kreide kann an diesem Ort ein Pfeil als Gegenstand eingezeichnet werden. Der dicke bikonvexe Linsenkörper wird so in den Strahlenverlauf gebracht, daß sich die vom Gegenstand ausgehenden Lichtspuren hinter der Objektlinse in einem Bildpunkt schneiden und ein vergrößertes Bild eingezeichnet werden kann (Abb. 3.3.3./1b).

3.3.4. Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Projektors für undurchsichtige Bilder ●

1. 2 bis 3 Sechskantschienen (1 m; 2×0,5 m)
2. 1 bis 2 Optikleuchten
3. 4 bis 6 große Klemmreiter
4. kleiner Klemmreiter
5. 1 bis 2 Kondensorlinsen ($f = +120$ mm)
6. Blendscheibe mit Linse ($f = +200$ mm)
7. Irisblende
8. Blendscheibe mit Schiebeschacht
9. transparenter Schirm
10. farbiges, undurchsichtiges Bild (50 mm×50 mm) ⑧ (siehe 1.3.1.)

Methodischer Hinweis

Zum besseren Verständnis von Bau und Wirkungsweise eines Episkopes empfiehlt sich ein entwickelndes Vorgehen, so oder ähnlich wie im V 3.3.1. vorgeschlagen.

Versuch

An den beiden Enden der 1 m langen optischen Bank werden im Schiebeschacht das undurchsichtige Farbbild (z. B. auf schwarzem Untergrund geklebte helle,

große Briefmarke) und der transparente Schirm aufgestellt. Dazwischen stellt man die Objektivlinse von +200 mm Brennweite, die den farbigen Gegenstand scharf und vergrößert auf dem Schirm abbildet.
Mit einer Optikleuchte mit Kondensor wird das Farbbild von dem schwach divergent eingestellten Lichtkegel seitlich beleuchtet. Die Abbildung auf dem Schirm ist dabei nicht sonderlich hell.
Das Hinzufügen einer zweiten Beleuchtungseinrichtung führt zur Erhöhung der Helligkeit des abgebildeten Farbbildes (Abb. 3.3.4./1a). Der Versuch kann fortgesetzt werden, indem man eine Irisblende hinter die Objektivlinse setzt und

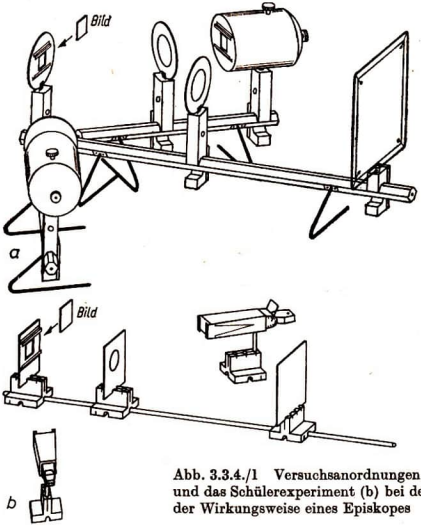


Abb. 3.3.4./1 Versuchsanordnungen für das Lehrerexperiment (a) und das Schülerexperiment (b) bei der Demonstration der Wirkungsweise eines Episkopes

diese ausgehend von einer Öffnung von etwa 10 mm langsam voll aufzieht. Das auf dem transparenten Schirm beobachtete Bild wird dabei immer heller, was zu dem Schluß führt, daß bei dieser Art der Projektion eine Linse mit möglichst großem Durchmesser verwendet werden muß.

Bemerkung

Mit den Geräten des SEG Optik läßt sich der Versuch als Schülerexperiment gemäß Abb. 3.3.4./1b durchführen; die Abbildungslinse hat eine Brennweite von $f = +100$ mm.

3.3.5. Demonstration von Bau und Wirkungsweise einer fotografischen Kamera ◑

Zu Variante a

1. Sechskantschiene (0,5 m)
2. Optikleuchte
3. 2 große Klemmreiter
4. Blendscheibe mit Linse ($f = +250$ mm)
5. Blendscheibe mit Linse ($f = +200$ mm)
6. Irisblende
7. Blendscheibe mit Schiebeschacht
8. Transparentobjekt
9. Diarähmchen mit Transparentpapier ® (siehe 1.3.1.)

Zu Variante b [SE]

10. Experimentierleuchte (ohne Kondensorlinse)
11. 3 T-Füße
12. Blendrahmen mit Linse ($f = +250$ mm)
13. Blendrahmen mit Linse ($f = +100$ mm)
14. Blendrahmen mit Schiebeschacht
15. Schirm
16. Lochblendstreifen aus Pappe ® (siehe 1.3.1.)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 3.0.3.!
2. Nach der Demonstration von Bau und Wirkungsweise einer fotografischen Kamera mit den Mitteln der optischen Bank sollte man Abbildung, Scharfeinstellung und Blendenwirkung an einer industriemäßig hergestellten Kamera zeigen.

Variante a

Auf einer kurzen optischen Bank wird ein Kameramodell aus Aufbauteilen zusammengesetzt. Als Objektiv werden die beiden Sammellinsen von +250 mm und +200 mm Brennweite mit einer dazwischen angeordneten Irisblende auf einem Klemmreiter aufgebaut. Als Mattscheibe wird ein Diarähmchen mit Transparentpapier — in einer Blendscheibe mit Schiebeschacht untergebracht — verwendet.
In größerer Entfernung hat man mit Stativmaterial die Optikleuchte in Höhe der optischen Achse montiert und das Transparentobjekt in den Schiebeschacht des Lampenhauses eingebracht (Abb. 3.3.5./1a).
Man stellt die Kamera durch Verschieben des Klemmreiters mit dem Objektiv auf den weit entfernten Gegenstand scharf ein. Dann nähert man die Optikleuchte der Kamera und zeigt, daß dabei stets erneut scharf eingestellt werden muß; das Objektiv muß um so weiter von der Mattscheibe fortgerückt werden, je näher der Gegenstand ist.
Schließlich zeigt man die Wirkung der Blende. Man engt die Irisblende immer mehr ein und beobachtet, daß dabei die Helligkeit des Mattscheibenbildes immer mehr

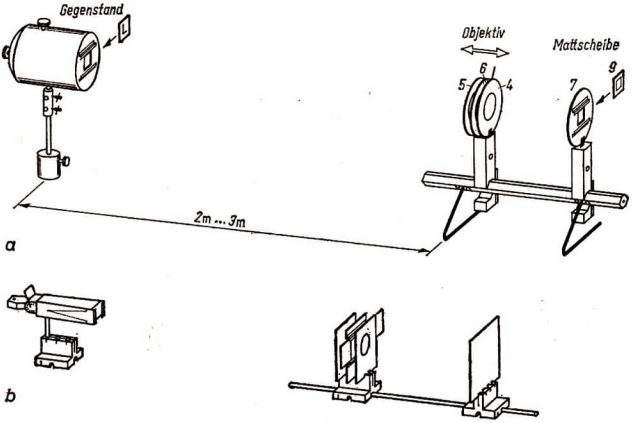


Abb. 3.3.5./1 Anordnung zur Demonstration von Bau und Wirkungsweise einer fotografischen Kamera im Lehrer- (a) und im Schülerexperiment (b)

abnimmt. Gleichzeitig führt man vor, daß mit kleiner werdender Blendenöffnung der scharf abgebildete Bereich immer größer wird.

Variante b

Als Kameramodell ordnet man auf dem kurzen Stativstab das Objektiv mit Blende (T-Fuß mit den beiden Linsen $f = +100$ mm und $f = +250$ mm und dazwischen den Blendrahmen mit Schiebeschacht) und den Schirm als Mattscheibe, wie Abb. 3.3.5./1b zeigt, an.

Das reelle Bild der Glühwendel der Glühlampe der weit entfernt aufgestellten Experimentierleuchte (ohne Kondensorlinse) bildet man scharf auf dem Schirm ab. Nähern des Gegenstandes (Glühwendel) erfordert jeweils erneute Scharfeinstellung.

Die Wirkung der Blende auf Bildhelligkeit und Schärfentiefe kann mit einem Lochblendstreifen gezeigt werden.

3.3.6. Demonstration des Strahlenverlaufes in einer fotografischen Kamera ◑

1. Manipermtafel
2. kleine Haftleuchte
3. Linsenkörper, bikonvex ($f = +150$ mm)
4. ebener Spiegel
5. Kameraquerschnittsmodell aus Zeichenkarton ⓢ (siehe 1.3.2.)
6. Manipermkerne
7. 2 Blenden

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ergänzt die gewonnenen Kenntnisse der Schüler über Bau und Wirkungsweise einer fotografischen Kamera im Hinblick auf den Strahlengang. Er sollte deshalb gemeinsam mit V 3.3.5. vorgeführt werden.
2. Wegen der grundsätzlichen Übereinstimmung des Strahlenverlaufs in der fotografischen Kamera und im menschlichen Auge empfiehlt sich auch eine Gegenüberstellung mit V 3.3.9.

Versuch

Auf die Hafttafel wird eine optische Achse gezeichnet. An der linken Seite der Tafel wird etwas außerhalb der optischen Achse die kleine Haftleuchte befestigt, an der rechten Seite der Kameraquerschnitt mit einigen Manipermkernen gehalten und der bikonvexe Linsenkörper als Kameraobjektiv eingesetzt. Das volle Lichtbündel der Haftleuchte wird auf das Kameraobjektiv gerichtet, und die Linse wird so weit längs der optischen Achse verschoben, bis der Bildpunkt in der Filmebene zu liegen kommt (Abb. 3.3.6./1a).

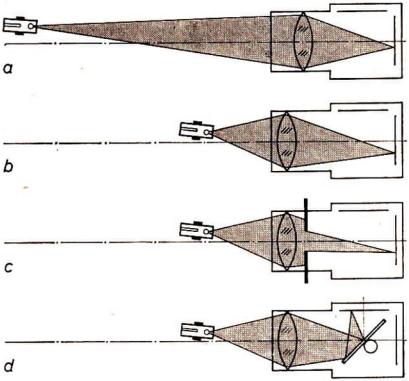


Abb. 3.3.6./1 Versuchsreihe zur Demonstration des Strahlenverlaufes in einer fotografischen Kamera bei Einstellung auf einen entfernten (a) oder einen nahen (b) Gegenstand mit veränderter Blendeneinstellung (c) bzw. bei Verwendung einer Spiegelreflexkamera (d)

Nunmehr wird die Haftleuchte näher an die Kamera gerückt, wodurch die „Scharfeinstellung" gestört ist. Der Konvergenzpunkt der gebrochenen Strahlen liegt nicht mehr in der Filmebene. Erst wenn man die Linse weiter von der Filmebene entfernt, gelingt erneut die Scharfeinstellung (Abb. 3.3.6./1b). Schließlich kann man in den Strahlengang hinter die Linse noch die beiden Blenden bringen und so das zur Bildentstehung genutzte Lichtbündel einengen. Man zeigt, daß durch die Bündeleinengung die Scharfeinstellung erhalten bleibt (Abb. 3.3.6./1c).
Die Wirkungsweise einer Spiegelreflexkamera demonstriert man durch Einbringen des ebenen Spiegels in den Kameraquerschnitt. Der Bildpunkt wird nunmehr auf einer markierten Einstellmattscheibe abgebildet (Abb. 3.3.6./1d).

3.3.7. Demonstration des Einflusses der Brennweite eines Kameraobjektives auf den Bildausschnitt

1. Sechskantschiene (0,5 m)
2. 3 große Klemmreiter
3. Blendscheibe mit Schiebeschacht
4. Blendscheibe mit Linse ($f = +50$ mm)
5. Blendscheibe mit Linse ($f = +100$ mm)
6. Blendscheibe mit Linse ($f = +150$ mm)
7. Blendscheibe mit Linse ($f = +200$ mm)
8. Blendscheibe mit Linse ($f = -100$ mm)
9. Diarähmchen mit Transparentpapier ⓢ (siehe 1.3.1.)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 3.0.3.!
2. Die Demonstration kann besonders eindrucksvoll ergänzt werden, wenn man zusätzlich eine Spiegelreflexkamera mit auswechselbaren Objektiven benutzt.

Versuch

Auf der kurzen optischen Bank wird aus je einer Linse und der Mattscheibe eine einfache Kamera zusammengesetzt. Man beginnt den Versuch mit einer kurzbrennweitigen Linse und stellt das Bild eines fernen Gegenstandes scharf ein. Man merkt oder skizziert sich den auf der Mattscheibe betrachteten Bildausschnitt (Abb. 3.3.7./1a).
Man ersetzt die Objektlinse durch immer längerbrennweitige, stellt jeweils scharf ein und betrachtet den Bildausschnitt (Abb. 3.3.7./1b und c). Der Vergleich zeigt, daß mit zunehmender Brennweite der Bildausschnitt immer kleiner wird. Die Wirkungsweise eines Teleobjektives führt man so vor, indem man 100 mm vor der Mattscheibe die Zerstreuungslinse von −100 mm Brennweite und abermals 100 mm davor die Sammellinse von +150 mm Brennweite aufstellt. Das scharfe Bild auf dem Schirm zeigt einen abermals kleineren Bildausschnitt, der dem einer Sammellinse von der Brennweite von +300 mm entspricht (Abb. 3.3.7./1d).

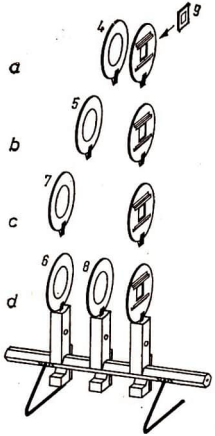


Abb. 3.3.7./1
Versuchsreihe zur Demonstration des Einflusses der Kamerabrennweite auf den Bildausschnitt

3.3.8. Demonstration von Bau und Wirkungsweise des menschlichen Auges ◑

Zu Variante a

1. Sechskantschiene (0,5 m)
2. Optikleuchte
3. großer Klemmreiter
4. kleiner Klemmreiter
5. Blendscheibe mit Linse ($f = +200$ mm)
6. Blendscheibe mit Linse ($f = +250$ mm)
7. Irisblende
8. Rundkolben mit kurzem Hals (∅ = 130 mm), an einer Seite mattiert ⓢ (Abb. 1.3.1./14)
9. zentral durchbohrter Stopfen

Zu Variante b

Geräte 1., 2., 3. (2mal), 5. bis 7., außerdem

10. Blendscheibe mit Linse ($f = +100$ mm)
11. Blendscheibe mit Schiebeschacht
12. Diarähmchen mit Transparentpapier ⓢ (siehe 1.3.1.)

Zu Variante c [SE]

Gerät 12., außerdem

13. Experimentierleuchte (ohne Kondensor)
14. 3 T-Füße
15. Blendrahmen mit Linse ($f = +50$ mm)
16. Blendrahmen mit Linse ($f = +100$ mm)
17. Blendrahmen mit Schiebeschacht

Methodische Hinweise

1. Von allen dargestellten Versuchen kommt die Variante a sowohl vom Bau als auch vom physikalischen Sehvorgang her dem menschlichen Auge am nächsten, weil durch den wassergefüllten Rundkolben der Glaskörper des menschlichen Auges simuliert wird.
2. Die große Ähnlichkeit der Abbildung durch das menschliche Auge und durch die fotografische Kamera macht man deutlich, indem man nebeneinander entsprechende Versuche von V 3.3.5. und 3.3.8. vorführt.

Variante a: Versuch mit einem wassergefüllten Augenmodell

Auf die kurze optische Bank wird auf einem kleinen Klemmreiter ein mit Wasser gefüllter und verschlossener Rundkolben gesetzt (vgl. Abschnitt 1.3.1. und Abb. 1.3.1./14b), so daß der Mittelpunkt der Kugelwölbung in Höhe der optischen Achse liegt. Die mit Schmirgelpapier aufgerauhte Fläche wird so angeordnet, daß sie von der optischen Achse zentral durchstoßen wird. Dicht vor den Rundkolben werden auf einem Klemmreiter die Linse mit +200 mm Brennweite sowie die Irisblende aufgestellt und so dicht an den Kolben herangebracht, daß ein

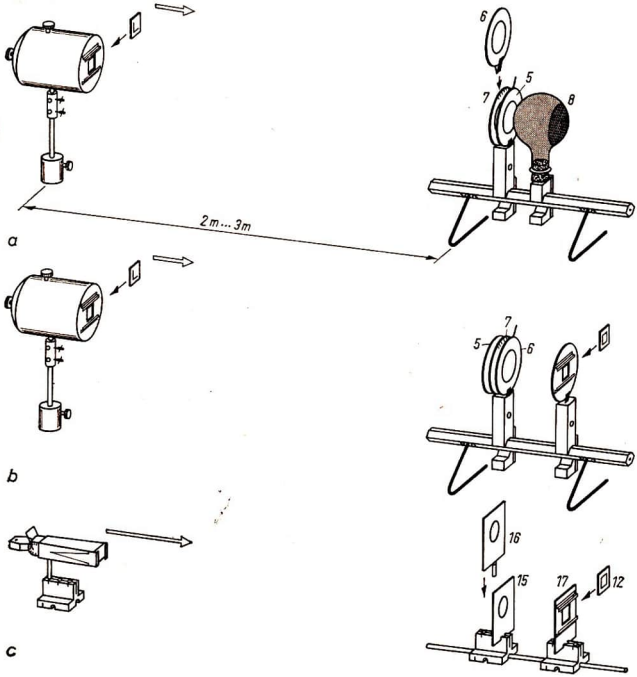


Abb. 3.3.8./1 Versuchsanordnungen zur Demonstration der Wirkungsweise des menschlichen Auges im Lehrerexperiment mit einem Augenmodell mit simuliertem Glaskörper (a) und ohne Glaskörper (b) sowie mit einem einfachen Augenmodell für das Schülerexperiment (c)

weit entfernter Gegenstand, z. B. die mit Stativmaterial in Höhe der optischen Achse montierte Optikleuchte, scharf auf der mattierten Fläche des Rundkolbens abgebildet wird. Damit ist das Augenmodell auf den Fernpunkt eingestellt (Abb. 3.3.8./1a).

Zur Demonstration der Einstellung des Augenmodells auf den Nahpunkt wird die zweite Linse mit +250 mm Brennweite so dicht wie möglich an die Irisblende

gesetzt und damit die Akkommodation der Augenlinse simuliert. Die Optikleuchte muß dem Augenmodell bis auf etwa 250 mm genähert werden, damit der Glühfaden wieder scharf auf der mattierten Kolbenfläche erscheint.
Die helligkeitssteuernde Wirkung der Irisblende erkennt man leicht beim Öffnen bzw. Schließen.

Variante b: Versuch mit einem einfachen Augenmodell (Lehrerexperiment)

Ein einfacheres Augenmodell stellt man sich aus zwei dicht auf einem Reiter zusammenstehenden Linsen von +200 mm und +250 mm Brennweite und einem kleinen transparenten Schirm her, der in den Schiebeschacht einer Blendscheibe eingeschoben ist. Die Einstellung auf den Fernpunkt geschieht wie bei Variante a (Abb. 3.3.8./1b). Zur Nahpunkteinstellung tauscht man die Linse mit einer Brennweite von +250 mm gegen eine solche von +100 mm aus. Der Nahpunkt liegt dann ungefähr 200 mm vor der Augenlinse. Nach Einfügen einer Irisblende kann man deren Funktion vorführen.

Variante c: Versuch mit einem einfachen Augenmodell (Schülerexperiment)

Das Augenmodell besteht aus einem kleinen transparenten Schirm im Blendrahmen mit Schiebeschacht als Netzhaut und einer Linse von +50 mm Brennweite. Zur Einstellung auf den Fernpunkt wird die als Gegenstand fungierende Glühwendel in der Experimentierleuchte ohne Kondensorlinse scharf abgebildet (Abb. 3.3.8./1c).
Bringt man 20 mm vor die Augenlinse eine zweite Linse mit +100 mm Brennweite, kann man mit der Experimentierleuchte ohne Kondensor prüfen, daß der Nahpunkt etwa 100 mm vor dem Augenmodell liegt.
Um Überstrahlungen und Blendungen zu vermeiden, betreibt man die Glühlampe mit beträchtlicher Unterspannung.

3.3.9. Demonstration des Strahlenverlaufes im menschlichen Auge ◑

1. Manipermtafel
2. 2 Haftleuchten
3. kleine Haftleuchte
4. Linsenkörper, bikonvex ($f = +150$ mm)
5. Linsenkörper, bikonvex ($f = +90$ mm)
6. Augenquerschnittsmodell aus Zeichenkarton Ⓢ (siehe 1.3.2.)
7. Manipermkerne
8. 2 Blenden

Methodischer Hinweis

Im Versuch wird die Änderung der Brennweite der Augenlinse nicht wie im menschlichen Auge durch Kontraktion des Ziliarmuskels erreicht, sondern durch Auswechseln der bikonvexen Linsenkörper. Der an der Lichtbrechung im menschlichen Auge beteiligte Glaskörper entfällt bei der modellhaften Darstellung vollständig. Diese erheblichen Unterschiede sind den Schülern bewußtzumachen.

Versuch

Auf der Hafttafel mit vorgezeichneter optischer Achse wird möglichst weit rechts das Augenquerschnittsmodell aus weißem Zeichenkarton mit Manipermkernen befestigt und zur Demonstration der Einstellung des Auges auf den Fernpunkt der bikonvexe Linsenkörper von +150 mm Brennweite als Augenlinse eingesetzt. Die zwei von den Haftleuchten erzeugten, etwa 80 mm voneinander entfernten Lichtspuren treffen als achsenparallele Strahlen die Augenlinse und werden auf der „Netzhaut" zu einem Bildpunkt des weit entfernten Gegenstandes vereinigt (Abb. 3.3.9./1a).

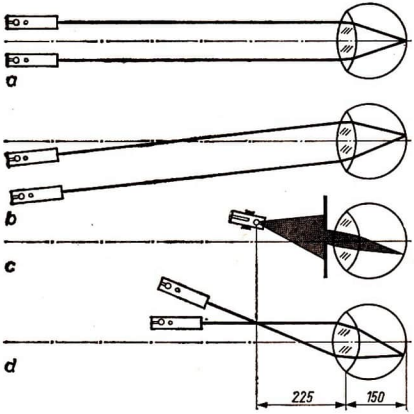


Abb. 3.3.9./1
Versuchsanordnung zur Demonstration des Strahlenverlaufes im menschlichen Auge bei Einstellung auf den Fernpunkt (a, b) und bei Einstellung auf den Nahpunkt (c, d)

Unter Beibehalten der Parallelität der Lichtspuren gibt man ihnen eine leichte Neigung zur optischen Achse. Der Bildpunkt liegt dann auf einer anderen Stelle der „Netzhaut" (Abb. 3.3.9./1b).
Zur Einstellung des Auges auf den Nahpunkt ersetzt man den Linsenkörper von +150 mm Brennweite durch den von +90 mm Brennweite. Etwa 220 mm bis 230 mm vor der Augenlinse wird etwas außerhalb der optischen Achse die kleine Haftleuchte befestigt und ihr divergenter Lichtkegel auf das Augenmodell gerichtet. Der Bildpunkt entsteht wiederum auf der „Netzhaut" (Abb. 3.3.9./1c).
Das volle Strahlenbündel kann in diesem Teilversuch natürlich auch durch zwei Lichtspuren ersetzt werden (Abb. 3.3.9./1d). Durch Einbringen von zwei Blenden in den Strahlengang des vollen Lichtkegels kann man leicht die Wirkungsweise der Augenpupille demonstrieren (Abb. 3.3.9./1c).

3.3.10. Demonstration der Akkommodation der Augenlinse ●

1. Sechskantschiene (0,5 m)
2. Optikleuchte
3. 2 große Klemmreiter
4. kleiner Klemmreiter
5. Irisblende
6. akkommodationsfähige Linse Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Methodischer Hinweis

Der Versuch zeigt sehr überzeugend die Akkommodation der Linse im menschlichen Auge. Der Versuch sollte parallel mit einer der Varianten von V 3.3.8. durchgeführt werden.

Versuch

Zur Vorführung der Akkommodationsfähigkeit der Augenlinse stellt man einen mit dehnbaren durchsichtigen Plastmembranen versehenen Hohlkörper (vgl. Abschnitt 1.3.1. und Abb. 1.3.1./14a), der voll mit destilliertem Wasser gefüllt ist, am Ende der kurzen optischen Bank auf. Dicht dahinter bringt man die Irisblende. Am anderen Ende der optischen Bank steht der transparente Schirm. Ungefähr zwei Meter vor der akkommodationsfähigen Linse steht die Optikleuchte in Höhe der optischen Achse (Abb. 3.3.10./1).
In den Hohlkörper wird über einen Schlauch langsam Luft geblasen. Die Membranen wölben sich beiderseits konvex auf und man kann beobachten, daß die Glühwendel immer schärfer auf dem Schirm abgebildet wird. Bei Erreichen der größten Schärfe quetscht man den Schlauch ab. Die Abbildung kann verbessert werden, wenn man die Irisblende bis auf etwa 40 mm bis 30 mm schließt.
Nunmehr wird soviel Luft in den Hohlkörper geblasen, wie bei Aufwenden aller Lungenkraft möglich ist. Danach wird der Schlauch wieder abgequetscht. Die Linse ist jetzt auf den Nahpunkt akkommodiert. Man muß die Lichtquelle erheblich näher an die Linse heranrücken, um wieder ein scharfes Bild auf dem Schirm beobachten zu können.

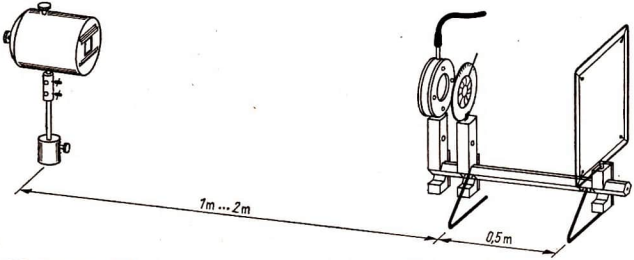


Abb. 3.3.10./1 Versuchsanordnung zur Demonstration der Wirkungsweise einer akkommodationsfähigen Linse

3.3.11. Demonstration der Korrektur von Fehlsichtigkeit ◑

Zu Variante a

Geräte wie beim V 3.3.8., Variante a, 3. (2mal); 6. (2mal), außerdem

18. Blendscheibe mit Linse ($f = +150$ mm)
19. Blendscheibe mit Linse ($f = +1000$ mm; Brillenglas mit +1 Dptr.) Ⓢ (siehe 1.3.1.)
20. Blendscheibe mit Linse ($f = -500$ mm; Brillenglas mit −2 Dptr.) Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Zu Variante b

Geräte wie beim Versuch V 3.3.8., Variante b, 3. (3mal), 6. (2mal), außerdem 20. und

21. Blendscheibe mit Linse ($f = +500$ mm)

Zu Variante c [*SE*]

Geräte wie beim V 3.3.8., Variante c, Gerät 18. (2mal), außerdem

22. Blendrahmen mit Linse ($f = -100$ mm) 23. Blendrahmen mit Linse($f = +250$ mm)

Methodische Hinweise

1. Es ist zu beachten, daß bei Verwendung des starren Augenmodells (wassergefüllter Rundkolben, Variante a) die Kurzsichtigkeit nicht durch Verlängern bzw. Verkürzen des Abstandes Augenlinse—Netzhaut, sondern durch Verwendung von Augenlinsen unterschiedlicher Brennweite simuliert wird.
2. Es ist empfehlenswert, die Versuche zur Korrektur der Augenfehler mit den Versuchen zur Demonstration des Strahlenverlaufes bei Verwendung von Sehhilfen zu koppeln.
3. Da bei den Varianten a und c sowohl die Korrektur der Fehlsichtigkeit als auch die Simulierung der Akkomodation durch das Hinzufügen einer Linse erfolgt, muß jeweils die Funktion der zusätzlich eingebrachten Linse — um Verwechslungen zu vermeiden — explizit vom Lehrer erläutert werden.

Versuch 1: Korrektur der Alterssichtigkeit

Man geht aus vom normalsichtigen Auge. Wie im V 3.3.8. beschrieben, wird je nach ausgewählter Variante das Augenmodell auf den Fernpunkt eingestellt. Rückt man den Gegenstand bis in den Nahpunkt, ist das Netzhautbild unscharf. Da beim Alterssichtigen infolge von Verhärtungserscheinungen die Akkommodationsfähigkeit der Augenlinse stark nachgelassen hat, kann die Einstellung auf den Nahpunkt nur durch eine Sehhilfe erfolgen, indem vor das Auge eine Sammellinse gesetzt wird.

Für die einzelnen Versuchsvarianten gelten dabei folgende Daten:

	Variante a	Variante b	Variante c
Linse als Sehhilfe	+250 mm	+250 mm	+250 mm
Abstand von der (vorderen) Augenlinse	30 mm	30 mm	40 mm
Nahpunkt vor der (vorderen) Augenlinse	~250 mm	~270 mm	~250 mm

Versuch 2: Korrektur der Übersichtigkeit

Ausgangspunkt ist wiederum die Einstellung des normalsichtigen Auges auf den Fernpunkt.
Da die Ursache für die Übersichtigkeit ein zu kurz gebauter Augapfel ist, erfolgt als nächster Schritt eine Verringerung des Abstandes von der Augenlinse bis zur Netzhaut, indem man den Schirm näher an die Linse rückt. Beim starren optischen Augenmodell muß das durch Einsetzen einer längerbrennweitigen Sammellinse als Augenlinse erfolgen.
Der Gegenstand im Fernpunkt wird nicht mehr scharf auf der Netzhaut abgebildet. Zur Korrektur muß vor das Augenmodell eine Sammellinse gebracht werden, um wieder ein scharfes Netzhautbild zu erhalten.
Verändert man nun wie im V 3.3.8. durch Hinzufügen bzw. Austausch einer Augenlinse die Einstellung des Modells auf den Nahpunkt (Simulieren der Akkommodation!), so ist das Netzhautbild wiederum unscharf und wird erst wieder scharf, wenn der Gegenstand bis an den Nahpunkt herangerückt worden ist. Für die einzelnen Versuchsvarianten gelten dabei folgende Daten:

	Variante a	Variante b	Variante c
Verkürzung des Augenmodells um	$f = +250$ mm statt $f = +200$ mm	20 mm	20 mm
Linse als Sehhilfe	$f = +1000$ mm (+ 1 Dptr.)	$f = +500$ mm (+2 Dptr.)	$f = +100$ mm
Abstand von der (vorderen) Augenlinse	12 mm	30 mm	40 mm
Linse zur Nahpunkteinstellung	zusätzl. $f = +250$ mm	$f = +100$ mm statt $f = +250$ mm	zusätzl. $f = +100$ mm
Nahpunkt vor der (vorderen) Augenlinse	~230 mm	~230 mm	~150 mm

Versuch 3: Korrektur der Kurzsichtigkeit

Das auf den Fernpunkt eingestellte Augenmodell muß zur Demonstration der Korrektur der angeborenen Kurzsichtigkeit verlängert werden, da die Ursache für diesen Augenfehler in einem zu langen Bau des Augapfels besteht. Man entfernt also den transparenten Schirm um eine bestimmte Strecke von der Augenlinse. Beim starren optischen Augenmodell wird das durch den Austausch der Augenlinse gegen eine von kürzerer Brennweite simuliert.
Der Gegenstand im Fernpunkt wird nicht mehr scharf auf der Netzhaut abgebildet. Als Sehhilfe wird eine Zerstreuungslinse vor das Augenmodell gesetzt, wodurch wieder ein scharfes Netzhautbild entsteht.
Verändert man wie im V 3.3.8. die Einstellung des Augenmodells vom Fernpunkt auf den Nahpunkt durch Hinzufügen oder Auswechseln einer Augenlinse, wird das Netzhautbild wiederum unscharf und muß erneut durch Heranrücken des Gegenstandes bis an den Nahpunkt eingestellt werden.

Für die einzelnen Versuchsvarianten gelten dabei folgende Daten:

	Variante a	Variante b	Variante c
Verlängerung des Augenmodells um	$f = +150$ mm statt $f = +200$ mm	30 mm	30 mm
Linse als Sehhilfe	$f = -500$ mm (-2 Dptr.)	$f = -500$ mm (-2 Dptr.)	$f = -100$ mm
Abstand von der (vorderen) Augenlinse	12 mm	30 mm	40 mm
Linse zur Nahpunkteinstellung	zusätzl. $f = +250$ mm	$f = +100$ mm statt $f = +250$ mm	zusätzl. $f = +100$ mm
Nahpunkt vor der (vorderen) Augenlinse	230 mm	~200 mm	~70 mm

3.3.12. Demonstration des Strahlenverlaufes bei der Korrektur von Fehlsichtigkeit ◑

1. Manipermtafel
2. 2 Haftleuchten
3. kleine Haftleuchte
4. 2 Linsenkörper, bikonvex, dünn
5. Linsenkörper, bikonvex, dick
6. Linsenkörper, plankonvex
7. Linsenkörper, bikonkav
8. Augenquerschnitte aus weißem Karton für das alterssichtige, übersichtige und kurzsichtige Auge Ⓢ (siehe 1.3.2.)
9. Manipermkerne

Methodische Hinweise

1. Durch die Versuche an der Hafttafel werden die Versuche auf der optischen Bank zur Demonstration der Fehlsichtigkeit ergänzt.
2. Für die Versuche zur Demonstration der Korrektur der Kurz- bzw. Übersichtigkeit wird die Akkommodation der Augenlinse durch Auswechseln der Linsenkörper simuliert.
3. Um für alle drei Versuche ähnliche Bedingungen zu schaffen (Nahpunkt 550 mm von der Augenlinse entfernt; Linsenkörper als Sehhilfen dicht vor der Augenlinse), ist von Versuch zu Versuch der Abstand der achsenparallelen Strahlen bei Einstellung mit dem Fernpunkt zu variieren, dabei muß man die große sphärische Aberration der Linsenkörper beachten.

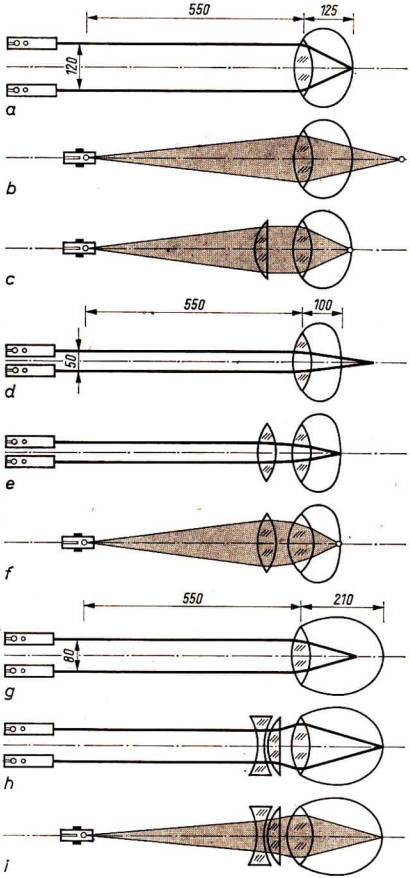


Abb. 3.3.12./1 Versuchsreihe zur Demonstration des Strahlenverlaufes bei der Korrektur der Fehlsichtigkeit: Alterssichtigkeit (a bis c), Übersichtigkeit (d bis f) und Kurzsichtigkeit (g bis i)

Versuch 1: Korrektur der Alterssichtigkeit

An der Hafttafel mit vorgezeichneter optischer Achse wird mit Manipermkernen und dem dünnen bikonvexen Linsenkörper der aus weißem Zeichenkarton gefertigte Augenquerschnitt für das alterssichtige Auge von 125 mm Länge befestigt. Man zeigt, daß zwei 120 mm voneinander entfernte, achsenparallele Lichtspuren auf der „Netzhaut" gesammelt werden (Abb. 3.3.12./1a).
Ersetzt man die beiden Haftleuchten durch eine kleine, die man 550 mm von der Augenlinse entfernt im Nahpunkt aufstellt, wird der divergente Lichtkegel durch die Augenlinse erst hinter der „Netzhaut" vereinigt (Abb. 3.3.12./1b). Da bei Alterssichtigkeit die Akkomodationsfähigkeit stark vermindert ist, muß durch Hinzufügen einer Sehhilfe das Bild eines im Nahpunkt befindlichen Körpers auf der Netzhaut entworfen werden. Dazu bringt man dicht vor die Augenlinse die plankonvexe Linse (Abb. 3.3.12./1c).

Versuch 2: Korrektur der Übersichtigkeit

Man wechselt den aus Zeichenkarton gefertigten Augenquerschnitt von 125 mm Länge gegen den des übersichtigen Auges von 100 mm Länge aus. Man zeigt, daß 50 mm voneinander entfernte, achsenparallele Strahlen, die vom Fernpunkt kommen, hinter der „Netzhaut" des verkürzten Auges gesammelt werden (Abb. 3.3.12./1d). Erst nachdem dicht vor die Augenlinse ein zweiter dünner, bikonvexer Linsenkörper gesetzt worden ist, wird das Bild auf der „Netzhaut" entworfen (Abb. 3.3.12./1e).
Bringt man anstelle der beiden Haftleuchten die kleine in den 550 mm vor der Augenlinse liegenden Nahpunkt und simuliert man die Akkommodation durch Auswechseln der dünnen bikonvexen Augenlinse gegen die dicke, erhält man wiederum ein scharfes Bild auf der „Netzhaut" (Abb. 3.3.12./1f).

Versuch 3: Korrektur der Kurzsichtigkeit

80 mm voneinander entfernte, achsenparallele Strahlen werden nicht auf der „Netzhaut" des kurzsichtigen, 210 mm langen Augenquerschnitts gesammelt, sondern davor (Abb. 3.3.12./1g). Die Kombination der bikonkaven und plankonvexen Linsenkörper dicht vor die Augenlinse gesetzt, behebt die Kurzsichtigkeit (Abb. 3.3.12./1h). Auch bei Änderung des Strahlengangs durch Einsetzen der kleinen Haftleuchte auf den 550 mm vor dem Auge liegenden Nahpunkt und gleichzeitiger Simulierung der Akkomodation durch Auswechseln der dünnen Bikonvexlinse gegen die dicke, erfolgt die Sammlung der Strahlen auf der „Netzhaut" des verlängerten Augapfels (Abb. 3.3.12./1i).

3.3.13. Ermittlung der Abhängigkeit des Sehwinkels von der Gegenstandsentfernung

1. Sechskantschiene (1 m)
2. 2 große Klemmreiter
3. Blendscheibe mit durchsichtiger Teilung (5/1 mm oder 1/1 mm) ® (siehe 1.3.1.)
4. Irisblende
5. Gegenstand (z. B. weißes Kartonquadrat; Kantenlänge 120 mm bis 150 mm)
6. Meßband

Methodischer Hinweis

Der Versuch ist sehr einfach und zur Ermittlung der indirekten Proportionalität zwischen Entfernung Gegenstand—Auge und Sehwinkel geeignet. Er kann in einfacher Form auch als Hausexperiment durchgeführt werden.

Versuch

In einer Entfernung von 571 mm werden die durchsichtige Teilung und die enggeschlossene Irisblende angeordnet. Das geschieht auf einer optischen Bank gemäß Abbildung 3.3.13./1a. Als Gegenstand fungiert das Quadrat aus weißem Karton, das unter Zuhilfenahme von Stativmaterial lotrecht aufgestellt wird.
Blickt man mit unbewegtem Auge durch die Lochblende als Diopter und visiert über die durchsichtige Teilung die Ober- und die Unterkante des Quadrates an, so kann man durch abwechselndes Akkommodieren auf die Teilung und auf das Quadrat die Höhe des Quadrats auf die Teilung übertragen. Ist nur eine Halbzentimetereinteilung eingeritzt, so müssen die Millimeter geschätzt werden. Da die Entfernung zwischen dem Diopter und der Teilung auf 571 mm eingestellt ist, entspricht 1 cm der Teilung einem Sehwinkel von etwa 1°, 1 mm dementsprechend einem Sehwinkel von etwa 0,1°. Rechnet man die Längenangaben der Skale in Grad um, so kann man an ihr unmittelbar den Betrag des Sehwinkel ablesen. Je weiter man den Gegenstand vom Auge entfernt, desto kleiner wird der Sehwinkel. Man bringt den Gegenstand in eine Entfernung von 1 m, 2 m bis

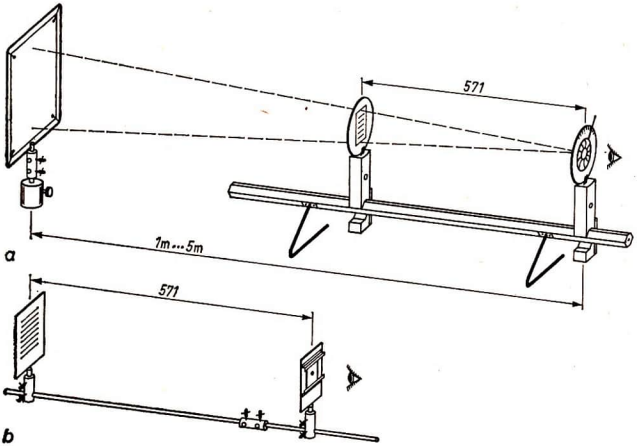


Abb. 3.3.13./1 Versuchsanordnung zur Messung des Sehwinkels im Lehrerexperiment (a) und im Schülerexperiment (b)

etwa 5 m und mißt die dazugehörigen Sehwinkel. Die Werte werden in eine Tabelle eingetragen, wofür die beigefügte Tabelle ein Beispiel gibt.

Meßwerttabelle

Entfernung x (Gegenstand – Auge) in m	Sehwinkel α in Grad	$x \cdot \alpha$ in m · Grad
1,0	7,2	7,2
1,5	4,8	7,2
2,0	3,6	7,2
2,5	2,9	7,3
3,0	2,4	7,2
3,5	2,0	7,0
4,0	1,8	7,2
4,5	1,6	7,2
5,0	1,4	7,0

Tabelle und grafische Darstellung (Abb. 3.3.13./2) lassen erkennen, daß der Sehwinkel der Gegenstandsentfernung umgekehrt proportional ist.

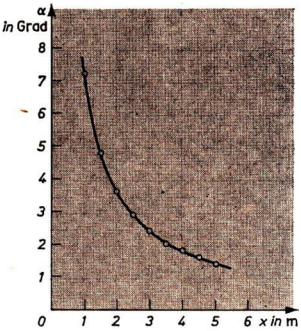


Abb. 3.3.13./2 Grafische Darstellung der Abhängigkeit des Sehwinkels von der Gegenstandsentfernung

Bemerkungen

1. Das Anfertigen einer Blendscheibe mit durchsichtiger Teilung kann man sich ersparen, wenn man an ihrer Stelle ein durchsichtiges Lineal mit mm-Teilung verwendet.
2. Als Schülerexperiment erfolgt der Versuchsaufbau nach Abb. 3.3.13./1b unter Verwendung von Stativmaterial mit einer durchsichtigen Teilung nach Abb. 1.3.1./7a und einer kleinen Lochblende als Diopter.

3.4. Demonstration von Bau und Wirkungsweise optischer Geräte zur Nah- und Fernbeobachtung

3.4.1. Freihandversuche zum Erlernen des Gebrauchs der Lupe [SE]

1. Verschiedene Lupen (Leselupe, Fadenzähler, Präparierlupe, Visolettlupe)
2. Betrachtungsobjekte (Zeitung mit kleingedrucktem Schriftsatz, Briefmarken, Gewebe, biologische Präparate)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 3.0.4.!
2. Die Freihandversuche bieten nicht nur die Möglichkeit, physikalische Kenntnisse über die Entstehung virtueller Bilder an Sammellinsen zu vertiefen, sondern gestatten außerdem, die Schüler die richtige Handhabung der Lupe zu lehren.
3. Längere Übungen im Gebrauch der Lupe sind beim Präparieren im Biologieunterricht möglich. Man versäume nicht, die Schüler auf das ermüdungsfreie Arbeiten mit der Lupe hinzuweisen, wenn die Augen auf den Fernpunkt eingestellt sind und beide Augen beim Betrachten geöffnet bleiben.

Versuche

Die Schrift eines Zeitungsblattes wird durch eine Lupe zunächst aus größerer Entfernung betrachtet. Das Zeitungsblatt befindet sich dabei innerhalb der einfachen Brennweite der Lupe. Man erblickt sowohl das virtuelle, vergrößerte Bild der Schrift als auch über den Rand der Lupe hinweg die Schrift selbst. Die durch die Lupe hervorgerufene Vergrößerung ist deutlich festzustellen. Ändert man den Abstand der Lupe vom Zeitungsblatt, so wird man eine Stellung finden, wo das Bild stark verschwimmt. Bei weiterem Entfernen erscheint dann ein umgekehrtes Bild der Schrift. Diese Änderung des Bildes ist allerdings nur zu beobachten, wenn man entgegen dem üblichen Gebrauch die Lupe mit ausgestrecktem Arm vor die Zeitung hält und sie in dieser Haltung beim Entfernen von der Zeitung beläßt.
Beim richtigen Gebrauch der Lupe ist eine bestimmte Entfernung zwischen dem Gegenstand und der Lupe einzuhalten; das Auge ist dicht an die Lupe heranzubringen. Das Auge wird dann beim Beobachten kaum angestrengt; allerdings wird bei dieser Beobachtungsart die Vergrößerung der Lupe nicht voll ausgenutzt.
In ähnlicher Weise kann man den Gebrauch einer besonderen Lupenart, des Fadenzählers, an einem Gewebestück üben. Beim Fadenzähler ist der Abstand zwischen der Lupe und dem Gewebe festgelegt.
Übungen mit einer Lupe lassen sich sehr einfach mit Präparierlupen an biologischen Präparaten durchführen. Da es sich hierbei meist um längere Beobachtungen handelt, deren Ergebnisse man in Zeichnungen oder Skizzen festhält, muß der Beobachter sein Auge von Zeit zu Zeit entspannen. Die Präparierlupe hat den Vorteil, daß der Beobachter, im Gegensatz zur Arbeit mit dem Fadenzähler, die richtige Gegenstandsentfernung selbst einstellen muß. Man versuche bei längerem Gebrauch der Lupe, beide Augen offen zu halten. In ähnlicher Weise zeigt man den Gebrauch der als Briefmarkenlupe häufig benutzten Visolettlupe. Dabei wird man auf die große Flächenhelligkeit des Bildes hinweisen, die bei richtiger Beleuchtung größer ist als die Helligkeit der Umgebung.

3.4.2. Demonstration der Wirkungsweise und der Vergrößerung einer Lupe ◑

Zu Versuch 1

1. Große Optikleuchte
2. Sechskantschiene (0,5 m)
3. 3 große Klemmreiter
4. kleiner Klemmreiter
5. Blendscheibe mit Linse ($f = +200$ mm)
6. Blendscheibe mit Linse ($f = +100$ mm)
7. Blendscheibe mit Linse ($f = +250$ mm)
8. Irisblende
9. Rundkolben mit mattierter Fläche als Augenmodell Ⓢ (siehe 1.3.1.)
10. Transparentobjekt
11. Meßstab

Zu Versuch 2

Geräte 1. bis 6. und 8. bis 11.

Methodische Hinweise

1. Die Versuche veranschaulichen „modellmäßig" das Zusammenwirken von Sammellinse und menschlichem Auge beim Gebrauch einer Lupe. Sie unterscheiden sich lediglich durch die Einstellung des Auges auf den Nah- bzw. auf den Fernpunkt.
2. Die Versuche können einzeln, aber auch gemeinsam vorgeführt werden. Beide zusammen verdeutlichen durch den Vergleich der Bildgrößen auf der mattierten Fläche des Augenmodells sowie der Gegenstandsweite und der Brennweite der Lupe den Unterschied zwischen subjektiver Vergrößerung und Normalvergrößerung.

Versuch 1: Einstellung des Auges auf den Nahpunkt

Auf der optischen Bank ordnet man die beiden Linsen von $f = +250$ mm und $f = +200$ mm, die Irisblende und den Rundkolben mit mattierter Fläche wie in V 3.3.8. beschrieben zu einem Augenmodell an. Von der Einstellung des Modells auf den Nahpunkt, der bei Verwendung der angegebenen Linsen 250 mm vor der Augenlinse liegt, überzeugt man sich, indem man das von der Optikleuchte bestrahlte Transparentobjekt im Nahpunkt aufstellt. Auf der mattierten Fläche des Rundkolbens entsteht dann ein scharfes Bild des Gegenstandes (Abb. 3.4.2./1a). Die Bildgröße y_1 wird gemessen.
Nunmehr ordnet man dicht vor der Augenlinse die als Lupe fungierende Sammellinse von $f = +100$ mm an. Um abermals ein scharfes Bild des Transparentobjekts auf der Mattscheibe beobachten zu können, muß man die Leuchte mit dem Objekt erheblich näher an das Augenmodell heranrücken. Man überzeugt sich leicht, daß das Transparentobjekt innerhalb der einfachen Brennweite steht. Das reelle Bild auf der Mattscheibe ist im Vergleich zum Bild, das ohne Lupe entworfen wurde, größer geworden (Abb. 3.4.2./1b). Man mißt die Bildgröße y_2.

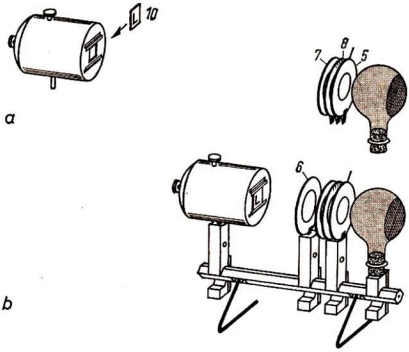


Abb. 3.4.2./1 Versuchsreihe zur Demonstration der Wirkungsweise einer Lupe: Augenmodell ohne Lupe (a), mit Lupe (b)

Durch Vergleich der beiden Bildgrößen y_2 und y_1 kann die subjektive Vergrößerung Γ_s der Lupe ermittelt werden:

$$\Gamma_s = \frac{y_2}{y_1}.$$

Der ermittelte Wert stimmt gut überein mit

$$\Gamma_s = \frac{s}{f} + 1,$$

wobei s die deutliche Sehweite (für das beschriebene Modell $s \approx 250$ mm) und f die Brennweite der Lupe bedeutet.

Versuch 2: Einstellung des Auges auf den Fernpunkt

Durch Entfernen der Linse $f = +250$ mm ist das Augenmodell auf den Fernpunkt (auf Unendlich) eingestellt. Notfalls überzeugt man sich davon, indem man einen weit entfernten Gegenstand auf der mattierten Fläche des Rundkolbens abbildet und durch leichtes Verrücken der Augenlinse die Bildschärfe korrigiert.
Abermals wird die als Lupe fungierende Linse von $f = +100$ mm dicht vor das Augenmodell gesetzt und das Transparentobjekt längs der optischen Achse verschoben, bis wiederum ein scharfes, vergrößertes Bild auf der Mattscheibe eingestellt ist. Man mißt die Bildgröße y_3, die etwas kleiner als die im Versuch 1 ermittelte Größe y_2 ist.
Weiterhin überzeugt man sich davon, daß das Transparentobjekt genau in der Brennebene der Lupe steht.
Ein Vergleich der Bildgrößen y_3 und y_1 zeigt, daß die Normalvergrößerung Γ_n

$$\Gamma_n = \frac{y_3}{y_1}$$ in guter Näherung übereinstimmt mit der Beziehung

$$\Gamma_n = \frac{s}{f}.$$

3.4.3. Ermittlung der Vergrößerung einer Lupe [SE]

1. 3 T-Füße
2. Blendrahmen mit Linse ($f = +50$ mm oder $f = +100$ mm)
3. 2 Vergleichsmaßstäbe ⑧

Methodischer Hinweis

Neben der Wirkungsweise spielt für die Anwendung einer Lupe häufig auch die Vergrößerung eine entscheidende Rolle. Dieses einfache Schülerexperiment gestattet, die Vergrößerung einer Lupe hinreichend genau zu bestimmen und zwingt auf Grund seiner Anordnung den Schüler zum beidäugigen Beobachten, wie es für das ermüdungsfreie Arbeiten mit allen optischen Geräten mit Okular bedeutsam ist.

Versuch

Nach Abb. 3.4.3./1 ordnet man die als Lupe verwendete Linse $f = +50$ mm oder $f = +100$ mm sowie die beiden selbstangefertigten Vergleichsmaßstäbe so an, daß die Entfernung von Lupe und Maßstäben in einem Fall gleich der Brenn-

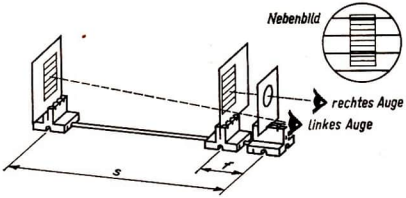


Abb. 3.4.3./1
Versuchsanordnung für das Schülerexperiment zur Ermittlung der Vergrößerung einer Lupe. Nebenbild: Das vom Beobachter gesehene Bild

weite, im anderen Fall der deutlichen Sehweite entspricht. Der Beobachter bringt seine Augen dicht an den Blendrahmen mit der Lupe und betrachtet mit einem Auge den nahestehenden Maßstab durch die Sammellinse. Mit dem anderen Auge wird am Blendrahmen vorbei der weiter entfernte Maßstab betrachtet. Dem Beobachter erscheinen dann die beiden Vergleichsmaßstäbe aufeinanderliegend, wie es das Nebenbild der Abbildung 3.4.3./1 zeigt.
Erforderlichenfalls ist die Stellung der Maßstäbe etwas zu korrigieren. Die Einstellung ist richtig, wenn die beiden Maßstäbe gegeneinander bei geringem Auf- und Niederbewegen der Augen keine Parallaxe zeigen.
Durch Vergleich der beiden einander überdeckenden Bilder ermittelt man die Vergrößerung der Lupe. Die Ergebnisse werden je nach der individuellen Augenanpassung zwischen den Werten der subjektiven Vergrößerung $\Gamma_s = \frac{s}{f} + 1$ und der Normalvergrößerung $\Gamma_n = \frac{s}{f}$ liegen, wobei s die deutliche Sehweite und f die Brennweite der Lupe kennzeichnen.

3.4.4. Demonstration der Wirkungsweise eines Diapositivbetrachters

Zu Variante a

1. Sechskantschiene (0,5 m)
2. große Optikleuchte
3. 3 große Klemmreiter
4. Blendscheibe mit Linse ($f = +50$ mm)
5. Blendscheibe mit Schiebeschacht
6. Transparentpapier (50 mm × 50 mm), gerahmt Ⓢ (siehe 1.3.1.)
7. Farbdiapositive (50 mm × 50 mm), gerahmt Ⓢ (siehe 1.3.1.)
8. Blendschutz Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Zu Variante b [SE]

Geräte 4. bis 8., außerdem

9. Experimentierleuchte

Methodische Hinweise

1. Der Versuch gestattet, die Schüler mit einer verbreiteten Anwendung der Lupe vertraut zu machen.
2. Bei schrittweisem Vorgehen lernt der Schüler die Wirkungsweise eines Diabetrachters von der einfachen Anwendung der Lupe bis zum fertigen Gerät kennen.
3. Über den Versuch hinausgehend können den Schülern Anregungen zum Selbstbau eines einfachen Diabetrachters gegeben werden.

Varianten a und b

Auf der optischen Bank oder beim Schülerexperiment unter Verwendung von Stativmaterial ordnet man die Linse $f = +50$ mm und die Blendscheibe mit dem eingeschobenen Farbdiapositiv so an, daß man beim Betrachten ein virtuelles, vergrößertes Bild beobachten kann. Durch Verschieben der Linse korrigiert man

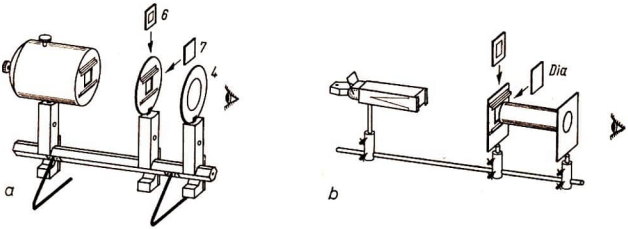


Abb. 3.4.4./1 Versuchsanordnung zur Demonstration der Wirkungsweise eines Diabetrachters im Lehrerexperiment (a) und im Schülerexperiment (b)

die Scharfeinstellung. Richtet man die Anordnung auf helle oder dunkle, gleichmäßige oder stark gegliederte Teile des Klassenraumes, dann macht sich das in veränderter Grundhelligkeit und störendem Hintergrund bemerkbar.
Ein zusätzlich hinter dem Farbdiapositiv im Blendrahmen eingefügtes Transparentpapier mindert zwar etwas die Grundhelligkeit des betrachteten Bildes, läßt aber die Einzelheiten des Hintergrundes verschwinden.
Wird schließlich die Anordnung noch durch die Optikleuchte bzw. die Experimentierleuchte ergänzt, wird der Diabetrachter unabhängig von der Raumhelligkeit einsetzbar. Die vollständigen Anordnungen für die Lehrerdemonstration siehe 3.4.4./1a, für das Schülerexperiment 3.4.4./1b.
Durch Hinzufügen eines Blendschutzes kann störendes Seitenlicht zurückgehalten werden.

3.4.5. Demonstration der Vergrößerung einer Lupe mit Hilfe des Tageslichtschreibprojektors ◑

1. Tageslichtschreibprojektor
2. ungefaßte Sammellinse ($f = +50$ mm ... 150 mm)
3. Distanzring aus Pappe, passend zu 2. ⓢ (siehe 1.3.4.)
4. Projektionsfolie mit Raster

Methodischer Hinweis

Der Versuch zeigt überzeugend die Vergrößerung bei Verwendung einer Lupe. Frei von subjektiven Wahrnehmungen gestattet er die gleichzeitige Beobachtung der Vergrößerung durch alle Schüler.

Versuch

Auf die Projektionsfläche eines Tageslichtschreibprojektors legt man die Projektionsfolie. Die Rasterung soll nicht kleiner sein als 5 mm Strichabstand. In der Bildmitte ordnet man den Distanzring aus Pappe an, auf den man die ungefaßte Sammellinse legt. Die Höhe des Distanzringes soll etwa ein Drittel der Brennweite der verwendeten Linse ausmachen.
Das Projektionsbild wird so eingestellt, daß die Rasterung außerhalb und innerhalb des Linsenfeldes gleich scharf erscheint. Man beobachtet das Projektionsbild nach Abbildung 3.1.9./1 (Nebenbild), jedoch ohne die im V 3.1.9. durch die zusätzliche Verwendung einer Zerstreuungslinse erzeugte Rasterverkleinerung.

3.4.6. Demonstration des Strahlenverlaufes beim Gebrauch der Lupe ◐

1. Manipermtafel
2. 2 Haftleuchten
3. Linsenkörper, bikonvex ($f = +90$ mm)
4. Linsenkörper, bikonvex ($f = +150$ mm)
5. Augenquerschnittsmodell aus Zeichenkarton ⓢ (siehe 1.3.2.)

Methodischer Hinweis

Wichtig für das Verständnis des richtigen Gebrauchs der Lupe ist das Zusammenspiel von Sammellinse und menschlichem Auge. Es erscheint deshalb empfehlenswert, nacheinander, oder, wenn man über genügend Geräte verfügt, besser noch parallel den Strahlengang an der Lupe allein sowie an der mit dem menschlichen Auge kombinierten Lupe vorzuführen.

Versuch

An der Hafttafel mit vorgezeichneter optischer Achse wird der bikonvexe Linsenkörper mit einer Brennweite von 90 mm als Lupe befestigt und der dingseitige Brennpunkt markiert. Mit Kreide wird innerhalb der einfachen Brennweite ein Pfeil als Gegenstand gezeichnet. Die Lichtspuren zweier Haftleuchten werden über die Pfeilspitze hinweg (Abb. 3.4.6./1a) auf die Linsen gelenkt. Die Strahlen verlassen die Linse divergent, ihre rückwärtigen Verlängerungen liefern den Bildpunkt der Pfeilspitze. Das virtuelle Bild kann eingezeichnet werden.

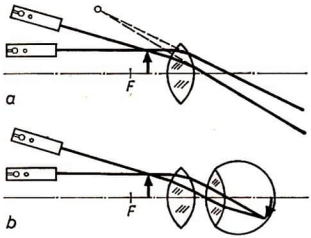


Abb. 3.4.6./1 Versuchsanordnung zur Demonstration des Strahlenverlaufes beim Gebrauch der Lupe bei Einstellung des Auges auf den Nahpunkt (a, b)

In die Mitte zwischen den Schnittpunkten der divergenten Strahlen mit der optischen Achse hinter der Lupe bringt man den bikonvexen Linsenkörper mit einer Brennweite von 150 mm mit unterlegtem Augenquerschnitt aus weißem Zeichenkarton an. Die durch die Augenlinse konvergent gemachten Strahlen schneiden einander auf der Netzhaut. Das Netzhautbild kann eingezeichnet werden (Abb. 3.4.6./1b).

3.4.7. Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Keplerschen Fernrohres

1. Sechskantschiene (1 m)
2. 4 große Klemmreiter
3. Blendscheibe mit Linse ($f = +500$ mm)
4. Blendscheibe mit Linse ($f = +150$ mm)
5. Blendscheibe mit Linse ($f = +50$ mm)
6. Irisblende
7. Blendscheibe mit Schiebeschacht
8. Transparentpapier (50 mm × 50 mm), gerahmt Ⓢ (siehe 1.3.1.)
9. Fadenkreuz (50 mm × 50 mm), gerahmt Ⓢ (siehe 1.3.1.)
10. Papprohre als Blendschutz Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 3.0.4.!
2. Der Versuch ist so angelegt, daß dem Schüler nicht das fertige Fernrohr vorgesetzt wird. Vielmehr werden die Funktion und das Zusammenspiel der einzelnen optischen Bauelemente wie Objektiv, Okular, Gesichtsfeldblende, Feldlinse und Okularblende schrittweise erarbeitet und vorgeführt.
3. Die schrittweise Darstellung ist keinesfalls als starres Schema zu verstehen. Es bleibt dem Lehrer überlassen, welche Schritte er für seinen Unterricht auswählt.

Versuch

Die optische Bank mit aufgesetzter Objektivlinse von 500 mm Brennweite wird auf einen gut beleuchteten, weit entfernten Gegenstand gerichtet. Den in den Schiebeschacht eingebrachten kleinen transparenten Schirm verschiebt man hinter der Linse solange längs der optischen Achse, bis durch die Linse ein scharfes, umgekehrtes, reelles und verkleinertes Bild des Gegenstandes auf dem Schirm entsteht. Die Entfernung zwischen der Linse und dem Schirm ist bei dieser Einstellung nahezu gleich der Brennweite der Objektivlinse (Abb. 3.4.7./1a).
Zur Betrachtung des Mattscheibenbildes durch eine als Okular wirkende Lupe setzt man die Bikonvexlinse mit einer Brennweite von 50 mm hinter den Schiebeschacht und verschiebt soweit längs der optischen Achse, bis das Mattscheibenbild mit dem nahe an die Okularlinse herangebrachten Auge scharf und vergrößert gesehen werden kann (Abb. 3.4.7./1b).
Entfernt man nun das Transparentpapier, kann man ein helles, umgekehrtes Bild des entfernten Gegenstandes beobachten. Die Öffnung der Blendscheibe mit Schiebeschacht wirkt als Gesichtsfeldblende. Davon kann man sich überzeugen, wenn man an seine Stelle die Irisblende bringt und sie beim Beobachten schließt

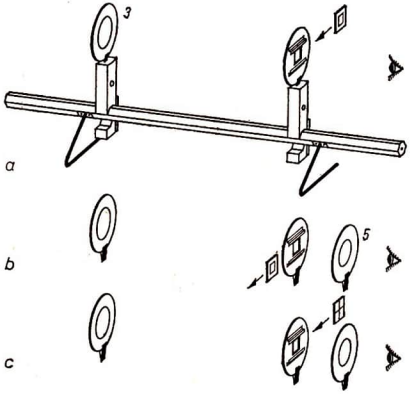


Abb. 3.4.7./1 Versuchsreihe zur schrittweisen Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Keplerschen Fernrohres im Lehrerexperiment (a bis c)

und öffnet. Am besten ist das Bild zu betrachten, wenn man die Augenpupille 55 mm von der Okularlinse entfernt.
Von der Vergrößerung dieser Anordnung überzeugt man sich dadurch, daß man mit dem einen Auge das Fernrohrbild, mit dem anderen Auge an der Blendscheibe vorbei den entfernten Gegenstand betrachtet. Es gelingt leicht, durch Korrektur der Augenstellung die beiden Bilder zur Deckung zu bringen und die Vergrößerung abzuschätzen.
Ein auf eine durchsichtige, farblose Folie mit Tusche oder mit Faserstift gezeichnetes Kreuz im Schiebeschacht demonstriert die Möglichkeit der Verwendung eines Fernrohres als Visierhilfe (Abb. 3.4.7./1c).
Anstelle der Blendscheibe mit Schiebeschacht kann die Sammellinse von 150 mm Brennweite gesetzt werden. Damit wird eine weitere Aufhellung des Gesichtsfeldes erreicht. Die Linsenfassung wirkt als Gesichtsfeldblende. Durch das Einfügen der Feldlinse wird die Beobachtung mit dem Fernrohr auch dadurch erleichtert, daß nunmehr das Auge dichter an die Okularlinse gebracht werden kann. Feldlinse (Kollektiv) und Okularlinse bilden gemeinsam ein Okular. Für die im Versuch angegebenen Werte und Entfernungen der Linsen liegt die Austrittspupille 38 mm vom Okular entfernt. In die Nähe der Austrittspupille kann schließlich zur Unterstützung der Beobachtung mit dem Fernrohr die Irisblende oder ein Lochblendstreifen angebracht werden.
Die Qualität des Fernrohrbildes ist schließlich dadurch zu verbessern, daß durch Anbringen von Papprohren störendes Seitenlicht abgeblendet wird.

Bemerkungen

1. Mit den Mitteln des SEG Optik baut man das Modell eines Keplerschen Fernrohres am besten unter Verwendung von Stativmaterial fest zusammen (Abb. 3.4.7./2). Objektivlinse ($f = +250$ mm), Feldlinse ($f = +100$ mm)

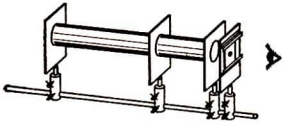


Abb. 3.4.7./2
Aus Aufbauteilen zusammengesetztes Fernrohr für das Schülerexperiment

und Okularlinse ($f = +50$ mm) werden ergänzt durch eine Lochblende aus Pappe im Schiebeschacht etwa 30 mm vor dem Okular und Papprohren zum Seitenlichtschutz.
2. Man kann zur Demonstration der Wirkungsweise eines Fernrohres auch andere als die angegebenen Linsen verwenden.

Objektivbrennweite f_o in mm	Okularbrennweite f_a in mm	Kollektivbrennweite f_k in mm	Entfernung der Austrittspupille s (mit/ohne Kollektivlinse) in mm
200	50	100	37 bzw. 63
200	100	150	83 bzw. 150
250	50	100	35 bzw. 60
250	100	150	73 bzw. 140
500	50	100	30 bzw. 55
500	100	150	53 bzw. 120
+200/−250/(12)	50	100	28 bzw. 53
+200/−250/(12)	100	150	46 bzw. 112
+200/−250/(24)	50	100	29 bzw. 54
+200/−250/(24)	100	150	48 bzw. 115

3. Die Lage der Austrittspupille des Fernrohres kann *experimentell* wie folgt ermittelt werden: Man ersetzt das Objektiv durch ein hell beleuchtetes Transparentobjekt und sucht hinter dem Okular mit einer Mattscheibe das reelle Bild des Transparentobjektes. An genau diesen Ort muß man die Augenpupille zum Beobachten mit dem Fernrohr bringen.
4. Man *berechnet* die Lage der Austrittspupille für ein Fernrohr, angegeben als Entfernung s vom Okular:

Fernrohr mit Kollektivlinse $s = f_a - \frac{f_a^2 (f_o - f_k)}{f_o \cdot f_k}$

Fernrohr ohne Kollektivlinse $s = \frac{f_a (f_a + f_o}{f_o}$

Hierin bedeuten:
s ... Entfernung der Austrittspupille
f_a ... Okularbrennweite
f_o ... Objektivbrennweite
f_k ... Kollektivbrennweite

5. Da nur einfache Linsen verwendet werden, ist das Bild mit Fehlern behaftet, von denen der Farbfehler am stärksten auffällt. Er läßt sich weitgehend beseitigen, indem man als Okular eine achromatische Linse verwendet.

3.4.8. Demonstration des Strahlenverlaufes in einem Keplerschen Fernrohr ◑

1. Manipermtafel
2. 2 oder 3 Haftleuchten
3. Linsenkörper, bikonvex ($f = +90$ mm)
4. 2 Linsenkörper, bikonvex ($f = +150$ mm)
5. Linsenkörper, plankonvex ($f = +250$ mm)
6. Augenquerschnittsmodell aus weißem Zeichenkarton Ⓢ (siehe 1.3.2.)

Methodischer Hinweis

Der Versuch ist so angelegt, daß die Demonstration des Strahlenverlaufes im Keplerschen Fernrohr in einer methodisch aufeinander abgestimmten Schrittfolge dargestellt wird. Der Lehrer kann die für seine Unterrichtsführung erforderlichen Schritte auswählen.

Versuch

An der Manipermtafel werden auf der mit Kreide vorgezeichneten Achse der plankonvexe und der dicke bikonvexe Linsenkörper zu einem Keplerschen Fernrohr zusammengestellt. Ihr Abstand ist gleich der Summe ihrer Brennweiten. 2 oder 3 Haftleuchten ordnet man so an, daß die Lichtspuren achsenparallel auf das Objektiv treffen. Sie verlassen dann das Okular ebenfalls achsenparallel mit verkleinertem Bündelquerschnitt (Abb. 3.4.8./1a).
Die parallelen Lichtspuren werden um einen kleinen Winkel α gegen die optische Achse geneigt. Sie verlassen bei richtig eingestelltem Fernrohr das Okular wiederum parallel und schneiden hinter dem Okular die optische Achse unter dem Winkel β, der größer ist als der Winkel α (Abb. 3.4.8./1b). Aus diesen beiden Winkeln läßt sich die Normalvergrößerung des Fernrohres berechnen: $\Gamma_n = \frac{\tan\beta}{\tan\alpha}$.
Auf die Schnittpunkte der parallelen Strahlen hinter dem Okular mit der optischen Achse, der Austrittspupille, setzt man den bikonvexen Linsenkörper mit einer

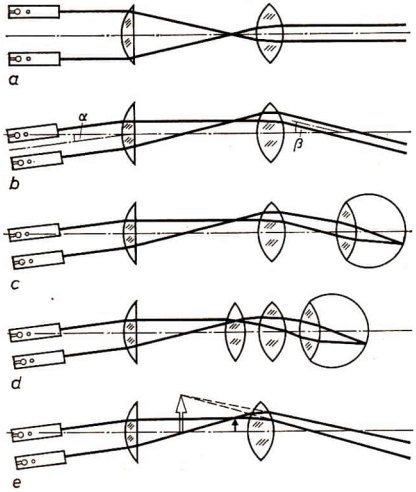


Abb. 3.4.8./1 Versuchsreihe zur Demonstration des Strahlenverlaufes im Keplerschen Fernrohr für achsenparallele Strahlen (a), für geneigte Strahlen (b) im Zusammenspiel mit dem menschlichen Auge (c), unter Hinzufügen einer Feldlinse (d) sowie zur Bildkonstruktion im Keplerschen Fernrohr (e)

Brennweite von 150 mm als Augenlinse mit untergelegtem Augenquerschnitt. Man kann — wie die Abbildung 3.4.8./1c zeigt — beobachten, daß sich die Strahlen auf der Netzhaut schneiden.
Setzt man an den Ort des reellen Zwischenbildes den bikonvexen Linsenkörper von 150 mm Brennweite, so bewirkt die als Feldlinse fungierende Sammellinse, daß die Austrittspupille näher an das Okular heranrückt, ohne daß sich die Vergrößerung des Fernrohres ändert (Abb. 3.4.8./1d).
Schließlich kann man den Gebrauch des Fernrohres mit dem auf den Nahpunkt eingestellten Auge demonstrieren. Man rückt zu diesem Zwecke das Okular etwas näher an das mit Kreide als Pfeil eingezeichnete Zwischenbild, so daß die Strahlen das Okular leicht divergent verlassen. Man skizziert die rückwärtigen Verlängerungen dieser Strahlen und findet den Ort des virtuellen Bildes, das man ebenfalls mit Kreide einzeichnen kann (Abb. 3.4.8./1e).

3.4.9. Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Fernrohres mit Umkehrlinse

1. Sechskantschiene (1 m)
2. 5 große Klemmreiter
3. kleiner Klemmreiter
4. Zwischenstück
5. Blendscheibe mit Linse ($f = +250$ mm)
6. 2 Kondensorlinsen ($f = +120$ mm)
7. Blendscheibe mit Linse ($f = +100$ mm)
8. Blendscheibe mit Linse ($f = +50$ mm)
9. Irisblende
10. Blendscheibe mit Schiebeschacht
11. Fadenkreuz (50 mm × 50 mm), gerahmt Ⓢ (siehe 1.3.1.)
12. Papprohre als Blendschutz Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 3.0.4.!
2. Der Versuch ist in einer kurzen methodischen Schrittfolge angelegt. Die Schrittfolge kann aber ähnlich wie beim V 3.4.7. in noch mehr Teilschritte untergliedert werden.

Versuch

Auf der optischen Bank setzt man aus der Objektivlinse von 250 mm Brennweite, der Umkehrlinse von 100 mm Brennweite und der Okularlinse von 50 mm Brennweite (Abb. 3.4.9./1a) ein terrestrisches Fernrohr zusammen. Der Abstand Objektiv—Umkehrlinse beträgt dabei 450 mm, der Abstand Umkehrlinse—Okular 250 mm. Man richtet das Fernrohr auf einen weit entfernten Gegenstand, blickt durch das Okular und stellt durch leichtes Verschieben der Okularlinse längs der optischen Achse ein scharfes Bild ein. Zur Unterstützung des Auges kann man eine Irisblende etwa 85 mm vom Okular entfernt anbringen. Das Gesichtsfeld eines

solchen Fernrohres ist relativ klein. Die beiden entstehenden Zwischenbilder kann man jeweils in der Brennebene der Objektiv- bzw. Okularlinse mit einem transparenten Schirm aufsuchen. In die Brennebene der Okularlinse kann ein Fadenkreuz als Zielhilfe gebracht werden. Geeignet dazu ist ein auf durchsichtige Folie gezeichnetes Kreuz.

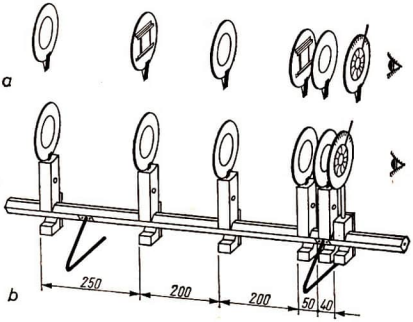


Abb. 3.4.9./1
Versuchsanordnung zur Demonstration der Wirkungsweise eines Keplerschen Fernrohres mit Umkehrlinse (a) und unter Hinzufügen von Feldlinsen (b)

Eine erhebliche Vergrößerung des Gesichtsfeldes und eine Verbesserung der Bildhelligkeit wird durch das Einsetzen von zwei Linsen mit der Brennweite ($f = +120$ mm) jeweils am Ort der Zwischenbilder erreicht. Die Austrittspupille liegt dann erheblich näher am Okular, so daß man die Irisblende etwa 40 mm von der Okularlinse entfernt aufstellen muß (Abb. 3.4.9./1b).
Zur Abblendung des störenden Seitenlichtes verwendet man passend zugeschnittene Papprohre.

Bemerkung

Natürlich kann ein terrestrisches Fernrohr auch mit anderen Linsenkombinationen als den angegebenen zusammengesetzt werden. Einige Beispiele zeigt die folgende Tabelle:

Objektivbrennweite f in mm	Okularbrennweite f in mm	Brennweite der Umkehrlinse f in mm	Brennweite der 1. und 2. Feldlinse		Entfernung der Austrittspupille s (mit/ohne Feldlinsen) in mm
			f in mm	f in mm	
250	50	100	200	150	56 bzw. 85
250	50	100	120	120	43 bzw. 85
500	50	100	200	150	51 bzw. 80
500	50	100	120	120	38 bzw. 80

3.4.10. Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Prismenfernrohres

1. Sechskantschiene (0,5 m)
2. 2 große Klemmreiter
3. kleiner Klemmreiter
4. Blendscheibe mit Linse ($f = +250$ mm)
5. Blendscheibe mit Linse ($f = +50$ mm)
6. Blendscheibe mit zwei Umkehrprismen ⑧ (siehe 1.3.1.)

Methodische Bemerkungen

1. Es ist empfehlenswert, die Umkehrwirkung zweier lotrecht aufeinander stehender rechtwinkliger Prismen mit einem einfachen Freihandversuch als Vorversuch zu zeigen.
2. Man versäume nicht, die Schüler auf die Vorteile der kurzen Bauweise von Prismenfernrohren gegenüber den terrestrischen Fernrohren mit Umkehrlinse aufmerksam zu machen.

Vorversuch

Zur Untersuchung der Umkehrwirkung zweier rechtwinkliger Prismen setzt man diese mit den Hypotenuseflächen teilweise zusammen und blickt durch den Prismensatz auf eine Schriftunterlage (Zeitung, Lehrbuch). Verlaufen die beiden Prismen parallel, erscheint die Schrift aufrecht, stehen sie lotrecht aufeinander, erscheint die Schrift umgekehrt (Abb. 3.4.10./1a).

Versuch

Auf der kurzen Schiene zur optischen Bank werden die Objektivlinse mit einer Brennweite von $f = +250$ mm und die selbstgefertigte Blendscheibe mit den

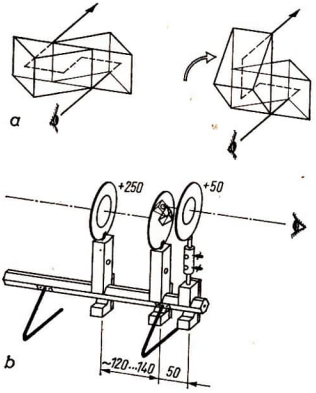


Abb. 3.4.10./1 Freihandversuch zur Demonstration der Umkehrwirkung zweier rechtwinklig, gleichschenkliger Prismen (a) und Anordnung zur Vorführung von Bau und Wirkungsweise eines Prismenfernrohres (b)

beiden eingeschobenen Umkehrprismen (vgl. Abb. 1.3.1./16) in einem Abstand von 120 mm bis 140 mm aufgebaut (Abb. 3.4.10./1b). Durch die zweimalige Umkehrung des Strahlenganges liegt die optische Achse hinter der Prismenanordnung höher (etwa um das 0,7fache der Hypotenusenlänge der verwendeten Prismen). Mit Hilfe von Stativmaterial wird die Okularlinse mit einer Brennweite von $f = +50$ mm etwa 50 mm hinter der Prismenanordnung auf einem kleinen Klemmreiter befestigt und in der erhöhten optischen Achse fixiert.
Blickt man durch die Okularlinse des auf einen fernen Gegenstandes ausgerichteten Prismenfernrohres, beobachtet man ein aufrechtes Bild. Das Prismenfernrohr ist also für terrestrische Beobachtungen geeignet. Durch Verschieben der Okularlinse längs der optischen Achse stellt man das Fernrohr scharf auf den anvisierten Gegenstand ein.
Die Größe des Gesichtsfeldes hängt von der Größe der Umkehrprismen ab und ist für das beschriebene Modell relativ klein.

3.4.11. Demonstration der subjektiven Beobachtung mit einem Fernrohr

Geräte wie beim V 3.4.7. oder V 3.4.13.

Augenmodell nach V 3.3.8., Variante a oder b

Methodischer Hinweis

Der Versuch ist leicht an die Demonstration des Aufbaus und der Wirkungsweise von Fernrohren anzuschließen. Er soll das Zusammenspiel von optischem Instrument und menschlichem Auge verdeutlichen und ist für das Verständnis der subjektiven Beobachtung wertvoll.

Versuch

Auf einer optischen Bank wird entsprechend den Angaben im V 3.4.7. ein Keplersches oder nach den Angaben im V 3.4.13. ein Galileisches Fernrohr aufgebaut,

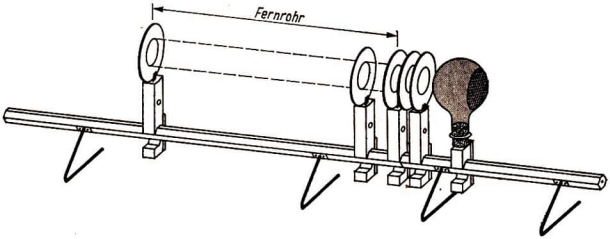


Abb. 3.4.11./1 Versuchsanordnung zur Demonstration der subjektiven Beobachtung mit einem Fernrohr

auf einen weit entfernten Gegenstand gerichtet und scharf eingestellt. Man achte beim Aufbau darauf, daß die Okularlinse möglichst genau am Ende der optischen Bank steht.
Daneben ordnet man das Augenmodell so an, daß der gleiche weit entfernte Gegenstand scharf auf der mattierten Fläche des Modells abgebildet wird. Das Augenmodell ist damit ebenfalls auf den Fernpunkt eingestellt. Man achte darauf, daß die als Augenlinse fungierende Sammellinse ebenfalls dicht am Ende der optischen Bank steht.
Schließlich rückt man das Augenmodell dicht an das Okular des Fernrohres heran, so daß die Augenlinse genau am Ort der Austrittspupille des Fernrohres zu liegen kommt (Abb. 3.4.11./1). Auf der Mattscheibe des Augenmodells wird der weit entfernte Gegenstand nunmehr scharf im Vergleich zur Abbildung ohne vorgeschaltetes Fernrohr vergrößert abgebildet.
Durch Messung der Bildgrößen der beiden reellen Bilder auf der Mattscheibe des Augenmodells kann man die Vergrößerung des Fernrohres bestimmen.

3.4.12. Ermittlung der Vergrößerung eines Fernrohres ◑

Zu Variante a

1. Fernrohr oder Prismenfernrohr oder Theaterglas oder Fernrohrmodell nach V 3.4.7. bzw. V 3.4.9. oder V 3.4.13.
2. Wandtafel mit parallelen, waagerechten Kreidestrichen

Zu Variante b

3. Fernrohrmodell nach V 3.4.7. oder V 3.4.9.
4. Optikleuchte
5. Blendscheibe mit Schiebeschacht
6. Transparentpapier (50 mm × 50 mm), gerahmt Ⓢ (siehe 1.3.1.)
7. transparenter Schirm
8. Meßstab oder Lineal

Methodische Hinweise

1. Der Versuch läßt sich leicht an die Demonstration des Aufbaus und der Wirkungsweise eines Fernrohres anschließen und gestattet die schnelle Bestimmung der Vergrößerung eines Fernrohrmodells oder eines Fernrohres.
2. Variante a ist für alle Fernrohrtypen anwendbar, Variante b nur für solche, deren Austrittspupille das vom Okular entworfene reelle Bild der Objektivfassung ist.
3. Als weitere Variante zur Ermittlung der Vergrößerung bietet sich die im V 3.4.2. beschriebene an.

Variante a

Ein Fernrohrmodell oder ein handelsübliches Fernrohr wird erforderlichenfalls durch Einspannen mit Stativmaterial auf einen etwa 5 m ... 10 m entfernten Vergleichsmaßstab gerichtet und scharf auf diesen eingestellt. Den Maßstab

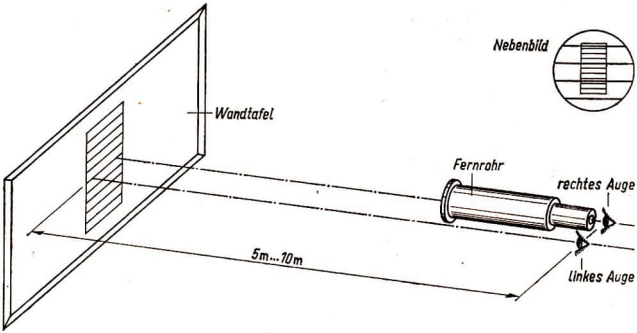


Abb. 3.4.12./1 Anordnung zur Ermittlung der Vergrößerung eines Fernrohres. Nebenbild: Gesichtsfeld bei der Beobachtung

zeichnet man vorher mit Kreide an eine gut beleuchtete Wandtafel. Es genügen 10 bis 15 waagerechte parallele Striche mit einem Strichabstand von mindestens 50 mm und einer Strichlänge von 200 mm. Blickt man mit dem einen Auge durch das Fernrohr und mit dem anderen Auge seitlich am Fernrohr vorbei, so kann man die mit dem unbewaffneten Auge und die mit dem durch das Fernrohr blikkenden Auge gesehen Bilder des Maßstabes vergleichend nebeneinander betrachten (Abb. 3.4.12./1). Man kann bei einiger Übung erreichen, daß die beiden Bilder einander überlagern (Abb. 3.4.12./1, Nebenbild). Das Verhältnis der beiden Strichabstände zueinander ergibt die Vergrößerung des Fernrohres.

Variante b

Bei einem auf unendlich eingestellten Fernrohrmodell nach V 3.4.7. oder V 3.4.9. ersetzt man das Objektiv durch ein in eine Blendscheibe mit Schiebeschacht eingebrachtes Transparentobjekt, dessen Größe e man mißt. Das Objekt wird mit der Optikleuchte gut bestrahlt. Hinter dem Okular fängt man auf einem transparenten Schirm nach Entfernen der Iris- oder Lochblende das scharfe, reelle Bild des Transparentobjektes auf und mißt dessen Größe a. Die Berechnung der Vergrößerung erfolgt nach der Beziehung: $\Gamma = \frac{e}{a}$.

Bemerkung

Bei Bestimmung der Vergrößerung fertiger Fernrohre nach Variante b braucht man das Objektiv nicht zu entfernen. Es genügt, dicht vor die Objektivlinse ein Transparentobjekt zu bringen.

3.4.13. Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Galileischen Fernrohres

1. Sechskantschiene (0,5 m)
2. 2 große Klemmreiter
3. Blendscheibe mit Linse ($f = +150$ mm)
4. Blendscheibe mit Linse ($f = -50$ mm)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 3.0.4.!
2. Die Vorführung von Aufbau und Wirkungsweise eines Galileischen Fernrohres etwa parallel zu einem Keplerschen Fernrohr nach V 3.4.7. zeigt den Schülern deutlich die Vorteile der sehr kurzen Tubuslänge und der größeren Lichtstärke, so daß es besonders als Theaterglas Anwendung findet.

Versuch

Am Ende der kurzen optischen Bank wird die Konkavlinse mit einer Brennweite von -50 mm als Okularlinse aufgestellt. Davor bringt man in einer Entfernung, die der Differenz der Absolutwerte der Brennweiten von Objektiv und Okular entspricht, die Konvexlinse mit einer Brennweite von $+150$ mm. Schaut man durch das Okular, so erblickt man das aufrechte, etwa 3mal vergrößerte Bild

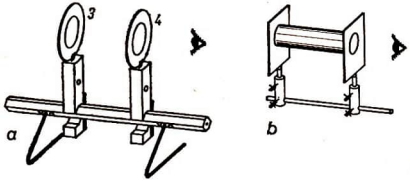


Abb. 3.4.13./1
Versuchsanordnungen zur Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Galileischen Fernrohres im Lehrerexperiment (a) oder im Schülerexperiment (b)

eines entfernten Gegenstandes. Zur Scharfeinstellung muß man den Abstand der beiden Linsen erforderlichenfalls etwas korrigieren (Abb. 3.4.13./1a).
Die Objektivfassung wirkt als Gesichtsfeldblende. Die Austrittspupille ist identisch mit der Augenpupille des Beobachters, so daß sich das Aufstellen einer Augenblende erübrigt.

Bemerkungen

1. Bei Verwendung des SEG Optik befestigt man auf einem kurzen Stativstab mit Kreuzmuffen als Objektiv die Sammellinse $f = +250$ mm und in 150 mm Abstand als Okular die Zerstreuungslinse $f = -100$ mm. Zum Lichtschutz bringt man zwischen beide Linsen ein Papprohr (Abb. 3.4.13./1b) an.
2. Man kann die Bildqualität steigern, wenn man als Objektiv eine achromatische Linse verwendet.

3. Andere brauchbare Linsenkombinationen sind:

Objektiv-brennweite f in mm	Okular-brennweite f in mm	Linsen-abstand l in mm	Vergrößerung Γ
+500	−250	250	2
+500	−100	400	5
+500	− 50	450	10
+250	−100	150	2,5
+250	− 50	200	5
+200	−100	100	2
+200	− 50	150	4
+100	− 50	50	2

3.4.14. Demonstration des Strahlenverlaufes in einem Galileischen Fernrohr ◑

1. Manipermtafel
2. 2 bis 3 Haftleuchten
3. Linsenkörper, plankonvex ($f = +250$ mm)
4. Linsenkörper, bikonvex ($f = +150$ mm)
5. Linsenkörper, bikonkav ($f = -150$ mm)
6. Augenquerschnittsmodell aus Zeichenkarton ⓑ (siehe 1.3.2.)

Methodischer Hinweis

Die hier dargestellte Reihenfolge zur Behandlung des Strahlenganges am Galileischen Fernrohr ist synthetisch aufgebaut. Sie kann auch umgekehrt werden, wenn Wert auf ein analytisches Vorgehen gelegt wird.

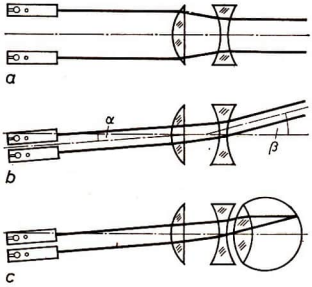


Abb. 3.4.14./1 Versuchsanordnung zur Demonstration des Strahlenverlaufes in einem Galileischen Fernrohr für achsenparallele Strahlen (a) und für geneigte Strahlen (b) unter Hinzufügen des menschlichen Auges (c)

Versuch

Auf der mit Kreide an der Hafttafel vorgezeichneten optischen Achse werden der plankonvexe und der bikonkave Linsenkörper zu einem Galileischen Fernrohr zusammengesetzt. Der Abstand der beiden Linsen ist dabei gleich der Differenz der Absolutwerte ihrer Brennweiten, also etwa 100 mm. 2 oder 3 achsenparallele Strahlenbündel treffen auf das Objektiv, verlaufen zwischen den Linsen konvergent und verlassen das Okular wiederum achsenparallel mit verkleinertem Bündelquerschnitt (Abb. 3.4.14./1a).
Unter Beibehaltung der Parallelität werden die Lichtspuren um einen kleinen Winkel α gegen die optische Achse geneigt. Sie verlassen das Okular wiederum in sich parallel, aber unter einem größeren Winkel β (Abb. 3.4.14./1b).
Ordnet man dicht hinter der Okularlinse den bikonvexen Linsenkörper mit einer Brennweite von etwa +150 mm mit untergeschobenem Augenquerschnitt an, läßt sich die Vereinigung der Lichtspuren auf der Netzhaut erkennen und das Zusammenspiel von Fernrohr und menschlichem Auge demonstrieren (Abb. 3.4.14./1c).

3.4.15. Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Spiegelteleskopes

Zu Variante a

1. Sechskantschiene (0,5 m)
2. 4 große Reiter
3. Blendscheibe mit Hohlspiegel ($f = +200$ mm)
4. Blendscheibe mit Linse ($f = +100$ mm)
5. Blendscheibe mit Linse ($f = +50$ mm)
6. Blendscheibe mit Schiebeschacht
7. Irisblende
8. Diarähmchen mit Transparentpapier Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Zu Variante b

Geräte 1. bis 8., außerdem

9. Sechskantschiene (1 m)
10. Schwenkverbindung
11. kleiner Klemmreiter mit Verlängerungsstück
12. Spiegelglasstreifen (50 mm × 100 mm) Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 3.0.4.!
2. Für die Vorführung des Versuches im Unterricht wird eine Schrittfolge analog zur Demonstration des Aufbaus und der Wirkungsweise eines Keplerschen Fernrohres empfohlen. Vergleiche dazu V 3.4.7.!

Variante a: Spiegelteleskop nach Herschel

Entsprechend der Abbildung 3.4.15./1a kann ein einfaches Spiegelteleskop aus dem Hohlspiegelobjektiv von ungefähr 200 mm Brennweite und der Okularlinse von 50 mm Brennweite bei einem gegenseitigen Abstand von etwa 250 mm auf einer kurzen optischen Bank aufgebaut werden. Der Hohlspiegel ist um einen kleinen Winkel gegen die optische Achse zu drehen, damit an der Okularblendscheibe vorbei ein weit entfernter Gegenstand anvisiert werden kann. Die Scharfein-

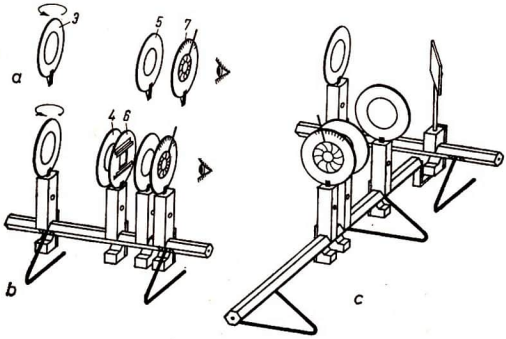


Abb. 3.4.15./1 Versuchsanordnungen zur Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Spiegelteleskopes nach Herschel ohne (a) und mit (b) Feldlinse sowie eines Spiegelteleskopes nach Newton (c)

stellung erfolgt durch Verschieben der Okularlinse längs der optischen Achse. Die Austrittspupille liegt etwas mehr als 60 mm hinter dem Okular. An diese Stelle kann zur Unterstützung des Auges die Irisblende gebracht werden.
Auf einem Klemmreiter werden Feldlinse ($f = +100$ mm) und Schiebeschacht gemeinsam etwa 25 mm voneinander entfernt angeordnet und so zur Versuchsanordnung hinzugefügt, daß die Ebene des Schiebeschachtes mit der Brennebene von Objektivspiegel und Okularlinse zusammenfällt, die Kollektivlinse zum Spiegel weist. Die Irisblende muß man der Okularlinse nunmehr bis auf etwa 35 mm nähern. Schiebt man das Diarähmchen mit dem Transparentpapier in den Schiebeschacht ein, kann das reelle Zwischenbild beobachtet und auch vergrößert durch das Okular betrachtet werden (Abb. 3.4.15./1b).

Variante b: Spiegelteleskop nach Newton

Der Aufbau des Versuches unterscheidet sich vom Aufbau der Variante a nur wenig. In den optischen Daten stimmen beide Versuche vollständig überein. Um den sphärischen Fehler des Spiegels, der bei schräger Inzidenz der Lichtbündel besteht, zu beseitigen, wird der Strahlengang durch einen ebenen Spiegel in das um 90° zur optischen Achse des Spiegels versetzte Okular gelenkt (Abb. 3.4.15./1c).

3.4.16. Demonstration des Strahlenverlaufes in einem Spiegelteleskop ◑

Zu Variante a

1. Manipermtafel
2. 2 Haftleuchten
3. Konkavspiegelstreifen ($f = +200$ mm)
4. Linsenkörper, bikonvex ($f = +90$ mm)

Zu Variante b

Geräte 1. bis 4., außerdem

5. kleiner, ebener Spiegelstreifen Ⓢ (siehe 1.3.2.)

Methodischer Hinweis

Entsprechend den im V 3.4.15. beschriebenen Spiegelteleskopen werden hier die Strahlengänge an der Hafttafel vorgeführt. Es wird in der Darstellung auf eine detaillierte Schrittfolge verzichtet. Es bereitet aber keinerlei Schwierigkeiten, den Versuch etwa wie die Demonstration des Strahlenverlaufes am Keplerschen Fernrohr zu erweitern (vgl. V 3.4.8.).

Variante a: Spiegeltelskop nach Herschel

An der Manipermtafel mit vorgezeichneter optischer Achse wird der Hohlspiegelstreifen befestigt. Die zwei parallelen Lichtspuren der Haftleuchten treffen den Hohlspiegel symmetrisch unter einem kleinen Winkel zur optischen Achse. Der Linsenkörper wird außerhalb der optischen Achse so in den Strahlenverlauf gebracht, daß der Konvergenzpunkt der reflektierten Strahlen in der Brennebene zu liegen kommt. Die Strahlen verlassen dann die Okularlinse wiederum parallel (Abb. 3.4.16./1a).

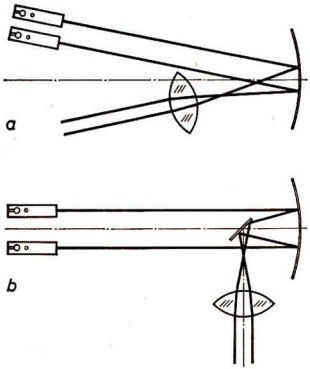


Abb. 3.4.16./1 Versuchsanordnung zur Demonstration des Strahlenverlaufes in einem Spiegelteleskop nach Herschel (a) bzw. Newton (b)

Variante b: Spiegelteleskop nach Newton

Der Versuch gestaltet sich ähnlich wie Variante a. Die Lichtspuren fallen achsenparallel auf den Hohlspiegel und werden nach der Reflexion kurz vor dem Konvergenzpunkt mit dem kleinen, ebenen Spiegelstreifen in die Okularlinse geleitet (Abb. 3.4.16./1b).

3.4.17. Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Mikroskopes

1. 2 Sechskantschienen (1 m und 0,5 m)
2. 5 große Klemmreiter
3. kleiner Klemmreiter
4. große Optikleuchte
5. 2 Blendscheiben mit Schiebeschacht
6. Blendscheibe mit Linse ($f = +50$ mm)
7. Blendscheibe mit Linse ($f = +100$ mm)
8. Blendscheibe mit Linse ($f = +150$ mm)
9. Irisblende
10. Diarähmchen mit mikroskopischem Präparat zwischen Folien oder Gläsern Ⓢ (siehe 1.3.1.)
11. Diarähmchen mit Transparentpapier Ⓢ (siehe 1.3.1.)
12. Diarähmchen mit transparentem Millimeterpapier Ⓢ (siehe 1.3.1.)
13. Diarähmchen mit durchsichtiger Folie und cm-Teilung Ⓢ (siehe 1.3.1.)
14. Spiegel auf 13 mm Stiel

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist so angelegt, daß den Schülern nicht das fertig zusammengesetzte Mikroskop vorgestellt wird, sondern daß die Funktion der einzelnen optischen Bauelemente sowie ihr Zusammenspiel schrittweise vorgeführt und mit ihnen erarbeitet werden kann.
2. Das schrittweise Vorgehen soll keinesfalls als starres Schema verstanden werden. Es bleibt dem Lehrer überlassen, welche Schritte er für die Demonstration auswählt.

Versuch

Auf der Schiene zur optischen Bank werden entsprechend der Abbildung 3.4.17./1a die große Optikleuchte, die Blendscheibe mit Schiebeschacht und eingeschobenem mikroskopischem Präparat, die Objektivlinse mit einer Brennweite von +50 mm und die zweite Blendscheibe mit Schiebeschacht und eingeschobenem Diarähmchen mit Transparentpapier angeordnet. Durch leichtes Verrücken des Präparates oder der Objektivlinse längs der optischen Achse stellt man ein scharfes, vergrößertes und umgekehrtes Bild des Präparates auf dem kleinen Transparentschirm ein.
Durch Hinzufügen der Okularlinse mit einer Brennweite von 100 mm betrachtet man das in der Brennebene der Okularlinse stehende Mattscheibenbild wie durch eine Lupe. Entfernt man das Diarähmchen mit dem Transparentpapier, erblickt man ein sehr helles, vergrößertes Bild des Gegenstandes durch das Okular

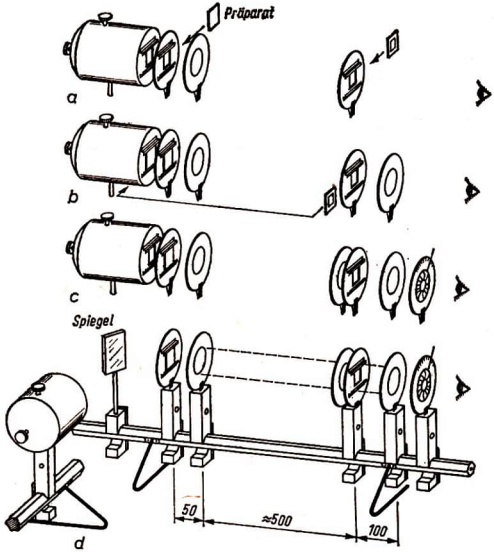


Abb. 3.4.17./1 Versuchsanordnung zur schrittweisen Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Mikroskopes

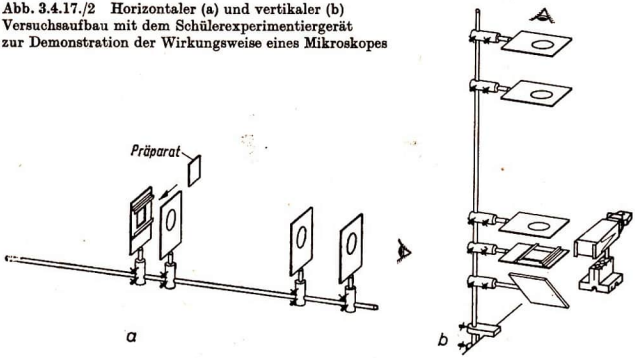
(Abb. 3.4.17./1b). Das Bild ist gestört durch Überstrahlungen von der Glühlampe. Diese Störung beseitigt man leicht, indem man das Diarähmchen mit dem Transparentpapier zwischen Lichtquelle und Präparat bringt.
Als nächsten Schritt kann man die Feldlinse mit einer Brennweite von 150 mm zwischen Objektiv und Okular 125 mm vom Okular entfernt einbringen. Dadurch vergrößert sich das Gesichtsfeld, und die Flächenhelligkeit nimmt etwas zu (Abb. 3.4.17./1c).
Eine gewisse Abwandlung des Strahlenganges kann man erreichen, wenn man anstelle der Optikleuchte einen ebenen Spiegel 45° zur optischen Achse gedreht anbringt, die Leuchte auf einer zweiten Schiene anordnet und ihr Licht in das Mikroskopmodell spiegelt (Abb. 3.4.17./1d).
Schließlich kann man noch die Objektivvergrößerung des Modells ermitteln, indem man das Präparat durch transparentes Millimeterpapier ersetzt und mit dem in die Brennebene des Okulars gebrachten Okularmaßstab (Zentimeterteilung auf einer durchsichtigen Folie) vergleicht. Die Gesamtvergrößerung des Mikroskopmodells ergibt sich als Produkt der Objektiv- und der Okularvergrö-

ßerung. Letztere kann man nach V 3.4.3. bestimmen oder als Quotienten aus deutlicher Sehweite und Okularbrennweite berechnen.

Bemerkung

Mit den Geräten des SEG Optik läßt sich der Versuch als Schülerexperiment durchführen. Die Schrittfolge ist ähnlich wie beim Lehrerversuch, jedoch sind die anderen experimentellen Daten zu berücksichtigen: Objektivlinse ($f = +50$ mm), Okularlinse ($f = +100$ mm), Feldlinse ($f = +250$ mm); starrer Aufbau mit Stativmaterial.

Abb. 3.4.17./2 Horizontaler (a) und vertikaler (b) Versuchsaufbau mit dem Schülerexperimentiergerät zur Demonstration der Wirkungsweise eines Mikroskopes



Bei den ersten Schritten erfolgt die Betrachtung ohne Experimentierleuchte einfach gegen einen hellen Hintergrund oder gegen den Himmel (Abb. 3.4.17./2a). Nach Übergang zum Vertikalaufbau erfolgt die Beleuchtung über einen Spiegel mit Tageslicht und schließlich mit der Experimentierleuchte als Beleuchtungseinrichtung (Abb. 3.4.17./2b). Vergleiche dazu auch Abbildung 1.2.1./6 als Mikroskopmodell ohne Feldlinse.

3.4.18. Demonstration des Strahlenverlaufes in einem Mikroskop ◑

1. Manipermtafel
2. kleine Haftleuchte
3. Linsenkörper, halbrund
4. Linsenkörper, plankonvex ($f = +250$ mm)
5. Linsenkörper, bikonvex ($f = +150$ mm)
6. Linsenkörper, bikonvex ($f = +90$ mm)
7. Augenquerschnittsmodell aus Zeichenkarton ⓢ (siehe 1.3.2.)

Methodische Hinweise

1. Ähnlich wie in V 3.4.8. und 3.4.14. wird hier der Strahlengang schrittweise entwickelt. Es bleibt dem Lehrer überlassen, welche der dargestellten Schritte er entsprechend seiner Unterrichtssituation auswählt.
2. In dem Versuch wird von einem Gegenstandspunkt ein volles Lichtbündel verwendet. Der Versuch läßt sich unter Verwendung von zwei großen Haftleuchten ähnlich wie V 3.4.8. gestalten.

Versuch

Auf der Manipermtafel mit vorgezeichneter optischer Achse werden der halbrunde und der plankonvexe Linsenkörper zu einem „Objektiv" vereinigt angebracht (Abb. 3.4.18./1a).
20 mm bis 30 mm außerhalb der optischen Achse wird die kleine Haftleuchte so angebracht, daß die Glühlampe als Gegenstandspunkt zwischen der einfachen und doppelten Brennweite des Objektivs steht und das divergente Strahlenbündel die Objektivlinse voll ausleuchtet. Außerhalb der doppelten Brennweite vereinigt sich das Lichtbündel zum Bildpunkt, so daß ein reelles Zwischenbild mit Kreide skizziert werden kann (Abb. 3.4.18./1a).
Nunmehr wird der bikonvexe Linsenkörper mit einer Brennweite von etwa +90 mm als Okular so in den Strahlengang gebracht, daß ein schwach divergentes Lichtbündel die Okularlinse verläßt. Die rückwärtigen Verlängerungen der Randstrahlen dieses Bündels liefern einen Bildpunkt des virtuellen Bildes, das ebenfalls mit Kreide eingezeichnet werden kann (Abb. 3.4.18./1b).
Schließlich bringt man den bikonvexen Linsenkörper von +150 mm Brennweite in die Austrittspupille des Mikroskopes. Auf der Netzhaut des untergeschobenen Augenquerschnitts wird das Lichtbündel wieder in einem Punkt gesammelt, so daß auch das Netzhautbild gezeichnet werden kann (Abb. 3.4.18./1c).

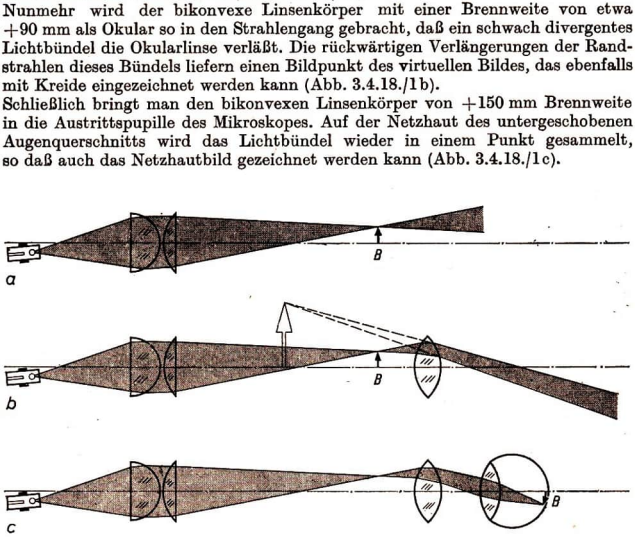


Abb. 3.4.18./1 Versuchsreihe zur Demonstration des Strahlenverlaufes in einem Mikroskop. Bildentstehung durch das Objektiv (a), Zusammenspiel von Objektiv und Okular (b) sowie Objektiv, Okular und menschlichem Auge (c)

3.4.19. Ermittlung der Vergrößerung eines Mikroskopes [SE]

1. Mikroskop
2. Objektträger nach Thoma als Objektmaßstab
3. Meßstab mit Millimeterteilung als Vergleichsmaßstab

Methodischer Hinweis

Der methodische Wert des Versuches liegt vor allem in der Tatsache, daß es mit dieser einfachen Versuchsanordnung gelingt, auch stark vergrößernde Mikroskope auszumessen.

Versuch

Zum Ermitteln der Vergrößerung eines Mikroskops wird das scheinbare Bild eines Objektmaßstabes mit einem Millimeterstab verglichen, der sich in der deutlichen Sehweite befindet. Als Objektmaßstab kann ein Objektträger nach Thoma mit einer eingravierten Strichteilung verwendet werden. In der Praxis dient dieser Objektträger zum Auszählen von Blutkörperchen.

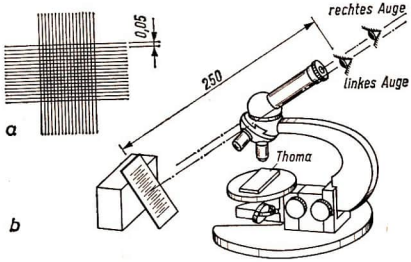


Abb. 3.4.19./1 Anordnung zur Bestimmung der Vergrößerung eines Mikroskopes (b) unter Verwendung eines Objektträgers nach Thoma — Strichteilung (a)

Auf seiner Oberseite ist eine Strichteilung nach Abb. 3.4.19./1a eingeritzt; der Strichabstand beträgt $\frac{1}{20}$ mm. Der Objektträger wird auf den Objekttisch des zu untersuchenden Mikroskops gelegt. Sein Bild wird scharf eingestellt. Etwa 250 mm vom Auge entfernt wird ein Millimeterstab so hingelegt, daß ihn die Blickrichtung des Auges senkrecht trifft (Abb. 3.4.19./1b). Man betrachtet nun mit einem Auge durch das Mikroskop das scharfe Bild des Objekts, mit dem anderen Auge fixiert man die Millimeterteilung des Meßstabes. Die beiden Bilder überdecken sich beim Betrachten und werden miteinander verglichen. Man muß dabei auf die parallele Lage der Striche der beiden Bilder achten.

Ist der Strichabstand des Objektmaßstabes $\frac{1}{20}$ mm und fallen n Striche des scheinbaren Bildes des Objektmaßstabes mit m mm-Strichen des Vergleichsmaßstabes zusammen, so ist die Vergrößerung Γ des Mikroskopes durch die zugeschnittene Gleichung

$$\Gamma = \frac{20 \cdot m}{n} \text{ gegeben.}$$

Bemerkungen

1. Das Überdecken der beiden Bilder bereitet dem Anfänger oft Schwierigkeiten und muß geübt werden.
2. Sollen nach dieser Methode schwachvergrößernde Mikroskope oder Mikroskopmodelle nach V 3.4.16. ausgemessen werden, empfiehlt es sich, anstelle des Objektträgers nach Thoma einfach transparentes Millimeterpapier zu verwenden. Die angegebene Gleichung kann dann zur Berechnung nicht angewandt werden.
3. Dieses Verfahren läßt sich für einäugige Beobachtung abwandeln, indem man dicht über dem Okular des Mikroskops einen kleinen, halbdurchlässig versilberten Spiegel, beispielsweise ein unter einem Winkel von 45° gegen die optische Achse des Mikroskops geneigtes Deckglas, anbringt. Den Meßstab stellt man dabei seitlich 250 mm vom Okular entfernt auf. Blickt man durch die schwachversilberte Glasplatte in das Okular, so sieht man gleichzeitig die durch das Mikroskop und den Spiegel erzeugten scheinbaren Bilder des Objekt- und des Vergleichsmaßstabes.

3.4.20. Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Spektralapparates ◑; ●

Zu Variante a

1. 2 Sechskantschienen (1 m; 0,5 m)
2. Schwenkverbindung
3. 5 große Klemmreiter
4. kleiner Klemmreiter mit Verlängerungsstück
5. Blendscheibe mit Mikrometerspalt
6. Blendscheibe mit Linse ($f = +250$ mm)
7. Blendscheibe mit Linse ($f = +200$ mm)
8. Blendscheibe mit Linse ($f = -250$ mm)
9. Blendscheibe mit Linse ($f = +100$ mm)
10. Blendscheibe mit Linse ($f = +50$ mm)
11. Blendscheibe mit Schiebeschacht
12. Irisblende
13. Prismentisch
14. Kronglasprisma 40 mm
15. Papprohre als Blendschutz Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Zu Variante b [SE]

16. 4 T-Füße
17. Blendrahmen mit Schiebeschacht
18. Blendrahmen mit Linse ($f = +100$ mm)

19. Blendrahmen mit Linse ($f = +250$ mm)
20. Blendrahmen mit Linse ($f = +50$ mm)
21. Tischchen
22. Kronglasprisma
23. enger Spalt (50 mm × 50 mm) Ⓢ (siehe 1.3.1.)
24. Gelenkverbindung Ⓢ (siehe 1.3.1.)
25. Papprohre als Blendschutz Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Methodischer Hinweis

Der Versuch dient nicht nur zur Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Spektralapparates. Die fertige Anordnung kann als relativ leistungsfähiger Spektralapparat im Unterricht zur Beobachtung von kontinuierlichen Spektren und Linienspektren verwendet werden.

Variante a

Mit der Schwenkverbindung werden die beiden Sechskantschienen miteinander verbunden. Über der Drehachse am Ende der kurzen Schiene wird mit dem Verlängerungsstück der Prismentisch angeordnet. Das Kollimatorrohr, bestehend aus den Mikrometerspalt und der Sammellinse von 250 mm Brennweite, wird ebenfalls noch auf der kurzen Sechskantschiene montiert. Der Abstand vom Mikrometerspalt zur Linse beträgt 250 mm.
Auf der langen Schiene wird ein Fernrohr zusammengesetzt, das aus einer so eng wie möglich beieinanderstehenden Linsenkombination von +200 mm und

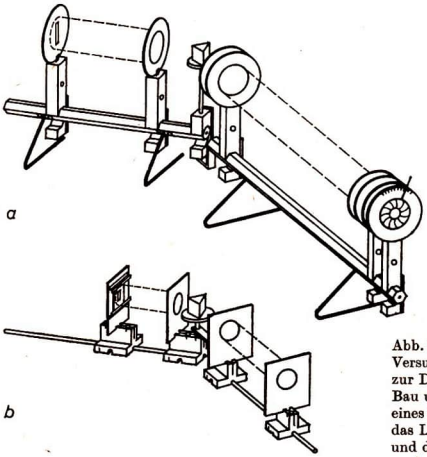


Abb. 3.4.20./1
Versuchsanordnung zur Demonstration von Bau und Wirkungsweise eines Spektralapparates für das Lehrerexperiment (a) und das Schülerexperiment (b)

—250 mm Brennweite als Objektiv besteht. Als Okularlinse verwendet man die Sammellinse von 50 mm Brennweite. Der Abstand Objektiv—Okular beträgt etwa 850 mm.
75 mm vor der Okularlinse steht als Feldlinse die Sammellinse von 100 mm Brennweite. Beide Linsen zusammen bilden ein achromatisches Okular. Zur Unterstützung der subjektiven Beobachtung bringt man zwischen Auge und Okularlinse die Irisblende (Abb. 3.4.20./1a).
Zur Scharfeinstellung wird das Fernrohr ausgeschwenkt und scharf auf einen weit entfernten Gegenstand eingestellt. Danach richtet man es wieder mit dem Kollimatorrohr aus und verschiebt den Mikrometerspalt solange längs der optischen Achse, bis man ein scharfes Spaltbild im Okular erkennt.
Endlich wird das Prisma auf den Prismentisch gesetzt; das Fernrohr um etwa 40° ausgeschwenkt. Man beobachtet einen Teil des Spektrums im Okular. Durch leichtes Drehen des Prismas stellt man auf das Minimum der Ablenkung ein. Damit ist das Gerät zum Einsatz als Spektralapparat fertig.

Variante b

Auf dem kurzen Stativstab werden der im Schiebeschacht befindliche Spalt und die Sammellinse von 100 mm Brennweite als Kollimator aufgebaut. Gemeinsam mit der Kollimatorlinse ist das Tischchen auf einem T-Fuß untergebracht. Die Linsen von 250 mm und 50 mm Brennweite bilden zusammen ein Fernrohr, das durch ein 306 mm langes Papprohr mit einer lichten Weite von 42 mm die beiden Linsen in der richtigen Entfernung hält. Das Fernrohr ist mit der Gelenkverbindung (vgl. Abb. 1.3.1./18) um das Tischchen schwenkbar (Abb. 3.4.20./1b).
Die Einstellung ist denkbar einfach. Fernrohr und Kollimator werden ausgerichtet, und der Spalt wird solange längs der optischen Achse verschoben, bis ein scharfes Bild im Okular zu sehen ist. Dann kann das Prisma aufgesetzt, das Fernrohr um etwa 40° ausgeschwenkt werden und die Einstellung auf das Minimum der Ablenkung erfolgen.
Störendes Seitenlicht kann vom Kollimator ferngehalten werden, wenn die Linse mit einem etwa 100 mm langen Papprohr von 42 mm Durchmesser versehen wird.

4. Spektrale Zerlegung des Lichtes und Farbmischung

4.0. Methodische Bemerkungen

4.0.0. In diesem Kapitel werden Versuche zur spektralen Zerlegung des Lichtes, zur Erzeugung kontinuierlicher und diskontinuierlicher Spektren, zum Nachweis des ultravioletten und des ultraroten Lichtes sowie zur additiven und subtraktiven Farbmischung beschrieben. Für den Großteil der Versuche in den Abschnitten 4.1. und 4.2. wird entweder ein Spektralapparat für subjektive Beobachtung oder eine Anordnung zur Erzeugung eines Spektrums auf einer optischen Bank für die objektive Beobachtung benötigt. Es empfiehlt sich, eine solche Anordnung möglichst fest aufzubauen und gegebenenfalls mit einem Geradsichtprisma auszurüsten, weil dann eine Abwinkelung der optischen Bank und die stets erneute Einstellung des Prismas auf das Minimum der Ablenkung entfallen können. Ein fester Aufbau spart außerdem Vorbereitungszeit, ist nach ein-, zweimaligem Einsatz den Schülern vertraut und trägt somit zur Erhöhung der Effektivität des Unterrichts bei. Von den in diesem Buch dargestellten Versuchen lassen sich V 4.1.1., V 4.1.5. bis 4.1.7., V 4.1.11. bis 4.1.13., V 4.2.1. und V 4.2.3. mit einer solchen Anordnung vorführen.

4.0.1. Der Abschnitt beginnt mit V 4.1.1. zur Erzeugung eines Spektrums. Er ist als grundlegender Versuch für weitere aufbauende Versuche anzusehen. Deshalb werden verschiedene Varianten unter Verwendung des Tageslichtschreibprojektors, des Kleinbildprojektors, der optischen Bank für Lehrer- und Schülerexperimente und einfacher Mittel bis zur Handhabung als Freihandversuch angegeben. Die subjektive Betrachtung eines Spektrums ist dabei schon als Hausexperiment möglich. Bei der Behandlung sollte nachdrücklich betont werden, daß ein Spektrum durch eine Aneinanderreihung vieler farbiger Spaltbilder entsteht. Das kann beispielsweise anschaulich so vorgeführt werden, daß in einer Versuchsanordnung zur Erzeugung eines Spektrums nacheinander verschiedene Farbfilter in den Strahlengang gebracht und die Lage des jeweiligen Spaltbildes auf dem Schirm markiert wird. Man sollte vermeiden, von unendlich vielen Spaltbildern zu sprechen, da durch Versuche festgestellt worden ist, daß im Spektrum nur etwa 160 Farbeindrücke unterschieden werden können. Im anschließenden Versuch 4.1.2. wird der Strahlenverlauf bei der spektralen Zerlegung des Lichtes an einer Haftfafel demonstriert; ein Versuch, der durch seine Einfachheit und Übersichtlichkeit V 4.1.1. sinnvoll ergänzt.
Mit Versuchen zur Entstehung eines Regenbogens und zur Demonstration des Strahlenverlaufes bei seiner Entstehung wird modellmäßig eine natürliche und den Schülern bekannte Erscheinung nachgeahmt. Man versäume nicht, die Schüler

auf die grundlegenden Unterschiede der Entstehung eines Regenbogens im Vergleich zu den Versuchen aufmerksam zu machen und darauf hinzuweisen, daß gegenüber der natürlichen Erscheinung die Farbfolge bei den modellhaften Versuchen genau umgekehrt ist.
Wichtig ist noch, die Schüler von der Unzerlegbarkeit der Spektralfarben zu überzeugen, was mit V 4.1.5. mühelos gelingt.
V 4.1.6. zeigt Möglichkeiten, die spezifische Dispersion von Kron- und Flintglas aber auch von nicht mischbaren Flüssigkeiten miteinander zu vergleichen. Aus der unterschiedlichen spezifischen Dispersion von Kron- und Flintglas lassen sich auch die Kombinationen je zweier geeigneter Prismen zu einem achromatischen Prisma bzw. zu einem Geradsichtprisma erklären. Sehr geeignet hierzu ist das im V 4.1.7. verwendete Dreiprismengerät von Weinhold.
Die Versuche 4.1.8. bis 4.1.10. sind dem Nachweis des ultravioletten und des ultraroten Lichtes gewidmet. Für beide Strahlungsarten werden jeweils mehrere Nachweismöglichkeiten angegeben. Sehr anschaulich ist die im Ultravioletten auftretende Phosphoreszenz bzw. deren Schwächung im Ultraroten, einfach auch die Schwärzung einer Fotoplatte durch UV-Strahlen. Das UR-Licht läßt sich durch eine Fotodiode oder eine Thermosäule erfassen. Der Versuch 4.1.10. gestattet, die Reflexion von UR-Licht und die Durchlässigkeit verschiedener Stoffe für UR-Licht mit einfachen Mitteln vorzuführen.
Die restlichen Versuche dieses Abschnitts befassen sich mit der Erzeugung und Beobachtung von diskontinuierlichen Spektren in Emission und Absorption. Trotz der gewissen Unbequemlichkeiten und organisatorischen Schwierigkeiten im Unterricht bietet sich wegen der oft geringen Helligkeit der Spektren die subjektive Beobachtung unter Verwendung eines Spektralapparates, auch eines nach V 3.4.20. aus Aufbauteilen zusammengesetzten, an. Bei der Beobachtung von Linienspektren kann noch einmal augenfällig durch Öffnen und Schließen des Leuchtspaltes bei gleichzeitiger Beobachtung des Spektrums darauf hingewiesen werden, daß es sich um eine Folge von farbigen Spaltbildern handelt. Im Versuch 4.1.11. wird auf die Erzeugung von Linienspektren durch gefärbte Flammen, Spektralröhren, Metalldampflampen und durch Funken eingegangen. Der Übergang zu den Absorptionsspektren wird im V 4.1.12. durch die Demonstration der Absorption von farbigen Gläsern vollzogen, wobei stets der direkte Vergleich zwischen dem kontinuierlichen Spektrum und dem Absorptionsspektrum erfolgt. Zur Erleichterung des Verständnisses der Entstehung von Linienspektren bei Absorption wird im V 4.1.13. die Absorption von Natriumlicht durch Natriumdampf gezeigt. Einen großen wissenschaftlichen und bildenden Wert hat die Beobachtung der Fraunhoferschen Linien im Sonnenspektrum. Da das Vorhandensein eines Heliostaten an der Schule nicht vorausgesetzt werden kann, wird eine einfachere Anordnung zur Einspiegelung des Sonnenlichtes in den Spektralapparat vorgeschlagen. Man kann aber auch das Himmelslicht mit einem Handspektroskop beobachten. Wie einfach das Beobachten der Fraunhoferschen Linien durchgeführt werden kann, ist in einem Freihandversuch gezeigt. Abschließend zu den Absorptionsspektren werden Hinweise und Empfehlungen zur Vorführung der Umkehrung der Natriumlinien gegeben. Die Durchführung dieses Versuches erfordert in hohem Maße experimentelle Erfahrung und Geschick.

4.0.2. Ausgangspunkt für die Versuche zur Farbmischung ist der Standardversuch zur Vereinigung aller Spektralfarben. Im V 4.2.1. werden einige Varianten beschrieben, die sich darin unterscheiden, in welcher Weise die Vereinigung der

Spektralfarben zu Weiß erfolgt, durch Verwendung einer Sammellinse, einer Zylinderlinse, eines Becherglases als behelfsmäßige Zylinderlinse oder aber eines Hohlspiegels. Der auf diese Weise erbrachte Nachweis, daß Weiß keine Grundfarbe, sondern eine Mischfarbe sämtlicher Spektralfarben darstellt, hat eine große Bedeutung für die Erkenntnisgewinnung im Unterricht. Methodisch zu empfehlen ist die Mischung der Spektralfarben durch Linsen oder Spiegel. Die Vereinigung durch rotierende Spiegel oder durch Farbkreisel, wie im V 4.2.2. beschrieben, erbringt gut den Nachweis der Farbträgheit des menschlichen Auges. Soll allerdings ein solcher Versuch im Unterricht vorgeführt werden, erweist sich ein durchsichtiger Farbkreisel im Gegensatz zu einem undurchsichtigen methodisch als vorteilhafter, außerdem erzeugt er ein reineres Weiß. Beim Farbkreisel mit undurchsichtigen Sektoren kann wegen der Mischung von Körperfarben bestenfalls ein sehr helles Grau als Ergebnis der Farbmischung erreicht werden.
Im Versuch 4.2.3 wird auf die Vereinigung der Restfarben eines Spektrums bei Ausblendung einer Farbkomponente eingegangen. Verwendet man zur Ausblendung schmale Spiegelstreifen, so läßt sich die ausgeblendete Farbkomponente gemeinsam mit der Vereinigung der Restfarben auf einem Schirm auffangen. Auf die additive Mischung zweier Farbkomponenten eines Spektrums und auf die additive Vereinigung von Filterlicht wird im V 4.2.4. aufmerksam gemacht. Vergleichend zur additiven Farbmischung sollte die subtraktive vorgeführt werden.
Von großer praktischer Bedeutung ist der Versuch, der die Veränderungen zeigt, die Körperfarben bei Bestrahlung mit farbigem Licht erleiden. Sehr instruktiv ist die Beobachtung eines langsam durch ein breites Spektrum bewegten farbigen Körpers, der in Abhängigkeit von der jeweils wirkenden Farbkomponente seinen Farbcharakter völlig verändert. Das vergleichende Betrachten eines farbigen oder bunten Körpers im Tageslicht und im Farbfilterlicht bzw. im Licht einer Spektrallampe macht den Schülern die Bemühungen der Industrie deutlich, Tageslichtlampen für verschiedene Zwecke bereitzustellen. Interessant und für die Schüler immer wieder verblüffend sind die nach V 4.2.7. einfach auszuführenden Versuche zur Erzeugung farbiger Schatten.

4.1. Spektrale Zerlegung des Lichtes

4.1.1. Demonstration der spektralen Zerlegung des Lichtes ●; ◑

Zu Variante a ●

1. Tageslichtschreibprojektor
2. großer Pappspalt Ⓢ (siehe 1.3.3.)
3. Geradsichtprisma
4. Blendscheibe mit Schiebeschacht
5. Prismenhalter Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Zu Variante b ●

6. Kleinbildprojektor
7. enger Spalt (0,2 mm bis 0,5 mm; 50 mm × 50 mm) Ⓢ (siehe 1.3.1.)
8. Prisma oder Hohlprisma, gleichseitig
9. Pappblende Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Zu Variante c ●

10. 2 Sechskantschienen (0,5 m; 1 m)
11. Schwenkverbindung
12. Optikleuchte
13. 4 bis 5 große Klemmreiter
14. 2 kleine Klemmreiter (1 × mit Verlängerungsstück)
15. 2 Kondensorlinsen ($f = +120$ mm)
16. Blendscheibe mit Linse ($f = +150$ mm)
17. Blendscheibe mit Linse ($f = +200$ mm)
18. Blendscheibe mit Linse ($f = -250$ mm)
19. Blendscheibe mit Mikrometerspalt
20. Prismentisch
21. Prisma oder Hohlprisma, gleichseitig
22. Transparentschirm

Zu Variante d [*SE*] ◑

Gerät 21., außerdem

23. Experimentierleuchte
24. Spaltblende (0,2 mm)
25. 4 T-Füße
26. Blendrahmen mit Linse ($f = +100$ mm)
27. Blendrahmen mit Linse ($f = +250$ mm)
28. Blendrahmen mit Linse ($f = +50$ mm)
29. Tischchen
30. Gelenkverbindung Ⓢ (siehe 1.3.1.)
31. Bildschirm, transparent
32. Papprohre als Blendschutz Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Zu Variante e [*SE*]

33. Geradsichtprisma oder Prisma, gleichseitig
34. Stricknadel oder Pappe mit feiner Spaltblende Ⓢ
35. schwarze Unterlage

Zu Variante f [*SE*] ◑

36. Kühlschrankbox
37. Kerze

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 4.0.1.!
2. Die Varianten e und f sind auch als Hausexperimente durchführbar.
3. Sollen der Strahlengang und die Erzeugung eines Spektrums erarbeitet werden, wähle man die Variante c oder d, eventuell gemeinsam mit V 4.1.3., ansonsten sind die Varianten a und b zur schnellen Erzeugung eines hellen Spektrums zu empfehlen.

Variante a

Ein großer Pappspalt wird mit dem Tageslichtschreibprojektor waagerecht und scharf auf einer Projektionswand abgebildet. Mit Hilfe von Stativmaterial bringt man das Geradsichtprisma dicht hinter der Objektivlinse gut durchstrahlt in den Strahlengang. An der Projektionswand ist ein helles Spektrum zu beobachten (Abb. 4.1.1./1a).

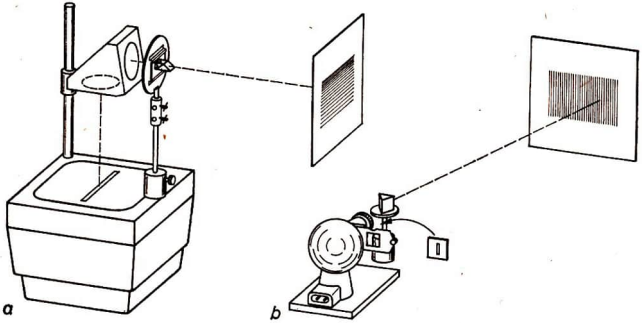


Abb. 4.1.1./1 Versuchsanordnungen zur Demonstration der spektralen Zerlegung des Lichtes bei Verwendung eines Tageslichtschreibprojektors (a) oder eines Kleinbildprojektors (b)

Variante b

Ein enger Spalt wird in den Diapositivschacht eines Kleinbildprojektors gebracht und scharf auf einer Projektionswand abgebildet. Dicht vor dem Objektiv bringt man ein gleichseitiges Prisma oder ein flüssigkeitsgefülltes Hohlprisma gut durchleuchtet unter Verwendung von Stativmaterial in den Strahlengang. Man dreht die gesamte Anordnung, bis das Spektrum an der Stelle des ehemaligen Spaltbildes an der Projektionswand liegt. Durch leichtes Nachdrehen des Prismas stellt man auf das Minimum der Ablenkung ein. Seitlich am Prisma vorbeigehendes Licht blendet man mit einer weiten Pappblende ab (Abb. 4.1.1./1b).

Variante c

Nachdem beide Sechskantschienen mit der Schwenkverbindung zusammengesetzt sind, ordnet man auf der kürzeren Schiene die Optikleuchte, den Doppelkon-

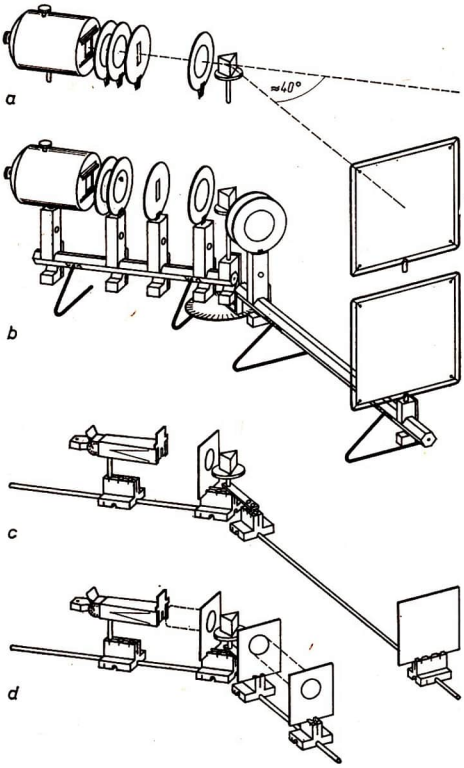


Abb. 4.1.1./2
Versuchsanordnung zur Demonstration der spektralen Zerlegung des Lichtes im Lehrerexperiment (a, b) oder im Schülerexperiment (c, d)

densor, den Mikrometerspalt und die Objektivlinse ($f = +150$ mm) so an, daß die Objektivlinse dicht vor dem über der Schwenkverbindung befestigten Prismentisch steht und der Spalt scharf auf dem am anderen Ende der langen Schiene stehenden Schirm abgebildet wird. Erst danach setzt man gut durchleuchtet ein gleichseitiges Prisma auf den Prismentisch, winkelt die Bank um etwa 40° um die Basis des Prismas ab und stellt durch leichtes Drehen des Prismas auf das Minimum der Ablenkung ein. Das Spektrum wird am hellsten, wenn das reelle, vom Kondensor entworfene Bild der Glühwendel im Prisma liegt, wovon

man sich durch Vorhalten eines Stückes Transparentpapier überzeugen kann (Abb. 4.1.1./2a).
In der eben beschriebenen Anordnung wird das Spektrum in der Bildebene der Objektivlinse erzeugt. Die Anordnung kann leicht zum Fraunhoferschen Strahlengang ergänzt werden; das Spektrum entsteht dann in der Brennebene einer Objektivlinse. Dazu werden die Sammellinse von +200 mm Brennweite und die Zerstreuungslinse von −250 mm Brennweite auf einem Klemmreiter so dicht wie möglich aneinandergebracht und hinter dem Prisma dicht an der Schwenkverbindung aufgestellt. Der Mikrometerspalt muß dabei allerdings in der Brennebene der Kollimatorlinse von +150 mm Brennweite stehen. Ohne Prisma auf gerade ausgerichteter Bank stellt man durch Verschieben des Schirmes das Spaltbild scharf ein. Die Entfernung zur kombinierten Linse beträgt dann etwa 800 mm. Nach Aufsetzen des Prismas und Ausschwenken der Bank erhält man ein Spektrum auf dem Schirm (Abb. 4.1.1./2b).
Die Versuchsanordnung kann bis zum leistungsfähigen Spektralapparat erweitert werden (vgl. V 3.4.20.).
Sehr lichtstarke Spektren, insbesondere im violetten Bereich, erhält man bei Verwendung einer Bogenlampe anstelle einer Glühfadenlampe.

Variante d

Auf einem T-Fuß bringt man gemeinsam mit der Schwenkverbindung (vgl. Abb. 1.3.1./18) das Tischchen und weiterhin noch die Objektivlinse von +100 mm Brennweite an. Mit ihr wird der in den Schacht der Experimentierleuchte eingeschobene feine Spalt auf dem am anderen Ende der noch nicht ausgeschwenkten Bank stehenden Schirm scharf abgebildet. Ein Prisma wird auf das Tischchen gesetzt und die Bank soweit abgewinkelt, bis ein Spektrum in der Mitte des Schirmes entsteht. Man stellt auf das Minimum der Ablenkung ein und justiert notfalls noch etwas nach (Abb. 4.1.1./2c).
Die Anordnung kann erweitert werden, wenn man den Schirm entfernt und die beiden Linsen von +250 mm und +50 mm mit Hilfe eines 300 mm langen Papprohres zu einem Fernrohr zusammensetzt und damit das Spektrum subjektiv betrachtet. Zur Scharfeinstellung wird ohne Prisma bei gerader Bank durch Verschieben der Experimentierleuchte ein scharfes Bild des Spaltes im Fernrohr eingestellt (Abb. 4.1.1./2d).

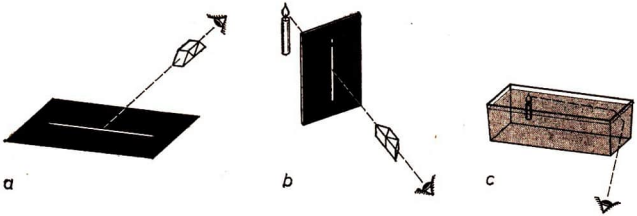


Abb. 4.1.1./3 Anordnungen zur subjektiven Beobachtung eines Spektrums mit Hilfe eines Geradsichtprismas (a und b) oder einer Kühlschrankbox (c)

Variante e

Auf eine schwarze Unterlage wird eine Stricknadel gelegt und gut vom Sonnenlicht oder vom Kunstlicht beleuchtet. Die Stricknadel wird durch ein Geradsichtprisma betrachtet. Man beobachtet ein helles Spektrum (Abb. 4.1.1./3a). Der Versuch gelingt auch, wenn man durch das Geradsichtprisma eine mit der ausgestreckten Hand gehaltene Spaltblende gegen die zu untersuchende Lichtquelle betrachtet (Abb. 4.1.1./3b). Der Versuch gelingt auch bei Verwendung eines gleichseitigen Prismas, jedoch erfordert die Beobachtung durch die Ablenkung des Strahlenganges etwas mehr Geschick.

Variante f

Man betrachtet eine Kerzenflamme durch eine wie ein Prisma wirkende wassergefüllte Kühlschrankbox. Die Kerze steht nahe der Box an deren Längsseite, der Beobachter blickt fast streifend auf die Schmalseite (Abb. 4.1.1./3c).

Bemerkung

Zur Erzeugung eines kontinuierlichen Spektrums vergleiche auch „Physikalische Schulversuche", 10. Teil, V 2.2.7. und 2.2.11., Variante c 2!

4.1.2. Demonstration des Strahlenverlaufes bei der spektralen Zerlegung des Lichtes ◑

1. Manipermtafel
2. kleine Haftleuchte
3. 2 Linsenkörper, bikonvex, unterschiedliche Brennweite
4. Prismenkörper, rechtwinklig, gleichschenklig
5. kleiner, weißer Schirm ⑧ (siehe 1.3.2.)

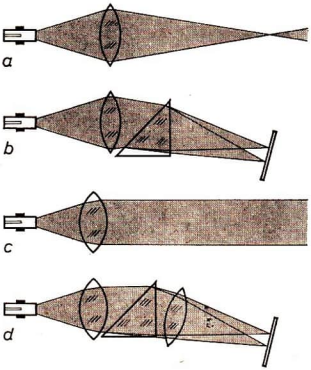


Abb. 4.1.2./1
Versuchsreihe zur Demonstration des Strahlenverlaufes bei der spektralen Zerlegung des Lichtes. Erzeugung des Spektrums in der Bildebene (a, b) oder in der Brennebene (c, d) einer Sammellinse

Methodischer Hinweis

Es ist empfehlenswert, Versuche zur Erzeugung eines Spektrums mit einem Versuch zur Demonstration des Strahlenverlaufes zu koppeln.

Versuch

Das divergente Licht der kleinen Haftleuchte wird durch den bikonvexen Linsenkörper schwacher Krümmung wieder in einem Bildpunkt gesammelt, der weiter von der Linse entfernt sein soll als die Lichtquelle (Abb. 4.1.2./1a). Dicht hinter die Linse bringt man den Prismenkörper. Das Lichtbündel wird abgelenkt. Im Konvergenzpunkt läßt sich mit einem kleinen, weißen, schräg gegen die Tafel gehaltenen Schirm ein kleines Spektrum beobachten (Abb. 4.1.2./1b).
Zur Darstellung des Fraunhoferschen Strahlenganges wird das divergente Licht der kleinen Haftleuchte durch den dickeren Linsenkörper parallel gemacht (Abb. 4.1.2./1c), vom Prismenkörper abgelenkt und nach Durchsetzen des Prismenkörpers wieder in der Brennebene des dünneren Linsenkörpers gesammelt. In der Brennebene ist das Spektrum zu beobachten (Abb. 4.1.2./1d).

4.1.3. Demonstration der Entstehung eines Regenbogens ●

Zu Variante a

1. Tageslichtschreibprojektor
2. großer Pappspalt
3. undurchsichtiger Schirm
4. große, schlierenfreie Flasche
5. breiter Spalt aus schwarzem Papier (2 mm bis 5 mm) ⓢ
   (siehe 1.3.3.)

Zu Variante b

6. Sechskantschiene (0,5 m)
7. Optikleuchte
8. 3 große Klemmreiter
9. kleiner Klemmreiter mit Verlängerungsstück
10. 2 Kondensorlinsen ($f = +120$ mm)
11. Blendscheibe mit Mikrometerspalt
12. Prismentisch
13. undurchsichtiger Schirm
14. großes, schlierenfreies Becherglas

Methodischer Hinweis

Bei den hier vorgeführten Versuchen ist die Reihenfolge der Spektralfarben genau umgekehrt wie bei dem in der Natur beobachteten Vorgang, weil im Versuch die Entstehung des Regenbogens modellmäßig an *einem* Wassertropfen gezeigt wird, in der Natur aber das Zusammenspiel vieler Tröpfchen die Entstehung bewirkt. Auf diesen Unterschied sind die Schüler hinzuweisen.

Variante a

Der auf der Projektionsfläche eines Tageslichtschreibprojektors liegende Pappspalt wird auf einem so nahe wie möglich herangerückten Schirm scharf abgebildet. Dann wird der Schirm, wie die Abbildung 4.1.3./1a zeigt, schräg vor dem Projektor so aufgestellt, daß sich seine Oberkante nahe am Objektiv befindet. Eine voll mit Wasser gefüllte schlierenfreie Flasche wird unter Verwendung von Stativmaterial etwa 200 mm bis 250 mm vor dem Objektiv in waagerechter Lage aufgestellt (Abb. 4.1.3./1a). Die Flasche ist zu einem Drittel des gesamten Umfangs mit schwarzem Papier beklebt, das einen 2 mm bis 5 mm breiten Spalt längs der Mantellinie aufweist. Durch Drehen, Heben oder Senken der Flasche findet man die günstigste Stellung der Flasche, bei der das durch den Spalt eintretende Licht im Inneren der Flasche wie in Abb. 4.1.4./1a verläuft und auf dem Schirm ein gut sichtbares Spektrum entworfen wird.

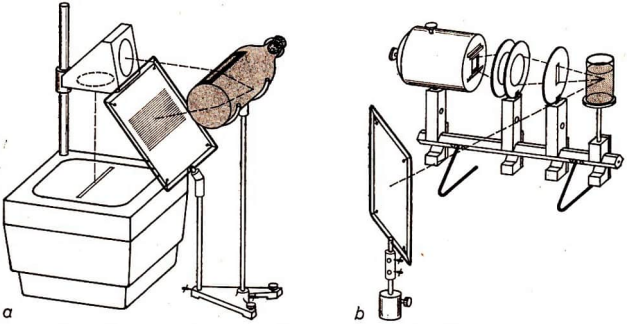


Abb. 4.1.3./1 Versuchsanordnungen zur Demonstration der Entstehung eines Regenbogens unter Verwendung eines Tageslichtschreibprojektors (a) bzw. einer optischen Bank (b)

Variante b

Auf der kurzen Schiene werden die Optikleuchte, der Doppelkondensor und etwa 100 mm davor der Mikrometerspalt aufgebaut. Das den Kondensor verlassende Lichtbündel soll konvergent sein. Der Konvergenzpunkt liegt in dem vor dem Spalt stehenden und mit Wasser gefüllten Becherglas. Dieses wird so in den Strahlengang gebracht, daß ein Strahlenverlauf wie in Abb. 4.1.4./1a verwirklicht wird und auf einem seitlich mit Hilfe von Stativmaterial aufgestellten undurchsichtigen Schirm ein Spektrum entsteht (Abb. 4.1.3./1b).

4.1.4. Demonstration des Strahlenverlaufes bei der Entstehung eines Regenbogens ◑

1. Manipermtafel
2. Haftleuchte
3. Linsenkörper, kreisförmig, oder
   2 Linsenkörper, halbkreisförmig Ⓢ (siehe 1.3.2.)
4. weißes Kartonblatt

Methodischer Hinweis

Die Vorführung des Strahlenverlaufes bei der Entstehung eines Regenbogens ergänzt V 4.1.3., so daß es sich empfiehlt, beide Versuche miteinander zu kombinieren.

Versuch

Auf der Hafttafel wird eine lange Lichtspur erzeugt, in die man — wie die Abb. 4.1.4./1a zeigt — den kreisförmigen oder die beiden zusammengesetzten Halbkreiskörper bringt. Das nach zweimaliger Brechung und einmaliger Reflexion spektral aufgespaltene Licht wird nach Verlassen des Linsenkörpers in größerer Entfernung auf einem Kartonblatt, das man schräg zur Tafelfläche in den Strahlengang hält, aufgefangen, um das entstehende Spektrum besser beobachten zu können.

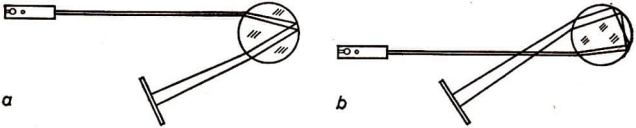


Abb. 4.1.4./1 Versuchsanordnung zur Demonstration des Strahlenverlaufes in einem Regentropfen bei Lichteintritt im oberen Drittel (a) bzw. im unteren Drittel (b)

Läßt man die Lichtspur im unteren Drittel des Linsenkörpers eintreten (Abb. 4.1.4./1b), so wird nach zweimaliger Brechung und zweimaliger Reflexion wiederum ein spektral aufgespaltenes Lichtbündel erzeugt, wovon man sich mit einem in den Strahlengang gehaltenen Kartonblatt überzeugt. Der dabei entstehende „Nebenregenbogen" weist die genau umgekehrte Farbfolge wie der „Hauptregenbogen" auf.

4.1.5. Nachweis der Unzerlegbarkeit der Spektralfarben

Geräte wie bei V 4.1.1., Variante c, jedoch Geräte 20. und 21. 2mal, außerdem

23. Blendscheibe mit Schiebeschacht
24. Pappschirm mit Spalt Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Methodischer Hinweis

Der Versuch schließt sich an den Versuch 4.1.1. an und zeigt augenfällig, daß Spektralfarben elementare Farben sind, die nicht in weitere Farbkomponenten zerlegt werden können.

Versuch

Wie im V 4.1.1. angegeben, erzeugt man ein helles Spektrum auf einem transparenten Schirm. Ungefähr 80 mm bis 100 mm vor dem Schirm bringt man auf einem Prismentisch ein zweites Prisma so in den Strahlengang, daß die Oberkante des Prismas noch unterhalb der optischen Achse liegt und nur der untere Teil des Spektrums gleich- oder gegensinnig abgelenkt wird. Davor stellt man eine Blendscheibe mit Schiebeschacht. In den Schiebeschacht bringt man nun einen

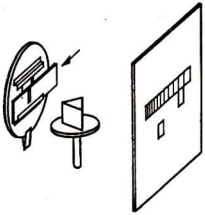


Abb. 4.1.5./1
Anordnung von Blende, Prisma und Schirm beim Versuch zum Nachweis der Unzerlegbarkeit der Spektralfarben

etwa 1 mm breiten Spalt, der das obere Drittel der Blendscheibenöffnung freiläßt. Durch Verschieben des Spaltes kann eine beliebige Farbe des Spektrums ausgeblendet und vom dahinterstehenden Prisma erneut gebrochen werden. Bei richtiger Stellung von Spalt und Prisma erscheint auf dem Schirm im oberen Drittel das volle Spektrum, darunter die ausgeblendete Farbe und seitlich daneben die zweimal abgelenkte, aber nicht nochmals zerlegte ausgeblendete Farbe (Abb. 4.1.5./1).

4.1.6. Vergleich von Stoffen unterschiedlicher spezifischer Dispersion ●

Geräte 6. bis 9. oder 10. bis 22. wie bei V 4.1.1., außerdem

23. Flintglasprisma, gleichseitig
24. verschiedene, nicht mischbare Flüssigkeiten unterschiedlicher spezifischer Dispersion (z. B. Wasser-Schwefelkohlenstoff, Wasser-Benzol, Wasser-Äther)

Methodischer Hinweis

Durch das gleichzeitige Erzeugen von zwei Spektren unterschiedlicher Ablenkung und unterschiedlicher spezifischer Dispersion ist der Vergleich sehr augenfällig und überzeugend.

Versuch

Wie im V 4.1.1. wird mit Hilfe des Kleinbildprojektors oder der optischen Bank ein Spektrum auf einer Projektionswand oder einem Schirm erzeugt. Zum Vergleich zweier Spektren unterschiedlicher spezifischer Dispersion stellt man z. B. ein Kronglasprisma und ein Flintglasprisma möglichst gleicher Abmessungen übereinander und bringt sie so in den Strahlengang, daß beide gleichmäßig durchleuchtet werden. An der Projektionswand entstehen dann zwei getrennte Spektren unterschiedlicher Ablenkung und unterschiedlicher Länge. Für Kron- und Flintglas verhalten sich die Längen der Spektren etwa wie 1:2.
Die beiden übereinandergestellten Prismen kann man ersetzen durch ein Hohlprisma, das zwei übereinandergeschichtete, nicht mischbare Flüssigkeiten unterschiedlicher spezifischer Dispersion enthält. Unterscheiden sich die beiden Flüssigkeiten nicht stark in der Brechungszahl voneinander, überdecken die beiden Spektren einander teilweise.

4.1.7. Demonstration der Wirkungsweise von achromatischen Prismen und Geradsichtprismen ●

Geräte 10. bis 20., 22. wie bei V 4.1.1., außerdem

23. Dreiprismengerät nach Weinhold

Methodischer Hinweis

Der Versuch dient der Vermittlung des Verständnisses über die Kombination von Linsen zur Beseitigung des Farbfehlers und zur Verwendung eines Geradsichtprismas zur Vereinfachung der Versuchsanordnung bei der spektralen Zerlegung des Lichtes.

Versuch

Man ordnet alle Geräteteile wie zum V 4.1.1., ersetzt jedoch das gleichseitige Prisma durch ein Dreiprismengerät nach Weinhold (Abb. 4.1.7./1a).

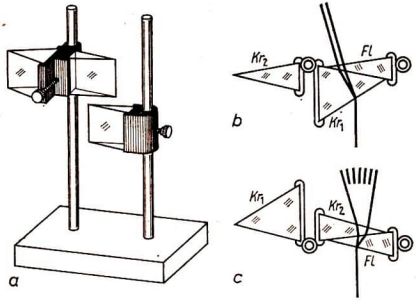


Abb. 4.1.7./1
Dreiprismengerät nach Weinhold (a) und Strahlenverlauf bei der Demonstration des achromatischen Prismas (b) und beim Geradsichtprisma (c)

Die Spektren des Flintglasprismas und des großen Kronglasprismas werden zunächst einzeln auf dem Schirm entworfen, den man dazu je nach Ablenkungsrichtung ausschwenkt. Man beobachtet, daß die Länge der beiden Spektren nahezu gleich, ihre Ablenkung aber recht unterschiedlich ist.
Werden beide Prismen mit gegeneinanderliegenden brechenden Kanten in den Strahlengang gebracht, so erfolgt keine spektrale Zerlegung, wohl aber eine Ablenkung des Strahlenbündels. Die Kombination ergibt ein achromatisches Prisma (Abb. 4.1.7./1b).
Zur Demonstration der Wirkungsweise eines Geradsichtprismas zeigt man wiederum zunächst die Spektren des Flintglasprismas und des kleinen Kronglasprismas. Beide Spektren sind etwa gleich weit abgelenkt, aber von unterschiedlicher Breite. Gemeinsam mit aneinanderliegenden brechenden Kanten ergeben sie ein Spektrum in der Richtung des auffallenden Lichtbündels (Abb. 4.1.7./1c).

4.1.8. Nachweis des ultravioletten Lichtes im Spektrum einer Bogenlampe bzw. einer Quecksilberdampflampe ●

Zu Variante a

1. 2 Sechskantschienen (1 m und 0,5 m)
2. 2 Klemmreiter
3. 3 kleine Klemmreiter (davon 1× mit Verlängerungsstück)
4. Kohlebogenlampe mit Vorwiderstand
   oder Quecksilberdampflampe mit Drossel
5. Blendscheibe mit Mikrometerspalt
6. undurchsichtiger Schirm
7. Perlux-Schirm (fluoreszierender bzw. phosphoreszierender Schirm)
   oder Fotofilm (Isochromfilm)
8. Blendscheibe mit Linse ($f = +150$ mm)
9. Tischchen
10. Kronglasprisma, gleichseitig
11. Schwenkverbindung
12. Klebefilm

Zu Variante b

Geräte 1. bis 7. wie Variante a, außerdem

13. Blendscheibe mit Schiebeschacht
14. Spaltblende (50 mm × 50mm)
15. Blendscheibe mit Hohlspiegel
16. Reflexionsgitter

Methodische Hinweise

1. Die Versuche zum Nachweis des ultravioletten Lichtes eignen sich vornehmlich zur Lehrerdemonstration.

2. Zur Durchführung benötigt man ein Spektrum möglichst hoher Lichtintensität; man wählt deshalb als Lichtquelle eine Kohlebogenlampe oder eine Quecksilberdampflampe aus. Außerdem gestaltet man den Leuchtspalt etwas weiter als bei den sonstigen Versuchen zur Erzeugung eines Spektrums.
3. Da Glas ultraviolettes Licht absorbiert, sollte man beim Versuchsaufbau möglichst Linsen und Prismen aus Quarz verwenden. Variante b verzichtet völlig auf optische Elemente aus Glas, es kommen Hohlspiegel und Reflexionsgitter zur Anwendung.

Versuchsaufbau, Variante a mit Linse und Prisma

Nachdem die beiden Sechskantschienen mit der Schwenkverbindung zusammengekoppelt sind, ordnet man auf der kurzen Schiene die Kohlebogenlampe ohne Kondensorlinse oder die Quecksilberdampflampe auf einem kleinen Klemmreiter, den Mikrometerspalt, die Objektivlinse mit einer Brennweite von $f = +150$ mm und dicht dahinter den Prismentisch an (Abb. 4.1.8./1a). Der Spalt wird scharf auf dem am anderen Ende der langen optischen Schiene stehenden undurchsichtigen Schirm abgebildet. Nach Aufsetzen des Kronglasprismas und Abwinkeln

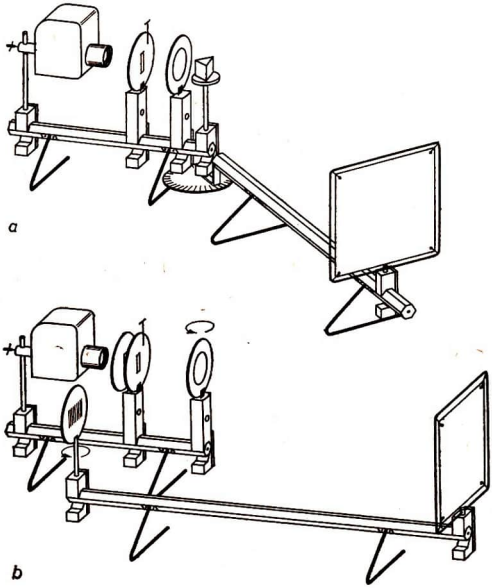


Abb. 4.1.8./1 Versuchsanordnungen zum Nachweis des ultravioletten Lichtes bei Verwendung von Linse und Prisma (a) oder Hohlspiegel und Reflexionsgitter (b)

der optischen Bank um etwa 40° fängt man das kontinuierliche oder das Linienspektrum so auf dem Schirm auf, daß der blaue Anteil in der Schirmmitte liegt. Durch leichtes Nachjustieren stellt man auf das Minimum der Ablenkung ein, und durch Öffnen oder Schließen des Mikrometerspaltes erreicht man die gewünschte Helligkeit.

Versuchsaufbau, Variante b mit Hohlspiegel und Reflexionsgitter

Auf der kurzen Sechskantschiene baut man die Kohlebogenlampe ohne Kondensorlinse oder die Quecksilberdampflampe auf, stellt dicht davor auf einem Klemmreiter den einfachen Spalt und den Mikrometerspalt—beide gut durchleuchtet—auf und ordnet in einem Abstand von etwa 250 mm den Hohlspiegel drehbar auf einem Klemmreiter an. So dicht wie möglich bringt man die lange Schiene parallel zur kurzen Schiene, daß das an einem Ende stehende drehbare Reflexionsgitter etwa in Höhe der Spalte steht und das vom Hohlspiegel kommende Licht auf den undurchsichtigen Schirm am anderen Ende der Bank lenkt (Abb. 4.1.8./1b). Durch Verschieben des Hohlspiegels stellt man den Spalt scharf auf dem Schirm ein, dann dreht man das Gitter ein wenig um seine lotrechte Achse, bis der blaue Anteil des kontinuierlichen bzw. des Linienspektrums in Schirmmitte liegt. Mit der Spaltweite reguliert man die Helligkeit des Spektrums.

Versuch 1: Verwendung eines fluoreszierenden Schirmes

Dicht vor dem undurchsichtigen Schirm, auf dem das Spektrum entworfen wird, bringt man den Fluoreszenzschirm oder einen phosphoreszierenden Schirm, so daß nur der obere Teil des Spektrums bedeckt wird. In dieser Stellung kann er nötigenfalls mit Klebefilm fixiert werden. Man erkennt deutlich das Aufleuchten des Fluoreszenzschirmes über das violette Ende des Spektrums hinaus.
Bei Verwendung eines Phosphoreszenzschirmes kann man nach einer minutenlangen intensiven Bestrahlung nach Ausschalten der Lichtquelle ein Nachleuchten im ultravioletten und im sichtbaren Bereich beobachten. Es wird zum Bereich des roten Lichtes hin immer schwächer.

Versuch 2: Verwendung von Fotomaterial

Der Versuch ist dem ersten sehr ähnlich. Anstelle des fluoreszierenden Schirms wird ein längeres Stück eines Isochrom-Fotofilms oder ein Streifen Fotopapier gebracht und mit Klebestreifen am undurchsichtigen Schirm befestigt. Das kann bei roter Dunkelkammerbeleuchtung erfolgen. Man läßt danach das Spektrum je nach Empfindlichkeit des Fotomaterials eine bis mehrere Minuten auf den Film oder auf das Fotopapier einwirken, markiert während der Belichtung mit Bleistift die Grenzen des sichtbaren Spektrums auf dem Film oder dem Fotopapier.
Nach dem Entwickeln und Fixieren kann man an der Schwärzung des Films bzw. des Papiers über das markierte violette Ende hinaus die Wirkung der UV-Strahlen nachweisen.

Bemerkungen

1. Vergleiche hierzu auch Physikalische Schulversuche, 11. Teil, V 4.2.3.!
2. Statt eines Fluoreszenzschirmes kann man das glatte, weiße, eiweißhaltige Ormig-Papier verwenden oder Streifen von Fließpapier, die mit fluoreszierenden Flüssigkeiten getränkt wurden (z.B. mit Fluoreszeinlösung, Lösung von modernen Waschmitteln oder optischen Aufhellern für Textilien).

3. Der Nachweis gelingt auch mit einer UV-empfindlichen Fotozelle mit breiter Spaltblende, die durch das Spektrum und in den ultravioletten Bereich geführt wird. Die Anzeige erfolgt mit einem möglichst empfindlichen Meßgerät (UNI 7, 0 ... 50 μA).

4.1.9. Nachweis des ultraroten Lichtes im Spektrum einer Bogenlampe bzw. einer Glühlampe ●

Zu Variante a

Geräte wie bei V 4.1.8., Variante a oder b, jedoch unbedingt

4. Kohlebogenlampe und
7. phosphoreszierenden Schirm

Zu Variante b

Geräte wie bei V 4.1.8., Variante a oder b, jedoch ohne 4., 6. und 7., außerdem

17. Optikleuchte
18. Blendscheibe mit Thermosäule
19. Spiegelgalvanometer

Zu Variante c

Geräte wie bei V 4.1.8., Variante a oder b, jedoch ohne 4., 6. und 7., außerdem

20. Optikleuchte
21. Blendscheibe mit Fotodiode ⓑ (siehe 1.3.1.)
22. Strommesser (0 ... 50 μA)

Methodischer Hinweis

Während für die Durchführung der Varianten a und b sehr intensives Licht erforderlich ist, gelingt der Nachweis nach Variante c bereits bei Verwendung einer Glühpunkt- bzw. Glühfadenlampe mit einer Leistung von 50 W.

Variante a: Benutzen eines phosphoreszierenden Schirmes

Wie beim Versuch 4.1.8., Variante a oder b, entwirft man ein lichtstarkes Spektrum auf dem undurchsichtigen Schirm, der allerdings so gerückt ist, daß diesmal das rote Ende des Spektrums in Schirmmitte liegt.
Der verwendete Nachweis beruht auf der Eigenschaft des ultraroten Lichtes, das Leuchten eines phosphoreszierenden Schirms vorzeitig zum Erlöschen zu bringen. Ein phosphoreszierender Schirm von mindestens doppelter Länge des erzeugten kontinuierlichen Spektrums wird längere Zeit dem Tageslicht ausgesetzt und danach auf dem Schirm der Versuchsanordnung so angebracht, daß er vom Spektrum nur teilweise bedeckt wird, vorwiegend über das rote Ende des Spektrums hinausragt. Wird der Schirm einige Minuten der Beleuchtung durch das Spektrum ausgesetzt, ist im roten Spektralgebiet und jenseits des sichtbaren Bereichs im Ultraroten die Phosphoreszenz erloschen, während sie an anderen Stellen erhalten bleibt.

Variante b: Benutzen einer Thermosäule

In der Versuchsanordnung nach V 4.1.8., Variante a oder b, ersetzt man den Schirm durch die Blendscheibe mit dahinter befestigter Thermosäule, die man an das Spiegelgalvanometer angeschlossen hat. Schwenkt man die optische Bank langsam, so nimmt der Ausschlag beim Hinbewegen auf das rote Ende des Spektrums zu und vergrößert sich sogar noch jenseits des sichtbaren Bereichs.
Da die Ausschläge des mit der Thermosäule verbundenen Spiegelgalvanometers im allgemeinen nicht sehr groß sind, empfiehlt es sich, den Leuchtspalt etwas breiter einzustellen und den Abstand zwischen Prisma und Thermosäule nicht zu groß zu wählen.

Variante c: Benutzen einer Fotodiode

Sehr einfach gestaltet sich der Nachweis des ultraroten Lichtes bei Verwendung einer Glühpunkt- oder Glühfadenlampe, wenn man zum Nachweis eine Fotodiode verwendet. Der Versuchsaufbau entspricht dann der Anordnung nach V 4.1.8., Variante a oder b; lediglich der Schirm wird durch die Blendscheibe mit eingesetzter Fotodiode ersetzt. Die Fotodiode wird der Einfachheit halber als Fotoelement betrieben und an ein Strommeßgerät von 0 ... 50 μA angeschlossen. Beim Ausschwenken der optischen Bank, weit über den Bereich des sichtbaren Rot hinaus, läßt sich ein Fotostrom noch deutlich nachweisen.

4.1.10. Demonstration der Reflexion von ultrarotem Licht und Vorführung der Durchlässigkeit von Stoffen für Wärmestrahlen ◑

1. 2 Sechskantschienen (0,5 m; 1 m)
2. Schwenkverbindung
3. 3 große Klemmreiter
4. 2 kleine Klemmreiter
5. 2 Blendscheiben mit Hohlspiegel ($f = 200$ mm)
6. Fotodiode mit schmalem Halter ⑧ (siehe 1.3.1.)
7. kleine Heizwendel aus Widerstandsdraht oder vom Glaskolben befreite Glühpunktlampe ⑧ (siehe 1.3.1.)
8. Strommesser (0 ... 50 μA)
9. verschiedene diathermane und athermane Stoffe (z.B. Glas, Glimmer, Asbest, Pappe, Metallbleche, Piacryl, PVC)
10. Aluminiumblech (200 mm × 200 mm)

Methodische Hinweise

1. Der Versuch zeigt, daß die unsichtbaren UR-Strahlen ebenso wie das sichtbare Licht reflektiert werden können.
2. Bei der Vorführung der Durchlässigkeit von Stoffen für Wärmestrahlen wähle man auch solche Stoffe aus, die für sichtbares Licht undurchlässig, für ultrarotes Licht aber durchlässig sind.

Versuch 1

An den beiden Enden der mit der Schwenkverbindung vereinigten und gestreckt ausgerichteten Sechskantschienen der optischen Bank werden die beiden Blendscheiben mit den Hohlspiegeln, die konkaven Seiten einander zugekehrt, aufgestellt. Im Brennpunkt des einen Spiegels wird eine kleine Heizspirale, im Brennpunkt des anderen zum Nachweis der Wärmestrahlen eine an einem schmalen Halter befestigte Fotodiode angeordnet (Abb. 4.1.10./1a).
Die Glühwendel wird bis zur schwachen Rotglut elektrisch erhitzt. Die im Brennpunkt des zweiten Hohlspiegels gesammelten Wärmestrahlen treffen die Fotodiode und erzeugen im angeschlossenen Meßgerät einen Ausschlag.
Scheiben oder Platten aus unterschiedlichem Material werden zwischen die beiden Reflektoren gebracht, um sie auf ihre Durchlässigkeit für ultrarotes Licht zu untersuchen.

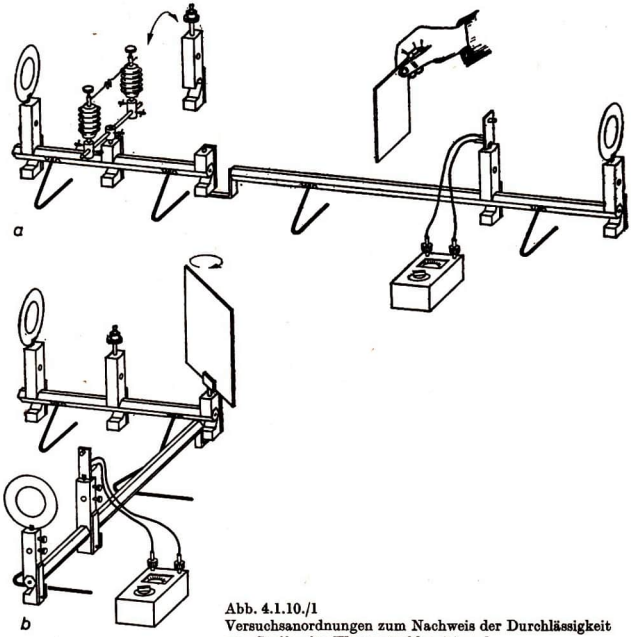


Abb. 4.1.10./1
Versuchsanordnungen zum Nachweis der Durchlässigkeit von Stoffen für Wärmestrahlen (a) und zur Gültigkeit des Reflexionsgesetzes für ultrarotes Licht (b)

Versuch 2

Zur Vorführung der Reflexion der Wärmestrahlen an einer ebenen Metallplatte wird die optische Bank um 45° bis 135° abgewinkelt. Im Schnittpunkt der optischen Achsen wird die Aluminiumplatte drehbar gelagert (Abb. 4.1.10./1b). Das Maximum des Ausschlages am Strommesser ist dann erreicht, wenn beim langsamen Drehen der Aluminiumplatte das Reflexionsgesetz erfüllt wird.

4.1.11. Beobachtung von diskontinuierlichen Emissionsspektren ●

Zu Versuch 1

1. Spektralapparat oder
   aus Aufbauteilen zusammengesetzter Spektralapparat nach V 3.4.20.
2. Bunsenbrenner
3. Platindraht mit Öse oder Magnesiastäbchen
4. verschiedene Salze
5. destilliertes Wasser

Zu Versuch 2

Gerät 1., außerdem

6. Spektralröhren
7. Funkeninduktor oder kräftiger Teslatransformator

Zu Versuch 3

Gerät 1., außerdem

8. Metalldampflampen
9. Drossel zur Metalldampflampe

Zu Versuch 4

Geräte 1. und 7., außerdem

10. Drähte aus verschiedenem Material
11. 2 Holtzsche Klemmen
12. Leydener Flasche

Methodischer Hinweis

Bei der Vorführung von Linienspektren und bei Untersuchungen zur Spektralanalyse ist man wegen der meist geringen Lichtstärke der Lichtquellen in vielen Fällen auf die subjektive Beobachtung angewiesen. Jedoch sollte man zur Beobachtung der interessanten und effektvollen physikalischen Erscheinungen die Mühen und organisatorischen Schwierigkeiten der subjektiven Betrachtung nicht scheuen.

Versuch 1

Vor dem Spalt des Kollimatorrohres eines Spektralapparates brennt ein Bunsenbrenner mit nichtleuchtender Flamme. Zum Färben verwendet man verschiedene

Salze, die mit einem am Ende zu einer kleinen Öse gebogenen Platindraht in die Flamme gebracht werden. Die Öse taucht man erst in destilliertes Wasser, dann in das Salz und hält sie in die Flamme. Diese verfärbt sich entsprechend dem verwendeten Salz. Anstelle des Platindrahtes lassen sich auch Stäbchen aus gebrannter Magnesia verwenden. Die im Spektroskop sichtbar werdenden Linien stellt man durch Verengen des Spaltes und durch Verschieben des Okulars scharf ein. Durch Schwenken des Fernrohres bekommt man nacheinander das gesamte Spektrum ins Gesichtsfeld.
Man beginnt mit einem Spektrum, das nur eine Linie zeigt, also mit Natrium. (Die Doppellinie erscheint in den schwach auflösenden Schulspektralapparaten meist nur als eine Linie.) Dann bringt man Kalium-, Kalzium-, Lithium-, Strontium-, Barium-, Rubidium-, Cäsium- oder Thalliumsalze in die Flamme; gelegentlich auch zwei verschiedene Salze zugleich, um auf die Methode der Durchführung der Spektralanalyse hinzuweisen.

Versuch 2

Für die spektroskopische Beobachtung von Linienspektren sind Spektralröhren sehr geeignet. Man bringt den verengten Teil der Spektralröhre dicht vor den Spalt und parallel zu ihm. Die Röhre wird an einen kleinen Funkeninduktor angeschlossen. Wegen des Gasdrucks in der Röhre ist zuweilen die Überlagerung eines Linien- und eines Bandenspektrums zu sehen. Dieses stammt von den Molekülverbindungen der Gase.
Ein sehr linienreiches Spektrum liefert eine mit Neon gefüllte Spektralröhre.

Versuch 3

Zur Erzeugung von Linienspektren benutzt man außerdem Spektrallampen. Sie werden über eine Drossel oder über einen Vorwiderstand an eine Wechselspannung von 220 V gelegt. Die Spektrallampen müssen erst einige Minuten brennen, ehe sie ihre volle Strahlungsintensität erreichen.

Versuch 4

Die Spektren von Metallen, deren Salze die Flamme nur schwach färben, können durch Funken erzeugt werden. Zwei Drähte aus gleichem Material, beispielsweise aus Eisen, Zink, Wolfram, Kupfer, werden im Abstand von 5 mm ... 10 mm dicht vor dem Spalt des Spektroskops unter Verwendung von Holtzschen Klemmen eingespannt, und zwar so, daß die Funkenstrecke zum Spalt parallel verläuft. Die Drähte werden mit einem Funkeninduktor verbunden. Parallel zur Funkenstrecke wird eine Leydener Flasche geschaltet.

Bemerkungen

1. Zur Erzeugung diskontinuierlicher Emissionsspektren vergleiche auch „Physikalische Schulversuche", 10. Teil, V 2.2.9. und 2.2.10., und 11. Teil, V 4.1.1., 4.1.2., 4.2.1. und 4.2.2.!
2. Die Schulspektralapparate enthalten in der Regel noch ein drittes Rohr. Das Ende dieses Rohres wird schwach beleuchtet. Dadurch wird eine Skale über die vor dem Fernrohr liegende Seitenfläche des Prismas in das Fernrohr reflektiert und dem Spektrum überlagert. Ferner läßt sich ein kleines, dreiseitiges Prisma vor den unteren Teil des Spaltes klappen. Dadurch kann man zugleich das Spektrum einer zweiten Lichtquelle zum Vergleich beobachten.

3. Sehr zweckmäßig sind neben dem Gebrauch eines großen Spektroskops auch Übungen mit einem Handspektroskop, das ein Geradsichtprisma enthält. Man kann es gerade für Schülerexperimente ausgezeichnet verwenden, doch ermöglicht es darüber hinaus auch andere interessante Schulversuche.

4.1.12. Demonstration von Absorptionsspektren fester, flüssiger und gasförmiger Stoffe ●

1. Tageslichtschreibprojektor
2. großer Pappspalt ⑧ (siehe 1.3.3.)
3. Geradsichtprisma
4. Blendscheibe mit Schiebeschacht
5. Prismenhalter aus Pappe ⑧ (siehe 1.3.3.)
6. mehrere gleichartige Küvetten mit Glasplatte zum Verschließen
7. verschiedene Farbgläser oder verschieden gefärbte Gelatinefolien
8. Glas einer Sonnenbrille
9. verdünnte Lösungen verschiedener absorbierender Substanzen (z. B. Kupfersulfat, Fuchsin, Anilinfarben, Kaliumchromat, Kaliumpermanganat in Wasser, Jod in Alkohol oder Schwefelkohlenstoff, Chlorophyll in Alkohol)
10. verschiedene absorbierende Gase (z. B. Stickstoffoxide, Bromdampf)

Methodischer Hinweis

Der Versuch soll Verständnis für das Zustandekommen eines Absorptionsspektrums wecken und gleichzeitig damit die Versuche 4.1.14. und 4.1.15. vorbereiten helfen.

Versuch

Der große Pappspalt wird mit dem Tageslichtschreibprojektor scharf auf der Projektionswand in waagerechter Lage abgebildet. Durch Anordnen des Geradsichtprismas vor dem Objektiv wird ein kontinuierliches Spektrum erzeugt (vgl. V 4.1.1., Variante a). Zur Demonstration der Absorptionsspektren fester Stoffe bedeckt man den Spalt teilweise mit farbigen Filtergläsern oder gefärbten Gelatinefolien. Im Projektionsbild beobachtet man neben dem kontinuierlichen Spektrum die Absorptionsspektren der Farbgläser. Meist entstehen Absorptionsbereiche, die verschieden scharf begrenzt bis verwaschen sind. Man verwende auch zwei komplementäre Filtergläser oder Folien, die man teilweise übereinanderlegt. Auch Gläser von Sonnenbrillen können untersucht werden.
Zur Demonstration von Absorptionsspektren von Flüssigkeiten bedeckt man den Spalt teilweise mit Küvetten, die mit absorbierenden Flüssigkeiten gefüllt sind. Man beginnt mit einer wassergefüllten Küvette und zeigt, daß sämtliche Spektralbereiche durchgelassen werden. Erst danach wird man die absorbierende Wirkung von Kaliumchromat-, Kaliumpermanganat-, Kupfersulfat-, Jod- oder Chlorophyllösungen zeigen.
In ähnlicher Weise wie bei Flüssigkeiten verfährt man bei Gasen. Die Küvetten werden lediglich mit einer Glasscheibe abgedeckt, um ein Entweichen der Gase zu verhindern.

Bemerkungen

1. Zur Erzeugung der Stickstoffoxide läßt man etwa 30%ige Salpetersäure auf Kupferblech in Anwesenheit von Luft träufeln.
2. Bromdämpfe erhält man, wenn einige Tropfen Brom in die Küvette gegeben werden.
3. Gut geeignet sind auch Farbfilter aus dem Satz Absorptionsfilter von Schott, die deutlich selektive Absorption zeigen.

4.1.13. Beobachtung der Absorption von Natriumlicht durch Natriumdampf ●

Zu Variante a

1. 2 Bunsenbrenner,
   einer davon mit Schlitzaufsatz
2. Natriumsalz zum Färben der Flamme
3. Platindraht mit Öse
   oder Magnesiastäbchen

Zu Variante b

Geräte 1. (nur einmal), 2. und 3., außerdem

4. Natriumdampflampe mit Drossel
5. undurchsichtiger Schirm

Zu Variante c

Geräte 1. (nur einmal), 2. bis 4., außerdem

6. Milchglasscheibe
7. Natriumröhre

Methodischer Hinweis

Der Versuch dient der Vorbereitung der Versuche zur Beobachtung der Fraunhoferschen Linien und der Umkehrung der Natriumlinie. Die Schüler sollen erkennen, daß ein leuchtendes Gas das Licht derjenigen Wellenlänge absorbiert, die es auch emittiert.

Variante a

Die beiden Brenner werden hintereinandergestellt und ihre Flammen mit Natriumsalz intensiv gelb gefärbt. Die breite Flamme des Brenners mit Schlitzaufsatz wird kräftig eingestellt, die andere Flamme mäßig. Um die letztere möglichst kalt zu halten und einen großen Temperaturunterschied zwischen beiden Flammen herzustellen, kann man ein Blechstück oder einen kräftigen Draht in die Flamme bringen. So kann man die Wärme etwa über ein Stativ ableiten.
Betrachtet man durch die breite Flamme hindurch die schmale Flamme, erscheint die Mitte der großen Flamme heller.
Blickt man durch die kleine Flamme auf die große, so erscheint die kleine Flamme besonders an den Flammenrändern fast schwarz.

Variante b

Beleuchtet man einen undurchsichtigen Bildschirm oder eine Projektionswand mit einer Natriumdampflampe und stellt dazwischen eine nichtleuchtende Bunsenflamme, so entsteht auf dem Schirm nur ein schwacher Schatten der Flamme. Färbt man sie jedoch mit einem Natriumsalz, so zeichnet sich auf dem Schirm ein dunkler Schatten der Flamme ab.
Ein Kontrollversuch mit einem natriumfreien Salz liefert das gleiche Ergebnis wie die ungefärbte Flamme.

Variante c

Vor die Natriumdampflampe wird die Milchglasscheibe aufgestellt und gleichmäßig hell bestrahlt.
Betrachtet man dann gegen die Milchglasscheibe eine schwache, mit Natrium gelb gefärbte Flamme, erscheint sie besonders an den kälteren Flammenrändern schwarz.
Man kann auch eine Natriumröhre zur Vorführung der Absorption von Natriumlicht durch Natriumdampf verwenden. Die Natriumröhre besteht aus schwer schmelzbarem Glas, in ihr befinden sich Wasserstoff und ein Stück Natrium. Vor dem Gebrauch wird die Röhre leicht erhitzt. Hält man sie vor die von der Natriumdampflampe bestrahlte Milchglasscheibe, so erscheint die Röhre fast schwarz.

Bemerkung

Vergleiche hierzu auch „Physikalische Schulversuche", 11. Teil, V 5.3.5.!

4.1.14. Nachweis der Fraunhoferschen Linien im Sonnenspektrum

Zu Variante a

1. Spektralapparat oder aus Aufbauteilen zusammengesetzter Spektralapparat nach Versuch 3.4.20.
2. ebener Spiegel mit Stiel

Zu Variante b [SE]

3. Geradsichtprisma
4. Stricknadel oder Pappe mit feinem Spalt Ⓢ
5. schwarze Unterlage

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 4.0.1.!
2. Bei der Behandlung von Absorptionsspektren sollte man nie versäumen, das Spektrum des Sonnenlichtes zu betrachten. Die Fraunhoferschen Linien sind schon mit verhältnismäßig einfachen Mittel zu beobachten. Dies gilt auch dann, wenn nur gestreutes Sonnenlicht zur Verfügung steht.

Variante a

Man richte das Kollimatorrohr des Spektralapparates oder des aus den Aufbauteilen der optischen Bank zusammengesetzten Spektroskops genau in Richtung auf die Sonne aus. Vor dem Spalt ordne man einen in Höhe der optischen Achse horizontal drehbaren ebenen Spiegel an. Um Schädigungen des Auges durch zu helles Sonnenlicht zu vermeiden, wird der Spalt so eng wie möglich eingestellt

oder dicht vor dem Spalt ein Stück Transparentpapier gebracht. Man beobachtet ein kontinuierliches Spektrum, das mit einer Reihe von Absorptionslinien durchzogen ist.

Variante b

Eine gut polierte dünne Stricknadel oder Stopfnadel wird vor eine mattschwarze, vom Sonnenlicht gut beleuchtete Unterlage gehalten. Aus einer Entfernung von etwa 1 m ... 1,5 m blickt man durch ein ungefaßtes Geradsichtprisma auf die glänzende Nadel. Die Nadel und die brechende Kante des Geradsichtprismas sollen dabei parallel zueinander verlaufen. Man beobachtet ein kontinuierliches Spektrum mit Absorptionslinien, den Fraunhoferschen Linien.
Der Versuch gelingt auch, wenn man durch das Geradsichtprisma eine gegen den Himmel gehaltene Pappscheibe mit einem feinen Spalt betrachtet.

Bemerkungen

1. Zur Beobachtung der Fraunhoferschen Linien vergleiche auch „Physikalische Schulversuche", 10. Teil, V 2.2.11., Variante c 1.
2. Die Beobachtung der Fraunhoferschen Linien kann natürlich auch mit einem Handspektroskop erfolgen, das man auf einen hellen Teil des Himmels, nicht aber unmittelbar auf die Sonne richtet.
3. Die Variante a kann ebenfalls als Schülerexperiment durchgeführt werden.

4.1.15. Demonstration der Umkehrung der Natriumlinien ●

Zu Variante a

1. Sechskantschiene (1 m)
2. 4 Klemmreiter
3. 2 kleine Klemmreiter
4. Kohlebogenlampe mit Vorwiderstand oder Optikleuchte
5. 2 Blendscheiben mit Linse ($f = +120$ mm)
6. Blendscheibe mit Linse ($f = +150$ mm)
7. Blendscheibe mit Mikrometerspalt
8. Blendscheibe mit Schiebeschacht
9. Geradsichtprisma
10. Prismenhalter aus Pappe Ⓢ (siehe 1.3.1.)
11. Schirm
12. Teklubrenner
13. Eisenlöffel
14. Natrium, metallisch
15. splittersichere Glasscheibe
16. Asbestunterlage

Zu Variante b

Geräte 4., 5., 12. bis 16., außerdem 17. Spektralapparat

Methodischer Hinweis

Die Demonstration der Umkehrung der Natriumlinien ist ein Versuch von hohem Bildungs- und Erziehungswert. Er ist aber wegen der notwendigen Beachtung vieler Bedingungen, wie der abgestimmten Intensität der Glühlichtquelle und der Natriumflamme, des nötigen langen Lichtwegs durch die Natriumflamme und einer sehr sauberen Justierung der Spektralanordnung, nicht einfach in der Vorführung und verlangt Erfahrung und Geschick im Experimentieren.

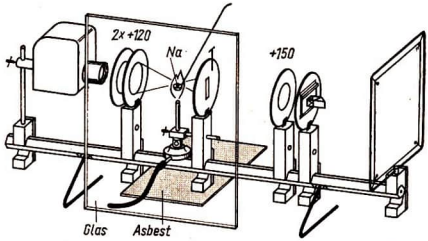


Abb. 4.1.15./1 Versuchsanordnung zur Vorführung der Umkehrung der Natriumlinien

Variante a

Am Ende der langen Sechskantschiene baut man unter Verwendung von Stativmaterial auf einem kleinen Reiter die Kohlebogenlampe auf oder an ihrer Stelle die Optikleuchte. Dicht davor steht der Doppelkondensor und in einem Abstand von abermals etwa 100 mm der Mikrometerspalt. Zwischen beiden Bauteilen wird mit Stativmaterial ein Teklubrenner so befestigt, daß seine Flamme im Bereich der optischen Achse brennt. Der Spalt wird mit der Sammellinse von $f = +150$ mm scharf auf dem am anderen Ende der Bank stehenden Schirm abgebildet, dann wird dicht hinter der Objektivlinse das Geradsichtprisma angeordnet, so daß ein kontinuierliches Spektrum auf dem Schirm entsteht (Abb. 4.1.15./1).
In einem Eisenlöffel verbrennt man in der heißen Flamme des Brenners ein erbsengroßes Stück metallischen Natriums. Zum Schutze gegen herumspritzendes, geschmolzenes Natrium stellt man eine nicht splitternde Glasscheibe auf und legt auf den Experimentiertisch unter den Brenner eine Asbestunterlage. Nach kurzer Zeit wird die schwarze Absorptionslinie im Spektrum sichtbar. Sollte sie nicht erscheinen, so ist das Spektrum nicht scharf eingestellt. Man behebt den Mangel dadurch, daß man den Spalt ein wenig verengt. Wenn man das Bogenlicht abdeckt, so zeigt sich schwach die gelbe Natriumlinie auf dunklem Grund.
Die Natriumflamme kann man auch nahe dem Prisma aufstellen. Dann ist zwar die Umkehrung, nicht aber der zuletzt genannte Effekt zu erreichen.

Variante b

Vor dem Spalt eines Spektralapparates wird ein Bunsenbrenner aufgestellt und seine Flamme mit Natriumsalz möglichst intensiv gelb gefärbt.
Die Natriumlinien werden im Spektralapparat so scharf wie möglich eingestellt und betrachtet. Wird nun aus einiger Entfernung Glühlicht einer Bogenlampe oder einer Glühfadenlampe auf den Spalt gerichtet, so erscheinen die Natriumlinien (bei geringem Auflösungsvermögen des Spektralapparates nur eine Linie) dunkel im kontinuierlichen Spektrum.
Zu beachten ist dabei, daß die Wendel der Glühpunkt- oder Glühfadenlampe mit Hilfe der Linse von +120 mm Brennweite direkt in der Flamme abgebildet wird und daß die Flammenfärbung immer intensiv gehalten wird.

Bemerkungen

1. Vergleiche auch „Physikalische Schulversuche", 10. Teil, V 2.2.12., Variante c, und 11. Teil, V 5.3.6. sowie V 5.3.7!
2. Eine mit Natriumsalz gefärbte Flamme erfüllt den Zweck nur dann, wenn sie sehr intensiv gefärbt und von genügender Ausdehnung in Richtung der optischen Achse ist.
3. Man kann die Natriumflamme bei Variante a einsparen, wenn man die untere, möglichst lotrechtstehende Kohle ausbohrt (eventuell Dochtkohlen verwenden) und mit wasserfreier Soda füllt. Die mit der abbrennenden Kohle verdampfende Soda schafft um den Kohlebogen eine Wolke von Natriumdampf, der das Absorptionsspektrum erzeugt.

4.2. Farbmischung

4.2.1. Demonstration der Vereinigung aller Spektralfarben zu Weiß ●

Zu Variante a

Geräte 1. bis 5. wie bei V 4.1.1., außerdem

38. Linsenkörper, bikonvex ($f = +150$ mm)
39. Eisenblech (100 mm × 200 mm) ⓢ

Zu Variante b

Geräte 10. bis 22. wie bei V 4.1.1., außerdem

40. Blendscheibe mit Zylinderlinse ($f = +100$ mm bis 200 mm)

Zu Variante c

Geräte 10. bis 22. wie bei V 4.1.1., außerdem

41. Drehspiegel mit Motor

Zu Variante d

Geräte 10. bis 19., 20. (2mal), 21., 22. wie bei V 4.1.1., außerdem

42. Spiegelstreifen, konkav
43. Blendscheibe mit Schiebeschacht
44. Diarähmchen mit Transparentpapier ⓢ (siehe 1.3.1.)

Zu Variante e [SE]

Geräte 21., 23. bis 26., 28. bis 31. wie bei V 4.1.1. oder anstelle von 28.

45. Becherglas

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 4.0.2.!
2. Für die Demonstration der Vereinigung der Spektralfarben zu Weiß gibt es sowohl von der Versuchsanordnung zur Erzeugung eines Spektrums wie auch

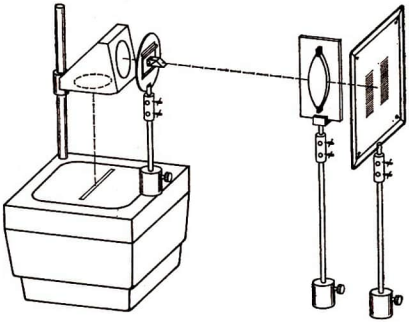


Abb. 4.2.1./1
Versuchsanordnung zur Vereinigung der Spektralfarben zu Weiß

von der Vereinigung her mehrere Möglichkeiten. Es empfiehlt sich aus Gründen der Effektivität, die Vereinigung der Spektralfarben zu Weiß mit derselben Anordnung durchzuführen wie die Zerlegung des Glühlichtes in die Spektralfarben.

Variante a

Wie im V 4.1.1. erzeugt man mit Hilfe eines Tageslichtschreibprojektors ein Spektrum an einer Projektionswand. Man richtet die Entfernung zur Projektionswand so ein, daß das Spektrum maximal 100 mm breit aufgefächert wird. Mit Stativmaterial wird ein Eisenblech in Höhe des Spektrums lotrecht aufgestellt und der bikonvexe Linsenkörper so befestigt, daß das gesamte Spektrum symmetrisch auf den Linsenkörper fällt (Abb. 4.2.1./1). Durch Ändern der Entfernung des Linsenkörpers von der Projektionswand erreicht man die Vereinigung zu Weiß in einem schmalen Bereich. Neben dem flachen Ausschnitt durch den bikonvexen Linsenkörper bleibt rechts und links davon das Spektrum erhalten.

Varianten b, c und d

Die drei Varianten gleichen einander im Aufbau sehr, in jedem Fall wird die Erzeugung eines Spektrums unter Verwendung der optischen Bank wie im entsprechenden Versuch von V 4.1.1. vorausgesetzt. Das Spektrum wird auf einem Bildschirm entworfen. Unterschiede gibt es lediglich in der Art und Weise der Vereinigung der Spektralfarben zu Weiß.
Bei Variante b erfolgt die Vereinigung mit Hilfe einer Zylinderlinse, die in einem Abstand, der etwas größer als ihre Brennweite ist, vor dem Bildschirm angebracht wird. Durch leichtes Verschieben längs der optischen Achse findet man leicht die Stellung, bei der die Vereinigung der Spektralfarben zu einem weißen Spaltbild erfolgt (Abb. 4.2.1./2a).
Bei der Variante c wird die Vereinigung durch einen rotierenden Drehspiegel bewirkt, der etwa in die Mitte zwischen Prisma und Schirm gestellt wird. Wegen der Ablenkung des Lichtes durch den Drehspiegel muß der Schirm mit Hilfe von Stativmaterial außerhalb der optischen Achse der Bank aufgestellt werden (Abb. 4.2.1./2b).

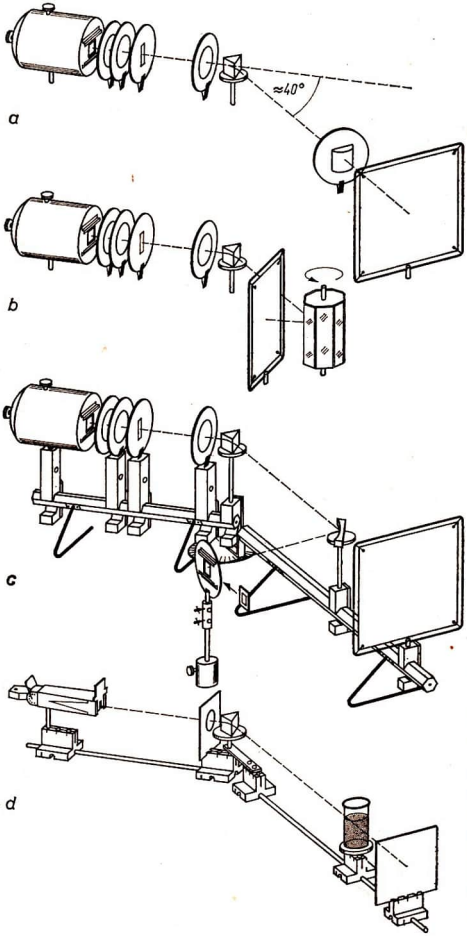


Abb. 4.2.1./2
Versuchsanordnungen zur Demonstration der Vereinigung aller Spektralfarben zu Weiß unter Verwendung einer Zylinderlinse (a), eines Drehspiegels (b), eines Zylinderspiegels (c) oder im Schülerexperiment unter Verwendung eines wassergefüllten Becherglases (d)

Bei Variante d kann man zur Vereinigung der Spektralfarben einen konkaven Spiegelstreifen aus Glas verwenden. Er wird kurz vor dem Schirm unter einen Winkel zur optischen Achse in den Strahlengang gebracht, wodurch ein Teil des Spektrums auf dem Schirm ausgeblendet wird. Mit einem kleinen in den Schiebeschacht einer Blendscheibe eingeschobenen transparenten Schirm sucht man das weiße Spaltbild, das vom Konkavspiegelstreifen entworfen wird (Abb. 4.2.1./2c).

Variante e

Wie im V 4.1.1. wird ein kleines Spektrum auf dem transparenten Schirm erzeugt. Kurz vor den Schirm bringt man die Sammellinse von 50 mm Brennweite und vereinigt das gesamte Spektrum in einem weißen Bildpunkt. Anstelle der Sammellinse kann man auch ein möglichst schlierenfreies, zur Hälfte mit Wasser gefülltes Becherglas kurz vor dem Schirm auf zwei Unterlegeklötzen aufstellen (Abb. 4.2.1./2d). Man beobachtet dann oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche das Spektrum, darunter die zu einem Spaltbild zu Weiß vereinigten Spektralfarben.

Bemerkungen

1. An Stelle der Zylinderlinse kann zur Vereinigung der Spektralfarben auch eine sphärische Linse verwendet werden.
2. Zur Erzeugung des Spektrums kann man auch ein Geradsichtprisma einsetzen.

4.2.2. Demonstration der additiven Farbmischung einzelner Spektralfarben zu Weiß ●

Zu Variante a ●

1. Kleinbildprojektor
2. Lochblende (50 mm × 50 mm; ∅ 15 mm) Ⓑ (siehe 1.3.3.)
3. großer Farbkreisel mit durchsichtigen Farbsektoren Ⓑ (siehe 1.3.1.)
4. Experimentiermotor

Zu Variante b [SE]

5. kleiner Farbkreisel mit farbigen Sektoren (Pigmentfarben) Ⓑ (siehe 1.3.1.)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 4.0.2.!
2. Dieser Versuch, der oft als Versuch zur Vereinigung der Spektralfarben zu Weiß ausgegeben wird, ist bestenfalls geeignet, die Trägheit des Auges und dessen begrenzte Farbtüchtigkeit zu demonstrieren. Es handelt sich zwar durch die Trägheit des menschlichen Auges um eine additive Farbmischung, aber keinesfalls um reine Spektralfarben.
3. Die Variante b ist wegen ihrer Einfachheit auch als Hausexperiment geeignet.

Variante a

Mit dem Kleinbildprojektor wird eine Lochblende vergrößert und scharf auf der Projektionswand abgebildet. Vor das Objektiv bringt man den Farbkreisel, der

aus mehreren durchsichtigen Farbsektoren besteht, die in der Reihenfolge dem Ostwaldschen Farbkreis entsprechen,

z.B.: 6 Sektoren von je 60°: Weinrot, Rotorange, Gelb, Grün, Blaugrün, Ultramarinblau oder
6 Sektoren von je 60°: Karminrot, Orange, Gelbgrün, Seegrün, Preußischblau, Violett oder
4 Sektoren von je 90°: Rot, Gelb, Seegrün, Ultramarinblau.

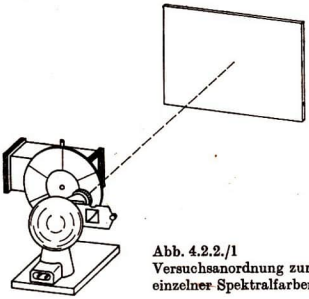


Abb. 4.2.2./1
Versuchsanordnung zur Vorführung der additiven Farbmischung einzelner Spektralfarben zu Weiß

Beim langsamen Drehen der Scheibe vor dem Objektiv wechseln die Farben entsprechend der durchstrahlten Farbfolie auf dem Schirm. Bei schnellem Drehen beobachtet man einen weißlichen Lichtfleck. Verbleibt ein Farbton, so verkleinert man den Sektor dieser Farbe, indem man einen schmalen schwarzen Sektor aufklebt (Abb. 4.2.2./1).

Variante b

Ein mit Pigmentfarben entsprechend den obigen Farbfolgen auf steifen, weißen Karton gemalter Farbkreisel von etwa 50 mm bis 80 mm Durchmesser wird in der Mitte mit einem kleinen Speiler als Drehachse versehen und durch Drehen zwischen den Fingern in schnelle Rotation versetzt. Die Farben verschmelzen ineinander, und die Kreisfläche erscheint gelblichweiß.

4.2.3. Vereinigung der Restfarben eines Spektrums ●

Zu Variante a

Geräte wie bei V 4.2.1., Variante a, außerdem

46. kleine Blende (5 mm breit), magnetisch haftend Ⓢ (siehe 1.3.2.)

Zu Variante b

Geräte wie bei V 4.2.1., Variante b, außerdem

47. schmaler, ebener Spiegelstreifen (4 mm breit) Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Zu Variante c

Geräte wie bei V 4.2.1., Variante d, außerdem

48. Blendscheibe mit Schiebeschacht
49. Glasstreifen mit schmalem Hindernis (2 mm; 50 mm × 100 mm) Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 4.0.2.!
2. Da der Versuch zur Vereinigung der Restfarben eines Spektrums die Fortführung des Versuches 4.2.1. darstellt, siehe auch MH zu 4.2.1.!
3. Der Versuch zur Vereinigung der Restfarben eines Spektrums hat neben der ästhetischen Wirkung, die vielen Versuchen zur Farbmischung zukommen, noch Bedeutung für die Entwicklung des Begriffs Komplementärfarbe.

Variante a: Benutzen einer Blende

Die Vereinigung der Spektralfarben erfolgt wie im V 4.2.1., Variante a. Dicht vor dem bikonvexen Linsenkörper befestigt man die schmale Blende und blendet damit einen bestimmten Spektralbereich aus. Durch den über den Rand des Linsenkörpers hinausragenden Teil der Blende kann man im kontinuierlichen Spektrum auf dem Schirm den ausgeblendeten Farbbereich erkennen. Die Vereinigung der Restfarben liefert die komplementäre Farbe der ausgeblendeten Spektralfarbe.

Variante b: Benutzen eines Spiegelstreifens

Wie im V 4.2.1., Variante d, vereinigt man mit Hilfe eines Hohlspiegelstreifens die Spektralfarben wieder zu Weiß. Dicht vor dem Hohlspiegel stellt man den schmalen Spiegelstreifen so auf, daß ein enger Farbbereich des Spektrums neben das Spaltbild auf den Schirm reflektiert wird. Im Spaltbild vereinigen sich nur noch die Restfarben des Spektrums zur Komplementärfarbe der ausgespiegelten Farbkomponente.

Variante c: Benutzen eines Glasstreifens mit Hindernis

In einer Versuchsanordnung nach V 4.2.1., Variante b, wird dicht vor der Zylinderlinse eine Blendscheibe mit Schiebeschacht auf den Reiter gesteckt und der Glasstreifen mit dem schmalen, aus Aluminiumfolie aufgeklebten Hindernis langsam durch das Spektrum gezogen. Die im Konvergenzpunkt auf dem Schirm vereinigten Restfarben nehmen jeweils die komplementäre Farbe zum ausgeblendeten Spektralbereich an.

4.2.4. Demonstration der additiven Farbmischung ●

Zu Variante a

1. Kleinbildprojektor
2. feiner Spalt (0,2 mm bis 0,5 mm; 50 mm × 50 mm) Ⓢ (siehe 1.3.1.)
3. Geradsichtprisma
4. 2 schmale Spiegelstreifen mit Haftmagneten an der Stirnseite Ⓢ (siehe 1.3.2.)
5. Eisenblech (100 mm × 200 mm) Ⓢ
6. transparenter Schirm

Zu Variante b

7. 2 Kleinbildprojektoren gleichen Typs
8. verschiedene Farbfilter (50 mm × 50 mm)

Zu Variante c [SE]

9. Experimentierleuchte
10. 4 T-Füße
11. Handapparat
12. Blendrahmen mit Linse ($f = +100$ mm)
13. Blendrahmen mit Schiebeschacht
14. transparenter oder undurchsichtiger Schirm
15. Diarähmchen mit Transparentpapier ® (siehe 1.3.1.)
16. verschiedene Farbfilter, gerahmt (50 mm × 50 mm)

Methodischer Hinweis

Die Variante a benutzt zur additiven Farbmischung enge ausgespiegelte Bereiche des Spektrums, die zur Überdeckung gebracht werden. Trotz der wesentlich geringeren Lichtstärke im Vergleich zu den anderen Versuchen, die Filterlicht zur Überdeckung bringen, und der erheblich kleineren Überdeckungsbereiche sollte diese Variante zur Einführung genutzt werden.

Variante a

Der feine Spalt im Bildschacht des Kleinbildprojektors wird scharf auf der Projektionswand abgebildet. Unter Verwendung von Stativmaterial bringt man vor das Objektiv gut durchleuchtet ein Geradsichtprisma. Auf der Projektionswand entsteht ein kontinuierliches Spektrum. Man richtet die Entfernung zur Projektionswand so ein, daß ein etwa 100 mm breites helles Spektrum entsteht.
Vor der Wand werden auf dem waagerecht liegenden Eisenblech die beiden etwa 5 mm schmalen Spiegelstreifen mit den Haftmagneten senkrecht so aufgestellt, daß zwei schmale Spektralbereiche ausgespiegelt werden. Durch Drehen der Spiegel wirft man die reflektierten Lichtbündel auf einen seitlich stehenden Schirm, so daß sie einander teilweise überdecken. In dem Überlappungsbereich entsteht die additive Mischfarbe (Abb. 4.2.4./1a). Durch Verändern der Spiegelstellungen können beliebige Farbanteile des Spektrums miteinander gemischt werden. Die Mischfarbe ist weißlich, wenn komplementäre Farbanteile zur additiven Mischung gebracht werden.
Die ausgespiegelten Farbbereiche auf dem Schirm sind relativ klein und lichtschwach, so daß zur Beobachtung an den Schirm herangetreten werden muß.

Variante b

Zwei gleiche Kleinbildprojektoren werden in kurzer Entfernung auf einen Schirm gerichtet. In die Diapositivschächte werden zwei unterschiedliche Farbfilter gebracht und nebeneinander gleich groß auf der Projektionswand abgebildet. Durch seitliches Drehen eines der beiden Projektoren bringt man die beiden farbigen Bilder teilweise zur Deckung. Der Überdeckungsbereich erscheint in der Mischfarbe: die Mischfarbe ist Weiß, wenn die beiden Farbanteile komplementär sind (Abb. 4.2.4./1b).

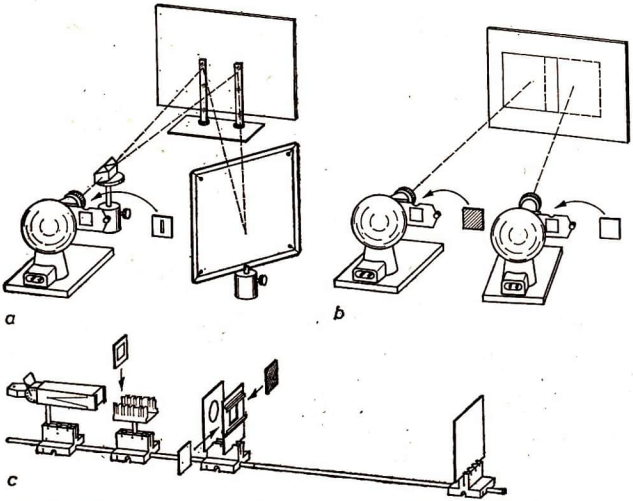


Abb. 4.2.4./1Versuchsanordnung zur Demonstration der additiven Farbmischung zweier Spektralfarben (a) und zweier Filterfarben (b und c); Lehrerexperimente (a und b), Schülerexperiment (c)

Variante c

Das als Gegenstand dienende Diarähmchen mit Transparentpapier wird im Handapparat untergebracht und von der Experimentierleuchte bestrahlt. Mit der Linse von 100 mm Brennweite bildet man das Transparentobjekt leicht vergrößert auf dem transparenten bzw. undurchsichtigen Schirm ab. Dicht hinter der Linse ist der Schiebeschacht angeordnet, in den man von beiden Seiten die gerahmten Farbfilter einschiebt, so daß die vom Filter bedeckten äußeren Linsenteile gleich groß sind.
Auf dem Bildschirm erscheint die Mischfarbe, im Falle komplementärer Farbfilter Weiß. Nun verschiebt man den Schirm längs der optischen Achse, dadurch überdecken die beiden von den Linsenteilen entworfenen Bilder einander nicht mehr vollständig. Die seitlichen Ränder erscheinen in den Farben der Filter, die überdeckte Mitte in der Mischfarbe (Abb. 4.2.4./1c).

4.2.5. Demonstration der subtraktiven Farbmischung

Zu Variante a ●

1. Tageslichtschreibprojektor
2. Maske für den Tageslichtschreibprojektor
   mit mehreren Aussparungen, die mit sich z. T.
   überlappenden durchsichtigen Farbfolien bedeckt sind Ⓢ (siehe 1.3.3.)

Zu Variante b [*SE*]

3. Handapparat
4. Diarähmchen mit sich z. T. überlappenden Farbfolien Ⓢ
   (siehe 1.3.1.)
5. Diarähmchen mit Transparentpapier Ⓢ
   (siehe 1.3.1.)

Methodischer Hinweis

Der Versuch bietet Möglichkeiten, auf das ästhetische Farbempfinden der Schüler Einfluß zu nehmen.

Variante a

Auf die Projektionsfläche des Tageslichtschreibprojektors legt man eine Maske mit mehreren Aussparungen, über die einander teilweise überlappende Farbfolien geklebt sind. Empfehlenswert ist es zum Beispiel,

- zwei Quadrate mit Folien zu überdecken, die keine Komplementärfarben sind,
- zwei Quadrate mit Folien zu überdecken, die Komplementärfarben sind, und
- ein Dreieck mit drei Farbfolien so zu bedecken, daß jede Farbe einzeln, jede mit jeder überdeckt und schließlich alle drei überdeckt projiziert werden können.

Die Maske wird scharf auf der Projektionswand abgebildet, wobei entweder alle Aussparungen mit den subtraktiven Farbmischungen sofort freigegeben werden oder die Freigabe nacheinander erfolgt. Man beobachtet im Projektionsbild, daß neben den Farben der Folien die Überlappungsgebiete eine dunklere Mischfarbe bilden, die aus den Farbresten gebildet wird, die durch beide Folien hindurchtreten. Sind beide Folien komplementärfarbig, so ist das Überlappungsgebiet schwarz.
Bei der subtraktiven Mischung von drei Farben erscheint das Überlappungsgebiet aller drei Folien meist schwarz, alle Überlappungsgebiete von nur zwei Farbfolien liefern eine dunklere Mischfarbe.

Variante b

In den Handapparat werden Diarähmchen gesteckt, die teilweise einander überlagernde Farbfolien enthalten. Wie in Variante a ist die Kombination zweier nichtkomplementärer, zweier komplementärer und auch dreier Farbfolien möglich.
Man blickt durch die Farbfolien gegen den Himmel oder eine hell beleuchtete weiße Wand und beobachtet die subtraktive Farbmischung. Muß man gegen eine Lampe oder den sehr hellen Himmel blicken, kann dicht hinter die Farbfolien noch ein Diarähmchen mit Transparentpapier gesetzt werden.

4.2.6. Beleuchtung farbiger Körper mit farbigem Licht und fluoreszierender Stoffe mit UV-Licht ●

Zu Variante a

1. Tageslichtschreibprojektor
2. großer Pappspalt Ⓢ (siehe 1.3.3.)
3. Geradsichtprisma
4. Blendscheibe mit Schiebeschacht
5. Prismenhalter Ⓢ (siehe 1.3.3.)
6. verschiedene farbige und bunte Gegenstände (z. B.: Streifen aus Buntpapier, kontrastreiches Farbbild, Zitrone, Orange, Blumen usw.)

Zu Variante b

Gerät 6., außerdem

7. Natriumdampflampe
8. Quecksilberdampflampe
9. Ultraviolettstrahler
10. Fluoreszenzschirm oder verschiedene flubreszierende Stoffe (Fluoreszeinnatrium, Filterpapierstreifen mit optischem Aufheller getränkt)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 4.0.2.!
2. Betont werden sollte die praktische Bedeutung dieses Versuches zur Entwicklung von Lichtquellen, die ein tageslichtähnliches Licht erzeugen, um auch bei Kunstlicht die Farben in ihrem natürlichen Farbton betrachten zu können (Beleuchtung in Gemäldeausstellungen, Kunstgalerien und Textilgeschäften).

Variante a

Wie im V 4.1.1. wird an der Projektionswand ein möglichst breites und helles Spektrum erzeugt. Hält man schmale Streifen aus Buntpapier vor den Schirm in das Spektrum, so erscheinen sie in ihrer Farbe nur in den Bereichen der Spektralfarben, die als Farbkomponenten in der Körperfarbe der Buntpapierstreifen enthalten sind. Bewegt man die Streifen durch das ganze Spektrum hindurch, so ändert sich der Farbeindruck völlig. Die Farben werden unbunt und gehen in Hellgrau und schließlich in Dunkelgrau oder Schwarz über, wenn der Buntpapierstreifen in den Bereich der komplementären Spektralfarben gelangt.
Sehr eindrucksvoll läßt sich die Farbänderung zeigen, wenn man einen Strauß aus roten und blauen Blumen durch das Spektrum hindurchführt.

Variante b, Versuch 1

Überraschend wirkt es, einen farbigen Körper, etwa eine Zitrone, erst mit einer Natriumspektrallampe und dann mit einer Quecksilberspektrallampe zu beleuchten. Die Zitrone erscheint im Natriumlicht in ihrer natürlichen Farbe, während sie diese im Quecksilberlicht ganz verliert und fast schwarz wirkt. Das

Umgekehrte ist zu beobachten, wenn man eine Pflaume nacheinander in beiden Lichtarten betrachtet. Auch ein Buntdruck wechselt beim Übergang vom Tageslicht zum Natriumlicht oder zum Quecksilberlicht vollständig seinen Farbcharakter.
Anstelle von Spektrallampen lassen sich auch Farbfilter verwenden, mit denen man das Licht eines Projektors färbt. Doch wirkt der Versuch nicht ganz so überzeugend, da die Farbfilter meist nicht auf einen so engen Spektralbereich beschränkt sind wie die Spektrallampen.

Variante b, Versuch 2

In den nicht sichtbaren Lichtkegel eines UV-Strahlers bringt man einen Fluoreszenzschirm, der hell aufleuchtet.
Schöne Fluoreszenz beobachtet man an Filterpapierstreifen, die mit Fluoreszeinnatrium, modernen Waschmitteln oder optischen Aufhellern für Textilien getränkt sind.
Auch eine Leuchtstofflampe fluoresziert im UV-Licht.

Bemerkung

Es ist durch Abschirmen dafür zu sorgen, daß die Schüler nicht unmittelbar vom UV-Licht getroffen werden. Der experimentierende Lehrer trage eine Sonnenbrille.

4.2.7. Demonstration farbiger Schatten ●

1. 2 Sechskantschienen (0,5 m; 1 m)
2. 2 Optikleuchten
3. 3 große Klemmreiter
4. kleiner Klemmreiter
5. undurchsichtiger Schirm
6. verschiedene Farbfilter (50 mm × 50 mm)

Methodischer Hinweis

Es empfiehlt sich, bei der Demonstration farbiger Schatten entwickelnd vorzugehen. Man sollte mit dem Schattenwurf der einen Lichtquelle beginnen, danach die zweite hinzufügen und Halbschatten erzeugen (Wiederholung Schattenbildung!) und schließlich das Licht beider Lichtquellen färben und die Entstehung der farbigen Schatten beobachten.

Versuch

Auf der kurzen Schiene werden dicht nebeneinander die beiden Optikleuchten senkrecht zur Schiene aufgestellt. Die lange Schiene trägt den undurchsichtigen Schirm und einen Stativstab (0,15 m) als Schattenstab. Beide Schienen stehen lotrecht zueinander. Man erzeugt zwei Halbschatten auf dem Schirm.
Bringt man vor die eine Lampe ein Rotfilter, vor die andere ein Grünfilter, so wirkt sich das auf die Gesamtbeleuchtung des Schirmes kaum aus. Er erscheint nach wie vor in weißlichem Licht. Die beiden Schatten jedoch erscheinen farbig;

auf der Seite des Rotfilters liegt der rötliche Schatten, auf der Seite des Grünfilters der grünliche.
Es lassen sich verschiedene Farbfilter miteinander kombinieren.

Bemerkung

Der Versuch kann in gleicher Weise als Schülerexperiment durchgeführt werden. Der Versuchsaufbau ist ähnlich wie im V 2.1.4. bei der Halbschattenerzeugung. Die Experimentierleuchten werden ohne Kondensor benutzt, in ihre Blendenhalterung werden entsprechend zurechtgeschnittene Farbfolien eingeschoben. Man kann zur farbigen Schattenerzeugung komplementäre oder auch nichtkomplementäre Farbfilterkombinationen verwenden.

5. Ausgewählte Versuche zur Fotometrie

5.0. Methodische Bemerkungen

5.0.0. In diesem Kapitel sollen lediglich ergänzend und abrundend einige ausgewählte grundlegende Versuche zur Fotometrie dargestellt werden. Alle Versuche dieses Kapitels erfordern die Selbstherstellung einfacher Aufbauteile, besonders der Fotometer.
Alle Versuche zur Fotometrie erfordern sehr sorgfältiges Arbeiten. Jedes Fremdlicht, das zum Fotometer gelangt, stört die Meßergebnisse empfindlich. Man sorge deshalb stets dafür, daß weder das Tageslicht noch die Raumbeleuchtung, aber auch nicht das an hellen Wänden oder an der hellen Kleidung des Experimentators reflektierte Licht zum Fotometer gelangt. Das gelingt meist ausreichend durch gute Raumverdunklung, durch Verwendung lichtdichter Lampengehäuse, durch Aufstellen mehrerer Blenden zwischen Lichtquelle und Fotometer, durch zweckmäßige Kleidung des Experimentators sowie durch Abdecken bestimmter Teile der Versuchsanordnungen.
Die Eigenart der subjektiven Fotometrie besteht darin, daß die Lichtstärken von Lichtquellen nicht unmittelbar miteinander verglichen werden können, sondern über den Umweg der Beurteilung der Beleuchtungsstärken von Vergleichsflächen unter Anwendung des Entfernungsgesetzes berechnet werden müssen. Dabei kann wegen des Fehlens eines Lichtstärkenormals an den Schulen lediglich das Verhältnis der Lichtstärken zweier Lichtquellen ermittelt werden. Angenäherte Absolutwerte lassen sich bei Verwendung der in 1.1.1. angegebenen mittleren Lichtstromwerte für 220-Volt-Glühlampen bestimmen.
Wegen der oft erheblichen Meßfehler sind fotometrische Versuche nicht leicht durchzuführen. Sie erfordern großes Experimentiergeschick vom Lehrer. Erschwerend kommt bei einigen Versuchen noch die unterschiedliche spektrale Zusammensetzung des ausgestrahlten Lichtes unterschiedlicher Lichtquellen hinzu. Man wird sich deshalb vorteilhaft bei der Vorführung fotometrischer Versuche in der Schule auf Lichtquellen annähernd gleicher spektraler Zusammensetzung beschränken.

5.0.1. In V 5.1.1. sind mehrere Varianten des Versuches zum subjektiven Vergleich der Lichtstärken zweier Lichtquellen beschrieben, bei Verwendung unterschiedlicher Fotometer. Der objektive Vergleich der Lichtstärken zweier Lichtquellen erfolgt im Versuch 5.1.2. mit Hilfe eines Fotoelements. Sehr instruktiv ist die Erarbeitung des Lambertschen Entfernungsgesetzes nach V 5.1.3. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einem Versuch in 5.1.4. zur experimentellen Ermittlung der Lichtverteilungskurve einer Glühlampe.

5.1. Fotometrie

5.1.1. Subjektiver Vergleich der Lichtstärken zweier Lichtquellen ●

Zu Variante a

1. Sechskantschiene (1 m)
2. 4 bis 6 große Klemmreiter
3. kleiner Klemmreiter mit Verlängerungsstück
4. 2 Blendscheiben mit Schiebeschacht
5. 2 Irisblenden
6. Blendscheibe mit Fotometer nach Bunsen oder Töpler ® (siehe 1.3.1.)
7. 2 zu vergleichende Lichtquellen nahezu gleicher spektraler Zusammensetzung
8. 2 Spiegel (50 mm × 50 mm) ® (siehe 1.3.1.)
9. Meßleiste
10. 3 Meßleistenhalter mit Markierungen

Zu Variante b

Geräte 1. (2mal), 2. (2mal), 3. (2mal), 6., 9., 10., außerdem

11. Papierfotometer nach Bouguer-Weber ® (siehe 1.3.1.)
12. Blendschutz aus Holz oder Pappe ® (siehe 1.3.1.)

Zu Variante c [SE]

13. 2 Experimentierleuchten (ohne Kondensor) oder zwei zu vergleichende Lichtquellen
14. 4 T-Füße
15. transparenter Schirm
16. Lineal

Zu Variante d [SE]

Geräte 13. (1mal), 14. (5mal), 16., außerdem

17. 2 Blendrahmen mit Loch (∅ 30 mm) ® (siehe 1.3.1.)
18. Tischchen
19. Prisma, gleichseitig
20. weißer, dünner Zeichenkarton
21. Kerzen

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 5.0.1.!
2. Für die meisten der hier beschriebenen Versuche sind die Fotometer selbst herzustellen (vgl. 1.3.1. sowie Abbildung 1.3.1./11d und Abbildung 1.3.1./13a). Will man die Erscheinungen einem großen Kreis vorführen, eignen sich Fotometer nach Bouguer-Weber oder ein Schattenfotometer. Alle anderen Fotometeranordnungen, etwa nach Bunsen, Töpler oder das einfache Papierfotometer für das Schülerexperiment, sind für die subjektive Einzelbeobachtung vorgesehen.

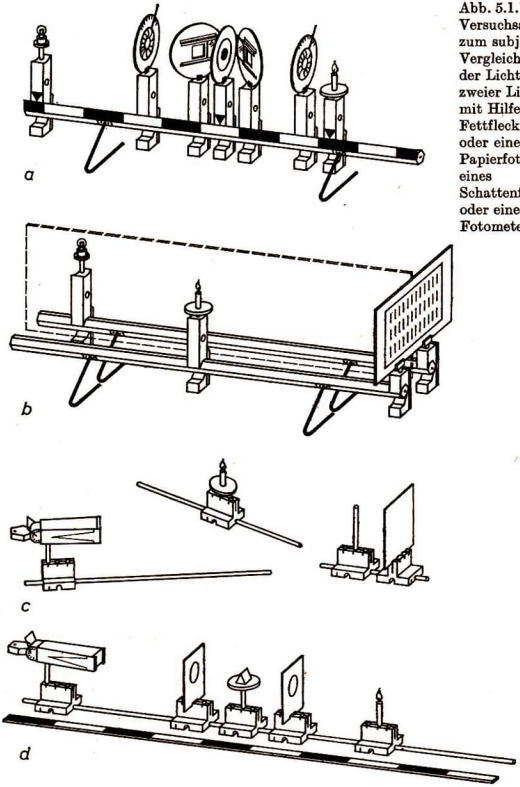


Abb. 5.1.1./1
Versuchsanordnungen zum subjektiven Vergleich der Lichtstärken zweier Lichtquellen mit Hilfe eines Fettfleckfotometers (a) oder eines Papierfotometers (b), eines Schattenfotometers (c) oder eines Fotometerprismas (d)

Variante a

In der Mitte der optischen Bank wird auf einem Klemmreiter ein selbsthergestelltes Fotometer nach Bunsen oder Töpler aufgestellt. Zu beiden Seiten ordnet man je eine Blendscheibe mit Schiebeschacht 45° zur optischen Achse gedreht an und bringt die beiden Spiegel in den Schiebeschächten bis dicht an die Blendscheibe mit dem Fotometer. Blickt man senkrecht zur optischen Achse in die beiden Spiegel, muß man in ihnen das Fotometer sehen. Beiderseits des Foto-

meters stellt man dann noch die zu vergleichenden Lichtquellen auf und blendet Fremdlicht mit zwei symmetrisch zum Fotometer stehenden Irisblenden ab. Mit Haftmagneten am Klemmreiter des Fotometers und an beiden Lichtquellen befestigt man die Meßleiste (Abb. 5.1.1./1a).
Man verschiebt zum Messen eine der beiden Lichtquellen in Richtung der optischen Achse der Fotometerbank so lange, bis die beiden Spiegelbilder des Fettflecks gleich hell erscheinen. Der Fettfleck verschwindet beim Verschieben der beiden Lichtquellen nie ganz. Der Vergleich der beiden Lichtstärken erfolgt unter Anwendung des Entfernungsgesetzes.

Variante b

Zwei Sechskantschienen werden etwa 140 mm voneinander entfernt parallel aufgestellt. Mit kleinen Klemmreitern wird am Ende beider Schienen ein Papierfotometer nach Bouguer-Weber unter Verwendung von Stativmaterial befestigt. Auf je einem Reiter werden die beiden zu vergleichenden Lichtquellen auf je einer der Schienen angeordnet. Zwischen die beiden Lichtquellen bringt man über die ganze Länge der Bank einen Blendschutz aus Holz oder Pappe (Abb. 5.1.1./1b).
Zum Vergleich der Lichtstärken wird eine der beiden Lichtquellen längs der optischen Achse so lange verschoben, bis die beiden Seiten des Papierfotometers gleich hell erscheinen; bei unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung der zu vergleichenden Lichtquellen stellt man auf gleiche Lesbarkeit des auf dem Fotometer geschriebenen Textes ein. Danach werden die Entfernungen der beiden Lichtquellen zum Fotometer bestimmt und die Lichtstärken mit Hilfe des Entfernungsgesetzes miteinander verglichen.

Variante c

Zum Vergleich der Lichtstärken zweier Lichtquellen wird das Schattenfotometer nach Rumford verwendet. Man stellt es einfach aus einem Schattenstab (kurzer Stativstab) her, der lotrecht vor dem transparenten Schirm steht. Der Stab wird von den beiden zu vergleichenden Lichtquellen so beleuchtet, daß die beiden entstehenden Halbschatten auf dem Schirm einander gerade berühren. Durch Verschieben einer der beiden Lichtquellen wird erreicht, daß beide Schatten gleich dunkel erscheinen (Abb. 5.1.1./1c). Die Lichtstärken der beiden Lichtquellen verhalten sich dann wie die Quadrate ihrer Entfernungen zum Schirm.

Variante d

Der Vergleich der Lichtstärken zweier Lichtquellen gelingt auch, wenn man als Fotometer ein mit einem dünnen, weißen Kartonstreifen ummanteltes, gleichseitiges Prisma verwendet, das mit der Fläche mit der Klebestelle auf einen Prismentisch senkrecht zur optischen Achse gelegt wird, der in der Mitte der optischen Bank steht und beidseitig symmetrisch zwei Lochblenden angeordnet hat. Von den beiden zu vergleichenden Lichtquellen wird je eine der papierbespannten Prismenflächen beleuchtet (Abb. 5.1.1./1d). Man blickt von oben auf die bestrahlten Prismenflächen und verschiebt eine der beiden Lichtquellen so lange, bis die beiden Prismenflächen gleich hell erscheinen. Die Lichtstärken der Lichtquellen verhalten sich wie die Quadrate ihrer Entfernungen zum Prisma.

5.1.2. Objektiver Vergleich der Lichtstärken zweier Lichtquellen

Zu Variante a

1. Sechskantschiene (1 m)
2. 4 große Klemmreiter
3. 2 zu vergleichende Lichtquellen
4. 2 Irisblenden
5. Blendscheibe mit Fotoelement Ⓢ (siehe 1.3.1)
6. Strommesser (0 ... 50 µA) oder Spiegelgalvanometer

Zu Variante b

Geräte 1. bis 6., außerdem

7. kleiner Klemmreiter mit Verlängerungsstück
8. Meßleiste (1 m)
9. 3 Meßleistenhalter mit Markierungsreiter

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 5.0.1.!
2. Um den Unterschied in der Genauigkeit der subjektiven und objektiven fotometrischen Messungen überzeugend vorzuführen, empfiehlt es sich, zwei Lichtquellen einmal nach einer Variante des V 5.1.1. auszumessen und vergleichend dazu nach einer der hier dargestellten Varianten.

Variante a

Am Ende einer optischen Bank ist die Blendscheibe mit dem Fotoelement (vgl. 1.3.1. sowie Abb. 1.3.1./12a) aufgebaut und an das elektrische Meßgerät angeschlossen. Das Meßgerät soll einen möglichst kleinen Innenwiderstand besitzen. Die

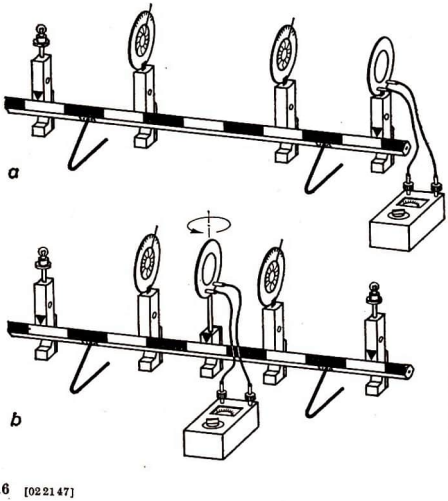


Abb. 5.1.2./1
Versuchsanordnungen zum objektiven Vergleich der Lichtstärken zweier Lichtquellen für sukzessive (a) oder simultane (b) Ausmessung

lichtstärkere der beiden Lichtquellen wird in einer solchen Entfernung vom Fotoelement aufgestellt, daß ein relativ großer Ausschlag am Meßgerät hervorgerufen wird. Zur Abblendung von Streulicht ordnet man zwischen Lichtquelle und Fotoelement noch zwei weitgeöffnete Irisblenden an. Die Fotostromstärke I_1 wird gemessen (Abb. 5.1.2./1a).
Ohne die Entfernung zum Fotometer und die Einstellung der Irisblenden zu verändern, werden die Lichtquellen ausgetauscht. Die Fotostromstärke I_2 wird gemessen. Die Beleuchtungsstärken und damit die Lichtstärken verhalten sich wie die Stärken der Fotoströme.

Variante b

Genau in der Mitte einer optischen Bank wird auf einem kleinen Klemmreiter mit Verlängerungsstück das Fotoelement drehbar angeordnet. Zu beiden Seiten bringt man die beiden Lichtquellen und als Blendschutz die beiden Irisblenden symmetrisch an. Zur Ermittlung der Entfernung wird außerdem die Meßleiste magnetisch an den Klemmreitern befestigt. Man schwenkt das Fotoelement nach beiden Seiten und vergleicht die Fotostromstärken miteinander (Abb. 5.1.2./1b).
Die Lichtquelle, die die geringere Stromstärke hervorruft, bringt man näher an das Fotoelement heran, und zwar so weit, bis die beiden Stromstärken gut übereinstimmen. Die Lichtstärken der beiden Lichtquellen verhalten sich dann wie die Quadrate ihrer Entfernungen zum Fotoelement.

5.1.3. Experimentelle Ermittlung des Lambertschen Entfernungsgesetzes ●

Zu Variante a

1. 2 bis 3 Sechskantschienen (1 m)
2. Optikleuchte
3. 4 große Klemmreiter
4. Blendscheibe mit Fotoelement Ⓢ (siehe 1.3.1.)
5. 2 Irisblenden
6. Strommesser (0 ... 100 µA) oder Spiegelgalvanometer
7. Meßband

Zu Variante b

Geräte 1. (2mal), 3. (2mal), außerdem

8. 2 kleine Klemmreiter
9. 2 Blendscheiben mit 1 bzw. 9 Glühlämpchen Ⓢ (siehe 1.3.1.)
10. Papierfotometer nach Bouguer-Weber Ⓢ (siehe 1.3.1.)
11. Blendschutz aus Holz oder Pappe Ⓢ (siehe 1.3.1.)
12. Meßstab

Zu Variante c [*SE*]

13. Experimentierleuchte ohne Kondensor
14. 3 T-Füße
15. Blendrahmen mit Schiebeschacht
16. transparenter Schirm
17. Lineal

Methodischer Hinweis

Von den Varianten a und b eignet sich die objektive Ausmessung zur genauen Bestimmung, die subjektive Bestimmung besser für die Demonstration vor einem größeren Kreis bei geringeren Ansprüchen an die Genauigkeit.

Variante a

Am Ende der 2 m bis 3 m langen optischen Bank wird das Fotoelement aufgestellt und mit dem Strommesser verbunden. Die Glühpunktlampe in der Optikleuchte wird im Laufe der Messungen schrittweise vom Fotometer entfernt. Entfernung und Fotostromstärke werden jeweils gemessen und etwa nach dem folgenden Muster in Tabellenform festgehalten.

Entfernung r Lichtquelle-Fotometer in m	Quadrat der Entfernung Lichtquelle-Fotometer r^2 in m^2	Fotostromstärke I in µA	$I \cdot r^2$ in $\mu A \cdot m^2$
0,50	0,25	118	29
1,00	1,00	30	30
1,50	2,25	13	29
2,00	4,00	7,5	30
2,50	6,25	4,7	29

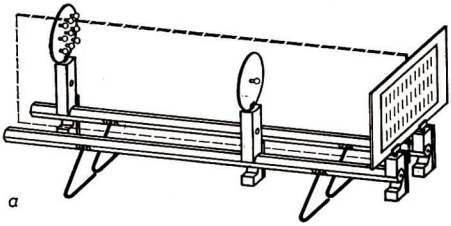
Zur Abblendung von Streulicht ordnet man zwischen Lichtquelle und Fotoelement noch zwei Irisblenden an.
Die Auswertung der Versuchsergebnisse liefert die Erkenntnis, daß die Beleuchtungsstärke einer Fläche dem Quadrat ihrer Entfernung von der (punktförmigen) Lichtquelle umgekehrt proportional ist.

Variante b

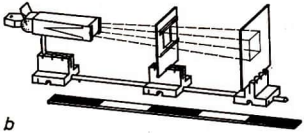
Die Anordnung der Bauteile erfolgt wie im V 5.1.1., Variante b. Als die beiden zu vergleichenden Lichtquellen werden die Blendscheiben mit einem und mit neun Glühlämpchen anfänglich beide etwa 300 mm vom Fotometer entfernt aufgestellt.
Die Glühlämpchen werden mit Strom versorgt, in der Blendscheibe mit den neun Lämpchen sind vorerst acht zurückgeschraubt, so daß nur eines leuchtet. Um gleiche Beleuchtungsstärke zu erhalten, muß man die Reiter mit den Lämpchen kaum noch verrücken (Abb. 5.1.3./1a). Der Versuch wird mit vier und schließlich mit neun eingeschalteten Lämpchen wiederholt. Dabei muß der Reiter etwa auf die doppelte bzw. dreifache Entfernung vom Schirm fortgerückt werden, um gleiche Beleuchtungsstärke zu erreichen. Die Beleuchtungsstärke ist demnach dem Quadrat der Entfernung indirekt proportional.

Variante c

Experimentierleuchte ohne Kondensor, Blendrahmen mit Schiebeschacht und transparenter Schirm werden in mehrere verschiedene Stellungen stets so zueinander gebracht, daß der durch den quadratischen Ausschnitt des Blendrahmens begrenzte Lichtkegel auf dem Schirm ein helles Quadrat erzeugt (Abb. 5.1.3./1b). Man mißt jeweils die Kantenlänge der Öffnung des Blendrahmens und des Licht-



a



b

Abb. 5.1.3./1
Versuchsanordnung
zur Bestätigung
des Lambertschen
Entfernungsgesetzes
im Lehrerexperiment (a)
oder
im Schülerexperiment (b)

quadrates auf dem Schirm und die Entfernungen von Schirm bzw. Blendrahmen zur Lichtquelle. Man erkennt, daß sich die beleuchteten Flächen wie die Quadrate ihrer Entfernungen zur Lichtquelle verhalten.

5.1.4. Experimentelle Ermittlung der Lichtverteilungskurve einer Glühlampe ●

1. Sechskantschiene (1 m)
2. 3 große Klemmreiter
3. kleiner Klemmreiter
4. Rundtisch
5. Vollwinkelmesser
6. Blendscheibe mit Schiebeschacht
7. Irisblende
8. Blendscheibe mit Fotoelement Ⓢ (siehe 1.3.1.)
9. Strommesser (0 ... 100 μA) oder Spiegelgalvanometer
10. auszumessende Glühlampe (z. B. 6 V, 5 A mit angelöteten, starren Zuleitungsdrähten) Ⓢ (siehe 1.3.1.)

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch kann als Anregung für experimentelle Tätigkeit in Arbeitsgemeinschaften dienen.

Versuch

Das Fotoelement mit dicht davorstehender Irisblende wird an einem Ende der optischen Bank aufgebaut. In einer Entfernung, die noch gut auswertbare Stromstärken liefert, wird auf einem kleinen Klemmreiter mit Rundtisch die auszumessende Lichtquelle unter Verwendung von Stativmaterial so angebracht, daß sie genau in Höhe der optischen Achse liegt und ihre Glühwendel mit der Drehachse des Tisches zusammenfällt. Um die Lichtverteilungskurve wenig zu stören, sind an die Glühlampe zwei starre Zuleitungsdrähte angelötet, wovon

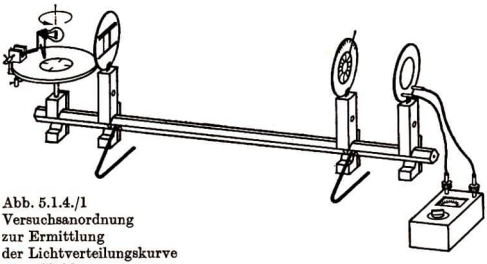


Abb. 5.1.4./1
Versuchsanordnung
zur Ermittlung
der Lichtverteilungskurve
einer Glühlampe

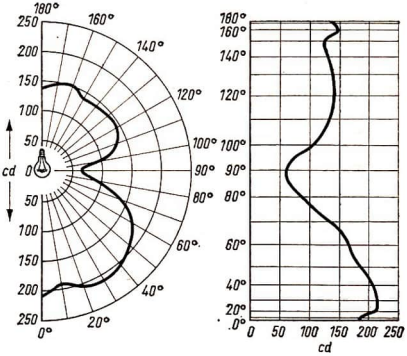


Abb. 5.1.4./2
Lichtverteilungskurve
und Lichtstromdiagramm
einer Glühfadenlampe
(6 V; 5 A – Glühfaden
horizontal)
nach Liebenthal-Rousseau

mindestens einer zur Fixierung der Glühlampe mit Stativmaterial am Rundtisch festgeklemmt wurde. Auf dem Tisch wird zentrisch ein Vollwinkelmesser so befestigt, daß seine Nullinie parallel zur Lampenachse verläuft. Vor dem Tisch steht zur Abblendung des Lichtes eine Blendscheibe mit Schiebeschacht, an deren Klemmreiter mit Stativmaterial eine Meßmarke zum Ablesen des Winkels befestigt wurde (Abb. 5.1.4./1).

Zur Messung schließt man das Fotoelement an den Strommesser an, speist die Glühlampe mit Strom und mißt jeweils um fünf bis zehn Grad weiterdrehend die Lichtverteilungskurve der Glühlampe. Die Lichtverteilungskurve der untersuchten Glühlampe (Glühfadenlampe 6 V, 5 A, Glühfaden horizontal) und das Lichtstromdiagramm sind in Abbildung 5.1.4./2 wiedergegeben. Um die übliche Darstellung der Abhängigkeit der Lichtstärke vom Strahlungswinkel vornehmen zu können, wurde die untersuchte Glühlampe fotometrisch mit einem Kohlefadennormal verglichen. Die Lichtstärken wurden aus den Fotostromstärken berechnet.

6. Ausgewählte Blackbox-Versuche zur geometrischen Optik

6.0. Methodische Bemerkungen

6.0.0. Im letzten Kapitel des Buches sollen in zusammenhängender Form einige Anregungen zur Einbeziehung von Blackbox-Versuchen aus dem Gebiet der Strahlenoptik in den Unterricht gegeben werden, da diese Versuche den Physikunterricht nicht nur beleben, sondern auch einen hohen Bildungswert besitzen.
Versuche mit Blackbox-Charakter können zur Motivierung des Unterrichts dienen und zur allseitigen Auseinandersetzung mit dem Lehrstoff anregen. Blackbox-Versuche fördern das schöpferische Lösen von Aufgaben, sie wenden sich an das konstruktive Denken der Schüler und sprechen wegen ihrer Mehrdeutigkeit besonders das Kombinationsvermögen an.
Zur Bestätigung oder Widerlegung der Analysenergebnisse ist nur das Abheben der Abdeckung erforderlich.

6.0.1. Im Versuch 6.1.1. werden einige Beispiele für die Reflexion des Lichtes vorgestellt. Zwei von ihnen zeigen Input-Output-Übereinstimmung, so daß bereits mit diesem einfachen Versuch die Schüler auf die Mehrdeutigkeit der meisten Blackbox-Versuche hingewiesen werden können. Der Versuch 6.1.2 zeigt einfache Blackbox-Anordnungen zur Brechung des Lichtes an einer planparallelen Platte und einem Prisma, während der Versuch 6.1.3. auf den Durchgang des Lichtes durch Linsen orientiert. Komplizierter sind die Blackbox-Versuche nach 6.1.4. mit einem durch die Kombination von zwei Linsen erzeugten teleskopischen Strahlengang. Beide Varianten von V 6.1.5. sind so angelegt, daß Input-Output-Übereinstimmung zwischen den jeweils zu vergleichenden Blackbox-Anordnungen besteht und erst nach einer weiterführenden Analyse (Inputänderung) entschieden werden kann, welches der möglichen Bauelemente tatsächlich in der Blackbox verborgen ist.
Schließlich kann in dem sehr anspruchsvollen Versuch 6.1.6. gezeigt werden, wie grundlegend unterschiedlich bei nur ganz geringfügiger Inputänderung der Output ausfallen kann. Besonders augenfällig wird das in dem besonderen Fall, daß von den beiden Inputstrahlen der eine lediglich zweimal gebrochen, der andere zusätzlich noch an der Basisfläche totalreflektiert wird.

6.1. Blackbox-Versuche zur geometrischen Optik

6.1.1. Blackbox-Versuche zur Reflexion ◑

1. Hafttafel
2. 2 Haftleuchten
3. 2 ebene Spiegelstreifen
4. Abdeckblech, quadratisch Ⓢ (siehe 1.3.2.)
5. Manipermkerne

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 6.0.0.!
2. Die drei Versuche sind voneinander unabhängig und können jeder für sich an geeigneter Stelle im Unterricht eingesetzt werden. Es ist aber auch möglich, die beiden ersten Versuche simultan nebeneinander zu demonstrieren und nach Abnahme der Abdeckbleche den Schülern vorzuführen, daß Blackbox-Versuche in den meisten Fällen mehrdeutig sind.

Versuch

Der Versuch ist vorbereitend vom Lehrer aufgebaut worden und wird den Schülern abgedeckt als Blackbox-Versuch vorgeführt.
An einer Manipermtafel werden die Haftleuchten und je nach ausgewähltem Versuch ein oder zwei Spiegel magnetisch befestigt. Die Lichtspuren der Haftleuchten werden in sich und zueinander parallelgerichtet und von den Spiegeln in die gewünschte Richtung gelenkt. Danach werden die Abdeckbleche mit Manipermkernen an der Hafttafel so angebracht, daß sie die Spiegel verdecken (Abb. 6.1.1./1a bis c und d bis f).
Werden die ersten beiden Strahlengänge gleichzeitig nebeneinander an einer Hafttafel demonstriert, so erhält man trotz unterschiedlicher Anordnung der Spiegel Übereinstimmung von Input und Output. Erst nach Entfernen der Abdeckbleche wird den Schülern der Unterschied zwischen den beiden Versuchen deutlich.

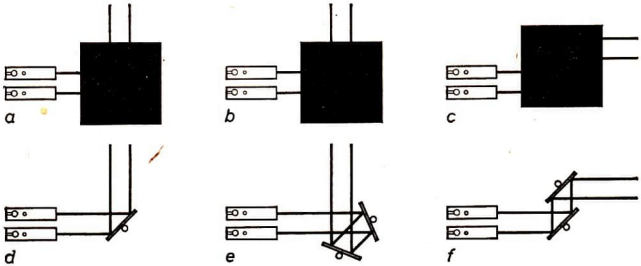


Abb. 6.1.1./1 Anordnung zur Vorführung von Blackbox-Versuchen zur Reflexion an einem Spiegel (a) oder an zwei Spiegeln (b, c) mit den dazugehörigen Strahlengängen (d bis f)

6.1.2. Blackbox-Versuche zur Brechung

1. Manipermtafel
2. 2 Haftleuchten
3. Glaskörper, planparallel
4. Prismenkörper
5. Abdeckblech, quadratisch Ⓢ (siehe 1.3.2.)
6. Manipermkerne
7. 2 Farbfilter

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 6.0.0.!
2. Der Versuch dient dem Wiedererkennen und der Festigung der charakteristischen Strahlenverläufe bei der Lichtbrechung an einer planparallelen Platte oder an einem Prisma.

Versuch

Der Aufbau des Versuches erfolgt je nach Auswahl entweder wie im V 2.5.2. oder wie im V 2.5.3. Zusätzlich erfolgt lediglich die Abdeckung der planparallelen Platte oder des Prismas durch ein magnetisch aufgesetztes Abdeckblech (Abb. 6.1.2./1a bis d).

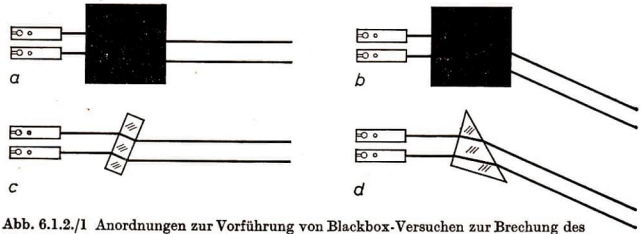


Abb. 6.1.2./1 Anordnungen zur Vorführung von Blackbox-Versuchen zur Brechung des Lichtes an einer planparallelen Platte (a) bzw. an einem Prisma (b) mit den dazugehörigen Strahlengängen (c und d)

Erforderlichenfalls färbt man die Inputstrahlen, um besonders beim Prisma die Auffächerung der Outputstrahlen in die Spektralfarben zu unterdrücken.

6.1.3. Blackbox-Versuche zum Durchgang des Lichtes durch Linsen ◑

1. Manipermtafel
2. 2 oder 3 Haftleuchten
3. Linsenkörper, bikonvex ($f = +150$ mm)
4. Linsenkörper, bikonkav ($f = -150$ mm)
5. Abdeckblech, quadratisch Ⓢ (siehe 1.3.2.)
6. Manipermkerne
7. 2 Farbfilter

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 6.0.0.!
2. Die Versuche dienen dem Wiedererkennen und der Festigung der charakteritischen Strahlenverläufe beim Durchgang des Lichtes durch Sammel- oder

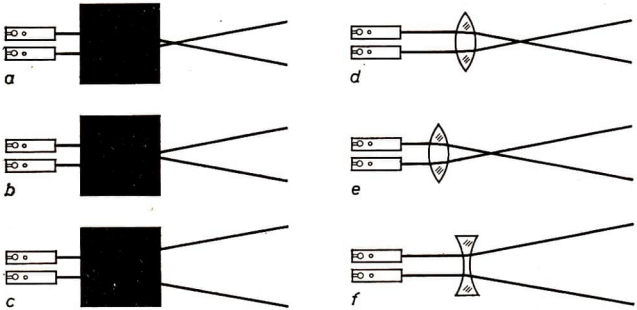


Abb. 6.1.3./1 Anordnungen zur Vorführung von Blackbox-Versuchen zum Durchgang des Lichtes durch Linsen (a bis c) mit den dazugehörigen Strahlengängen (d bis f)

Zerstreuungslinsen. Die Versuche sind voneinander unabhängig, jedoch können die beiden Anordnungen mit divergenten Outputstrahlen auch parallel nebeneinander vorgeführt werden.

Versuch

Einer oder gleichzeitig mehrere der in Abbildung 6.1.3./1 wiedergegebenen Versuche werden auf der Manipermtafel aufgebaut und mit den magnetisch befestigten Eisenblechabdeckungen versehen. Detailliertere Aufbauhinweise kann man V 3.1.1. entnehmen.
Demonstriert man gleichzeitig die beiden Versuche mit divergenten Outputstrahlen (Abb. 6.1.3./1 b, e und c, f), kann zur Deutlichmachung der Unterschiede zwischen beiden Blackbox-Anordnungen je ein Inputstrahl gefärbt werden.

6.1.4. Blackbox-Versuche mit teleskopischem Strahlengang ◑

1. Manipermtafel
2. 2 oder 3 Haftleuchten
3. Linsenkörper, bikonvex ($f = +150$ mm)
4. Linsenkörper, bikonvex ($f = +90$ mm)
5. Linsenkörper, plankonvex ($f = +250$ mm)
6. Linsenkörper, bikonkav ($f = -150$ mm)
7. Abdeckblech, rechteckig Ⓢ (siehe 1.3.2.)
8. Manipermkerne
9. Farbfilter

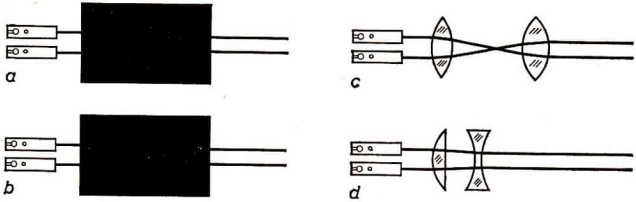


Abb. 6.1.4./1 Anordnungen zur Vorführung von Blackbox-Versuchen mit teleskopischem Strahlengang (a und b) mit den dazugehörigen Strahlengängen (c und d)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 6.0.0.!
2. Die vorgeschlagenen Blackbox-Versuche mit teleskopischem Strahlengang, ein Fernrohrmodell nach Kepler bzw. Galilei, sind voneinander unabhängig, aber auch gleichzeitig zu demonstrieren. Durch die weitgehende Übereinstimmung der Anordnungen bezüglich des In- und Output bieten sie die Möglichkeit eines interessanten Vergleichs und einer schrittweisen Analyse durch Veränderung des Input.

Versuch

Der Aufbau der teleskopischen Strahlenverläufe geschieht genau wie in den Versuchen 3.4.8. bzw. 3.4.13. Dabei können 2 oder 3 Haftleuchten Verwendung finden. Zusätzlich erfolgt noch die Abdeckung der Linsenkombination durch ein rechtwinkliges Eisenblech, das mit Manipermkernen an der Manipermtafel befestigt wird (Abb. 6.1.4./1).
Werden beide Strahlengänge gleichzeitig an einer Manipermtafel vorgeführt, kann zur Analyse der Input verändert werden. Entweder man färbt einen der Inputstrahlen oder man gibt den zwei bzw. drei Inputstrahlen bei Wahrung ihrer Parallelität eine geringe Neigung gegen die optische Achse und beobachtet in jedem Fall die unterschiedliche Outputänderung bei den beiden Anordnungen.
Natürlich kann man auch beide Änderungen hintereinander an jeder Anordnung durchführen und beide Änderungen miteinander kombinieren.

6.1.5. Blackbox-Versuche mit Input-Output-Übereinstimmung ◑

Zu Variante a

1. Manipermtafel
2. 4 Haftleuchten
3. ebener Spiegelstreifen
4. Prismenkörper, rechtwinklig, gleichschenklig
5. 2 Abdeckbleche, quadratisch Ⓢ (siehe 1.3.2.)
6. Manipermkerne

Zu Variante b

Geräte 1., 2. (2mal), 3., 5., 6., außerdem

7. Prismenkörper, gleichseitig ⑧ (siehe 1.3.2.)
8. Abdeckblech, quadratisch ⑧ (siehe 1.3.2.)
9. Farbfilter

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 6.0.0.!
2. Blackbox-Versuche mit Input-Output-Übereinstimmung regen die Schüler sehr zum analytischen Denken an und bieten auch viele Möglichkeiten der Schulung des konstruktiven Denkens.
3. Die Versuchsanordnungen einer Variante sollten unbedingt parallel an der Manipermtafel vorgeführt werden. Dabei ist es nicht unbedingt erforderlich, alle drei Anordnungen der Variante b vorzuführen, es genügt bereits die Auswahl zweier Anordnungen zur parallelen Demonstration.

Variante a

Wie die Abbildungen 6.1.5./1c und d zeigen, werden der Spiegelstreifen und der totalreflektierende Prismenkörper an der Manipermtafel befestigt und je zwei parallele Lichtspuren so auf den Spiegel bzw. den Prismenkörper gelenkt, daß die Strahlenverläufe genau übereinstimmen. Danach werden die Anordnungen durch quadratische Bleche unter Verwendung von Manipermkernen verdeckt (Abb. 6.1.5./1a und b).

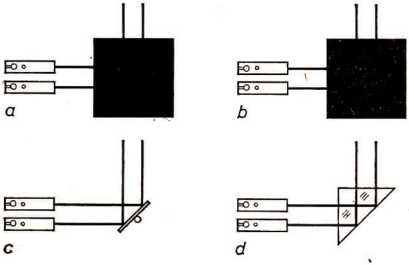


Abb. 6.1.5./1
Anordnungen zur Vorführung von Blackbox-Versuchen mit Input-Output-Übereinstimmung für die Reflexion am Spiegel bzw. am Prisma (a und b) mit den dazugehörigen Strahlengängen (c und d)

Färben oder Ausblenden eines Inputstrahles hat in jeder Anordnung die gleiche Outputänderung zur Folge, so daß die Annahme der völligen Übereinstimmung naheliegt.
Durch Entfernen der Abdeckbleche zeigt man, daß trotzdem ein Unterschied besteht.

Variante b

Man befestigt nebeneinander oder untereinander (Abb. 6.1.5./2d bis f) entweder zwei oder auch alle drei Versuchsanordnungen an einer Manipermtafel und richtet die Strahlengänge am ebenen Spiegel und eventuell auch am Parallelspiegel so

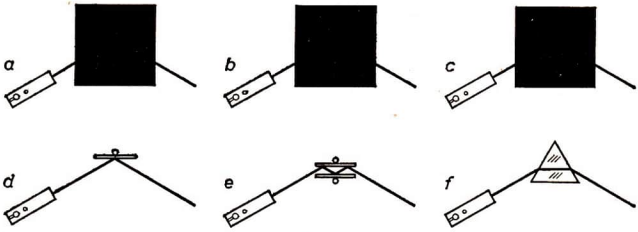


Abb. 6.1.5./2 Anordnungen von Blackbox-Versuchen mit Input-Output-Übereinstimmung für die Reflexion an einem Spiegel (a), an zwei Spiegeln (b) und für die Brechung an einem Prisma (c) mit den dazugehörigen Strahlengängen (d bis f)

aus, daß sie genau mit der sorgsam eingestellten Minimalablenkung am Prisma übereinstimmen. Danach haftet man über die Anordnungen die Abdeckbleche (Abb. 6.1.5./2a bis c).
Zur Analyse der übereinstimmenden Anordnungen gibt es mehrere Möglichkeiten. Entweder man ändert die Richtung der Inputstrahlen und beobachtet die damit verbundene Änderung der Outputstrahlen, oder man fügt je eine zweite Haftleuchte hinzu und färbt deren Lichtspur. An der Outputänderung kann auf den Inhalt der Blackbox geschlossen werden. Von der Richtigkeit oder Fehlerhaftigkeit der gezogenen Schlüsse kann man sich durch Entfernen der Abdeckbleche überzeugen.

Bemerkung

Weitere Möglichkeiten der Zusammenstellung und Auswahl von Blackbox-Versuchen mit Input-Output-Übereinstimmung kann man aus V 6.1.1. und V 6.1.4. entnehmen.

6.1.6. Blackbox-Versuch zur Brechung und Totalreflexion des Lichtes am gleichseitigen Prisma ◑

1. Manipermtafel
2. 2 Haftleuchten
3. Prismenkörper, gleichseitig Ⓢ (siehe 1.3.2.)
4. Abdeckblech, quadratisch Ⓢ (siehe 1.3.2.)
5. Manipermkerne

Methodischer Hinweis
Vergleiche MB 6.0.0.!

Versuch
Zwei dicht zusammenliegende, parallele, waagerechte Lichtspuren auf der Manipermtafel erzeugt man durch versetzt angeordnete Haftleuchten. Den Prismen-

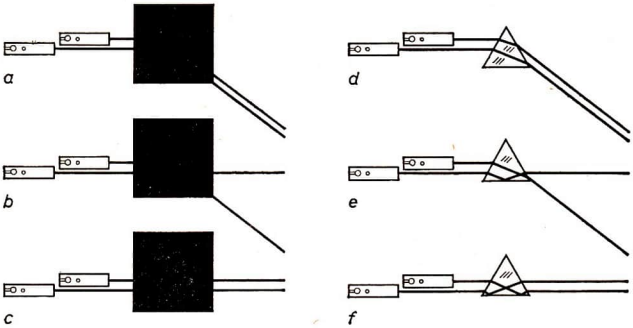


Abb. 6.1.6./1 Anordnungen zur Vorführung von Blackbox-Versuchen zur Brechung und Totalreflexion am gleichseitigen Prisma (a bis c) mit den dazugehörigen Strahlengängen (d bis f)

körper ordnet man so an, daß die Prismenbasis parallel zu den Inputstrahlen verläuft und beide gebrochenen Outputstrahlen das Prisma ebenfalls parallel verlassen (Abb. 6.1.6./1a und d). Danach deckt man die Anordnung unter Verwendung von Manipermkernen mit dem quadratischen Blech ab.
Durch vorsichtiges Parallelverschieben der beiden Haftleuchten ändert man den Input so lange, bis einer der beiden Strahlen nach Durchgang durch die Blackbox in Richtung der Inputstrahlen verläuft, während der andere noch unverändert bleibt (Abb. 6.1.6./1b und e).
Schließlich gelingt es durch abermaliges Parallelverschieben der Haftleuchten, daß beide Strahlen an der Basis totalreflektiert die Blackbox in der Richtung der Inputstrahlen verlassen (Abb. 6.1.6./1c und f).

Register

Abbildung
– astigmatische 132f.
– reelle 44ff.
– mit Sammellinsen 112f.
– mit sphärischen Spiegeln 78f.
Abbildungsfehler 124f.
Abbildungsgleichung
– Hohlspiegel 81f.
– Linsen 116f.
Abbildungsmaßstab
– Hohlspiegel 81f.
– Linsen 116f.
Abbildungsverfahren, optische 42f.
Aberration, chromatische 125f.
– Entstehung 128
Aberration, sphärische 125, 129
– Entstehung 130f.
Ablenkung, Minimum der 95f.
Absorption von Na-Licht 213f.
Absorptionsspektren 212f.
Alterssichtigkeit
– Korrektur 154
– Strahlenverlauf 157
Astigmatismus 125, 131f.
Auge, menschliches
– Wirkungsweise 149ff.
– Strahlenverlauf 151f.
Augenlinse, Akkommodation der 152
Augenmodell 35, 149f.
Ausbreitung, geradlinige 55ff., 63ff.
Autoscheinwerfer 36
– Wirkungsweise 83f.

Bank, optische 16, 21ff.
Beleuchtung farbiger Körper 226f.
Bilder, reelle
– Hohlspiegel 79f.
– Sammellinsen 113ff.
Bilder, virtuelle
– Hohlspiegel 82f.
– Linsen 117f., 119f.
Bilder an Winkelspiegeln 74f.
Bildentstehung am ebenen Spiegel 72
Bildfeldwölbung 135f.
Blackbox-Versuche
– optische 238ff.
– zur Brechung 240
– zur Brechung und Totalreflexion 245
– zur Input-Output-Übereinstimmung 242ff.
– mit Linsen 240f.
– zur Reflexion 239
– mit teleskopischem Strahlengang 241f.

Diakaustik 106, 130
Diapositivbetrachter 165f.
Diaskop
– Wirkungsweise 138ff.
– Strahlenverlauf 142f.
Dispersion 202f.

Eigenschaften 58
Emissionsspektren 210ff.
Entfernungsgesetz, Lambertsches 234ff.
Episkop 143f.
Experimentierleuchte 15

Farbfehler 124
Farbfolien 32
Farbkreisel 37
Farbmischung
– additive 220f., 222ff.
– subtraktive 225
Faseroptik 92
Fehlsichtigkeit
– Korrektur 154ff.
– Strahlenverlauf 156ff.
Fernrohr
– Galileisches 178f.
– Keplersches 167, 170
– subjektive Beobachtung 175f.
– terrestrisches 172ff.
– Vergrößerung 176
Fettfleckfotometer 34
Fluoreszenz im UV-Licht 226f.

Fotografieren mit einer Lochkamera 65
Fotometer 33
Fraunhofersche Anordnung 45f.
Fraunhofersche Linien 240f.

Galileisches Fernrohr
– Wirkungsweise 178f.
– Strahlengang 179f.
Geißlersche Röhren 20
Gelenkverbindung für SEG 37
Geradsichtprisma 203f.
Glaskörper 37
Glasplatten 34
Glühfadenlampe 18
Glühpunktlampe 18

Haftoptik 16, 25
Halbschatten 58, 60
Halogendampflampe 18
Handspektroskop 28
Hebung, scheinbare 85
Heftoptik 16, 26
Heliostat 15
Hilfsmittel für optische Versuche 15ff.

Kaleidoskop 40, 74f.
Kamera, fotografische
– Wirkungsweise 145f.
– Strahlenverlauf 146f.
Kameraobjektiv 148
Katakaustik 76
Kernschatten 58, 60
Keplersches Fernrohr
– Wirkungsweise 167ff.
– Strahlengang 170ff.
Kippeinrichtung für den Tageslichtschreibprojektor 49f.
Kohlebogenlampe 19
Koma 125
– Entstehung der 134f.
Komafiguren 133f.
Kreuzblenden 30
Kurzsichtigkeit
– Korrektur 155
– Strahlenverlauf 158

Lambertsches Entfernungsgesetz 234ff.
Lichtbündel 57f.
Licht, divergentes 42
Lichtdurchlässigkeit 54f.
Lichtleiter 35
– Wirkungsweise 92f.
Licht, paralleles 15f., 43
Lichtquellen 15, 18, 29
Lichtschutz 31
Lichtstärkevergleich
– subjektiver 230ff.
– objektiver 233f.
Lichtstrahl 57f.
Lichtverteilungskurve 236f.
Lichtweg, Umkehrbarkeit 77
Linse, akkomodationsfähige 35, 153
Linsen, Sammelwirkung von 108f.
Linsengleichung 116f.
– Newtonsche Form 117
Linsenwirkung, Einfluß der Umgebung auf die 110f.
Lochblenden 30
Lochkamera 40, 63ff.
– negative 63ff.
Lupe
– Gebrauch der 161
– Strahlenverlauf 166f.
– Vergrößerung 163ff.
– Wirkungsweise 162f.

Mehrfachspaltblende 39
Mikroprojektion 50
Mikroskop
– Wirkungsweise 183ff.
– Strahlenverlauf 185f.
– Vergrößerung 187f.
Mittelpunktstrahlen
– Brechung 111f.
– Reflexion 77f.
Mondfinsternis 60ff.
– Strahlenverlauf 62f.

Natriumlinien, Umkehrung der 215ff.
Nitraphotlampen 18

Objekte
– durchsichtige 32
– transparente 31
– undurchsichtige 31
Optikleuchte 15
optische Bank 16, 21ff.
optische Scheibe 25

Parallelstrahlen
– Brechung 111f.
– Reflexion 77f.
Prisma, achromatisches 203f.
Prismenfernrohr, Wirkungsweise 174f.

Querschnitte 38

Reflexion
– diffuse 66f.
– reguläre 66f.
– an Winkelspiegeln 73f.

Reflexionsgesetz 67f.
Regenbogen
— Entstehung 199f.
— Strahlenverlauf 201
Restfarben, Vereinigung von 221f.
Ringblenden 30

Sammellinse, Strahlenverlauf 105
Schatten, farbige 227f.
Schattenwurf 42, 58f.
— Strahlenverlauf 60
Scheibe, optische 25
Scheitelstrahlen, Reflexion 77f.
Schirm, undurchsichtig 36
Schlagschatten 59f.
SEG ebene geometrische Optik 26
SEG Optik 23
Sehwinkel 158ff.
Selbstanfertigung von Zusatz- und Ergänzungsteilen 17
Sonnenfinsternis
— Entstehung 60ff.
— Strahlenverlauf 62f.
Sonnenspektrum 214f.
Spaltblenden 30
Spektralapparat 28
— Strahlenverlauf 198f.
— Wirkungsweise 180ff.
Spektralfarben
— Unzerlegbarkeit der 201f.
— Vereinigung der 217ff.
Spektrallampen 20
Spektralröhren 20
Spektroskop 28
Spiegel 34
Spiegelbilder am ebenen Spiegel 70f.
Spiegelreflexkamera, Strahlenverlauf 147
Spiegelteleskop
— Strahlenverlauf 182f.
— Wirkungsweise 181f.
Stecknadeloptik 27
Strahl
— einfallender 69f.
— reflektierter 69f.
Strahlenverlauf
— Hohlspiegel 75f.
— Linsen 105f.
— symmetrischer 95
— Wölbspiegel 75f.

Tageslichtschreibprojektor 48f.
— Wirkungsweise 141f.
Totalreflexion 81, 99ff.
— am gleichschenklig-rechtwinkligen Prisma 98f.
— Strahlenverlauf 99f.

Übersichtigkeit
— Korrektur 155
— Strahlenverlauf 158
UR-Licht
— Nachweis 207f.
— Reflexion 208ff.
— Durchlässigkeit von Stoffen 208ff.
Umkehrung der Natriumlinien 215ff.
Ultraviolettlampen 21
UV-Licht, Nachweis 204ff.

Vereinigung der Spektralfarben 217ff.
Vergrößerungsapparat, Wirkungsweise 141f.
Verspiegeln von Glas 41
Verzeichnung
— kissenförmige 136ff.
— tonnenförmige 136ff.

Winkelspiegel
— Bilder 74f.
— Strahlenverlauf 73f.
WSP 220 47

Zerlegung, spektrale 193ff.
— Strahlenverlauf 198f.
Zerstreuungslinse, Strahlenverlauf 105f.
Zusatzteile
— für Haft- und Heftoptik 37ff.
— für die optische Bank 35ff.
— für den Tageslichtschreibprojektor 39f.

Quellenverzeichnis der Abbildungen
Dr. H. Roth, Karl-Marx-Stadt: 1.1.2./1; 1.2.1./1 bis 6; 1.2.2./1 bis 6; 1.2.3./1a und b; 1.4.5/1 bis 6.