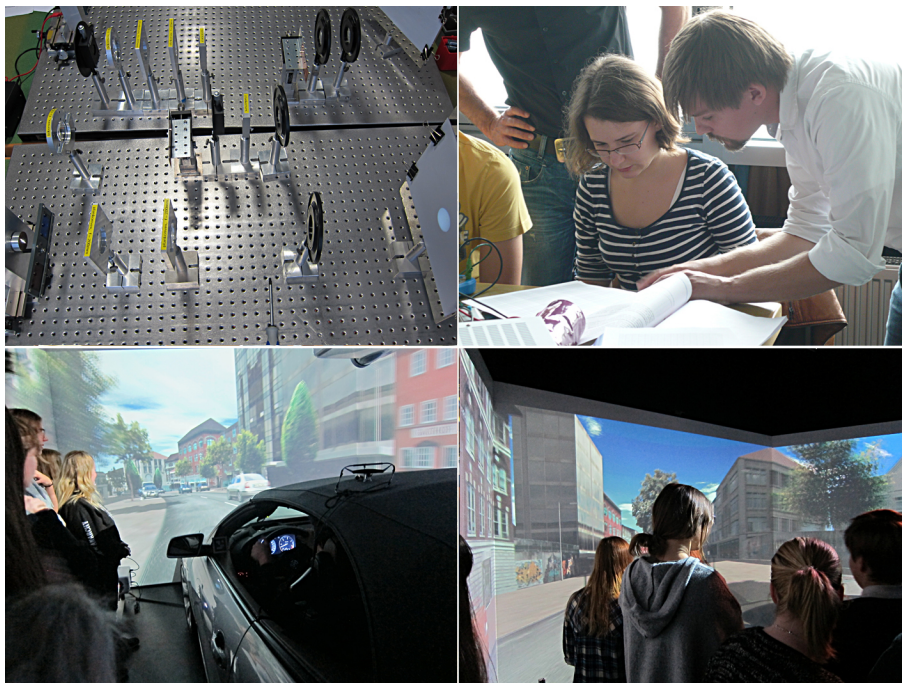


ABB - Optische Abbildung

Versuchsanleitung



Fachbereich:	Physik
Teilgebiet:	Optik
Thema:	Geometrische Optik, Linsensysteme, Abbildungsfehler

Zeitbedarf Minimum:	1,5 h
Zeitbedarf Maximum:	3,0 h
Hilfreiche Vorkenntnisse:	Strahlenmodell des Lichts, Winkelfunktionen

Ort:	Physikalisches Praktikum Maschinenwesen
------	---

Die Teilnehmer sollten Schreib- und Zeichenutensilien dabei haben. Dazu diese Anleitung und einen Ausdruck der Logbook-Vorlage.

Wir danken der Fakultät für Physik für die Möglichkeit der Nutzung dieses Praktikumsversuchs.

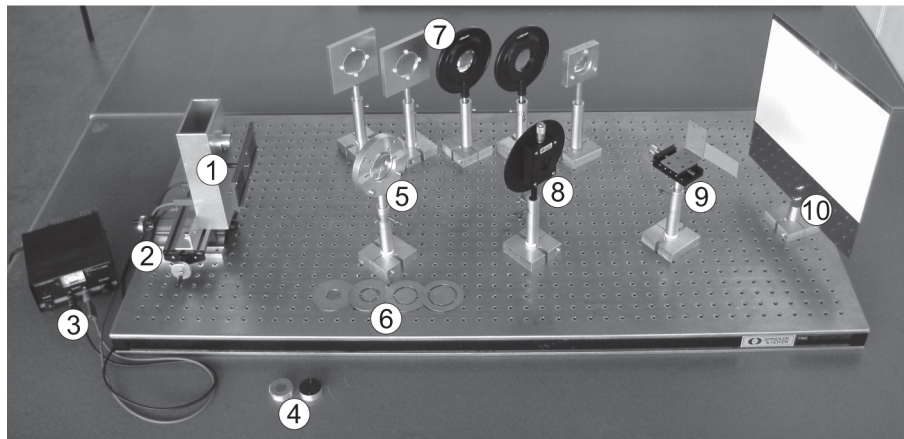
Andreas Kratzer, 27.6.2016

Inhaltsverzeichnis

Wichtige Elemente	3
1 Einleitung	7
1.1 Allgemeines	7
1.2 Ein wenig Historisches	7
1.3 Technische Anwendungen	8
1.4 Warum ist dieser Praktikumsversuch interessant?	8
2 Fachliche Grundlagen	11
2.1 Geometrische Optik, Strahlenoptik	11
2.2 Paraxiale Optik	12
2.3 Optische Linsen	12
2.4 Optische Abbildung	14
2.5 Abbildungsgleichung und Abbildungsmaßstab	14
2.6 Abbildungsfehler	15
2.6.1 Sphärische Aberration	15
2.6.2 Chromatische Aberration	16
2.7 Beugungsbegrenzung der Abbildung	16
2.8 Schlierenoptik	17
3 Aufgaben	19
3.1 Optische Abbildung mit einer Linse	19
3.1.1 Aufbau des Experiments	19
3.1.2 Abbildungsgleichung	20
3.1.3 Zusatzfrage	20
3.1.4 Abbildungsmaßstab und Spiegelung des Bildes	20
3.2 Linsenfehler	21
3.2.1 Sphärische Aberration	22
3.2.2 Chromatische Aberration	22
3.3 Beugungsbegrenzung der Abbildung (Zusatzaufgabe)	23
3.4 Zweistufige Abbildung, Linsensystem	23
3.4.1 Aufbau	23
3.4.2 Untersuchung des Aufbau	24
3.4.3 Konstruktion	24
3.5 Schlierenoptik	25

Zusammenfassung

Dieser Versuch ist Teil eines physikalischen Praktikums für Studierende der TU München. Zentrales Thema sind Linsen und Linsensysteme. Dabei wird eine sehr einfache Vorstellung von der Natur des Lichts die zentrale Rolle spielen. Es ist das Strahlenmodell, das vielen wahrscheinlich bereits in der 7. Jahrgangsstufe begegnet ist. Wir werden aber auch die Grenzen dieser einfachen Behandlung kennenlernen. Das folgende Bild gibt einen Überblick über den Aufbau.



1	LED-Lampe mit Farbfilter	5	Linse mit Blendenhalter	9	Schlierenkante
2	Kreuztisch	6	Blenden	10	Beobachtungsschirm
3	Lampen-Netzgerät	7	Diverse Linsen		
4	Abbildungsgegenstände	8	Einstellbare Schlitzblende		

Wir beginnen mit einem einfachen optischen System bestehend aus Lichtquelle, Gegenstand, Linse und Schirm. Daran soll die Abbildung und die Berechnung wichtiger Größen behandelt werden. Wir fragen z.B. wo das Bild scharf ist, wie groß es ist und wie es orientiert ist. Im weiteren Verlauf untersuchen wir die „Qualität“ des Bildes und kommen auf zwei wichtige Linsenfehler.

Als Zusatzaufgabe (wenn genügend Zeit ist) kann die sogenannte Beugungsbegrenzung untersucht werden. Sie kann mit dem Strahlenmodell nicht erklärt werden.

Im allgemeinen werden z.B. in Fotoobjektiven *Linsensysteme*, also Kombinationen mehrere Linsen, verwendet. Wir werden ein einfaches Linsensystem bestehend aus zwei Linsen aufbauen und untersuchen.

Besonders beeindruckend ist der Teilversuch *Schlierenoptik*. Das ist eine wichtige Methode zur Untersuchung von Strömungen und es kann hier z.B. der Luftstrom aus einer Pressluftpistole sichtbar gemacht werden.

Hinweis: Tipps und Verweise auf das *Glossar* finden Sie am Rand mit der Kennzeichnung **Tipp!** bzw. . Die Glossar-Stichworte sind in der Regel schräg gedruckt.

Wichtige Elemente

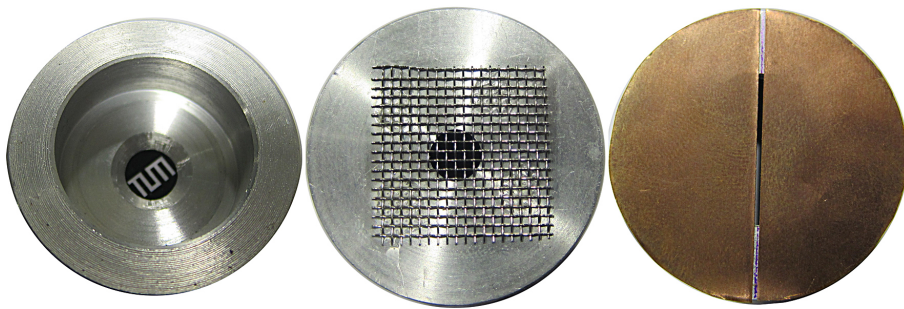


Abbildung 0.1: Diese Elemente werden direkt auf die Lichtquelle aufgesteckt: TUM-Logo, Edelstahlgitter, Spalt.

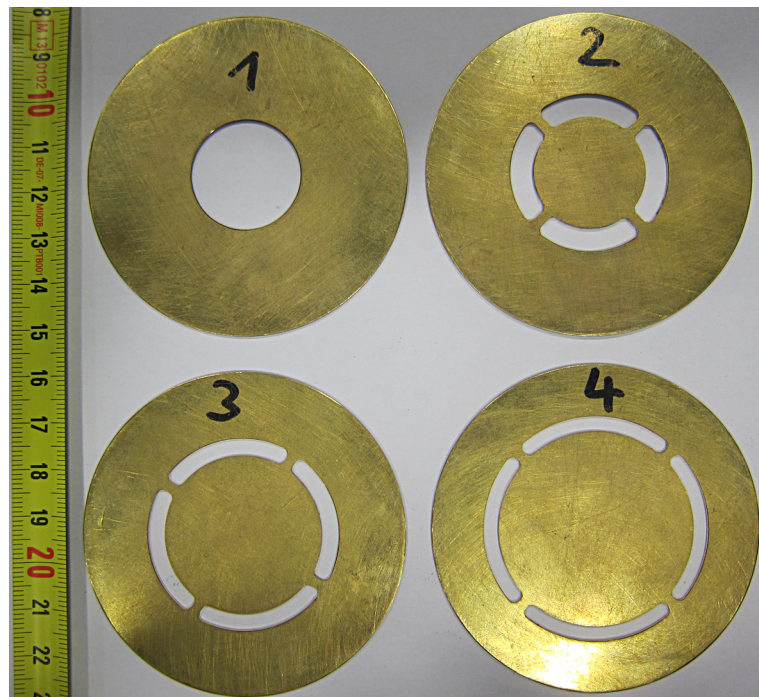


Abbildung 0.2: Vier Blenden dienen zur genaueren Untersuchung der sphärischen Aberration.

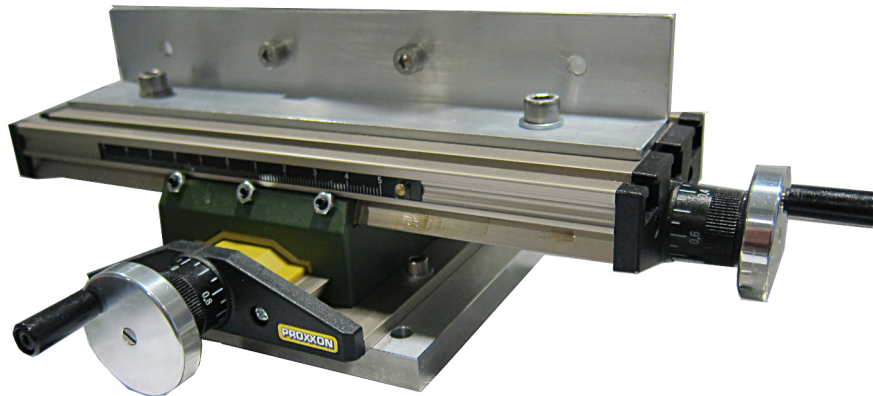


Abbildung 0.3: Mit dem Kreutisch kann die Lichtquelle in Richtung der optischen Achse und senkrecht dazu verschoben werden. Der Nullpunkt lässt sich einstellen (am gerändelten Bereich neben der Skala drehen, während die Kurbel festgehalten wird). Eine Umdrehung entspricht einem Verstellweg von 1 mm. Die angegebenen Zahlen haben ebenfalls die Einheit mm.

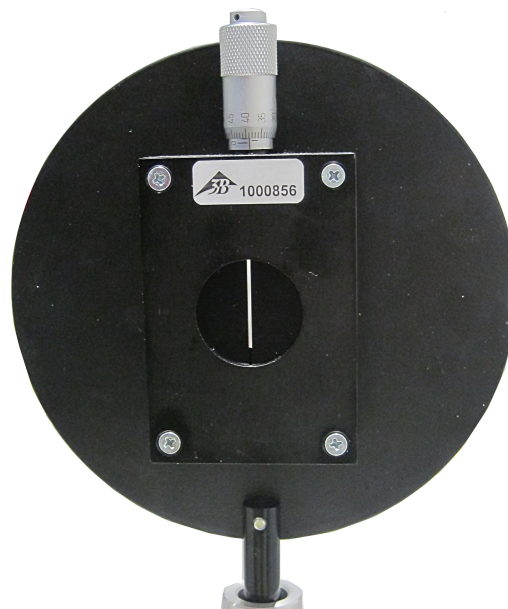


Abbildung 0.4: Die verstellbare Schlitzblende wird beim Versuch zur Beugungsbegrenzung der Abbildung benutzt. Die Spaltöffnung lässt sich an der Skala der Messschraube abgelesen werden. Dazu muss aber zuerst der Wert für den geschlossenen Zustand bestimmt werden, der dann zur Korrektur des Wertes verwendet werden muss.

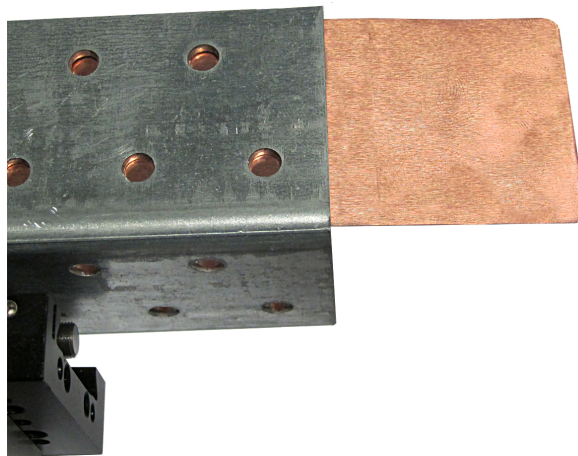


Abbildung 0.5: Die Schlierenkante für den Schlierenoptik-Aufbau. Die Kante ist rechts im Bild.

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

In der Optik ist die Beschreibung von Abbildungen von großer Bedeutung. *Abbildung* bedeutet, dass alle Lichtstrahlen, die von einem Punkt eines Gegenstandes ausgehen, sich in genau einem Bildpunkt sammeln. Ein Beispiel aus der Natur ist das Auge (Bild 1.1) des Menschen. Mit Hilfe einer Linse wird ein Abbild der Umgebung auf der lichtempfindlichen Netzhaut erzeugt.

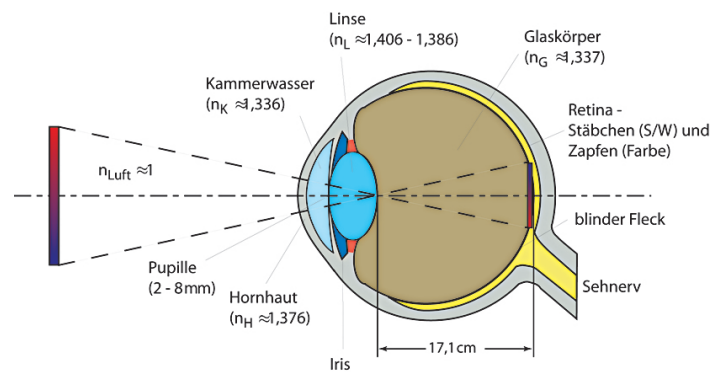


Abbildung 1.1: Das menschliche Auge ist ein optisches System dessen Abbildungseigenschaften durch verschiedene optische Komponenten definiert sind. Das scharfe Bild entsteht bei Normalsichtigen auf der Netzhaut.

Das Auge kann unterschiedlich weit entfernte Gegenstände scharf abbilden. Allerdings kommen auch Fehlsichtigkeiten vor, die dann oft mit Hilfe von Brillen korrigiert werden.

1.2 Ein wenig Historisches

Die vergrößernde Wirkung, wie sie etwa geschliffener Bergkristall hat, ist lange bekannt. Sicherlich schon lange bevor die ersten Brillen um 1300 entstanden. 300 Jahre später, also um 1600, erfand HANS LIPPERHEY das Fernrohr. Bereits 1609 nutzte es GALILEO GALILEI für Himmelsbeobachtungen und entdeckte damit z.B. die Monde des Jupiters. Plötzlich wurden also wissenschaftliche Entdeckung mit Hilfe spezieller Instrumente gemacht und nicht durch das direkte Erfassen mit menschlichen Sinnesorganen. Damit begann eine neue Zeit der Wissenschaft.

Linsensysteme wie sie z.B. für Kamera-Objektive heute verwendet werden, gehen zum Teil auf Konstruktionen des 19. Jahrhunderts zurück. Bild 1.2 zeigt ein Objektiv, dass 1840 von PETZVAL und VOIGTLÄNDER entwickelt wurde. Es ist bereits ein *Achromat* (siehe *chromatische Aberration*). Die Petzval-Linse wurde vor allem in der Porträt-Fotografie bekannt. Auch andere Linsensysteme wurden zur Verminderung von Abbildungsfehlern entwickelt.

Natürlich war auch die Natur des Lichts und das Zustandekommen verschiedener Farben eine wichtiges Thema. Der „Fingerabdruck“ der Elemente in Form ihrer Spektrallinien war relativ früh bekannt. Die Ursache war aber unbekannt. Darüber ließe sich sehr viel schreiben. Die Suche nach

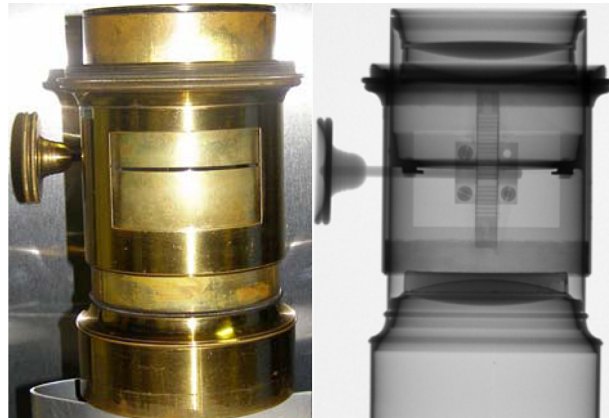


Abbildung 1.2: Ein historisches Objektiv, das im Deutschen Museum ausgestellt ist. Rechts eine Neutronen-Radiografie, die das Linsensystem sichtbar macht. Sie wurde an der Garchingener Forschungsneutronenquelle FRM II erstellt. Für Neutronen ist der Metalltubus praktisch durchsichtig, so dass sie sich für diese Untersuchungen besonders gut eignen.

der Erklärung verschiedener Spektren führte letztendlich zu den modernen Quantentheorien.

1.3 Technische Anwendungen

Allgemein bekannt sind sicher Brillen, Fotoapparat, Mikroskop, Teleskop oder Videoprojektor. Hier sind große Fortschritte bei Berechnung und Fertigung von Präzisionsoptiken gemacht worden.

Ein modernes Beispiel aus der Automobilindustrie ist das Head-Up-Display (Bild 1.3). Die Grundlagen dieser Technik bildet das Fachwissen, das auch in diesem Versuch gebraucht wird.



Abbildung 1.3: Head-Up Display eines BMWs. Foto: Sebastian Klein/Wikipedia

1.4 Warum ist dieser Praktikumsversuch interessant?

Sie werden im folgenden das experimentelle Vorgehen selbst entwickeln. Damit entwickeln sie Methodenkompetenzen, die in vielen alltäglichen Situationen zur Problemlösung eingesetzt

werden können.

Der fachliche Hintergrund ist ein wichtiger Beitrag zum Verständnis der Physik. Wir nutzen das einfachste Modell des Lichts und sehen, dass es in bestimmten Situationen immer noch die beste Wahl ist. Physik arbeitet immer mit Modellen, die in einem begrenzten Gültigkeitsbereich richtig sind. Diese Vorgehensweise muss man kennen, wenn man naturwissenschaftliche Aussagen richtig beurteilen will.

Oft gibt es auch Situationen in denen physikalisches Grundwissen in anderen Fachbereichen nützlich ist. Ein Beispiel sind neue Hochhausarchitekturen, die seit einigen Jahren konkave Flächen erlauben. Diese wirken natürlich wie ein Hohlspiegel und können deshalb Licht auf einen Brennfleck fokussieren. Ein bekanntes Beispiel ist das Hochhaus „Walkie Talkie“ in London. Das gebündelte Licht soll Außenspiegel und Armaturen Brett eines Autos verformt haben. Hätte der Architekt diesen Praktikumsversuch gemacht, wäre das wahrscheinlich nicht passiert.



Abbildung 1.4: Das Hochhaus Walkie Talkie in London. Foto: Diego Delso/Wikimedia Commons, License CC-BY-SA 3.0

2 Fachliche Grundlagen

2.1 Geometrische Optik, Strahlenoptik

Bei der Beschreibung und Berechnung optischer Systeme aus Linsen, Prismen und Spiegeln kommt sehr erfolgreich das *Strahlenmodell des Lichts* zur Anwendung. Deshalb sprechen wir von der *Strahlenoptik* oder *Geometrischen Optik*, da aus relativ einfachen geometrischen Überlegungen wichtige Aussagen folgen.

Die *Lichtstrahlen* haben *keine Ausdehnung senkrecht zur Strahlrichtung*. Sie entsprechen also nicht realen Strahlen oder Lichtbündeln, sondern sind eine *Modellvorstellung* wie der Massepunkt in der Newtonschen Mechanik.

Die Lichtstrahlen haben folgende Eigenschaften:

1. Ein Lichtstrahl breitet sich geradlinig im homogenen Medium aus.
2. Verschiedene Lichtstrahlen sind unabhängig voneinander. Sie beeinflussen sich gegenseitig nicht.
3. Der Strahlengang ist *umkehrbar*, d.h. ein Lichtstrahl würde in umgekehrter Richtung den selben Weg nehmen. Gegenstand und Bild können ihre Rollen tauschen.
4. Es gelten das Brechungs- und das Reflexionsgesetz.

In vielen Fällen reicht tatsächlich die Anwendung von *Reflexions-* und *Brechungsgesetz*, um z.B. optische Systeme zu berechnen.

Anmerkung: Bei komplexeren Problemen, die innerhalb der Strahlenoptik behandelt werden, muss auf das allgemeinere *Fermatsche Prinzip* zurückgegriffen werden, das wir hier aber nicht behandeln werden.

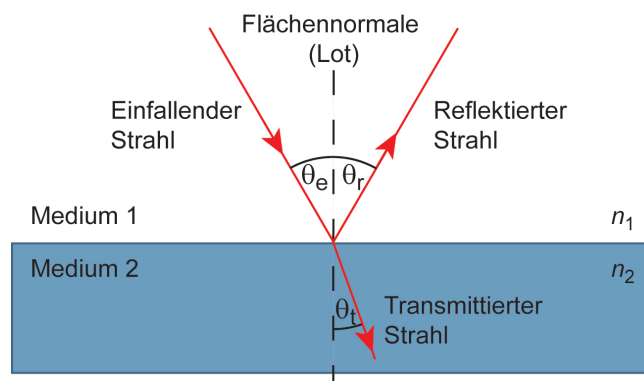


Abbildung 2.1: An der Grenzfläche zum optisch dichteren Medium (2) wird der Lichtstrahl zum Lot (Flächennormale) hin gebrochen. Ein Teil des Lichts wird gleichzeitig reflektiert.

Brechungs- und Reflexionsgesetz sind in Bild 2.1 veranschaulicht. Die Indices bedeuten: e... einfallend; r... reflektiert; t... transmittiert. n ist jeweils der *Brechungsindex*. Die Winkel

Θ_e , Θ_t und Θ_r werden zur Oberflächennormalen (Lot) hin gemessen.

Trifft ein Lichtstrahl auf die Grenzfläche zwischen zwei Medien, so wird er *gebrochen* und *reflektiert*. In Bild 2.1 ist der Brechungsindex n_1 von Medium 1 kleiner als der Brechungsindex n_2 von Medium 2. Medium 1 wird deshalb als das *optisch dünnere* Medium bezeichnet; Medium 2 als das *optisch dichtere*.

Der Lichtstrahl wird beim Übergang vom optisch dünneren ins optisch dichtere Medium zum Lot hin gebrochen.

Mathematisch wird das durch das (Snelliussche) *Brechungsgesetz* beschrieben:

$$\frac{\sin \Theta_e}{\sin \Theta_t} = \frac{n_2}{n_1} \quad \textbf{Brechungsgesetz} \quad (2.1)$$

Für den Brechungsindex von Luft gilt in sehr guter Näherung $n_{\text{Luft}} \approx 1$. Für die Brechung an der Grenzfläche Luft-Glas gilt also (Medium 1 ist jetzt die Luft):

$$\frac{\sin \Theta_e}{\sin \Theta_t} \approx n_{\text{Glas}}$$

Das Reflexionsgesetz ist noch einfacher:

$$\Theta_r = \Theta_e \quad \textbf{Reflexionsgesetz} \quad (2.2)$$

Bei der Reflexion ist der Einfallswinkel Θ_e gleich dem Reflexionsswinkel Θ_r .

Anmerkung: Gelegentlich wird das auch in der Form „Einfallswinkel = Ausfallswinkel“ ausgedrückt.

- Ⓔ **Grenzen des Strahlenmodells** *Beugung* und *Interferenz* sind Phänomene, die mit dem Strahlenmodell nicht mehr im Einklang sind. Es ist ein komplexeres Modell des Lichts notwendig. Das ist das *Wellenmodell* in dem Licht durch *elektromagnetische Wellen* beschrieben wird. Diese Beschreibung wird wichtig, sobald die Abmessungen eines optischen Strahlengangs und auch die Abmessung des abzubildenden Objekts in der Größenordnung der Wellenlänge des Lichts sind. Der Versuch *Beugungsbegrenzung* wird das eindrucksvoll demonstrieren.

2.2 Paraxiale Optik

- Ⓔ Eine weitere Vereinfachung erreichen wir, wenn wir uns auf *kleine Winkel* bezüglich der Symmetrieachse des Systems (*optische Achse*) beschränken. Dies wird als *paraxiale Optik* oder *Gaußsche Optik* bezeichnet. Die Sinusfunktion im Brechungsgesetz kann in diesem Fall durch den Winkel im *Bogenmaß* genähert werden.

Die einfachen Gleichungen der folgenden Abschnitte gelten für die paraxiale Näherung.

2.3 Optische Linsen

Reflexion und Brechung erlauben es nun, Lichtstrahlen bzw. ganze Strahlbündel für bestimmte Zwecke gezielt zu manipulieren. So entsteht beim Spiegel das Spiegelbild durch Reflexion der Lichtstrahlen, die vom Objekt ausgehen und auf die Spiegelfläche treffen. *Linsen* werden genutzt, um abbildende Systeme zu konstruieren. Hier spielt die Lichtbrechung die zentrale Rolle.

Die Lichtstrahlen werden sowohl an der Eintritts- wie auch an der Austrittsfläche der Linse gemäß dem Brechungsgesetz gebrochen. Innerhalb und außerhalb der Linse bewegen sich die Lichtstrahlen jeweils geradlinig.

Es gibt verschiedene **Linsenformen**. Konvexe Linsen, auf die wir uns hier beschränken werden, sind Sammellinsen. Die Oberfläche ist oft sphärisch (Kugelfläche). G

Anmerkung: Die **Kugelfläche** ist nicht ideal, aber leichter zu schleifen als jede andere Form. G

Die wichtigste Kenngröße einer Linse ist (neben dem Durchmesser der Linse) ihre **Brennweite** f .

Bei konvexen Linsen wird von links parallel einfallendes Licht auf den Brennpunkt fokussiert, der sich im Abstand der Brennweite f rechts von der Linse befindet (umgekehrt natürlich genauso).

Anmerkung: Bei weit entfernten Himmelskörpern wie der Sonne, fällt das Licht praktisch parallel auf eine Linse. Deshalb wirken Sammellinsen als Brenngläser.

In der Realität sind Linsen in der Regel rotationssymmetrische Gebilde.

Die Symmetrieachse des optischen Systems wird **optische Achse** genannt. Im allgemeinen werden optische Systeme als Schnittbilder entlang der optischen Achse dargestellt. G

Bild 2.2 gibt einen Überblick über Kenngrößen einer Abbildung mit einer (dünnen) Linse. Hervorgehoben muss hier noch die sogenannte **Hauptebene** werden. G

Eine genügend dünne Linse kann durch eine einzige Hauptebene repräsentiert werden. Alle Abstände beziehen sich dann auf diese Hauptebene.

Dadurch vereinfachen sich für dünne Linsen vor allem Bildkonstruktionen (siehe Abschnitt 2.4), da alle Maße, wie z.B. der Abstand des Gegenstandes, auf die Hauptebene bezogen werden.

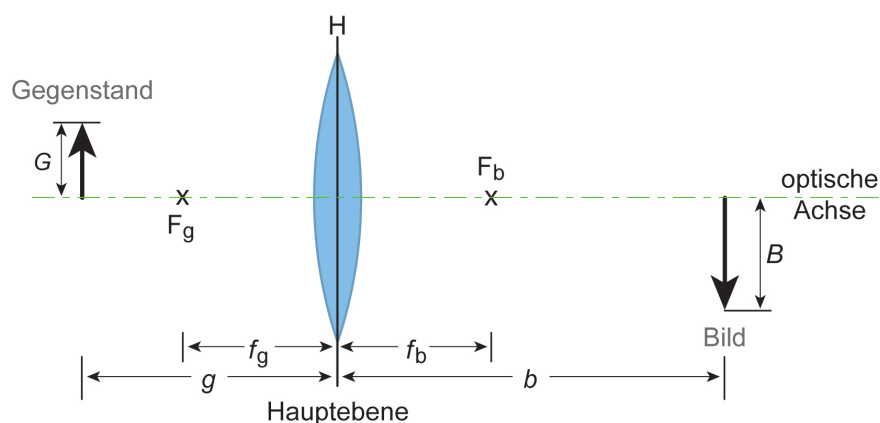


Abbildung 2.2: Übersicht über die Größen, durch die eine Abbildung gekennzeichnet ist. Der Gegenstand der Größe G wird auf das Bild der Größe B abgebildet. Die Orte sind gegeben durch die Gegenstandsweite g bzw. die Bildweite b . Die Brennpunkte F_g und F_b (hier wird nach gegenstandsseitig und bildseitig unterschieden) befinden sich im Abstand f_g bzw. f_b (Brennweiten). Alle Abstände werden auf die Hauptebene H bezogen.

2.4 Optische Abbildung

Wir beginnen mit der Konstruktion des Bildes eines Gegenstandes, das durch eine dünne konvexe Linse erzeugt wird. Dazu betrachten wir die Abbildung der Spitze des Gegenstandes auf die Spitze des zugehörigen Bildes (Bild 2.3).

Die Lichtstrahlen laufen, wie allgemein üblich, von links nach rechts.

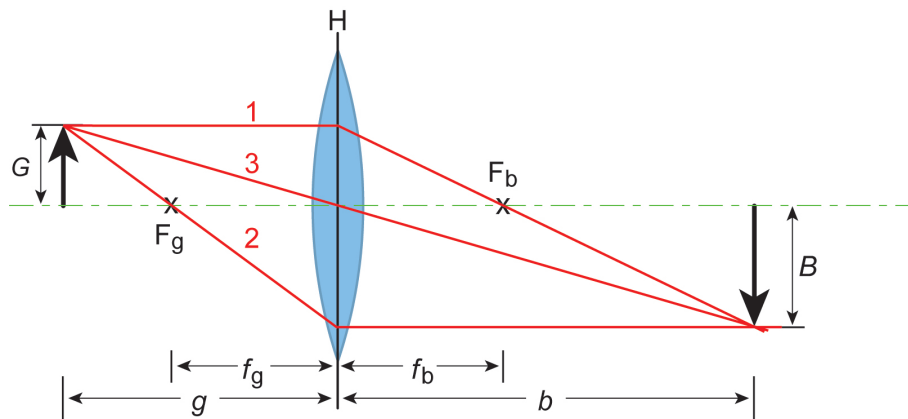


Abbildung 2.3: Konstruktion eines Bildes mithilfe dreier ausgezeichnete Lichtstrahlen. Die Hauptebene „repräsentiert“ die Linse.

Drei Lichtstrahlen können für die Konstruktion des Bildes genutzt werden (in der Praxis reichen zwei davon):

1. Der oberste Strahl läuft zunächst parallel zur optischen Achse und geht dann durch den bildseitigen Brennpunkt F_b .
2. Entsprechend läuft ein Strahl zuerst durch den gegenstandsseitigen Brennpunkt F_g und dann parallel zur optischen Achse.
3. Der *mittlere Strahl* läuft ohne Ablenkung durch den Linsenmittelpunkt (*Mittelpunktstrahl*).



Anmerkung: Sehr wichtig ist es, sich klar zu machen, dass alle von einem Gegenstandspunkt ausgehenden Strahlen, die die Linse treffen, zur optischen Abbildung beitragen und sich im Bildpunkt treffen. Also nicht nur die, die für die Konstruktion genutzt werden.

2.5 Abbildungsgleichung und Abbildungsmaßstab

Wir wollen nun die optische Abbildung quantitativ untersuchen.

Wir bezeichnen ein Bild als „scharf“, wenn ein Gegenstandspunkt genau auf einen Bildpunkt abgebildet wird.

Aus Bild 2.3 erkennen wir bereits, dass sich die Größen von Gegenstand (G) und Bild (B) im Allgemeinen unterscheiden. Das Größenverhältnis B/G heißt *Abbildungsmaßstab* M . Betrachten wir den Mittelpunktstrahl zwischen Gegenstand und Bild, so ist offensichtlich, dass M nur vom



Verhältnis der Abstände zur Hauptebene abhängt (ähnliche Dreiecke):

$$M = \frac{B}{G} = \frac{b}{g}. \quad \text{Abbildungsmaßstab} \quad (2.3)$$

Bei der Abbildung an einer konvexen Linse sind Bild und Gegenstand zueinander gespiegelt (siehe Aufgabe 3.1), das Bild steht auf dem Kopf. Außerdem erfüllen die Größen f , g und b eine bestimmte Relation, die wir mit Hilfe geometrischer Überlegungen herleiten können. Sie heißt **Abbildungsgleichung**: Ⓒ

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}. \quad \text{Abbildungsgleichung} \quad (2.4)$$

Anmerkung: Genau genommen muss an dieser Stelle eine sogenannte **Vorzeichenkonvention** eingeführt werden. Der Einfachheit halber verzichten wir aber darauf. Ⓒ

2.6 Abbildungsfehler

In Abschnitt 2.2 wurde auf die *paraxiale Näherung* hingewiesen, die der bisherigen Behandlung der optischen Abbildung zugrunde liegt. Natürlich weichen reale Abbildungen von diesen idealisierten Bedingungen ab. Die Abweichungen werden **Abbildungsfehler** oder **Aberrationen** genannt. Dabei können verschiedene Aberrationen aufgrund von Ursache und Wirkung unterschieden werden. Für den monochromatischen Fall (Licht einer bestimmten Wellenlänge) treten **fünf Aberrationen** besonders stark hervor: sphärische Aberration, Koma, Astigmatismus, Bildfeldwölbung und Distorsion. Das sind die *Seidelschen Linsenfehler*. Ⓒ

Dazu kommen die Abweichung, die sich aus der Abhängigkeit des Brechungsindex von der (Spektral-)Farbe ergeben (**Dispersion**). Sie heißt **chromatische Aberration**. Ⓒ

Im Folgenden werden zwei Abbildungsfehler näher beschrieben.

2.6.1 Sphärische Aberration

Die sphärische Aberration ist ein Abbildungsfehler für Gegenstandspunkte auf der optischen Achse oder für achsenparallele Strahlen.

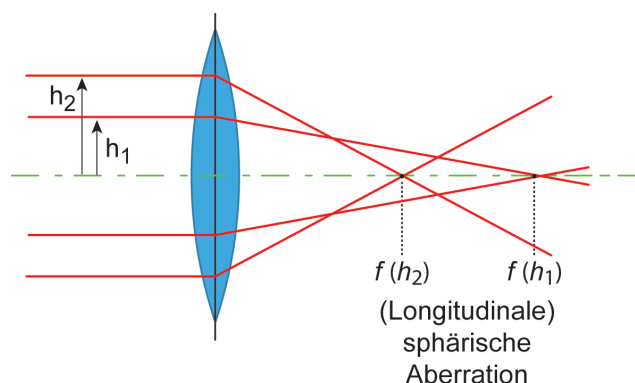


Abbildung 2.4: Die sphärische Aberration wird auch Öffnungsfehler genannt. Hier ist sie für achsenparallele Strahlen dargestellt. Die Lage des Brennpunktes hängt vom Abstand h des Strahls von der optischen Achse ab.

Bei der Verwendung einer sphärischen Linse tritt die in Bild 2.4 dargestellte, sphärische Aberration auf. Die Brennweite hängt davon ab, in welchem Abstand h zur optischen Achse der Lichtstrahl

die Linse durchquert. Die Brennweite ist keine Konstante mehr, sondern eine Funktion $f(h)$. Die Brennweite der achsenfernen Strahlen ist kürzer als die Brennweite der achsennahen Strahlen. Dieses nicht ideale Verhalten hat natürlich seine Auswirkungen auf die optische Abbildung. Hier führt es dazu, dass (je nach radialer Ausleuchtung der Linse) aus einem Gegenstandspunkt ein verbreiteter, unscharfer Bildpunkt wird. Man findet dann beim Scharfstellen kein scharfes Abbild mehr.

2.6.2 Chromatische Aberration

Ein weiterer charakteristischer Abbildungsfehler ist auf das Linsenmaterial zurückzuführen. Die Lichtbrechung an den Linsenoberflächen ist durch den Brechungsindex des Glases bestimmt (Brechungsgesetz 2.1), da $n_{\text{Luft}} \approx 1$ gesetzt wird. Der Brechungsindex des Linsenmaterials n_{Glas} hängt bei genauer Betrachtung von der (Spektral-)Farbe des Lichts ab (*Dispersion*). Entsprechend ergibt sich für jede Farbe des Lichts eine andere Brennweite (Bild 2.5). Da der Brechungsindex die Brennweite mitbestimmt, ergibt sich z.B. für rotes Licht eine andere Brennweite als für blaues. Aus der Abbildungsgleichung 2.4 folgt damit auch eine andere Bildweite.

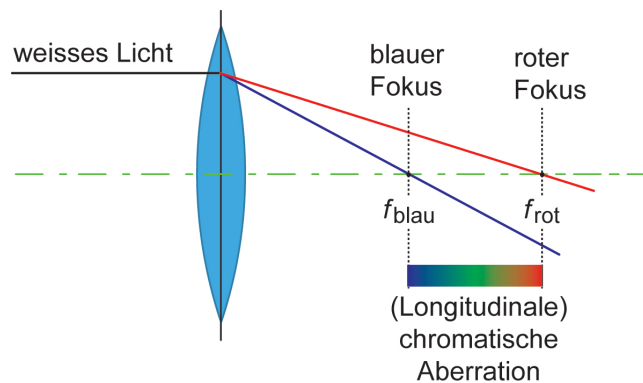


Abbildung 2.5: Die chromatische Aberration folgt aus der Wellenlängenabhängigkeit des Brechungsindex. Die Lage des Brennpunktes hängt von der Wellenlänge ab, die hier durch die (Spektral-)Farbe repräsentiert ist.

Bei einer Abbildung mit weißem Licht entsteht für die unterschiedlichen Farben kein gemeinsames Abbild mehr. Dies ist die Ursache für die typischen Farbsäume mancher Abbildungen mit nicht entsprechend korrigierten Linsen(-systemen).

2.7 Beugungsbegrenzung der Abbildung

Die oben diskutierten Abbildungsfehler stellen keine prinzipielle physikalische Grenze dar und können mit entsprechendem Aufwand korrigiert werden. Ein Effekt limitiert die Abbildung aber prinzipiell. Wie bereits erwähnt spielt unter bestimmten Voraussetzungen die *Lichtbeugung* eine Rolle. Diese kann nur im *Wellenmodell* des Lichts beschrieben werden. Beugung ist immer zu beobachten, wenn Dimensionen in die Größenordnung der Lichtwellenlängen kommen (400 nm - 700 nm).

Durch die Beugung des Lichts entstehen in der Bildebene Beugungsverteilungen, die den idealen, punktförmigen Bildpunkt zu einer kleinen Scheibe vergrößern (bei kreisförmigen Blenden). Überlappen die (Bild-)Scheibchen zweier Gegenstandspunkte, so sind die Bildpunkte kaum mehr zu unterscheiden. Dieser Effekt ist abhängig von der Größe der Öffnung. Die Scheibchen werden umso größer je kleiner die Öffnung ist.

Der geringste Abstand, den zwei Gegenstandspunkte haben können, wenn sie noch getrennt (also als zwei Punkte) am Bild erscheinen sollen, ergibt das **Auflösungsvermögen** des optischen Systems. 
Praktisch heißt das, dass die Auflösung eines optischen Systems beugungsgrenzt ist. Daran kann auch ein Detektor mit noch so hoher Auflösung (z.B. besonders vielen Megapixeln) nichts ändern. Versuch 3.3 ist eine Demonstrationsversuch zur Beugungsbegrenzung.

2.8 Schlierenoptik

Schlierenoptik

*Mit Hilfe der **Schlierenoptik** werden Dichteschwankungen der Luft sichtbar gemacht.* 

Die Dichteunterschiede können z.B. durch Temperaturunterschiede verursacht werden.

Der Aufbau ist relativ einfach. Das zu untersuchende Objekt, z.B. eine Kerzenflamme, wird von parallelem Licht durchstrahlt. Das Licht geht dann durch eine Sammellinse und genau im Brennpunkt befindet sich die sogenannte *Schlierenkante*. Aufgrund der durch die Dichteunterschiede bedingten unterschiedlichen Brechung der Lichtstrahlen in der Luft (die ja dann kein homogenes Medium mehr ist), werden nicht alle Lichtstrahlen im Brennpunkt vereint und die Schlierenkante deckt sie unterschiedlich stark ab. Da weißes Licht eine Mischung aus allen Farben (genauer Spektralfarben) ist, werden natürlich die Schatten auch farbig, da verschiedene Farben ja unterschiedlich gebrochen werden.

Eine wichtige Anwendung ist die Schlieren-Fotografie. Schlieren-Fotografie ist z.B. nützlich in der Luftfahrttechnik, weil sie uns den Luftstrom um Objekte z.B. um die Flügel eines Flugzeugs zeigen kann.



Abbildung 2.6: Bild einer Feuerzeugflamme aufgenommen im Praktikum.

3 Aufgaben

Sicherheitshinweis Die LED-Leuchte strahlt in einem begrenzten Winkelbereich ein relativ helles Licht ab. Vermeiden Sie es daher, insbesondere aus kurzer Entfernung, direkt in den Lichtkegel zu blicken! Drehen Sie die Helligkeit nur soweit hoch, wie es für die jeweilige Aufgabe notwendig ist. Vor dem Einschalten muss der Spannungregler des Netzteils auf „Null“ (ganz nach links) gedreht werden.

Allgemeine Hinweise:

Es kommt im folgenden darauf an, dass Sie

- sich zunächst mit den einzelnen Komponenten vertraut machen (auch mit dem Kreutztisch)
- bei der Messung die Position der einzelnen Elemente möglichst genau erfassen (Bezugspunkte für Messungen festlegen)
- alle optischen Elemente möglichst exakt ausrichten (optische Achse).
- ihre Vorgehensweise im Protokoll (logbook) beschreiben (auch Misserfolge oder Probleme).

Tipp: Die Lochreihen könnten bei der Positionierung hilfreich sein. Auch ein Geodreieck ist sehr zu empfehlen. Tipp!

3.1 Optische Abbildung mit einer Linse

Material		
LED Beleuchtung	TUM-Logo (Gegenstand)	Kreutztisch
Linse 100 mm bikonvex	Schirm	

In dieser ersten Aufgabe sollen einige grundlegende Messungen durchgeführt werden.

3.1.1 Aufbau des Experiments

Planen Sie zunächst den Aufbau und beschreiben Sie Ihre (geplante) Vorgehensweise (*logbook*). Dazu gehören Konzepte

1. für die genaue Erfassung der Positionen der einzelnen Elemente und
2. für eine exakte Ausrichtung entlang der optischen Achse.

Verwenden Sie als Abbildungs-Gegenstand das *TUM-Logo*:

1. Setzen Sie das *TUM-Logo* direkt auf die *LED-Beleuchtung*.
2. Stellen Sie den Schirm in einer Entfernung von ca. 60 cm zum Gegenstand auf und schrauben Sie ihn am Tisch fest (genaue Entfernung messen!).

3. Klemmen Sie ein weißes Blatt Papier am Schirm fest.
4. Verwenden Sie die Halterung mit der bikonvexe Linse mit 100 mm Brennweite.
5. *Skizzieren Sie den Aufbau im logbook.*

3.1.2 Abbildungsgleichung

1. Schalten Sie die LED-Lampe ein (Netzteil mit Spannungsregler).
2. Verschieben Sie die abbildende Linse vom Gegenstand ausgehend in Richtung Schirm bis ein scharfes Bild zu beobachten ist (optische Achse beachten). Messen Sie Gegenstandsweite g und Bildweite b .
3. *Beschreiben Sie die Vorgehensweise mit eigene Worten und notieren Sie die Messergebnisse im logbook.*
4. Überprüfen Sie mit diesen Werten die Abbildungsgleichung (Gleichung 2.4):

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}.$$

Stimmt die Gleichung?

5. *Formulieren Sie Ihr Ergebnis (mit Rechnung) im logbook.*
6. Berechnen Sie den Abbildungsmaßstab M nach Gleichung (Gleichung 2.3):

$$M = \frac{B}{G} = \frac{b}{g}.$$

7. *Notieren Sie Rechnung und Ergebnis im logbook.*
8. *Für Spezialisten (sonst weiter beim Punkt 10):* Betrachten Sie die Abbildungsgleichung (siehe oben oder Gleichung 2.4).
 - (a) Warum sollte es ein weiteres scharfes Bild geben.
 - (b) Sagen Sie Ort und Größe des zweiten Bildes voraus.
9. *Notieren Sie Überlegung und Ergebnis im logbook.*
10. Es gibt ein zweites scharfes Bild. Suchen Sie es und bestimmen Sie g , b und M . Vergleichen Sie mit der Abbildungsgleichung. *Tipp: Die LED sollte nicht sehr hell eingestellt sein.*
11. *Notieren Sie Ihr Ergebnis im logbook.*
12. *Formulieren Sie zusammenfassend Ihre Ergebnisse, d.h. schreiben Sie einen kurzen Bericht über den Abschnitt (3.1.2) ins logbook.*

Tipp!

3.1.3 Zusatzfrage

Sie decken die untere Hälfte der Linsen ab (z.B. mit einem Blatt Papier). Was passiert mit der Abbildung? *Erklären Sie das Ergebnis (mit Skizze des Strahlenverlaufs) im logbook.*

3.1.4 Abbildungsmaßstab und Spiegelung des Bildes

Für den existierenden Aufbau soll nun der Abbildungsmaßstab *experimentell* bestimmt werden. Da die Messung der Gegenstandsweite g und der Bildweite b nicht sehr genau erfolgen kann, nutzen wir den Gegenstand und das Bild selbst. Allerdings messen wir nicht einfach die Größen, da dies auch zu ungenau wäre. Wir nutzen den Kreutztische, der ein genaues Verschieben des TUM-Logos erlaubt. Wir verschieben also die Gegenstandspunkte und untersuchen die Verschiebung

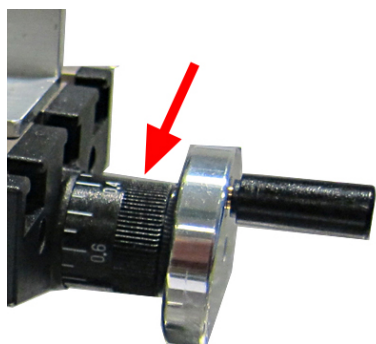


Abbildung 3.1: Für den folgenden Versuch wird der Kreuztisch verwendet, um damit das Objekt senkrecht zur optischen Achse zu bewegen. Durch Festhalten der Kurbel und Drehen am gerändelten Skalenring lässt sich der Nullpunkt einstellen. Die Verschiebung lässt sich dann direkt am Skalenring ablesen. Eine volle Umdrehung entspricht einem Verstellweg von 1 mm.

der Bildpunkte. Am Schirm kann mit entsprechenden Markierungen die Verschiebung des Bildes gemessen werden.

Außerdem soll der Typ der Spiegelung (Punkt, Achse oder Ebene) bestimmt werden.

1. Stellen Sie am Kreuztisch den Nullpunkt ein (Skalenring, siehe Bild 3.1).
2. Kennzeichnen Sie den Ort des Bildes am Schirm (ein neues weißes Blatt ist hilfreich).
3. Verschieben Sie mit dem Kreuztisch LED-Lampe und Gegenstand transversal (also senkrecht) zur optischen Achse um genau 5 mm.
4. Kennzeichnen Sie erneut den Ort des Bildes am Schirm und messen Sie die Verschiebung des Bildes.
5. Das Verhältnis der Verschiebung am Schirm zur Verschiebung des Gegenstands ergibt den Abbildungsmaßstab. Stimmt dieser mit dem vorhin berechneten Wert überein?
6. *Notieren Sie alle Schritte und Ergebnisse im logbook.*
7. Verschieben Sie den Gegenstand nochmals. Wie ist die Richtung dazu auf dem Schirm orientiert? Können Sie bestätigen, dass das Bild gespiegelt ist?
8. Drehen Sie nun den Gegenstand um die optische Achse. Dreht sich das Bild in die gleiche Richtung oder nicht?
9. *Beschreiben Sie die Versuche und Ergebnisse im logbook.*
10. Aufgrund der bisherigen Erkenntnisse sollten Sie auf folgende Frage eine begründete Antwort haben. *Notieren Sie im logbook: Um welchen Typ von Spiegelung es sich handelt? Begründen Sie das Ergebnis Ihrer Überlegung!*

3.2 Linsenfehler

Material		
LED Beleuchtung	Edelstahlgitter (Gegenstand)	Kreuztisch
Linse $f = 100$ mm bikonvex	Farbfilter	Blende 1 und 2
Blende 1	kreisförmige Öffnung, Öffnungsradius $s = 6,0$ mm	
Blende 2		
Blende 3		
Blende 4		
	ringförmige Öffnung, mittlerer Öffnungsradius $s = 14,5$ mm	
	ringförmige Öffnung, mittlerer Öffnungsradius $s = 18,9$ mm	
	ringförmige Öffnung, mittlerer Öffnungsradius $s = 22,4$ mm	

In diesem Aufgabenteil wollen wir uns die Qualität der Abbildung etwas genauer betrachten und

die auftretenden Abbildungsfehler untersuchen. Dabei werden wir uns auf die sphärische und chromatische Aberration beschränken.

3.2.1 Sphärische Aberration

Wir verwenden die Anordnung aus dem letzten Experiment (vergrößernde Abbildung mit der Linse mit $f = 100 \text{ mm}$). Allerdings wird das *TUM-Logo* durch das *feinmaschige Edelstahlgitter* ersetzt. Mithilfe des Kreuztisches wird im Folgenden versucht, die optimale Bildschärfe einzustellen. Dabei wird genau beobachtet, wie sich das Bild verändert. Gelingt es, alle Bereiche gleich scharf zu stellen?

Tipp! *Tipp: Der Linsenhalter muss am Tisch angeschraubt werden.*

1. Skizzieren Sie im logbook Ihren Versuchsaufbau. Beschreiben und skizzieren Sie das Bild bzw. wie sich das Bild bei Verschiebung des Gegenstandes verändert.
2. Legen Sie jetzt die Blende Nr. 1 in den Blendenhalter (an der Linse) ein.
3. Optimieren Sie wieder die Bildschärfe.
4. Beschreiben Sie im logbook genau Ihre Beobachtung (zwei bis drei Auswirkungen der Blende sollten Sie erkennen).

Anmerkung: Sie haben soeben die einfachste aber zugleich auch effektivste Methode kennengelernt, Abbildungsfehler zu reduzieren. Allerdings erkaufte man sich dies durch eine drastische Reduktion der Bildhelligkeit.

Nach diesem Vorversuch soll die sphärische Aberration genauer untersucht werden.

Wie hängt die Abbildung vom Abstand s der Lichtstrahlen vom Zentrum ab?

Da die Gegenstandsweite g mit dem Kreuztisch sehr genau verstellt und abgelesen werden kann, ist es sinnvoll die Änderung von g , also Δg , in Abhängigkeit vom Öffnungsradius s (siehe Tabelle weiter oben) zu messen. Die absoluten Längen g interessieren nicht. Die Bildweite b wird nicht verändert. Als Nullpunkt $\Delta g = 0$ verwenden wir die Einstellung „scharfes Abbild“ mit der Blende Nr. 1. Verfälscht werden könnte das Ergebnis durch die chromatische Aberration (s.u.). Deshalb wird mit nur einer Farbe gemessen.

1. Drehen Sie zunächst den roten oder blauen Farbfilter (nach Ihrer Wahl) vor den Gegenstand, um die chromatische Aberration (weitgehend) auszuschalten.
2. Beschreiben Sie das Experiment im logbook mit eigenen Worten.
3. Notieren Sie im logbook Ihre experimentellen Schritte.
4. Führen Sie das Experiment durch.
5. Notieren Sie im logbook: Stellen Sie Ihr Ergebnis in geeigneter Form da (einschließlich einer Graphik) und geben Sie eine mögliche Erklärung an.

3.2.2 Chromatische Aberration

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, um den Farbfehler optischer Systeme zu korrigieren. Natürlich braucht man dabei auch ein Maß für den Farbfehler. Charakterisieren lässt sich der Farbfehler grundsätzlich durch Vergleich der Abbildung bei verschiedenen Wellenlängen des Lichts. Schön wäre natürlich eine relative Größe als Maß für den Farbfehler. Dies soll mit dem folgenden Experiment erreicht werden:

- Legen Sie nochmals die Blende Nr. 2 ein. Drehen Sie das rote Farbglas in den Strahlengang und stellen Sie die Abbildung scharf. Wechseln Sie zum blauen Farbglas und stellen Sie wieder scharf. Wie groß ist der Unterschied Δg der Gegenstandsweite? Berechnen Sie die relative Änderung $\Delta g/g$.
- Bei welcher Farbe hat die Linse die kleinere Brennweite? Begründung!
- Schreiben Sie einen kurzen Bericht mit Experimentbeschreibung und Ergebnissen ins log-book.

3.3 Beugungsbegrenzung der Abbildung (Zusatzaufgabe)

Material		
LED Beleuchtung	Edelstahlgitter (Gegenstand)	Kreuztisch
Linse $f = 100$ mm bikonvex	Farbfilter	verstellbare Schlitzblende

Mit dem bestehenden Aufbau soll gezeigt werden, wie die optische Abbildung durch Beugungseffekte limitiert wird. Das Strahlenmodell des Lichts kann dies nicht erklären. Dazu ist das Wellenmodell notwendig. Es wird weißes Licht verwendet. Ein verstellbarer Spalt (Schlitzblende) dient dazu, die Beugungsbegrenzung zu demonstrieren. Die Abbildung des Edelstahlgitters (Gitterstege waagrecht bzw. senkrecht) wird scharf gestellt (keine Ringblende). Bei maximaler Lichtstärke wird die Schlitzblende, die sich hinter der Linse befinden soll, zunächst bis auf 2 mm geöffnet und dann langsam geschlossen.

Vorsicht! Beim Schließen des Spaltes nicht über den Nullpunkt hinausdrehen.

1. Was erwarten Sie beim Schließen des Spaltes? Notieren Sie Ihre Vermutung im logbook.
2. Bestimmen Sie die Spaltbreite bei der eine signifikante Veränderung auftritt.
3. Beschreiben Sie das Experiment und erklären Sie Ihr Ergebnis qualitativ. Eintrag im logbook.

3.4 Zweistufige Abbildung, Linsensystem

Material		
LED Beleuchtung	TUM-Logo (Gegenstand)	
Linse 35 mm plankonvex	Linse 50 mm, bikonvex	Schirm

Bis jetzt wurde der Gegenstand mit Hilfe einer Linse auf den Schirm abgebildet. Es ist jedoch auch möglich, das Bild dieser Linse als Ausgangsobjekt für eine weitere Abbildung mit einer zweiten Linse zu verwenden (Abbildung mit Zwischenbild). Dies soll im Folgenden untersucht werden.

3.4.1 Aufbau

1. Bauen Sie die Anordnung entsprechend Bild 3.2 auf. Dabei soll $L = 80$ cm sein. Achten Sie bei der plankonvexen Linse auf die Orientierung!

Tipp: Das Zwischenbild sollte sich genau in der Mitte zwischen Gegenstand und Schirm befinden.

Tipp!

2. Notieren Sie im logbook: Beschreiben Sie das Zwischenbild (Position, Größe, Orientierung).
3. Mit Hilfe der zweiten Linse soll jetzt ein scharfes Bild am Schirm entstehen. Skizzieren Sie die Anordnung mit allen relevanten Größen im logbook.

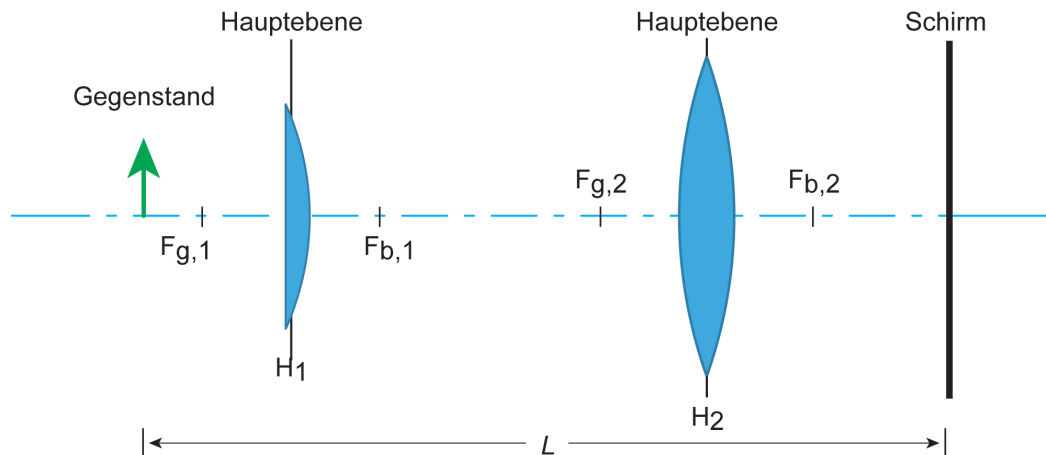


Abbildung 3.2: Der Aufbau für eine zweistufige Abbildung mit Hilfe eines Linsensystems aus einer plankovexen ($f_1 = 3,5 \text{ cm}$) und einer bikonvexen Linse ($f_2 = 5 \text{ cm}$).

4. Notieren Sie im logbook, ob Abbildungsfehler auffallen?

3.4.2 Untersuchung des Aufbau

1. Bestimmen Sie den Abbildungsmaßstab mit der Methode aus Aufgabe 3.1.4. Notieren Sie das Ergebnis im logbook.
2. Die plankovexe Linse haben Sie sicher nach Anleitung eingebaut. Was passiert, wenn Sie sie umdrehen? Notieren Sie das Ergebnis im logbook.

3.4.3 Konstruktion

Wie oben beschrieben, können im Linsensystem die beiden Linsen getrennt betrachtet werden. Die erste Linse erzeugt eine (Zwischen-)Bild, welches der Gegenstand für die zweite Linse ist. Von dieser wird das Bild am Schirm erzeugt. Bild 3.3 zeigt das Prinzip.

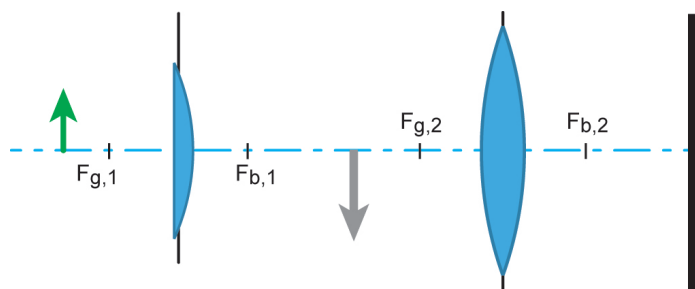


Abbildung 3.3: Die Abbildung kann beim Linsensystem durch Betrachtung der beiden Einzelabbildungen erklärt werden. Die erste Linse erzeugt ein Zwischenbild, das hier eingezeichnet ist und von der zweiten Linse abgebildet wird.

Im Logbook ist das Bild 3.3 mit den wichtigsten Elementen zu finden. Führen Sie die Konstruktion durch. Wenn Sie es richtig gemacht haben, entsteht das Bild genau am Schirm.

3.5 Schlierenoptik

Material		
LED Beleuchtung	Spalt-Aufsatz (Gegenstand)	Schlierenkante
2 Linsen 200 mm plankonvex	Linse 150 mm, bikonvex	Schirm
Feuerzeug	Fön	Druckluftpistole

Zum Abschluss soll nun noch eine etwas speziellere, aber interessante optische Anordnung aufgebaut werden.

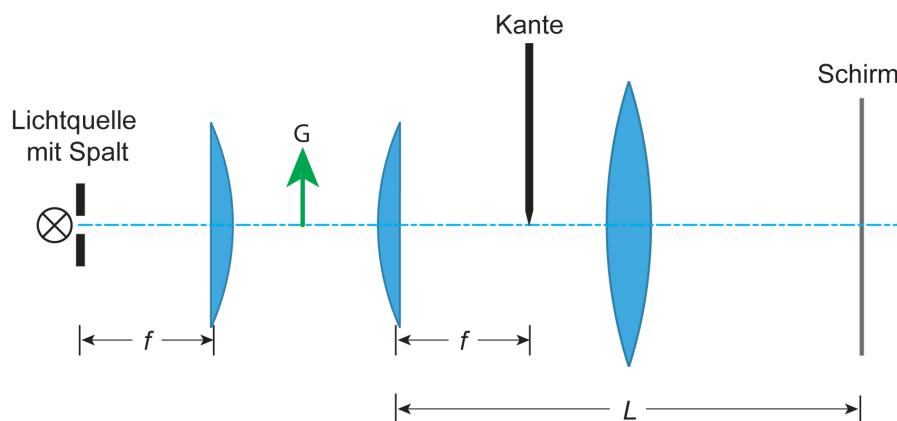


Abbildung 3.4: Dieser Aufbau zur Schlierenoptik muss exakt eingehalten werden..

1. Dazu benötigen wir eine spaltförmige Lichtquelle. Das Gegenstands-Gitter wird deshalb durch den Spaltaufsatz (Spaltbreite ca. 0,5 mm) ersetzt. Der Spalt soll dabei senkrecht zur Tischebene orientiert sein.
2. Stellen Sie nun die beiden plankonvexen Linsen mit $f = 200$ mm in der gezeigten Weise auf. Der Abstand zwischen den beiden Linsen ist unkritisch (z.B. 10 cm und 15 cm). Wenn Sie nun den Schirm in die Brennebene der zweiten Linse stellen (also Abstand f), sollten Sie sehen können, dass dort der Lichtspalt scharf abgebildet wird. Diese Position spielt später noch eine wichtige Rolle.
3. Schieben Sie nun den Schirm so weit weg, dass der Abstand zur zweiten Linse ungefähr $L = 50$ cm beträgt.
4. Stellen Sie in die Mitte zwischen die beiden Linsen einen beliebigen Gegenstand G (z.B. ein Lineal). Bilden Sie mit einer dritten Linse (bikonvex, $f = 150$ mm) den Gegenstand scharf auf den Schirm ab.
5. Nun kommt der entscheidende Schritt: Stellen Sie die Kante (Schlierenkante) an die Stelle, an welcher der Spalt scharf abgebildet wurde. Schieben Sie nun die Kante soweit in den Strahlengang, dass nur noch sehr wenig Licht am Schirm ankommt. Dabei sollte von links nach rechts ein Farbverlauf sichtbar sein.
6. Untersuchen Sie nun folgende Objekte als Gegenstand G: Feuerzeugflamme (von unten), Feuerzeuggas (von oben), Heißluftfön (kurz nach dem Abschalten), Luftaustritt der Druckluftpistole. Können Sie die „Schlieren“ beobachten?
7. Beschreiben Sie Ihre Beobachtungen im logbook.