

Geometrische Optik

Astronomisches Praktikum

ABSTRACT

In dieser Praktikumseinheit haben wir die Brennweite einer Kamera mit einem Linsensystem des Typs Tessar und die Brennweite einer Linse in Abhängigkeit von der Wellenlänge bestimmt.

Linsenformen

Beim Einfallen des Lichtes ins Glas wird das Licht zum Lot gebrochen, beim Ausfallen aus dem Glas vom Lot weg. Das Lot ist eine gedachte Hilfslinie, die im rechten Winkel auf die Grenzfläche zwischen zwei Materialien steht. Um das Licht zu lenken, wird das Glas auf beiden Seiten so gekrümmt, dass das Lot in die richtige Richtung zeigt. Da beim Austritt genau der gegenteilige Effekt, wie beim Eintritt in ein Material entsteht, ist die Austrittsgrenzfläche in der Regel spiegelverkehrt zur Eintrittsgrenzfläche.

Konvexe Linsen: Konvexe Linsen (auch Sammellinsen genannt) sind auf beiden Seiten nach außen gekrümmt (konvex) um das Licht nach innen zu brechen und ein verkleinertes Bild darzustellen.

Konkave Linsen: Konkave Linsen (auch Zerstreuungslinsen genannt) sind auf beiden Seiten nach innen gekrümmt (konkav) um das Licht nach außen zu brechen und so ein vergrößertes Bild darzustellen.

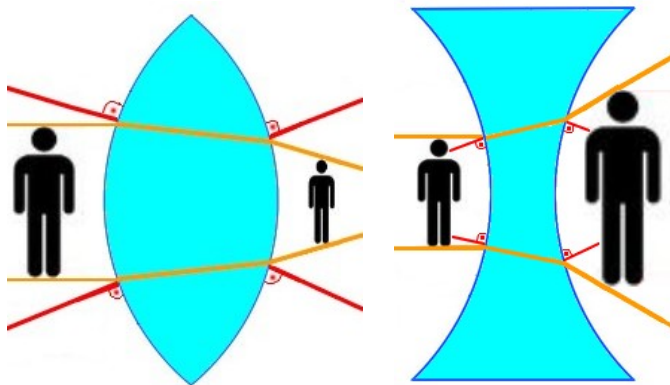


Abb. 1 - 2: Lichtbrechung einer konvexen Linse (links) und einer konkaven Linse (rechts). Die Linsen sind blau, die Lichtstrahlen orange und die Lote rot eingezeichnet. Die Figur, von der die Lichtstrahlen im rechten Winkel weggehen, ist der Originalgegenstand, die andere das Bild.

Die Vergrößerung bzw. Verkleinerung nimmt bei beiden Linsen mit zunehmender Krümmung und zunehmender Entfernung des Schirms, auf dem das Bild entsteht, zu.

Spiegelformen

Beim Auftreffen des Lichtes auf einen Spiegel, wird es so gebrochen, dass der Einfallswinkel gleich groß wie der Ausfallswinkel ist. Um das Licht zu lenken, wird die Oberfläche des Spiegels so gebogen, dass der Ausfallswinkel in die richtige Richtung zeigt. Dabei haben konvexe und konkave Spiegeln (auch Hohl- und Wölbspiegel genannt) genau die gegenteiligen Eigenschaften wie konvexe und konkave Linsen.

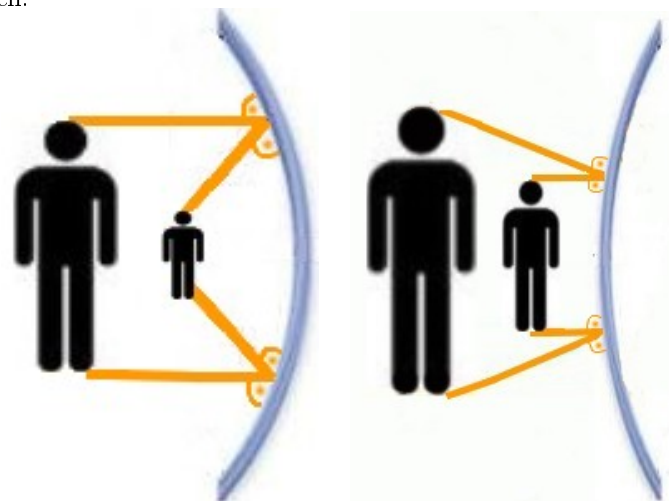


Abb. 3 - 4: Lichtreflexion an einem konkaven Spiegel (links) und einem konvexen Spiegel (rechts). Die Lichtstrahlen sind orange und die Spiegel blau eingezeichnet. Die Figur, von der die Lichtstrahlen im rechten Winkel weggehen, ist der Originalgegenstand, die andere das Bild.

Parabolspiegel: Der Parabolspiegel ist ein Sonderfall des konkaven Spiegels. Dabei wird das Licht so gebrochen, dass es sich aus allen Richtungen in einem Punkt trifft. Diesen Punkt nennt man Brennpunkt. Dadurch werden auch sehr schwache Lichtquellen hell genug um messbar zu sein. Deshalb werden Parabolspiegel beispielsweise bei Radioteleskopen verwendet.

Hauptebene

Die Hauptebene ist der Ort innerhalb der Linse, von dem aus Gegenstandsweite (Abstand zum Gegenstand), Bildweite (Abstand zum Schirm) und Brennweite (Abstand zum Schnittpunkt der Strahlen) gemessen werden. Den Ort der Hauptebene erhält man, indem man die auf der Linse

auftreffenden Lichtstrahlen verlängert. Beim Schnittpunkt der Verlängerungen befindet sich die Hauptebene.

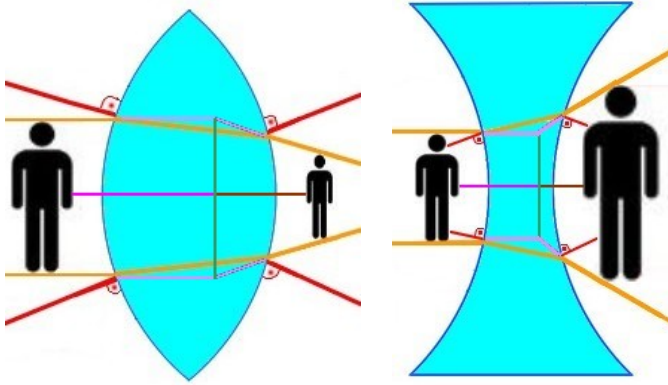


Abb. 5 - 6: Die Hauptebene durch Verlängerung der Lichtstrahlen bei einer konvexen Linse (links) und einer konkaven Linse (rechts). Die Linse ist blau, die Lichtstrahlen orange, die Verlängerung der Lichtstrahlen lila und die Hauptebene grün eingezeichnet. Außerdem ist die Gegenstandsweite rosa und die Bildweite braun eingezeichnet.

Die Hauptebene wird deshalb als Beginn dieser Entfernungen definiert, damit die Gleichung

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \quad (1)$$

mit der Brennweite f , der Bildweite b und der Gegenstandsweite g gut merkbar bleibt.

Brennweitenbestimmung

Die Brennweite ist die Distanz zwischen dem Brennpunkt (Ort an dem sich die Lichtstrahlen treffen) und der Spiegeloberfläche bzw. der Hauptebene der Linse.

Bei konvexen Linsen und konkaven Spiegeln gibt es einen Brennpunkt, sofern die Krümmung überall gleich groß ist. Diesen Brennpunkt kann man bestimmen, indem man den Schirm hin- und herschiebt. Vor dem Brennpunkt ist das Bild immer aufrecht, hinter dem Brennpunkt umgedreht. In Richtung des Brennpunkts wird das Bild immer kleiner bis es am Brennpunkt selbst nicht sichtbar ist.

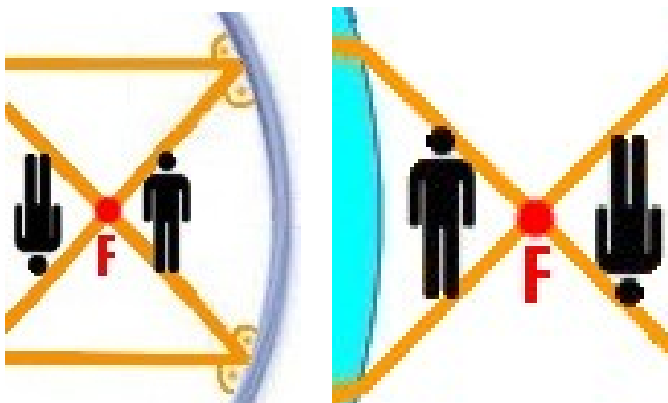


Abb. 7 - 8: Umdrehen des Bildes beim Brennpunkt eines konkaven Spiegels (links) und einer konvexen Linse

(rechts). Die Lichtstrahlen sind orange, Spiegel und Linse blau und der Brennpunkt (F) rot eingezeichnet.

Nachdem man den Schirm auf den Platz des Brennpunkts gestellt hat, kann man den Abstand zwischen Schirm und Linse bzw. Spiegel messen. Bei der Linse ist der Abstand zur Linsenoberfläche die Untergrenze und der Abstand zur Linsenmitte die Obergrenze. Da die Linsen in der Regel sehr dünn sind, ist der Unterschied zwischen Ober- und Untergrenze sehr gering.

Bei konvexen Spiegeln und konkaven Linsen gibt es keinen echten Brennpunkt. Allerdings nimmt das Auge einen solchen Brennpunkt wahr, weil es davon ausgeht, dass sich Lichtstrahlen immer geradeaus ausbreiten und daher die Lichtstrahlen nach hinten verlängert.

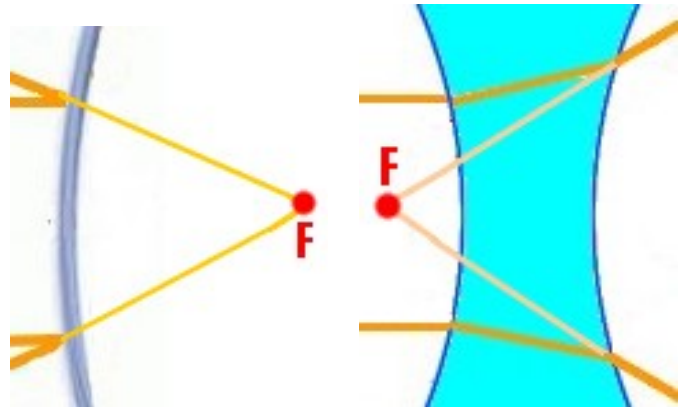


Abb. 9 - 10: Die Entstehung eines virtuellen Brennpunkts durch Verlängerung der Lichtstrahlen bei einem konvexen Spiegel (links) und einer konkaven Linse (rechts). Linse und Spiegel sind blau, die Lichtstrahlen orange, die virtuellen Lichtstrahlen blauer und dünner und der Brennpunkt (F) rot eingezeichnet.

Um die Brennweite zu bestimmen, muss man den Gegenstand hin- und herschieben. Wenn die Lichtstrahlen bis zum Gegenstand genau so lang wie die Lichtstrahlen bis zum Brennpunkt verschwindet der Gegenstand im Spiegelbild bzw. durch die Linse hindurch betrachtet scheinbar, weil das Auge glaubt, dass alle Lichtstrahlen des Körpers vom selben Punkt kommen.

Hinter dem Brennpunkt erscheint der Gegenstand verkehrt herum. Der Strahlengang und das Bild sind analog wie beim konkaven Spiegel und bei der konvexen Linse. Das liegt daran, dass Spiegel und Linse dort gewissermaßen selber der Schirm sind, auf dem die virtuellen Strahlen abgebildet werden.

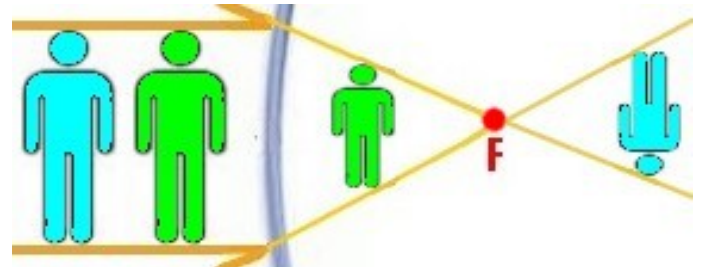


Abb. 11: Nicht maßstäbliche Darstellung eines virtuellen Strahlengangs am konvexen Spiegel. Bei einer maßstäblichen Abbildung wären die Personen links genau

so weit vom Spiegel entfernt, wie ihre Abbildungen rechts.

Bei der konkaven Linse ist eine maßstäbliche Abbildung noch schlechter möglich, weil dort der scheinbare Ort der Abbildung an der selben Stelle wie der tatsächliche Ort der Abbildung ist, nur dass die Abbildung gestaucht bzw. weit hinter dem Brennpunkt gespiegelt und gestreckt ist.

Man könnte auf die Idee kommen, dass selbst wenn der Gegenstand nicht abgebildet wird, der Brennpunkt gar nicht gleich weit entfernt, wie der Ort des Gegenstands ist, weil die Lichtstrahlen schief sind, die Entfernung jedoch gerade ist.

Das ist jedoch nicht der Fall. Am offensichtlichsten wird das, wenn man die Linse betrachtet, die genau im Mittelpunkt durch den Spiegel geht. Diese ist nämlich selber ganz gerade.

Die anderen Strahlen müssen genauso lang sein, denn sonst würden die unterschiedlichen Stellen des Gegenstands nicht vom Auge als gleich weit entfernt wahrgenommen. Die schiefe des Lichtstrahls wird dadurch ausgeglichen, dass sich Spiegel bzw. Linsenoberfläche vom Gegenstand wegkrümmen. Je weniger stark gekrümmt der Spiegel bzw. die Linse ist, desto weiter ist der Brennpunkt vom Spiegel bzw. von der Linse entfernt und desto weniger schief sind die Lichtstrahlen.

Lupen- und Fernrohrvergrößerung

Die direkteste Vergrößerung entsteht mit einer Lupe, in der nur eine Sammellinse vorhanden ist. Das Auge verlängert die Lichtstrahlen, die parallel ankommen gerade aus weiter und glaubt deshalb, dass der Gegenstand größer ist. Um ein möglichst großes Bild zu erzeugen, muss der Gegenstand möglichst nah beim Brennpunkt sein, aber nicht dahinter sonst ist der Gegenstand verkehrt herum und die Vergrößerung geht wieder zurück.

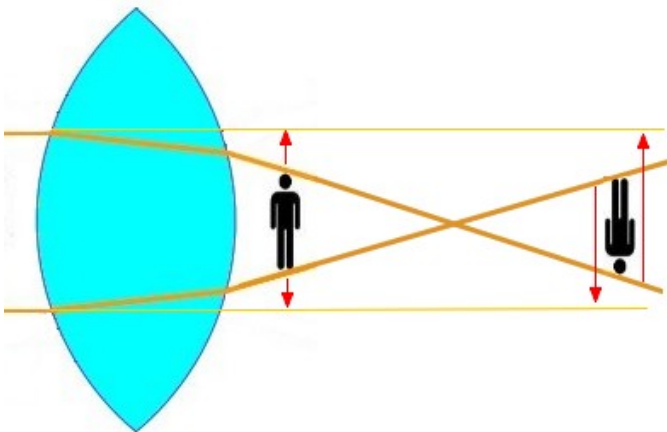


Abb. 12: Die vom Auge verlängerten Lichtstrahlen sind blasser und dünner eingezeichnet, welcher Teil des Körpers sich scheinbar an welcher Stelle befindet ist mit roten Pfeilen angegeben.

Für eine starke Vergrößerung ist das nicht besonders praktikabel, weil der Gegenstand nicht ganz glatt ist und jeder geringe Entfernungsunterschied gleich zu einer weniger starken Vergrößerung oder Spiegelung eines Teils

des Gegenstands führt.

Das Problem kann man lösen, indem man mehrere Linsen hintereinander stellt, um das vergrößerte Bild nochmals zu vergrößern. Dabei potenziert sich die Vergrößerung, sodass man mit nur wenigen Linsen ein sehr viel größeres Bild erhält.

Die Grenze ist erst dann erreicht, wenn das Licht so weit auseinander gestreut wird, dass der Gegenstand zu dunkel ist. Durch die Lichtabsorption der Glaslinse ist diese Grenze schneller als notwendig erreicht. Deshalb versucht man bei modernen Teleskopen möglichst viel mit Spiegeln und möglichst wenig mit Linsen zu vergrößern.

Die historischen Teleskope, bei denen die Vergrößerung ausschließlich mit Linsen erreicht wurde, bezeichnet man als Linsenteleskope, die Fernrohre bei denen auch Spiegel verwendet werden als Spiegelteleskope.

Linsenteleskope

Es gibt 2 Arten von Linsenteleskopen.

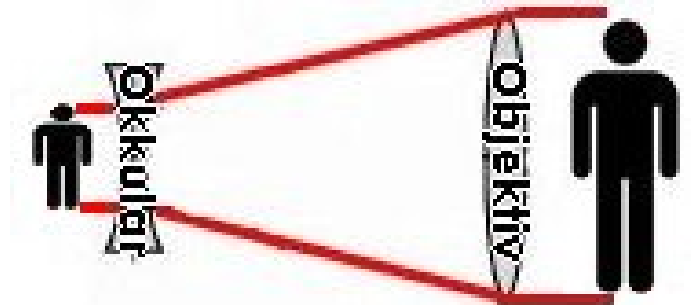


Abb. 13: Beim Holländischen Fernrohr werden die Lichtstrahlen gleich zweimal gebrochen: Das eine Mal, damit man das Bild vergrößert sieht und das zweite Mal, damit das Bild wieder richtig herum steht. Bei jeder Brechung wird die Bildqualität schwächer. Als es erfunden wurde, war es dennoch das beste Teleskop, dass es gab, sodass Galilei damit einige Entdeckungen machen konnte. Inzwischen ist es aber viel zu ungenau und wird nur noch für kurze Entfernungen verwendet.

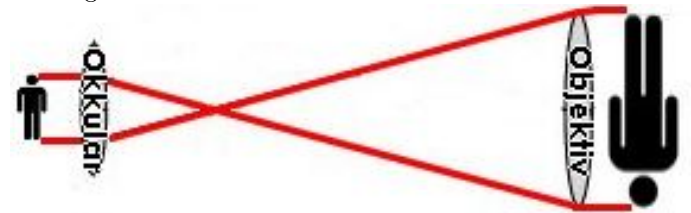


Abb. 14: Das Astronomische Fernrohr bricht das Licht nur zum Vergrößern. Deshalb ist es auch um einiges genauer. Der Nachteil ist, dass das Bild auf dem Kopf steht. Das ist aber nicht so schlimm, weil man das Bild mit jedem gewöhnlichen Zeichenprogramm drehen kann. Inzwischen wird auch dieses Linsenfernrohr nicht mehr wissenschaftlich verwendet, weil Spiegelteleskope noch genauer sind.

Spiegelteleskope

Es gibt 5 Arten von Spiegelteleskopen mit unterschiedlichen Reihenfolgen von Spiegeln und Linsen. Diese unterschiedlichen Kombinationen werden als Fokusse bezeichnet.

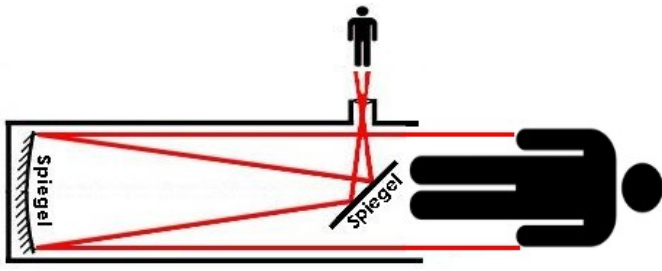


Abb. 15: Beim Newtonfokus fällt das Licht auf einen Spiegel, der um 45° geneigt ist. Deshalb wird es im rechten Winkel gebrochen. Man verwendet diesen Fokus heute nur noch in der Privatastronomie.

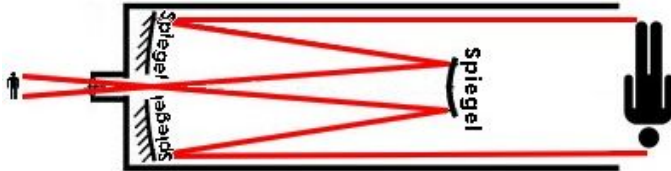


Abb. 16: Beim Cassegrainfokus fällt das Licht auf einen Hauptspiegel der die Form einer verkürzten Parabel hat. Die Lichtstrahlen werden auf beide Seiten reflektiert. Auf den Seiten steht je ein Fangspiegel, der die Lichtstrahlen wieder parallel zurückwirft.

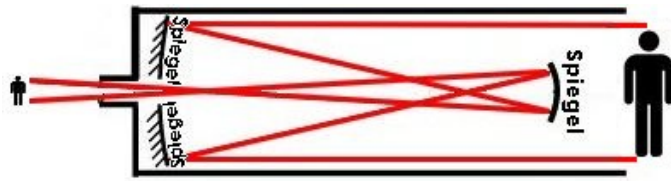


Abb. 17: Im Gegensatz zum Cassegrain-Fokus ist der Hauptspiegel beim Gregoryfokus genau in die andere Richtung gekrümmt. Die Lichtstrahlen werden also auch genau in die entgegengesetzte Richtung reflektiert. Das hat den Vorteil, dass das Bild aufrecht erscheint.

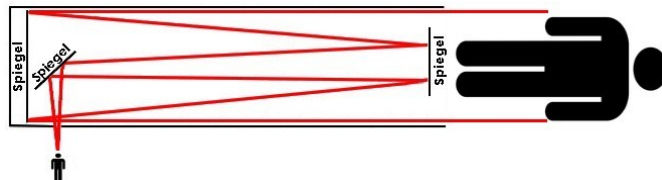


Abb. 18: Der Coudéfokus ist eine Kombination aus Cassegrain-Fokus und Newton-Fokus. Zuerst werden die Lichtstrahlen so wie beim Cassegrain-Fokus parallel gebrochen. Dann werden sie, so wie beim Newtonfokus, rechtwinklig gebrochen.

Der Nasmythfokus funktioniert genauso wie der Coudéfokus, nur dass die Anordnung um 90° gedreht ist.

1. Aufgabe: Brennweite und Hauptebene eines Photoobjektivs

Bei der ersten Aufgabe sollten wir die Brennweite und die Lage der Hauptebene einer Kamera des Typs Tessar bestimmen. Beim Typ Tessar werden mehrere konvexe und konkave Linsen hintereinander gestellt um eine besonders gute Bildqualität zu erzeugen.

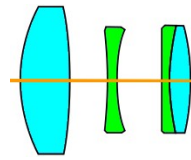


Abb. 19: Linsenanordnung beim Typ Tessar. Konvexe Linsen sind blau, konkave Linsen grün dargestellt. Bild aus (1)

Zuerst haben wir Kamera und Schirm in eine optische Bank gesteckt. Das ist eine Bahn, die dafür sorgt, dass die Instrumente nur in eine Richtung verschiebbar sind, sodass der Schirm immer parallel zur mittleren Achse der Linsen ist.

Um die Brennweite zu messen, muss man zuerst die Vergrößerung messen. Das erreicht man, indem man statt dem Schirm einen ebenen Spiegel in die optische Bank einspannt. Da der Einfallswinkel 90° ist, wird das Licht auf der selben Bahn zurückgeworfen und kommt wieder am Ausgangspunkt an.

Wenn man auf den Spiegel einen Maßstab aufträgt, wird dieser auf den Gegenstand zurückgeworfen und man sieht den Maßstab des Bildes auf dem Gegenstand. Diesen Vorgang nennt man Autokollimation.

Als nächstes nimmt man ein Instrument, dessen Brennweite man bereits kennt und misst auch bei diesem die Vergrößerung durch Autokollimation. Dieses Instrument nennt man Prüfling.

Da das Verhältnis zwischen Brennweite und Vergrößerung immer gleich ist, kann man in die Formel

$$\frac{V}{V_P} = \frac{f}{f_P} \quad (2)$$

die beiden Vergrößerungen und die Brennweite des Prüflings einsetzen um die gesuchte Brennweite zu erhalten.

2. Aufgabe: Chromatische Aberration

Chromatische Aberration ist ein Abbildungsfehler bei Linsen, der dadurch entsteht, dass unterschiedliche Wellenlängen des Lichts mit einem unterschiedlichen Winkel gebrochen werden. Wenn der Winkel größer ist, ist auch der Brennpunkt näher.

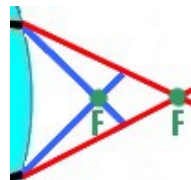


Abb. 20: Da blaues Licht stärker als rotes Licht gebrochen wird, ist der Brennpunkt beim blauen Licht näher an der Linse und die Brennweite deshalb kürzer.

Wir sollten die Abhängigkeit zwischen Brennweite und Wellenlänge des Lichts herausfinden. Das erreicht man, indem man nur Licht mit derselben Wellenlänge durch die Linse schickt.

Um das Licht nach Wellenlänge zu filtern, benutzt man wiederum die chromatische Aberration: Man lässt das Licht durch ein Prisma (Dreieckiges Glas) fallen. Das Licht wird beim Eintreten ins Glas und beim Austreten aus dem Glas in die selbe Richtungen gebrochen und die chromatische Aberration verstärkt.

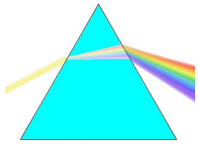


Abb. 21: Brechung des Lichts am Prisma. Das kurzwellige Licht wird stark gebrochen und ist daher unten, das langwellige nur schwach und ist daher oben. Bild aus (2)

Das Prisma befindet sich in einem Gerät namens Monochromator. Auf beiden Seiten des Monochromators ist ein Loch. Durch das Loch auf der linken Seite lässt man einen Lichtstrahl, bei dem sich alle Wellenlängen überlagern einfallen. Hinter dem Prisma ist ein verschiebbares Loch, durch das nur einer der Lichtstrahlen durchkommt.

Um die Brennweite aller Wellenlängen zu messen, haben wir das Loch von ganz unten, wo der kurzwelligste Lichtstrahl aus der Öffnung austritt, nach ganz oben wo der langwelligste Lichtstrahl aus der Öffnung austritt verschoben. Bei jeder Einstellung haben wir die Brennweite gemessen und den Wert in die Funktion eingetragen.

References

- [1] SPG v14.2.0., https://de.wikipedia.org/wiki/Verkittung#/media/Datei:Zeiss_Tessar.svg, Ericd, 31.12.2015
- [2] SPG v14.2.0., [https://de.wikipedia.org/wiki/Dispersion_\(Physik\)#/media/Datei:Prism-rainbow.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Dispersion_(Physik)#/media/Datei:Prism-rainbow.svg), Suidroot, 17. März 2008