

Optisches Praktikum, Aufgabe 12:
Aufbau eines Doppelmonochromators

1. Ziel der Aufgabe

- Aufbau und Justierung eines Doppelmonochromators
- Kennenlernen der wichtigsten Begriffe aus der Farbmeterik

2. Grundlagen

2.1 Dispersion

In jedem optischen Medium, außer dem Vakuum, ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen, also auch des Lichts, eine Funktion der Wellenlänge λ . Diese Eigenschaft wird durch den materialspezifischen Brechungsindex n gekennzeichnet. Der Brechungsindex gibt das Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum zu der im Medium an:

$$n(\lambda) = \frac{c}{v(\lambda)}$$

c = Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

v = Lichtgeschwindigkeit im Medium

Die Änderung des Brechungsindex mit der Wellenlänge $\frac{dn}{d\lambda}$ wird als Materialdispersion bezeichnet. Im Bereich der normalen Dispersion gilt $\frac{dn}{d\lambda} < 0$ (siehe Abb. 1), bei anomaler Dispersion, die bei den üblichen optischen Medien nur im Ultravioletten und Infraroten auftritt, gilt $\frac{dn}{d\lambda} > 0$. Die Eigenschaft der Dispersion wird u.a. bei der spektralen Zerlegung des Lichts durch Prismen ausgenutzt. Dabei wird ein paralleles, nichtmonochromatisches Lichtbündel durch ein Prisma in seine spektralen

Anteile zerlegt (siehe Abb. 2). Es ist dabei wichtig, daß das Lichtbündel senkrecht zur Kante des Prismas auftrifft (*Warum?*).

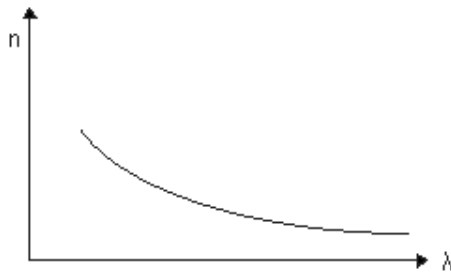


Abb.1: Kurvenverlauf von $n = n(\lambda)$
für normale Dispersion

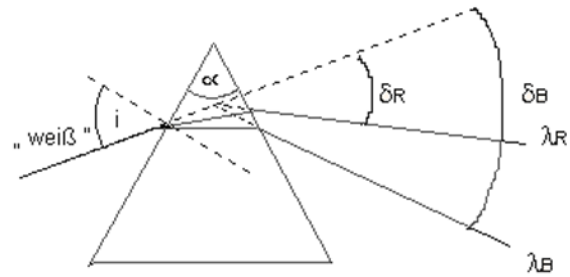


Abb.2: Dispersion bei einem Prisma
(R=Rot, B=Blau)

Das Lichtbündel muß parallel sein, damit alle Teilstrahlen gleicher Wellenlänge λ die gleiche Ablenkung d erfahren. Die Änderung der Ablenkung mit der Wellenlänge $\frac{dd}{d\lambda}$ bezeichnet dann die Winkeldispersion. Sie setzt sich zusammen aus:

- der Materialdispersion $\frac{dn}{d\lambda}$, die den Einfluß des Prismenmaterials kennzeichnet,
- dem Ausdruck $\frac{dd}{dn}$, der eine Funktion des Prismenwinkels α und des Einfallswinkels i ist.

$$\frac{dd}{d\lambda} = \frac{dn}{d\lambda} \cdot \frac{dd}{dn}$$

2.2 Der Monochromator

Die Eigenschaft der Dispersion wird für den Aufbau von Prismenmonochromatoren ausgenutzt. Dabei wird das Licht einer spaltförmigen Lichtquelle durch ein Prisma geschickt und in seine spektralen Anteile zerlegt. Die Teilstrahlen werden dann durch ein Objektiv auf den Austrittsspalt, der die Funktion hat, bestimmte Spektralabschnitte auszublenden, abgebildet (siehe Abb. 3). Die *Breite* des Austrittsspalt bestimmt die Größe des durchgelassenen Wellenlängenintervalls, seine *Lage* hingegen bestimmt dessen mittlere Wellenlänge. *Wie beeinflusst die Breite des Eintrittsspalt das entstehende Spektrum?*

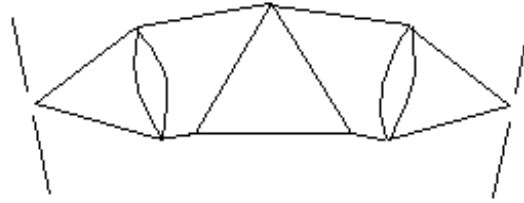


Abb. 3: Einfacher Prismenmonochromator

Infolge der unvermeidlichen Streuung und Mehrfachreflexion an Linsen und Prismen wird das Spektrum eines einfachen Prismenmonochromators stets von Falschlicht überlagert sein. Die spektrale Reinheit wird wesentlich verbessert, wenn man das Licht zwei Monochromatoren hintereinander durchlaufen läßt. Dabei wird der Austrittsspalt des ersten Monochromators als Eintrittsspalt des zweiten genutzt. So eine Anordnung nennt man Doppelmonochromator. Im Aufbau unterscheidet man zwischen additiver und subtraktiver Dispersion. Schaltet man beide Monochromatoren so hintereinander, daß ein von dem ersten durchgelassenes Teilspektrum im zweiten weiterdispergiert, so nennt man dies additive Dispersion. Ordnet man den zweiten Monochromator so an, daß dieser die Dispersion des Ersten wieder rückgängig macht, so spricht man von subtraktiver Dispersion (siehe Abb. 4a und 4b).

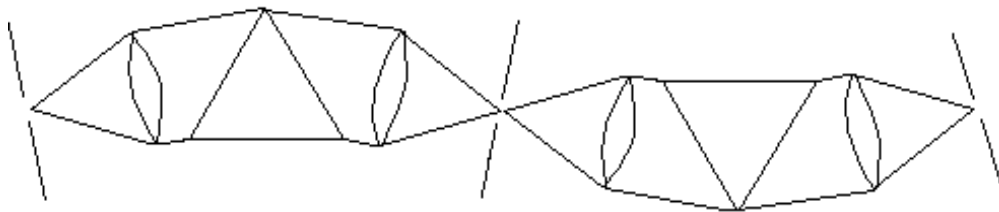


Abb. 4a: Additive Dispersion

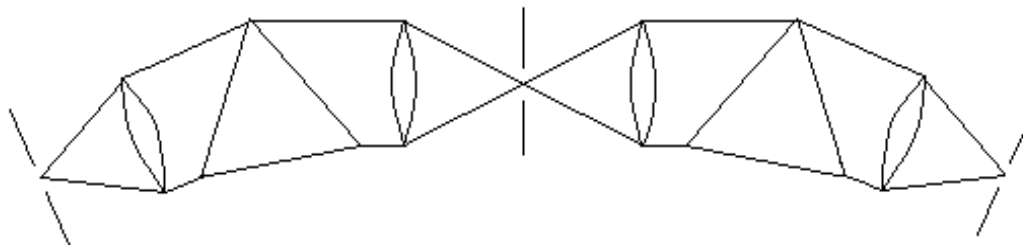


Abb. 4b: Subtraktive Dispersion

In beiden Anordnungen bestimmen Breite und Lage des Mittelspalt es durchgelassenen Spektralbereich. Die Einstellung eines gewünschten Farbeindrucks im

Austrittsspalt läßt sich bei dieser Anordnung durch einfache seitliche Verschiebung des Mittelspalts längs des Spektrums bewirken, ohne daß die Prismen bewegt werden müssen. Dieses Vorgehen eignet sich zur Herstellung beliebiger Farbmischungen im Austrittsspalt durch Einfügen mehrerer Spalte an verschiedenen Stellen des zwischen beiden Monochromatoren entworfenen Spektrums.

2.3 Elementare Begriffe aus der Farbmatrik:

Farbe ist eine Sinneswahrnehmung, die von einem Farbreiz (vom Auge aufgenommenes Licht) ausgelöst und von physiologischen sowie psychologischen Faktoren beeinflusst wird. Farbe kann als *freie* oder *gebundene* Farbe gesehen werden. Während die freie Farbe dem Auge flächenhaft und strukturlos erscheint, wird die gebundene Farbe immer mit Materie verknüpft gesehen.

Weiterhin unterscheidet man *bunte* und *unbunte* Farben. Unbunte Farben unterscheiden sich nur durch ihre Helligkeit untereinander (Schwarz, Grau und Weiß). Bunte Farben werden durch Farbton, Helligkeit und Sättigung (Grad der Buntheit im Vergleich zum gleich hellen Unbunt) gekennzeichnet. Eine *Optimalfarbe (Vollfarbe)* hat von allen bunten Farben gleichen Farbtons die größte Helligkeit und Sättigung. Bei der Mischung bzw. Wirkung von Farbreizen unterscheidet man zwischen *additiver* und *subtraktiver (multiplikative) Farbmischung*. Bei der additiven Farbmischung wirken Farbreize zusammen. Entweder treffen verschiedene Farbreize gleichzeitig das Auge (wie z.B. beim Fernseher), oder sie erregen periodisch die Netzhautelemente in rascher Reihenfolge hintereinander. Die additive Mischung gehorcht dem *Farbmetrischen Grundgesetz*.

Das helladaptierte, trichromatische Auge bewertet die einfallende Strahlung nach drei voneinander unabhängigen spektralen Wirkungsfunktionen (Rot, Grün, Blau) linear und stetig, wobei sich die Einzelwirkungen zu einer untrennbaren Gesamtwirkung addieren. Zwischen je vier wahrgenommenen Farbreizen besteht immer eine eindeutige, lineare Beziehung, das *Grassmann'sche Gesetz*:

$$\mathcal{F}(R, G, B) = \mathcal{R}R + \mathcal{G}G + \mathcal{B}B$$

Dabei ist zu beachten, daß verschiedene Kombinationen von Farbreizen gleiche Farbwahrnehmung bewirken können. Bunte Farben, die sich in additiver Mischung zu Unbunt kompensieren lassen, werden als *kompensative Farben* bezeichnet.

Komplementärfarben sind Vollfarben, die sich in additiver Mischung zu Weiß verbinden, d.h. jeder Vollfarbe, die aus einem bestimmtem Gebiet des Spektrums resultiert, entspricht eine eindeutig festgelegte Komplementärfarbe, die sich aus dem übrigen Teil des Spektrums ergibt.

Subtraktive Farbmischung liegt vor, wenn Licht einer bestimmten spektralen Zusammensetzung einen oder mehrere Farbfilter durchläuft, bzw. erst nach Auftreffen auf einer Oberfläche gesehen und dadurch in seiner Zusammensetzung verändert wird (Farbmischung in der Malerei). Bei der subtraktiven Farbmischung multiplizieren sich die Transmissionsgrade miteinander und mit der Strahlungsfunktion der Lichtquelle.

3. Aufgaben

3.1 Aufgabenstellung

Es soll ein Doppelmonochromator bei additiver und subtraktiver Dispersion aufgebaut und justiert werden. Zur Vereinfachung des Aufbaus werden dabei Geradsichtprismen verwendet.

Anschließend sind die Kenntnisse über Farben experimentell nachzuempfinden.

3.2 Hinweise zum Aufbau

Beim Aufbau des Doppelmonochromators ist neben dem Abbildungsstrahlengang die Abbildung der Lichtquelle zu betrachten, da der Eintrittsspalt nicht selbstleuchtend ist. Die Abbildungen von Objekt und Lichtquelle sollen in der von A. Köhler angegebenen Weise „verkettet“ werden.

Dazu überlege man sich, welche Bauelemente für Abbildungsstrahlengang (abzubildendes Objekt: Eintrittsspalt) und Beleuchtungsstrahlengang (abzubildendes Objekt: Lampenwendel) jeweils die Funktion der Aperturblende bzw. der Gesichtsfeldblende übernehmen. Aus der Köhler'schen Forderung, daß die Bilder der Aperturblende des einen Strahlenganges mit den Bildern der Gesichtsfeldblende des anderen zusammenfallen müssen, ergibt sich dann der vollständige Aufbau des Doppelmonochromators.

Beim Aufbau beginnt man zweckmäßiger Weise mit der Abbildung des Eintrittspaltes nach Unendlich durch das erste Objektiv (Prüfung mittels eines Dioptrienfernrohrs). Anschließend bilde man die Lampenwendel mit einem Kondensator in das erste Prisma ab.

Der weitere Aufbau erfolgt gemäß der Anordnung des Doppelmonochromators und der Erfordernisse des Köhler'schen Strahlenganges.

Bei richtiger Justierung darf das auf dem Austrittsspalt liegende Bild des Eintrittspaltes keinen Farbstich mehr zeigen, wenn der Mittelspalt so weit geöffnet ist, daß das gesamte Spektrum durchgelassen wird. Zur Kontrolle der Justierung ist anschließend das Bild der Lampenwendel mit einer Feldlinse farbstichfrei auf den Wandschirm zu projizieren.

3.3 Fragen zur Vorbereitung

- Zeichnen Sie vollständigen Strahlengang nach A. Köhler. Zur Vereinfachung werde dabei von der Dispersion abgesehen. Die Prismen werden als dünne planparallele Platten gezeichnet.
- Welche Funktion hat ein Geradsichtprisma? Wie wird es realisiert?
- Warum setzt man beim Doppelmonochromator bei additiver Dispersion nicht einfach zwei Prismen unmittelbar hintereinander?
- Warum ist der Aufbau bei additiver Dispersion nicht spiegelsymmetrisch, wie man zunächst annehmen könnte?

Literatur

1. F. Kohlrausch: **Praktische Physik I**
Teubner-Verlag, Stuttgart, 1985
2. K. Mütze: **ABC der Optik**
Dausien-Verlag, Hanau, 1972
3. Bergmann, Schaefer: **Lehrbuch der Experimentalphysik**
de Gruyter - Verlag, Berlin, 1993, Band III, Optik