

aus vom Filter hindurchgelassenem (Φ_d) zum auf das Filter auftreffenden (Φ_0) Strahlungsfluss. Wegen der zusätzlichen Reflexionsverluste (Mehrfachreflexion an beiden Oberflächen) ist τ kleiner als \mathcal{G} . Mit einem von der Brechzahl abhängigen Reflexionsgrad $\rho < 1$ gilt

$$\tau = (1 - \rho) \cdot \mathcal{G} \quad (2-3)$$

Analog zum Zusammenhang zwischen Reintransmissionsgrad und Extinktion $E = -\lg \mathcal{G}$ wird dem Transmissionsgrad τ die optische Dichte $D = -\lg \tau$ zugeordnet. Durch die Verwendung der Dichte werden die Bereiche niedriger Transmission besser aufgelöst. Das menschliche Auge empfindet zudem gleich große Dichteunterschiede als gleich, gleich große Transmissionsunterschiede aber nicht.

Die Transmission ist i. A. wellenlängenabhängig und wird durch den spektralen Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ beschrieben.

Der von einer Lichtquelle in einem bestimmten Wellenlängenintervall der Breite $\Delta\lambda$ ausgesendete Strahlungsfluss $\Delta\Phi$ ist ebenfalls von der Wellenlänge abhängig und wird durch den spektralen Strahlungsfluss charakterisiert. Dieser beschreibt das Verhältnis des Strahlungsflusses $\Delta\Phi$ im Wellenlängenintervall $\Delta\lambda$ und für den infinitesimalen Grenzübergang $\Delta\lambda \rightarrow 0$:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial\lambda}(\lambda) = \lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\lambda} \quad .$$

Von solch einer polychromatischen Lichtquelle werde nun ein Filter der spektralen Transmission $\tau(\lambda)$ bestrahlt.

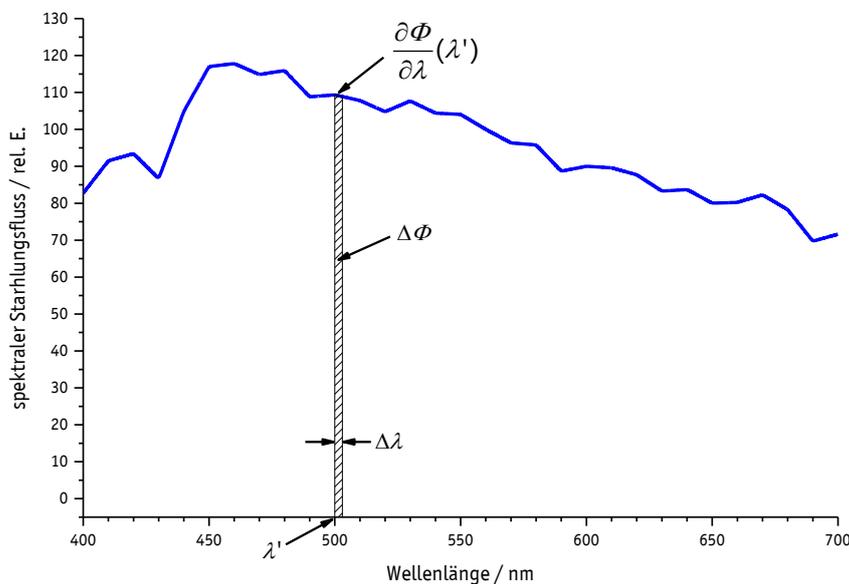


Bild 2 Spektraler Strahlungsfluss der Normlichtart D65 (Tageslicht)

Der spektrale Strahlungsfluss hinter dem Filter der Dicke d wird dann

$$\frac{\partial\Phi_d}{\partial\lambda}(\lambda) = \tau(\lambda) \cdot \frac{\partial\Phi_0}{\partial\lambda}(\lambda) \quad (2-4)$$

sein.

Voraussetzung für die Messung der spektralen Transmission $\tau(\lambda)$ ist die Möglichkeit, den spektralen Fluss sowohl vor als auch hinter dem Filter zu messen. Dies geschieht mithilfe eines Spektrometers, das das eintreffende Licht in seine verschiedenen Wellenlängen, genauer in viele einzelne Wellenlängenintervalle $\Delta\lambda$, zerlegt und diese Teilflüsse vermisst.

Der spektrale Transmissionsgrad bei einer bestimmten Wellenlänge λ' ergibt sich dann in guter Näherung als Verhältnis des transmittierten zum aufgestrahlten Teilfluss im relevanten Wellenlängenintervall $\Delta\lambda'$

$$\tau(\lambda') \approx \frac{\frac{\Delta\Phi_d}{\Delta\lambda}(\lambda')}{\frac{\Delta\Phi_0}{\Delta\lambda}(\lambda')} = \frac{\Delta\Phi_d(\lambda')}{\Delta\Phi_0(\lambda')} \quad (2-5)$$

Die Gesamtheit aller spektralen Transmissionsgrade bildet die Kurve der spektralen Transmission $\tau(\lambda)$.

Bestrahlt man jedoch mit polychromatischer Strahlung $\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda}(\lambda)$ und bewertet die Strahlung mit einem Empfänger der Spektralempfindlichkeit $\varepsilon(\lambda)$, so ergibt sich ein Messwert M nach:

$$M = K \cdot \int \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot d\lambda \quad , \quad (2-6)$$

wobei K eine einheitenbehaftete Kalibrationskonstante darstellt. Ist der Empfänger das menschliche Auge, kann man seine Farbwahrnehmung beschreiben, in dem man analog zur spektralen Empfindlichkeit $\varepsilon(\lambda)$ den drei Zapfentypen des Auges jeweils eine Empfindlichkeitsfunktion, die sogenannten Normspektralwerte $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ bzw. $\bar{z}(\lambda)$ zuweist. Die Kalibrationskonstante ist dann gleich dem photometrischen Äquivalent $C = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$. Die drei so entstehenden Werte bezeichnet man als Normfarbwerte des Auges X , Y und Z :

$$\begin{aligned} X &= C \cdot \int \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda \quad , \\ Y &= C \cdot \int \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda \quad , \\ Z &= C \cdot \int \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda \quad . \end{aligned} \quad (2-7)$$

Ihre Anteile $x = \frac{X}{X+Y+Z}$ und $y = \frac{Y}{X+Y+Z}$ spannen die Normfarbtafel auf.

Dem Farbwert Y kommt hierbei eine besondere Bedeutung zu. Da der Normspektralwert $\bar{y}(\lambda)$ identisch ist mit der spektralen Hellempfindlichkeit des Auges, stellt der Farbwert Y ein Maß für die wahrgenommene Helligkeit dar. Für ein Filter bezeichnet man das Verhältnis der Helligkeit des transmittierten Lichts zu der des aufgestrahlten als visuellen Transmissionsgrad $\tau_{\text{vis}} = \frac{Y_d}{Y_0}$.

3 Versuchsanordnung

Die Messung spektraler Strahlungsflüsse wird im vorliegenden Fall von einem Spektrometer durchgeführt, in dem das einfallende Licht durch ein Gitter räumlich getrennt und die Teilflüsse der einzelnen Wellenlängenintervalle mittels eines Detektorarrays gemessen werden. Als Lichtquelle dient eine Halogenglühlampe.

Das Licht dieser Lampe durchläuft eine Probenhalterung, in die ein oder mehrere Filter eingelegt werden können und wird dann in eine Glasfaser eingekoppelt, die es zum Spektrometer leitet. In diesem werden die unterschiedlichen Wellenlängenanteile des einfallenden Lichts durch Beugung an einem Gitter räumlich getrennt. Sie fallen anschließend auf ein Detektorarray, mit dem die Teilflüsse der einzelnen Wellenlängenintervalle gemessen werden. Der gemessene spektrale Strahlungsfluss wird auf dem angeschlossenen Computer numerisch angezeigt und graphisch dargestellt. Aus diesen Daten können per Tabellenkalkulation die spektralen Transmissionsgrade der eingesetzten Filter berechnet werden.

Auf dem Computer sind auch die spektralen Flüsse für verschiedene Normlichtarten, u.a. das Tageslicht D65, sowie die Normspektralwerte des menschlichen Auges abgespeichert. Mit Hilfe dieser Daten können die Normfarbwerte und weitere farbmimetrische Größen für die Filterproben berechnet werden.

Den Reintransmissionsgrad \mathcal{G} eines Filters bestimmt man aus Transmissionsmessungen an zwei Filtern gleichen Materials aber unterschiedlicher Dicke. Bei einer Dicke d sei $\tau_d = (1-\rho) \cdot \mathcal{G}$, dann ist (z. B.) bei doppelter Dicke $2d$ der Transmissionsgrad $\tau_{2d} = (1-\rho) \cdot \mathcal{G} \cdot \mathcal{G}$.

Also ist

$$\frac{\tau_{2d}}{\tau_d} = \frac{(1-\rho) \mathcal{G} \mathcal{G}}{(1-\rho) \mathcal{G}} = \mathcal{G} \quad . \quad (3-1)$$

Der Reflexionsgrad ρ eines Filter lässt sich dann aus Transmissionsmessungen bestimmen gemäß:

$$\rho = 1 - \frac{\tau}{g} .$$

(3 - 2)

4 Aufgaben

- 4.1 a) Messen Sie den von der Lichtquelle (Halogenglühlampe) emittierten spektralen Strahlungsfluss.
 b) Messen Sie für drei Farbfilter den transmittierten spektralen Strahlungsfluss.
 c) Berechnen Sie aus den Daten von a) und b) die spektrale Transmissionsgrade $\tau(\lambda)$ der drei Filter sowie die zugehörigen spektrale Dichte $D(\lambda)$. Stellen Sie die Ergebnisse graphisch dar.
- 4.2 Wiederholen Sie die Messung nach 4.1 b) für eine Kombination jedes Filters mit einem Graufilter und werten Sie die Ergebnisse entsprechend 4.1 c) aus. Vergleichen Sie das Resultat mit dem von 4.1 c).
- 4.3 Berechnen Sie für jedes der drei Farbfilter die Normfarbwerte X , Y und Z sowie ihre Anteile x und y bei Bestrahlung der Filter mit Normlicht D65. Tragen Sie alle Farborte in die Normfarbtafel ein.
- 4.4 Wiederholen Sie die Berechnungen aus 4.3 für die Kombination der Filter mit einem Graufilter entsprechend 4.2.
- 4.5 Ermitteln Sie die visuellen Transmissionsgrade der Filter und ihrer Kombination mit dem Graufilter.
- 4.6 Ermitteln Sie für eine der Filterproben (bei einer bestimmten Wellenlänge) Transmissionsgrad τ , Reintransmissionsgrad g und Schichtdicke d , und berechnen Sie Dichte D , Extinktion E , spezifische Extinktion ε und Reflexionsgrad ρ .

5 Fragen

- 5.1 Was verstehen Sie unter dem Begriff Transmissionsgrad? Erläutern Sie anschaulich die Bedeutung des spektralen sowie des visuellen Transmissionsgrads. Was ist die optische Dichte?
- 5.2 Der Strahl eines Laserpointers mit einem Strahlungsfluss von 1 mW wird durch ein Filter auf 0,2 mW reduziert. Wie groß ist der Transmissionsgrad des Filters bei der Wellenlänge des Laserstrahls?
- 5.3 Welche Spektralfarben dominieren die Wellenlängenbereiche 400 nm bis 500 nm, 500 nm bis 600 nm und 600 nm bis 700 nm?
- 5.4 Zwei Filter (1 und 2) haben bei $\lambda = 550$ nm folgende Werte: $D_1 = 0,63$, $\tau_2 = 0,47$. Wie groß sind dann bei dieser Wellenlänge Transmissionsgrad und Dichte der Filterkombination?
- 5.5 Drei gleiche Filter des Transmissionsgrades $\tau = 50\%$ werden hintereinander angeordnet. Berechnen Sie den Gesamttransmissionsgrad und die Gesamtdichte.
- 5.6 Zwei Filter (1 und 2) unterscheiden sich in der Dichte um $D_2 - D_1 = \Delta D = 2$. In welchem Verhältnis stehen ihre Transmissionsgrade?
- 5.7 Skizzieren Sie die typischen Verläufe der spektralen Transmissionsgrade eines Gelbfilters, eines Purpurfilters und eines Blaugrünfilters in ein Diagramm.
- 5.8 Erläutern Sie die subtraktive Farbveränderung beim Hintereinanderschalten eines Gelbfilters und eines Purpurfilters anhand der spektralen Dichten dieser Filter.
- 5.9 Skizzieren Sie die typischen Verläufe der spektralen Dichte eines Rotfilters, eines Grünfilters und eines Blaufilters in ein Diagramm.
- 5.10 Wie berechnet man den Nomfarbwert Y ?

Literatur

- | | | |
|-------|--------------------------------|--|
| [1] | Bergmann, L. und Schäfer, C. : | Lehrbuch der Experimentalphysik, Band III, Optik, Walter de Gruyter, 2004 |
| [2] | Leute, U.: | Optik für Medientechniker: Optische Grundlagen der Medientechnik, Carl Hanser Fachbuchverlag, 2011 |
| [3] | Gall, D.: | Grundlagen der Lichttechnik: Kompendium, Pflaum, 2007 |
| [4] | Richter, M. : | Einführung in die Farbmatrik, Walter de Gruyter, 2011 |