

Versuchsanleitung 07 : Transmissionsgrad

1 Einleitung

Fällt elektromagnetische Strahlung (z. B. Licht) auf einen Körper, wird ein Teil des auftreffenden Strahlungsflusses (der Strahlungsleistung) reflektiert. Der nicht reflektierte Strahlungsfluss dringt in den Körper ein und wird teilweise (oft auch vollständig) absorbiert. Ein ggf. nichtabsorbierter Anteil schließlich verlässt den Körper wieder als sogenannter transmittierter Strahlungsfluss.

Absorptionsfilter (es gibt auch Filter mit anderen physikalischen Wirkprinzipien wie z. B. Interferenzfilter oder Polarisationsfilter) sind transmittierende Körper. Wenn sie im Spektrum einer Lichtquelle bestimmte Bereiche dämpfen (oder gar sperren), werden andere, weniger gedämpfte Spektralbereiche dadurch hervorgehoben. Absorptionsfilter finden z. B. als Sperrfilter, Auszugsfilter oder Farbfilter Verwendung.

Die das Filter in oben erwähnter Hinsicht allgemeingültig kennzeichnenden Stoffeigenschaften sind seine spektrale Transmission bzw. spektrale Dichte. Andere Filterkenngrößen wie z. B. (aktinische) Transmissionsgrade und Dichten, Filterfaktoren oder Farbwerte sind außer von der spektralen Transmission des Filters auch von der benutzten Lichtart und den Eigenschaften des Messempfängers (bzw. des Auges) abhängig und demzufolge immer nur im entsprechenden Zusammenhang sinnvoll zu verwenden.

2 Grundlagen

Die Absorption im Filter hat zur Folge, dass die in das Filter eingetretene Strahlungsleistung ϕ_e bis zum Auftreffen auf die Austrittsfläche auf $\phi' = \mathcal{G} \phi_e$ absinkt. Das Verhältnis

$$\frac{\phi'}{\phi_e} = \mathcal{G} = 10^{-E} \quad (2-1)$$

heißt Reintransmissionsgrad \mathcal{G} .

Die Extinktion (Auslöschung) $E = -\lg \mathcal{G} = \varepsilon d$ ist ein logarithmisches Maß für \mathcal{G} und hängt mit dem Faktor ε (spezifische Extinktion) linear von der Schichtdicke d ab.

Als Transmissionsgrad τ bezeichnet man das Verhältnis

$$\tau = \frac{\phi_d}{\phi_0} \quad (2-2)$$

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 n abhängigen Reflexionsfaktor $P \approx \frac{2n}{n^2 + 1} < 1$ gilt

$$\tau = P \mathcal{G} \quad (2-3)$$

Analog zu $E = -\lg \mathcal{G}$ wird dem Transmissionsgrad τ die (optische) Dichte $D = -\lg \tau$ zugeordnet. Durch die Verwendung der Dichte werden die Bereiche niedriger Transmission besser aufgelöst wiedergegeben. Das menschliche Auge empfindet zudem gleich große Dichteunterschiede gleich stark, gleich große Transmissionsunterschiede aber nicht.

Die Transmission τ ist i. Allg. wellenlängenabhängig [spektrale Transmission $\tau(\lambda)$].

Der von einer Lichtquelle ausgesandte Strahlungsfluss ϕ wird von einem Spektrum von Wellen unterschiedlicher Wellenlänge transportiert. Die Verteilung des Strahlungsflusses auf diese Wellenlängen beschreibt man durch eine

Funktion $\frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda)$, den sogenannten spektralen Strahlungsfluss.

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

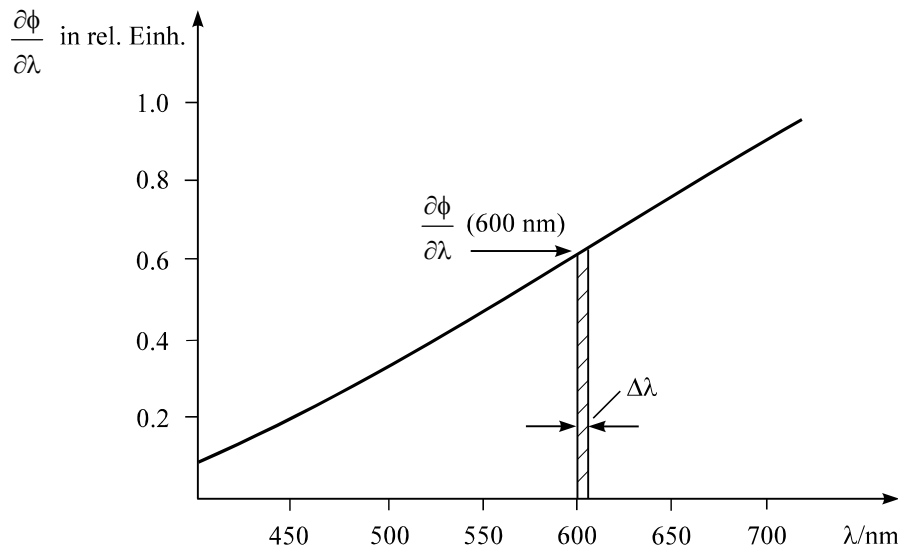


Bild 1 Spektraler Strahlungsfluss der Normlichtart A (Glühlicht)

Der spektrale Strahlungsfluss hinter dem Filter wird dann

$$\left[\frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda) \right]_d = \tau(\lambda) \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda) \quad (2-4)$$

sein.

Zur Messung der spektralen Transmission $\tau(\lambda)$ benötigt man monochromatische Strahlung.

Dazu greift man aus dem Spektrum der Lichtquelle an einer Stelle λ' (in Bild 1 bei 600 nm) ein Wellenlängenintervall der Breite $\Delta\lambda$ heraus. Das geschieht experimentell mit Hilfe eines Monochromators (vgl. Kapitel 3 dieser Anleitung). Der Flächeninhalt des markierten Streifens veranschaulicht den Anteil $\Delta\phi_0(\lambda')$ des Strahlungsflusses, der auf dieses Intervall $\Delta\lambda$ entfällt. Es gilt

$$\Delta\phi_0(\lambda') \approx \frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda') \cdot \Delta\lambda \quad (2-5)$$

Ist $\Delta\lambda$ bereits hinreichend klein (einige nm, unterschiedlich nach Spektralbereich), so bewirkt seine weitere Verkleinerung die Veränderung der Lichtfarbe nur noch in ihrer Helligkeit. Den Strahlungsfluss $\Delta\phi_0(\lambda')$ nennt man dann monochromatisch (einfarbig).

Richtet man den monochromatischen Strahlungsfluss $\Delta\phi_0(\lambda')$ einer bestimmten Wellenlänge λ' auf eine transmittierende Probe (Filter), so wird ein Teil $\Delta\phi_d(\lambda')$ davon hindurchgelassen werden.

Das Verhältnis

$$\frac{\Delta\phi_d(\lambda')}{\Delta\phi_0(\lambda')} \approx \frac{\left[\frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda') \right]_d \cdot \Delta\lambda}{\frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda') \cdot \Delta\lambda} = \tau(\lambda') \quad (2-6)$$

ist eine gute Näherung für den spektralen Transmissionsgrad $\tau(\lambda')$ der Probe (bei der gewählten Wellenlänge λ'). Wiederholt man das Experiment mit monochromatischen Strahlungsflüssen anderer Wellenlängen, erhält man i. Allg. andere Ergebnisse für die zugehörigen spektralen Transmissionsgrade. Die Gesamtheit aller spektralen Transmissionsgrade bildet die Kurve der spektralen Transmission $\tau(\lambda)$.

Bestrahlt man jedoch mit polychromatischer Strahlung $\left[\frac{\partial \phi}{\partial \lambda} \right]$ und bewertet die Strahlung mit einem Empfänger der Spektralempfindlichkeit $\varepsilon(\lambda)$ so stehen die Messwerte M (mit Probe) und M_0 (ohne Probe) im Verhältnis der aktinischen (d. h. auf den Empfänger wirksamen) Strahlungsflüsse. Dieses Verhältnis

$$\frac{M}{M_0} = \frac{\phi_d}{\phi_0} = \frac{\int \frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot d\lambda}{\int \frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot d\lambda} = \tau_{\text{akt}} \quad (2-7)$$

heißt aktinischer Transmissionsgrad τ_{akt} .

Sollte der Empfänger das menschliche Auge sein, so ist in (2 – 7) dessen spektraler Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ an die Stelle von $\varepsilon(\lambda)$ zu setzen. Aus dem aktinischen Transmissionsgrad τ_{akt} wird dann speziell der visuelle Transmissionsgrad τ_{vis} .

3 Versuchsanordnung

Zur Messung der spektralen Transmission wird ein Gitterspektralphotometer verwendet (Bild 2).

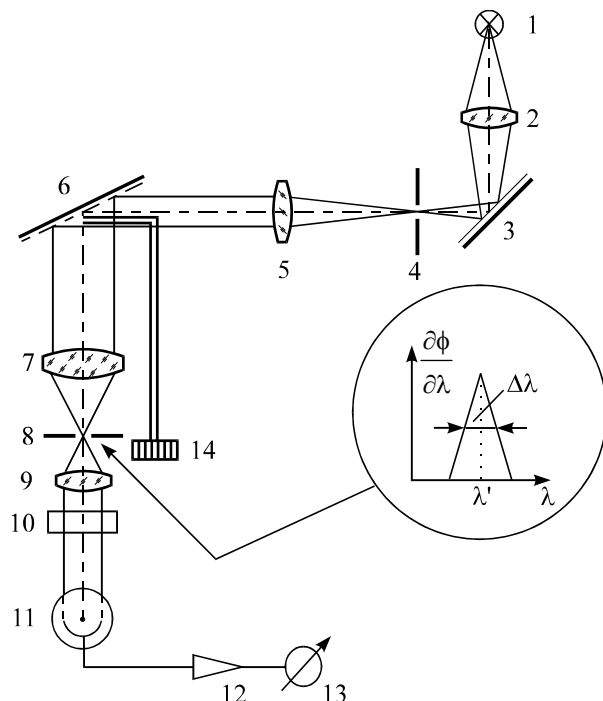


Bild 2 Gitterspektralphotometer (schematisch)

Die Wendel einer Glühlampe (1) wird vom Kondensor (2) über einen Umlenkspiegel (3) auf den Eintrittsspalt (4) des Monochromators abgebildet. Der Kollimator (5) bildet den Eintrittsspalt nach Unendlich ab, so dass ein paralleles Lichtbündel auf das Reflexions-Beugungsgitter (6) fällt.

Die Beugungsmaxima (erster Ordnung) bilden sich unter Winkeln aus, die von der Wellenlänge abhängen. Dreht man mittels der Wellenlängentrommel (14) das Gitter geeignet, so entsteht das Maximum für eine gewünschte Wellenlänge λ' gerade in Achsenrichtung. Der Achromat (7) fokussiert das Bündel auf den Austrittsspalt (8). Wegen dessen endlicher Ausdehnung gelangt auch Licht von (im Bild nicht dargestellten) Bündel benachbarter Wellenlängen (zum Teil) durch den Spalt (8), so dass der im Ausschnitt von Bild 2 gezeigte (annähernd) dreieckige Verlauf des spektralen Flusses mit der Halbwertsbreite (Breite in halber Höhe) $\Delta\lambda$ um die sogenannte Schwerpunktwellenlänge λ' entsteht.

Die Linse (9) schließlich formt ein Parallelbündel, das die Probe (10) durchsetzt und auf die Messeinrichtung [bestehend aus Photozelle (11), Verstärker (12) und Anzeige (13)] trifft.

Zur Bestimmung eines Transmissionsgrades $\tau(\lambda')$ wählt man zunächst an der Wellenlängentrommel die Wellenlänge λ' aus. Dann wird ohne Probe der Messwert $M_0(\lambda') \approx e(\lambda') \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda') \cdot \Delta\lambda$ mit der Verstärkung auf 100 Skalenteile eingestellt [$e(\lambda')$ ist die Spektralempfindlichkeit der Messeinrichtung bei λ']. Schließlich legt man die Probe ein und erhält bei gleicher Verstärkung den Wert $M(\lambda') \approx e(\lambda') \cdot \tau(\lambda') \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda') \cdot \Delta\lambda \approx 100 \cdot \tau(\lambda')$.

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

Also ist

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

Zur Messung integraler (aktinischer) Transmissionsgrade [vgl. (2 – 7)] können in einer gesonderten Anordnung die Filter mit verschiedenen Lampen bestrahlt und die Strahlungsflüsse mit unterschiedlich empfindlichen Empfängern bewertet werden.

4 Aufgaben

- 4.1 Messen Sie die spektrale Transmission $\tau(\lambda)$ und berechnen Sie die zugehörige spektrale Dichte $D(\lambda)$ einer Probe. Stellen Sie beide graphisch dar.
- 4.2 Messen Sie an der Probe aktinische Transmissionsgrade τ_{akt}
 - a) bei einer Lichtart mit zwei verschiedenen Empfängern und
 - b) mit einem Empfänger und bei zwei verschiedenen Lichtarten.
- 4.3 Berechnen Sie den visuellen Transmissionsgrad τ_{vis} der Probe für Normlichtart A .
- 4.4 Ermitteln Sie für eine Probe (bei einer festen Wellenlänge) Transmissionsgrad τ , Reintransmissionsgrad ρ und Schichtdicke d , und berechnen Sie Dichte D , Extinktion E und spezifische Extinktion ε .

5 Fragen

- 5.1 Welche Spektralfarben dominieren die Wellenlängenbereiche 400 nm bis 500 nm, 500 nm bis 600 nm und 600 nm bis 700 nm?
- 5.2 Ein paralleles polychromatisches Lichtbündel fällt senkrecht auf ein Beugungsgitter der Konstanten d . Unter welchen Winkeln α_2 kann man die Maxima 2.Ordnung beobachten?
- 5.3 Wovon ist ein aktinischer Transmissionsgrad abhängig?
- 5.4 Zwei Filter (Nr. 1 und Nr. 2) haben bei $\lambda = 550 \text{ nm}$ folgende Werte: $D_1 = 0,63$, $\tau_2 = 0,47$. Wie groß sind (bei $\lambda = 550 \text{ nm}$) Transmission und Dichte der Filterkombination?
- 5.5 Drei gleiche Filter des Transmissionsgrades τ (bzw. der Dichte D) werden hintereinandergeschaltet. 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 spektralen Transmissionsfunktionen 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.
- 5.9 Skizzieren Sie die typischen spektralen Dichtefunktionen eines Rotfilters, eines Grünfilters und eines Blaufilters in ein Diagramm.
- 5.10 Wie berechnet man den visuellen Transmissionsgrad?

Literatur

- | | | |
|-------|--------------------------------|--|
| [1] | Bergmann, L. und Schäfer, C. : | Lehrbuch der Experimentalphysik, Band III, Optik
Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1993
ISBN 3-11-012973-6 |
| [2] | Etzold, F. : | Lichttechnik (1. - 3.Lehrbrief)
(ehemalige) Zentralstelle des MHF, Dresden, 1987
Bestell-Nr. 02 1850 010/020/030 |
| [3] | Richter, M. : | Einführung in die Farbmatrik
Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1981
ISBN 3-11-008209-8 |