

Versuchsanleitung 0 8 : Remissionsgrad

1 Einleitung

Fällt elektromagnetische Strahlung (z. B. Licht) auf einen Körper, wird ein Teil des auftreffenden Strahlungsflusses (der Strahlungsleistung) von der Oberfläche des Körpers reflektiert. Der verbleibende Strahlungsfluss dringt in den Körper ein. Er wird entweder dort absorbiert oder vom Körper transmittiert.

Spektrale Zusammensetzung, geometrische Verteilung und Leistung der reflektierten Strahlung sind für die optische Beurteilung einer Oberfläche (Farbe, Glanz) maßgeblich. Wird die Oberflächenbeschaffenheit gezielt verändert (Färben, Bedrucken), so stellen die Farbwerte und Glanzzahlen Kenngrößen dar, die technologisch einzuhalten und zu überprüfen sind.

Der Reflexionsgrad der Oberfläche (das Verhältnis des von ihr in alle Richtungen des Halbraumes reflektierten Strahlungsflusses zu dem aus allen Richtungen auf sie auftreffenden Strahlungsfluss) ist für die oben genannten Kenngrößen nicht relevant.

Vielmehr vergleicht man bei gleichen Beleuchtungsbedingungen die Reflexion der Probenoberfläche mit der eines Weißstandards (Normalweiß), indem man die von beiden in die jeweils gleiche Richtung reflektierten Strahlungsflüsse in das Verhältnis setzt und dieses Verhältnis den Remissionsgrad β der Probe nennt.

Bei monochromatischer Bestrahlung hängt der Remissionsgrad i. Allg. von der Wellenlänge ab [spektrale Remission $\beta(\lambda)$].

Die eine Oberfläche hinsichtlich ihrer Remission allgemeingültig kennzeichnenden Stoffeigenschaften sind ihre spektrale Remission bzw. spektrale Dichte. Andere Kenngrößen der Oberfläche wie z. B. (aktinische) Remissionsgrade und Dichten oder Farbwerte sind außer von der spektralen Remission der Oberfläche immer auch von der benutzten Lichtart und den Eigenschaften des eingesetzten Messempfängers (bzw. des Auges) abhängig und demzufolge immer nur im entsprechenden Zusammenhang sinnvoll zu verwenden.

2 Grundlagen

Der von einer Lichtquelle ausgesandte und von einem Normalweiß (N) reflektierte Strahlungsfluss ϕ_N wird von einem Spektrum von Wellen unterschiedlicher Wellenlänge transportiert. Die Verteilung des Strahlungsflusses auf diese Wellenlängen beschreibt man durch eine Funktion $\frac{\partial \phi_N}{\partial \lambda}(\lambda)$, den sogenannten spektralen Strahlungsfluss.

Er ist dem spektralen Strahlungsfluss $\frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda)$ der Lichtquelle (siehe Bild 1) proportional, weil das Weißnormal (z. B. Bariumsulfat) wellenunabhängig (und diffus) reflektiert.

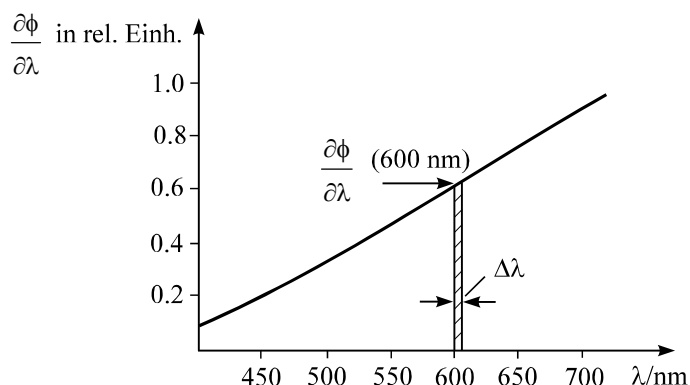


Bild 1 Spektraler Strahlungsfluss der Normlichtart A (Glühlucht)

Der von der Probe (P) reflektierte spektrale Strahlungsfluss $\frac{\partial \phi_P}{\partial \lambda}(\lambda)$ wird i. Allg. eine andere Verteilung besitzen, weil er durch die spektrale Remission $\beta(\lambda)$ der Probe modifiziert wird

$$\frac{\partial \phi_P}{\partial \lambda}(\lambda) = \beta(\lambda) \cdot \frac{\partial \phi_N}{\partial \lambda}(\lambda) \quad (2-1)$$

Der Messung des spektralen Remissionsgrades legt man z. B. die Messgeometrie 45/0 (Beleuchtung unter 45° und Messung unter 0° zur Probennormalen) zugrunde. Das entspricht etwa den Verhältnissen bei visueller Betrachtung einer Oberfläche. Bei anderen Messgeometrien (z. B. d/0) wird man i. Allg. auch andere Remissionsgrade finden.

Die Messung erfolgt mit monochromatischer 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. Experimentell geschieht das mit Hilfe eines Monochromators (vgl. Kapitel 3 dieser Anleitung). Der Flächeninhalt des markierten Streifens veranschaulicht den Anteil $\Delta\phi(\lambda')$ des Strahlungsflusses, der auf dieses Intervall $\Delta\lambda$ entfällt.

Es gilt

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

Macht man $\Delta\lambda$ hinreichend klein (einige nm, unterschiedlich nach Spektralbereich), so bewirkt eine weitere Verkleinerung von $\Delta\lambda$ eine Veränderung der Lichtfarbe nur noch in ihrer Helligkeit. Den Strahlungsfluss $\Delta\phi$ nennt man dann monochromatisch (einfarbig).

Richtet man den monochromatischen Strahlungsfluss $\Delta\phi(\lambda')$ einer bestimmten Wellenlänge λ' unter 45° zunächst auf das Normalweiß und dann auf die Probe, reflektieren diese die monochromatischen Flüsse $\Delta\phi_N(\lambda')$ und $\Delta\phi_P(\lambda')$ in die (durch eine Blende festgelegte) 0°-Richtung. Das Verhältnis

$$\frac{\Delta\phi_P(\lambda')}{\Delta\phi_N(\lambda')} \approx \frac{\frac{\partial \phi_P}{\partial \lambda}(\lambda') \cdot \Delta\lambda}{\frac{\partial \phi_N}{\partial \lambda}(\lambda') \cdot \Delta\lambda} = \beta(\lambda') \quad (2-3)$$

ist (näherungsweise) der spektrale Remissionsgrad $\beta(\lambda')$ 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 Remissionsgrade. Die Gesamtheit aller spektralen Remissionsgrade bildet die Kurve $\beta(\lambda)$ der spektralen Remission.

Bestrahlt man jedoch mit polychromatischer Strahlung $\left[\frac{\partial \phi}{\partial \lambda}\right]$ und bewertet die vom Normal N $[\beta_N(\lambda) \equiv 1]$ und der Probe P $[\beta(\lambda)]$ remittierte Strahlungen mit einem Empfänger der Spektralempfindlichkeit $\varepsilon(\lambda)$, so stehen die Messwerte M_P und M_N im Verhältnis der aktinischen (d. h. auf den Empfänger wirksamen) Strahlungsflüsse. Dieses Verhältnis

$$\frac{M_P}{M_N} = \frac{\Delta\phi_P}{\Delta\phi_N} = \frac{\int \frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot d\lambda}{\int \frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot d\lambda} = \beta_{\text{akt}} \quad (2-4)$$

heißt aktinischer Remissionsgrad β_{akt} .

Sollte der Empfänger das menschliche Auge sein, so ist in (2-4) dessen spektrale Hellempfindlichkeit $V(\lambda)$ an die Stelle von $\varepsilon(\lambda)$ zu setzen. Aus dem aktinischen Remissionsgrad β_{akt} wird dann speziell der visuelle Remissionsgrad β_{vis} .

Allen genannten Remissionsgraden lässt sich nach

$$D = -\lg \beta \quad (2-5)$$

eine optische Dichte zuordnen.

Durch die Verwendung der Dichte werden die Bereiche niedriger Remission besser aufgelöst wiedergegeben. Das menschliche Auge empfindet zudem gleich große Dichteunterschiede gleich stark, gleich große Remissionsunterschiede aber nicht.

3 Versuchsanordnung

Zur Messung der spektralen Remission wird ein Gitterspektralphotometer mit Remissionsansatz 45/0 verwendet (Bild 2).

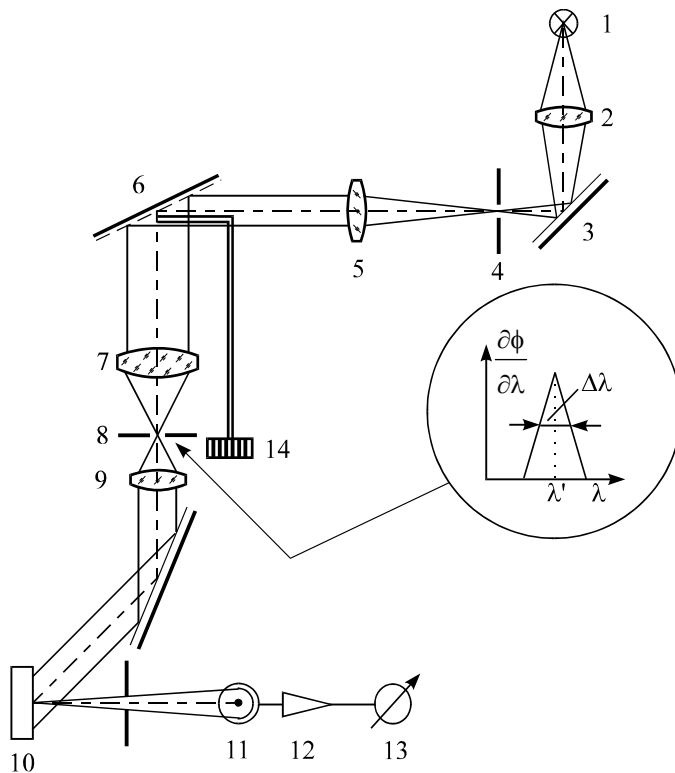


Bild 2 Gitterspektralphotometer (schematisch)

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 der endlichen Spaltbreite gelangt auch Licht von (im Bild nicht dargestellten) Bündeln 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 im Remissionsansatz unter 45° auf die Probe (10) gerichtet wird. Aus dem von der Probe in alle Richtungen reflektierten Strahlungsfluss wird nur die 0° -Richtung ausgeblendet und der Messeinrichtung [bestehend aus Photozelle (11), Verstärker (12) und Anzeige (13)] zugeleitet.

Zur Bestimmung des Remissionsgrades stellt man die Wellenlänge λ' ein, legt das Normalweiß unter und stellt

mit der Verstärkung den Messwert $M_N(\lambda') \approx e(\lambda') \cdot \frac{\partial \phi_N}{\partial \lambda}(\lambda') \cdot \Delta\lambda$ auf 100 Skalenteile ein, wobei $e(\lambda')$ die

Spektralempfindlichkeit der Messeinrichtung bei λ' ist. Dann legt man die Probe unter und misst bei gleicher

Verstärkung $M_P(\lambda') \approx e(\lambda') \cdot \frac{\partial \phi_P}{\partial \lambda}(\lambda') \cdot \Delta\lambda = e(\lambda') \cdot \frac{\partial \phi_N}{\partial \lambda}(\lambda') \cdot \beta(\lambda') \cdot \Delta\lambda = 100 \cdot \beta(\lambda')$.

Zur Messung integraler (aktinischer) Remissionsgrade nach (2 – 4) wird in einem anderen Messkopf das spektral unzerlegte Licht einer Glühlampe auf das Messobjekt gerichtet. Dieser Messkopf erlaubt auch die Einstellung anderer Messgeometrien, das Wechseln des Empfängers und die Verwendung anderer Lichtarten (mittels Filter).

4 Aufgaben

- 4.1 Messen Sie die spektrale Remission $\beta(\lambda)$, und berechnen Sie die zugehörige spektrale Dichte $D(\lambda)$ einer Probe (Geometrie 45/0). Stellen Sie beide graphisch dar.
- 4.2 Messen Sie den aktinischen Remissionsgrad β_{akt} der Probe mit Glühlicht und Empfänger 1 bei den Geometrien 45/0, 0/45 und 22,5/22,5.
- 4.3 Messen Sie die Probe in Geometrie 45/0
 - a) mit Glühlicht und Empfänger 2 und
 - b) mit Filterlicht und Empfänger 1.Vergleichen Sie mit 4.2.
- 4.4 Berechnen Sie den visuellen Remissionsgrad β_{vis} der Probe für Normlichtart A.

5 Fragen

- 5.1 Welche Farbeindrücke entstehen beim Betrachten von Spektralfarben der Wellenlängen
 - a) 550 nm,
 - b) 580 nm und
 - c) 640 nm?
- 5.2 Wie ist der spektrale Remissionsgrad $\beta(\lambda)$ zu messen?
- 5.3 Geben Sie die Formeln für die Berechnung der Dichte D bei gegebenem Remissionsgrad β und für die Berechnung von β bei gegebenem D an.
- 5.4 Skizzieren Sie typische spektrale Remissionsfunktionen roter, grüner und blauer Farbstoffe in ein Diagramm.
- 5.5 Wovon ist ein aktinischer Remissionsgrad abhängig?
- 5.6 Skizzieren Sie typische spektrale Dichten für Gelb, Purpur (Magenta) und Blaugrün (Cyan) in ein Diagramm.
- 5.7 Skizzieren Sie die Messgeometrie 45/0.
- 5.8 Wie berechnet man den visuellen Remissionsgrad?
- 5.9 Geben Sie die Beziehung für den Normfarbwert Z an, wenn eine Oberfläche $[\beta(\lambda)]$ mit Licht der spektralen Verteilung $\frac{\partial \phi}{\partial \lambda}$ beleuchtet wird.
- 5.10 Ein Beugungsgitter ($d = 1,5 \mu\text{m}$) wird mit monochromatischem Licht ($\lambda = 500 \text{ nm}$) senkrecht bestrahlt. Unter welchen Winkeln α_1 sind die Maxima 1. Ordnung zu finden?

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 Farbmetrik
Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1981
ISBN 3-11-008209-8 |