

Versuchsanleitung O 12 : Farbwiedergabeindex

1. Einleitung

Die Farbeindrücke, die wir von den Objekten unserer Umgebung erhalten, hängen (auch) von der beleuchtenden Lichtart ab. Eine Änderung der Lichtart (z.B. von künstlichem Licht zu Tageslicht) zieht i.Allg. Farbänderungen nach sich. Vor dem Kauf von Kleidungsstücken z.B. ist man gut beraten, sich von Art und Ausmaß derartiger Farbänderungen zu überzeugen.

Lichtquellen, die für Beleuchtungszwecke eingesetzt werden, sollen gute Farbwiedergabe-Eigenschaften besitzen. Das heißt, sie sollen von den beleuchteten Objekten Farben vermitteln, die den Objektfarben bei "gewohnter" Beleuchtung (z.B. Tageslicht) nahekommen. Farbvalenzmetrisch können Farbverschiebungen, die ausgewählte Testfarben beim Wechsel der Beleuchtung (von einer Referenzlichtquelle zu einer zu kennzeichnenden Lichtquelle) erfahren, quantitativ bestimmt werden. Damit kann ein Maß für die Farbwiedergabe-Eigenschaften einer Lichtquelle (im Vergleich zur Referenzlichtquelle) gebildet werden - der Farbwiedergabeindex.

2. Grundlagen

Bei der Farbwahrnehmung wird das Licht vom Auge gleichzeitig mit rot-, grün- und blauempfindlichen Rezeptoren bewertet. Deren spektrale "Empfindlichkeiten" heißen die Normspektralwerte $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$ des CIE-Normvalenzsystems (siehe Bild 1). Grünempfindung $\bar{y}(\lambda)$ und Hellempfindung $V(\lambda)$ sind dabei gleich. Die Abkürzung CIE bedeutet Commission Internationale de l'Éclairage (Internationale Beleuchtungskommission).

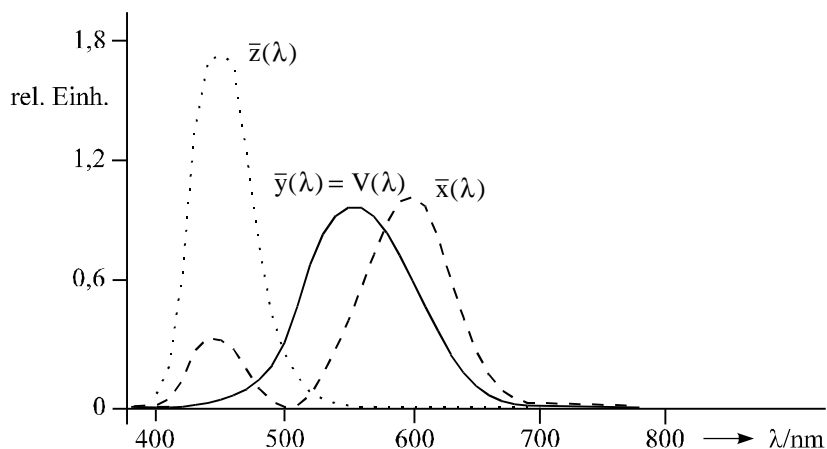


Bild 1 Normspektralwerte

Als Folge dieser Bewertung leitet das Auge drei voneinander unabhängige Nervenreize an das Sehzentrum weiter, die dort das Zustandekommen des Sinneseindrucks "Farbe" bewirken. Die drei Reizstärken sind den drei Normfarbwerten

$$X = \frac{1}{k} \int \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda ; Y = \frac{1}{k} \int \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda ; Z = \frac{1}{k} \int \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (2-1)$$

proportional.

Die spektrale Funktion $\varphi(\lambda)$ heißt Farbreizfunktion. Sie ist das Produkt aus der spektralen Strahldichte (oder einer dazu proportionalen Größe, z.B. der spektralen Bestrahlungsstärke) der Lichtquelle und der spektralen Transmission (bei Durchsichtsfarben) bzw. spektralen Remission (bei Aufsichtsfarben). Bei Emissionsmessungen (Lichtfarben) ist die Farbreizfunktion gleich der spektralen Strahldichte (oder einer dazu proportionalen Größe). Über den Faktor $(1/k)$ wird so verfügt, dass die (bei gegebener Beleuchtung) hellste Farbe den Wert $Y = 100$ erhält; das ist bei Emissions- und Transmissionsmessungen die Lichtfarbe selbst und bei Remissionsmessungen

Der Farbort wird durch die Angabe der Normfarbwertanteile

(mit $x + y + z = 1$) in der CIE-Normfarbtafel (siehe Bild 2) dargestellt.



Seine spektrale Strahldichte ist durch das Plancksche Strahlungsgesetz

Für weitere Betrachtungen ist die relative (einsnormierte) Verteilung ausreichend. Man teilt daher (2 - 3) durch den maximalen Funktionswert des Intervalls [380 nm, 780 nm]. Dieser liegt für $T \leq 3500 \text{ K}$ bei 780 nm, denn nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz

Somit wird die Farbreizfunktion des Planckschen Strahlers

o12.doc

Für eine Anzahl (maximal 14) sogenannter CIE-Testfarben bekannter [2] spektraler Remission werden nun die Normfarbwerte bei beiden Lichtarten [(k) und (r)] berechnet. Für die i-te Testfarbe (z.B.) sollen diese sein :

$X_{r,i}$, $Y_{r,i}$, $Z_{r,i}$, bzw. $X_{k,i}$, $Y_{k,i}$, $Z_{k,i}$. Mithin wird die Valenz der Testfarbe i durch den Wechsel der Lichtart um die "Strecke" $\Delta F_i = \left[(X_{r,i} - X_{k,i})^2 + (Y_{r,i} - Y_{k,i})^2 + (Z_{r,i} - Z_{k,i})^2 \right]^{1/2}$ verschoben.

Die Verschiebung ΔF_i kann jedoch nicht zur Beurteilung der Farbwiedergabe herangezogen werden, weil das Normvalenzsystem nicht empfindungsgemäß gleichabständig ist. An verschiedenen Orten und in verschiedenen Richtungen in diesem System abgetragene Abstände gleicher Größe empfindet das Auge als nicht gleichwertig.

In ein (annähernd) empfindungsgemäß gleichabständiges System gelangt man, wenn man zunächst alle Farbörter (x, y) in die Farbtabelle CIE-1960-UCS (Uniform Chromaticity Scale = Gleichabständige Farbarttabelle) mit den Koordinaten u , v transformiert

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad ; \quad v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3} \quad . \quad (2-6)$$

Die Farbörter der Lichtarten (u_r , v_r) und (u_k , v_k) sollen dabei einen Abstand kleiner $5,4 \times 10^{-3}$ haben.

Wegen der unterschiedlichen Farbstimmung des Auges bei den beiden Lichtarten ist eine Korrektur der Farbörter ($u_{k,i}$; $v_{k,i}$) in ($u''_{k,i}$; $v''_{k,i}$) vorzunehmen. Im Experiment wird dies vom Auswertprogramm vorgenommen; auf Einzelheiten soll hier nicht eingegangen werden [2].

Schließlich erfolgt der Übergang in den gleichförmigen Farbenraum CIE 1964, aus dessen Koordinaten

$$\begin{aligned} W_{r,i}^* &= 25 \sqrt[3]{Y_{r,i}} - 17 \quad ; \quad W_{k,i}^* = 25 \sqrt[3]{Y_{k,i}} - 17 \\ U_{r,i}^* &= 13 W_{r,i}^* (u_{r,i} - u_r) \quad ; \quad U_{k,i}^* = 13 W_{k,i}^* (u''_{k,i} - u''_k) \\ V_{r,i}^* &= 13 W_{r,i}^* (v_{r,i} - v_r) \quad ; \quad V_{k,i}^* = 13 W_{k,i}^* (v''_{k,i} - v''_k) \end{aligned} \quad (2-7)$$

die Farbverschiebung

$$\Delta E_i = \left[(U_{r,i}^* - U_{k,i}^*)^2 + (V_{r,i}^* - V_{k,i}^*)^2 + (W_{r,i}^* - W_{k,i}^*)^2 \right]^{1/2} \quad (2-8)$$

berechnet wird.

Je größer ΔE_i ist, desto kleiner wird der spezielle Farbwiedergabeindex

$$R_i = 100 - 4,6 \Delta E_i \quad (2-9)$$

für die i-te Testfarbe.

Den allgemeinen Farbwiedergabeindex

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (2-10)$$

erhält man durch Mittelung über die Farbwiedergabeindizes der Testfarben 1 bis 8.

3. Versuchsanordnung

Die zu untersuchende spektrale Verteilung der Bestrahlungsstärke wird von der Lichtquelle auf der Eintrittsöffnung einer Einkoppeloptik (EOP 140) erzeugt. Von dort gelangt das Licht durch ein Glasfaserbündel in ein Dioden-Array-Spektrometer (MAS 30). Es wird darin von einem Beugungsgitter spektral zerlegt; sein Spektrum wird auf ein Dioden-Array (256 Pixel, Abstand 25 µm, Höhe 2,5 mm) abgebildet.

Die Messwerte werden ausgelesen, in den PC übernommen und gespeichert.

Das Rechenprogramm (ISCOLOR) steuert den Messablauf, ermöglicht die farbvalenzmetrische Auswertung und die Berechnung der Farbwiedergabeindizes R_i ($i = 1 \dots 14$) und R_a .

Für bestimmte Fragestellungen können Datenfiles nach einer Konvertierung in einem separaten Auswertprogramm (NUMERI) speziellen Prozeduren unterworfen und spektrale Verteilungen miteinander verglichen werden.

4. Aufgaben

In diesem Abschnitt werden die zu bearbeitenden Aufgaben nur grundsätzlich aufgeführt. Genauere Hinweise zur Versuchsdurchführung befinden sich am Arbeitsplatz.

- 4.1. Kennzeichnen Sie die Farbwiedergabe-Eigenschaften einer Lichtquelle durch Angabe
 - der zu kennzeichnenden Lichtart
 - der Bezugslichtart
 - der speziellen Farbwiedergabeindizes $R_1 - R_{14}$.
 - des allgemeinen Farbwiedergabeindex R_a .
- 4.2. Ergänzen Sie 4.1. durch eine graphische Darstellung der (relativen) spektralen Flüsse von zu kennzeichnender Bezugslichtart.
- 4.3. Erstellen Sie ein Diagramm mit den spektralen Remissionsfunktionen der CIE-Testfarben Nr. 1 bis Nr. 8.
- 4.4. Messen Sie den allgemeine Farbwiedergabeindex R_a einer thermischen Lichtquelle bei verschiedenen Farbtemperaturen.

5. Fragen

- 5.1. Wie heißen die radiometrischen Größen L und $\partial L / \partial \lambda$ und in welchem Zusammenhang stehen sie?
- 5.2. Geben Sie die Definitionsgleichungen der Normfarbwerte an.
- 5.3. Ein Beugungsgitter hat 800 Linien/mm. Unter welchem Winkel α wird Licht der Wellenlänge $\lambda = 550$ nm in erster Ordnung gebeugt?
- 5.4. Wie lautet das Plancksche Strahlungsgesetz?
- 5.5. Für eine Lichtquelle misst man die Normfarbwerte $X = 124$; $Y = 100$ und $Z = 13$. Berechnen Sie den Farbort der Lichtquelle. Welchen Farbton hat das Licht?
- 5.6. Eine Fläche A wurde im Zeitraum $0 \leq t \leq T$ mit der orts- und zeitabhängigen Bestrahlungsstärke $E(\vec{r}, t)$ bestrahlt. Welche Leistung P und Energie W trafen auf A ?
- 5.7. Welche Aussage hat das Wiensche Verschiebungsgesetz?
- 5.8. In welchem Falle nimmt der spezielle Farbwiedergabeindex R_i den Wert 100 an?
- 5.9. In einem orthogonalen Raum sind die beiden Punkte $P_1(x_1, y_1, z_1)$ und $P_2(x_2, y_2, z_2)$ gegeben. Wie berechnet man ihren Abstand?
- 5.10. Erklären Sie den Begriff "Farbtemperatur".

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] | DIN 6169-2

Farbwiedergabe; Farbwiedergabe-Eigenschaften von Lichtquellen
in der Beleuchtungstechnik
Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 1976.02 |
| [3] | Richter, M. :

Einführung in die Farbmeterik
Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1981
ISBN 3-11-008209-8 |