

Versuch „Spektralmessung an Körperfarben“

Nach DIN 5033-1 ist Farbe ein durch das Auge vermittelter Sinneseindruck, durch den sich zwei aneinandergrenzende, strukturlose Teile des Gesichtsfeldes bei einäugiger Beobachtung mit unbewegtem Auge allein unterscheiden. Der Farbreiz wird durch die Strahlung, die ins Auge fällt, bestimmt und löst durch die unmittelbare Reizung der Netzhaut eine Farberscheinung aus. Die spektrale Beschaffenheit des Farbreizes wird als Farbreizfunktion $\varphi(\lambda)$ bezeichnet. Für Körperfarben ergibt sich die Farbreizfunktion durch die Multiplikation der Strahlungsfunktion des beleuchtenden Lichts $S(\lambda)$ mit den spektralen Reflexionseigenschaften der Körperfarbe $R(\lambda)$ bei allen Wellenlängen im sichtbaren Spektralbereich:

Gleichung 1:
$$\varphi(\lambda) = S(\lambda) \cdot R(\lambda)$$

Die spektralen Reflexionseigenschaften können durch den spektralen Reflexionsgrad $\rho(\lambda)$ oder durch den spektralen Strahldichtefaktor $\beta(\lambda)$ beschrieben werden. Der spektrale Reflexionsgrad ist das Verhältnis des reflektierten spektralen Strahlungsflusses zu dem auftreffenden spektralen Strahlungsfluss:

Gleichung 2:
$$\rho(\lambda) = \frac{\Phi_{e\lambda\rho}}{\Phi_{e\lambda}}$$

Der lichttechnische Reflexionsgrad bewertet die Strahlungsflüsse mit dem spektralen Hellempfindlichkeitsgrad für das Tagessehen $V(\lambda)$:

Gleichung 3:
$$\rho_v = \frac{\int \Phi_{e\lambda} \cdot \rho(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int \Phi_{e\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda}$$

Beim spektralen Strahldichtefaktor wird die Strahldichte des Materials in einer Richtung auf die Strahldichte des vollkommen mattweißen Materials, das in gleicher Weise bestrahlt wird, bezogen:

Gleichung 4:
$$\beta(\lambda) = \frac{L_{e\lambda\rho}}{L_{e\lambda w}}$$

Diejenige Eigenschaft des Farbreizes, die dessen Verhalten in additiver Mischung mit anderen Farbreizen bestimmt, wird als Farbvalenz bezeichnet. Sie wird durch drei Farbwerte beschrieben und kann als vektorielle Größe verstanden werden. Die Normfarbwerte X, Y, Z ergeben sich für die Farbreizfunktion durch die Bewertung mit den Spektralwertfunktionen des farbmetrischen Normalbeobachters:

Gleichung 5:
$$X = k \cdot \int \varphi(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda$$
$$Y = k \cdot \int \varphi(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda$$
$$Z = k \cdot \int \varphi(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

Der Normierungsfaktor k wird so definiert, dass für den vollkommen mattweißen Körper $\beta = 1$ für jede Lichtart stets der Normfarbwert $Y_w = 100$ beträgt:

Gleichung 6:
$$k = \frac{100}{\int S_{\lambda} \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda}$$

Die Spektralwertfunktionen sind von der Gesichtsfeldgröße abhängig. Für Objekte mit einer Gesichtsfeldgröße zwischen 1° und 4° finden die Normspektralwertfunktionen für den 2°-Normalbeobachter (CIE 1931) Anwendung. Für größere Objekte werden die Normspektralwertfunktionen für den 10°-Normalbeobachter (CIE 1964) empfohlen.

Für die Kennzeichnung einer Farbart in der Normfarbtafel sind die Normfarbwertanteile x, y ausreichend. Diese lassen sich aus den Normfarbwerten ableiten:

Gleichung 7:
$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

wobei $x + y + z = 1$ gilt.

Mit der Bestimmung der Farbmaßzahlen Y, x, y ist eine Farbvalenz eindeutig beschreibbar.

Da in dem Normvalenzsystem die geometrischen Abstände sehr stark von den empfundenen Farbabständen abweichen, hat die CIE 1976 den $L^* a^* b^*$ -Farbenraum empfohlen, der als angenähert empfindungsgemäß gleichabständig gilt.

Für die Farbmaßzahlen L^* (Helligkeit), a^* (rot-grün Achse) und b^* (gelb-blau Achse) gelten für $X/X_n, Y/Y_n, Z/Z_n > 0,008856$ folgende Beziehungen:

Gleichung 8:
$$L^* = 116 \cdot \sqrt[3]{Y/Y_n} - 16$$

$$a^* = 500 \cdot \left(\sqrt[3]{X/X_n} - \sqrt[3]{Y/Y_n} \right)$$

$$b^* = 200 \cdot \left(\sqrt[3]{Y/Y_n} - \sqrt[3]{Z/Z_n} \right)$$

Die Normfarbwerte X_n, Y_n, Z_n sind die Normfarbwerte des vollkommen mattweißen Körpers unter der beleuchtenden Lichtart und legen den Unbuntpunkt fest:

Gleichung 9:
$$X_n = \int S(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y_n = \int S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z_n = \int S(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

Im $L^* a^* b^*$ -Farbenraum kann der euklidische Abstand zwischen zwei Farben verwendet werden, um angenähert die empfundene Größe eines Farbunterschieds ΔE_{ab}^* zu beschreiben.

Gleichung 10:
$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

mit

$$\Delta L^* = L_1^* - L_2^*$$

$$\Delta a^* = a_1^* - a_2^*$$

$$\Delta b^* = b_1^* - b_2^* \quad (1 \text{ .. Farbprobe 1, } 2 \text{ .. Farbprobe 2)}$$

Zielstellung

Im Rahmen des Praktikumsversuches sind unterschiedliche Körperfarben spektral zu vermessen und die spektralen Strahldichtefaktoren $\beta(\lambda)$ der Materialien zu bestimmen. Für die vermessenen Farbproben sind die Normfarbwerte x, y und der lichttechnische Reflexionsgrad ρ_V für unterschiedliche Normlichtarten (A, D65) sowie für die Farbart des energiegleichen Spektrums zu bestimmen und die Farbunterschiede ΔE^*_{ab} zwischen Farbproben im $L^*a^*b^*$ -Farbenraum zu berechnen und zu vergleichen. Betrachten Sie außerdem den Einfluss der Wahl des Gesichtsfeldes!

Durchführung

Es sind spektrale Messungen mit dem Spektralradiometer YETI Specbos 1201 in einer $0^\circ/45^\circ$ -Geometrie durchzuführen nach DIN 5033 Teil 7¹ (Abbildung 1). Als Lichtquelle dient eine Halogenglühlampe, die zur Stabilisierung des Lichtstroms mit konstantem Strom betrieben wird ($U = 14 \text{ V}$, $I = 3,2 \text{ A}$ - Bitte langsam Strom bis Nennwert erhöhen!!).

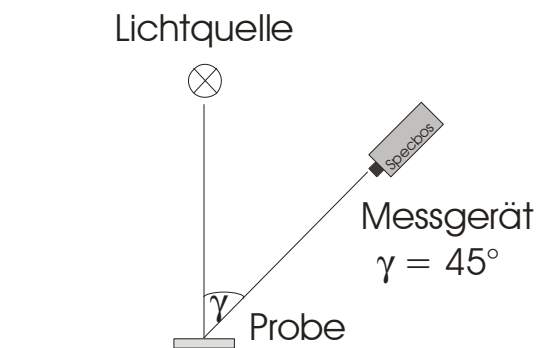


Abbildung 1: Schema des Versuchsaufbaus

Zur Bestimmung der relativen spektralen Strahldichte $L_{e\lambda}$ der für die Messung verwendeten Lichtquelle, ist eine Messung der spektralen Strahldichte $L_{e\lambda\rho_n}(\lambda)$ auf einem Reflexionsnormal mit bekanntem spektralen Strahldichtefaktor $\beta_n(\lambda)$ vorzunehmen. Verwenden Sie dazu das Reflexionsnormal 708795. Die Berechnung der spektralen Strahldichte der Lichtquelle erfolgt auf Grundlage der Gleichung 11.

Gleichung 11:
$$L_{e\lambda} = \frac{L_{e\lambda\rho_n}(\lambda)}{\beta_n(\lambda)}$$

Die Messung der spektralen Strahldichte der Farbproben $L_{e\lambda\rho_p}(\lambda)$ sollte unmittelbar im Anschluss an die Messung auf dem Reflexionsnormal auf den einzelnen Farbproben durchgeführt werden, wobei darauf zu achten ist, dass die Positionen von Reflexionsnormal und Farbprobe exakt identisch sind. Der spektrale Strahldichtefaktor der einzelnen Farbproben $\beta_p(\lambda)$ ist nach Gleichung 12 zu berechnen.

Gleichung 12:
$$\beta_p(\lambda) = \frac{L_{e\lambda\rho_p}(\lambda)}{L_{e\lambda}}$$

Stellen Sie die Ergebnisse in einem EXCEL-Blatt *Diagramme* grafisch dar!

Berechnen Sie die lichttechnischen Reflexionsgrade für die vermessenen Farbproben für unterschiedliche Normlichtarten (A, D65) sowie für die Farbart des energiegleichen Spektrums.

¹ DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Farbmessung - Messbedingungen für Körperfarben*. DIN 5033 Teil 7, Berlin: Beuth Verlag, Juli 1983

Berechnen Sie für jede vermessene Körperfarbe die Normfarbwertanteile x, y und die lichttechnischen Reflexionsgrade ρ_V für unterschiedliche Normlichtarten und Gesichtsfeldgrößen (2°- und 10°-Normalbeobachter)! Die dafür notwendigen spektralen Daten finden Sie in der EXCEL-Datei *Praktikum Spektralmessung an Körperfarben.xls*. Die Daten der spektralen Hellempfindlichkeitsgrade finden Sie im Tabellenblatt *Bewertung*, wobei $V(\lambda) = \bar{y}(\lambda)$ gilt. Die Daten für die Lichtarten sind im Tabellenblatt *Lichtarten* zu finden. Der spektrale Strahldichtefaktor des Reflexionsnormals ist im Tabellenblatt *Reflexionsnormal* abgelegt.

Berechnen Sie für jede Körperfarbe die Werte L^*, a^*, b^* im $L^*a^*b^*$ -Farbenraum und die sich zwischen den Farben ergebenden Farbunterschiede ΔE_{ab}^* !

Werten Sie die Daten aus und führen Sie eine Fehlerbetrachtung durch!

Vorbereitungsaufgaben

1. Worin besteht der Zusammenhang zwischen dem Leuchtdichtefaktor β und dem Reflexionsgrad ρ ?
2. Wovon ist der spektrale Reflexionsgrad abhängig?
3. Erklären Sie das Prinzip der Spektralmessung von Körperfarben?
4. Worauf müssen Sie bei der Messung achten? Was sind mögliche Fehlerquellen?
5. Was ist eine Normlichtart?
6. Wie erfolgt die Bestimmung der Normfarbwertanteile?
7. Wie hängen der Normfarbwert Y und die Leuchtdichte L zusammen?
8. Machen Sie sich mit der Berechnung der Farbunterschiedes im $L^*a^*b^*$ -Farbenraum vertraut!
9. Setzen Sie sich mit der Berechnung der Farbmaßzahlen und lichttechnischen Kennzahlen im EXCEL auseinander.

Literatur

- /1/ LANGE H: *Farbe in den Medien*. Muster-Schmidt Verlag Göttingen Zürich, 1995
- /2/ SCHLÄPFER K: *Farbe in der grafischen Industrie*. UGRA, 2002
- /3/ DIN 5033 Teil 1: *Farbmessung - Grundbegriffe der Farbmessung*. Beuth Verlag Berlin, Mai 2009
- /4/ DIN 5033 Teil 2: *Farbmessung - Normvalenzsysteme*. Beuth Verlag Berlin, Mai 1992
- /5/ DIN 5033 Teil 3: *Farbmessung - Farbmaßzahlen*. Beuth Verlag Berlin, Juli 1992
- /6/ DIN 5033 Teil 4: *Farbmessung - Spektralverfahren*. Beuth Verlag Berlin, Juli 1992
- /7/ DIN 5033 Teil 7: *Farbmessung - Messbedingungen für Körperfarben*. Beuth Verlag Berlin, Juli 1983
- /8/ DIN 5036 Teil 1: *Strahlenphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien – Begriffe und Kennzahlen*. Beuth Verlag Berlin, Juli 1978
- /9/ DIN 6174: *Farbmetrische Bestimmung von Farbmaßzahlen und Farbabständen im angenähert gleichförmigen CIELAB-Farbenraum*. Beuth Verlag Berlin, Oktober 2007