

## Versuchsanleitung 0 11 : Farbmeterik / Transmission

### 1 Einleitung

Zuweilen bezeichnet man umgangssprachlich unkorrekt mit dem Begriff Farbe z. B. die Farbstoffe (Pigmente), die man im Baumarkt kauft, um seine Wohnung zu verschönern.

Hier jedoch wird mit Farbe der Sinneseindruck bezeichnet, der in unserem Gehirn infolge des Eintretens einer physikalischen Strahlung in das Auge entsteht. Es handelt sich dabei um die elektromagnetische Strahlung in dem Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm, die wir als sichtbares Licht bezeichnen. Wenn der durch die objektive physikalische Erscheinung hervorgerufene subjektive physiologische Eindruck quantitativ beschrieben werden soll, bedient man sich der Farbmeterik.

Diese spielt überall dort eine Rolle, wo die Bewertung der Farbeigenschaften von Gegenständen durch das menschliche Auge objektiviert werden soll. Dabei kann es sich um modische, künstlerische oder technische, kurz beliebige Gegenstände handeln. In ganz besonderem Maße trifft das auf polygraphische Erzeugnisse wie Farbdrucke zu. Die Technologie der Herstellung polygraphischer Erzeugnisse ist nur mit einer fundierten Farbmessung reproduzierbar zu bewerkstelligen. Aus diesem Grunde muss sich der mit diesen Problemen befasste Ingenieur das physikalische Rüstzeug aneignen. Der vorliegende Versuch soll dazu einen Beitrag leisten.

### 2 Grundlagen

Der Farbeindruck wird durch drei Einflussgrößen bestimmt:

- die Lichtquelle mit ihrer spektralen Leistungsverteilung
- der Gegenstand mit seinen spektralen Transmissionseigenschaften
- das Auge mit seinen spektralempfindlichen Rezeptoren.

Die spektralen Strahlungseigenschaften der Lichtquelle werden durch eine physikalische Größe, die spektrale Strahlungsdichte  $L_\lambda = \frac{\partial L}{\partial \lambda}$ , beschrieben. Sie gibt für jede Wellenlänge  $\lambda$  an, wieviel Strahlungsleistung pro

Fläche der Strahlungsquelle in einen bestimmten Raumwinkel  $d\omega$  und im Wellenlängenintervall  $d\lambda$  ausgesandt wird. Die Größe  $L_\lambda$  ist eine Funktion der Wellenlänge und wird in  $\text{W sr}^{-1} \text{m}^{-2}$  gemessen, oft wird der spektrale Verlauf auch nur in relativen Einheiten angegeben. Alle Strahlungsquellen besitzen ihre spezifischen spektralen Strahlungsverteilungen.

Bei konstant gehaltenen geometrischen Mess- bzw. Betrachtungsbedingungen ist  $L_\lambda$  proportional dem spektralen Strahlungsfluss  $\frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda)$ , der unmittelbar mit einem Messinstrument oder dem Auge erfasst wird. In die

nachfolgenden Beziehungen geht deshalb dieser spektrale Strahlungsfluss  $\frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda)$  ein (vgl. Bild 1).

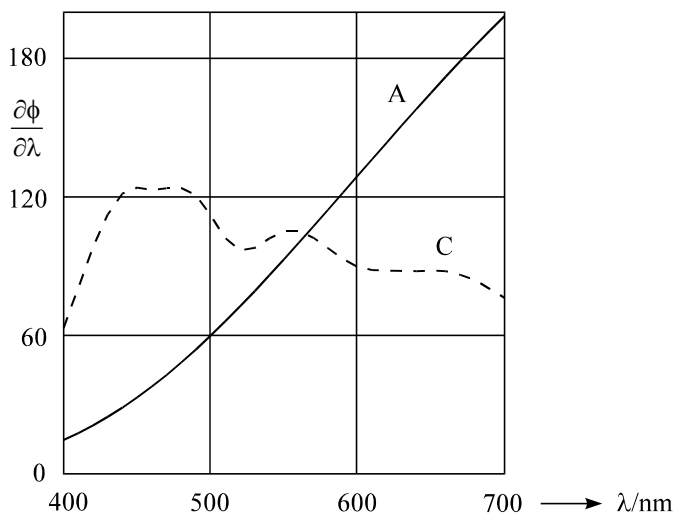
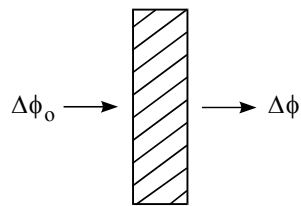


Bild 1 Der spektrale Strahlungsfluss für die Normlichtarten A und C in relativen Einheiten

Für die Transmission des Lichtes durch einen zu untersuchenden Gegenstand sind dessen Eigenschaften durch seinen spektralen Transmissionsgrad  $\tau(\lambda)$  bestimmt. Es gilt mit den Bezeichnungen des Bildes 2.



$$\text{Transmissionsgrad } \tau(\lambda) = \frac{\Delta\phi(\lambda)}{\Delta\phi_0(\lambda)}$$

Bild 2 Zur Definition des spektralen Transmissionsgrades  $\tau(\lambda)$

[  $\Delta\phi(\lambda)$  und  $\Delta\phi_0(\lambda)$  sind die transmittierten bzw. auftreffenden Teilstrahlungsflüsse in einem kleinen Intervall  $\Delta\lambda$  um eine bestimmte Wellenlänge  $\lambda$  ]

Als Beispiel wird im Bild 3 für drei Farbfilter Gelb (YELLOW), Blaugrün (CYAN) und Purpur (MAGENTA) der spektrale Transmissionsgrad  $\tau(\lambda)$  dargestellt.

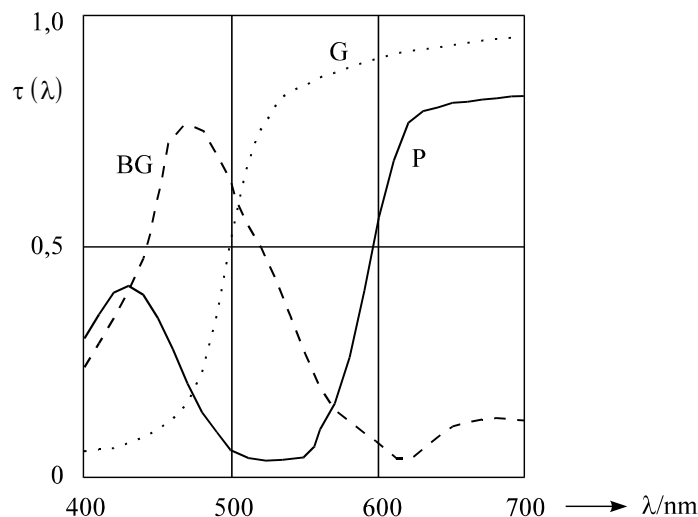


Bild 3 Beispiele für den spektralen Transmissionsgrad  $\tau(\lambda)$  dreier Farbfilter

Die Farbreizfunktion  $\varphi(\lambda)$  ist das Produkt aus dem von der Lichtquelle herrührenden spektralen Strahlungsfluss und der Transmissionsfunktion

$$\varphi(\lambda) = \frac{\partial\phi}{\partial\lambda}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \quad . \quad (2-1)$$

Die Farbreizfunktion  $\varphi(\lambda)$  ist objektiv, d. h. sie ist unabhängig von den spektralen Empfindungseigenschaften des Auges. Sie erfasst die physikalischen Ursachen der Farbempfindung und verursacht auf den Rezeptoren im Auge Reize, die an das Hirn weitergeleitet werden und dort den physiologischen Farbsinneseindruck hervorrufen. Da auf der Netzhaut des Auges drei Arten von Rezeptoren unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit existieren, gibt es drei verschiedene Reizarten, die das Hirn zu einem Sinneseindruck zusammensetzen kann. Die unterschiedlichen Spektralempfindlichkeiten der drei Augenrezeptoren werden durch die Normspektralwerte  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  beschrieben. Diese sind standardisiert und in Bild 4 dargestellt.

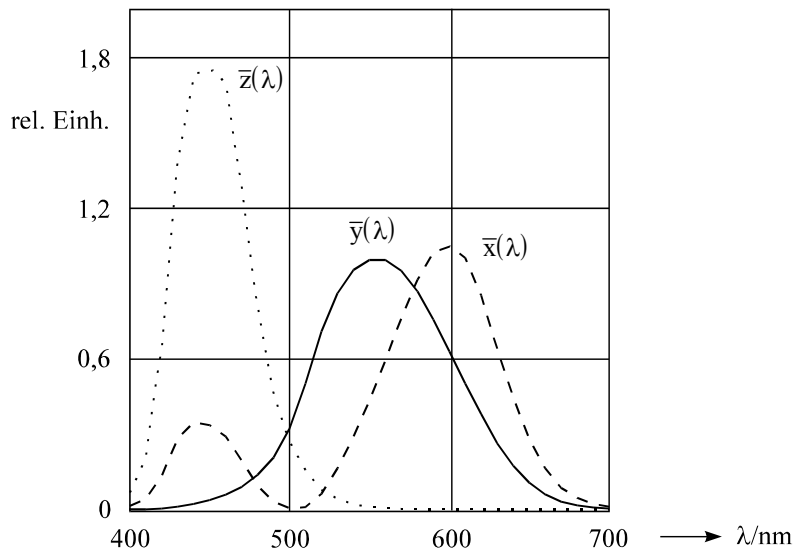


Bild 4 Die Normspektralwerte des Auges

In der Praxis werden verschiedene Systeme eingesetzt, um die Farbempfindung quantitativ zu erfassen. Von diesen werden hier das CIE-Normvalenzsystem und das CIELAB-System beschrieben und ihr Zusammenhang dargestellt. Beide Farbsysteme gehen von den Normfarbwerten  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  aus. Die physikalischen Ursachen [ die Farbreizfunktion  $\phi(\lambda)$  ] und die physiologischen Eigenschaften des Auges [ Normspektralwerte  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  ] werden zu neuen Größen  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  zusammengefasst, die den Sinnesreizen entsprechen. Diese werden im Gehirn zu einer Farbempfindung zusammengesetzt. Im Falle der Transmission gelten die nachstehenden Beziehungen, wobei der Faktor  $\frac{1}{k}$  ein noch zu bestimmender Proportionalitätsfaktor ist

$$X = \frac{1}{k} \int \frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda, \quad Y = \frac{1}{k} \int \frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda, \quad Z = \frac{1}{k} \int \frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda. \quad (2-2)$$

Im Falle der Remission gelten analoge Beziehungen für  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , wobei statt  $\tau(\lambda)$  die spektrale Remission  $\beta(\lambda)$  zu schreiben ist.

Die Integration ist über den sichtbaren Spektralbereich von 380 nm bis 780 nm durchzuführen. (Da die Normspektralwerte unterhalb 400 nm und oberhalb 700 nm sehr klein werden und daher dort nur geringe Beiträge zu den Normfarbwerten entstehen, begeht man nur einen unwesentlichen Fehler, wenn man die Integration von 400 nm bis 700 nm führt. Dieser Umstand ist in den Bildern 1, 3, 4 berücksichtigt worden).

Die Tatsache, dass das menschliche Auge sehr empfindlich auf grünes Licht (500 nm) und relativ unempfindlich auf blaues (400 nm) und rotes (700 nm) reagiert, wird durch den spektralen Hellempfindlichkeitsgrad  $V(\lambda)$  beschrieben.  $V(\lambda)$  hat den gleichen Verlauf wie der Normspektralwert  $\bar{y}(\lambda)$ . Es gilt  $V(\lambda) \equiv \bar{y}(\lambda)$ . Damit ist es möglich, einen Helligkeitsbezug zu definieren. Man betrachtet dazu ein Transmissionsnormal, für das bei allen Wellenlängen  $\tau(\lambda) = 1$  gilt. Praktisch wird dafür der Leerwert gemessen, d. h. die Probe aus der Halterung entfernt. Für dieses Normal legt man den Helligkeitswert  $Y_N = 100$  fest und bezieht alle anderen Helligkeitswerte auf diesen Normalwert  $Y_N$ . Es gilt

$$Y_N = \frac{1}{k} \int \frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot 1 \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda = 100. \quad (2-3)$$

Damit ist der oben erwähnte Faktor  $\frac{1}{k}$  bestimmt.

Will man eine beliebige Körperfarbe nur bezüglich ihrer Helligkeit (unabhängig von ihrem Farbton) mit dem Normal vergleichen, so dient hierfür der Hellbezugswert  $Y$ . Für diesen gilt

$$Y = 100 \cdot \frac{\int \frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int \frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot 1 \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} = 100 \cdot \tau_v. \quad (2-4)$$

Das Verhältnis  $\tau_v$  wird als visueller Transmissionsgrad bezeichnet.

Die Normfarbwertanteile  $x$ ,  $y$ ,  $(z)$ , im CIE-Normalvalenzsystem erhält man durch Normierung der einzelnen Normfarbwerte auf die Summe der drei Normfarbwerte

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (2-5)$$

Es gilt automatisch  $x+y+z=1$ . Der sogenannte Farbart kann daher in einer zweidimensionalen Darstellung - der Normfarbtafel - als Punkt dargestellt werden (Bild 5). Den Hellbezugswert  $Y$  gibt man zusätzlich an, um die Farben einer bestimmten Farbart, die alle den gleichen Farbart einnehmen, hinsichtlich ihrer Helligkeit zu unterscheiden.

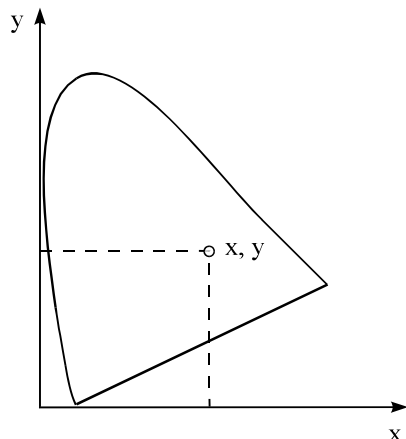


Bild 5 Normfarbtafel zur Darstellung der Farborte

Jede in der Natur vorkommende Farbe kann in der auf dem Bild 5 geschlossen umrandeten Fläche als ein Punkt dargestellt werden. Die reinen Spektralfarben findet man auf dem gekrümmten Rand. Der Farbart des Normals liegt im Regelfall im zentralen Bereich der umrandeten Fläche und ändert sich mit dem Spektrum der Lichtquelle. Dieser Farbart wird mit Unbunt bezeichnet. Farborte auf der Verbindungsgeraden zwischen Unbunt und einem Randpunkt haben den gleichen Farbart, aber unterschiedliche Sättigung. Zur Berandung hin nimmt die Sättigung einer Farbe zu. Der gerade Teil der Berandung heißt Purpurgerade und entsteht durch additive Mischung von spektralem Rot und spektralem Blau. Punkte außerhalb der geschlossenen Fläche haben in der Natur keine Entsprechung als Farbe.

Man erhält die Koordinaten des Unbuntpunktes, indem in die Beziehungen (2-2) der Normfarbwerte  $\tau(\lambda) \equiv 1$  gesetzt wird.

Will man die Abweichungen einer Körperfarbe von der Farbe der Lichtquelle deutlich herausheben, so sucht man eine Darstellung (Bild 6) in deren Zentrum sich das Unbunt befindet. Die Transformationen (2-6) und (2-7) berechnen aus den bekannten Normfarbwerten  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  die CIELAB-Werte  $a^*$ ,  $b^*$  und  $L^*$ .

Die Werte  $a^*$  und  $b^*$  charakterisieren den Farbart.  $L^*$  ist ein Maß für die Helligkeit des Körpers. Bei der Aufstellung der angewendeten Transformationen wurden gleichermaßen das physiologische Empfinden für gleichabständige Farborte als auch für gleichabständige Helligkeit berücksichtigt. Insofern ist dieses CIELAB-Farbsystem dem physiologischen Empfinden des Auges besser angepasst als das CIE-Normalvalenzsystem und wird in der Praxis oft angewendet. Es gilt

$$X^* = \sqrt[3]{\frac{X}{X_i}}, \quad Y^* = \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_i}}, \quad Z^* = \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_i}} \quad (2-6)$$

$$a^* = 500(X^* - Y^*), \quad b^* = 200(Y^* - Z^*), \quad L^* = 116Y^* - 16 \quad (2-7)$$

Der Index  $i$  bei den Normfarbwerten  $X_i$ ,  $Y_i$ ,  $Z_i$  bezeichnet die Normlichtart  $i$ . Die graphische Darstellung der CIELAB-Farborte wird nach Bild 6 vorgenommen.

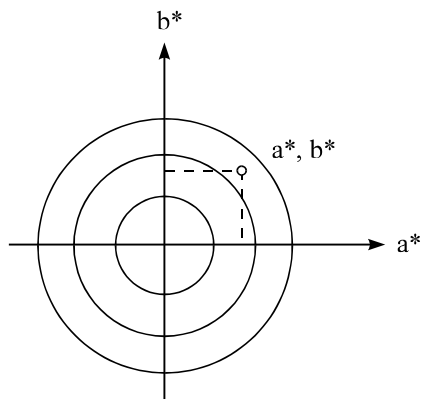


Bild 6 CIELAB-Darstellung der Farbwerte

### **3 Versuchsanordnung**

Die zu untersuchende Probe wird in einem Transmissionsmessansatz mit gefiltertem Glühlicht bestrahlt. Das transmittierte Licht gelangt über einen Lichtleiter in das Spektrometer (MAS 30). Dort wird es von einem Beugungsgitter spektral zerlegt und sein Spektrum auf ein Dioden-Array (256 Pixel, Abstand 25 µm, Höhe 2,5 mm) abgebildet. Die Messwerte werden in den PC übernommen und gespeichert. Das Programm ISCOLOR steuert den Messablauf und die Auswertung.

Die Messwerte sind (außer von den Probeneigenschaften) natürlich auch von der spektralen Verteilung des Messlichtes, der spektralen Transmission des Spektrometers und der spektralen Empfindlichkeit der Array-Dioden abhängig. Deshalb nimmt man zunächst ohne Probe ein sogenanntes Basislinienspektrum auf. Die nachfolgende Messung der Probe liefert dann sozusagen ein mit der spektralen Transmission der Probe multipliziertes Basislinienspektrum. Das Auswerteprogramm dividiert beide Spektren durcheinander und stellt die spektrale Transmission für farbvalenzmetrische Auswertungen bereit.

Für bestimmte Fragestellungen können Datenfiles nach einer Konvertierung in einem separaten Auswerteprogramm (NUMERI) speziellen Prozeduren (Addieren, Multiplizieren, Logarithmieren) unterworfen werden.

#### 4 Aufgaben

- 4.1 Messen Sie das Basislinienspektrum sowie die Transmissionsfunktionen für den Leerwert und mehrere Farbfilter und Filterkombinationen.
- 4.2 Für die in 4.1 gemessenen Transmissionsfunktionen sind die CIELAB-Farbwerte jeweils für NL A und NL C tabellarisch zu erfassen. Die CIELAB-Farbwerte aller Proben sind für eine Lichtart graphisch darzustellen.
- 4.3 Stellen Sie in der Normfarbtafel und mittels der Transmissions- und Dichtekurven die subtraktive Farbveränderung am Beispiel zweier Filter und ihrer Kombination dar.
- 4.4 Tragen Sie die beiden Farbwerte eines Filters bei NL A und NL C in die Normfarbtafel ein und kennzeichnen Sie die Farbverschiebung.
- 4.5 Tragen Sie die Farbwerte der Unbuntpunkte A und C ebenfalls in die Normfarbtafel ein. Bestimmen Sie graphisch die farbtongleichen Wellenlängen eines Filters bei NL A und NL C.

#### 5 Fragen

- 5.1 Skizzieren Sie die relativen spektralen Strahlungsflüsse der Normlichtarten A und C.
- 5.2 Ein Gelbfilter und ein Purpurfilter werden nacheinander mit Tageslicht durchstrahlt. Erläutern Sie anhand der spektralen Eigenschaften, welche Farbe dadurch entsteht.
- 5.3 Skizzieren Sie die Normspektralwerte des menschlichen Auges.
- 5.4 Erläutern Sie die Konstruktion zur Bestimmung der farbtongleichen Wellenlänge  $\lambda_f$  bei gegebenem Farbwert  $(x, y)$ .
- 5.5 Schreiben Sie die Definitionsgleichung des Normfarbwertes  $X$  (des CIE-Normvalenzsystems) auf und erklären Sie die dabei verwendeten Größen.
- 5.6 Gegeben ist eine Farbe  $F_1$  mit  $X_1 = 54$ ,  $Y_1 = 63$  und  $Z_1 = 18$ . Welche Normfarbwerte müsste eine Farbe  $F_2$  mit  $X_2 = 18$  besitzen, um der gleichen Farbart wie  $F_1$  anzugehören?
- 5.7 Wie ist im CIE-Normvalenzsystem der Hellbezugswert definiert?
- 5.8 Erläutern Sie die Bedingungen für die Messung des spektralen Transmissionsgrades  $\tau(\lambda_0)$  bei gegebener Wellenlänge  $\lambda_0$ .
- 5.9 Eine Farbe besitzt die Normfarbwerte  $X = 50$ ,  $Y = 70$ ,  $Z = 10$ . Berechnen Sie ihren Farbwert in der CIE-Normfarbtafel.
- 5.10 Die Farbwerte  $F_1$ ,  $F_2$  und  $F_3$  haben in der CIELAB-Farbtafel folgende Lage:  
 $F_1: (a^* < 0, b^* = 0)$ ,  $F_2: (a^* = 0, b^* = 0)$ ,  $F_3: (a^* = 0, b^* > 0)$ . Um welche Farbarten handelt es sich?

#### Literatur

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