

## Versuchsanleitung 0 10 : Aktivität

### 1 Einleitung

Zwei verschiedenartige Lichtquellen mögen jeweils eine Hälfte einer homogen mattweißen Fläche mit gleicher Beleuchtungsstärke beleuchten. Beim Betrachten dieser Teilflächen nimmt man ein und dieselbe Helligkeit wahr. Die Farben beider Teilflächen hingegen sind nicht notwendig gleich. Im Allgemeinen werden auch mit einem beliebigen Lichtempfänger (z. B. einem Photoelement) an den beiden Teilflächen vorgenommene Messungen zu verschiedenen Ergebnissen führen und die auf die Teilflächen auftreffenden Strahlungsleistungen unterschiedlich sein. Die genannten Erscheinungen haben ihre Ursache in der wellenlängenabhängigen (spektralen) Empfindlichkeit der Empfänger (Auge, Photoelement, ...). Jeder Empfänger besitzt in manchen Spektralbereichen eine höhere Empfindlichkeit als in anderen Spektralbereichen, in denen seine Empfindlichkeit geringer oder gleich Null ist. Somit wird nur ein Teil des auftreffenden Strahlungsflusses (der Strahlungsleistung) für die Ausgangsgröße des Empfängers (Hellempfindung, Photostrom, ...) wirksam. Man nennt diesen Anteil deshalb den aktinischen (d. h. wirksamen) Strahlungsfluss.

Auch das Farbsehen gründet sich auf aktinische Größen - die sogenannten Normfarbwerte  $X$ ,  $Y$  und  $Z$ .

### 2 Grundlagen

Wir führen die Überlegungen am Beispiel der Bestrahlungsstärke  $E$  durch, ebenso könnte man dazu auch den Strahlungsfluss  $\Phi$  oder eine andere seiner Dichten verwenden.

Ein (homogener) Strahlungsfluss  $\Phi$  treffe auf die Fläche  $A$  und erzeuge auf ihr die (konstante) Bestrahlungsstärke  $E = \frac{\Phi}{A}$ .

Der Strahlungsfluss ist in einer für die betreffende Lichtquelle (z. B. Temperaturstrahlung, Gasentladung oder Lumineszenz) typischen und ggf. durch Glaskolben, Schutzscheiben, Lichtleiter u. ä. modifizierten Weise über die Wellenlängen verteilt. Die Bestrahlungsstärke  $E$  hat eine dazu proportionale Verteilung. Man nennt sie spektrale Bestrahlungsstärke  $\frac{\partial E}{\partial \lambda}(\lambda)$ . In einem infinitesimalen Wellenlängenintervall  $d\lambda$  um eine Wellenlänge  $\lambda'$

entsteht der infinitesimale Beitrag  $dE = \frac{\partial E}{\partial \lambda}(\lambda') \cdot d\lambda$  zur Bestrahlungsstärke  $E$  (siehe Bild 1). Ein Spektralbereich mit den Grenzen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$ , z. B. der sichtbare (oder VIS-) Bereich zwischen 380 nm und 780 nm, liefert zu  $E$  den Beitrag

$$E' = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial E}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2-1)$$

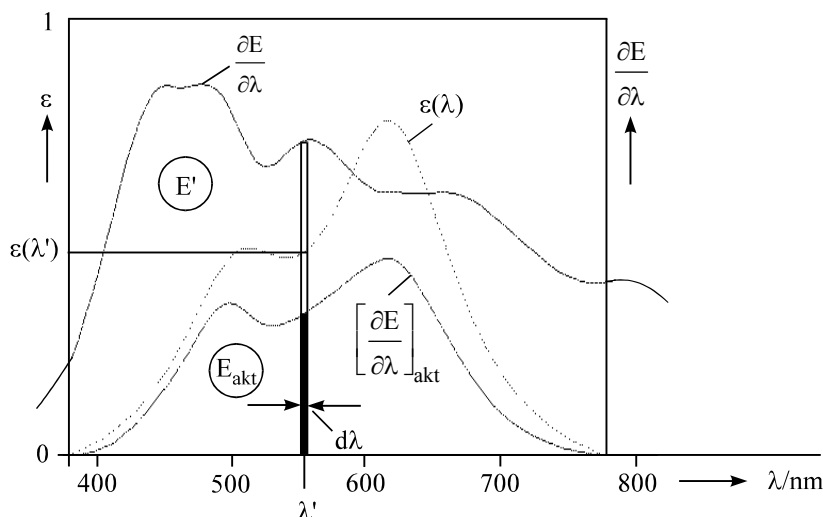


Bild 1 Spektralempfindlichkeit

Die Summation (Integration) aller differentiellen Bestrahlungsstärken  $dE$  liefert schließlich die (Gesamt)-Bestrahlungsstärke  $E$  (die Integrationsgrenzen werden oft weggelassen).

$$E = \int_0^{\infty} \frac{\partial E}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot d\lambda = \int \frac{\partial E}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2-2)$$

Nun setzt man einen Empfänger dieser Bestrahlungsstärke aus. Bei der bereits betrachteten Wellenlänge  $\lambda'$  möge er von  $dE$  nur den (in Bild 1 schwarz ausgefüllten) Anteil

$$dE_{\text{akt}} = \left[ \frac{\partial E}{\partial \lambda}(\lambda') \right]_{\text{akt}} \cdot d\lambda \quad (2-3)$$

effektrelevant verarbeiten und den Rest anderweitig abbauen. Das Verhältnis

$$\frac{dE_{\text{akt}}}{dE} = \varepsilon(\lambda') \quad (2-4)$$

ist die absolute Spektralempfindlichkeit  $\varepsilon(\lambda')$  des Empfängers an der Stelle  $\lambda'$ . Die analoge Betrachtung bei allen anderen Wellenlängen liefert die Kurve  $\varepsilon(\lambda)$  der spektralen Empfindlichkeit des Empfängers.

Nach (2-3) und (2-4) gilt für die aktinische spektrale Bestrahlungsstärke

$$\left[ \frac{\partial E}{\partial \lambda}(\lambda) \right]_{\text{akt}} = \frac{\partial E}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda) \quad (2-5)$$

durch Integration folgt schließlich daraus die aktinische Bestrahlungsstärke

$$E_{\text{akt}} = \int \left[ \frac{\partial E}{\partial \lambda}(\lambda) \right]_{\text{akt}} \cdot d\lambda = \int \frac{\partial E}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2-6)$$

Dieser aktinischen Bestrahlungsstärke ist (i. Allg.) die vom Empfänger angezeigte Größe (Hellempfindung, Photostrom, ...) proportional. Da der Proportionalitätsfaktor noch experimentell zu finden (oder zu definieren) ist, wird oft statt der meist sehr schwierig zu bestimmenden absoluten Spektralempfindlichkeit  $\varepsilon(\lambda)$  eine relative, d. h. die in ihrem Maximum gleich 1 gesetzte, Spektralempfindlichkeit benutzt.

Das menschliche Auge als Helligkeits-"Empfänger" bewertet die Strahlung mit der "Empfindlichkeit"  $K(\lambda)$ , dem sogenannten spektralen Hellempfindlichkeitsgrad. Dieser ist das Produkt

$$K(\lambda) = C \cdot V(\lambda) \quad (2-7)$$

aus dem relativen spektralen Hellempfindlichkeitsgrad  $V(\lambda) = \bar{y}(\lambda)$  (vgl. Bild 2) und dem sogenannten photometrischen Strahlungsäquivalent  $C = 683 \text{ lm/W} = 683 \text{ cd}\cdot\text{sr/W}$ , welches durch die Candela-Definition festgelegt ist. Im Falle der Hellbewertung durch das menschliche Auge nennt man die aktinischen Größen visuelle Strahlungsgrößen. Nach (2-6) erhält man für die visuelle Bestrahlungsstärke

$$E_v = C \int \frac{\partial E}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2-8)$$

Diese Größe  $E_v$  heißt Beleuchtungsstärke, ihre Maßeinheit ist das Lux (Kurzzeichen lx).

Es gilt  $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2 = 1 \text{ cd}\cdot\text{sr/m}^2$ .

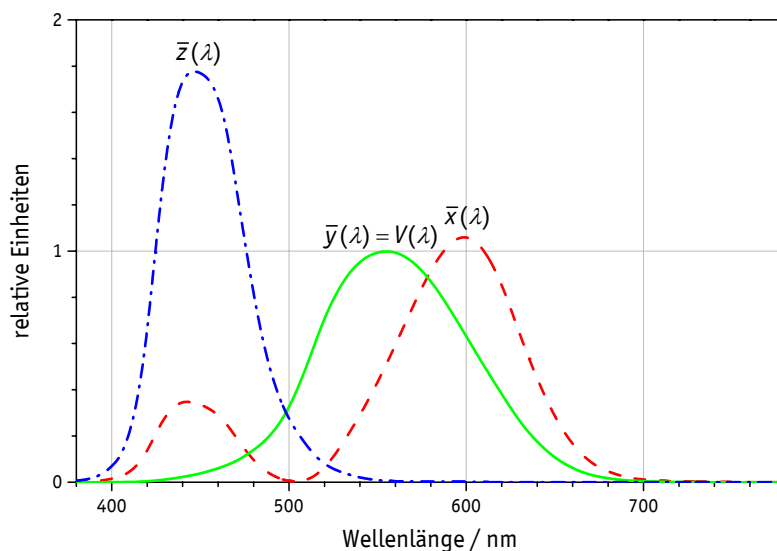


Bild 2 Normspektralwerte

Bei der Farbwahrnehmung wird die Strahlung vom Auge gleichzeitig mit rot-, grün- und blauempfindlichen Rezeptoren bewertet. Deren spektrale "Empfindlichkeiten" sind die Normspektralwerte  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  und  $\bar{z}(\lambda)$  des CIE-Normvalenzsystems (siehe Bild 2). Man erkennt  $\bar{y}(\lambda) = V(\lambda)$ , d. h. Grünempfindung und Hellempfindung stimmen überein.

Durch die Bewertung entstehen gemäß (2-6) als aktinische Größen die drei Normfarbwerte

$$X = \frac{1}{k} \int \varphi(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda, \quad Y = \frac{1}{k} \int \varphi(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda, \quad Z = \frac{1}{k} \int \varphi(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda. \quad (2-9)$$

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 Durchsichtfarben) bzw. spektralen Remission (bei Aufsichtfarben). Bei Emissionsmessungen (Lichtfarben) ist die Farbreizfunktion gleich der spektralen Strahldichte (oder einer dazu proportionalen Größe).

Über den Faktor  $\frac{1}{k}$  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 die des Weißstandards. Der  $Y$ -Wert dient so der Angabe einer relativen Helligkeit. Die absolute Helligkeit wird durch die Leuchtdichte (oder die proportionale Beleuchtungsstärke) ausgedrückt.

Die drei Normfarbwerte einer Farbe bilden ihre Farbvalenz.

Der Farbort wird durch die Angabe der Normfarbwertanteile

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (2-10)$$

(mit  $x+y+z=1$ ) in der CIE-Normfarbtafel (siehe Bild 3) dargestellt.

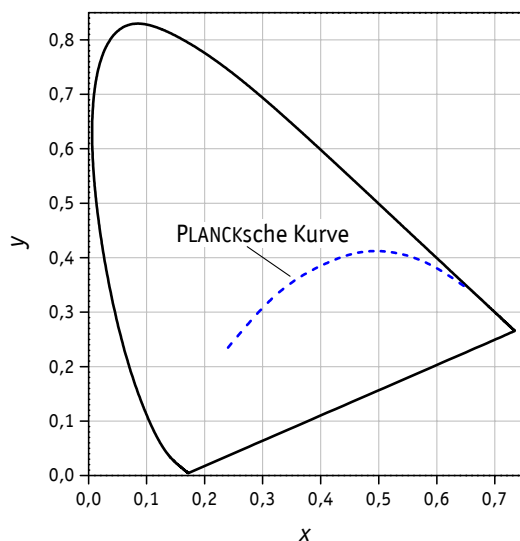


Bild 3 CIE-Normfarbtafel mit PLANCKScher Kurve

Die sogenannte PLANCKSche Kurve (Black-Body Kurve) enthält die Farborte der PLANCKSchen Strahlung eines schwarzen Strahlers aller Temperaturen. Liegt nun der Farbort einer zu kennzeichnenden Lichtquelle auf (oder in der Nähe) der PLANCKSchen Kurve, so kann man ihr einen PLANCKSchen Strahler der Temperatur  $T_F$  zuordnen, dessen Lichtfarbe ihrer eigenen gleich (oder sehr ähnlich) ist. Die Temperatur  $T_F$  nennt man dann die (ähnlichste) Farbtemperatur der zu kennzeichnenden Lichtquelle.

Die Farbtemperaturangabe bezieht sich allein auf die Farbähnlichkeit der Lichtquelle und des betreffenden PLANCKSchen Strahlers. Daraus Schlüsse auf die spektrale Strahldichteverteilung oder die thermodynamische Temperatur der Lichtquelle ziehen zu wollen, ist falsch.

### 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 und sein Spektrum wird auf ein Dioden-Array (256 Pixel, Abstand 25  $\mu\text{m}$ , Höhe 2,5 mm) abgebildet.

Die Messwerte werden ausgelesen, in den PC übernommen und gespeichert. Ein Rechenprogramm (z. B. IS-SpecWin) steuert den Messablauf und ermöglicht eine farbvalenzmetrische Auswertung.

Die Messordnung wurde vom Hersteller (rückführbar auf Normlampen der PTB Braunschweig) auf Bestrahlungsstärke kalibriert. Die spektrale Bestrahlungsstärke kann daher absolut in  $\frac{W}{m^2 nm}$  angegeben werden.

Für bestimmte Fragestellungen können Datenfiles nach einer Konvertierung in einem separaten Auswerteprogramm (z. B. ORIGIN) speziellen Prozeduren wie Multiplikation oder Integration unterworfen werden.

#### 4 Aufgaben

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

- 4.1 Stellen Sie mit der Strahlung einer Halogenlampe auf der Einkoppeloptik verschiedene Beleuchtungsstärken ein, indem Sie a) den Lampenabstand bei konstanter elektrischer Leistung und b) die elektrische Leistung bei konstantem Abstand variieren. Beobachten Sie in beiden Fällen die Änderung der Farbtemperatur und des Farbortes.
- 4.2 Die spektralen Bestrahlungsstärken einer Energiesparlampe und einer auf gleiche Beleuchtungsstärke eingestellten Halogenlampe sind aufzuzeichnen.
- 4.3 Man bestimme für die in 4.2 untersuchten Lampen die Bestrahlungsstärken (im VIS-Bereich), sowie deren Verhältnis.
- 4.4 Man berechne für Energiesparlampe und für Halogenlampe jeweils aus den spektralen Bestrahlungsstärken die Beleuchtungsstärken und schätze für beide Lampen den lichttechnischen Wirkungsgrad ab.
- 4.5 Vergleichen Sie die spektrale(n) Bestrahlungsstärke(n) der am Versuchsplatz vorhandenen LED-Lampe(n) mit den zu 4.2 gemessenen spektralen Bestrahlungsstärken von Energiesparlampe und Halogenlampe.

#### 5 Fragen

- 5.1 Fertigen Sie eine Aufstellung der radiometrischen Größen an und ordnen Sie die ihnen entsprechenden photometrischen Größen zu.
- 5.2 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?
- 5.3 Geben Sie die Definitionsgleichungen der Normfarbwerte an.
- 5.4 Wie heißt die visuell bewertete Strahlstärke und in welcher Maßeinheit ist sie anzugeben?
- 5.5 Wie sind die Strahlstärke  $I$  und deren Maßeinheit definiert?
- 5.6 Ein Beugungsgitter hat 800 Linien/mm. Unter welchem Winkel  $\alpha$  wird Licht der Wellenlänge  $\lambda = 550$  nm in erster Ordnung gebeugt?
- 5.7 Erklären Sie den Begriff "Farbtemperatur".
- 5.8 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  $A$ ?
- 5.9 Ein Strahlungsfluss  $\Phi$  mit der spektralen Verteilung  $\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda}$  fällt auf einen Empfänger der Spektralempfindlichkeit  $\varepsilon(\lambda)$ . Schreiben Sie den aktinischen Strahlungsfluss auf.
- 5.10 Wie ändern sich Farbort und Farbtemperatur einer Lichtquelle, wenn man ihr Licht mit einem Echtgraufilter [ $\varepsilon(\lambda) \equiv \text{const}$ ] schwächt?

#### 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 Farbmeterik<br>Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1981<br>ISBN : 3-11-008209-8                        |