

Versuchsanleitung 0 10 : Lichtquellen

1 Einleitung

Die heutzutage erhältlichen Leuchtmittel basieren auf ganz unterschiedlichen Funktionsprinzipien: Die klassischen Leuchtmittel früherer Zeiten waren Temperaturstrahler, wie die Glühlampe. Diese kommen aufgrund ihres schlechten Wirkungsgrads und ihrer geringen Lebensdauer immer seltener zum Einsatz. Lichtemittierende Halbleiterbauelemente, wie sie bei LED-Beleuchtungen verwendet werden, erlangen hingegen zunehmend an Bedeutung. Daneben spielen Elektrolumineszenzlampen, wie Energiesparlampen oder Leuchtstoffröhren, in zahlreichen Anwendungen nach wie vor eine große Rolle. Die verschiedenen Lichtentstehungsmechanismen führen dazu, dass sich die ausgesendete Strahlung dieser Leuchtmittel in charakteristischer Weise voneinander unterscheidet. Das fällt zum Beispiel auf, wenn zwei verschiedenartige Lichtquellen jeweils eine homogene mattweiße Fläche mit gleicher Beleuchtungsstärke beleuchten. Beim Betrachten dieser Fläche nimmt man ein und dieselbe Helligkeit wahr, doch die Farbe, in der die beleuchtete Fläche erscheint, ist für die beiden Lichtquellen nicht notwendigerweise gleich. Im Allgemeinen werden auch mit einem beliebigen Lichtempfänger (wie zum Beispiel einem Photoelement) vorgenommene Messungen für die beiden Lichtquellen zu verschiedenen Ergebnissen führen und die auf die Fläche auftreffende Strahlungsleistung unterschiedlich sein. Die genannten Erscheinungen haben ihre Ursache zum einen in der für die jeweilige Lichtquelle charakteristischen Verteilung der Strahlungsleistung auf die Wellenlängen und zum anderen 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 der auftreffenden Strahlung (Strahlungsleistung) für die Ausgangsgröße des Empfängers (Hellempfindung, Photostrom, ...) wirksam. Man nennt diesen Anteil deshalb den aktinischen (das heißt wirksamen) Strahlungsfluss.

Auch das Farbsehen gründet sich auf aktinischen Größen - den sogenannten Normfarbwerten X , Y und Z .

2 Grundlagen

Wir nehmen an, dass ein räumlich homogener Strahlungsfluss Φ auf die Fläche A treffe und dort die (konstante) Bestrahlungsstärke $E = \frac{\Phi}{A}$ erzeuge.

Der Strahlungsfluss ist in einer für die betreffende Lichtquelle (Temperaturstrahler, Elektrolumineszenzstrahler, LEDs) typischen und gegebenenfalls durch Glaskolben, Schutzscheiben, Lichtleiter u. ä. modifizierten Weise über die Wellenlängen verteilt. Die Bestrahlungsstärke E als Verhältnis von auftreffendem Strahlungsfluss und bestrahlter Fläche hat eine dazu proportionale Verteilung.

In einem infinitesimalen Wellenlängenintervall $\partial\lambda$ um eine Wellenlänge λ entsteht der infinitesimale Beitrag ∂E zur Bestrahlungsstärke E (siehe Bild 1). Das Verhältnis dieses Teils der Bestrahlungsstärke zur Intervallbreite $\partial\lambda$

nennt man spektrale Bestrahlungsstärke $\frac{\partial E}{\partial\lambda}(\lambda)$. Integriert (summiert) man diese Anteile der Bestrahlungsstärke über alle Wellenlängen von 0 bis ∞ , erhält man die gesamte auftreffende Bestrahlungsstärke E . Diese entspricht der Fläche unter der Kurve $\frac{\partial E}{\partial\lambda}(\lambda)$ im Wellenlängenbereich von 0 bis ∞ .

$$E = \int_0^{\infty} \frac{\partial E}{\partial\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2-1)$$

Nun setzen wir einen Empfänger dieser Bestrahlungsstärke aus. Dieser setzt bei einer betrachteten Wellenlänge λ' nur einen bestimmten Teil der auftreffenden Strahlung in ein Ausgangssignal um (in Bild 1 schwarz ausgefüllt).

Diesen nennt man aktinische (wirksame) spektrale Bestrahlungsstärke $\left[\frac{\partial E}{\partial\lambda}(\lambda) \right]_{\text{akt}}$. Das Verhältnis aus wirksamer

und auftreffender spektraler Bestrahlungsstärke bezeichnet man als absolute Spektralempfindlichkeit des Empfängers $\varepsilon_{\text{abs}}(\lambda)$:

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

Diese stellt die Charakteristik des Empfängers dar. Es ist üblich statt dieser absoluten Spektralempfindlichkeit ihre auf einen Maximalwert von 1 normierte Funktion, die sogenannte relative Spektralempfindlichkeit $\varepsilon(\lambda)$ anzugeben.

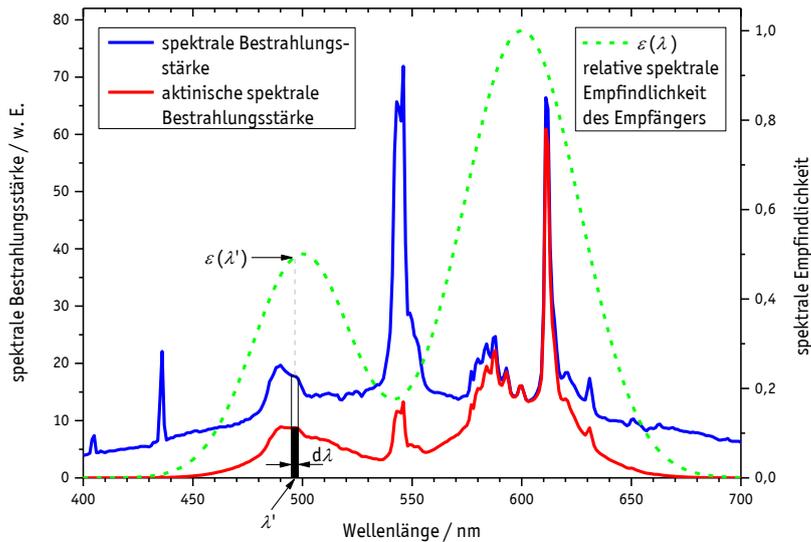


Bild 1 Spektralempfindlichkeit

Das Ausgangssignal S eines Empfängers ergibt sich dann als:

$$S = A \cdot \int \frac{\partial E}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2-3)$$

Die Proportionalitätskonstante A wird als Kalibrationskonstante bezeichnet und experimentell bestimmt bzw. im Fall der Hellempfindung des Auges definiert.

Im letzten Fall bezeichnet man aus Gründen der Unterscheidbarkeit die Spektralempfindlichkeit $\varepsilon(\lambda)$ als spektrale Hellempfindlichkeit $V(\lambda)$ (vgl. Bild 2) und die Kalibrationskonstante A als Photometrisches Strahlungsäquivalent $C = 683 \text{ lm/W}$. Hierbei steht $\text{lm} = \text{Lumen}$ für die Einheit des Lichtstroms, des helligkeitswirksamen Anteils des Strahlungsflusses.

Im Falle der Hellbewertung durch das menschliche Auge nennt man die aktinischen Größen dann *visuelle* Strahlungsgrößen. Sie erhalten den Index V . Nach (2-3) erhält man für die visuelle Bestrahlungsstärke E_V

$$E_V = C \cdot \int \frac{\partial E}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2-4)$$

Sie wird auch als Beleuchtungsstärke bezeichnet, ihre Maßeinheit ist das Lux (Kurzzeichen lx). Es gilt $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$.

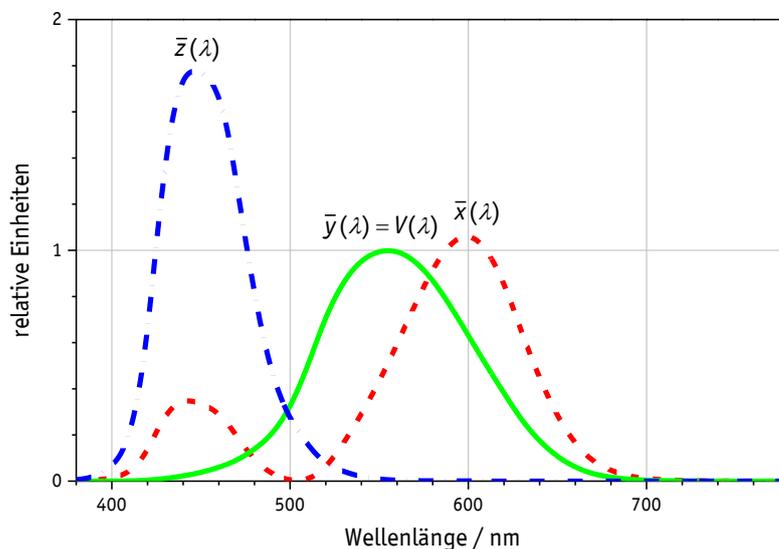


Bild 2 Normspektralwerte

Bei der Farbwahrnehmung wird die Strahlung vom Auge gleichzeitig durch drei Typen von Rezeptoren bewertet, die sich hinsichtlich ihrer spektralen Empfindlichkeiten unterscheiden. Im CIE-Normvalenzsystem entsprechen diesen spektralen Empfindlichkeiten die Normspektralwerte $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$ (siehe Bild 2). Der Verlauf von $\bar{y}(\lambda)$ deckt sich dabei mit der spektralen Hellempfindlichkeit, d.h. es gilt: $\bar{y}(\lambda) \equiv V(\lambda)$.

Durch die Bewertung der auf die Rezeptoren in einem Wellenlängenintervall $\partial\lambda$ auftreffenden Bestrahlungsstärke ∂E entstehen gemäß (2-3) als aktinische Größen die drei Normfarbwerte

$$X = C \cdot \int \frac{\partial E}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda, \quad Y = C \cdot \int \frac{\partial E}{\partial \lambda} \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda, \quad Z = C \cdot \int \frac{\partial E}{\partial \lambda} \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda. \quad (2-5)$$

Die drei Normfarbwerte einer Farbe bilden ihre Farbvalenz. In der CIE-Normfarbtafel wird der Farbort durch die Angabe der Normfarbwertanteile

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (2-6)$$

(mit $x+y+z=1$) dargestellt (siehe Bild 3).

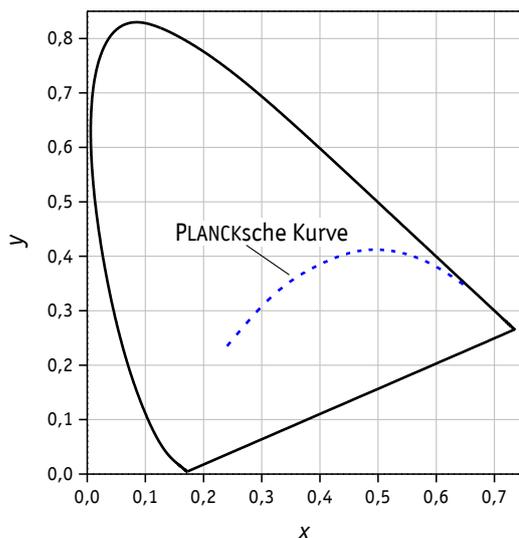


Bild 3 CIE-Normfarbtafel mit PLANCKScher Kurve

Die sogenannte PLANCKSche Kurve enthält die Farborte eines Temperaturstrahlers (schwarzen Strahlers) in Abhängigkeit von seiner Temperatur. Liegt nun der Farbort einer zu charakterisierenden Lichtquelle auf oder in der Nähe der PLANCKSchen Kurve, so kann man ihrer Strahlung eine Farbtemperatur zuordnen, indem man die Temperatur eines Temperaturstrahlers angibt, dessen Lichtfarbe der der Testlichtquelle gleich oder sehr ähnlich ist. Mit Hilfe der Farbtemperatur ist es somit möglich, die Farbe einer Lichtquelle mittels eines einzigen Parameters zu beschreiben. Allerdings bezieht sich die Farbtemperaturangabe allein auf die Farbähnlichkeit der betreffenden Lichtquelle und des Temperaturstrahlers. Sie lässt keine Rückschlüsse auf das Spektrum der Testlichtquelle zu und hat außer für Temperaturstrahler mit der Temperatur der Lichtquelle nichts zu tun.

Die Strahlung von Temperaturstrahlern wie der Sonne oder einer Glühlampe enthält alle Wellenlängen und lässt daher die von ihr beleuchteten Gegenstände in natürlichen Farben erscheinen. Man spricht von optimaler Farbwiedergabe. Andere Leuchtmittel dagegen emittieren möglicherweise diskrete Spektren oder solche, in denen bestimmte Bereiche nur schwach repräsentiert oder aber überbetont sind. Die Farbe von Oberflächen, die von ihnen beleuchtet werden, kann unnatürlich und verfälscht erscheinen - man spricht von schlechter Farbwiedergabe. Ein quantitatives Maß für die Farbwiedergabequalität einer Strahlung bzw. eines Leuchtmittels bieten verschiedene Farbwiedergabeindizes. Zu ihrer Berechnung wird der Abstand der Farborte einer Serie von farbigen Testoberflächen bei Beleuchtung mit dem zu charakterisierenden Leuchtmittel zu den Farborten dieser Oberflächen bei Beleuchtung mit der Referenzstrahlung (z.B. Tageslicht) in geeigneten Farbräumen ermittelt. Modernere Verfahren berücksichtigen darüber hinaus auch die Größe des Farbraums, der mit der Testlichtquelle abgedeckt werden kann (Gamut Area) und setzen ihn ins Verhältnis zur Größe des Farbraums der durch eine Referenzlichtquelle (z.B. Tageslicht) eröffnet wird.

3 Versuchsanordnung

Die zu untersuchenden Lichtquellen bestrahlen jeweils eine Mattscheibe, von der diffus gestreutes Licht auf die Eintrittsöffnung einer Einkoppeloptik fällt. Von dort gelangt das Licht durch ein Glasfaserbündel in ein Dioden-Array-Spektrometer. Darin wird es von einem Beugungsgitter nach der Wellenlänge zerlegt und auf das Dioden-

Array abgebildet. Da die Messordnung vom Hersteller (rückführbar auf Normlampen der PTB Braunschweig) auf Bestrahlungsstärke kalibriert wurde, kann so die spektrale Bestrahlungsstärke absolut in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ nm}}$ angegeben werden.

Die Messwerte werden ausgelesen, in den PC übernommen und gespeichert. Ein Computerprogramm (z. B. SpecWin) steuert den Messablauf und ermöglicht eine farbmetrische Auswertung. Für bestimmte Fragestellungen können Datenfiles nach einer Konvertierung in einem separaten Auswerteprogramm (z. B. ORIGIN) speziellen Prozeduren wie Multiplikation oder Integration unterworfen und die Ergebnisse graphisch dargestellt werden.

4 Aufgaben

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

- 4.1 An Ihrem Arbeitsplatz finden Sie eine Anordnung von drei Lampen (Glühlampe, Energiesparlampe, Weißlicht-LED), die ein und dieselbe Abbildung beleuchten. Vergleichen Sie ihr Erscheinungsbild im Licht der unterschiedlichen Leuchtmittel und halten Sie Ihre Beobachtungen im Protokoll fest.
- 4.2 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.
- 4.3 Die spektralen Bestrahlungsstärken einer Energiesparlampe und einer auf gleiche Beleuchtungsstärke eingestellten Halogenlampe sind aufzuzeichnen.
- 4.4 Man bestimme für die in 4.2 untersuchten Lampen die Bestrahlungsstärken (im sichtbaren Bereich) sowie deren Verhältnis.
- 4.5 Man berechne für Energiesparlampe und für Halogenlampe jeweils aus den spektralen Bestrahlungsstärken die Beleuchtungsstärken und schätze für beide Lampen den lichttechnischen Wirkungsgrad ab.
- 4.6 Vergleichen Sie die spektralen Bestrahlungsstärken der am Versuchsplatz vorhandenen LED-Lampen mit den zu 4.2 gemessenen spektralen Bestrahlungsstärken von Energiesparlampe und Halogenlampe.
- 4.7 Untersuchen Sie die Farbwiedergabe der am Versuchsplatz vorhandenen Leuchtmittel, indem Sie von SpecWin jeweils den Fidelity Index (Rf) sowie den Gamut Index (Rg) berechnen lassen.

5 Fragen

- 5.1 Erläutern Sie die Prozesse der Lichtentstehung bei folgenden Lichtquellen: Glühlampe, Leuchtstoffröhre und Weißlicht-LED.
- 5.2 Skizzieren Sie typische spektrale Strahlungsflüsse dieser Lichtquellen.
- 5.3 Ein Strahlungsfluss Φ mit der spektralen Verteilung $\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda}(\lambda)$ fällt auf einen Empfänger der Spektralempfindlichkeit $\varepsilon(\lambda)$. Wie berechnet sich aus diesen Größen der aktinische Strahlungsfluss?
- 5.4 Geben Sie die Definitionsgleichungen der Normfarbwerte an.
- 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 Wodurch ergibt sich die PLANCKSche Kurve in der Normfarbtafel?
- 5.7 Erklären Sie den Begriff "Farbtemperatur".
- 5.8 Eine Natriumdampflampe emittiert monochromatisches Licht der Wellenlänge 589 nm. Wie groß ist die Beleuchtungsstärke, die sie auf einer Oberfläche erzeugt, wenn dort die Bestrahlungsstärke 0,38 W/m² beträgt?
- 5.9 Wie ändern sich Farbort und Farbtemperatur einer Lichtquelle, wenn man ihr Licht mit einem Echtgraufilter $[\tau(\lambda) \equiv \text{const}]$ schwächt?
- 5.10 Warum ist die Farbwiedergabe von Glühlampenlicht erheblich besser als die des Lichts einer RGB-LED?

Literatur

- | | | |
|-------|--------------------------------|--|
| [1] | Bergmann, L. und Schäfer, C. : | Lehrbuch der Experimentalphysik, Band III, Optik, Walter de Gruyter, 2004 |
| [2] | Leute, U.: | Optik für Medientechniker: Optische Grundlagen der Medientechnik, Carl Hanser Fachbuchverlag, 2011 |
| [3] | Gall, D.: | Grundlagen der Lichttechnik: Kompendium, Pflaum, 2007 |
| [4] | Richter, M. : | Einführung in die Farbmetrik, Walter de Gruyter, 2011 |