

Lichttechnische Größen richtig messen

Beim Einsatz optischer Bauelemente, wie z. B. LEDs, Lampen oder auch Laserdioden, stellen sich oft die Fragen: Wie „hell“ ist mein Bauelement eigentlich? Wie gut ist es im Vergleich zu anderen? Um diese Fragen beantworten zu können, muss man wissen, wie die relevanten optischen Parameter gemessen werden können und was sie aussagen.

Mit diesem Thema befasst sich der erste Teil unserer kleinen Artikelserie zur Messung und Beurteilung lichttechnischer Größen, die ihre Fortführung in der Vorstellung eines sehr universell einsetzbaren Beleuchtungsmessgerätes mit integriertem Datenlogger findet.

Photometrische und radiometrische Größen

Für die Messung von Eigenschaften elektromagnetischer Strahlung verwendet man allgemein fünf sogenannte radiometrische Größen. Für sichtbares Licht, d. h. für Strahlung im Wellenlängenbereich von 400 bis 740 nm, existieren darüber hinaus fünf äquivalente photometrische Größen. Während die radiometrischen Größen rein physikalische Eigenschaften beschreiben, berücksichtigen photometrische Größen außerdem die spektrale Helligkeitsempfindlichkeit des menschlichen Auges.

Unser subjektives Helligkeitsempfinden ist nämlich abhängig von der Wellenlänge des Lichts und wird mit der sogenannten V_λ -Kurve beschrieben (siehe Diagramm von Abbildung 1). So reagiert unser Auge z. B. viel stärker auf grünes Licht als auf blaues oder rotes, d. h. bei Lichtquellen mit radiometrisch gleicher Leistung erscheint uns eine grüne Lampe trotzdem heller als eine blaue.

Für die Entscheidung, ob nun radiometrische oder photometrische Größen zur Bewertung einer Strahlungsquelle gemessen werden sollen, muss daher neben dem Spektrum der jeweiligen Einsatzfall der Lichtquelle betrachtet werden. Soll etwas sichtbar beleuchtet werden, z. B. zur Signalisierung, dann sollten photometrische Größen herangezogen werden,

wird auf die physikalischen Eigenschaften Wert gelegt, z. B. bei einem Infrarot-Laser für optische Kommunikation, dann sind die radiometrischen Eigenschaften sinnvoll. Angaben in radiometrischen Größen sind darüber hinaus für die Bewertung monochromatischer, d. h. einfarbiger Lichtquellen wie LEDs geeignet, wogegen bei gemischtem Licht (z. B. weißem Licht) photometrische Größen meist aussagekräftiger sind.

Umrechnung photometrischer und radiometrischer Größen

Eine Umrechnung zwischen radiometrischen und photometrischen Größen ist theoretisch möglich, jedoch nur, wenn das Spektrum der Lichtquelle bekannt ist. Bei monochromatischen Strahlungsquellen ist dies kein Problem, hierfür existieren verschiedene Umrechnungsformeln. Beispielsweise gilt für den Zusammenhang zwischen Strahlungsleistung und Lichtstrom bei Wellenlänge λ die Formel:

$$\Phi_v = \Phi_e \cdot V_\lambda(\lambda) \cdot 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$$

$V_\lambda(\lambda)$ (bzw. auch $C[\lambda]$ genannt) ist hierbei der Wert für die Augenempfindlichkeit bei Wellenlänge λ , so wie im Diagramm in Abbildung 1 dargestellt. Der Wert 683 lm/W stellt das sogenannte photometrische Strahlungsäquivalent Km

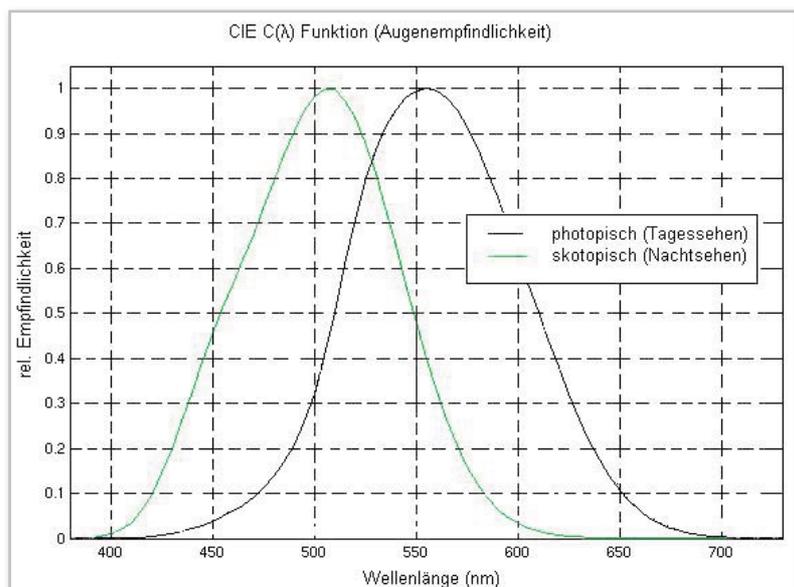


Bild 1: Die V_{λ} -Kurve beschreibt unser subjektives Helligkeitsempfinden, hier für Tag- und Nachtsehen dargestellt.

dar, dieser Faktor entspricht der maximalen Empfindlichkeit des menschlichen Auges bei Tagsehen. Die anderen Messgrößen können in gleicher Weise ineinander umgerechnet werden.

Mit dieser Formel kann man auch sehr schön den Unterschied zwischen photometrischen und radiometrischen Größen demonstrieren. Nimmt man z. B. zwei rote Laserdioden mit Wellenlängen von 650 nm und 670 nm an, welche beide die gleiche Lichtleistung von $\Phi_e = 20$ mW besitzen sollen, so erhält man nach dieser Formel für die 650-nm-Diode einen Lichtstrom von $\Phi_v = 1,46$ lm ($V_{\lambda}[650] = 0,107$), während die 670-nm-Diode trotz gleicher Leistung weniger als ein Drittel dieses Lichtstroms von $\Phi_v = 0,44$ lm ($V_{\lambda}[670] = 0,032$) besitzt!

Schwieriger stellt sich eine Umrechnung von radiometrischen zu photometrischen Größen bei breitbandigen Licht-

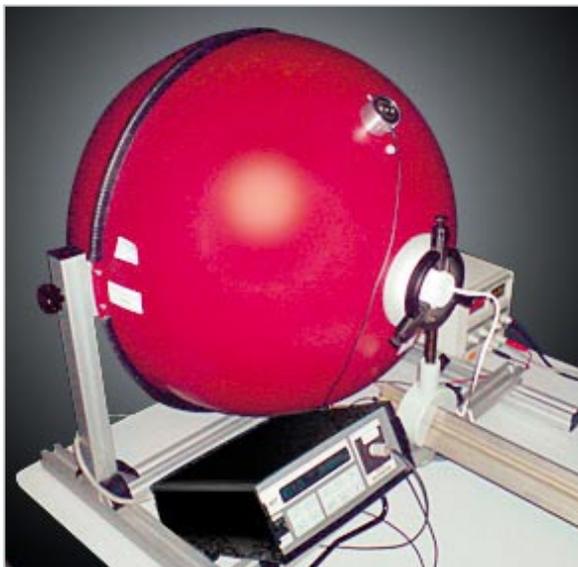


Bild 2: Lichtstrommessplatz mit Ulbricht-Kugel

quellen dar, da hier die jeweiligen unterschiedlichen Anteile der einzelnen Wellenlängen in die Berechnungen eingehen. Hierfür müssen mathematische Verfahren wie Integration und Faltung zur Anwendung kommen und das Spektrum der Lichtquelle muss bekannt sein. Eine Umrechnung von photometrischen zu radiometrischen Größen bei breitbandigen Lichtquellen ist überhaupt nicht möglich, hierfür müssen Messungen erfolgen.

Lichttechnische Größen und ihre Messung

Nachfolgend werden nun kurz die fünf radiometrischen bzw. photometrischen Größen vorgestellt und die Möglichkeiten ihrer Messung beschrieben. Die Formelzeichen der radiometrischen Größen werden meist mit dem Index „e“ (elektrisch) und die entsprechenden photometrischen Größen zur Unterscheidung mit dem Index „v“ (visuell) gekennzeichnet.

1. Strahlungsleistung/Strahlungsfluss, Einheit W (Watt) (Radiometrie)

Lichtleistung/Lichtstrom, Einheit lm (Lumen) (Photometrie)

Bedeutung: Die Strahlungsleistung Φ_e (bzw. der Lichtstrom Φ_v) ist die optische Energie, welche von der Strahlungsquelle pro Zeiteinheit in den Raum abgestrahlt wird. Da die Strahlung meist in fast alle Richtungen abgestrahlt wird, gibt diese Größe nur eine Aussage über die generelle Leistung einer Lichtquelle, wichtig zur Bestimmung des Wirkungsgrads und zum direkten Vergleich von Lasern, Lampen und von ansonsten identisch aufgebauten Leuchten (d. h. gleiche Größe, Linsen etc.).

Messung: Zur Messung der Strahlungsleistung wird meist eine sogenannte Ulbricht-Kugel (Abbildung 2) verwendet, um die Strahlung aus allen Richtungen rund um die Quelle erfassen zu können. Hierbei wird die Lichtquelle innerhalb einer Kugel platziert, welche von innen mit einem diffus reflektierenden Material beschichtet ist. Dieses Material muss einen möglichst hohen Reflexionskoeffizienten besitzen und wellenlängenunabhängig sein. Hierfür wird vorwiegend Bariumsulfat verwendet. Die Kugel besitzt eine kleine Öffnung mit einem Photodetektor, diese Öffnung sollte nicht größer als 5 % der Kugeloberfläche sein. Ein in der Kugel angebrachter sogenannter Shutter verhindert, dass direkte Strahlung von der Quelle auf den Detektor trifft. Durch die Beschichtung ist die Lichtmenge an jeder Stelle der Kugel gleich, also auch auf dem Detektor, und damit proportional zur gesamten Lichtleistung.

2. Bestrahlungsstärke, Einheit W/m² (Radiometrie) Beleuchtungsstärke, Einheit lx (Lux) (Photometrie)

Bedeutung: Als Bestrahlungsstärke E_e bzw. Beleuchtungsstärke E_v bezeichnet man die Strahlungsleistung, welche auf eine bestimmte Fläche abgestrahlt wird. Die auf eine Fläche auftreffende Strahlungsenergie nimmt quadratisch mit dem Abstand zur Quelle ab, daher ist die Bestrahlungsstärke ebenfalls abhängig vom Abstand. Sie ist außerdem abhängig von der Position der Strahlungsquelle, da diese selten in alle

Richtungen gleich stark abstrahlt. Überall, wo eine Fläche beleuchtet werden soll, z. B. Solarzellen, Photodetektoren etc., ist die Angabe der Bestrahlungsstärke von Interesse und meist aussagekräftiger als die reine Strahlungsleistung der Quelle. Zur quantitativen Beurteilung von Licht weit entfernter Quellen, z. B. Sonnenlicht, wird ebenfalls die Bestrahlungsstärke angewendet.

Messung: Zur Messung wird einfach die auf einen Photodetektor auftreffende Strahlungsleistung auf dessen aktive Fläche bezogen. Wichtig ist, dass der Detektor durch die Lichtquelle möglichst homogen ausgeleuchtet wird und sich in genügend großem Abstand zur Lichtquelle befindet. Fast alle Licht-Messgeräte messen im Prinzip die Bestrahlungsstärke und leiten die anderen Größen in geeigneter Weise daraus ab.

3. Strahlstärke, Einheit W/sr (Watt pro Steradian)

(Radiometrie)

Lichtstärke, Einheit cd (candela) (Photometrie)

Bedeutung: Die Strahlstärke I_e bzw. Lichtstärke I_v ist ein Maß dafür, wie groß der Anteil der Strahlungsleistung ist, die in einen bestimmten Raumwinkel abgestrahlt wird, also wie stark gerichtet, d. h. gebündelt die Abstrahlung in einer Richtung ist. Diese Angabe ist daher immer auf eine bestimmte Richtung bezogen, z. B. die geometrische Achse eines Bauelements. Meist wird jedoch die maximale Strahlstärke einer Lichtquelle angegeben, die Richtung, in der diese auftritt, nennt man dann optische Achse. Die Strahlstärke einer Quelle ist im Gegensatz zur Bestrahlungsstärke (Achtung, Verwechslungsgefahr!) nicht vom Abstand zur Quelle abhängig. Mit der Strahlstärke lassen sich gerichtet abstrahlende Quellen (z. B. LEDs, Laser, aber auch Scheinwerfer etc.) beurteilen, für ungerichtet strahlende Quellen wie Glühlampen oder Leuchtstofflampen ist die Strahlstärke wenig aussagekräftig.

Messung: Die Strahlstärke wird in Leistung pro Raumwinkel gemessen und meist aus der gemessenen Bestrahlungsstärke abgeleitet, es gilt: 1 W/m^2 in 1 m Abstand entspricht 1 W/sr . Dies gilt jedoch nur bei genügend großem Abstand zur Lichtquelle (mindestens das 10fache der Ausdehnung der Lichtquelle) und einer homogenen Ausleuchtung des Detektors. Abbildung 3 gibt die Beziehung zwischen Raumwinkel, Abstand und Flächen wieder.

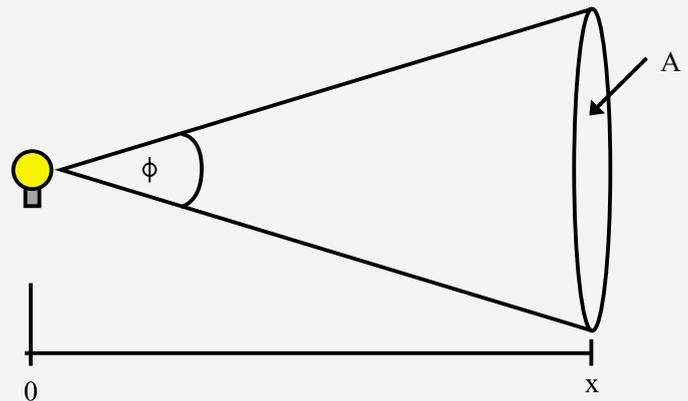
4. Strahldichte, Einheit $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}}$ (Watt pro Quadratmeter und Steradian)

(Radiometrie)

Leuchtdichte, Einheit cd/m^2 (candela pro Quadratmeter) (Photometrie)

Bedeutung: Als Strahldichte L_e bzw. Leuchtdichte L_v bezeichnet man die Strahlstärke einer Lichtquelle bezogen auf deren emittierende Fläche. Die Leuchtdichte ist die Eigenschaft, die der Mensch allgemein als Helligkeit wahrnimmt. Die Strahl- bzw. Leuchtdichte wird zur Beschreibung ausgehnter, flächiger Lichtquellen verwendet, wie z. B. Lichtkacheln, während Strahlstärke und Lichtleistung meist bei punktförmigen Lichtquellen zur Anwendung kommen.

gemessene Beleuchtungsstärke $E_v = 1 \text{ lx}$



bei $x = 1 \text{ m}$ und $A = 1 \text{ m}^2$ gilt: $\phi = 1 \text{ sr}$, $I_v = 1 \text{ cd}$

bei $x = 10 \text{ cm}$ und $A = 1 \text{ cm}^2$ gilt: $\phi = 0.01 \text{ sr}$, $I_v = 100 \text{ cd}$

Bild 3: Die Lichtstärke in Abhängigkeit von der Beziehung zwischen Raumwinkel, Abstand und Fläche

Messung: Zur Bestimmung der Strahldichte wird die Strahlstärke gemessen und durch die leuchtende Fläche geteilt.

5. Strahlungsenergie, Einheit J (Joule) (Radiometrie)

Lichtmenge, Einheit $\text{lm} \cdot \text{s}$ (Lumensekunde) (Photometrie)

Bedeutung: Die Strahlungsenergie E_{ph} bzw. Lichtmenge entspricht der Leistung innerhalb einer bestimmten Zeit, also der Energie der in dieser Zeit ausgesendeten Photonen. Diese Werte werden z. B. in der Astronomie verwendet oder zur Berechnung von Dosisleistungen. Manchmal wird die Strahlungsenergie auch selbst als Dosis bezeichnet, die Dosis ist jedoch strenggenommen Energie pro Volumeneinheit. Bei sehr dünnen bestrahlten Flächen, wie z. B. Photodetektoren, fällt das Volumen jedoch meist nicht ins Gewicht.

Messung: Die Messung erfolgt analog zur Messung der Strahlungsleistung, nur dass die Messwerte über eine bestimmte Zeit integriert werden, z. B. mit einem Datenlogger. Zur Messung der Energie pro Fläche (Energiedichte bzw. Flächendosis) wird die Bestrahlungsstärke gemessen und über die Zeit integriert.

Messfehler und Abweichungen

Die Messung lichttechnischer Größen ist in viel stärkerem Maße abhängig von den Messbedingungen und den Messgeräten, als dies z. B. bei der Messung elektrischer Größen der Fall ist. Daher kann es immer wieder vorkommen, dass bei Messungen ein und derselben Lichtquelle jeweils unterschiedliche Werte ermittelt werden oder zwei Messgeräte verschiedener Hersteller stark voneinander abweichende Werte anzeigen.

Im zweiten Teil betrachten wir, wie solche Abweichungen zustande kommen und worauf daher bei lichttechnischen Messungen zu achten ist.

ELV