



Dem Licht auf der Spur

Seit Edisons Glühlampe von 1879 mit ihrer geringen Lichtausbeute konnte die Effizienz der elektrischen Lampen enorm gesteigert werden, wobei in den letzten Jahren die Halbleiterlichtquellen wegen ihrer Lichtausbeute und Lebensdauer im Fokus der Lichttechnik stehen. Besonders wichtig für die Entwicklung von LED-Leuchten ist eine geeignete Messtechnik.

Von Prof. Dr. Peter Marx

Für die Entwicklung von LED-Innenleuchten und LED-Außenleuchten sind drei Schlüssel-Technologien bestimmend: Lichttechnisch-optisches Design mit Linsen und Reflektoren, das thermische Design zur Minimierung der LED-Sperrschicht-Temperatur sowie das elektronische Design zur Optimierung des LED-Konverter-Systems.

Relevante Messgrößen in diesem Zusammenhang sind radiometrische Größen, spektrometrische Größen, photometrische Größen, elektrische Größen sowie thermische Größen.

Alle radiometrischen, photometrischen und farbmétrischen Größen können mit präzisen Spektralradiometern, welche die spektrale Zusammensetzung des Lichtes ermitteln, über einen weiten Bereich von UV bis Infrarot per Software aus den gemessenen Spektraldaten errechnet werden. Die farbmétrischen Größen sind eine Untermenge der spektrometrischen Größen (Spektrum und Wellenlängen) und beinhalten die ähnlichste Farbtemperatur CCT, die Farbkordinaten x, y, z , den Farbwiedergabe-Index CRI (R_g, R_i ($i = 1$ bis 14)) sowie andere Farbräume u', v' und L^*, a^*, b^* , die durch Transformation aus den $x-, y-, z$ -Werten errechnet werden.

Bei den radiometrischen Größen handelt es sich um die Strahlungsener-

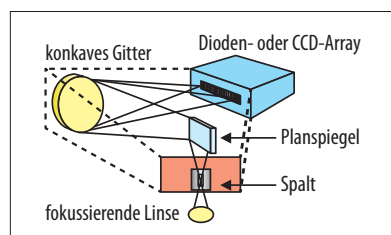


Bild 1. Funktionsdiagramm eines Array-Spektrometers.

gie Q_e (Ws), die Strahlungsleistung (entspricht dem Strahlungsfluss Φ_e (W)), die Strahlstärke I_e (W/sr), die Bestrahlungsstärke E_e (W/m²), die Strahldichte L_e (W/srm²) sowie den Wirkungsgrad, welcher der Strahlungsausbeute entspricht.

Array-Spektrometer bestehen aus einem feststehenden Beugungsgitter und einem Dioden- oder CCD-Array. Da das gesamte Spektrum durch die Detektorzeile simultan erfasst wird, können sehr kurze Messzeiten im Millisekundenbereich erzielt werden. Array-Spektrometer sind sehr robust und eignen sich insbesondere für den industriellen Einsatz. Bild 1 zeigt das Prinzip eines Array-Spektrometers.

Scannende Spektrometer beruhen auf einem Dioden- oder CCD-Zeilendetektor und einem sich drehenden Beugungsgitter. Da das Spektrum während des Drehvorgangs des Beugungsgitters sequenziell abgetastet wird, benötigen scannende Spektrometer eine Messzeit von mehreren Sekunden bis Minuten. Sie bieten eine sehr hohe Signaldynamik und Spektralaufösung sowie einen breiten Spektralbereich, da mehrere Gitter und Detektoren in einem Gerät integriert werden können.

Messung photometrischer Größen

Photometrische Größen sind der Lichtstrom Φ (lm), die Lichtstärke I (cd), die Beleuchtungsstärke E (lx), die Leuchtdichte L (cd/m²), die Lichtwelligkeit (Flimmern), die Lichtausbeute η (lm/W) und die Systemlichtausbeu-

te η_s (lm/W). Der Lichtstrom ist wie folgt definiert:

$$\Phi = K_m \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Das maximale photometrische Strahlungsäquivalent K_m beträgt 683 lm/W. Der Lichtstrom einer Lichtquelle kann mit den Integralen

$$\Phi = \int_{4\pi\text{sr}} E(\vartheta, \varphi) dA \quad (2)$$

oder

$$\Phi = \int_{4\pi\text{sr}} I(\vartheta, \varphi) d\omega \quad (3)$$

bestimmt werden. Mit dem photometrischen Entfernungsgesetz

$$I(\vartheta, \varphi) = r^2 E(\vartheta, \varphi) \quad (4)$$

erhält man für den Lichtstrom

$$\Phi = r^2 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi E(\vartheta, \varphi) \sin(\vartheta) d\vartheta \quad (5)$$

Messung mit Goniophotometern

Spiegelgoniophotometer und Leuchtenwender dienen zur Bestimmung von Lichtstärkeverteilungskurven (LVK), Lichtstrom, Lichtausbeute und Leuchtenwirkungsgrad. Zur messtechnischen Lichtstrom-Bestimmung werden die Integrale in eine Summendarstellung überführt (s. Formel 6).

Bild 2 zeigt das Funktionsschema eines Drehspiegel-Goniophotometers. Die Lichtquelle wird in C-Ebenen von 0°

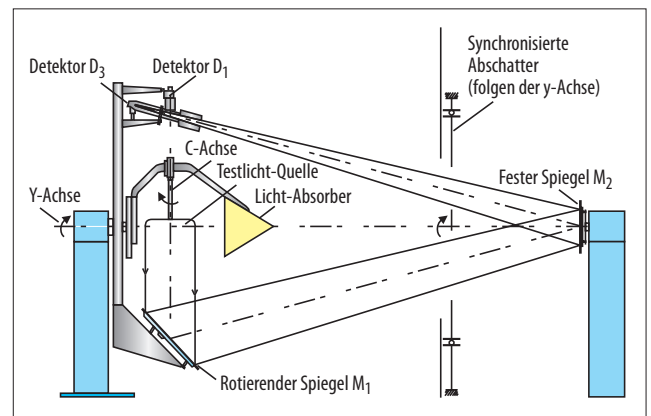


Bild 2. Funktionsschema eines Drehspiegel-Goniophotometers.

$$\begin{aligned} \Phi &\approx 2\pi \cdot \sum_{m=1}^k \left[\cos\left(\vartheta_m - \frac{\Delta\vartheta}{2}\right) - \cos\left(\vartheta_m + \frac{\Delta\vartheta}{2}\right) \right] \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n I(\varphi_i, \vartheta_m) \\ &= 4\pi \cdot \sin\frac{\Delta\vartheta}{2} \cdot \sum_{m=1}^k \sin\vartheta_m \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n I(\varphi_i, \vartheta_m) \\ (6) \quad &= 4\pi r^2 \cdot \sin\frac{\Delta\vartheta}{2} \cdot \sum_{m=1}^k \sin\vartheta_m \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n E(\varphi_i, \vartheta_m) \end{aligned}$$

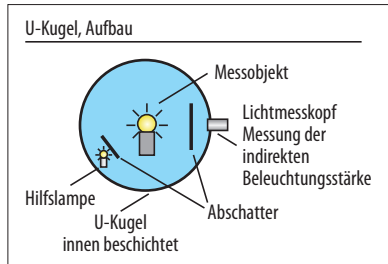
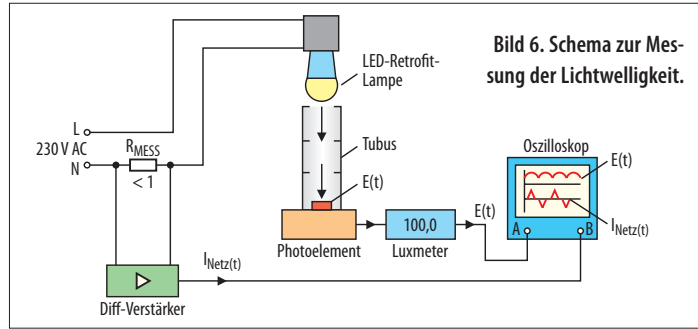


Bild 3. Lichtstrommessung mit der Ulbricht-Kugel.

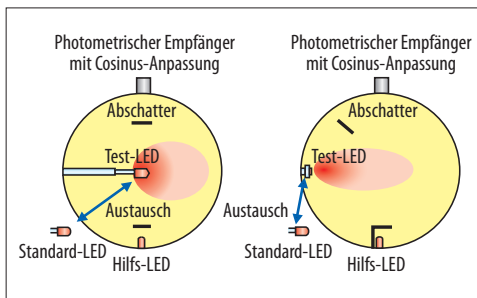


Bild 4. Ulbricht-Kugeln mit 4π- und 2π-Konfiguration für LED-Messungen.

bis 180° positioniert, der Spiegel rotiert in der G-Ebene von -180° bis +180°. Die Lichtquelle wird während der Messung nicht bewegt. Die Winkel-Messgenauigkeit beträgt ±0.01°. Kleine Lichtquellen wie z.B. LEDs können mit geringer Distanz mit dem Detektor D₁ gemessen

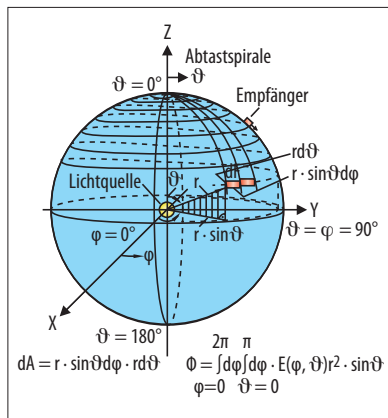


Bild 5. Spiral-Abtastverfahren mit einer elektronischen U-Kugel.

werden. Das Gerät arbeitet auch als Gonio-Spektroradiometer, wenn Detektor D₁ mit einem Spektrometer bestückt ist.

Ein weiteres Verfahren zur Bestimmung des Lichtstromes ist die Lichtstrommessung mit der Ulbricht-Kugel (Bild 3). Der Lichtstrom ist proportional zur indirekten Beleuchtungsstärke E_{ind} auf der Kugelwand A_k:

$$\Phi = E_{ind} \cdot A_k \cdot \frac{1 - \rho}{\rho} \quad (7)$$

Ulbricht-Kugeln sind geeignet zur Bestimmung der LED-Strahlungsleistung bzw. des LED-Lichtstroms von Lichtquellen in 2π-Konfiguration – hierbei wird nur die in den vorderen Halbraum emittierende Strahlung erfasst – oder in 4π-Konfiguration, um die in alle Richtungen emittierte Strahlung zu erfassen (Bild 4).

Zur Messung der indirekten Beleuchtungsstärke sind Digitalluxmeter mit Silizium-Photoelement mit V(λ)- und Kosinus-Korrektur gemäß DIN 5032 Klasse B geeignet.

Die Leuchtdichtemessung kann mit einem Vorsatztubus erfolgen, dessen Geometrie so berechnet ist, dass die angezeigte Beleuchtungsstärke in Lux mit dem Faktor 100 multipliziert wird und die Leuchtdichte in cd/m² liefert.

Die elektronische U-Kugel

Bei der Lichtstrommessung mit dem Spiral-Abtastverfahren werden die Lichtquelle und der photometrische Empfänger mit Cosinus- und V(λ)-Anpassung oder Arrayspektrometer simultan bewegt und somit die Lichtquelle auf einer Spiralbahn kontinuierlich fortlaufend abgetastet. Die Vorteile bestehen in der Absolut-Lichtstrommessung, wobei keine Lichtstromnormale benötigt werden, in der hohen Auflösung durch geringe Winkelschritt-

weiten Δφ und Δθ sowie in der geringen Messzeit von wenigen Minuten. Bild 5 zeigt das Spiral-Abtastverfahren mit einer elektronischen U-Kugel.

Die Abtastung des Lichtverteilungskörpers erfolgt nach der Formel

$$\Phi \approx r^2 \Delta\varphi \Delta\vartheta \sum_{i=1}^{M=1} E(\varphi_i, \vartheta_i) \sin\vartheta_i \quad (8)$$

Für eine Abtastung mit beispielsweise Δφ = Δθ = 5° und R = 1 m folgt die Bestimmungsgleichung zu

$$\Phi [lm] \approx 0,007615 [m^2] \cdot \sum_{i=1}^{2591} E_i [lx] \cdot \sin\vartheta_i \quad (9)$$

Wenn z.B. 10 Abtastwerte E_i pro Sekunde gemessen werden, benötigt man 2592/10 = 259,2 Sekunden = 4,32 Minuten für eine vollständige Absolut-Lichtstromintegration. Bei dieser Abtastfrequenz liegen 100 ms zwischen zwei Abtastungen, d.h. es bleibt dazwischen noch genügend Zeit für eine automatische Bereichsumschaltung, womit die Genauigkeit der Messung erheblich gesteigert werden kann.

Lichtwelligkeit

Es gibt DC-Licht und DC+AC-Licht. Bei Dimmung der LEDs mit der üblichen Pulsweitenmodulation (PWM) hat man den Vorteil, dass der Farbort erhalten bleibt und ein Schalttransistor am PWM-Ausgang des Mikrocontrollers ausreicht. Allerdings bezahlt man diese Vorteile mit einer geringeren Lichtausbeute und einer hohen Lichtwelligkeit.

Das Analog-Dimm-Verfahren von LEDs vermeidet die i.A. störende Lichtwelligkeit; dieses Prinzip ist in der Lichtbranche noch wenig bekannt. Beim Analogdimmen werden die LEDs statt mit Pulsweitenmodulation (PWM) mit einem kontinuierlich regelbaren Kon-

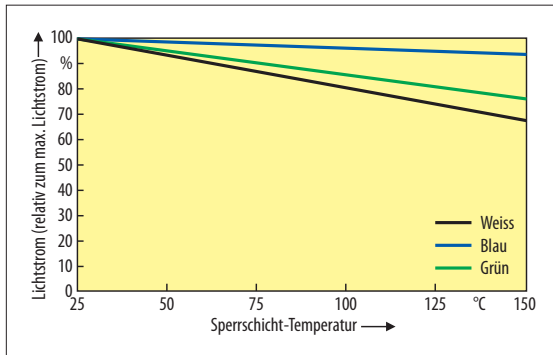


Bild 7. Lichtstromrückgang mit zunehmender Sperrschicht-Temperatur.

stant-Gleichstrom gedimmt, d.h. es entsteht keine Lichtwelligkeit. Die Vorteile des Analog-Dimm-Verfahrens sind:

- Kein Flimmern, kein Stroboskop-effekt, keine Interferenzen mit anderen Lichtquellen wie z.B. Video-Bildschirmen, Vermeidung eventueller Probleme bei TV-Aufnahmen und Fotos mit Digitalkameras.
- Geringere Strombelastung der LED-Sperrschicht, dadurch geringere Sperrschichttemperatur, höhere Lichtausbeute, höhere Lebensdauer.
- Günstige EMV, da keine steilen Strom- und Spannungspulse auftreten (PWM-Pulse erzeugen dagegen ein breitbandiges Störspektrum).
- Keine Gefahr evtl. wahrnehmbarer akustischer Geräusche.
- Der Nachteil des Analog-Dimm-Verfahrens besteht darin, dass sich die ähnlichste Farbtemperatur und damit der Farbort geringfügig mit dem LED-Vorwärtsstrom ändern. Bild 6 zeigt ein Schema zur Messung der Lichtwelligkeit.

Messung elektrischer Größen

Die für LEDs und LED-Konverter relevanten elektrischen Größen sind der Vorwärtsstrom I_F , die Vorwärtsspannung U_F , der Sperrstrom I_R , die Sperrspannung U_R , die Verlustleistung, der Leistungsfaktor, die Kurvenform des Netzstroms, der Netzspannungsbereich, die Abhängigkeit des Lichtstroms von der Netzspannung, der Konstantstrom, die Konstantspannung, der elektrische Wirkungsgrad des Converters (möglichst >90 %), das Tastverhältnis (PWM) und die ESD-Festigkeit (z.B. bis 8 kV).

Elektrostatische Ladungen und deren Feldstärke können mit einem Feldmeter ermittelt werden. Wichtig ist auch die Netz-Transienten-Festigkeit

bei Convertern und LED-Modulen (>4 kV), EMV (elektromagnetische Verträglichkeit, Störspektrum) und THD (Total Harmonic Distortion, eine gebräuchliche Angabe, um die Größe der Anteile, die durch nichtlineare Verzerrungen eines elektrischen Signals entstehen, zu quantifizieren). Der THD definiert sich

über die Messung der Summe der harmonischen Anteile eines Signals im Verhältnis zur Grundschwingung.

Zur Bestimmung der elektrischen Parameter von LEDs und LED-Convertern gibt es spezielle Mess- und Testgeräte.

Messung thermischer Größen

Wichtige thermische Größen sind die Sperrschicht-Temperatur T_j (Richtwert: $T_j < 85^\circ\text{C}$), die Umgebungstemperatur T_{amb} und der Wärmewiderstand R_{th} . LED-Parameter wie Lichtausbeute, Lebensdauer und Farbkoordinaten (Lichtfarbe) werden bei steigender Chip-Temperatur negativ beeinflusst. Die notwendige Entwärmung der LED-Chips geschieht durch Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung. Bild 7 zeigt den Lichtstromrückgang mit zunehmender Sperrschicht-Temperatur.

Zur Messung thermischer Größen verwendet werden z.B. Kontaktthermometer (PT1000, Thermoelemente, Halbleiter-Sensoren), IR-Strahlungs-Thermometer und Wärmebildkameras. LED-Sperrschicht-Temperaturen T_j können nur indirekt gemessen werden.

Der absolute Wärmewiderstand R_{th} in $^\circ\text{C}/\text{W}$ oder K/W ist eine spezifische Kennzahl eines Bauteils. Er wird u. a. zur Charakterisierung von Kühlkörpern oder Wärmeleitpads angegeben. Für die in der Praxis relevante Sperrschicht-Temperatur T_j gilt:

$$T_j = R_{\text{thja}} \times P + T_a$$

R_{thja} ist der Wärmewiderstand (Sperrschicht/ambient), T_j die Sperrschichttemperatur, T_a die Umgebungstemperatur (ambient) und P die Gesamtleistung der LED ($I_F \times U_F$). Bei einer 1-W-LED würde sich z.B. P zu $3 \text{ V} \times 0,35 \text{ A} = 1,05 \text{ W}$ berechnen und T_j zu $(30^\circ\text{C}/\text{W} \times 1,05 \text{ W}) + 50^\circ\text{C} = 81,5^\circ\text{C}$. fr



LED-Messtechnik

Lösungen vom Weltmarktführer

Instrument Systems setzt weiterhin Maßstäbe in der LED-Messtechnik. Ob beim Testen von Einzel-LEDs (Standard oder High-Power), LED-Modulen oder OLEDs – weltweit vertraut die LED-Industrie auf unsere hochwertigen Messgeräte, die für schnellste Produktionstests sowie anspruchsvolle Anwendungen in Forschung und Entwicklung und in der Qualitätssicherung eingesetzt werden.



Instrument Systems
light measurement