

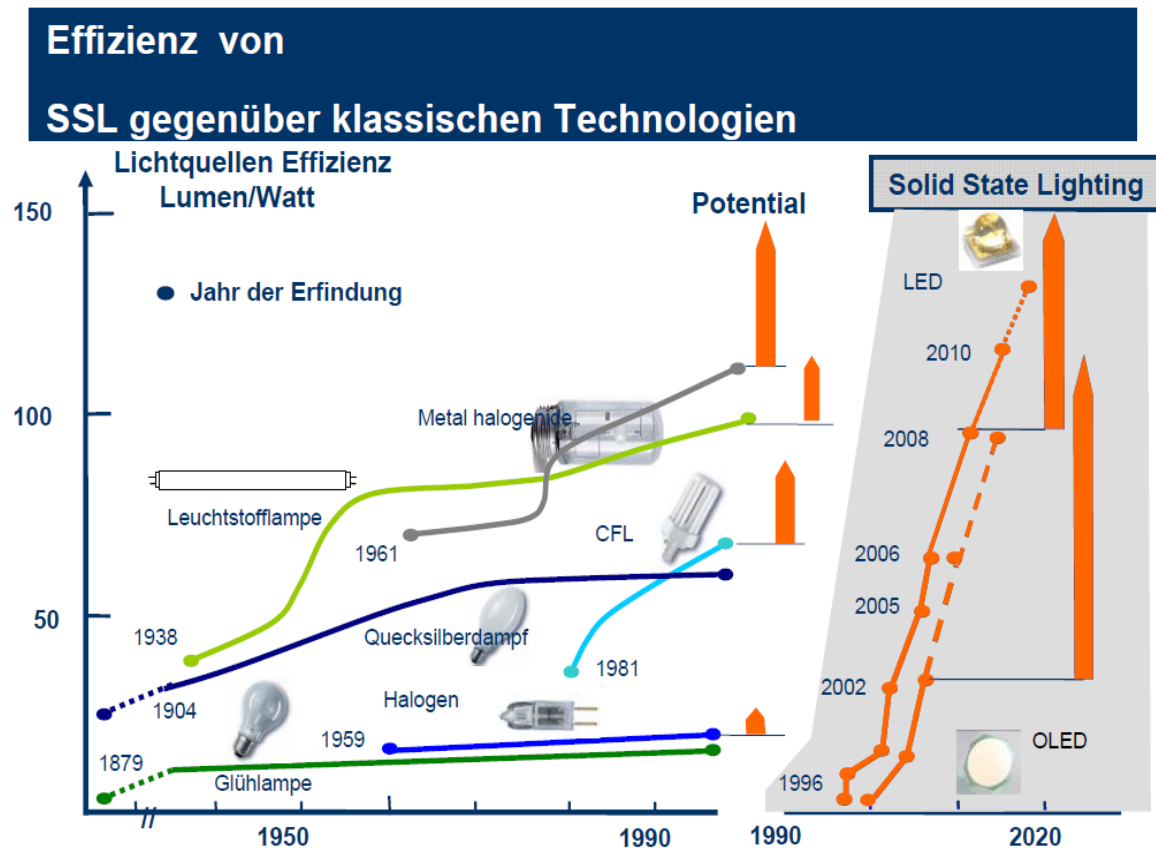
Aktuelle Messtechnik für LEDs, LED-Lampen und LED-Leuchten

Prof. Dr.-Ing. Peter Marx

MX-Elektronik, Am Kleinen Wannsee 12 J, D-14109 Berlin-Germany

www.mx-electronic.com

info@mx-electronic.com



Entwicklung der Lichtausbeute weißer LEDs und herkömmlicher Weißlichtlampen (OSRAM)

Seit Edisons Glühlampe von 1879 mit einer anfänglich sehr geringen Lichtausbeute von nur 1,4 lm/W konnte die Effizienz der elektrischen Lampen in den vergangenen 130 Jahren enorm gesteigert werden, wobei in den letzten Jahren die Halbleiterlichtquellen wegen ihrer hohen Lichtausbeute und der langen Lebensdauer im besonderen Focus der Lichttechnik stehen.

Das Entwicklungspotential für weiße LEDs reicht etwa bis 300 lm/W.

Hinweis: Die Gasglühkörper der heute noch existierenden Gaslaternen, 85.000 in Europa, davon allein rd. 40.000 in Berlin, haben auch nur eine Lichtausbeute von 1,6 lm/W.

Zum Vergleich: Die Lichtausbeute der Sonne, unserer wichtigsten Licht- und Wärmequelle, beträgt $\approx 100 \text{ lm/W}$.

Die effizientesten weißen LEDs erreichen derzeit eine Lichtausbeute über 200 lm/W (Aussage der Firma CREE). Die Systemlichtausbeute $\eta_s (\text{lm/W})$, System = Lichtquelle + Betriebsgerät liegt wegen der Verluste im Betriebsgerät (elektronischer LED Konverter) darunter. Die Lichtausbeute ist stark von der Lichtfarbe abhängig, bei warmweißen LEDs liegt sie deutlich unter der von kaltweißen.

Hinweis: OLEDs haben inzwischen bereits 87 lm/W erreicht mit einer Leuchtdichte von 1000 cd/m^2 und $\text{CCT} = 4000 \text{ K}$.

Für die Entwicklung von LED-Innenleuchten und LED-Außenleuchten sind drei Schlüssel-Technologien bestimmend:

- Lichttechnisch-optisches Design mit Linsen und Reflektoren
- Thermisches Design zur Minimierung der LED-Junction-Temperatur
- Elektronisches Design zur Optimierung des Systems LED-Konverter

Um diese Ziele zu erreichen, ist eine geeignete Messtechnik erforderlich.

Relevant sind:

- **Radiometrische Größen**
- **Spektrometrische Größen**
- **Photometrische Größen**
- **Elektrische Größen**
- **Thermische Größen**

Literatur: CIE-Report 127/2007 „Measurement of LEDs“

• **Radiometrische Größen:**

Strahlungsenergie $Q_e (\text{Ws})$, Strahlungsleistung = Strahlungsfluss $\Phi_e (\text{W})$,
 Strahlstärke $I_e (\text{W/sr})$, Bestrahlungsstärke $E_e (\text{W/m}^2)$, Strahldichte $L_e (\text{W/sr m}^2)$,
 Wirkungsgrad = Strahlungsausbeute

• **Spektrometrische Größen:**

Spektrum und Wellenlängen, Farbmetrische Größen: ähnlichste Farbtemperatur CCT, Farbkoordinaten x, y, z ; Farbwiedergabe-Kennzahlen, CRI ($R_a, R_i (i = 1 - 14)$) sowie andere Farbräume u', v' und L^*, a^*, b^* , die durch Transformation aus den $x-, y-, z$ - Werten errechnet werden.

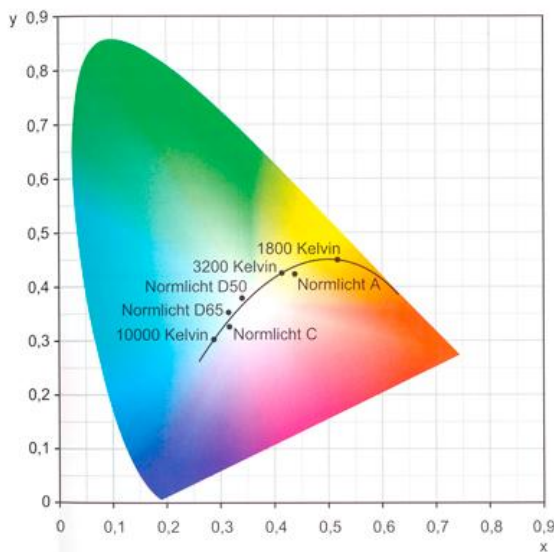
Für die Normfarbwerte X, Y, Z (DIN 5033) gelten die Beziehungen

$$X = k \int \varphi(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

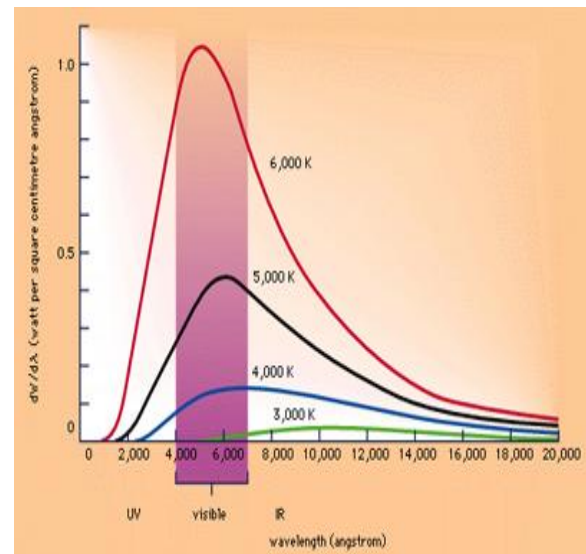
$$Y = k \int \varphi(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = k \int \varphi(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

$\varphi(\lambda)$ ist die relative spektrale Strahlungsfunktion und $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ sind die standardisierten Normspektralwertfunktionen. Zur praktischen Berechnung werden die Integrale durch Summen ersetzt.



Normfarbtafel



Spektrum des schwarzen Strahlers

Aus den Normfarbwerten X, Y, Z lassen sich zur Kennzeichnung der Farbart die Normfarbwertanteile x, y, z ableiten, von denen wegen $x + y + z = 1$ meist nur x und y benutzt werden.

$$x = X / (X + Y + Z)$$

$$y = Y / (X + Y + Z)$$

$$z = Z / (X + Y + Z)$$

Ähnlichste Farbtemperatur CCT (Correlated Color Temperature)

Durch die ähnlichste Farbtemperatur CCT wird die Lichtfarbe einer Lichtquelle gekennzeichnet. CCT wird aus den Farbkoordinaten x, y, z berechnet.

Für den CCT-Bereich 3000 K bis 50000 K gilt nach *Moreno und Contreras* die Formel

$$CCT(x,y,z)=A_0+\sum_{i=1}^3 A_i \exp\left[-n(x,y,z)/t_i\right]$$

mit $A_0 = -949,86315$, $A_1 = 6253,80338$, $A_2 = 28,70599$, $A_3 = 0,00004$ sowie

$$t_1 = 0,92159, t_2 = 0,20039, t_3 = 0,07125 \quad \text{und} \quad n = \frac{x-x_e}{y-y_e}$$

mit $x_e = 0,3366$ und $y_e = 0,1735$ // x, y sind die gemessenen Normfarbwertanteile, $z = 1 - x - y$

Klassifizierung:

Warmweiss	$CCT < 3300 \text{ K}$
Neutralweiss	$3300 \text{ K} < CCT < 5300 \text{ K}$
Tageslichtweiss	$CCT > 5300 \text{ K}$

Farbwiedergabeindex CRI (Color Rendering Index)

Der Farbwiedergabeindex CRI gibt die Qualität der Farbwiedergabe bei Beleuchtung mit einer bestimmten Lichtquelle an und ist abhängig von der relativen spektralen Energieverteilung der Lichtquelle, der spektralen Remission der beleuchteten Objekte und der Farbstimmung des Auges (vgl. DIN 6169, Teil 2).

Der allgemeine Farbwiedergabewert R_a sagt aus, wie „echt“ die Farben von Gegenständen für das menschliche Auge aussehen, wenn sie von einer Lampe beleuchtet werden. Der maximal erreichbare Farbwiedergabewert liegt bei 100, die Bewertung ist:

Farbwiedergabeindex Farbwiedergabestufe Bewertung nach DIN

90-100	1A	sehr hoch
80-90	1B	sehr hoch
70-80	2A	hoch
60-70	2B	hoch
40-60	3	mittel
20-40	4	gering

Für die Büro- oder Arbeitsplatzbeleuchtung werden nach DIN 5035 mindestens die Farbwiedergabestufe 2A empfohlen, für Krankenhäuser und Speiseräume mindestens 1B, für besonders anspruchsvolle Aufgaben (z.B. Zahnarzt) 1A.

Berechnung des Farbwiedergabeindex

Zur Bestimmung des Farbwiedergabeindex einer Lichtquelle K werden acht Testfarben, die in DIN 6169 definiert sind, mit der Lampe beleuchtet und gemessen, wie stark jede einzelne dieser Farben, im Vergleich zur Beleuchtung mit einer Bezugslichtquelle, auf der CIE-Farbkarte verschoben ist.

Um die Bezugslichtquelle zu finden, muss zuerst die Farbtemperatur der Lichtquelle K bestimmt werden. Liegt die Farbtemperatur oberhalb von 5000K wird eine Phase des Tageslichts mit derselben Farbtemperatur als Bezugslichtquelle verwendet, bei einer Farbtemperatur unterhalb von 5000K ein Planckscher Strahler derselben Farbtemperatur.

Anschließend werden die Farborte von acht (bzw.14) Testfarben bei Beleuchtung mit der Lichtquelle K und Beleuchtung mit der Bezugslichtquelle R bestimmt. Die Farben werden dabei mit $i = 1 \dots 8$ durchnummeriert.

Die Farborte werden als (x_{iR}, y_{iR}, z_{iR}) für die Bezugslichtquelle und (x_{iK}, y_{iK}, z_{iK}) für die Lichtquelle bezeichnet.

Die Farborte werden in den uv-Farbraum transformiert: (u_{iR}, v_{iR}) und (u_{iK}, v_{iK}) . Da die Farborte der Lichtquelle K und der Bezugslichtquelle R nicht identisch sind, sondern nur ihre ähnlichsten Farbtemperaturen gleich sind, muss die chromatische Adaption des Auges an die Farbe des Lichts berücksichtigt werden (Farbumstimmung).

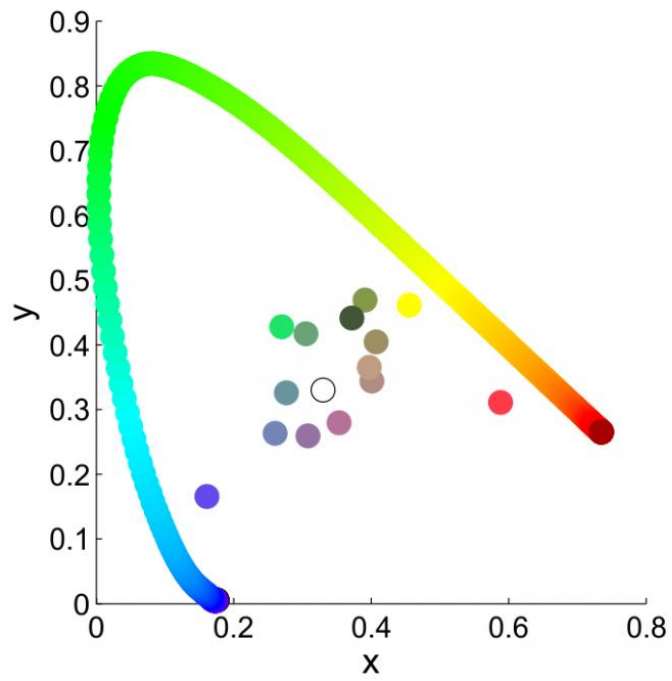
Dazu werden die Farborte (u_{iR}, v_{iR}) in den CIE-1976-UCS-Farbraum (u'_{iR}, v'_{iR}) transformiert. Diese Transformation ist auch als von Kries-Transformation bekannt. (UCS = Uniform Chromaticity Scale)

Zuletzt werden diese Koordinaten in den CIE 1964 Farbraum transformiert und in diesem Koordinatensystem wird der Abstand ΔE_i für jede Farben bestimmt. Damit ergibt sich der Farbwiedergabeindex R_i dieser Farbe zu

$$R_i = 100 - 4,6 \Delta E_i.$$

Der allgemeine Farbwiedergabeindex ist dann der Mittelwert für die ersten acht Farben

$$Ra = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i$$



Farborte der 14 Testfarben im x-y-Farbraum

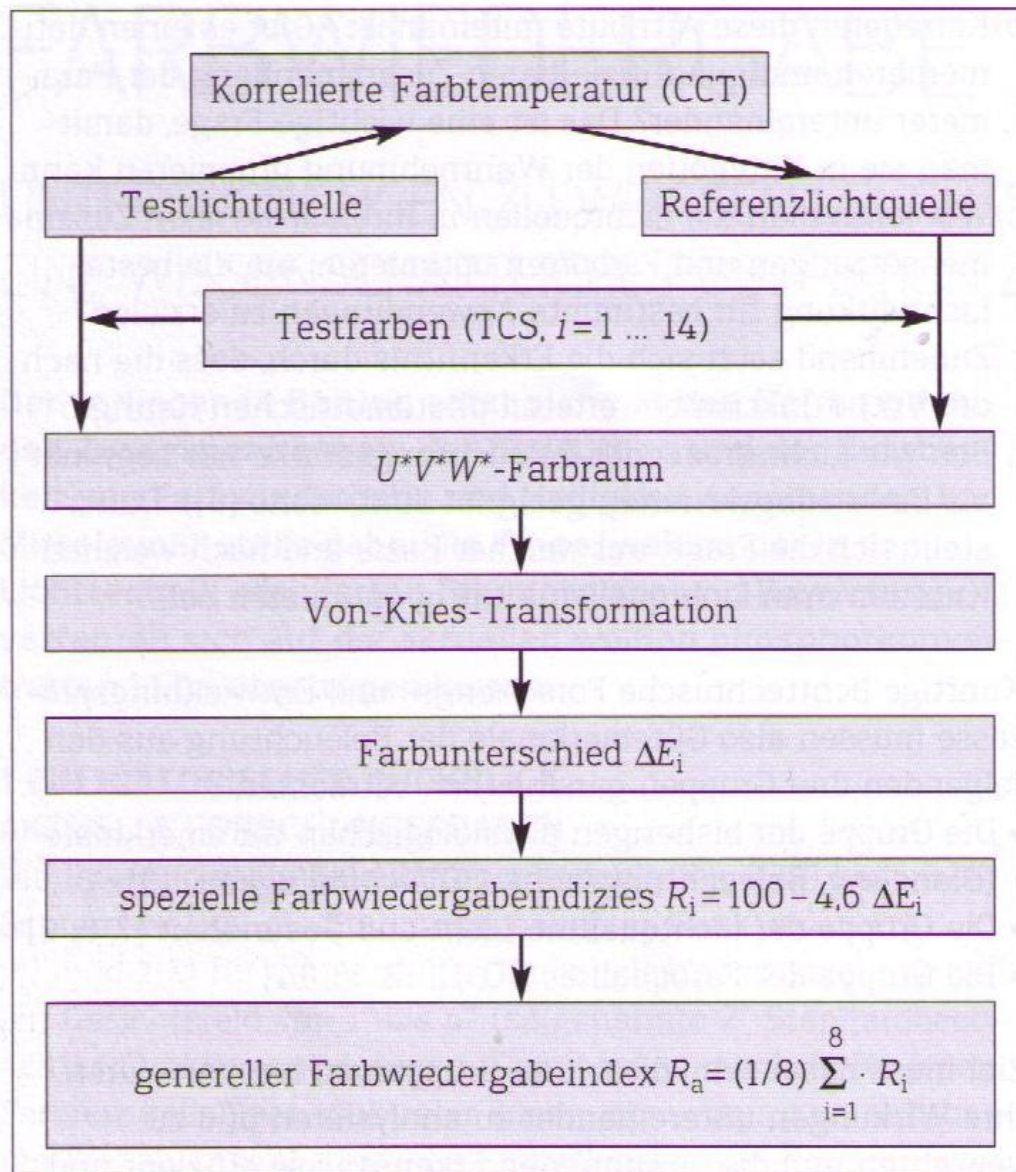
Testfarben					
R_1	Altrosa		R_5	Türkisblau	
R_2	Senfgelb		R_6	Himmelblau	
R_3	Gelbgrün		R_7	Asterviolett	
R_4	Hellgrün		R_8	Fliederviolett	
Zusätzliche Testfarben mit gesättigten Farben					
R_9	Rot		R_{12}	Blau	
R_{10}	Gelb		R_{13}	Hautfarbe	
R_{11}	Grün		R_{14}	Blattgrün	

Die 14 Testfarben nach DIN 6169

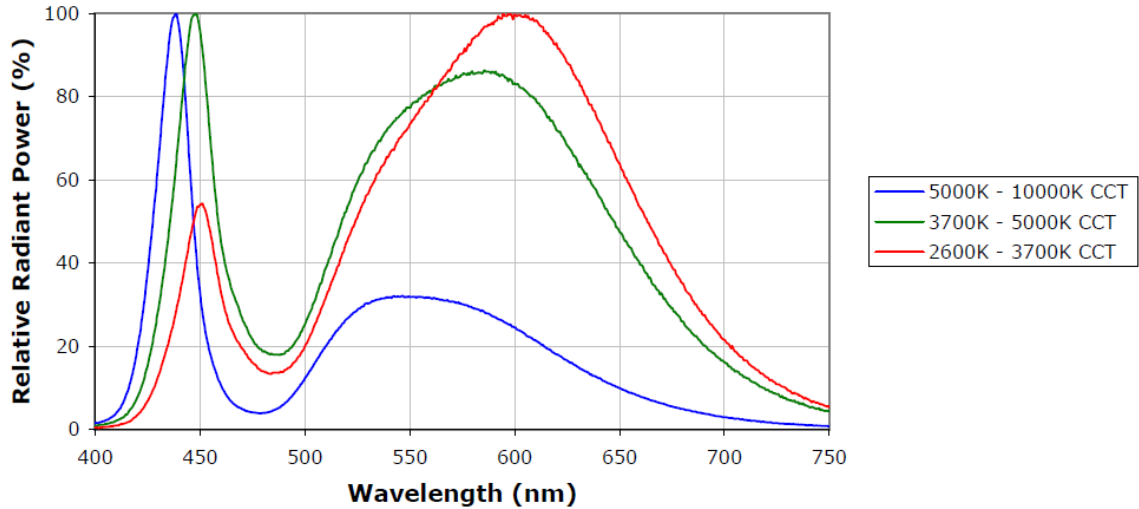
Der allgemeine Farbwiedergabeindex R_a berechnet sich aus dem Mittelwert der speziellen Farbwiedergabeindizes R_i der ersten 8 Testfarben.

Farbwiedergabeindex einiger Lampen

Lampe	Index R_a
Glühlampe	bis 100
Leuchtstofflampe, weiß de Luxe	85..100
Leuchtstofflampe, weiß	70...84
LED, weiß	70...95
Leuchtstofflampe	50...90
Halogen-Metall dampflampe	60...95
Natriumdampf-Hochdrucklampe, warmweiß	80...85
Quecksilberdampf-Hochdrucklampe	45
Natriumdampf-Hochdrucklampe, Standard	18...30
Natriumdampf-Hochdrucklampe, farbverbessert	60



Schema der Berechnung des CIE-Farbwiedergabeindex für Lichtquellen
(vgl. CIE-Publ. 13.3-1995)



Typische spektrale Verteilung weißer LEDs (phosphorkonvertiert) bei verschiedenen Farbtemperaturen

LEDs können zudem mäßig gesättigte Farben relativ gut wiedergeben, während Farben hoher Sättigung nur schlecht wiedergegeben werden.

Aus visuellen Farbwiedergabeversuchen ergab sich, dass die gegenwärtige CRI-Methode Beleuchtungssituationen mit weißen LED-Lichtquellen nicht gut beschreibt.

Daher wurde beim CIE TC1-69 Meeting in Peking im Jahr 2007 die Zielvorgabe gemacht, innerhalb von 4 Jahren einen neuen Farbwiedergabeindex für sämtliche Lichtquellen zu entwickeln.

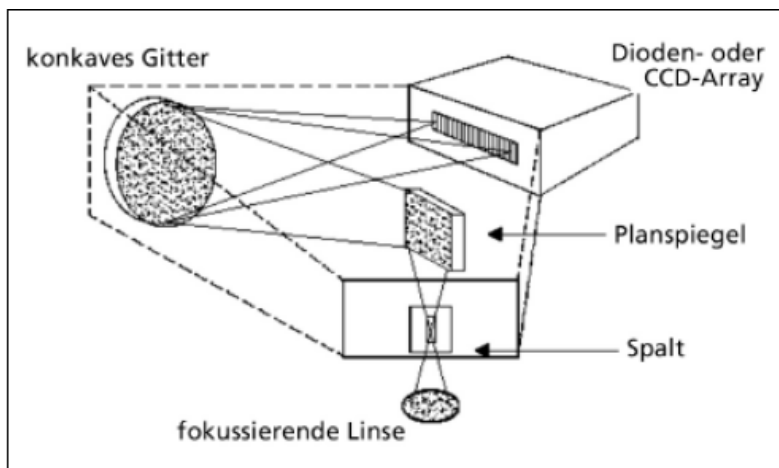
Licht- und Strahlungsgrößen

Physikalische Größe	Einheit	Lichttechnische Größe	Einheit
Strahlungsmenge (Strahlungsenergie)	W * s	Lichtmenge	lm * s
Strahlungsfluss (Strahlungsleistung)	W	Lichtstrom	lm
Spezifische Ausstrahlung	W * m ⁻²	Spezifische Lichtausstrahlung	lm * m ⁻²
Strahlstärke	W * sr ⁻¹	Lichtstärke	cd, lm sr ⁻¹
Strahldichte	W * sr ⁻¹ * m ⁻²	Leuchtdichte	cd * m ⁻²
Bestrahlungsstärke	W * m ⁻²	Beleuchtungsstärke	lx
Bestrahlung (Energiedichte)	W * m ⁻² * s	Belichtung	lx * s

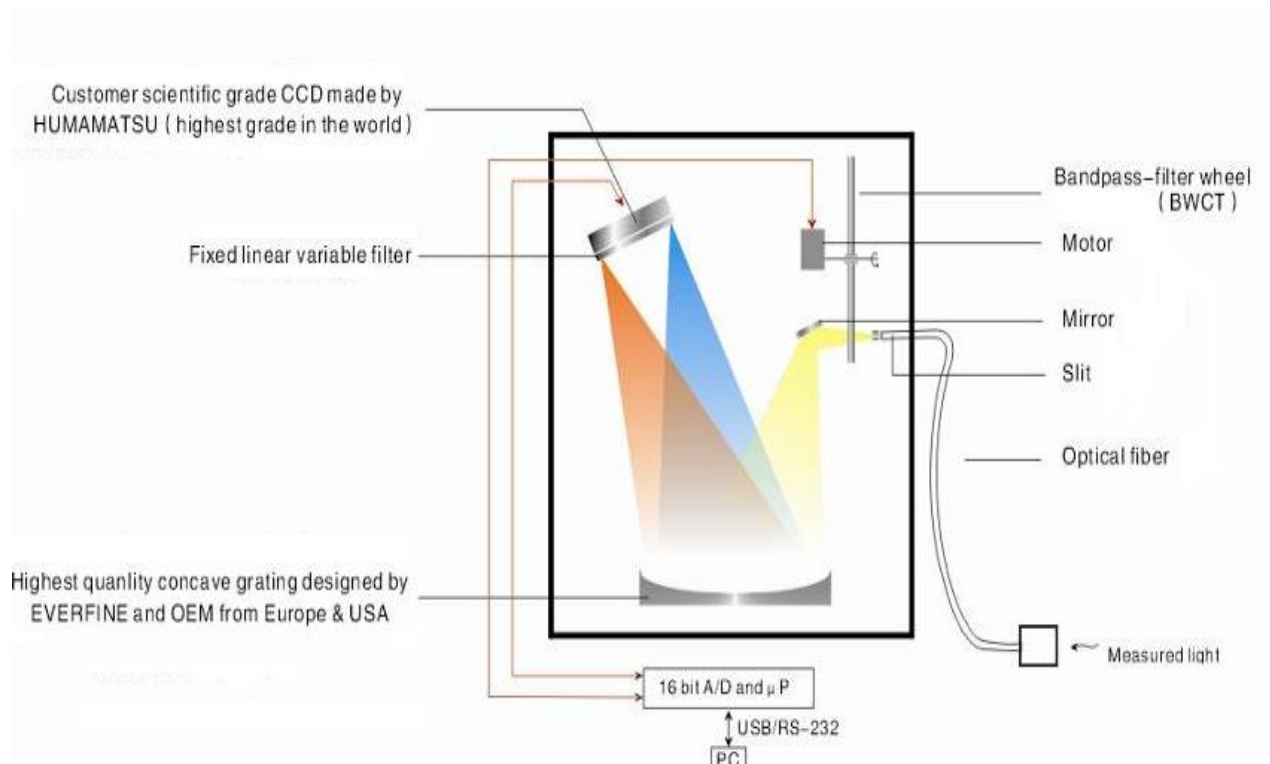
Messung radiometrischer und spektrometrischer Größen

Alle radiometrischen, photometrischen und farbmétrischen Größen können mit präzisen Spektralradiometern über einen weiten Bereich von UV bis IR per Software aus den gemessenen Spektraldaten errechnet werden. Optische Spektrometer werden in zwei unterschiedlichen Bauweisen hergestellt:

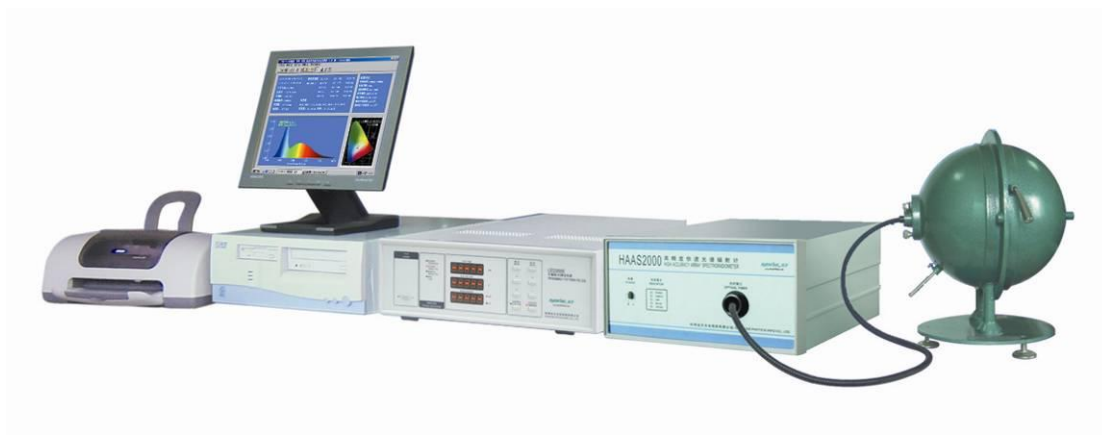
Array-Spektrometer bestehen aus einem feststehenden Beugungsgitter und einer Detektorzeile (beispielsweise einem CCD-Sensor). Da das gesamte Spektrum durch die Detektorzeile simultan erfasst wird, können sehr kurze Messzeiten im Millisekundenbereich erzielt werden. Array-Spektrometer sind sehr robust und eignen sich insbesondere für den industriellen Einsatz.



Prinzip des Array-Spektrometers

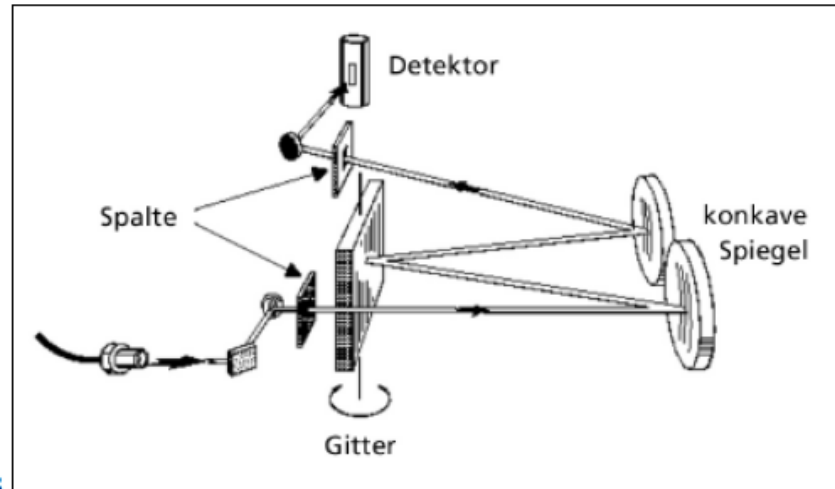


Prinzip eines Präzisions-Array-Spektrometers



LED-Mess-System für spektrale, farbmétrische und elektrische Parameter

Scannende Spektrometer beruhen auf einem Einzel-Detektor 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.



Prinzip des scannenden Spektrometers

Messung photometrischer Größen

Photometrische Größen sind: Lichtstrom Φ (lm), Lichtstärke I (cd), Beleuchtungsstärke E (lx), Leuchtdichte L (cd/m²), Lichtwelligkeit (Flimmern), Lichtausbeute η (lm/W), Systemlichtausbeute η_s (lm/W), System = Lichtquelle + Betriebsgerät

Definition des Lichtstroms

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

Maximales photometrisches Strahlungsäquivalent

$$K_m = 683 \text{ lm/W}$$

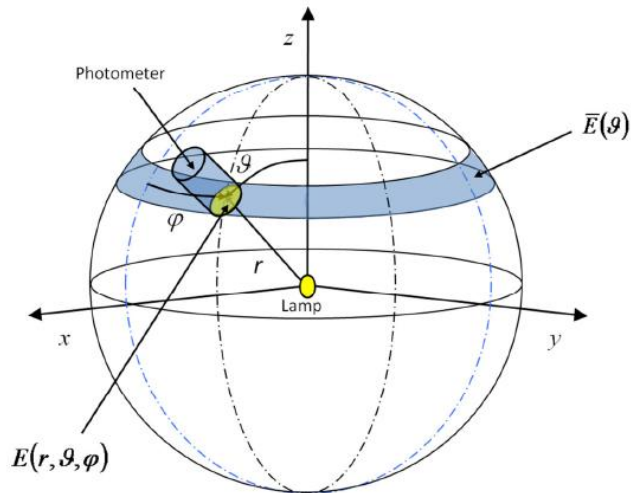
Der Lichtstrom einer Lichtquelle kann mit den Integralen

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

oder

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

bestimmt werden.



Beleuchtungsstärke als Funktion des Radiusvektors $r(\vartheta, \varphi)$

Mit dem photometrischen Entfernungsgesetz

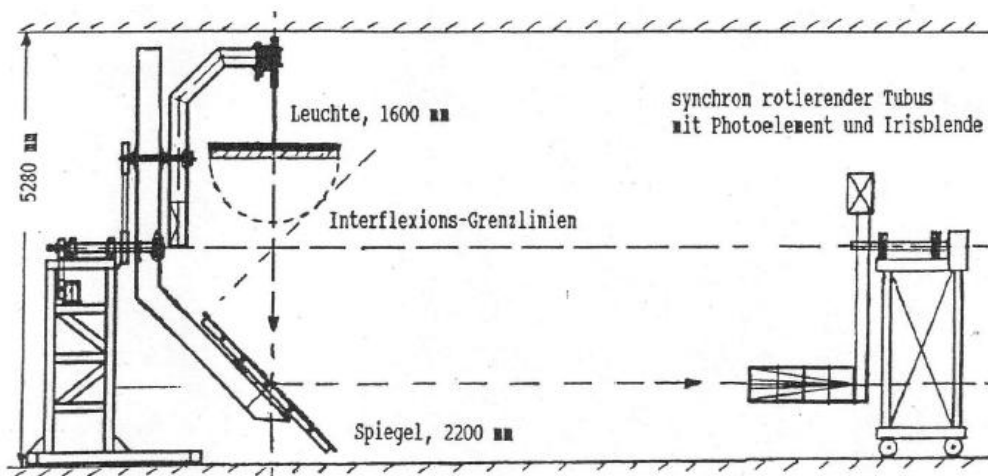
$$I(\vartheta, \varphi) = r^2 E(\vartheta, \varphi)$$

erhält man für den Lichtstrom

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

Messung mit Goniophotometern

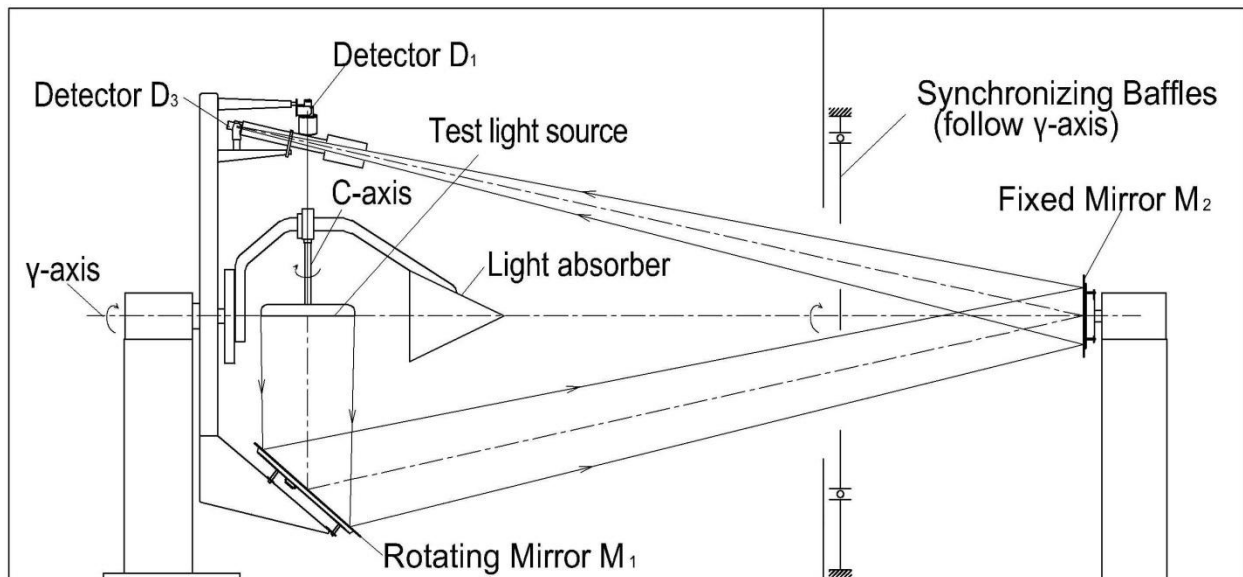
Spiegelgoniophotometer und Leuchtenwender dienen zur Bestimmung von Lichtstärkeverteilungskurven (LVK), Lichtstrom, Lichtausbeute und Leuchtenwirkungsgrad.



Exzenter-Drehspiegel-Goniophotometer mit reduzierter Bauhöhe ($h=5000$ mm)

Zur messtechnischen Lichtstrom-Bestimmung werden die Integrale in eine Summendarstellung überführt.

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



Drehspiegel-Goniophotometer

Typische Spezifikation

Die Lichtquelle wird in C-Ebenen von 0° bis 180° positioniert, der Spiegel rotiert in der G-Ebene von -180° bis +180°. Die Lichtquelle wird während der Messung nicht bewegt.

Winkel-Messgenauigkeit: $\pm 0.01^\circ$

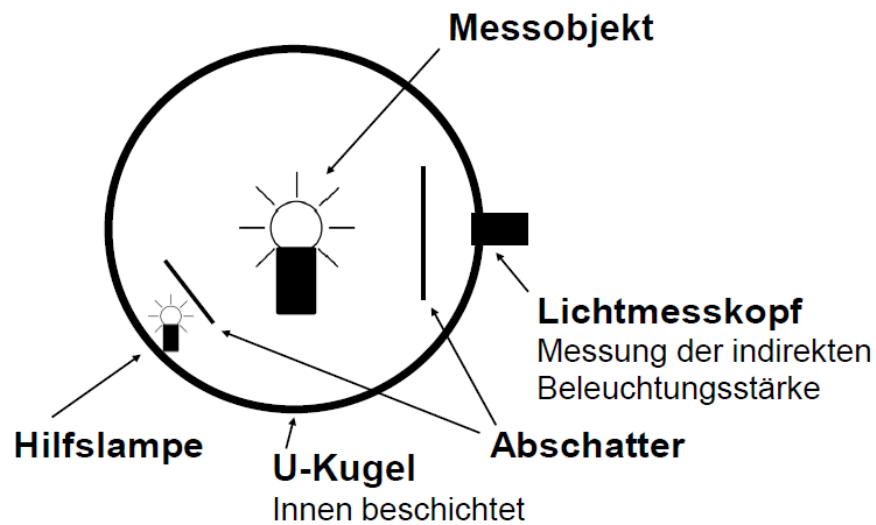
Kleine Lichtquellen, z.B. LEDs können mit geringer Distanz mit dem Detektor D1 gemessen werden. Das Gerät arbeitet auch als Gonio-Spektroradiometer, wenn Detektor D1 mit einem Spektrometer bestückt ist.



Drehspiegel-Goniophotometer

Lichtstrommessung mit der Ulbricht-Kugel

U-Kugel, Aufbau



Der Lichtstrom ist proportional zur indirekten Beleuchtungsstärke E_{ind} auf der Kugelwand A_k .

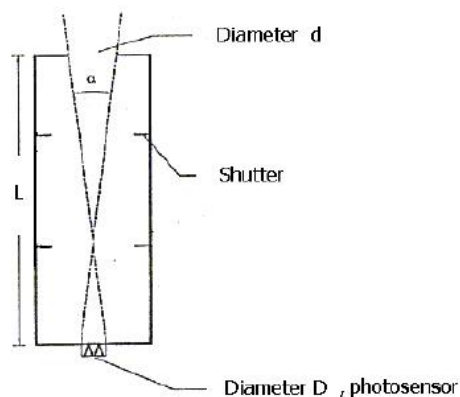
$$\Phi = E_{\text{ind}} \cdot A_k \cdot \frac{1 - \rho}{\rho}$$

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



MINILUX-Geräte: 6 Messbereiche, Messumfang: E = 1 mlx....200.000 lx
L = 100 mcd/m² bis 19,99×10⁶ cd/m²

Leuchtdichtemessung mit Vorsatzzubus

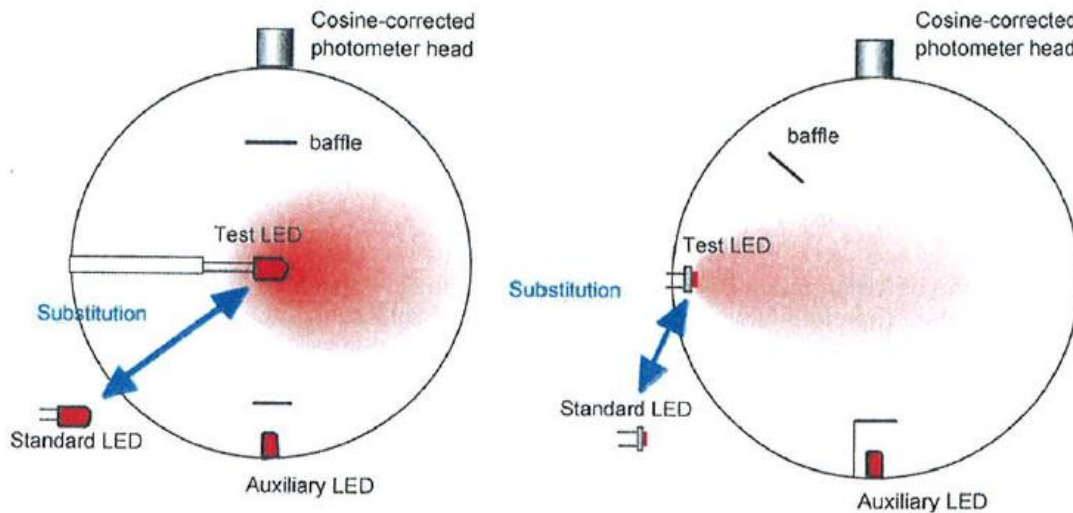


Die Geometrie des Tubus ist so berechnet, dass der Zusammenhang zwischen Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke sehr einfach ist.

$$L = 100 \times E \quad \text{mit } E \text{ in lx folgt } L \text{ in cd/m}^2$$

Die angezeigte Beleuchtungsstärke in Lux wird mit dem Faktor 100 multipliziert und liefert die Leuchtdichte in cd/m².

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.



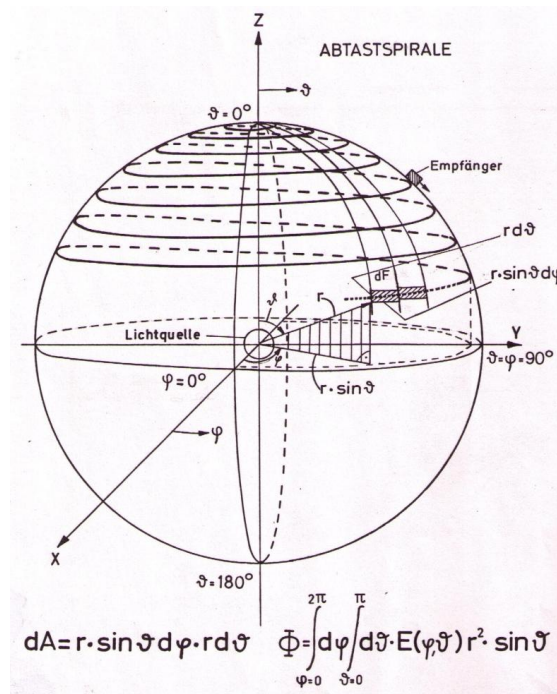
Ulbricht-Kugeln mit 4π - oder 2π -Konfiguration für LED-Messungen



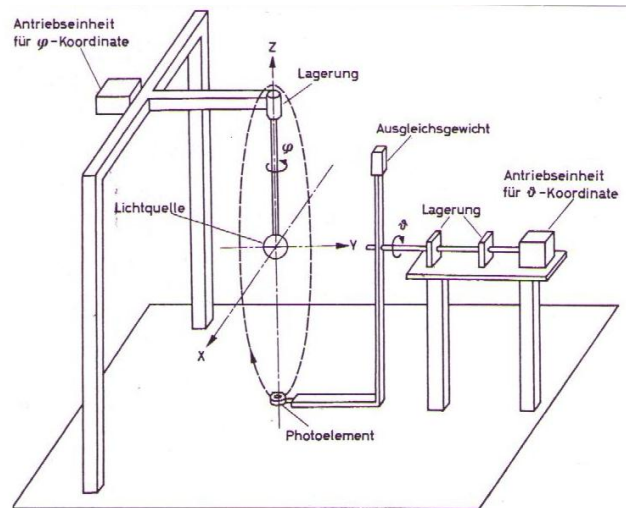
Mess-System für spektrale, farbmimetrische und elektrische Parameter von LED-Lampen und LED-Leuchten

Lichtstrommessung mit dem Spiral-Abtastverfahren (Elektronische U-Kugel)

Hierbei werden die Lichtquelle und der photometrische Empfänger mit Cosinus- und $V(\lambda)$ -Anpassung oder Arrayspektrometer simultan bewegt und somit die Lichtquelle auf einer Spiralbahn kontinuierlich fortlaufend abgetastet. Vorteile: Absolut-Lichtstrommessung, es werden keine Lichtstromnormale benötigt, hohe Auflösung durch geringe Winkelschrittweiten $\Delta \varphi$ und $\Delta \vartheta$ und geringe Messzeit (wenige Minuten).



Spiral-Abtastverfahren (Elektronische U-Kugel)



Spiral-Abtastmechanik für die elektronische U-Kugel

Formeln für das Abtast-Spiralverfahren

Für den Lichtstrom gilt

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

Zahl der Spiralwindungen $z = \frac{180^\circ}{\Delta \vartheta}$

Zahl der abgetasteten Messwerte auf der Spiralbahn $M = \frac{z \cdot 360^\circ}{\Delta \varphi}$

Inkrementierter Messwinkel: $\vartheta_i = \frac{i \cdot 180^\circ}{M}$

Rechen-Beispiel:

Winkelintervalle $\Delta \varphi = \Delta \vartheta = 5^\circ$

Zahl der Spiralwindungen $z = 36$

Messwertanzahl $M = \frac{z \cdot 360^\circ}{\Delta \varphi} = 2592 \text{ Messwerte}$

inkrementierter Meßwinkel: $\vartheta_i = \frac{i \cdot 180^\circ}{M} = i \cdot 0,06944^\circ$

Radius der abgetasteten Kugel $R = 1 \text{ m}$

Damit erhält man die sehr einfache Formel zur Lichtstrombestimmung:

$$\Phi \approx (1\text{m})^2 5^\circ \cdot 5^\circ \sum_{i=1}^{2591} E_i \sin \vartheta_i$$

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

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.

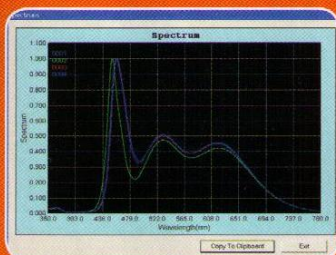
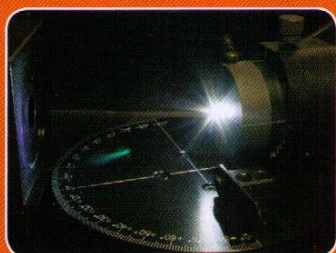
Die erforderlichen Drehzahlen betragen dann

$$n_{\varphi} = \frac{z}{4.32 \text{ min}} = \frac{36}{4.32 \text{ min}} = 8,333 \frac{\text{U}}{\text{min}} = \frac{1\text{U}}{7,2 \text{ s}}$$

$$n_{\vartheta} = \frac{0,5 \text{ U}}{4,32 \text{ min}} = 0,1157 \frac{\text{U}}{\text{min}} = \frac{1\text{U}}{518,6 \text{ s}} = \frac{1\text{U}}{8,64 \text{ min}}$$

Teure Winkelgeber für φ und ϑ sowie Positionierantriebe sind nicht erforderlich, da preiswerte Gleichstrommotoren mit Drehzahlregelungen verwendet werden und die Messwert-Triggerung mittels eines einfachen Taktgebers erfolgen kann. Alternativ können auch sehr preiswerte Synchronmotoren eingesetzt werden.

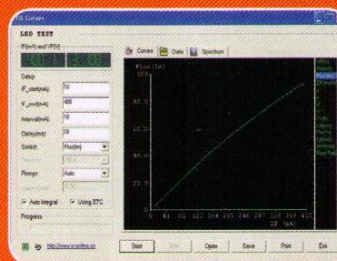
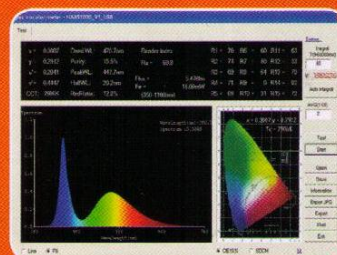
Lichtlabor



Nutzen Sie unser modernes Lichtlabor

Neueste Lichtmesstechnik entsprechend den Anforderungen nach CIE

- Hochauflösendes Spectroradiometer
 - CCD Array 1024 x 128
 - Wellenlängen Messbereich: 350 - 1100nm (UV- / sichtbar- / IR-Bereich)
 - Integrationszeit 9ms - 60s
- Messgrößen:
 - Farbort (x, y / u', v') / Farbtemperatur
 - CRI (Ra, Ri (i= 1 - 14))
 - Relative spektrale Lichtverteilung $P(\lambda)$
 - Lichtstrom, Lichtleistung
- 30cm Ulbricht Kugel
- Licht- und Strahlungs-Messeinrichtung zur Messung der Lichtstärke in cd bzw. mW/sr entsprechend den Anforderungen nach CIE 127
- Goniophotometer zur Vermessung der Abstrahlcharakteristik von LEDs und Optiken
 - Winkelauflösung 0.1°
 - Lichtstärke von 10mcd - 200cd mit einem CIE Klasse A Photometer messbar



Das Lichtlabor wurde geliefert über:

www.mx-electronic.com / Prof. Dr.-Ing. Peter Marx, Berlin

Glossar

Lichttechnische Begriffe

Lichtstrom

Lumen (lm)

Der Lichtstrom ist das Maß für die gesamte von einer Lichtquelle ausgesandte **sichtbare** Strahlung, unter Berücksichtigung der Wellenlängenabhängigkeit der Empfindlichkeit des menschlichen Auges (V-Lambda-Kurve)

Lichtstärke

Candela (cd)
1cd = 1lm/sr

Die Lichtstärke ist der Gesamtlichtstrom einer Lichtquelle in einer gegebenen Richtung bezogen auf einen Raumwinkel von 1 sr.

Beleuchtungsstärke

Lux (LX)
1lx = 1lm/m²

Die Beleuchtungsstärke ist der Quotient des Gesamtlichtstroms bezogen auf eine beleuchtete Fläche von 1m²

Farbtemperatur

Kelvin

Die Farbtemperatur ist definiert als die Temperatur bei der ein schwarzer Körper (plankscher Strahler) mit einer bestimmten **Lichtfarbe** glüht

Color Rendering Index

Unter **Farbwiedergabeindex** (engl. Colour Rendering Index = CRI) versteht man eine photometrische Größe, mit der sich die Qualität der **Farbwiedergabe** von Lichtquellen ermitteln lässt.

Lichtwelligkeit

Es gibt DC-Licht und (DC+AC)-Licht. Bei Dimmung der LEDs mit der üblichen Pulsweitenmodulation (PWM), gilt

$$W_{\text{LED}} = \frac{\phi_{\text{max}} - \phi_{\text{min}}}{\phi_{\text{mittel}}} \quad \text{mit } 1 \leq W_{\text{LED}} < \infty$$

Nachteil: Hierbei entsteht eine erhebliche Lichtwelligkeit.



PWM-Verfahren

Vorteil des PWM-Verfahrens: Der Farbort bleibt erhalten, es genügt ein Schalttransistor am PWM-Ausgang des Mikrocontrollers.

Nachteil des PWM-Verfahrens: Geringere Lichtausbeute, hohe 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 Konstant-Gleichstrom gedimmt, d.h. es entsteht keine Lichtwelligkeit!

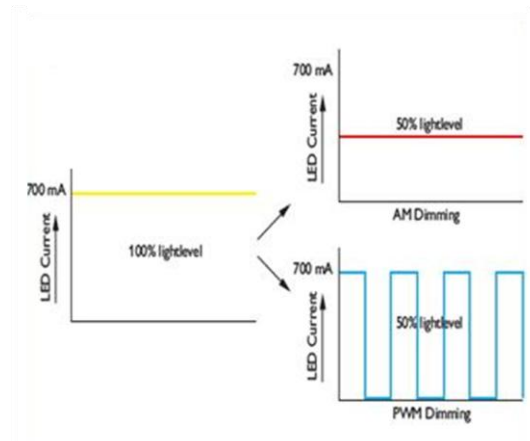
Vorteile des Analog-Dimm-Verfahrens:

1. Kein Flimmern, kein Stroboskopeffekt, keine Interferenzen mit anderen Lichtquellen wie z.B. Video-Bildschirmen, Vermeidung evtl. Probleme bei TV- Aufnahmen und Fotos mit Digitalkameras usw.
2. Verminderte Augenermüdung durch angenehmes Gleichlicht (DC-Licht), das natürliche Tageslicht ist auch ein langsam veränderliches Gleichlicht (DC-Licht)
3. Geringere Strombelastung der LED-Sperrschicht, dadurch geringere Sperrschichttemperatur, höhere Lichtausbeute, höhere Lebensdauer

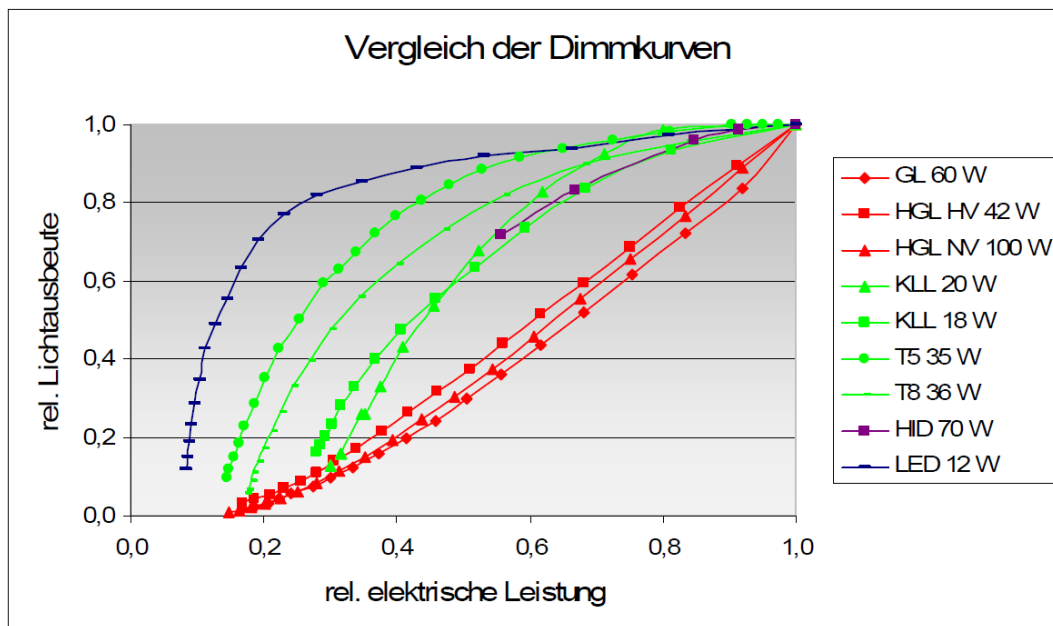
4. Günstige EMV, da keine steilen Strom- und Spannungspulse auftreten, PWM-Pulse erzeugen dagegen ein breitbandiges Störspektrum!
5. Keine Gefahr evtl. wahrnehmbarer akustischer Geräusche

Nachteil des Analog-Dimm-Verfahrens:

Die ähnlichste Farbtemperatur und damit der Farbtort ändern sich geringfügig mit dem LED-Vorwärtsstrom



Analog-Dimmen (rot) und PWM-Dimmen (blau)



Beim Dimmen ist der Rückgang der System-Lichtausbeute bei LEDs am geringsten (blaue Kurve)

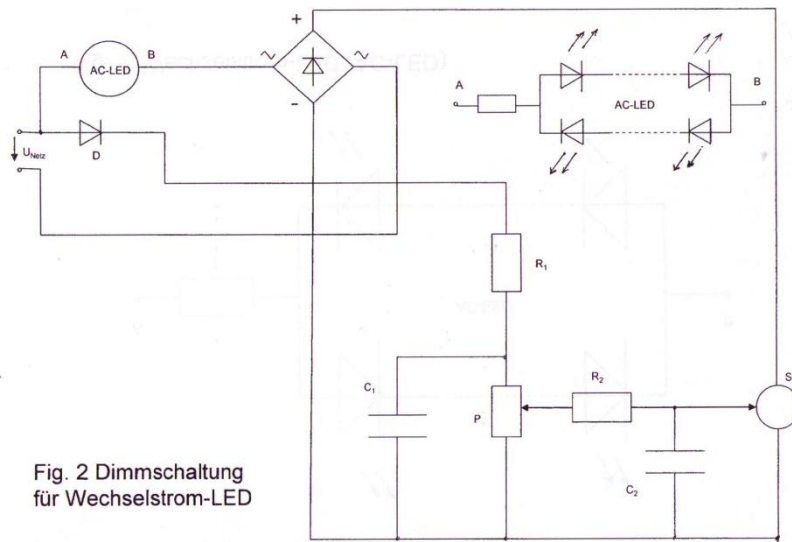
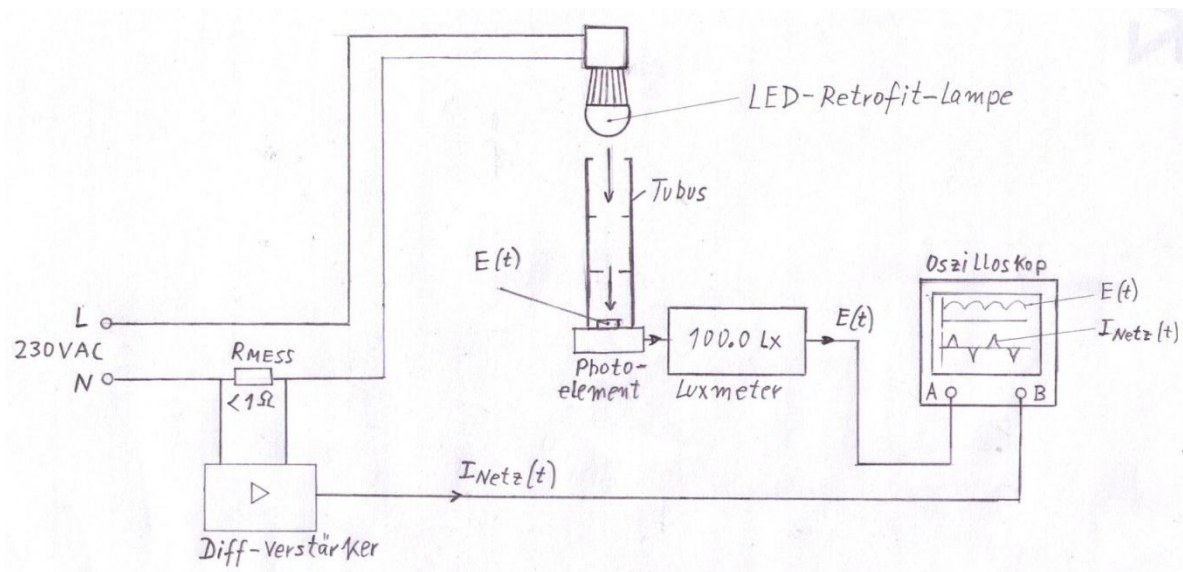
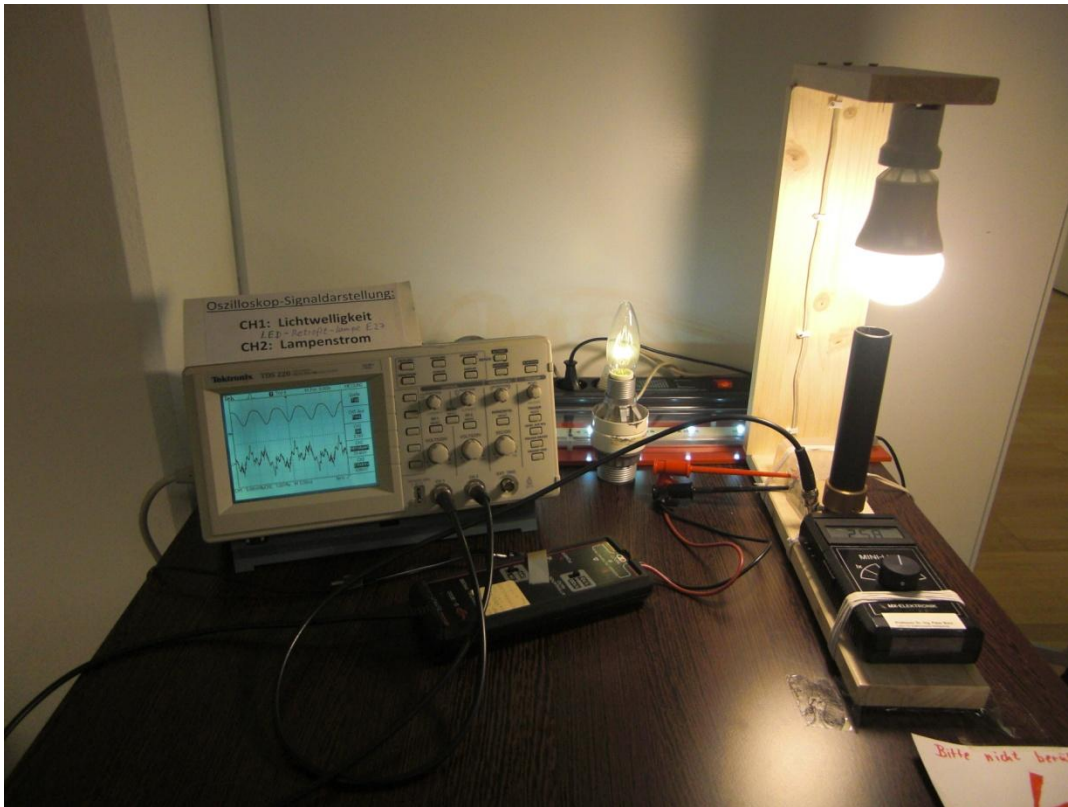


Fig. 2 Dimmschaltung
für Wechselstrom-LED

Einfache Dimmschaltung für Wechselstrom-LEDs (Patent angemeldet)



Schema zur Messung der Lichtwelligkeit



Messaufbau zur Bestimmung der Lichtwelligkeit

Messung elektrischer LED-Größen

Elektrische Größen:

Vorwärtsstrom I_F , Vorwärtsspannung U_F , Sperrstrom I_R , Sperrspannung U_R , Verlustleistung, Leistungsfaktor, Kurvenform des Netzstroms, Netzspannungsbereich, Abhängigkeit des Lichtstroms von der Netzspannung, Konstant-Strom, Konstant-Spannung, elektrischer Wirkungsgrad ($> 90\%$), Tastverhältnis (PWM)

ESD-Festigkeit, z.B. bis 8 kV (ESD = Electro-Static-Discharge).

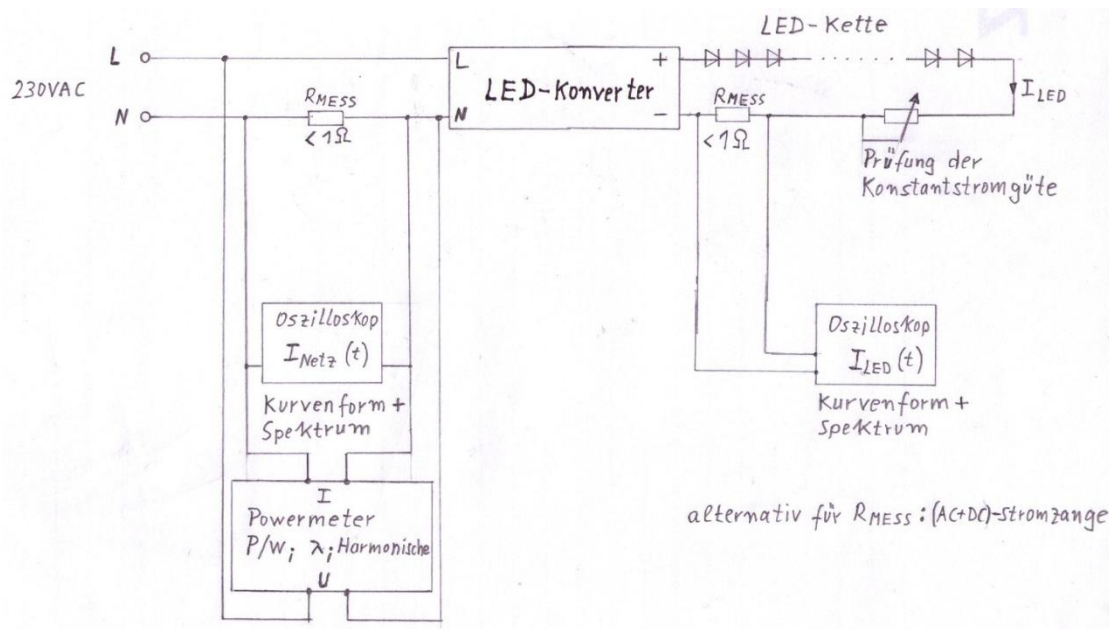
Elektrostatistische Ladungen und deren Feldstärke können mit einem Feldmeter ermittelt werden.

Netz-Transienten-Festigkeit bei Konvertern und LED-Modulen (> 4 kV), EMV (elektromagnetische Verträglichkeit, Störspektrum).

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

$$THD = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}$$



Schaltungsaufbau zur Untersuchung von LED-Konvertern

Es gibt spezielle Mess- und Testgeräte zur Bestimmung der elektrischen Parameter von LEDs und LED-Konvertern.



Programmierbare Quelle für LED-Konstantströme und LED-Konstantspannungen sowie Einzelpulse und Pulsfolgen, Messung von U_F , I_F , U_R , I_R



LED-Speisegerät mit Volt- und Amperemeter



Intelligentes Sinus-Netz-Speisegerät zum Test von LED-Konvertern



Digitales Leistungsmessgerät für LED-Lichtquellen



ESD (Electrostatic Discharge) –Testgerät



Transienten Generator für EMS-Messungen an LED-Systemen
(EMS = Elektromagnetische Störfestigkeit)

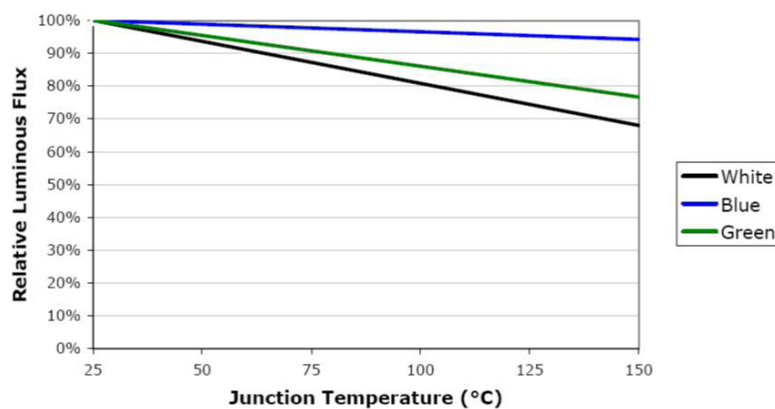


EMS Surge Generator (Surge = Flanke mit steilem Anstieg)

Wichtige thermische Größen sind:

Junction-Temperatur T_J (Richtwert: $T_J < 85^\circ\text{C}$), Umgebungstemperatur T_{amb} und Wärmewiderstand R_{th} .

LED-Parameter, wie Lichtausbeute, Lebensdauer und Farbkoordinaten (Lichtfarbe) werden negativ beeinflusst bei steigender Chiptemperatur. Die notwendige Entwärmung der LED-Chips geschieht durch Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung.



Beispiel: Lichtstromrückgang mit zunehmender Junction-Temperatur

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 Junction-Temperatur T_j gilt:

$$T_j = R_{thja} \cdot P + T_a$$

R_{thja} = Wärmewiderstand (junction / ambient)

T_j = Junction Temperatur (Sperrschichttemperatur)

T_a = Umgebungstemperatur (ambient)

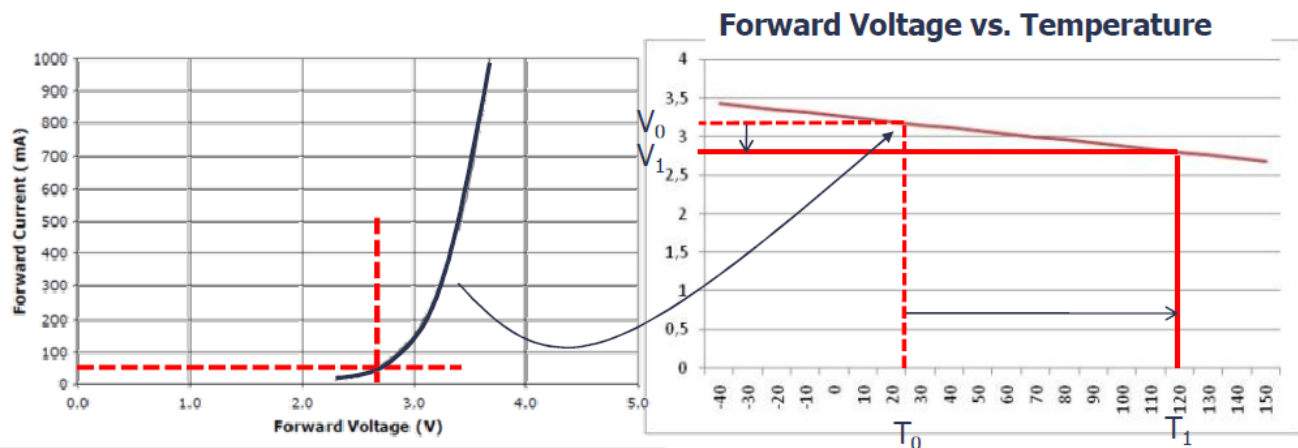
P = Gesamtleistung der LED ($I_f \cdot V_f$)

Beispiel für 1W-LED: $P = 3 \text{ V} \times 0,35 \text{ A} = 1,05 \text{ W}$

$$T_j = (30^{\circ}\text{C}/\text{W} \cdot 1.05 \text{ W}) + 50^{\circ}\text{C} = 81,5^{\circ}\text{C}$$

Alternatives Verfahren zur Bestimmung von T_j :

Die LED-Vorwärtsspannung U_F ist eine Funktion der Sperrschicht-Temperatur T_j und des LED-Stroms I_F . Typische Temperaturkoeffizienten für die Vorwärtsspannung bei konstantem LED-Strom liegen zwischen -1,5 bis -4 mV/K.



$$T_j = T_1 = T_0 + (U_1 - U_0) / -0.004 \text{ V}/^{\circ}\text{C}$$

$$T_0 = 25^{\circ}\text{C}, U_0 = 3,20 \text{ V}, U_1 = 2,82 \text{ V}$$

$$T_j = 25^{\circ}\text{C} + (-0,38 \text{ V}) / -0.004 \text{ V}/^{\circ}\text{C} = 120^{\circ}\text{C}$$

Messungen mit gepulstem LED-Strom (z.B. 350 mA und 20 ms Strompulsdauer) verhindern die Eigenerwärmung der Sperrschicht und reduzieren die Messzeit.



Elektronischer Analysator zur Messung von LED-Junction-Temperatur, thermischem Widerstand und elektrischen Parametern von LEDs

Weitere LED-Parameter werden bei der Temperatur eines Referenzpunktes in der Nähe des Chips bei +25°C oder neuerdings auch bei +85°C spektral, farb- und lichttechnisch vermessen und je nach den Messergebnissen in verschiedene Produktgruppen (sog. Binningprozess) sortiert.

Literatur

MARX, P., 2009, LED-ANWENDUNGSTECHNIK, LICHT, HEFT 3, SEITEN 184 -188

PAN, J., 2010, Note by EVERFINE PHOTO-E-INFO CO., LTD., Hangzhou, China

HONGYING, H., 2010, High Accurate Array Spectrometer (HAAS) Based Sphere Photometer for LEDs, Note by EVERFINE PHOTO-E-INFO CO., LTD., Hangzhou, China

NÄGELE, T., 2008, White light LEDs-Importance of Accepted Measurement Standards, LED Professional Review, Nov/Dec / Issue 10

DIN 5033, DIN 6169, CIE-Report 127/2007 „Measurement of LEDs”

MORENO, M.; CONTRERAS, U., 2007, Color distribution from multicolor LED arrays Vol. 15, No. 6 / OPTICS EXPRESS 3607



Prof. Dr.-Ing. Peter Marx

studierte Elektrotechnik und Lichttechnik an der TU seiner Geburtsstadt Berlin und schloss 1966 als Diplom-Ingenieur ab. Von 1967 bis 1973 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Lichttechnik der TU-Berlin. Ab 1977 Tätigkeit als Hochschullehrer im Fachbereich Elektrotechnik der Beuth-Hochschule für Technik Berlin – University of Applied Sciences. Er war Vorstandsmitglied der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft e.V. Seine Arbeitsgebiete heute sind die elektronische Messtechnik und die Lichttechnik (Sachverständiger).

info@mx-electronic.com

Prof. Dr.-Ing. Peter Marx, MX-ELEKTRONIK, Am Kleinen Wannsee 12J
D-14109 Berlin, info@mx-electronic.com, www.mx-electronic.com