

2. Lichttechnische Berechnungen und Messungen

Die in einem Raum oder Arbeitsplatz aufgrund der Sehaufgabe notwendige Beleuchtungsstärke muss durch die entsprechende Anzahl und Art von Lampen und Leuchten und ihre Anordnung erzielt werden. Hierzu ist die Berechnung der notwendigen Leuchtenanzahl und deren Bestückung erforderlich.

2.1 Berechnungen nach der Lichtstrommethode

Mit der Lichtstrommethode kann die Beleuchtungsanlage eines Raumes berechnet werden. Der Beleuchtungswirkungsgrad η_B wird aus dem auf die Nutzebene auftretenden Lichtstrom Φ_N und dem gesamten Lampenlichtstrom Φ berechnet. Der auf die Nutzebene auftretende Lichtstrom setzt sich aus dem direkten Lichtstromanteil Φ_{dir} und dem Lichtstromanteil durch Einfach- und Mehrfachreflexion Φ_{ind} zusammen.

$$\eta = \frac{\Phi_N}{\Phi} = \frac{\Phi_{\text{dir}} + \Phi_{\text{ind}}}{\Phi} \quad (2.1)$$

Bei gegebener Fläche A der Nutzebene lässt sich die mittlere horizontale Beleuchtungsstärke E'_m berechnen:

$$E'_m = \frac{\Phi_N}{A} \quad (2.2)$$

Der Beleuchtungswirkungsgrad η_B setzt sich multiplikativ aus dem Raumwirkungsgrad η_R und dem Leuchtenwirkungsgrad η_L zusammen.

$$\eta_B = \eta_R \cdot \eta_L \quad (2.3)$$

Der Leuchtenwirkungsgrad η_L wird den Angaben des Leuchtenherstellers entnommen oder aus der Lichtstärkeverteilungskurve ermittelt.

Der Raumwirkungsgrad η_R ist abhängig von:

- Anordnung der Leuchten,
- Lichtstromverteilung der Leuchten,
- Raumabmessungen,
- Reflexionsgrad der Raumbegrenzungsflächen.

Die Leuchten sollen in der Leuchtenebene gleichmäßig verteilt werden. Dabei soll der gegenseitige Abstand e geringer als h_N sein und der Abstand der wandnächsten Leuchte zur Wand $e/2$ betragen. Bei Pendelmontage der Leuchten wird die Pendellänge $p = h_N/2$ angenommen. Gleiche Lampenbestückung wird vorausgesetzt, sonst muss das Überlagerungsprinzip angewendet werden.

Der Raumwirkungsgrad η_R ist um so größer, je größer der Lichtstromanteil ist, der direkt auf die Nutzebene fällt. Der Direktanteil des Lichtstromes hängt bei vorgegebener Leuchtenanordnung von der Lichtstärkeverteilung der Leuchten ab. Als lichtstromcharakterisierende Größen einer Leuchte sind φ_u , φ_{su} und φ_{so} definiert.

$$\varphi_u = \frac{\Phi_u}{\Phi_u + \Phi_o} \quad \varphi_{su} = \frac{\Phi_{s,N}}{\Phi_u} \quad \varphi_{so} = \frac{\Phi_{s,D}}{\Phi_o} \quad (2.4)$$

Φ_u = Leuchtenlichtstrom in den unteren Halbraum

$\Phi_{s,N}$ = Direktnutzlichtstrom

Φ_o = Leuchtenlichtstrom in den oberen Halbraum

$\Phi_{s,D}$ = Deckenlichtstrom

Tabelle zur Ermittlung des Raumwirkungsgrades η_R für eine Gleichförmigkeitsleuchte

(Leuchtstofflampenleuchte mit Lammellenraster) mit $\varphi_u = 0,52$; $\varphi_{su} = 0,51$; $\varphi_{so} = 0,70$

$\rho_D =$	0,8	0,8	0,8	0,5	0,5	0,8	0,8	0,8	0,5	0,5	0,3
$\rho_W =$	0,8	0,5	0,3	0,5	0,3	0,8	0,5	0,3	0,5	0,3	0,3
$\rho_N =$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

k	Deckenmontage der Leuchten										
0,6	0,65	0,41	0,32	0,33	0,27	0,59	0,39	0,31	0,31	0,26	0,23
0,8	0,73	0,51	0,42	0,40	0,34	0,66	0,48	0,40	0,38	0,33	0,28
1,0	0,82	0,59	0,50	0,46	0,40	0,71	0,54	0,47	0,44	0,39	0,33
1,25	0,88	0,67	0,58	0,52	0,46	0,76	0,61	0,54	0,49	0,44	0,39
1,5	0,92	0,73	0,64	0,57	0,51	0,80	0,66	0,60	0,54	0,49	0,42
2,0	0,98	0,81	0,73	0,63	0,58	0,84	0,73	0,67	0,59	0,55	0,47
2,5	1,02	0,87	0,79	0,67	0,62	0,87	0,77	0,72	0,62	0,59	0,50
3,0	1,05	0,92	0,85	0,71	0,66	0,89	0,80	0,76	0,65	0,62	0,53
4,0	1,08	0,97	0,92	0,74	0,71	0,91	0,84	0,80	0,68	0,66	0,56
5,0	1,10	1,01	0,96	0,77	0,74	0,92	0,87	0,83	0,70	0,68	0,58

k	Pendelmontage der Leuchten										
0,6	0,59	0,30	0,23	0,27	0,21	0,49	0,29	0,22	0,26	0,21	0,20
0,8	0,64	0,39	0,31	0,34	0,28	0,58	0,37	0,30	0,33	0,27	0,26
1,0	0,74	0,47	0,38	0,41	0,34	0,66	0,45	0,37	0,39	0,33	0,30
1,25	0,79	0,55	0,46	0,47	0,40	0,70	0,52	0,44	0,44	0,39	0,35
1,5	0,85	0,62	0,53	0,52	0,45	0,74	0,57	0,50	0,49	0,43	0,39
2,0	0,92	0,71	0,62	0,58	0,52	0,80	0,65	0,58	0,55	0,50	0,44
2,5	0,96	0,78	0,69	0,63	0,57	0,83	0,70	0,64	0,59	0,54	0,48
3,0	1,00	0,83	0,75	0,66	0,61	0,86	0,74	0,68	0,62	0,58	0,51
4,0	1,04	0,90	0,82	0,71	0,66	0,88	0,79	0,74	0,65	0,62	0,54
5,0	1,07	0,94	0,87	0,74	0,70	0,90	0,82	0,78	0,68	0,65	0,56

Die Lichtstrommethode für Außenanlagen wird ähnlich wie für Innenanlagen durchgeführt. Als Bezugsfläche A wird hier die Fläche zwischen zwei Leuchten verwendet.

2.2 Berechnungen nach der Lichtstärkemethode

Die Lichtstärkemethode setzt die Kenntnis der Lichtstärkeverteilungskurve der für die Berechnung vorgesehenen Leuchte voraus. Mit dieser Methode ist es möglich, in vorgegebenen Berechnungspunkten in beliebigen Ebenen die Beleuchtungsstärke zu berechnen.

Lichtstärkemethode für punktförmige Lichtquellen ($r \geq 5 \cdot d$):

- Berechnung der Beleuchtungsstärke für Leuchten mit symmetrischer Lichtstärkeverteilung für die Horizontalebene.
- Der auf die Fläche A treffende Lichtstrom Φ wird in den Raumwinkel Ω ausgestrahlt, daraus kann man die mittlere Lichtstärke I_γ für den Winkel γ ableiten.

$$I_\gamma = \frac{\Phi}{\Omega} = \frac{\Phi \cdot r^2}{A \cdot \cos\gamma \cdot \Omega_0} \quad \text{mit} \quad \Omega = \frac{A'}{r^2} \cdot \Omega_0 \quad \text{und} \quad A' = A \cdot \cos\gamma \quad (2.6)$$

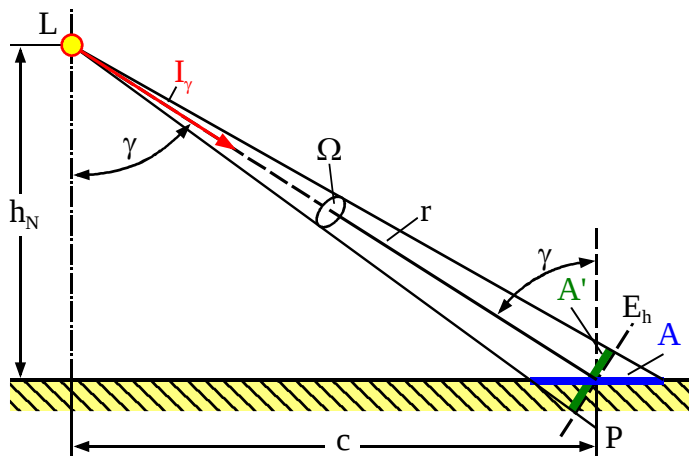


Bild zur Berechnung der Horizontalbeleuchtungsstärke

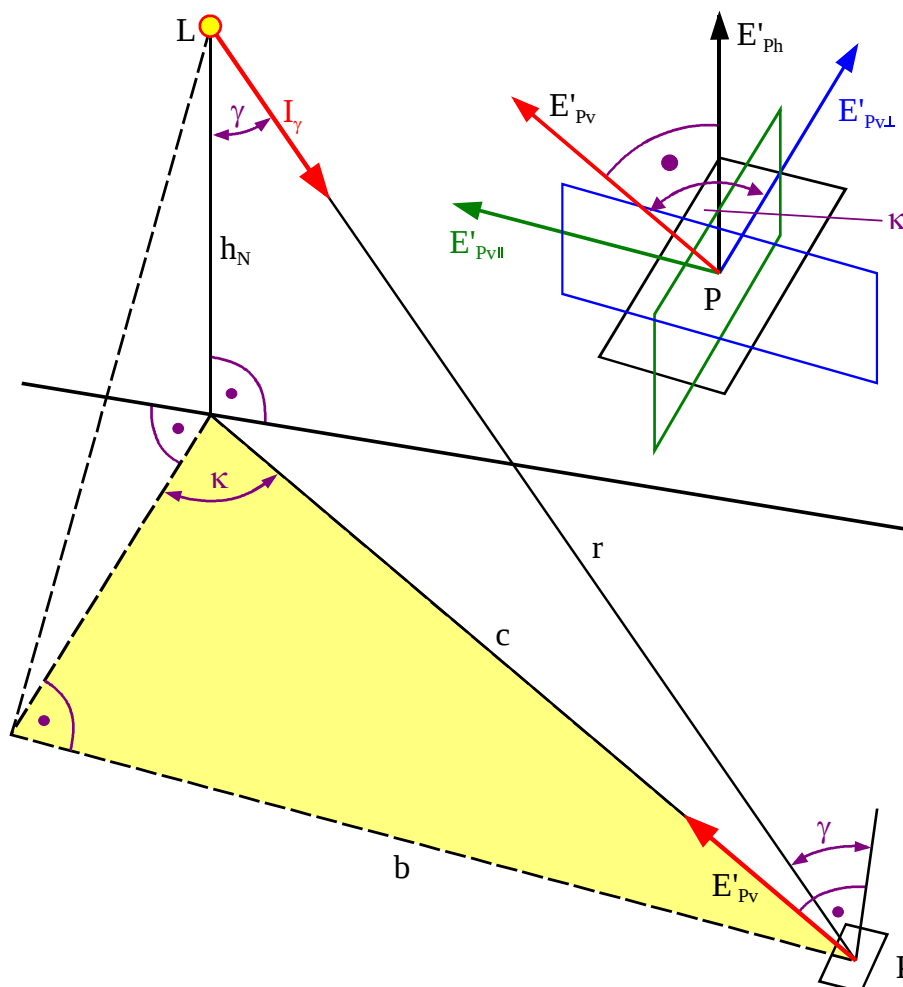
Für die Projektierungsbeleuchtungsstärke E'_{ph} der Horizontalebene im Punkt P gilt:

$$E'_{ph} = \frac{\Phi}{A} = \frac{I_\gamma \cdot \cos\gamma}{r^2} \cdot \Omega_0 = \frac{I_\gamma \cdot \cos^3\gamma}{h_N^2} \cdot \Omega_0 \quad (2.7)$$

Für die Berechnung von I_γ aus der LVK (C-Halbebenen) wird ebenfalls der Winkel γ benötigt.

Die Beleuchtungsstärke E'_{pv} auf einer vertikalen Ebene senkrecht zur Verbindungslinie zum Leuchtenfußpunkt ergibt sich aus den geometrischen Verhältnissen:

$$\frac{E'_{pv}}{E'_{ph}} = \frac{\sin\gamma}{\cos\gamma} = \tan\gamma \quad (2.8)$$



Geometrische Größen für die Berechnung der Vertikalbeleuchtungsstärke

Die Vertikalbeleuchtungsstärke E'_{pv} beträgt mit Gl. 2.7 und Gl. 2.8:

$$E'_{pv} = \frac{I_\gamma \cdot \cos^2 \gamma \cdot \sin \gamma}{h_N^2} \cdot \Omega_0 \quad (2.9)$$

Die Vertikalbeleuchtungsstärken $E'_{pv\parallel}$ und $E'_{pv\perp}$ der Vorzugsebenen stehen parallel oder senkrecht auf der Seite b. Entsprechend den geometrischen Größen des Bildes „Geometrische Größen für die Berechnung der Vertikalbeleuchtungsstärke“ ergeben sich:

$$E'_{pv\parallel} = \frac{I_\gamma \cdot \cos^2 \gamma \cdot \sin \gamma \cdot \cos \kappa}{h_N^2} \cdot \Omega_0$$

$$E'_{pv\perp} = \frac{I_\gamma \cdot \cos^2 \gamma \cdot \sin \gamma \cdot \sin \kappa}{h_N^2} \cdot \Omega_0 \quad (2.10)$$

Lichtstärkemethode für linienförmige Lichtquellen

Die Bedeutung der Niederdruck-Entladungslampen in Röhrenform (Leuchtstofflampen) in der Beleuchtungstechnik erfordern die Berechnung der Beleuchtungsstärke in einem Punkt, die durch linienförmige Lichtquellen hervorgerufen wird.

Berechnet werden die Horizontalbeleuchtungsstärke E'_{ph} , die Vertikalbeleuchtungsstärke der Ebene parallel zur Lampenachse $E'_{pv\parallel}$ und die Vertikalbeleuchtungsstärke der Ebene senkrecht zur Lampenachse $E'_{pv\perp}$.

Horizontalbeleuchtungsstärke E'_{ph} bei linienförmigen Lichtquellen:

I'_α ist die Lichtstärke je Länge, die senkrecht zum Lichtband in der Ebene von P steht. Bei der Leuchtenlänge l_L beträgt $I'_\alpha = I_\alpha / l_L$.

Zur Berechnung der Horizontalbeleuchtungsstärke im Punkt P wird zunächst die Teilbeleuchtungsstärke dE'_{ph} im Punkt P durch das Lichtbandteilstück dl berechnet.

$$dE'_{ph} = \frac{dI_\beta \cdot \cos \beta}{r^2} \cdot \Omega_0 \quad (2.11)$$

Für die Lichtverteilung im Längsschnitt des Lichtbandes nimmt man eine Lambertverteilung an.

$$dI_\beta = I'_\alpha \cdot \cos \varepsilon \cdot dl \quad (2.12)$$

Aus Gl. 2.11 und Gl. 2.12 erhält man:

$$dE'_{ph} = \frac{I'_\alpha \cdot \cos \varepsilon \cdot \cos \beta \cdot dl}{r^2} \cdot \Omega_0 \quad (2.13)$$

Mit den Geometrieangaben

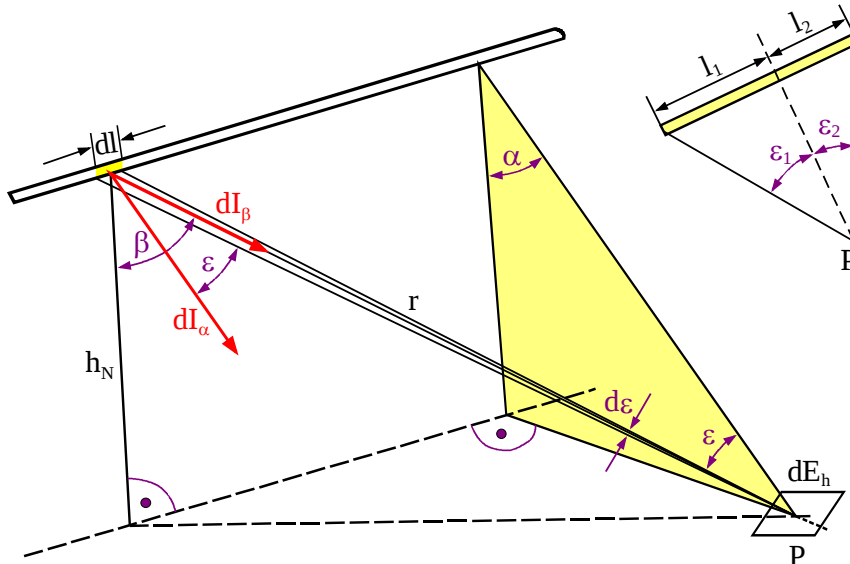
$$r = \frac{h_N}{\cos \alpha \cdot \cos \varepsilon}, \quad dl = \frac{h_N \cdot d\varepsilon}{\cos \alpha \cdot \cos \varepsilon} \quad \text{und} \quad \cos \beta = \cos \alpha \cdot \cos \varepsilon \quad (2.14)$$

erhält man:

$$dE'_{ph} = \frac{I'_\alpha \cdot \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \varepsilon \cdot d\varepsilon}{h_N} \cdot \Omega_0 \quad (2.15)$$

Integriert man Gl. 2.15 zwischen den Grenzen ε_1 und ε_2 , so erhält man die theoretische Horizontalbeleuchtungsstärke E'_{ph} einer linienförmigen Lichtquelle im Punkt P.

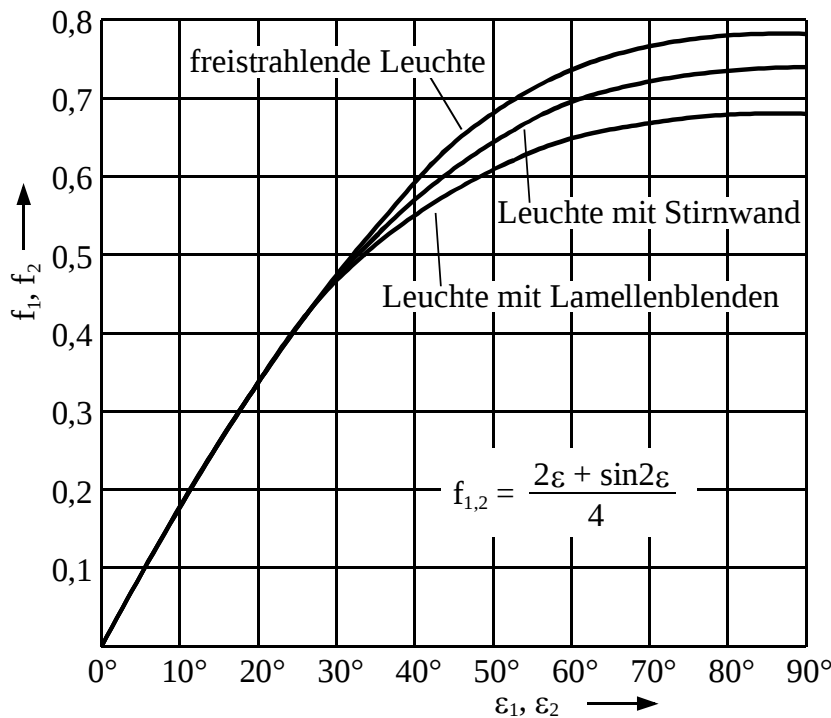
$$E'_{ph} = \frac{I'_\alpha \cdot \cos^2 \alpha}{h_N} \cdot \left[\frac{2\varepsilon + \sin 2\varepsilon}{4} \right]_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \cdot \Omega_0 \quad (2.16)$$



Projektierungsbeleuchtungsstärke E'_{ph} bei linienförmigen Lichtquellen

Neben den nahezu linienförmigen Lichtquellen kommen in der Praxis häufig Leuchten mit Stirnwand und/oder Lamellenraster vor. Die Horizontalbeleuchtungsstärke E'_{ph} wird dann unter Berücksichtigung von f_1 und f_2 gemäß Diagramm nach Gl. 2.17 berechnet.

$$E'_{ph} = \frac{I'_\alpha \cdot \cos^2 \alpha}{h_N} \cdot (f_1 + f_2) \cdot \Omega_0 \quad (2.17)$$



Ausdruck $f_{1,2}$ für die Berechnung der Horizontalbeleuchtungsstärke nach Gl. 2.17

Vertikalbeleuchtungsstärke $E'_{pv\parallel}$ bei linienförmigen Lichtquellen:

In Analogie zur Horizontalbeleuchtungsstärke im Punkt P (Gl. 2.11) gilt für die Vertikalteilbeleuchtungsstärke $E'_{pv\parallel}$ im Punkt P durch das Lichtbandteilstück dl :

$$dE'_{pv\parallel} = \frac{dI_\beta \cdot \sin\beta}{r^2} \cdot \Omega_0 \quad (2.18)$$

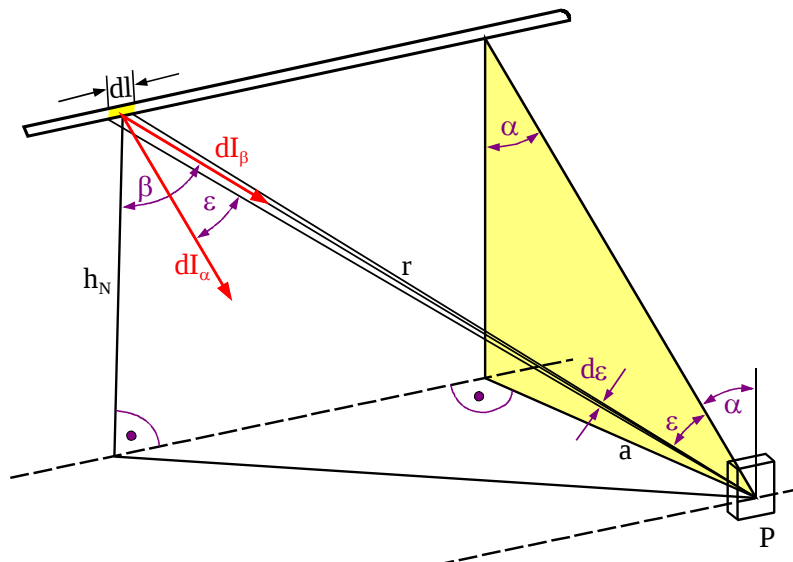
Die vereinfachenden Annahmen für die Horizontalbeleuchtungsstärke gelten auch für die Vertikalteilbeleuchtungsstärke $E'_{pv\parallel}$.

$$dE'_{pv\parallel} = \frac{I'_\alpha \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha \cdot \cos^2\varepsilon \cdot d\varepsilon}{h_N} \cdot \Omega_0 \quad (2.19)$$

Die Vertikalbeleuchtungsstärke der Ebene parallel zur Lampenachse $E'_{pv\parallel}$ berechnet sich aus Gl. 2.19 entsprechend den Gln. 2.16 und 2.17:

$$E'_{pv\parallel} = \frac{I'_\alpha \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha}{h_N} \cdot (f_1 + f_2) \cdot \Omega_0 \quad (2.20)$$

Die vertikale Beleuchtungsstärke $E'_{pv\parallel}$ lotrecht unter dem Lichtband ist Null.



**Projektierungs-
beleuchtungsstärke $E'_{pv\parallel}$**

Vertikalbeleuchtungsstärke $E'_{pv\perp}$ bei linienförmigen Lichtquellen:

Zur Berechnung der Vertikalbeleuchtungsstärke der Ebene senkrecht zur Lampenachse $E'_{pv\perp}$ im Punkt P wird zunächst die Teilbeleuchtungsstärke $dE'_{pv\perp}$ im Punkt P durch das Lichtbandteilstück dl berechnet.

$$dE'_{pv\perp} = \frac{dI_\beta \cdot \cos\lambda}{r^2} \cdot \Omega_0 = \frac{dI_\beta \cdot \sin\varepsilon}{r^2} \cdot \Omega_0 \quad (2.21)$$

Nimmt man die Verteilung der Lichtstärke parallel zum Lichtband als Lambertverteilung an, dann gilt nach Gl. 2.12 und in Analogie zu Gl. 2.14:

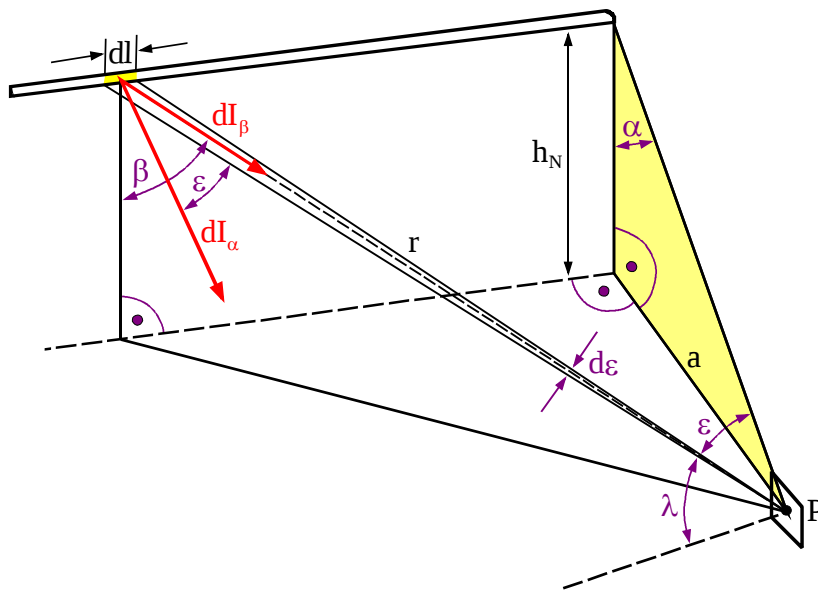
$$dE'_{pv\perp} = \frac{I'_\alpha \cdot \cos\alpha \cdot \sin\varepsilon \cdot \cos\varepsilon \cdot d\varepsilon}{h_N} \cdot \Omega_0 \quad (2.22)$$

Die Vertikalbeleuchtungsstärke $E'_{pv\perp}$ einer linienförmigen Lichtquelle im Punkt P beträgt:

$$E'_{pv\perp} = \frac{I'_\alpha \cdot \cos\alpha}{h_N} \cdot \left[\frac{\sin^2\varepsilon}{2} \right]_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \cdot \Omega_0 \quad (2.23)$$

Bei Annahme eines unendlich langen Lichtbandes ($\varepsilon_2 = 0^\circ$ und $\varepsilon_1 = 90^\circ$) erhält man:

$$E'_{p_{v\perp}} = \frac{I'_\alpha \cdot \cos\alpha}{2 \cdot h_N} \cdot \Omega_0 \quad (2.24)$$



**Projektierungs-
beleuchtungsstärke $E'_{p_{v\perp}}$**

Berechnung der

Leuchtdichte:

Bei der Berechnung der Leuchtdichte der Raumbegrenzungsflächen im Innenraum geht man von völlig diffus reflektierenden Flächen (Lambertstrahler) aus. Wird ein einheitlicher Reflexionsgrad für solche Flächen (Wände, Decke) vorausgesetzt, so gilt:

$$L'_m = \frac{\rho \cdot E'_m}{\pi} \cdot \frac{1}{\Omega_0} \quad (2.25)$$

Bei der Berechnung der Leuchtdichte in der Außenbeleuchtung geht man von der Proportionalität zwischen Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke aus. Diese Proportionalität gilt nur bei konstanter Einstrahlungs- und Beobachtungsgeometrie.

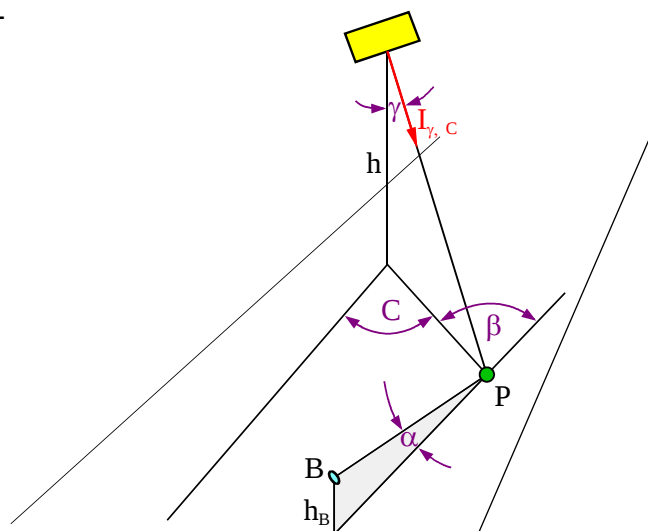
Für die Beleuchtungsstärke im Punkt P gilt:

$$E_p = \Phi \cdot \left(\frac{I}{\Phi} \right)_{\gamma, C} \cdot \frac{\cos^3 \gamma}{h^2} \cdot \Omega_0 \quad (2.26)$$

γ, C Bestimmungswinkel für die Lichtstärken aus der Lichtstärkeverteilung

Geometrische Verhältnisse für die Leuchtdichteberechnung

- α vertikaler Beobachtungswinkel
- β horizontaler Beobachtungswinkel
- γ vertikaler Einstrahlwinkel



Für die Leuchtdichte im Punkt P gilt:

$$L_P = \Phi \cdot \left(\frac{I}{\Phi} \right)_{\gamma, C} \cdot \left(\frac{L}{E} \right)_{\beta, \gamma} \cdot \frac{\cos^3 \gamma}{h^2} \cdot \Omega_0 \quad (2.27)$$

Einflussgrößen für die Beleuchtungsstärke sind:

- Lichtstrom Φ ,
- Lichtverteilung der Leuchte $(I/\Phi)_{\gamma, C}$,
- Geometrie der Leuchtenanordnung (h, γ, C).

Für die Leuchtdichte gilt zusätzlich:

- Reflexionsverhalten der Deckschicht $(L/E)_{\beta, \gamma}$,
- Geometrie der Beobachtung (β, γ).

Leuchtdichteberechnungen sind abhängig von:

- α vertikaler Beobachtungswinkel,
- β horizontaler Beobachtungswinkel,
- γ vertikaler Einstrahlwinkel.

Leuchtdichteverteilungen werden im Allgemeinen mit Computern durchgeführt. Hierbei wird auf Tabellen für die Leuchtdichtekoeffizienten zurückgegriffen [2].

2.3 Lichttechnische Messungen

Zur Kalibrierung stehen Referenznormale - Glühlampen-Lichtstärkenormale - mit guter Stabilität und Reproduzierbarkeit zur Verfügung. Mit diesen Lichtstärkenormalen kann man sich Lichtstrom-, Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichtenormale schaffen.

Klasseneinteilung für Fotometer

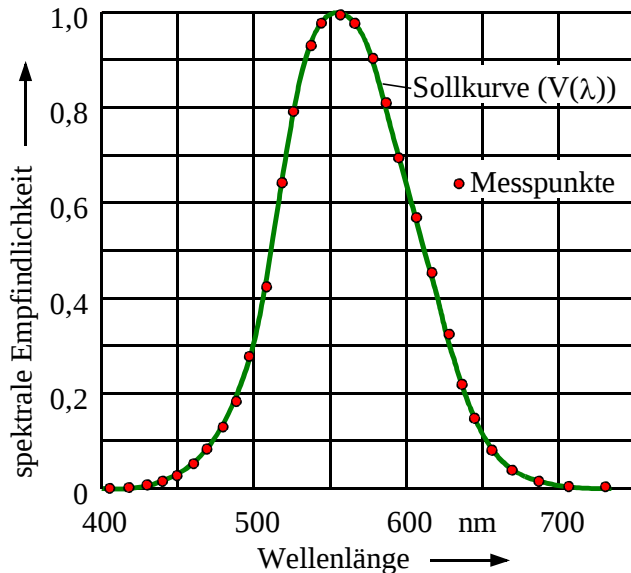
- BM Beleuchtungsstärkemessgerät
- LM Leuchtdichtemessgerät

Fehlergrenzen in % für Messgeräte der Klassen L, A, B, C.

Klasse	L		A		B		C	
Merkmal	BM	LM	BM	LM	BM	LM	BM	LM
V(λ)-Anpassung	1,5	2	3	3	6	6	9	9
räumliche Bewertung	1,5	2	1,5	3	3	6	6	9
Linearitätsfehler	0,2	0,2	1	1	2	2	5	5
Fehler des Anzeigegerätes	0,2	0,2	3	3	4,5	4,5	7,5	7,5
Ermüdung	0,1	0,1	0,5	0,5	1	1	2	2
Temperaturkoeffizient	0,1/K	0,1/K	0,2/K	0,2/K	1/K	1/K	2/K	2/K
Frequenzeinfluss	0,1	0,1	0,2	0,2	0,5	0,5	1	1
Gesamtfehler	3	5	5	7,5	10	10	20	20

Beleuchtungsstärkemessung

Eine Beleuchtungsstärkemessung mit einem lichtempfindlichen Empfänger (Si-Fotoelemente) ist möglich, wenn seine spektrale Empfindlichkeit der $V(\lambda)$ -Kurve des menschlichen Auges angepasst und eine Kosinusanpassung vorhanden ist.



Die Kalibrierung der Geräte (Luxmeter) sollte mit einer Referenzlampe der Normlichtart A erfolgen. Entsprechend dem fotometrischen Entfernungsgesetz kann man sich über einen gewissen Bereich definierte Beleuchtungsstärken mit einer Referenzlampe schaffen.

$V(\lambda)$ -Anpassung

Lichtstärkemessung

Die Lichtstärkemessung wird über eine Beleuchtungsstärkemessung nach dem fotometrischen Entfernungsgesetz durchgeführt. Steht der Empfänger senkrecht zur Lichteinfallrichtung, so gilt:

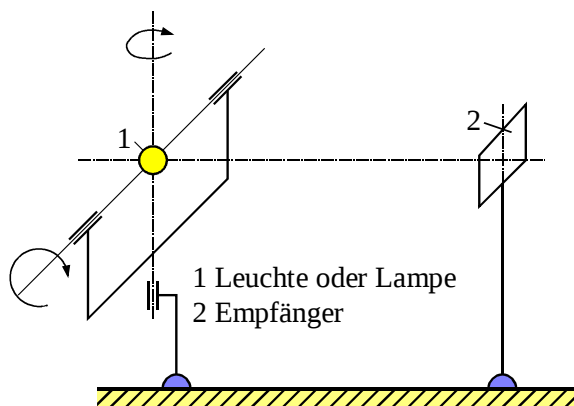
$$\frac{I_x}{I_0} \cdot \left(\frac{r_0}{r_x} \right)^2 = \frac{E_x}{E_0} \quad (2.28)$$

I_x, I_0 Lichtstärke der Lichtquelle bzw. Normallampe,

E_x, E_0 Beleuchtungsstärke auf dem Empfänger durch Lichtquelle (Abstand r_x) und Normallampe (Abstand r_0).

Bei der Messung muss man prüfen, ob die Bedingung Abstand Lampe - Empfänger ≥ 10 mal größte Ausdehnung der Lichtquelle bzw. des Empfängers eingehalten wird. Damit wird der Fehler $< 0,25 \%$. Zur Vermeidung von Linearitätsfehlern sollten etwa gleiche Beleuchtungsstärken auf dem Empfänger herrschen. Dann gilt:

$$\frac{I_x}{I_0} = \left(\frac{r_x}{r_0} \right)^2 \quad (2.29)$$



Zur Aufnahme von Lichtstärkeverteilungskurven (LVK) verwendet man Goniometer, die nach unterschiedlichen Prinzipien (fester Messkopf und drehbare Lampe/Leuchte oder feste Lampe/Leuchte und drehbarer Messkopf) funktionieren.

Goniometer mit festem Messkopf und drehbarer Lichtquelle für geringe Genauigkeitsanforderungen

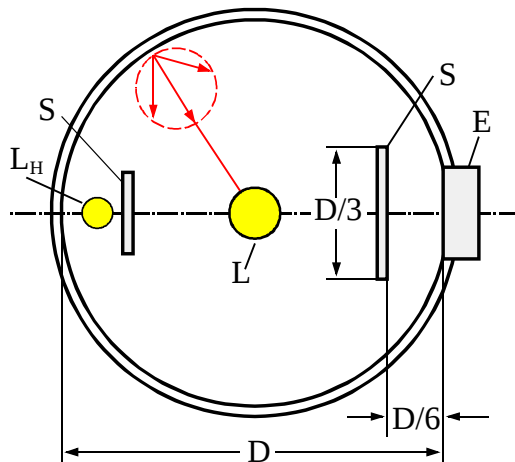
Lichtstrommessung

Den Lichtstrom kann man entweder mit der Integralkugel (Ulbrichtsche Kugel) oder aus dem Lichtstärkeverteilungskörper ermitteln.

In einer innen matt weiß gestrichenen Kugel ist die Beleuchtungsstärke E direkt proportional dem Lichtstrom Φ . Das Beleuchtungsstärkemessgerät wird mit Lichtstromnormallampen kalibriert:

$$\frac{E_x}{E_0} = \frac{\Phi_x}{\Phi_0} \quad (2.30)$$

Φ_0, E_0 Lichtstrom bzw. Beleuchtungsstärke durch die Normallampe.



L = Lichtstromprüfling bzw. -normal

L_H = Hilfslampe

S = Schatter

$E = V(\lambda)$ -angepasster Empfänger

Ulbrichtsche Kugel

Der Schatter bewirkt, dass nur indirektes Licht auf den Empfänger auftrifft. Die Absorption an Messhalterungen, Lampensockel und Leuchtenteilen beeinflusst die Messung. Dieser Fremdkörpereinfluss kann mit der Hilfslampe erfasst werden. Durchführung der Messung:

L_N = Normallampe; L_x = zu messende Lichtquelle

L_N an, L_H aus, Ablesung a_s

L_N aus, L_H an, Ablesung h_s

L_x an, L_H aus, Ablesung a_x

L_x aus, L_H an, Ablesung h_x

$$\Phi_x = \frac{a_x}{a_s} \cdot \frac{h_s}{h_x} \cdot \Phi_N \quad (2.31)$$

Leuchtdichtemessung

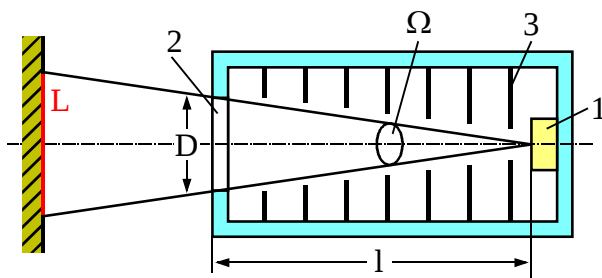
Die Leuchtdichte lässt sich aus der Beleuchtungsstärke ableiten, wenn mit einem definierten Raumwinkel Ω gearbeitet wird.

Für Blendungsmessungen sollte der Öffnungswinkel des Leuchtdichtemessgerätes bei einem Abstand von $1 \text{ m} \leq 1^\circ$ sein. Mit Öffnungswinkeln $< 5^\circ$ bestimmt man die mittlere Beleuchtungsstärke größerer Flächen.

Bei einigen Luxmetern kann auf den Messkopf ein Leuchtdichtevorsatz aufgesteckt werden.

Mit einem einfachen Tubusleuchtdichtemessgerät kann aus der Beleuchtungsstärke E auf dem Empfänger die mittlere Leuchtdichte des Objektes bestimmt werden.

$$L = \frac{E \cdot \left(1 + 4 \cdot \left(\frac{1}{D} \right)^2 \right)}{\Omega_0 \cdot \pi} \quad (2.32)$$



L = Leuchtdichte des Objektes

1 Empfänger

2 Blende

3 Schatter

Leuchtdichtemessung mit einfachem Tubus zur Raumwinkelbegrenzung

Näherungsweise kann die Leuchtdichte L mit einem Belichtungsmesser (Fotoapparat) für den im Sucher abgebildeten Rahmenausschnitt bestimmt werden. Für einen 200-ASA-Film (24° DIN) gilt:

$$L = 0,2 \cdot \frac{\text{cd} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \cdot \frac{K^2}{T} \quad (2.33)$$

K = Blendenzahl T = Belichtungszeit

Leuchtdichteverteilungen lassen sich fotografisch oder mit bildauflösenden fotoelektrischen Empfängern vermessen. Bei fotografischen Aufnahmen benötigt man zur Absolutmessung der Leuchtdichte ein Leuchtdichtenormal im Gesichtsfeld und zur Ermittlung der Gradation ein definiertes Graumuster.

Mit speziellen $V(\lambda)$ -angepassten Videokameras können Leuchtdichteverteilungen mit einem Fehler $\leq 10\%$ aufgenommen werden. Videokameras mit gesonderten Videokomparatoren können Linien gleicher Gesichtsfeldleuchtdichten auf einem Monitor darstellen und vermessen.

Mit Industriekameras kann man Leuchtdichten von $L = 3 \text{ cd/m}^2$ nachweisen und Leuchtdichten bis etwa 1500 cd/m^2 vermessen. Noch höhere Leuchtdichten müssen durch Neutralfilter geschwächt werden.

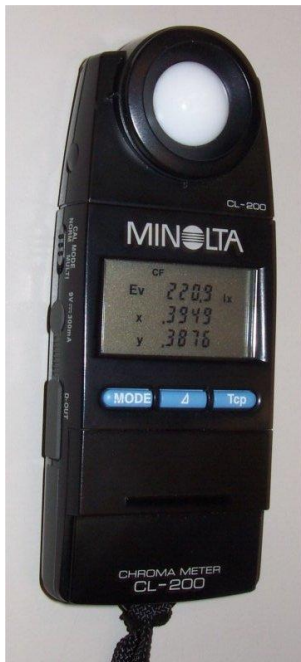
Messungen im Labor

Für lichttechnische Messungen stehen eine Ulbrichtkugel, verschiedene Beleuchtungsstärkemessgeräte, ein Leuchtdichtemessgerät, ein Spektrometer und ein einfaches Goniometer (Eigenbau) zur Verfügung. Die meisten Messungen werden in einem „Schwarzen Raum“ mit den Abmessungen $L = 5,10 \text{ m}$, $B = 2,60 \text{ m}$ und $H \geq 2,10 \text{ m}$ durchgeführt.



Mit dem MAVOLUX digital kann in einem großen Messbereich die Beleuchtungsstärke E genau ermittelt werden. Zusätzlich kann die Strahlungsleistung in W/m^2 bei 6000 K angezeigt werden. Mit dem zusätzlichen Leuchtdichtevorsatz kann großflächig die Leuchtdichte bestimmt werden.

Beleuchtungsstärkemessgerät mit Leuchtdichtevorsatz MAVOLUX digital der Firma GOSSEN



Das Lichtfarbmessgerät CL-200 ist ein genaues kompaktes und leichtes Beleuchtungsstärke- und Farbmessgerät (Farbtemperatur, Farbsättigung, Farbkoordinaten) für alle gängigen Lichtquellen. Messfunktionen sind die Tristimulus-Werte: XYZ, die Farbmaßzahlen: $E_v xy$; $E_v u'v'$; E_v , dominante Wellenlänge, Farbsättigung, die ähnlichste Farbtemperatur: E_v , T_{cp} , Δuv und die Farbdifferenz: $\Delta(XYZ)$, $\Delta(E_v xy)$, $\Delta(E_v u'v')$, $\Delta E_v \Delta u'v'$.

Mit den Adaptereinheiten für das Grundgerät T-A20 und dem Messkopf T-A21 können Fernmessungen durchgeführt werden.

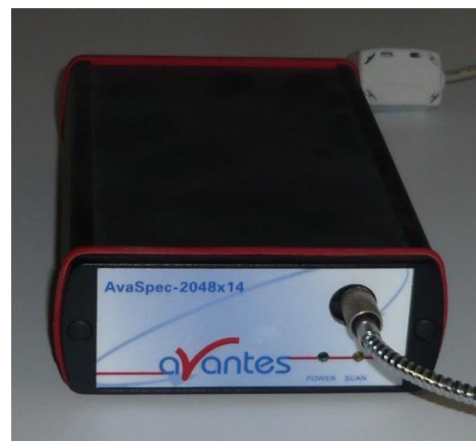
Beleuchtungsstärkemessgerät Chroma Meter CL-200 der Firma MINOLTA



Beleuchtungsstärkemessgerät Chroma Meter CL-200 (Grundgerät und Messkopf im „Schwarzen Raum“)



Spektrometer AvaSpec-2048x14 mit Detektor für $\lambda = 200 \dots 1100 \text{ nm}$ der Firma AVANTES



Das CL-500A ist ein Hand-Beleuchtungsstärke-Spektralphotometer mit dem präzise die Beleuchtungsstärke in Lux gemessen werden kann. Darüber hinaus erfüllt es aber auch alle Anforderungen einer farblichen Beurteilung von Lichtquellen jeglicher Art mit spektraler Genauigkeit. Das hochentwickelte Spektralphotometer misst die Farbwiedergabeindizes R_a und R_1 bis R_{15} , Beleuchtungsstärke, Farbmaßzahlen und Farbtemperatur praktisch aller Lichtquellen. Im eingebauten Display erfolgt die Anzeige von Spektrum, Beleuchtungsstärke, Farbwiedergabeindex, Farbkoordinaten, Farbtemperatur und vielem mehr.



Vorderseite mit Messsensor



Rückseite mit Display

Hand-Beleuchtungsstärke-Spektralphotometer CL-500A



Das Leuchtdichte-Farbmessgerät CS-100A ist ein tragbares Handgerät mit dem eine Punktmessung von Farbe und Leuchtdichte durchgeführt werden kann. Im Display werden die Leuchtdichte in cd/m^2 und die Farbmaßzahlen x und y angezeigt.

Das Tristimulus-Farbmessgerät CS-100A ist mit einem Bewertungswinkel von 1° für Messungen naher und ferner Lichtquellen und bestrahlter Objekte geeignet.

Leuchtdichtemessgerät Chroma Meter CS-100A der Firma MINOLTA



Ulbrichtkugel der Firma Labsphere mit $D = 1,65\text{ m}$



Geöffnete Ulbrichtkugel mit einem Reflektionsfaktor $\rho = 98\%$



Lichtstromprüfling und Schatter im Innenraum der Ulbrichtkugel
(Spektrometeröffnung hinter Schatter sichtbar)

Ulbricht-Kugel Lichtmesssystem illumia[®]plus der Firma Labsphere

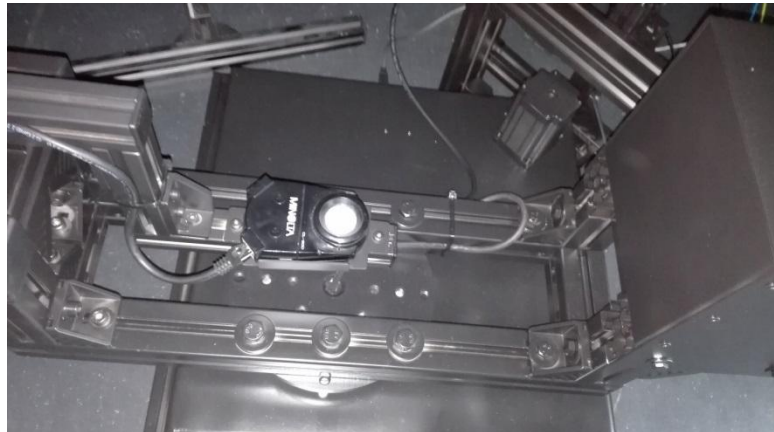
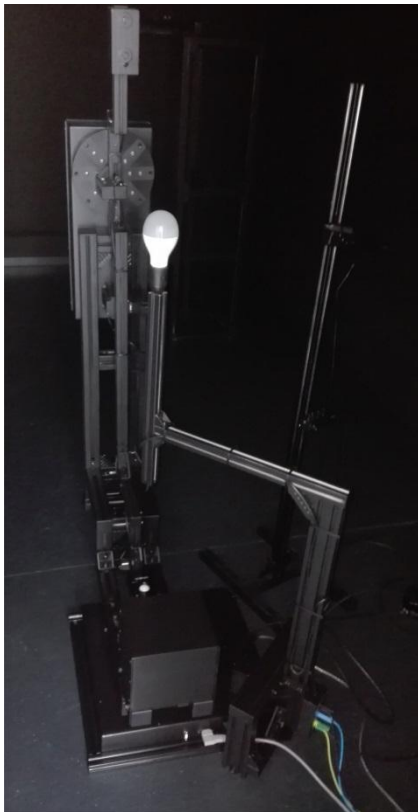
Das Ulbrichtkugel-Lichtmesssystem illumia[®]plus besteht aus einer Ulbrichtkugel mit einer hoch reflektierenden Kugelinnenwandbeschichtung von $\rho = 98\%$ und einem Durchmesser von $1,65\text{ m}$, einem Spektrometer, Software, Hilfs- und Kalibrierlampe und weiteren für die optische Anwendung spezifische Module. Das Messsystem ermöglicht die Vermessungen von Leuchten und Lampen mit der auf dem Markt höchsten verfügbaren Genauigkeit. Die normgerechte Bestimmung folgender photometrischer und radiometrischer Parameter ist möglich:

- Gesamtlichtstrom (Watt/nm)
- Photometrischer Lichtstrom (Lumen)
- Lichtausbeute (Lumen/Watt)
- Strahlungsfluss (Watt)
- Farbmaßzahlen (x, y, u, v), CCT, CRI
- Zentralwellenlänge, Hauptwellenlänge

Lichtstärkeverteilungskurven (LVK) von Lampen mit einer maximalen Ausdehnung von 18 cm werden mit dem zweiachsigen Goniometer im „Schwarzen Raum“ durchgeführt.



Zweiachsiges Goniometer (Eigenbau) im Messraum in verschiedenen Positionen



Zweiachsiges Goniometer im „Schwarzen Raum“ und Messkopf des Beleuchtungsstärkemessgerätes Chroma Meter CL-200

Beim zweiachsigen Goniometer wird der Messkopf des Chroma-Meters CL-200 auf einer Kugeloberfläche mit dem Radius $r = 0,90 \text{ m}$ senkrecht zum Mittelpunkt der Lampe bewegt. Die beiden Achsen werden jeweils von einem Schrittantrieb über einen Treibriemen bewegt. Die Ansteuerung der Schrittantriebe erfolgt über eine USB-Schnittstelle vom PC.

Lichtstärkeverteilungskurven von Leuchten, Strahlern und Lampen mit großer Ausdehnung werden durch Messung der horizontalen Beleuchtungsstärke E_{ph} am Boden an verschiedenen Messpunkten und der vertikalen Beleuchtungsstärke E_{pv} an den Wänden im „Schwarzen Raum“ durchgeführt. Für jeden Messpunkt werden aus der Geometrie der Abstand r zum Lampen-/Leuchtenmittelpunkt, die Beleuchtungsstärke $E_{\perp}$ senkrecht zur Strahlungsrichtung sowie die Winkel γ und φ berechnet. Nach Gl. 1.16 gilt für die Lichtstärke $I(\gamma, \varphi)$:

$$I(\gamma, \varphi) = E_{\perp} \cdot r^2 \quad (2.34)$$

Bei Lampen und Leuchten mit einer rotationssymmetrischen Verteilung ist die Lichtstärke I_γ nur vom Winkel γ abhängig. Die Messreihe wird beispielsweise bei $\varphi = 0^\circ$ durchgeführt. Einige Kontrollmessungen bei $\varphi = 45^\circ$, $\varphi = 90^\circ$ und $\varphi = 135^\circ$ sollten durchgeführt werden. Aus den einzelnen Messwerten kann die Lichtstärke $I(\gamma)$ für $\gamma = 0^\circ \dots 180^\circ$ abschnittsweise als Polynom höherer Ordnung angegeben werden. Mit der Trendlinie in Excel werden die jeweiligen Koeffizienten einfach ermittelt. Die Lichtstärke $I(\gamma)$ kann jetzt mit konstanter Winkeldifferenz $\Delta\gamma$ berechnet werden.

Den Lichtstrom Φ bestimmt man, wenn man den Lichtstärkeverteilungskörper in Kugelschichten mit konstanter Winkeldifferenz $\Delta\gamma = \gamma_1 - \gamma_2$ zerteilt (Gl. 1.7). Die einzelnen Kugelschichten werden mit den jeweiligen Lichtstärke $I(\gamma)$ multipliziert. Die so erhaltenen Lichtstromanteile $\Delta\Phi(\gamma)$ werden zum Lichtstrom Φ aufsummiert. Mit dem Winkeladditionstheorem erhält man aus Gl. 1.7 für die Kugelschicht den Raumwinkel $\Delta\Omega_{\text{sch}}$:

$$\Delta\Omega_{\text{sch}}(\gamma) = 4\pi \cdot \sin\left(\frac{\gamma_1 - \gamma_2}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2}\right) \cdot \Omega_0$$

mit $\Delta\gamma = \gamma_1 - \gamma_2$ und $\gamma = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2}$ (2.35)

$$\Delta\Omega_{\text{sch}}(\gamma) = 4\pi \cdot \sin\left(\frac{\Delta\gamma}{2}\right) \cdot \sin\gamma \cdot \Omega_0$$

Der Lichtstrom Φ wird aus der Summe der Teillichtströme $\Delta\Phi(\gamma)$ berechnet.

$$\Phi = \sum \Delta\Phi(\gamma) = \sum (\Delta\Omega_{\text{sch}}(\gamma) \cdot I(\gamma)) \quad (2.36)$$

Für „grobe Messungen“ reicht eine Winkeldifferenz $\Delta\gamma = 10^\circ$ aus. Der Lichtstrom $I(\gamma)$ wird dann für $\gamma = 5^\circ, 15^\circ, 30^\circ \dots 165^\circ$ und 175° bestimmt. Dieses Messverfahren wird mit dem einfachen Goniometer (Eigenbau) angewendet. Für genaue Lichtstärkeverteilungskurven (LVK) und entsprechende Lichtstrommessungen sollte die Winkeldifferenz $\Delta\gamma \leq 2,5^\circ$ sein.

Bei Langfeldleuchten für Leuchtstofflampen und LED-Röhren kann die Methode mit dem Punktstrahler nicht direkt angewendet werden. Besonders bei Rasterleuchten, die in der Praxis häufig eingesetzt werden, können Teile der Leuchte einzeln vermessen werden. Sofern die LVK der Teilleuchten (jeweils ein Raster) nahezu rotationssymmetrisch ist, können die Gl. 2.34, 2.35 und 2.36 für die Teilleuchten angewendet werden. Sonst müssen neben der Ebene C_0 noch die Ebenen C_{45} , C_{90} und C_{135} vermessen werden. Da die Teilleuchten nahezu gleich sind, kann jeweils mit der gleichen LVK gerechnet werden. Häufig weisen die Randfelder einen etwas geringeren Lichtstrom auf. Dieser Effekt kann mit einem einfachen Verfahren, Beleuchtungsstärke mittig unter der Teilleuchte immer im gleichen Abstand, ermittelt und berücksichtigt werden.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----

Prinzip einer Langfeldleuchte mit 15 Rasterfeldern

Der Leuchten-Lichtstrom Φ und die Beleuchtungsstärke E an beliebigen Punkten im Raum können dann nach dem Überlagerungsprinzip berechnet werden. An einigen Messpunkten sollte das Modell der Langfeldleuchte durch Beleuchtungsstärkemessungen bei eingeschalteter Gesamtleuchte überprüft werden.