

## **Anforderung an die Beleuchtung**

Leuchten mit ungeeigneter Lichtstärkenverteilung oder schlechtem Wirkungsgrad verschwenden wertvolle Energie oder können sich durch zu hohe Blendwerte negativ auf das Wohlbefinden und auf die Leistungsfähigkeit der Menschen auswirken.

Energieeffiziente Leuchten hingegen produzieren genügend Licht, ohne ermüdende Blendungen zu verursachen.

Elektrische und lichttechnische Kenndaten helfen beim Planen von Beleuchtungsanlagen.

Neben elektrischen Werten wie Versorgungsspannung, Systemleistung, Leistungsfaktor und Lampenleistung geben gerade die lichttechnischen Kenndaten Auskunft über die Gesamteigenschaften einer Leuchte.

## **Aufgaben eines photometrischen Labors**

Zu den Aufgaben eines photometrischen Labors gehört die Ermittlung aller lichttechnischer Kenndaten von Leuchten und Lampen (inkl. LED).

Mit Kenntnis der Lampenparameter lassen sich nach Messung der räumlichen Leuchten-Lichtstärkeverteilung sämtliche lichttechnische Kenndaten der geprüften Leuchte bestimmen:

- Lichtstärkeverteilung
- Ausstrahlungswinkel
- Betriebswirkungsgrad
- Mittlere Leuchtdichten
- Blendwerte

Mit Hilfe dieser lichttechnischen sowie der elektrischen Werte können wir eindeutige Aussagen über Energieeffizienz und Eignungsbereich der Leuchte treffen.

## **Das Drehspiegel-Goniophotometer GO-DS 2000 von LMT, Berlin**

Die räumliche Lichtstärkeverteilung wird mit Goniophotometern gemessen, wobei die Lichtstärken als Funktion zweier Winkel in bestimmten, definierten Ebenensystemen aufgenommen werden (EN 13032-1 Abschnitt 4).

**ILUmetriX** arbeitet mit dem Drehspiegel-Goniophotometer GO-DS 2000 der Firma LMT in Berlin.

Mit Hilfe eines Umlenkspiegels wird das zu messende Licht der Lichtquelle in einen fest installierten Messkanal umgelenkt, an dessen Ende sich der Messkopf, das Photometer, befindet.

Die zu prüfenden Leuchten können bis zu 50 kg wiegen und einen Durchmesser von maximal 2,0 m haben. Die Messungen erfolgen gemäß internationaler Richtlinien (EN 13032-1; 2004 [1] und CIE Publikation 121-1996 [2]).

Das Drehspiegel-Goniophotometer besteht im Wesentlichen aus drei Hauptkomponenten:

- Dem feststehenden Basisbock mit Motor A
- Dem auf der horizontalen Achse A drehenden Ausleger mit Drehspiegel und Gegengewicht
- Dem auf Achse B drehenden Positionier-Arm mit Motor C

Die Leuchte wird in ihrer Betriebslage an der Achse C befestigt. Elektrische Verbindungen werden über Schleifringe hergestellt. Dadurch kann die Achse C kontinuierlich rotieren.

Der feststehende Basisbock beherbergt den Motor A, der den Ausleger mit Positionier-Arm, Umlenkspiegel und Gegengewicht 180° um die horizontale Achse A dreht.

Der Positionier-Arm dreht über einen speziellen Kettentrieb auf der Achse B gegenläufig zur Achse A und hält dadurch die Achse C in ihrer vertikalen Position und somit die Leuchte in ihrer Betriebslage.

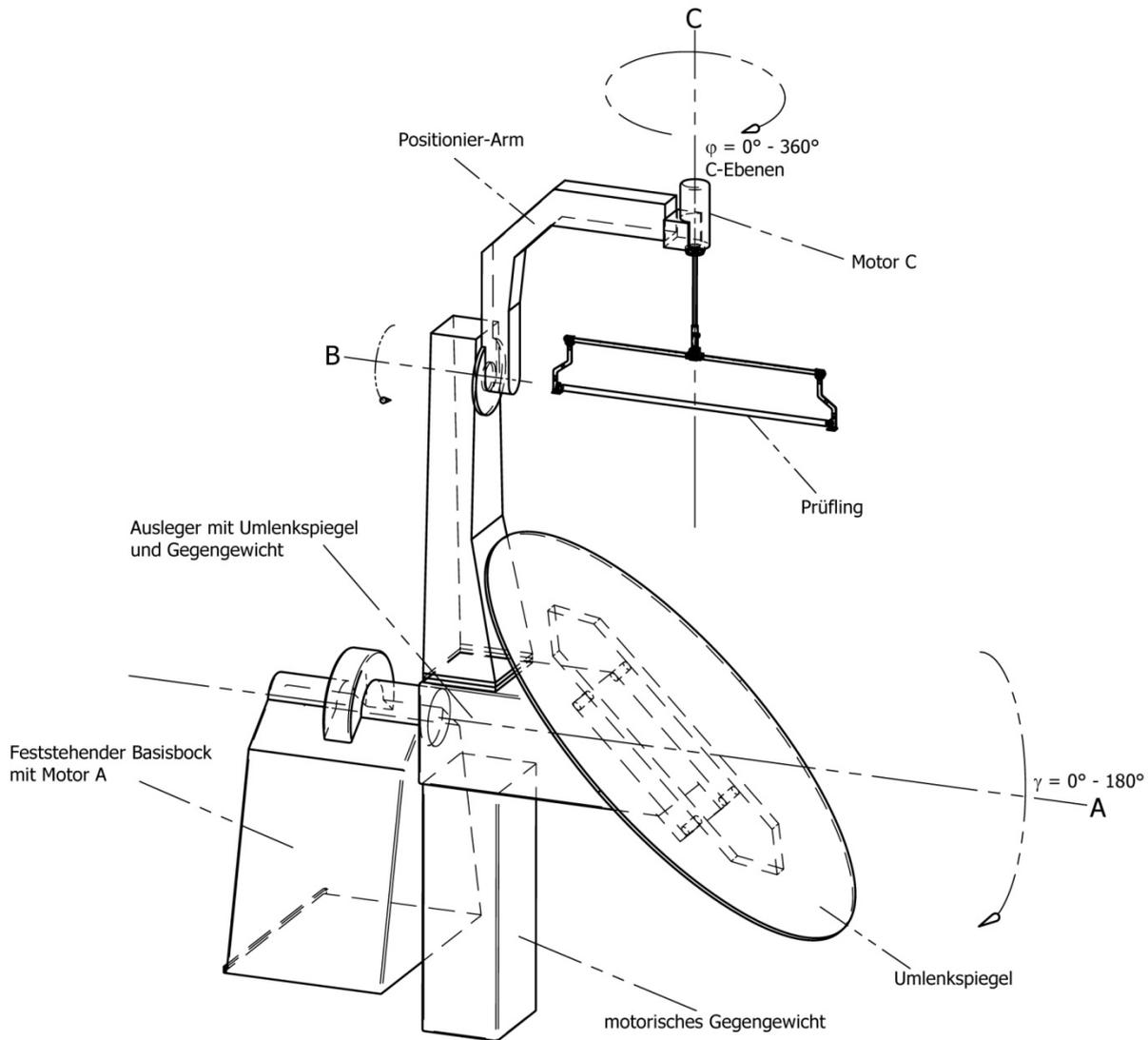
Der Umlenkspiegel ist mit einer Neigung von 45° auf dem Ausleger mit Gegengewicht montiert und lenkt das Licht der zu prüfenden Leuchte zum Photometerkopf. Die Spiegelmitte liegt im Drehpunkt der Achse A. Ein stabiler, justierbarer Spiegelträger hält einen ebenen, ovalen Spiegel der Größe 2,0 m x 2,80 m.

Aufgrund seiner spektralen Reflexionseigenschaften beeinflusst der Umlenkspiegel die Strahlung der

Messobjekte in ihrer relativen spektralen Verteilung. Daher sind dessen Reflexionseigenschaften in den spektralen Angleich des Photometerkopfes einbezogen.

Somit ist die Einhaltung des  $V(\lambda)$ -Fehlers nach EN 13032-1 gegeben, wenn die Strahlung über den Spiegel

auf den Photometerkopf gelangt.



Der Photometerkopf enthält Si-Photoelemente mit Partialfilterung und hat eine lichtempfindliche Fläche von 30 mm Durchmesser. Die Thermostatisierung des Photometerkopfes sorgt für eine von der Umgebungstemperatur unabhängige Empfindlichkeit.

Um Streulichteinflüsse zu vermeiden, sind auf die Messung zwischen Photometerkopf und Drehspiegel mehrere Lochblenden sowie an der Messkanalöffnung eine variable Streulichtblende angeordnet. Prüfraum und Messkanal sind mit tiefschwarzer Mattfarbe und schwarzem Teppich ausgestattet.

Das Drehspiegel-Goniophotometer weist einen besonderen Vorteil gegenüber allen anderen Einrichtungen auf, welche die Messobjekte in beiden Achsen drehen (z.B. Leuchtenwender):

Die Lichtquelle verbleibt während der gesamten Messung in der Gebrauchslage.

Eine Lageänderung kann bei verschiedenen Lampen zu wesentlichen Lichtstärkeveränderungen führen, z. B. bei Kompaktleuchtstofflampen, oder ist bei einigen Lampentypen überhaupt nicht zulässig, wenn vom Hersteller eine bestimmte Brennlage vorgeschrieben ist.

Darüber hinaus kann das GO-DS 200 als Referenz-Messgerät eingesetzt werden um zu untersuchen, ob und unter welchen Bedingungen Messungen mit anderen weniger aufwändigen Einrichtungen zur Bestimmung von Lichtstärkeverteilungen zu hinreichend genauen Ergebnissen führen.

## Messprinzip

Die Lichtstärke  $I$ , (Einheit: Candela, [cd]) einer Strahlungsquelle ist definiert als Lichtstrom  $d\Phi$ , pro Raumwinkelelement  $d\Omega$  in einer gegebenen Richtung.

Die Bestimmung der Lichtstärke erfolgt durch Messen der Beleuchtungsstärke  $E$  (Einheit: Lux, [lx]) über eine feste Messentfernung. Bei ausreichender Entfernung zur Lichtquelle verkleinert sich die Beleuchtungsstärke proportional zum Quadrat des Abstands  $r$  (photometrisches Entfernungsgesetz):

$$E = k * I_v / r^2$$

$k$  ist ein Korrekturfaktor für die Messanlage und wird über eine Lichtstromkalibrierung bestimmt.

Wird die Lichtstärkenverteilung einer Lichtquelle über den ganzen Raum gemessen, erhält man durch numerische Integration den absoluten Lichtstrom  $\Phi$  der Lichtquelle (Einheit Lumen, [lm]).

Benutzt man zur Lichtstromkalibrierung eine Lampe mit bekanntem Lichtstrom, kann mit dem ermessenen Lichtstromwert der Korrekturfaktor  $k$  der Messanlage bestimmt werden.

## Messgenauigkeit

Die stabile Konstruktion und die präzise Winkelmessung erlauben eine exakte Zuordnung der Lichtstärken zu den Ausstrahlungswinkeln mit einer Abweichung von weniger als  $0,1^\circ$ .

Die Planheit des Spiegels kann mit einem von der British Standards Institution angegebenen Prüfverfahren (BS 5225 Specification for Photometric Data for Luminaires Part 1, Photometer

Measurements) überprüft werden. Die für das GO-DS 2000 gemessenen Werte liegen deutlich innerhalb der zulässigen Grenzen.

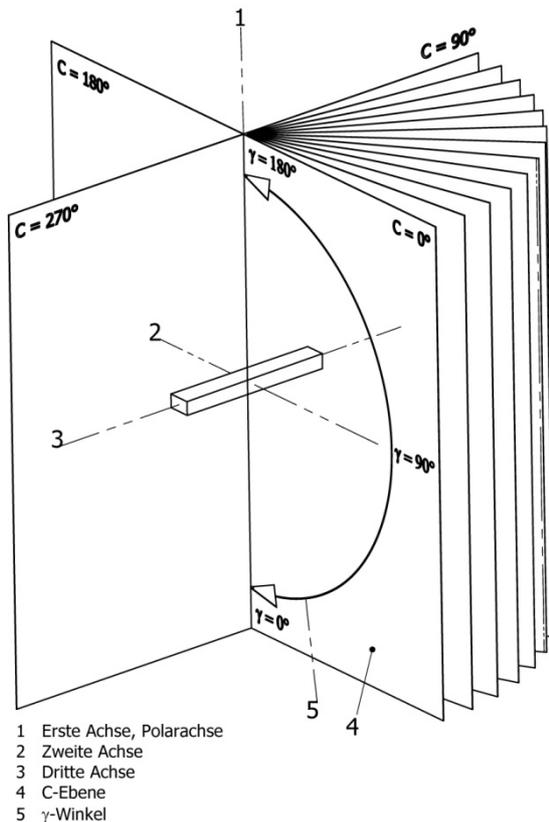
Die Anpassung der Empfindlichkeit der Photoelemente an die  $V(\lambda)$ -Funktion ist in Verbindung mit dem Spiegel sehr genau und entspricht nach DIN 5032 Teil 7 der Genauigkeitsklasse L.

## Messungen im C-Ebenensystem

Im Allgemeinen wird die Lichtstärkeverteilung von Leuchten in verschiedenen Ebenen gemessen.

Von der Vielzahl der möglichen Messsysteme finden drei Ebenensysteme Verwendung, die von der CIE als A-, B- und C-Ebenensystem bezeichnet werden.

Bei der Photometrie der Allgemeinbeleuchtung findet hauptsächlich das C-Ebenensystem als Standardsystem Verwendung.



Die erste Achse, auch Polarachse, steht senkrecht zur Ebene, die als Hauptlichtaustrittsfläche anzusehen ist. Für jede C-Ebene werden die Werte der Lichtstärke in einem Halbkreis um die Leuchte herum von  $\gamma=0^\circ$  bis  $\gamma=180^\circ$  aufgenommen.

Die Größe der Winkelschritte für die  $\gamma$ -Winkel und für die C-Ebenen ist abhängig von der Ausstrahlungscharakteristik der zu prüfenden Leuchte.

## Messmethoden

Vielfach lassen sich komplizierte Vorgänge recht einfach unter Verwendung eines Modells erklären. Am Kugelmodell werden die verschiedenen Messmethoden des DS-GO 2000 sehr schnell verständlich.

Man stelle sich eine Kugel oder besser einen Globus vor.

Der Radius des Globus entspricht der Messentfernung. Im Mittelpunkt des Globus ist der Prüfling montiert, mit Hauptausstrahlungsrichtung zum „Südpol“ ( $\gamma=0^\circ$ ).

Der Photometerkopf, der Messempfänger, wird tangential über die Globusoberfläche geführt und *sieht* immer radial zum Mittelpunkt, also zum Prüfling, wodurch die Messentfernung immer gleich bleibt.

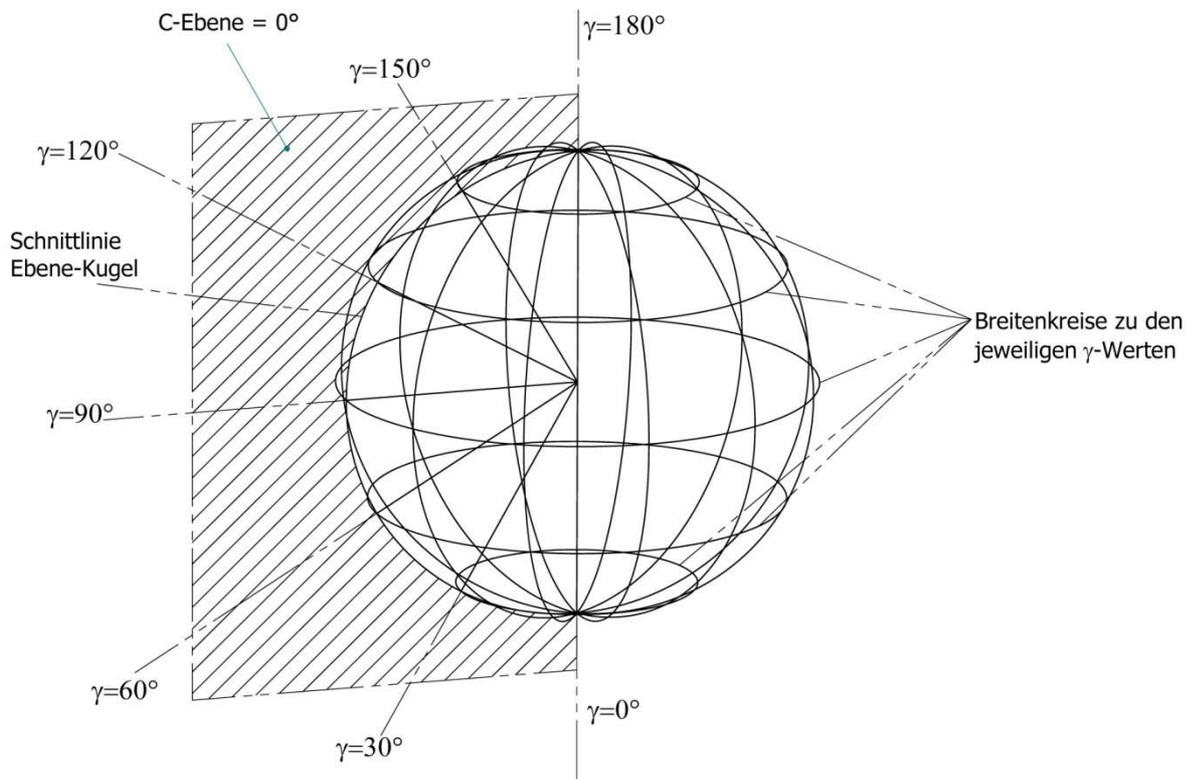
Auf einem Globus wie man ihn kennt befinden sich Längen- und Breitenkreise.

Die Längskreise schneiden sich im Nord- und Südpol, die Breitenkreise liegen parallel zum Äquator.

Das hier benutzte Kugelmodell hat ebenfalls Längen- und Breitenkreise.

Die Längskreise entstehen durch die Schnittlinien der Kugel mit den C-Ebenen. Da eine C-Ebene jedoch nicht die gesamte Kugel schneidet, sondern von der Polarachse aus immer nur die halbe Kugel, ergibt sich für jede C-Ebene ein Längenhalbkreis.

Ein Breitenkreis, parallel zum Äquator, entsteht dort, wo eine Gerade mit dem Winkel  $\gamma$  vom Mittelpunkt der Kugel auf den Längenhalbkreis trifft.



Jeder Schnittpunkt eines Breitenkreises mit einem Längenhalbkreis sowie die beiden Pole stellen einen Messpunkt dar.

Das zur Veranschaulichung gewählte Kugelmodell beschränkt sich auf  $\gamma$ -Winkelschritte und C-Winkelschritte von jeweils  $30^\circ$ .

Damit erhalten wir 12 Ebenen mit jeweils 7  $\gamma$ -Winkeln und somit 84 Messpunkte, die die Lichtstärkeverteilung beschreiben.

In der Praxis werden beispielsweise breitstrahlende Innenraumleuchten mit  $5^\circ$   $\gamma$ -Winkelschritten und  $15^\circ$  C-Winkelschritten gemessen. Damit ergeben sich 888 Messpunkte. Leuchten mit hohen Lichtstärkegradienten dagegen benötigen höhere Auflösungen und somit kleinere Winkelschritte.

Die maximale Auflösung des GO-DS 2000 beträgt  $0,1^\circ$  für beide Achsen und ermöglicht die Aufnahme von bis zu 6,5 Mio. Messwerten zur Darstellung einer Lichtstärkeverteilung.

Leuchten mit ausschließlich direkter Ausstrahlung werden mit  $\gamma=0-90^\circ$  gemessen, Leuchten mit direktem und indirektem Anteil dagegen von  $\gamma=0-180^\circ$ .

Das Drehspiegel-Goniophotometer GO-DS 2000 misst im C-Ebenensystem mit zwei verschiedenen Verfahren, der Längenwinkelmethode und der Breitenwinkelmethode.

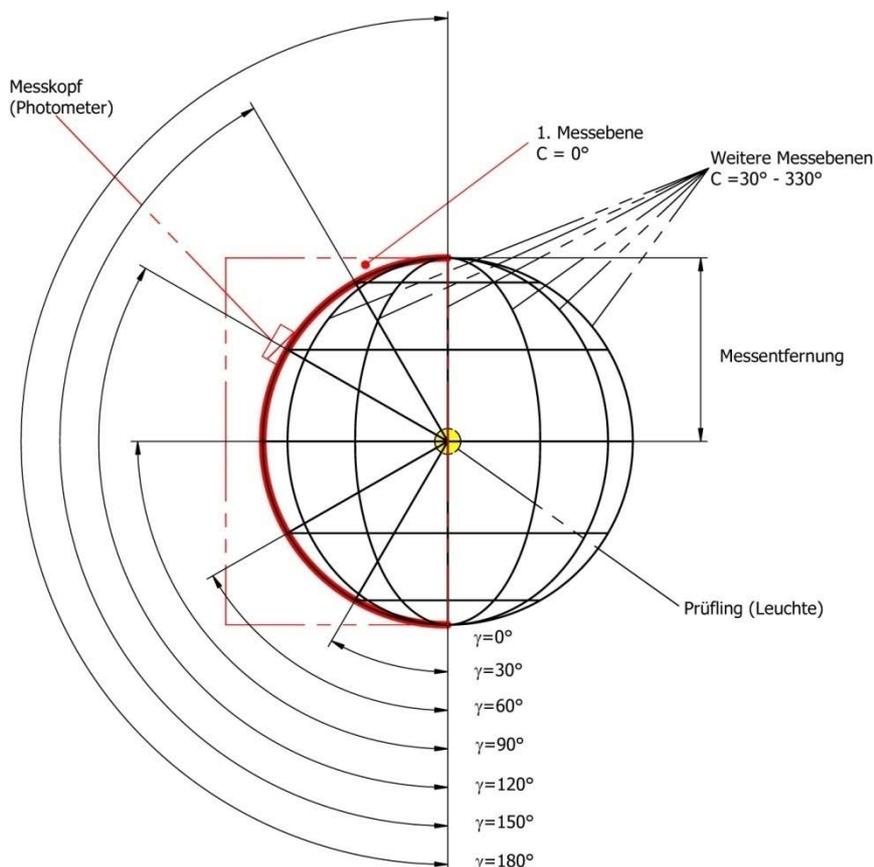
### 1) Längenwinkelmethode

Diese Messmethode findet hauptsächlich bei Leuchten mit guter Symmetrie und großen Lichtstärkegradienten Anwendung, z. B. bei sehr eng strahlenden Scheinwerfern.

In einem solchen Fall liegen die  $\gamma$ -Winkelschritte bei vielleicht  $0,5^\circ$ , die C-Ebenen Winkelschritte bei  $15^\circ$ .

*Das GO-DS 2000 arbeitet folgendermaßen:*

Die vertikale Drehachse, an der die Leuchte montiert ist, verweilt in der jeweiligen C-Ebene so lange, bis die horizontale Achse die  $\gamma$ -Winkel kontinuierlich von  $0^\circ-90^\circ$  (bei Leuchten mit ausschließlich direktem Abstrahlverhalten) oder mit  $0-180^\circ$  (bei Leuchten mit direktem und indirektem Anteil) mit hoher Messauflösung (bis zu 1801 Messwerte pro C-Ebene) durchlaufen hat. Danach dreht sie in die nächste Ebene, damit deren  $\gamma$ -Werte aufgenommen werden können. Dieser Vorgang wird wiederholt bis die letzte C-Ebene durchlaufen wurde.



Zur Veranschaulichung dient auch hier wieder das bereits beschriebene Kugelmodell.  
 Blickrichtung: seitlich auf die Kugel, senkrecht auf die  $C=0^\circ$  Ebene.  
 Die Hauptausstrahlungsrichtung des Prüflings weist nach unten, Richtung  $\gamma = 0^\circ$

## 2) Breitenwinkelmethode

Diese Messmethode findet Anwendung bei Leuchten, die eine unsymmetrische Lichtstärkeverteilung erwarten lassen, d. h. die Lichtstärkeverteilungen in den verschiedenen C-Ebenen unterscheiden sich deutlich voneinander. Solche Verteilungen finden sich bei Langfeldleuchten, Wallwashern oder auch Straßenleuchten.

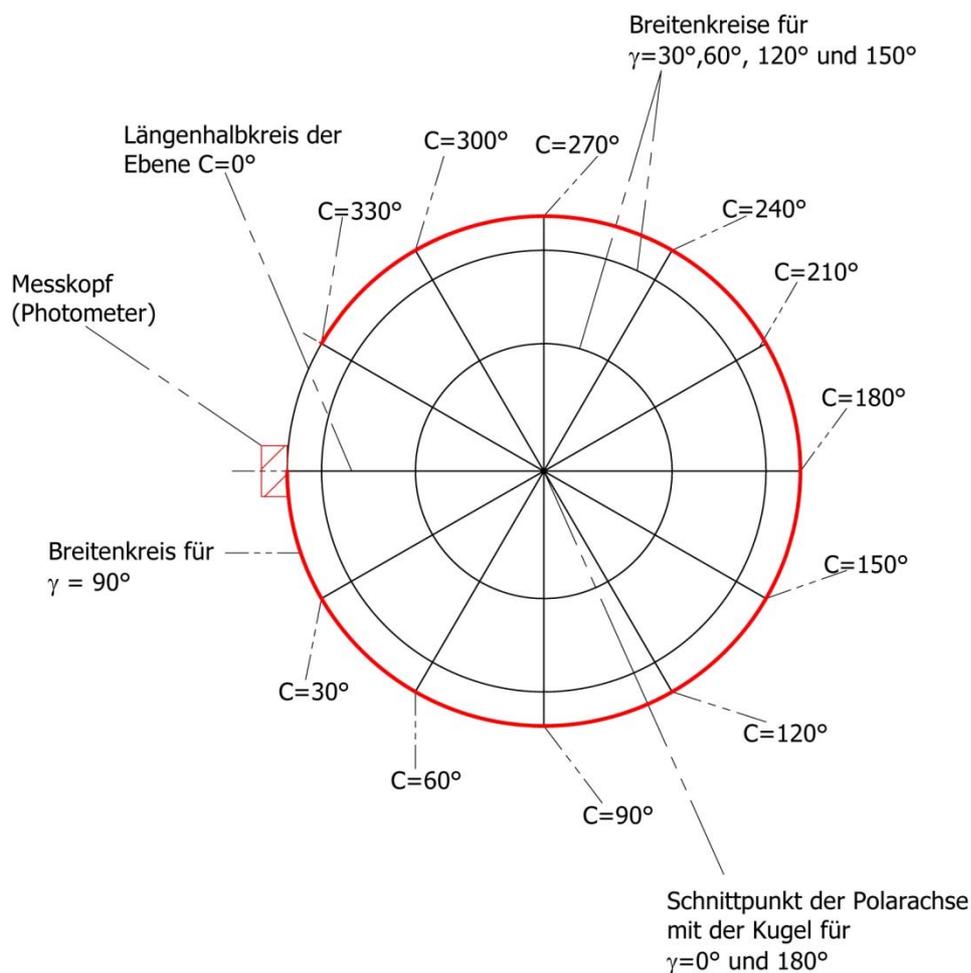
In solchen Fällen könnten die  $\gamma$ -Winkelschritte bei vielleicht  $5^\circ$  liegen, die der C-Ebenen aber bei  $1^\circ$ .

*Das GO-DS 2000 arbeitet folgendermaßen:*

Die vertikale Drehachse, an der die Leuchte montiert ist, rotiert kontinuierlich um volle  $360^\circ$  und kann bei höchster Auflösung 3600 C-Messwerte auf jedem  $\gamma$ -Breitenkreis sowie an den Polen aufnehmen.

Die horizontale Achse beginnt bei  $\gamma=0^\circ$  und verweilt während eines Umlaufs der vertikalen Achse in seiner Stellung.

Ist ein Umlauf der vertikalen Achse beendet, fährt die horizontale Achse den nächsten  $\gamma$ -Breitenkreis an, dessen C-Werte dann aufgenommen werden. Dieser Vorgang wiederholt sich bis  $\gamma=90^\circ$  (bei Leuchten mit ausschließlich direktem Abstrahlverhalten) oder  $\gamma=180^\circ$  (bei Leuchten mit direktem und indirektem Anteil) durchlaufen wurde.



Zur Veranschaulichung dient auch hier wieder das bereits beschriebene Kugelmodell.  
 Blickrichtung: von oben auf die Kugel, senkrecht auf die Schnittflächen der Breitenkreise.  
 Die Hauptausstrahlungsrichtung des Prüflings weist in die Zeichnung hinein, Richtung  $\gamma = 0^\circ$ .

Neben den zwei Messmethoden im C-Ebenensystem findet eine weitere Messmethode Anwendung. Diese Methode ist besonders geeignet zur Ermittlung von Lampenlichtströmen.

### Die spiralförmige Integrationsmessung

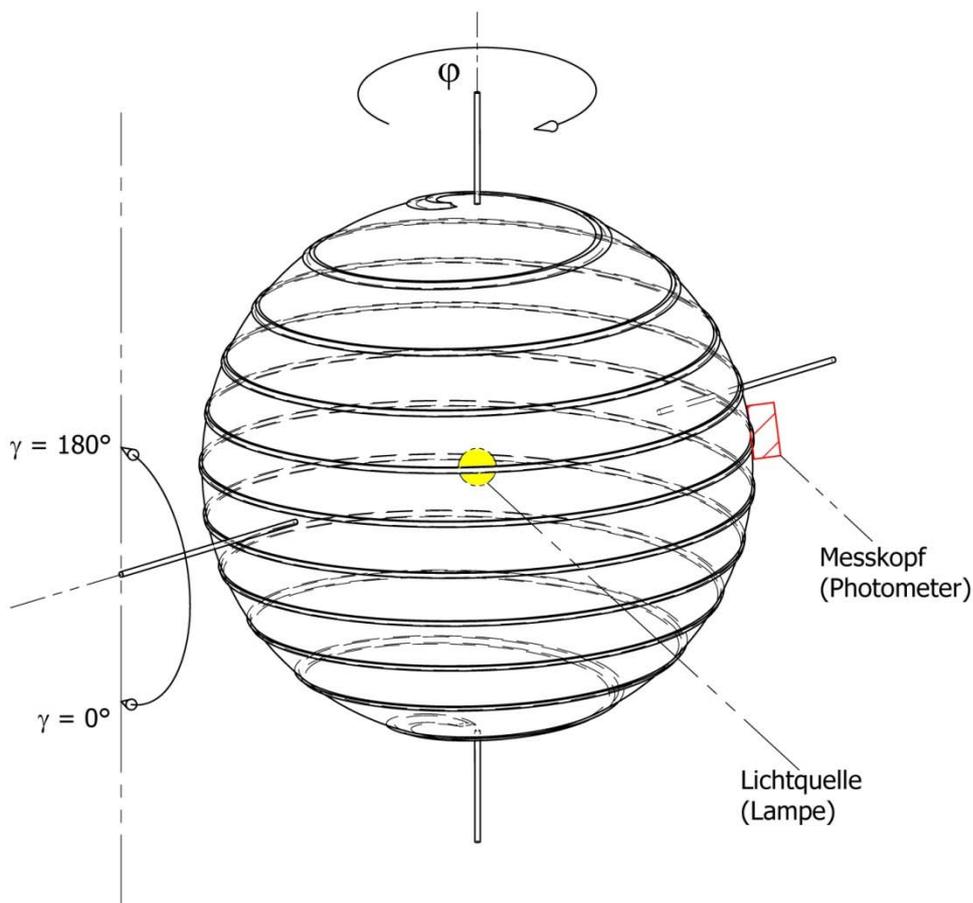
Im Gegensatz zu den vorstehend beschriebenen Messmethoden wird der Messkopf nicht über Längen- oder Breitenbahnen, sondern auf einer spiralförmigen Bahn über die Kugeloberfläche geführt. Die hierbei aufgenommenen Messwerte werden integriert.

Die Auflösung ergibt sich durch das Verhältnis der Umlaufhäufigkeit von  $\varphi$  zu  $d\gamma$ .

*Das GO-DS 2000 arbeitet folgendermaßen:*

Die vertikale Drehachse, an der die Leuchte montiert ist, rotiert kontinuierlich.

Die horizontale Achse wird ebenfalls kontinuierlich von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$  gedreht.



Das hier gezeigte Modell weist 10,5 volle Umdrehungen der vertikalen Achse bei  $180^\circ$  der horizontalen Achse auf und könnte somit maximal 37800 Messpunkte aufnehmen.

### Messen mit dem Drehspiegel-Goniophotometer GO-DS 2000

In der Praxis lässt sich das sehr anschauliche Kugelmodell jedoch schlecht realisieren.

Eine Kugel mit ausreichend großer Messentfernung hätte einen Durchmesser von ca. 30 m.

Dazu kämen noch die ebenso große wie aufwändige Halbkreis-Schiene, auf der der Photometerkopf über die Kugel fahren könnte, und eine sehr lange Zeitspanne für eine komplette Messung. Immerhin müsste der Photometerkopf an seiner tonnenschweren Schiene über 94 m zurücklegen, um den Äquator einmal zu umfahren.

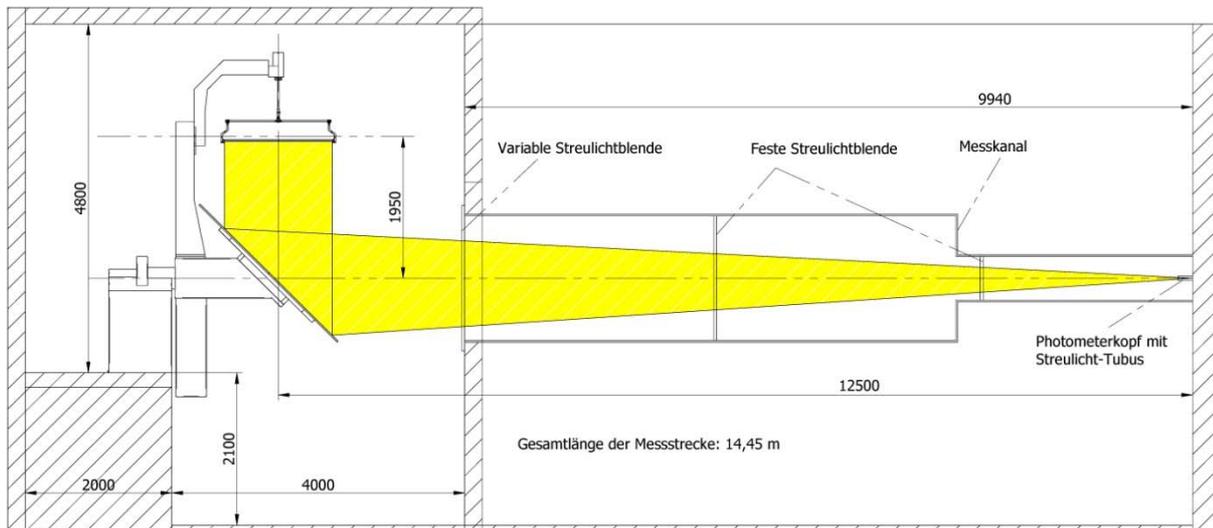
Eine solche Konstruktion wäre also unsinnig.

Ein Drehspiegel-Goniophotometer bietet platz sparende und sinnvolle Lösungen:

- Die Messstrecke kann in einen Messkanal verlegt werden, dessen Durchmesser nicht größer als der

- Durchmesser des größten Prüflings ist.
- Der Prüfling verbleibt während der gesamten Messung in Gebrauchslage. Somit können Prüflinge auch mit lageabhängigen Lampen korrekt geprüft werden
- Die Messzeiten sind verhältnismäßig kurz, da je nach Messmethode entweder jeweils eine Achse oder sogar beide Achsen kontinuierlich drehen

### Der Messraum mit Messkanal bei ILUmetriX



Die Abbildung zeigt einen Querschnitt durch unsere Messeinrichtung.

Die Unterkante des Messkanals befindet sich in einer Höhe von 2,50 m. Das hat den Vorteil, dass genügend Raumhöhe für weitere Messräume unter dem Messkanal verbleibt und somit eine optimale Raumausnutzung möglich ist.

Zu diesem Zweck wurde das GO-DS 2000 auf einem 2,10 m hohen Sockel montiert.

### Messung der Lichtstärkeverteilung

Bevor die goniometrische Messung der Lichtstärkeverteilung nach einem der zuvor beschriebenen Methoden erfolgen kann, muss der genaue Wert des Lichtstroms der Lampe bei Betrieb an dem zur Messung verwendeten Vorschaltgerät bekannt sein.

Um ein stabiles Brennverhalten einer solchen Messlampe zu gewährleisten, muss diese nach den Vorgaben der EN 13032-1 Tabelle 2 gealtert sein.

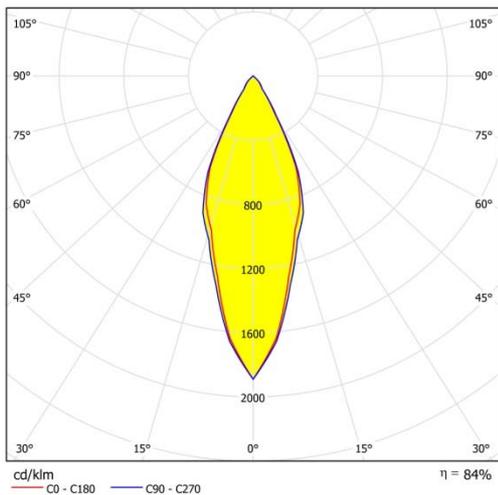
Die Umgebungstemperatur im Messraum soll bei Leuchtstofflampen  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , bei anderen Lampen  $20^{\circ}\text{C} - 27^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  betragen.

Die Stabilität der Versorgungs-Wechselspannung beträgt  $\pm 0,2\%$ .

Nach erfolgreicher Messung kann die Lichtstärkeverteilungskurve dargestellt werden.

Um Leuchten besser miteinander vergleichen zu können, wird die Lichtstärke auf einen normierten Lampenlichtstrom von 1000 lm berechnet. Die Lichtstärkewerte erscheinen also nicht als absolute Werte in cd, sondern normiert auf cd/klm (Candela pro Kilolumen).

Da die Darstellung aller C-Ebenen zu einem unübersichtlichen Bündel von Linien führen würde, beschränkt man sich bei der Darstellung der Lichtstärkeverteilungskurve (LVK) in der Regel auf die senkrecht zueinander stehenden Ebenen C0-C180 und C90-C270 in einem Polardiagramm.



## Betriebswirkungsgrad

Mit der bekannten räumlichen Lichtstärkeverteilung und dem Lichtstrom der Lampe lässt sich über den Leuchtenlichtstrom der Leuchtenbetriebswirkungsgrad  $\eta_{LB}$  berechnen.

Der Lampenlichtstrom der freibrennenden Lampe ist immer höher als der von der Leuchte abgegebene Lichtstrom. Durch verwendete Reflektoren, Optiken, Abdeckungen und durch thermische Einflüsse geht Licht in der Leuchte verloren.

$$\eta_{LB} = \Phi_{Le} / \Phi_{La}$$

Hierbei ist  $\Phi_{Le}$  der gemessene Leuchtenlichtstrom und  $\Phi_{La}$  der Lampenlichtstrom der gemessenen Lampe. Je höher der Leuchtenbetriebswirkungsgrad, umso effizienter ist die Leuchte. Im Klartext bedeutet das, dass bei gleicher elektrischer Leistung eine größere Lichtmenge zur Verfügung gestellt wird. Vergleichen sollte man jedoch nur Leuchten mit gleichen Lampen und ähnlichen Lichtstärkeverteilungs-Charakteristika.