

Prof. Dr. Jürgen Nolting

How does it work? – Teil 15

Radiometrische und photometrische Messungen

Im vorhergehenden Teil dieser Reihe wurden die radiometrischen und photometrischen Grundgrößen wie z.B. Bestrahlungsstärke, Strahldichte, Leuchtdichte etc. besprochen. Aber wie werden diese Größen gemessen?

Um eine Messaufgabe zielgerichtet erfüllen zu können oder ein Messinstrumentarium bedarfsgerecht spezifizieren und auswählen zu können, ist die Kenntnis der grundlegenden Funktions- und Verfahrensweisen unerlässlich. Hier soll dieser Artikel weiterhelfen. Die wichtigsten Messverfahren und Gerätetypen werden vorgestellt. Und auch die üblichen Darstellungsformen der Messergebnisse werden erläutert [1].

■ 1 Messung von Strahlungsfluss und Lichtstrom

Um den Strahlungsfluss bzw. Lichtstrom einer Quelle zu messen, eignen sich zwei Verfahren: das integrative Verfahren, das die gesamte abgestrahlte Strahlungsleistung pauschal und gleichzeitig misst und das goniometrische Verfahren, das das Strahlungsfeld um die Quelle herum punktweise und lückenlos abtastet.

Die Ulbricht-Kugel

Als Messsystem für das integrative Verfahren hat sich die Ulbricht-Kugel in Verbindung mit einem Radiometer bzw. Photometer durchgesetzt. Die Ulbricht-Kugel ist eine Hohlkugel, die auf der Innenseite mit einer möglichst perfekt diffus remittierenden Beschichtung (meist BaSO₄ oder PTFE) versehen ist, die im gesamten zu messenden Spektralbereich den gleichen hohen Remissionsgrad aufweist (97% für BaSO₄). Jedes Flächenelement der Innenseite sollte eine weitestgehend ideale Cosinus-förmige räumliche Remissionscharakteristik aufweisen, also ein möglichst idealer Lambert-Strahler sein. Koppelt man nun durch eine Öffnung Strahlung ein (oder bringt die zu vermessende Quelle vollständig in das Kugelinnere), so ergibt sich an allen Stellen der Kugelwand durch diffuse Mehrfachreflexion die gleiche Bestrahlungsstärke, sofern eine direkte Bestrahlung ausgeschlossen ist. Diese indirekte Bestrahlungsstärke $E_{e,ind}$ kann bei gegebener Kugelinnenfläche A und gegebenem Remissionsgrad ρ aus dem gesamten einge-

koppelten Strahlungsfluss Φ_e berechnet werden und ist für jedes Teilstück der Innenfläche gleich:

$$E_{e,ind} = \frac{\Phi_e \cdot \rho}{A \cdot (1 - \rho)}$$

Für den Lichtstrom und die Beleuchtungsstärke gilt eine analoge Beziehung.

Wenn man nun also mit einem Radiometer (bzw. Photometer) die Bestrahlungsstärke direkt an einer kleinen Öffnung der Kugel misst und durch eine Schattenmaske dafür sorgt, dass kein direktes Licht vom Eingang der Kugel zum Ausgang auf das Radiometer gelangen kann, dann ist der Messwert direkt proportional zum Strahlungsfluss. Dieses Messverfahren ist umso genauer, je diffuser die Quelle emittiert und je größer der Kugelinnenfläche im Verhältnis zu der Ein- und Auskoppelöffnung ist. Bei diffusen kleinen Quellen sind Genauigkeiten von $\pm 5\%$ möglich. Bei engwinklig abstrahlenden LEDs sind aber Messfehler in der doppelten Größe typisch.

Abbildung 1 zeigt auf der linken Seite das Prinzip und auf der rechten Seite eine Abbildung einer Ulbrichtkugel.

Das Goniophotometer

Einen anderen Ansatz zur Bestimmung des gesamten Strahlungsflusses bzw. des Lichtstroms verfolgt das Goniophotome-

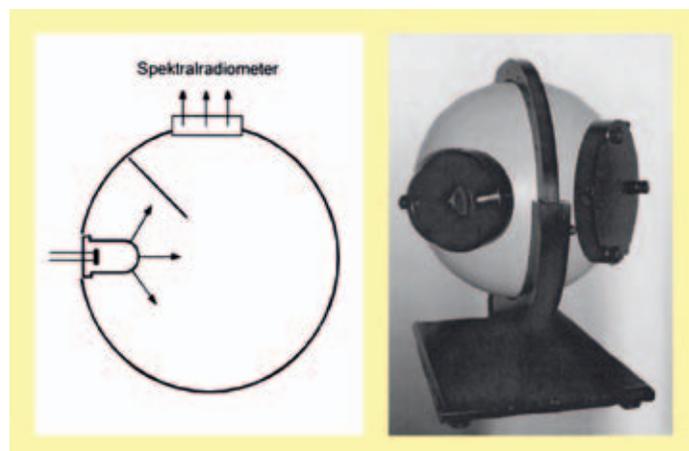


Abb. 1: Ulbrichtkugel, links: Prinzip [2], rechts: typisches Gerät [3]

ter. Im Prinzip tastet hierbei ein Detektor mit idealer Cosinus-Charakteristik eine (fiktive) Kugeloberfläche ab, die im Zentrum die zu vermessende Strahlungsquelle enthält. Der Detektor misst für jedes Teilstück der Kugeloberfläche die Bestrahlungsstärke E_e . Der Wert ist natürlich abhängig vom Ort auf der Kugel. Zur Bestimmung des gesamten Strahlungsflusses wird der Detektor schrittweise über die gesamte Kugel geführt. Bei diesem Verfahren wird also für alle möglichen Abstrahlrichtungen separat bestimmt, wie groß die Bestrahlungsstärke in die jeweilige Richtung ist. Da die Fläche des Detektors bekannt ist, kann man den Anteil des Strahlungsflusses in der jeweiligen Richtung bestimmen. Die Aufsummation der einzelnen Werte ergibt den gesamten Strahlungsfluss.

Es wäre natürlich ein großer apparativer Aufwand, wenn man den Detektor tatsächlich um die Quelle bewegen wollte. Stattdessen geht man z.B. bei der Vermessung von Leuchtdioden den Weg, dass man die Quelle um ihre Achse rotieren lässt und sie nach jeder Umdrehung um ein Stück um ihre Spitze schwenkt. Die Abbildung 2 zeigt den Aufbau eines typischen LED-Goniophotometers.

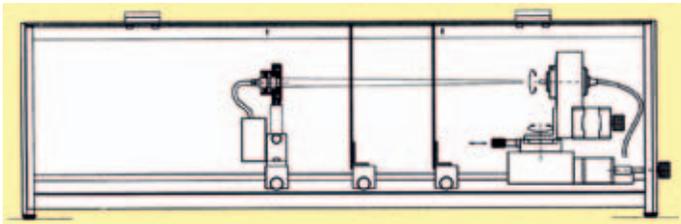


Abb. 2 Aufbau eines typischen Goniophotometers [2]

Da ein Goniophotometer die Verteilung des Strahlungsfeldes um eine Quelle herum stückweise aufnimmt, eignet es sich natürlich auch hervorragend zur Vermessung der räumlichen Abstrahlcharakteristik der Quelle.

■ 2 Messung der Bestrahlungsstärke und Beleuchtungsstärke

Absolut-Messgeräte

Die Messung der optischen Leistung sowie der daraus abgeleiteten Größen kann durch direkten Vergleich mit der Leistungsabgabe entsprechender elektrischer Heizelemente erfolgen. Diese erfolgt mit Absolut-Messgeräten. Bei diesen Geräten wird die optische Leistung ersetzt durch die Leistung eines elektrischen Heizelements. Gemessen wird die Temperaturerhöhung durch die eingekoppelte optische Strahlung. Sodann wird ohne optische Einkopplung die elektrische Heizung so eingestellt, dass sich die gleiche Temperaturerhöhung ergibt. Die dann von der Heizung abgegebene Wärmeleistung muss genauso groß sein wie die absorbierte optische Leistung. Abbildung 3 zeigt das Messprinzip.

Um möglichst die gesamte Strahlung im Gerät zu absorbieren, eignen sich besonders Hohlräume mit schwarz gefärbten, matten Innenflächen.

Absolutmessgeräte haben meist nicht die Empfindlichkeit und die geringen Zeitkonstanten, die man mit photoelektrischen Messsystemen erreichen kann. In der Praxis finden Absolutmessgeräte vor allem bei der Kalibrierung photoelektrischer Messsysteme Anwendung.

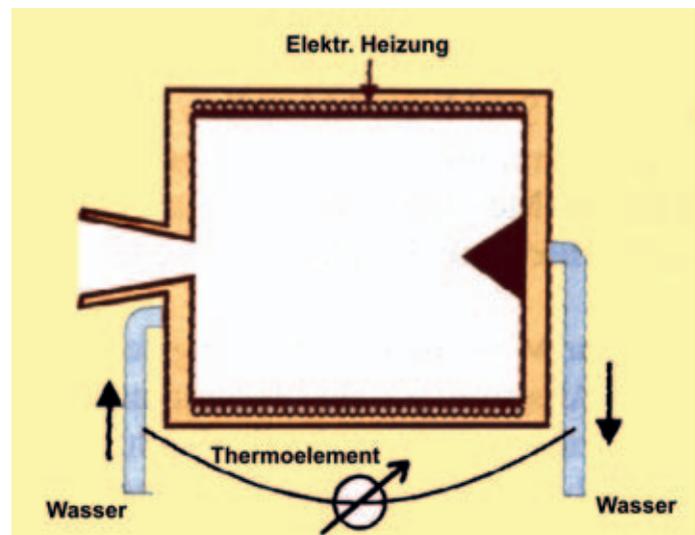


Abb. 3: Prinzipieller Aufbau eines Absolut-Messgerätes [4]

Radiometer und Photometer

Elektrisch messende Systeme auf der Basis von Strahlungsdetektoren sind die am häufigsten anzutreffenden und vielseitigsten Geräte zur Messung der Bestrahlungsstärke. Mit entsprechenden anpassenden Filtern davor kann man entweder einen flachen Spektralverlauf der Empfindlichkeit (zur Bestimmung der Bestrahlungsstärke) oder einen Verlauf nach der $V(\lambda)$ -Kurve (zur Bestimmung der Beleuchtungsstärke) erzielen. Auch andere Bewertungskurven sind gebräuchlich, um z.B. die Gewichtung der Bestrahlungsstärke nach biologischen Wirkfunktionen (z.B. retinal thermal hazard, thermische Netzhautbelastung) vorzunehmen.

Leider können gewünschten Verläufe der spektralen Responsivität mit geeigneten Filter-Detektorkombinationen oft nur näherungsweise erreicht werden können. Die sich ergebenden Fehler können zwar herauskalibriert werden, diese Kalibrierung hat aber nur dann Gültigkeit, wenn sich das zu messende Spektrum nicht zu stark von dem zur Kalibrierung verwendeten Spektrum unterscheidet. Aus historischen Gründen werden z.B. $V(\lambda)$ -Filter mit der Normlichtart A (Wolfram-Lampe bei einer Temperatur von 2850 K) angepasst. Das Maximum dieser Strahlung liegt im Infraroten. Bei der Wellenlänge 400 nm beträgt die spektrale Bestrahlungsstärke des Normlichts nur noch 8% vom Maximalwert. Dementsprechend ungenau kann die Anpassung des Filters im blauen Spektralbereich erfolgen, da das zur Anpassung verwendete Licht hier nur noch einen geringen Anteil aufweist. Soll nun aber eine Quelle vermessen werden, die einen hohen Blau-Anteil aufweist, so sind große Fehler zu erwarten. Bei der Vermessung von blauen LEDs sind z.B. Fehler von mehreren hundert Prozent keine Seltenheit. In diesem Fall ist man auf die Verwendung eines Spektralphotometers angewiesen. Auch das teilweise komplexe Spektrum von Plasmaquellen (z.B. beim Laserschweißen) erfordert eine spektral aufgelöste Bewertung, da typische UV-Bewertungsfilter hier ebenfalls Fehler in dieser Größe bewirken.

Zahlreiche Geräte verschiedener Hersteller sind am Markt verfügbar. Bei der Auswahl sollte man folgende Punkte beachten:

- Flexibilität: Das Messsystem sollte so ausgelegt sein, dass die eingesetzten Detektoren leicht gewechselt werden können. Hierbei sollte es auch möglich sein, auf einfache

Weise die Kalibrierfaktoren der eingesetzten Detektor/Filter/Einkoppeloptik-Kombination einzustellen.

- Dynamikbereich: Die typischen Beleuchtungsstärken können um bis zu 9 Größenordnungen variieren. Auch gute Detektoren liefern über diesen großen Bereich ein lineares Ausgangssignal. Das Messsystem sollte in der Lage sein, diesen gesamten Bereich abzudecken. Dabei sollte ein Messbereichswechsel möglichst automatisch erfolgen.
- Offset-Unterdrückung: In vielen Fällen muss gemessen werden, ohne dass der Einfluss von Umgebungslicht hinreichend ausgeschaltet werden kann. Hier ist es hilfreich, wenn ein konstanter (zuvor vermessener) Untergrundwert vom Messergebnis automatisch abgezogen werden kann.
- Mittelwertbildung: In der Praxis hat man es oft mit fluktuierenden Strahlungsquellen zu tun, möchte aber den zeitlichen Mittelwert bestimmen, da dieser z.B. häufig bei der Kontrolle der Einhaltung der zulässigen Bestrahlungsgrenzwerte am Arbeitsplatz bewertet werden muss. Hier ist eine einstellbare gleitende Mittelwertbildung hilfreich.
- Spitzenwertmessung: Zur Charakterisierung der Abstrahlung einer Quelle ist ebenfalls der Spitzenwert interessant. Bietet das Gerät eine „peak hold“-Funktion, so wird der während eines Messzyklus auftretende Spitzenwert gespeichert und kann nach der Messung abgerufen werden.

Abbildung 4 zeigt ein typisches Messgerät, das mit einer Vielzahl von Detektoren kombiniert werden kann.



Abb. 4: Typisches Radiometer [5]

Spektralradiometer

Ein Spektralradiometer besteht aus einem Gittermonochromator, der das eingekoppelte Licht spektral zerlegt und einem Radiometer, das das aus dem Monochromator ausgekoppelte monochromatische Licht misst. Auf diese Weise kann der gesamte Verlauf der spektralen Bestrahlungsstärke bestimmt werden. Evtl. notwendige Bewertungsfunktionen, wie z.B. die $V(\lambda)$ -Kurve oder die Gewichtungskurve für Blaulichtschädigung können sodann rechnerisch auf die Messdaten angewandt werden – ein anpassendes Filter ist bei diesem Verfahren nicht notwendig. Die bei Radiometern üblichen Fehler bei der Messung mit anpassenden Filtern (s.o.) treten bei Spektralradiometern also nicht auf.

Bei der Auswahl des Monochromators sind folgende Kriterien zu berücksichtigen:

- Spektrale Auflösung: Sie hängt von der Spaltbreite, der Brennweite und der Dispersion des Gitters ab und sollte ungefähr 3 nm betragen. Bei schlechterer spektraler Auflösung kann es z.B. bei schmalbandigen LEDs schon zu fehlerhaften Ergebnissen kommen.
- Wellenlängengenauigkeit: Sie sollte deutlich besser als ± 0.5 nm sein.
- Streulichtunterdrückung: Hier sind mindestens drei Größenordnungen notwendig, um insbesondere im UV-Bereich nicht falsche Signale durch gestreutes sichtbares Licht zu erhalten.
- Empfindlichkeit: Durch die spektrale Aufspaltung wird die Bestrahlungsstärke am Detektor stark reduziert. Daher sollten Detektoren von höchster Empfindlichkeit eingesetzt werden.
- Linearität: Sie ist ein wesentliches Merkmal für ein Spektralradiometer. Eine Änderung des eingekoppelten Strahlungsflusses muss zu einer proportionalen Änderung des Detektorausgangssignals führen. Bei Array-Spektrometern muss dies für alle einstellbaren Integrationszeiten des Detektors gelten.
- Dynamikbereich: Da in Spektren oftmals große Unterschiede zwischen den Maxima und den Bereichen dazwischen auftreten, ist ein Dynamikbereich von mindestens 50000 erforderlich. Dementsprechend gering sollte der Rauschanteil des Detektorsignals sein.

Es gibt zwei unterschiedliche Prinzipien, auf denen Spektralradiometer basieren. Scannende Spektralradiometer verwenden ein einzelnes Detektorelement und ein motorisch sich drehendes Gitter. Bei Array-Spektrometern steht hingegen das Gitter fest und eine Detektorzeile aus typischerweise 1024 Einzeldioden kommt zum Einsatz. Jede einzelne dieser Dioden entspricht dann einem bestimmten Spektralkanal, so dass das gesamte Spektrum simultan erfasst werden kann.

• Scannende Spektralradiometer

Die scannenden Geräte zeichnen sich durch höchste Genauigkeit und beste Streulichtunterdrückung aus. Allerdings kann die Messzeit für die Aufnahme eines kompletten Spektrums je nach Signalstärke in der Gegend von bis zu 10 s liegen. Sie eignen sich also nur bedingt zur Aufnahme des Spektrums fluktuierender oder nur kurzzeitig betreibbarer Quellen. Die gute Streulichtunterdrückung wird erreicht, da vor dem Detektor ein weiteres Blendensystem angeordnet werden kann. So kann eine Dynamik von bis zu 5 Größenordnungen erreicht werden. Scannende Spektralradiometer bieten einen breiten Spektralbereich bei guter Wellenlängengenauigkeit. Sie kommen vor allem als Referenzgerät für die Entwicklung und Kalibrierung zum Einsatz. Abbildung 5 zeigt den schematischen Aufbau eines typischen scannenden Spektralradiometers.

• Array-Spektralradiometer

Ein Array-Spektralradiometer ist in der Lage, deutlich schneller zu messen, da der gesamte Wellenlängenbereich simultan erfasst wird. Die kürzest möglichen Integrationszeiten liegen bei 10 ms, so dass auch stark fluktuierende Signale simultan spektral aufgelöst gemessen werden können. Für eine Erhöhung der Empfindlichkeit muss die Integrationszeit verlängert werden. Durch den fehlenden Austrittspalt ist der Dynamikbereich

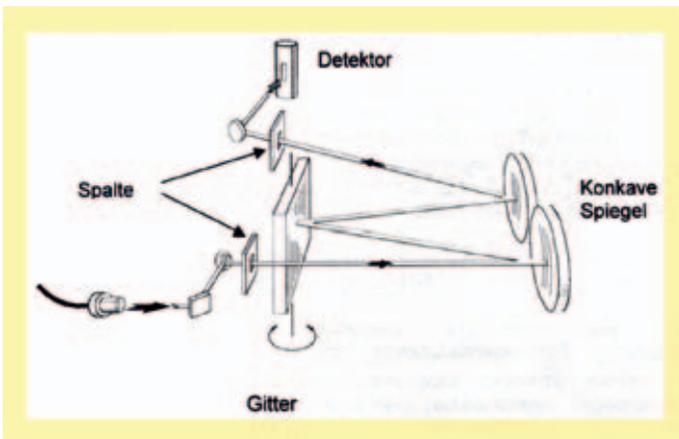


Abb. 5: Prinzipieller Aufbau eines scannenden Spektralradiometers [2]

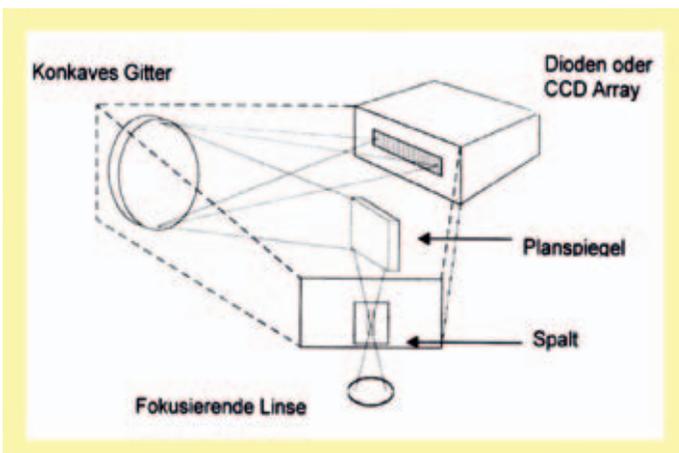


Abb. 6: Prinzipieller Aufbau eines Array-Spektralradiometers [2]

gegenüber einem scannenden Gerät um mindestens eine Größenordnung reduziert. Um eine im gesamten Spektrum gleichmäßige spektrale Auflösung (die bei wenigen Nanometern liegen kann) zu erzielen, ist es wichtig, dass die abbildende Optik bezüglich Bildfeldkrümmung und Astigmatismus sehr gut korrigiert ist. Haupteinsatzfeld der Array-Spektralradiometer ist die Routine-Messung, z.B. bei der Produktionskontrolle. Die Abbildung 6 zeigt den schematischen Aufbau eines solchen Geräts.

■ 3 Messung von Strahldichte und Leuchtdichte

Entsprechend ihrer Definition kann die Strahldichte L_e durch Messung der Strahlungsleistung P , die durch eine definierte Messblende der Fläche A fällt, in einem definierten Messabstand bestimmt werden. Dabei sollte man allerdings verhindern, dass den Detektor Strahlung erreicht, die aus der Umgebung kommt. Es ist also prinzipiell möglich, die Strahldichte innerhalb eines definierten Bereichs einer Quelle dadurch zu messen, dass man direkt vor der Quelle eine Messblende anordnet, die den Anteil der Fläche der Quelle definiert, für den die Strahldichte gemessen werden soll. Diese elementare Form der Strahldichtemessung liefert aber oftmals nur geringe Signalstärken. Daher hat es sich durchgesetzt, vor dem Detektor ein abbildendes optisches System einzusetzen, das die Quelle auf den Detektor abbildet. Der Anteil der Quelle, der vom Detektor erfasst wird, kann nun bequem mit Hilfe einer

Blende direkt vor dem Detektor definiert werden, so dass auch die Strahldichten unzugänglicher Quellen problemlos bestimmt werden können. Zur Berechnung der Bestrahlungsstärke darf nun aber nicht die gemessene Strahlungsleistung zur Detektorfläche in Relation gesetzt werden, vielmehr muss die Fläche der Eintrittspupille des Objektivs eingerechnet werden, denn die gesamte Strahlungsleistung, die von der Quelle ausgehend die Eintrittspupille trifft, wird auf den Detektor gebündelt. Abbildung 7 verdeutlicht den Messaufbau: Der wirksame Teil der Strahlerfläche ist hier kleiner als die Strahlerausdehnung und wird definiert durch die Feldblende am Ort des Detektors, den Messabstand und die Bildweite des abbildenden Systems. Die wirksame Empfangsfläche wird definiert durch eine Messblende (Aperturblende) direkt am Ort der Linse.

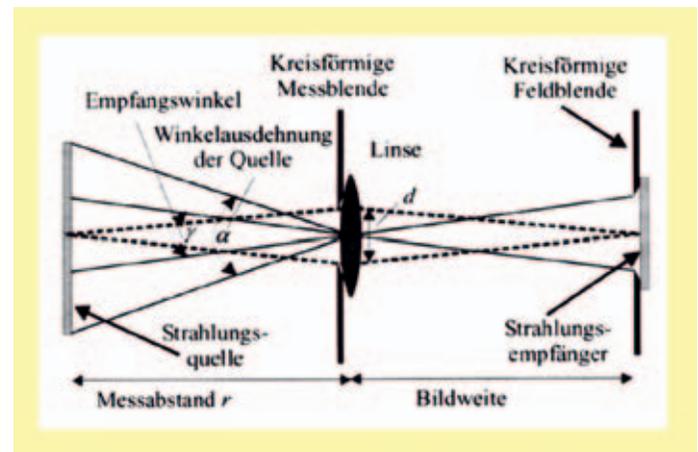


Abb. 7: Prinzipielle Messanordnung zur Bestimmung der Strahl- und Leuchtdichte [4]

In der Praxis verwendet man Radiometer, die unter Einbeziehung des Objektivs bereits für Strahldichtemessungen kalibriert sind. Die Anzeige erfolgt dann direkt in $W/(cm^2sr)$. Wenn zusätzlich ein anpassendes Filter eingesetzt wird, so ist auch eine Messung der Leuchtdichte möglich, die Anzeige kann dann bei geeigneter Kalibrierung direkt in cd/m^2 erfolgen. Auch eine spektral aufgelöste Messung mit Hilfe eines Spektralradiome-

Anzeige

IMPRESSION

- mikli macht Eindruck

Vertrieb + Service: Deutschland und Österreich
 Centre-Point GmbH Nicolaisstr. 8 65193 Wiesbaden
 Tel 0611-160 27 87 Fax 0611-160 27 88
 www.centre-point.de

ters mit geeignetem Messobjektiv ist möglich, so dass auch Leuchtdichten von Quellen bestimmt werden können, deren Spektrum stark von dem des Normlichts A abweicht.

■ 4 Einkoppeloptik

Bei der Auswahl einer geeigneten Einkoppeloptik für das Messsystem müssen die Größe der Quelle wie auch der beabsichtigte Empfangswinkel berücksichtigt werden. Soll z.B. der Erythem-wirksame Einfluss (Sonnenbrand) der Sonnenstrahlung bestimmt werden, so sollte nicht nur die Sonne als nahezu punktförmige Strahlungsquelle sondern auch das durch Streuung in der Atmosphäre hervorgerufene Himmelslicht berücksichtigt werden. Tageslicht ist somit eine Kombination aus Punktlicht und von einem Flächenstrahler ausgesandtem Licht. Die Haut ist ein relativ planer und diffuser Empfänger mit Cosinus-förmiger Richtungscharakteristik. Sie absorbiert Strahlung proportional zum Cosinus des Einfallswinkels. Ein Messsystem zur Bewertung der Sonnenbrandgefahr muss dem Rechnung tragen. Es sollte somit ebenfalls eine Cosinus-förmige Empfangscharakteristik aufweisen. Auch sollte nicht die maximal messbare Bestrahlungsstärke bewertet werden, die sich ergibt, wenn der Detektor direkt auf die Sonne ausgerichtet wird, sondern der Detektor sollte senkrecht zur Hautoberfläche messen – für eine am Strand liegende Person also zum Zenit weisen. Einige typische Einkoppeloptiken sind im folgenden kurz beschrieben.

• Cosinus-Diffusor

Eine offene Silizium-Planardiode hat eine nahezu perfekte Cosinus-Charakteristik, wie alle planen, diffusen Flächen. Sobald aber ein Filter davor gesetzt wird, wird die Charakteristik räumlich beschnitten. In solchen Fällen sollte ein Cosinus-Diffusor vor das Filter gesetzt werden. Eine Quarzscheibe mit aufgerauhter interner Halbkugelfläche eignet sich hierfür gut – auch im UV-Bereich. Teflon ist eine gute Alternative für den UV- und VIS-Bereich, ist aber kein guter Diffusor für infrarote Strahlung. Auch eine Ulbrichtkugel, die intern mit BaSO₄ oder PTFE beschichtet ist, ist ein sehr guter Cosinus-Diffusor, da die plane Eintrittsöffnung die räumliche Charakteristik definiert.

Abbildung 8 zeigt eine ideale Cosinus-förmige Charakteristik und eine Cosinus-Diffusor.

• Objektive zur Strahl- und Leuchtdichtemessung

Für die Messung der Strahldichte oder Leuchtdichte ist es erforderlich, die Strahlungsquelle auf den Detektor abzubilden. Hierzu werden in der Regel Objektive aus zwei optischen Gruppen eingesetzt. Hierdurch ergibt sich ein reduziertes Sehfeld des Messsystems. Das Sehfeld ist in der Regel kleiner als die Ausdehnung der zu vermessenden flächenhaften Strahlungsquelle. Zur Bewertung sehr kleiner Strahlungsquellen, wie z.B. LEDs, sind u.U. Mikroskopobjektive notwendig. Das in Abbildung 9 gezeigte Messobjektiv hat z.B. ein Sehfeld von 3°, sammelt aber die aus diesem kleinen Feld auftreffende Strahlung mit der gesamten Fläche der Frontlinse. Es ergibt sich somit ein größeres Signal, als wenn man durch ein Blenden-system die erforderliche Reduktion des Sehfelds erreicht hätte.

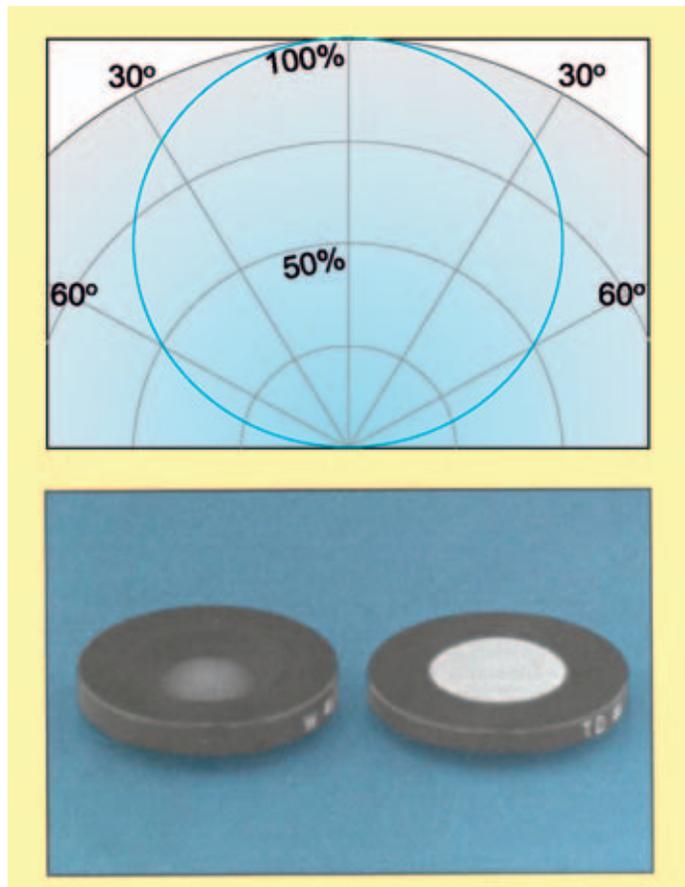


Abb. 8: Ideale Cosinus-förmige Empfängercharakteristik und Cosinus-Diffusor [6]

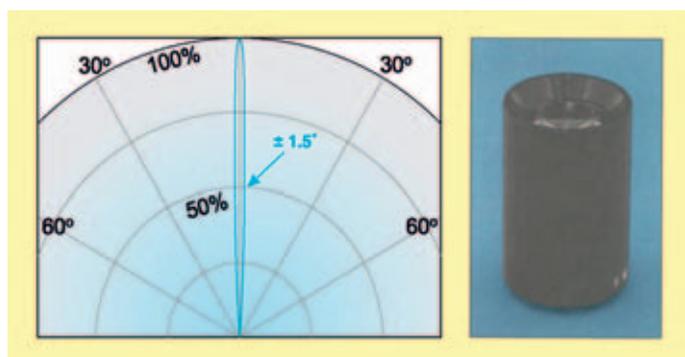


Abb. 9: Messobjektiv für Strahl- oder Leuchtdichte [6]

• Glasfaser

Eine Glasfaseroptik zur Einkopplung der optischen Strahlung in den Detektor wird immer dann eingesetzt, wenn der Messort räumlich schwer zugänglich ist oder wenn dort sehr hohe Temperaturen oder andere schädliche Umwelteinflüsse herrschen. Glasfasern bestehen aus einem Kern umgeben von einem Mantel mit niedrigerem Brechungsindex, so dass im Innern des Kerns an der Grenzfläche zum Mantel Totalreflexion auftritt, die Strahlung somit nicht in den Mantel übertreten kann. Glasfasern sind für den sichtbaren Spektralbereich geeignet. Soll Strahlung im UV-Bereich übertragen werden, so gelangen Quarzfasern zum Einsatz. Der Empfangswinkel einer typischen Faseroptik beträgt ca. $\pm 20^\circ$ im sichtbaren Spektralbereich und $\pm 10^\circ$ im ultravioletten Spektralbereich.

■ 5 Kalibrierung

Einige Messgeräte sind mit einer internen Kalibriermöglichkeit versehen, die es gestattet, die Anzeige des Gerätes von Zeit zu Zeit zu überprüfen. Andernfalls muss eine evtl. notwendig werdende Neukalibrierung meist durch den Hersteller des Gerätes erfolgen. Bei hohen Anforderungen an die Präzision ist in Deutschland die Kalibrierung durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig anzuraten. Hier kann eine Kalibrierung im Spektralbereich von 200 nm bis 10.6 μm durchgeführt werden. Sie ist vom Nanowattbereich (Nachrichtentechnik) bis in den Kilowattbereich (Laser zur Materialbearbeitung) möglich. Darüberhinaus gibt es von der PTB als Kalibrierstellen anerkannte Firmen, die Kalibrierungen mit vergleichbarer Messunsicherheit durchführen können [4].

Ein hochpräzise kalibriertes Gerät sollte nicht für Routinemessungen eingesetzt werden, sondern als Primärnormal unter Verschluss aufbewahrt werden. Dadurch verhindert man, dass sich die Daten des kalibrierten Geräts durch Umwelteinflüsse oder Überlastung unvorhersehbar ändern. Für den täglichen Betrieb sollte man stattdessen ein gleichartiges Gerät verwenden, dessen Kalibrierung als Sekundärnormal gegenüber der Kalibrierung dieses Primärnormals von Zeit zu Zeit überprüft werden muss.

DIN EN 61040 [7] sieht vor, dass für die Kalibrierung 50% der Empfängerfläche mit mindestens 63% des für das Gerät vorgesehenen Maximalwerts bestrahlt wird.

Messgeräte müssen kalibrierfähig sein, d.h. ihre Eigenschaften sollten über den geplanten Einsatzzeitraum so konstant sein, dass die Kalibrierwerte konstant bleiben. Folgende Anforderungen müssen gestellt werden [4]:

1. Zeitliche Konstanz: Die Empfindlichkeit muss über den geplanten Nutzungszeitraum konstant sein.
Zulässiger Fehler: 5%
2. Homogenität: Die Empfindlichkeit muss über die Empfängeroberfläche konstant sein. Zulässiger Fehler: 5%
3. Fading: Reversible Änderungen der Empfindlichkeit unter Dauerbestrahlung sollen nicht auftreten.
Zulässiger Fehler: 2%
4. Temperaturabhängigkeit: Die Empfindlichkeit darf sich nur wenig mit der Umgebungstemperatur ändern.
Zulässiger Fehler: 5%
5. Winkelabhängigkeit: Die Winkelabhängigkeit der Empfindlichkeit soll konstant sein. Zulässiger Fehler: 2%
6. Linearität: Die Empfindlichkeit soll nicht vom Wert der Strahlungsleistung abhängen. Zulässiger Fehler: 5%
7. Wellenlängenabhängigkeit: Die spektrale Empfindlichkeitskurve sollte konstant bleiben. Zulässiger Fehler: 2%
8. Polarisationsabhängigkeit: Die Empfindlichkeit sollte nicht von der Polarisationsrichtung des Lichtes abhängen.
Zulässiger Fehler: 2%
9. Zeitliche Mittelung: Bei der Messung der mittleren Leistung einer zeitlich gepulsten Quelle sollte der Messwert nicht von der Impulsfolgefrequenz abhängen.
Zulässiger Fehler: 5%
10. Nullpunktstabilität: Die Drift des Nullpunktes in einem Messzeitraum sollte nicht größer als 5% betragen.
11. Kalibrierunsicherheit: Die Kalibrierunsicherheit sollte nicht größer als 10% sein.

Wenn alle diese Forderungen erfüllt sind, dann ist die Genauigkeitsklasse 20 erreicht. Darüberhinaus gibt es noch höhere Genauigkeitsklassen, die in Tabelle 1 definiert sind.

Klasse	Summe der Absolutbeträge der Einzelmessunsicherheiten	Mittlere quadratische Unsicherheit
1	2%	0,8%
2	4%	1,6%
5	10%	4%
10	20%	8%
20	Entspricht den Mindestanforderungen	

Tab. 1: Gesamtmessunsicherheit in den einzelnen Genauigkeitsklassen [4]

Für die Kalibrierung von Spektralradiometern werden kalibrierte Normlampen eingesetzt, die man von der PTB oder von akkreditierten Kalibrierstellen beziehen kann.

■ 6 Graphische Darstellung der Messergebnisse

Je nach Art der Messung (und des Messergebnisses) sind unterschiedliche graphische Darstellungsformen gebräuchlich, die im folgenden kurz vorgestellt werden sollen:

• Kontinuierliches Spektrum mit starken Einzellinien

Entladungslampen emittieren oftmals ein kontinuierliches Spektrum, das von starken Linienemissionen überlagert ist. Eine einheitliche lineare Darstellung ist hier nicht angebracht, da das im Vergleich zu den Linien meist recht schwache Spektrum dann nicht mehr hinreichend erkennbar ist. Hier ist eine Darstellung mit zwei y-Achsen hilfreich. Das Spektrum wird als spektrale Bestrahlungsstärke, die Linien als Bestrahlungsstärke dargestellt, wie in der Abbildung 10 gezeigt.

• Polardiagramm für räumliche Charakteristik

Die beste und anschaulichste Möglichkeit der Darstellung einer räumlichen Abstrahl- oder Empfangscharakteristik ist das Polardiagramm. Es hat den Vorteil, dass z.B. eine Cosinus-Cha-

Anzeige



mikliStudio

EXPRESSION
- mikli schafft Persönlichkeit

Vertrieb + Service: Deutschland und Österreich
Centre-Point GmbH Nicolaistr. 8 65193 Wiesbaden
Tel 0611-160 27 87 Fax 0611-160 27 88
www.centre-point.de

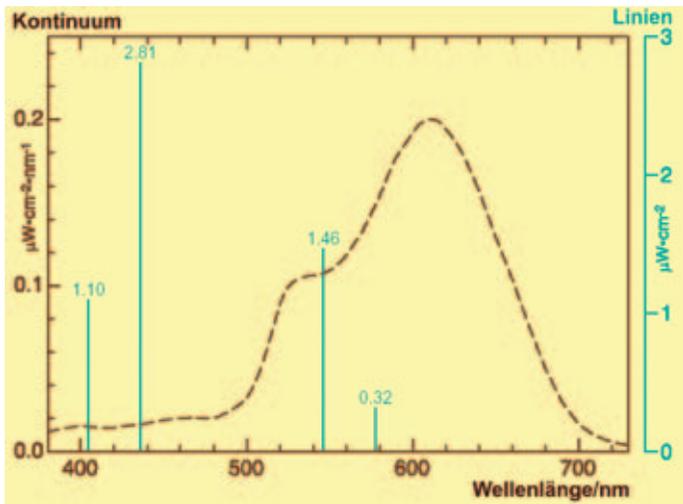


Abb. 10: Lineare Darstellung eines Spektrums mit zwei y-Achsen [6]

rakteristik direkt als ein Kreis erkannt werden kann, so dass Abweichungen hiervon leicht gesehen werden können. Abbildung 11 zeigt drei verschiedene Empfangscharakteristiken für ein winkelunabhängiges Laser-Leistungsmessgerät, für ein Bestrahlungsstärkemessgerät mit Cosinus-Charakteristik und für ein Strahllichte-Messgerät mit ausgeprägter Richtcharakteristik.

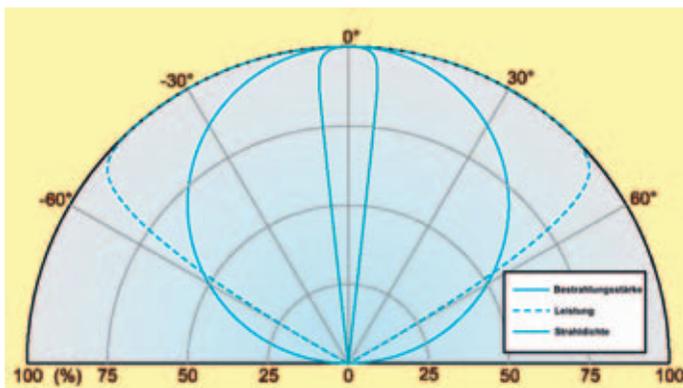


Abb. 11: Polardiagramm der Richtungsabhängigkeit dreier Messgeräte [6]

• **Kartesisches Diagramm für räumliche Charakteristik**

Auch kartesische Diagramme sind zur Darstellung einer räumlichen Charakteristik gebräuchlich (Excel kann leider keine Polardiagramme erstellen). Abbildung 12 zeigt die gleichen Kurven wie Abbildung 11. Man kann die Richtungsunabhängigkeit des Leistungsmessgerätes und die Richtcharakteristik des Strahllichtemessgerätes gut erkennen. Ob das Bestrahlungsstärkemessgerät aber wirklich eine Cosinus-förmige Charakteristik hat, lässt sich nicht gut beurteilen. Es ist in diesem Fall zu empfehlen, die ideale Cosinus-Charakteristik mit einzuzuzeichnen, um einen Vergleich zu ermöglichen.

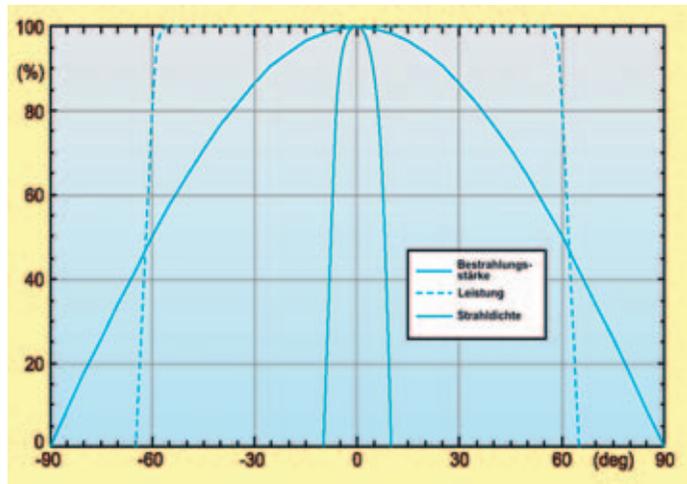


Abb. 12: Lineardiagramm der Richtungsabhängigkeit dreier Messgeräte [6]

• **Logarithmisch skaliertes Spektrum**

Bei der logarithmischen Darstellung eines Spektrum können sehr kleine und sehr große Werte gleichzeitig mit gleicher relativer Genauigkeit eingezeichnet werden. Prozentuale Unterschiede entsprechen unabhängig von der Größe des eingezeichneten Wertes gleichen Abständen in y-Richtung. Ein Nachteil der Darstellungsform ist allerdings die scheinbare Kompression der Messwerte am oberen Ende, so dass Bandbreiten leicht überschätzt werden können. Abbildung 13 zeigt eine logarithmische Darstellung der Empfindlichkeitskurven

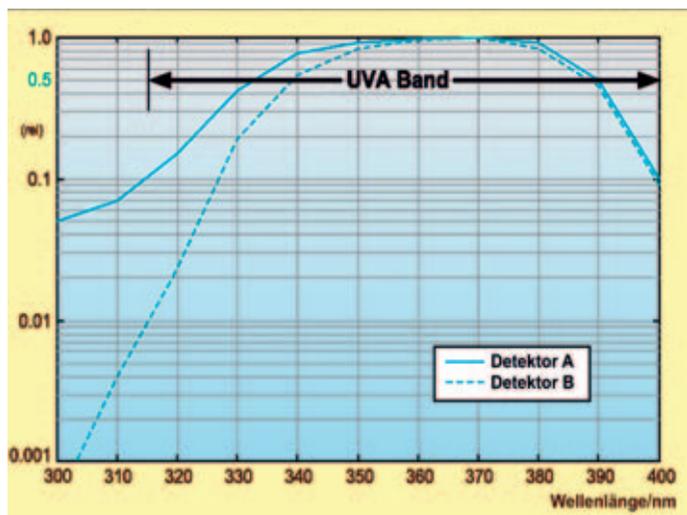


Abb. 13: Logarithmisches Diagramm der Empfindlichkeitskurve zweier Detektoren [6]

Sie möchten sich weiterbilden?
Unsere Fachbücher sind die Lösung!

Schauen Sie bei uns mal rein:
www.doz-verlag.de



Tel: +49(0)62 21-90 51 70,
 Fax: +49(0)62 21- 90 51 71

zweier Detektoren. Man erkennt deutlich, dass unterhalb von 340 nm die prozentuale Abweichung zwischen beiden Kurven sehr groß wird.

• Linear skaliertes Spektrum

Das linear skalierte Spektrum in Abbildung 14 zeigt die gleichen Empfindlichkeitskurven wie die Abbildung 13. Man erkennt hier nicht auf den ersten Blick, dass die Abweichung unter 340 nm groß wird. Dies ist ein Nachteil dieser Darstellungsform. Andererseits kann man hier die Bandbreite der beiden Detektoren leichter ablesen. Es ist daher empfehlenswert, vergleichende Darstellungen der Bandbreite in dieser Form aufzutragen.

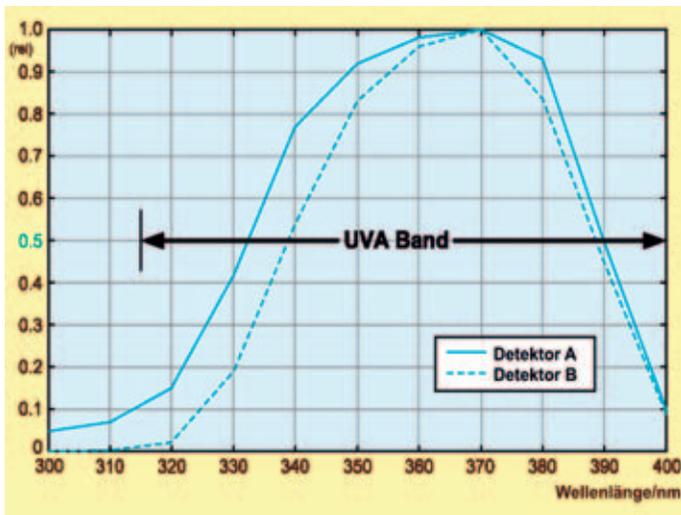


Abb. 14: Lineares Diagramm der Empfindlichkeitskurve zweier Detektoren [6]

Anschrift des Autors:
Prof. Dr. Jürgen Nolting,
Hochschule Aalen,
Studiengang Augenoptik,
Gartenstr. 135,
73430 Aalen

7. Literaturverzeichnis

- [1] J. Nolting: „Grundprinzipien der Messung radiometrischer und photometrischer Größen“, Skript Nr. 2 zum Lehrgang 30041/41.796 „Optische Messtechnik“, Technische Akademie Esslingen, Esslingen (2006)
- [2] Th. Nägele, R. Distl: „Handbuch der LED-Messtechnik“, Firmenschrift Instrument Systems, München (1999)
- [3] Firmeninformation Optronic Laboratories: „OLL IS-670-LED Integrating Sphere“, Optronic Laboratories, Orlando (2002)
- [4] E. Sutter: „Schutz vor optischer Strahlung“, VDE Verlag, Berlin (2002)
- [5] Firmenschrift International Light: „Light Measurement Instruments Catalog“, International Light, Newburyport (2001)
- [6] A. Ryer: „Light Measurement Handbook“, International Light Inc., Newburyport (1997)
<http://www.intl-light.com/ildocs/handbook.pdf> (2004)
- [7] DIN EN 61040 (VDE0835): „Empfänger, Messgeräte und Anlagen zur Messung von Leistung und Energie von Laserstrahlen“, Ausgabe 1993-08



Optics in Nature – Optische Naturerscheinungen

Carsten Kreß · Jürgen Nolting

Mit diesem Buch möchten wir Ihnen einige interessante optische Erscheinungen, die in die Kategorie Photometeore fallen, in Bild und Text näher bringen. Doch was sind eigentlich Photometeore? In die Rubrik der Photometeore fallen alle Lichterscheinungen, die durch Spiegelung, Brechung, Beugung oder Interferenz des Sonnen- oder Mondlichtes hervorgerufen werden.

76 Seiten mit 71 Abbildungen, größtenteils farbig.

€ 19,90

inklusive ges. MwSt., zzgl. Porto und Verpackung
 ISBN 3-922269-57-5

DOZ
 VERLAG

Postfach 12 02 01
 69065 Heidelberg
 Tel: +49(0)62 21-90 51 70
 Fax: +49(0)62 21- 90 51 71
www.doz-verlag.de

Anzeige

EXPLOSION

- mikli bringt Umsatz

Vertrieb + Service: Deutschland und Österreich
 Centre-Point GmbH Nicolaisstr. 8 65193 Wiesbaden
 Tel 0611-160 27 87 Fax 0611-160 27 88
www.centre-point.de