

Wie viel Licht gelangt wohin?

Goniophotometer finden in vielen Branchen Anwendung – vom Leuchten-Hersteller bis zum Raumfahrt-Spezialisten.

Alexandra Lachner und Jürgen P. Weißhaar

Die Anfänge der Goniophotometrie liegen über 200 Jahre zurück, als die Kristallographie untersuchte, wie Licht im Kristall gebrochen wird. Bei dieser ersten Anwendung wurde ein Objektiv um den Kristall bewegt, um herauszufinden, wie viel Licht wohin gelangt.

Thomas Alva Edison hatte 1888 die Glühlampe zum Patent ange-

meldet, sodass die Vermessung von Lichtquellen und Leuchten an Bedeutung gewann. In den 1920er-Jahren erfassten die ersten Goniophotometer die Lichtausbreitung. Während sich Messgrößen wie die Länge eines Objekts linear erfassen lassen, breitet sich Licht in alle Richtungen aus. Die detaillierte Erfassung des Lichtstärkeverteilungskörpers ist denkbar komplex. Dabei gibt es verschiedene Möglichkeiten, im Fernfeld zu messen – also mit einem Detektor, der in ausreichender Entfernung zum Prüfling platziert wird. Entweder bewegt sich der Detektor um die Lichtquelle oder der Detektor ist fest, und die Lichtquelle bewegt sich um ihre Achse bzw. um ihren Lichtschwerpunkt. Alternativ werden mehrere gleich kalibrierte Detektoren (z. B. ein Kreis- oder C-Bogen) gebaut, die sich um eine feststehende Lichtquelle bewegen. Das erfordert allerdings einen hohen Aufwand und ein großes Budget.

Die Fernfeld-Goniophotometrie dient bis heute zur Vermessung von Leuchten. Um die Beleuchtung von Straßen, Büros oder Sporthallen zu planen, gelten die Standardformate IES, Eulumdat oder CEN. Außerdem lassen sich verschiedene Normvorgaben

im Fernfeld prüfen, zum Beispiel für die Flughafenbefehung (ICA, FAA), für Signalleuchten (DIN EN 12368), für die Allgemeinbeleuchtung (DIN 13032-x) oder für Fahrzeugleuchten und Scheinwerfer (ECE, SAE). Für die Simulation und Entwicklung der Optiken erstellen Nahfeldmessungen, welche die ortsaufgelöste Emission rund um die Lichtquelle erfassen, detaillierte Strahlendaten.

Welcher Typ sind Sie?

Herkömmliche Goniophotometer unterscheiden sich in der Art, wie die einzelnen Drehachsen zueinander gesetzt sind, sowie durch die Drehung des Prüflings im Raum. Zur Messung von Kfz-Leuchten, Scheinwerfern und Signalleuchten dienen beispielsweise Goniophotometer vom Typ 1.1 (**Abb. 1**). Sie besitzen eine feste horizontale Achse (= Zenitachse) und eine bewegliche vertikale Achse (= Azimutachse). Goniophotometer vom Typ 1.3 verfügen über eine feste vertikale Achse (Zenitachse) und eine bewegliche Achse (Azimutachse). Sie kommen vor allem bei der Messung von Leuchten der Allgemeinbeleuchtung zum Einsatz. Bei Goniophotometern vom Typ 3.1 rotiert ein Spiegel um eine ortsfeste horizontale Achse; eine weitere horizontale Achse dreht sich gegenläufig zur ersten. Somit bleibt der Prüfling – meist aus der Allgemeinbeleuchtung – immer in seiner Gebrauchslage. Für LED-Leuchten sind keine Spiegel-Goniophotometer nötig, was den hohen Investitions- und Platzbedarf reduziert.



Goniophotometer vom Typ robogonio eignen sich zur flexiblen photometrischen Vermessung von Leuchten und Lichtquellen in verschiedenen Koordinatensystemen.

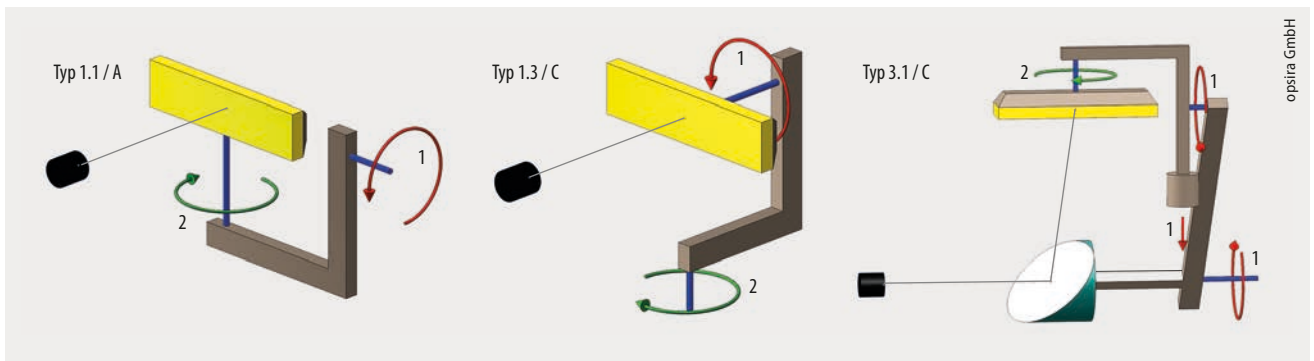


Abb. 1 Herkömmliche Goniophotometer unterscheiden sich in der Art, wie die einzelnen Drehachsen zueinander gesetzt sind, sowie durch die Art, wie der Prüfling im Raum gedreht wird. Häufig verwendet werden Goniophotometer vom Typ 1.1/A und 1.3/C.

Fern- und Nahfeld

Goniophotometer finden seit einigen Jahrzehnten auch verstärkt Anwendung im Nahfeld. Messungen im Fernfeld sehen vor, dass der Detektor – typischerweise ein Photometer – ausreichend entfernt zum Prüfling platziert ist. Die Entfernung beträgt in guter Näherung für eine breit strahlende Leuchte das 10-Fache der Leuchtengröße: Für eine zwei Meter lange Leuchte ergeben sich 20 Meter – und der entsprechende Platzbedarf für die Messung. Die Ortsausdehnung des Prüflings hält den geometrischen Fehler der Lichtstärkemessung möglichst klein: In der Fernfeldbetrachtung wird er zur Punktlichtquelle. Strahlt das Prüfobjekt enger, vergrößert sich die notwendige Messdistanz stark.

Solche klassischen Fernfeldmessungen liefern zu wenige Informationen für ein rechnergestütztes Optikdesign. Dazu gilt es, die orts aufgelöste Emission rund um die Lichtquelle im Nahfeld zu vermessen. So lassen sich detaillierte Strahlendaten erstellen, die in der Optiks simulation zu sehr realitätsnahen Ergebnissen führen. Ein Beispiel stellt die Messung einer LED aus sehr vielen verschiedenen Winkeln mit einer Leuchtdichtemesskamera dar. Die vielen Einzelmessungen beschreiben die Emission der Lichtquelle im Orts- und Winkelraum hochaufgelöst.

Das Aufbereiten dieser Daten führt zu hochaufgelösten Strahlendaten für alle gängigen Simulationsprogramme und für ein professionelles Optikdesign. Die Fernfeldinformation leitet sich daraus ebenfalls ab. Um allein das Fernfeld zu erhalten, ist die Nahfeldgoniophotometrie zu umständlich, zeitaufwändig und lediglich ein indirektes Verfahren mit höheren Messungsgenauigkeiten. Das direkte Messen des Fernfelds ist dann vorzuziehen.

Die nächste Generation

Die jüngsten Mitglieder in der Goniophotometer-Familie arbeiten robotergestützt und realisieren alle Koordinatensysteme sowohl für Scheinwerfer und Signalleuchten (Typ 1.1) als auch für Allgemeinleuchten (Typ 1.3) in einem Gerät. Grundsätzlich neu ist der Einsatz eines Industrieroboters, der

die Rotations- und Translationsbewegungen ausführt. Viele der aktuell gültigen Normen beinhalten für die Vermessung von LED-Systemen bereits die Vorgabe, die Leuchte aus ihrer Gravitationslage herauszubewegen, was Messungen mit robotergestützten Goniophotometern normkonform macht.

Neben dem Einsatz im Fernfeld zur Vermessung von Lichtquellen und Leuchten am Ende der Produktentwicklung können robotergestützte Modelle auch deren Beginn unterstützen, da sie Strahlendaten im Nahfeld als Grundlage für das Optikdesign erzeugen können.

Härtetests für Leuchten

Hersteller wie LED Linear (Neukirchen-Vluyn, Nordrhein-Westfalen) verfügen über Lichtlabore, die nach DIN ISO/IEC 17025 akkreditiert sind, um alle notwendigen Messungen für eigene und externe Ent-

Alles auch in Farbe

Spektrale Effekte von Lichtquellen sind in **polychromatischen Strahlendaten** darstellbar. Die Kamera erhält dafür verschiedene Farbfilter, bei der Vermessung einer Weiß-LED beispielsweise blau und gelb. So lassen sich das bläuliche Licht in der Mitte sowie die winkelabhängigen, gelblichen Anteile der LED (Color-over-Angle) messen. Pro Filter braucht es zwei Messungen für die gewünschten Strahlendaten. Bei der polychromatischen Messung muss jeder Filter entsprechend oft genutzt werden, sodass am Ende bis zu zehn Strahlendatensätze vorliegen. Die Simulation der Optik hilft dann, Farb- und Farbwiedergabewerte, Homogenität und die Reduktion von Farbändern wie OP- und Zahnarztleuchten zu optimieren.

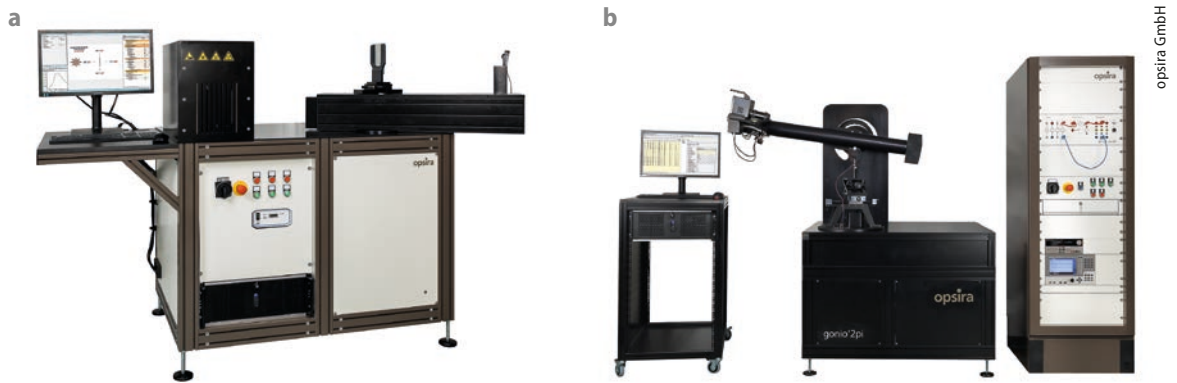


Abb. 2 Mit In-plane-Streulichtgoniophotometrie vom Typ gonio'0pi (a) lassen sich isotrope Streumaterialien vermessen. 3D-Streulichtgoniophotometer vom Typ gonio'2pi (b) dienen dazu, Streumaterialien in Reflexion und Transmission zu vermessen und per Nahfeldgoniophotometrie an Lichtquellen Strahlendaten zu erzeugen.

wicklungen durchzuführen. Auch ein robotergestütztes Goniophotometer gehört zum Equipment, da es schnell vielfältige und präzise Messergebnisse liefert. Dazu benötigt es lediglich einen langen, schmalen Raum, an dessen Ende der Detektor die Messergebnisse aufzeichnet.

Konkret ist das robotergestützte Goniophotometer bei LED Linear für die Ermittlung der Lichtverteilungskurve bis $\Gamma = 120^\circ$, des Lichtstroms sowie winkelabhängiger, farbortspezifischer Werte zuständig. Die photometrischen Ergebnisse liegen als IES- bzw. EULUMDAT-Daten vor. Selbst Coffee Spots kann das robotergestützte Goniophotometer beseitigen: In Kombination mit einem Spektralmesskopf lassen sich ungewünschte Effekte in Farbspektrum und -temperatur quantifizieren und ein Gut-/Schlecht-Abgleich durchführen. Dabei ist es das Ziel, trotz immer kleinerer Leuchtenabmessungen eine homogene Lichtverteilung zu erzielen. In der Optik-Entwicklung sind Computer-Simulationen häufig deutlich treffsicherer, wenn konkrete Werte vorliegen. Da dies in Zukunft noch mehr an Bedeutung gewinnen wird, ist es wichtig, Labore jetzt schon auf diesen Trend auszulegen.

Besonderes Anwendungsfeld

Mit der Goniophotometrie lassen sich nicht nur aktive Lichtquellen vermessen, sondern auch passive Materialien. Dann handelt es sich um die Streulicht-Goniophotometrie oder auch BSDF-Messtechnik (Bidirectional Scattering Distribution Function, **Abb. 2**). Sie befasst sich mit der Frage, was mit dem Licht dort geschieht, wo es auf das Material trifft. Dieses verhält sich in der Regel einfallswinkelabhängig.

Handelt es sich um Milchglas, diffuse Kunststoffe oder auch technische Volumenstreuer wie diffusil®, so wird das Licht nicht nur an der Oberfläche, sondern hauptsächlich im Material gestreut. Es tritt punktuell ein, streut und verteilt

sich je nach Materialdicke mehr und mehr im Volumen. Dann tritt es durch eine größere Fläche wieder aus – mit einer Verteilung, die von der Stärke und den spezifischen Volumenstreuparametern des Materials abhängt. Pro Anwendung gilt es also, das jeweils beste Material mit der optimalen Stärke zu ermitteln.

Bei anisotropen Materialien ändert sich die Streuung mit der Materialausrichtung in Bezug auf die Lichteinfallrichtung um die Probenormale. Vier Goniophotometerachsen garantieren die vollständige Messung der Streuphänomene. Je eine Achse bildet den Lichteinfallswinkel auf die Probe ab sowie die Messung um die Probe (in plane), die Messung ober-/unterhalb der Ebene (out-of-plane) und die

Schnell, präzise – und indirekt

Als Alternative zur Goniophotometrie kommt vereinzelt ein **kamerabasiertes Verfahren** infrage. Dann beleuchtet die Lichtquelle – oder meist eine Leuchte – eine weiße Messwand mit definierten Reflexionseigenschaften. Die zusammen mit der Messwand auf Beleuchtungsstärke kalibrierte Messkamera nimmt ein Bild auf und liefert in Sekunden ein hochaufgelöstes Bild der Beleuchtungsstärke oder auch der Lichtstärkeverteilung. Vorteile sind die hohe Orts- oder Winkelauflösung ($0,01^\circ$ oder besser) und die Dichte der Messwerte. Die Größe der Messwand schränkt jedoch den Gesamtmessbereich im Winkel ein. Durch Drehen der Leuchte, also den Einsatz einer goniometrischen Komponente, und die Aufnahme weiterer Bilder, die zusammenmontiert werden (Stitching), lassen sich umfangreiche Daten für die Leuchte generieren. Dies ist beispielsweise bei Flughafenbefeuerungsleuchten zur schnellen und hochaufgelösten Messung gängige Praxis.

Drehung um die Proben-Normale zur Messung von anisotropen Streuern. Leistungsstarke Detektoren decken die meist sehr große Dynamik in der Streulicht-Goniophotometrie ab, die typischerweise im Bereich von 10^{10} bis 10^{12} liegt. Daneben ist eine sehr hohe Empfindlichkeit der Detektoren gefragt, da weit entfernt vom Glanzpeak oft nur sehr geringe Streulichtstärken vorliegen.

Verschiedene Branchen nutzen die Analyse von Volumenstreuparametern. In der Entwicklung von MEMS (Micro Electronic Mechanical Systems) geht es darum, die Farbtemperatur von Displays an diejenige der Umgebung (Tages- oder Kerzenlicht) anzupassen. Im Automotive-Bereich steht die Entwicklung des Innenraumdesigns im Fokus, da moderne Fahrzeuge viel Licht im Interieur nutzen und volumenstreuende Materialien für eine weiche, angenehme Optik sorgen.

Goniophotometrie in Summe

Als Messergebnis liefern Goniophotometer den Lichtstärkeverteilungskörper oder Strahlendaten, wobei je nach Anwendung die Winkelgenauigkeit des Goniophotometers, die Güte des Photometers und die benötigte Messzeit über den Kauf entscheiden. Wird eine Leuchte im Halbraum vermessen, erledigt dies ein leistungsstarkes Goniophotometer in etwa zwei Minuten. Ist eine hochauflösende Messung mit 0,01 Grad Winkelauflösung gewünscht, dauert dies auch mehrere Stunden.

Bei der Streulicht-Goniophotometrie wiederum sind die winkelabhängigen Veränderungen der Streulichtstärken sehr groß, sodass sehr viele Messungen mit hoher Winkelauflösung nötig sind. In Bezug auf die Winkelauflösung erfordert die Allgemeinbeleuchtung

generell Werte zwischen 1 und 0,1 Grad, während die präzise Vermessung von Autoscheinwerfern mit Hell-Dunkel-Grenze 0,1 bis zu 0,01 Grad braucht.

Je nach Bedarf sollte das gewählte Goniophotometer die erforderliche Winkelgenauigkeit in einer sinnvollen Zeit liefern. Empfehlenswert ist es, den Einsatz eines robotergestützten Modells zu prüfen: Messungen im Fernfeld sind in allen Koordinatensystemen durchführbar ebenso im Nahfeld mit hoher Präzision – das garantiert eine hohe Flexibilität in der Anwendung.

Die Autor:innen

Alexandra Lachner, Text & Konzept – auf den Punkt, und **Jürgen P. Weißhaar**, Geschäftsführer, opsira GmbH, Leibnizstraße 20, 88250 Weingarten, www.opsira.de

PFEIFFER  **VACUUM**



ASM 306 S

Helium- und Wasserstoff-Schnüffellecksucher für den einfachen und präzisen 24-Stunden-Einsatz

- Vielseitigkeit dank Prüfmöglichkeiten mit Helium und Wasserstoff
- Hohe Empfindlichkeit (10^{-7} mbar l/s) für präzise und fehlerfreie Messungen
- Schnelle Dichtheitsprüfung und einfache Regenerierung bei Verschmutzung
- Robuste Schnüffelsonde mit hohem Gasdurchsatz und verschiedenen Schlauchlängen
- Geringer Wartungsaufwand

Wir treiben nachhaltige Lösungen voran.

Sie suchen eine perfekte Vakuumlösung? Sprechen Sie uns an:

Pfeiffer Vacuum GmbH · Germany · T +49 6441 802-0 · www.pfeiffer-vacuum.com