

WIR BRINGEN QUALITÄT ANS LICHT.

Handbuch der LED-Messtechnik



LED-Meßtechnik

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	2
2. Begriffe und Definitionen in der Lichtmeßtechnik	3
2.1. Radiometrische Größen	3
2.2. Photometrische Größen	5
2.3. Farbmatrik	6
3. Grundeigenschaften von LEDs	8
3.1. Die Gehäusebauform	8
3.2. Elektrische Eigenschaften und Umgebungsbedingungen	9
4. Optische Kenngrößen von LEDs	12
4.1. Abstrahlcharakteristik	12
4.2. Lichtstärke und Strahlstärke	14
4.3. Lichtstrom und Strahlungsleistung	16
4.4. Wellenlänge, Farbe und Spektrum	19
5. Anforderungen an optische Meßgeräte	22
5.1. Vergleich Photometer und Spektralradiometer	22
5.2. Anforderungen an ein Spektralradiometer	24
5.3. Kalibrierung	27
6. Diskussion von Meßbeispielen mit Fehleranalyse	29
6.1. Auswirkungen der Meßdynamik	29
6.2. Einfluß von Streulicht bei weißen LEDs	32
6.3. Einfluß des Bandpasses (Spektralaufösung)	35
6.4. Äußere Einflüsse	37
6.5. Messanforderungen in der Produktion	38
7. Zusammenfassung	40
8. Literaturhinweise	42

1. Einleitung

Die atemberaubenden Entwicklungen bei LEDs in den vergangenen Jahren haben zu einem bedeutenden Wachstumsmarkt mit völlig neuen Anwendungen geführt. Vollfarben-Displays wurden erst durch die lichtstarken blauen LEDs möglich und weiße LEDs finden Einzug in die Beleuchtungstechnik sowie in die Automobilindustrie. Damit verbunden ist ein zunehmender Bedarf an einer optischen Charakterisierung von LEDs, da deren lichttechnische Eigenschaften maßgebend für die Produktqualität sind.

Wer sich mit der Meßtechnik von LEDs beschäftigt, wird feststellen, daß sehr spezifische Kenntnisse erforderlich sind, um genaue und reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. In dieser Broschüre werden die besonderen Eigenschaften von LEDs diskutiert und daraus Empfehlungen für korrekte Messungen abgeleitet. Sie soll Lesern, die sich neu mit dieser Thematik befassen, als Leitfaden für die LED-Meßtechnik dienen sowie versierten Anwendern als Nachschlagewerk zur Verfügung stehen.

Zunächst wird eine kurze Einführung in die Grundbegriffe und Definitionen der Lichtmeßtechnik sowie in die spezifischen physikalischen Eigenschaften von LEDs gegeben. In weiteren Kapiteln werden daraus resultierende Anforderungen für den Testaufbau und für die korrekte Durchführung der Messungen beschrieben. Mögliche Fehlerursachen, die aus dem Zusammenspiel der Beschaffenheit von LEDs auf der einen und den Eigenschaften von Meßgeräten auf der anderen Seite entstehen, werden ebenfalls diskutiert.

Wer wenig Zeit hat kann nur die Zusammenfassung am Ende der Broschüre lesen, um sich später gezielt in den einzelnen Kapiteln zu informieren. Für ein umfassendes Verständnis der Zusammenhänge ist die gesamte Lektüre zu empfehlen.

Die CIE¹ (Internationale Beleuchtungskommission) hat bisher als einzige international anerkannte Organisation Richtlinien für die Meßtechnik von LEDs verfaßt. Das Dokument CIE 127 mit dem Titel „LED Measurements“ erschien in 1997 und dient als wissenschaftliche Grundlage für diese Applikationsbroschüre.

¹ Die CIE hat die bekannten Farbdiagramme xy und $u'v'$ definiert.

2. Begriffe und Definitionen in der Lichtmeßtechnik

Die für die LED-Meßtechnik relevanten optischen Größen sind durch die Radiometrie und Photometrie definiert. In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick über wichtige Grundbegriffe gegeben, die zum weiteren Verständnis für eine korrekte Anwendung von Meßgeräten erforderlich sind. Zunächst unterscheidet man zwischen radiometrischen Größen, die die physikalischen Strahlungseigenschaften beschreiben, und photometrischen Größen, die die Wirkung auf das menschliche Auge berücksichtigen.

2.1 Radiometrische Größen

In der Radiometrie wird die Energie bzw. die Leistung von optischer Strahlung bei einer gegebenen Ausbreitungsgeometrie betrachtet. Das Spektrum umfaßt den gesamten Bereich von UV bis Infrarot und ist damit unabhängig von der Helligkeits- und Farbempfindung des menschlichen Auges.

Die vier wichtigsten radiometrischen Größen sind:

Strahlungsleistung

Als Strahlungsleistung Φ_e bezeichnet man die von einer Lichtquelle in den ganzen Raum abgestrahlte Energie dQ_e pro Zeiteinheit dt (siehe Abbildung 1). Die Einheit der Strahlungsleistung ist Watt [W].

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$$

Strahlstärke

Die Strahlstärke I_e ist definiert als die in einem Raumwinkel $d\Omega$ abgestrahlte Strahlungsleistung $d\Phi_e$ (siehe Abbildung 1). Die Einheit ist Watt pro steradian [W/sr].

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$$

Ein Detektor mit einer aktiven Fläche A in einer Entfernung r von einer Lichtquelle mißt die Strahlungsleistung $d\Phi_e$. Diese Anordnung setzt voraus, daß es sich um eine Punktlichtquelle handelt, bzw. das Abstands-Quadrat-

Gesetz erfüllt ist. Die Entfernung r und die Detektorfläche dA definieren hierbei den Raumwinkel $d\Omega$.

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2}$$

Bestrahlungsstärke

Die Bestrahlungsstärke E_e erhält man aus dem Quotienten der Strahlungsleistung $d\Phi_e$ und der Detektorfläche dA . Die Einheit ist somit Watt pro Quadratmeter [W/m^2].

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$$

Aus den obigen Formeln für die Strahlstärke I_e ergibt sich folgende Beziehung zwischen Strahlstärke I_e und Bestrahlungsstärke E_e für eine punktförmige Lichtquelle.

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} = \frac{I_e d\Omega}{dA} = \frac{I_e}{r^2}$$

Strahldichte

Die Strahldichte L_e wird bei ausgedehnten, d.h. nicht-punktförmigen Lichtquellen gemessen und ist definiert als Strahlungsleistung $d\Phi_e$, die von einer Oberfläche dA_e in einen Raumwinkel $d\Omega$ emittiert wird. Die Einheit ist Watt pro steradian pro Quadratcentimeter [$W/sr\ cm^2$]:

$$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{dA_e d\Omega}$$

2.2 Photometrische Größen

Bei der Photometrie findet eine Bewertung der radiometrischen Größe, die eine Funktion der Wellenlänge λ ist, mit der sogenannten $V(\lambda)$ -Kurve statt. Diese beschreibt die Empfindlichkeit des menschlichen Auges im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm. So erhält man beispielsweise aus der Strahlungsleistung $\Phi_e(\lambda)$ den photometrischen Wert Lichtstrom aus der Integration:

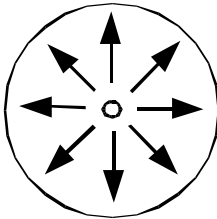
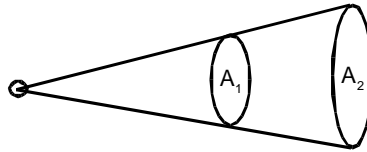
$$\Phi_v = K_m \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda$$

Die Einheit des Lichtstroms Φ_v ist Lumen [lm]. Der Faktor $K_m = 683 \text{ lm/W}$ stellt die Beziehung zwischen der (physikalischen) radiometrischen Größe Watt und der (physiologischen) photometrischen Größe Lumen her. Alle weiteren photometrischen Größen erhält man ebenfalls aus dem Integral ihrer korrespondierenden radiometrischen Größe gewichtet mit der $V(\lambda)$ -Kurve.

In der untenstehenden Tabelle sind alle radiometrischen und photometrischen Größen zusammengefaßt.

Radiometrie		Einheit
Strahlungsleistung	Φ_e	W
Strahlstärke	I_e	W/sr
Bestrahlungsstärke	E_e	W/m ²
Strahldichte	L_e	W/m ² sr
Photometrie		Einheit
Lichtstrom	Φ_v	lm
Lichtstärke	I_v	lm/sr = cd
Beleuchtungsstärke	E_v	lm/m ² = lx
Leuchtdichte	L_v	cd/m ²

Tabelle 1: gibt einen Überblick über die vier radiometrischen bzw. photometrischen Größen und ihre Einheiten.

Strahlungsleistung bzw.
LichtstromStrahlstärke bzw.
Lichtstärke**Abbildung 1:** Veranschaulicht die Definition von Lichtstrom und Lichtstärke

2.3 Farbmeterik

Die Farbmeßtechnik bezieht sich auf die menschliche Wahrnehmung von Farbe und Helligkeit. Die für das Farbempfinden des menschlichen Auges entwickelte Farbmeterik befaßt sich mit der qualitativen und quantitativen Beschreibung von Farbe. Die CIE Tristimulus Farbmeterik ist das meist benutzte System zur Farbbestimmung und basiert auf der Annahme, daß jede Farbe eine Kombination von den drei Grundfarben rot, grün und blau ist [1]. 1931 etablierte die CIE das Tristimulus-System X,Y,Z. Die Tristimuluswerte X,Y,Z werden dabei aus der Integration der spektralen Strahlungsverteilung $S(\lambda)$ und den drei Augenempfindlichkeitskurven $x(\lambda)$, $y(\lambda)$ und $z(\lambda)$ im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm gewonnen (siehe Abbildung 2, links). Aus den Tristimuluswerten werden schließlich die bekannten Farbkoordinaten x , y und z abgeleitet. Dieser Farbraum ist in Abbildung 2 (rechter Teil) zu sehen. Darüber hinaus gibt es weitere Farbräume, z.B. u' v' oder L^* , a^* , b^* , die durch Transformation aus den x,y,z Werten errechnet werden.

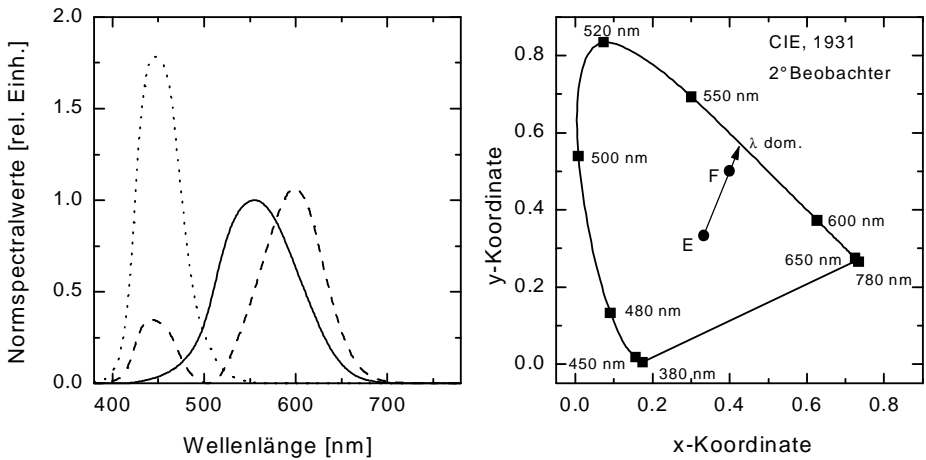


Abbildung 2: linker Teil: Die Tristimulusfunktionen $x(\lambda)$ (gestrichelt), $y(\lambda)$ (durchgezogen) und $z(\lambda)$ (gepunktet). Rechter Teil: CIE Farbdigramm von 1931 für 2°Beobachter

3. Grundeigenschaften von LEDs

In diesem Kapitel wird auf die grundlegenden physikalischen Eigenschaften von LEDs eingegangen, die zum Teil einen signifikanten Einfluß auf die optischen Messungen haben.

3.1 Die Gehäusebauform

Die Strahlung von LEDs wird von einem Halbleiterchip erzeugt, der in einem Gehäuse montiert ist. LEDs sind mittlerweile in den verschiedensten Bauformen und Typen erhältlich (siehe Abbildung 3), die einen wesentlichen Einfluß auf die Abstrahlcharakteristik der LED besitzen. Teilweise werden Linsen, Spiegel oder Diffusoren in das Gehäuse eingebaut, um eine bestimmte Abstrahlform zu erreichen. Fertigungstoleranzen bei der Herstellung des LED-Gehäuses können ebenfalls einen Einfluß haben, beispielsweise können mechanische und optische Achse nicht übereinstimmen (siehe Abbildung 3 unten).

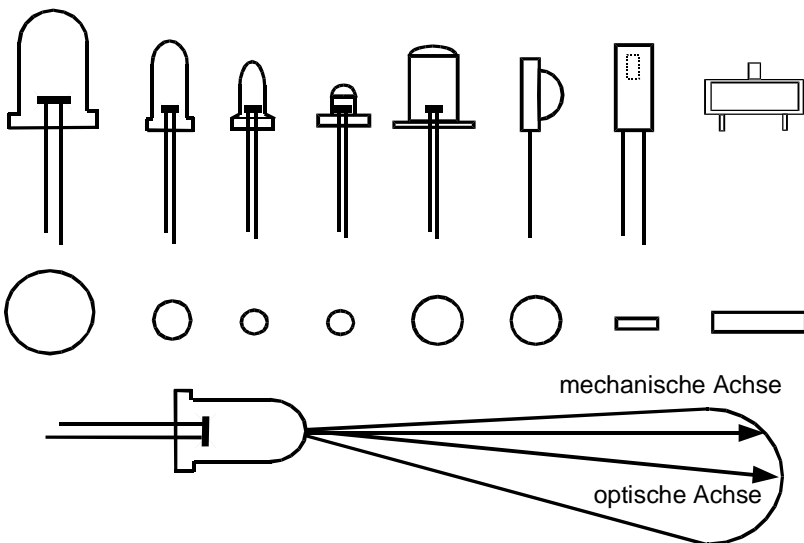


Abbildung 3: im oberen Teil sind verschiedene Bauformen von LEDs gezeigt, im unteren Teil eine schiefwinkelige LED.

Für eine exakte Lichtstärkemessung ist deshalb ein reproduzierbarer Testaufbau eine wichtige Voraussetzung, um zu gewährleisten, daß der Detektor immer den gleichen Ausschnitt aus der Strahlungskeule sieht. In Abbildung 4 ist eine Präzisions-Testfassung von Instrument Systems für 5 mm LEDs gezeigt. Die drei Klammern fassen das Gehäuse der LED immer an derselben Stelle und ermöglichen so eine für alle LEDs mit dieser Gehäuseform gleiche Ausrichtung der mechanischen Achse. Damit ist auch die CIE-Empfehlung berücksichtigt, nicht die optische sondern die mechanische Achse der LED als Bezugsachse für Messungen zu benutzen [2].

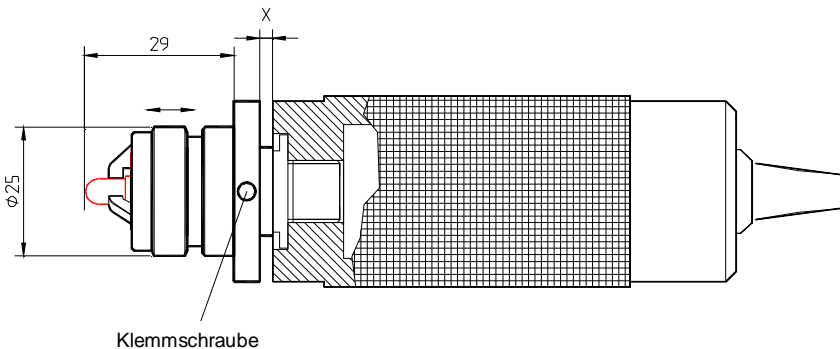


Abbildung 4: zeigt eine Präzisions-Testfassung von Instrument Systems für 5 mm LEDs.

3.2 Elektrische Eigenschaften und Umgebungsbedingungen

LEDs werden normalerweise in Vorwärtsspannung bei einem konstanten Strom I_F , der mit einer bestimmten Spannung U_f verknüpft ist, betrieben. Die Vorwärtsspannung $U_f(I_F, T_F)$ ist eine Funktion der Temperatur T_F und des Stromes I_F . Ein typischer Temperaturkoeffizient für die Vorwärtsspannung bei konstantem Strom beträgt ca. $-1,5$ bis $-2,5$ mV/K. Somit ist bei höheren Temperaturen und konstantem Strom die gemessene Vorwärtsspannung niedriger. Wegen der im LED-Chip verbrauchten elektrischen Leistung steigt die Temperatur an und stabilisiert sich nach einer gewissen Zeit auf einen Temperaturwert $T_c > T_{\text{Umgebung}}$ (bei einer Umgebungstemperatur von ca. 25°). Erst wenn eine konstante Vorwärtsspannung erreicht ist, ist auch die verbrauchte elektrische Leistung und damit die abgegebene Lichtleistung stabil.

Abbildung 5 zeigt die Stabilisierung einer weißen LED. Dazu wurde direkt nach der Bestromung der LED alle 10 Sekunden eine Lichtstärkemessung durchgeführt und die entsprechende Vorwärtsspannung aufgenommen, bis sich ein konstanter Wert eingestellt hat. Die Stabilisierung dauert bis zu einer Minute, was allerdings ein extremes Beispiel darstellt und bei weißen LEDs sicher von den Eigenschaften des Phosphors mit beeinflusst wird. Sobald im Chip das thermische Gleichgewicht erreicht wird, ist der Wert T_c vom Wärmeaustausch zur Umgebung bestimmt, der hauptsächlich über die elektrischen Kontakte stattfindet.

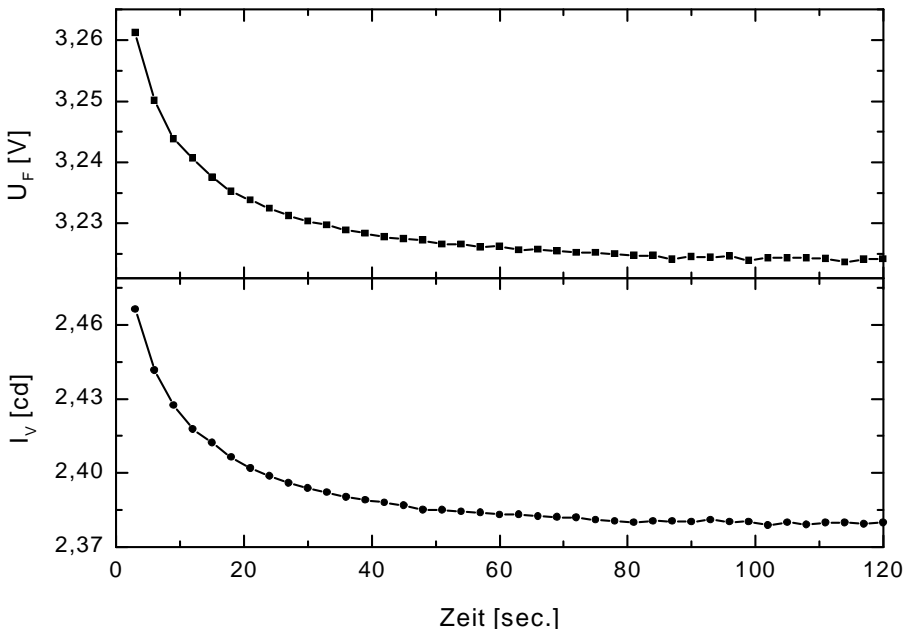


Abbildung 5: zeigt die Stabilisierung einer weißen LED. An der x-Achse ist die Zeit [sec.] und an der y-Achse die Lichtstärke I_V [cd] bzw. die Vorwärtsspannung U_F [V] aufgetragen.

Steigt die Temperatur an so verschiebt sich die gesamte spektrale Verteilung in Richtung längere Wellenlängen (außer für blaue LEDs). Die Verschiebung der Peakwellenlänge beträgt typischerweise ca. 0,1 bis 0,3 nm/K. Im Lichtstärkewert wird dieser Effekt bei grünen LEDs kaum wahrnehmbar sein, da sich deren Peakwellenlänge im Maximum der $V(\lambda)$ -Kurve befindet. Bei roten und blauen LEDs, deren Peakwellenlänge in den Flanken der $V(\lambda)$ -

Kurve sitzt, können sich allerdings signifikante Änderungen ergeben (siehe Abbildung 12). Deshalb muß sowohl der Strom als auch die Temperatur der LED stabilisiert sein, wenn man immer gleiche spektrale Eigenschaften erreichen möchte.

Werden LEDs mit veränderlichem Strom betrieben, führt die Strommodulation zu einer Temperaturfluktuation. Dadurch entspricht die mittlere Strahlungsleistung nicht der Strahlungsleistung unter Konstantstrombedingungen. Für gepulste LEDs ergibt sich eine ähnliche Problematik: Die LED wird von einem hohen Strom durchflossen, der periodisch an- und ausgeschaltet wird. Trotz vergleichbarem Leistungsverbrauch zwischen Multiplex-Betrieb und Konstantstrom-Betrieb können sich Unterschiede im Lichtstärkewert ergeben.

4. Optische Kenngrößen von LEDs

4.1 Abstrahlcharakteristik

Die Vielzahl der Gehäusebauformen und Typen führen zu sehr unterschiedlichen Abstrahlcharakteristiken. Für bestimmte Anwendungen ist eine genaue Kenntnis der winkelabhängigen Strahlungsverteilung notwendig. Ein Vollfarb-Display kann unter senkrechter Beobachtung weiß erscheinen, wenn alle drei Farben gleich hell leuchten. Haben jedoch die LEDs eine unterschiedliche Strahlungskeule für die einzelnen Farbanteile (rot, grün, blau), tritt ab einem bestimmten Beobachtungswinkel eine Farbveränderung auf.

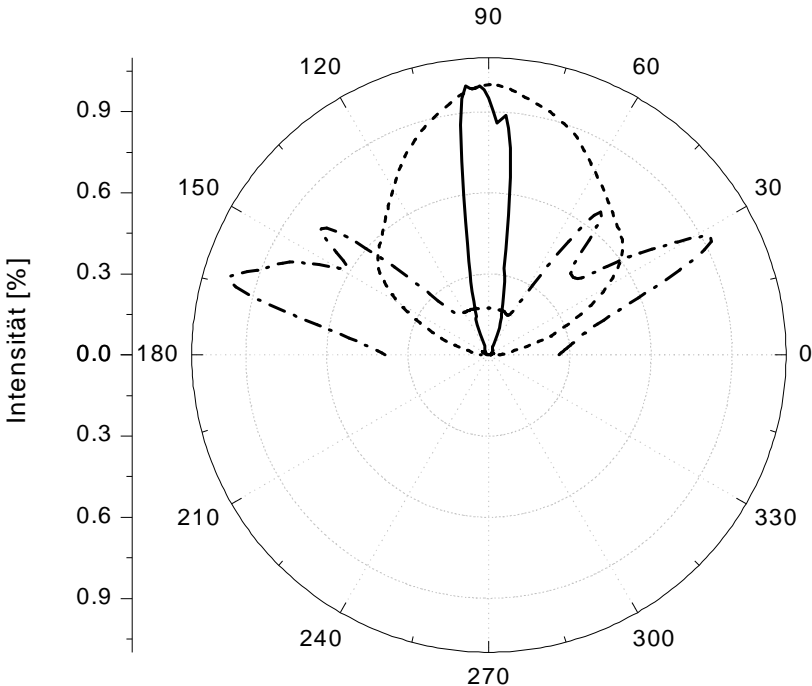


Abbildung 6: zeigt drei sehr unterschiedliche räumliche Strahlungsverteilungen von LEDs

In Abbildung 6 sind drei typische Abstrahlkeulen von LEDs für unterschiedliche Anwendungen dargestellt: eine diffuse LED mit nahezu Lambertischer Verteilung (gepunktete Linie), eine engwinklige, gerichtete LED (durchgezogene Linie) und eine LED mit zwei Intensitätsmaxima unter 30° und 150° (Argus-LED, gestrichelte Linie), die speziell für die Hintergrundbeleuchtung von Displays entwickelt wurde.

Mit einem Goniophotometer ist es möglich, die Abstrahlkeule einer LED zu bestimmen. Hierzu wird die LED um ihre Spitze gedreht und dabei die Intensität gemessen, d.h. der Winkel ϑ wird abgetastet. Man erhält so einen Schnitt der Abstrahlkeule in einer Ebene. Um die gesamte räumliche Verteilung der Strahlungskeule zu erfassen, kann die LED zusätzlich um ihre mechanische Achse rotiert werden; dies entspricht im sphärischen Koordinatensystem dem Winkel φ .

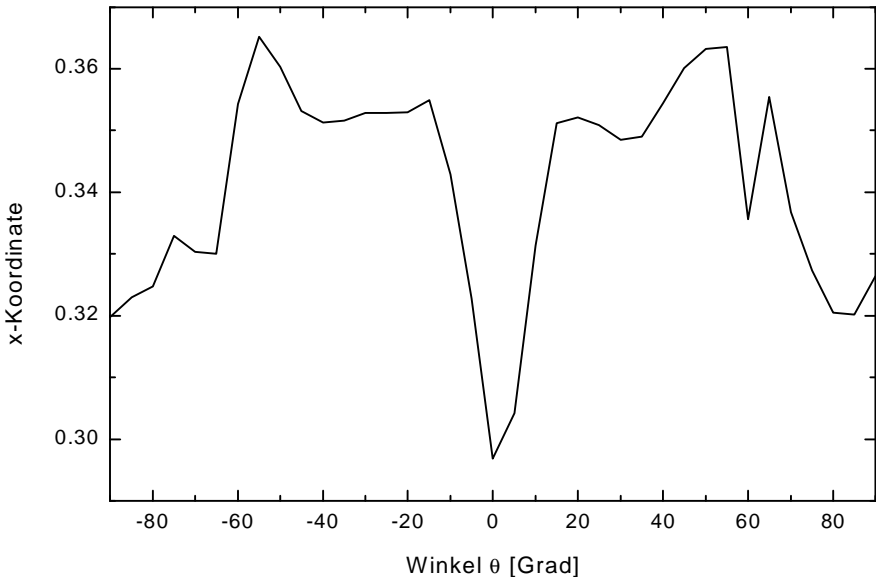


Abbildung 7: zeigt die x-Farbkoordinate einer weißen LED in Abhängigkeit vom Betrachtungswinkel. Bei 0° und an den äußeren Rändern sieht man eine deutliche Blauverschiebung.

Mit dem LED-Goniospektralradiometer (siehe Abbildung 10) von Instrument Systems kann sowohl ein einzelner Schnitt als auch die räumliche

Abstrahlkeule bestimmt werden. Als Detektor dient ein Diffusor mit einem Glasfaserbündelanschluß für ein Spektralradiometer. Der Vorteil eines Goniospektralradiometers besteht darin, daß mit einer Messung alle relevanten Informationen wie photometrischer Wert, Farbkoordinaten, dominante Wellenlänge, Farbtemperatur usw. simultan bestimmt werden. Winkelabhängige Farbmeßwerte sind beispielsweise für die Charakterisierung von weißen LEDs interessant, die bei senkrechtem Betrachtungswinkel und unter $\pm 80^\circ$ eine erhebliche Blauverschiebung in den Farbkoordinaten aufweisen (siehe Abbildung 7).

Bei der Messung von Lambertischen Strahlungsverteilungen kann ein Abstand des Detektors von 10 - 20 cm sinnvoll sein. Sollen feine Strukturen von sehr engwinkligen LEDs aufgelöst werden, empfiehlt es sich, den Detektor in 30 - 50 cm Entfernung zu positionieren und eine Aperturbegrenzung am Detektor vorzunehmen. Für typische engwinklige LEDs mit einer Halbwertsbreite von 2° sind Schrittwerten von $0,1^\circ$ für die Winkelabtastung erforderlich.

4.2 Lichtstärke und Strahlstärke

Am häufigsten wird die Lichtstärke von LEDs gemessen. Allerdings setzt das Konzept der Strahl- und Lichtstärkemessung die Annahme einer Punktlichtquelle voraus. Eine Methode, die Lichtstärke I_v zu bestimmen, besteht darin, den Detektor in Beleuchtungsstärke E_v zu kalibrieren und über das Abstandsquadratgesetz $I_v = E_v r^2$ die Lichtstärke zu berechnen. Die Genauigkeit dieser Berechnung hat zwei Bedingungen zur Grundlage:

- Zum einen muß der Abstand r vom Detektor zur LED exakt bestimmt werden. Aufgrund der Vielzahl an verschiedenen Bauformen ist es oft schwierig, die genaue Lage des Emissionszentrums (auch goniometrischer Schwerpunkt genannt) der LED zu bestimmen.
- Zum anderen muß der Abstand zwischen Detektor und LED groß gegenüber der räumlichen Ausdehnung der Lichtquelle sein (Fernfeld-Bedingung). Viele LEDs haben eine relativ große emittierende Fläche im Vergleich zu dem kurzen Abstand, der meistens bei einer Messung verwendet wird. In diesem Fall ist die Annahme einer Punktlichtquelle nicht mehr gegeben. Das Abstandsquadratgesetz ist nicht mehr erfüllt und die gemessene Bestrahlungsstärke am Detektor hängt sehr kritisch von der genauen Meßgeometrie ab.

“Averaged LED intensity” Konzept

Die CIE hat zur Lösung dieses Problems bei "Nahfeld-Bedingungen" das "Averaged LED Intensity" Konzept entwickelt [2]. Dieses Konzept entspricht nicht mehr der physikalisch exakten Definition der Lichtstärke sondern vielmehr einer Teillichtstrommessung bei einem festgelegten Abstand. Dazu wird ein runder Detektor mit einer aktiven Fläche von 1 cm^2 verwendet und die LED so positioniert, daß deren mechanische Achse genau eine Linie mit dem Detektormittelpunkt bildet und die Detektorfläche senkrecht zu dieser Achse liegt.

Für den Abstand der LED zur Detektorfläche gibt die CIE zwei Empfehlungen (siehe Tabelle 2). Es wird dabei immer die vordere Spitze der LED als Bezugspunkt für den Abstand herangezogen. Somit ist gewährleistet, daß unabhängig von der Bauform der LED bei Lichtstärkemessungen in verschiedenen Laboratorien immer die gleiche Geometrie verwendet wird.

CIE Empfehlung	Abstand LED-Spitze zu Detektor	Raumwinkel
Bedingung A	316 mm	0,001 sr
Bedingung B	100 mm	0,01 sr

Tabelle 2: Die CIE Empfehlungen für das "Averaged LED Intensity" Konzept. Die Fläche des verwendeten Detektors beträgt immer 1 cm^2 , aus dem Abstand der LED-Spitze zum Detektor ergibt sich der jeweilige Raumwinkel.

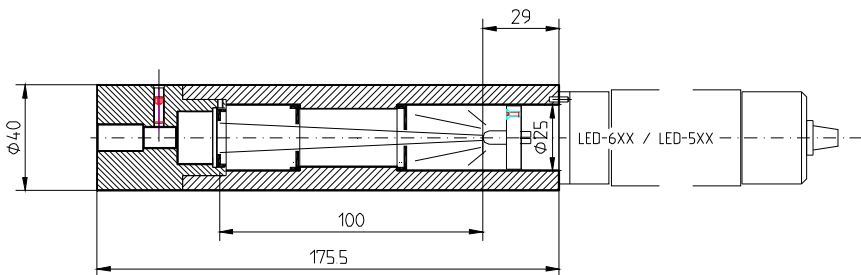


Abbildung 8: zeigt den LED-Meßadapter LED-430, der die gängige CIE-Bedingung B für 100 mm Abstand erfüllt.

Wie die Realisierung dieser Vorschrift in der Praxis aussehen kann, ist in Abbildung 8 zu sehen. Die von Instrument Systems entwickelte Ein-

koppeloptik LED 430 besteht aus einem Tubus passender Länge, in dem eine LED-Testfassung hineingesteckt werden kann. Der Abstand von der Spitze der LED zum Detektor, der in diesem Fall ein Diffusor ist, beträgt exakt 100 mm. Zwei Blenden im Strahlengang gewährleisten, daß kein Streulicht die Messung beeinflussen kann. Die Verbindung der LED-Einkoppeloptik zum Spektralradiometer wird über ein Glasfaserbündel erreicht, dessen Strahlungseintrittsseite hinter dem Diffusor angeordnet ist.

Dieser Aufbau hat sich in der Praxis am besten bewährt und ist auch für lichtschwache LEDs geeignet. Bei lichtstarken LEDs, die einen sehr engen Abstrahlwinkel aufweisen, sollte eine Einkoppeloptik gemäß der Bedingung A verwendet werden, wie z.B. der LED-440.

4.3 Lichtstrom und Strahlungsleistung

Zur Messung der Gesamtstrahlungsleistung bzw. des Lichtstroms stehen zwei prinzipielle Methoden zur Verfügung: Die Ulbricht-Kugel als Strahlungsintegrator oder das Goniophotometer. Beide Meßprinzipien werden nachstehend erläutert.

Die Ulbricht-Kugel

Bei der Ulbricht-Kugel handelt es sich um eine Hohlkugel, deren innere Fläche mit einem möglichst perfekt diffus reflektierenden Material beschichtet ist. In Abbildung 9 ist ein Schnitt durch eine Ulbricht-Kugel für Lichtstrommessungen gezeigt. Sie besitzt je eine Öffnung für die LED und für einen Detektor, der vor direkter Bestrahlung durch eine Blende geschützt wird.

Die Beschichtung der Kugel sorgt dafür, daß der eingekoppelte Strahlungsfluß Φ , der auf ein Flächenelement ΔA im Kugellinneren trifft, so reflektiert wird, daß die Strahl- bzw. Leuchtdichte in allen Richtungen gleich ist. Unter einem bestimmten Winkel strahlt das Flächenelement ΔA auch nach $\Delta A'$ und erzeugt dort eine indirekte Bestrahlungsstärke E_{ind} , die unabhängig von der relativen Lage von ΔA zu $\Delta A'$ ist [3]. Damit ist die indirekte Bestrahlungsstärke E_{ind} schon nach einer Reflektion auf der gesamten Kugeloberfläche gleich. An einem bestimmten Flächenelement $\Delta A'$ innerhalb der Kugel ergibt sich eine Bestrahlungsstärke E , die sich aus der Integration der indirekten Bestrahlungsstärke E_{ind} über die gesamte Kugelfläche errechnet. Unter Berücksichtigung der Vielfachreflexionen ist diese Bestrahlungsstärke E proportional zur gesamten eingekoppelten Lichtleistung Φ und wird von einem Detektor gemessen.

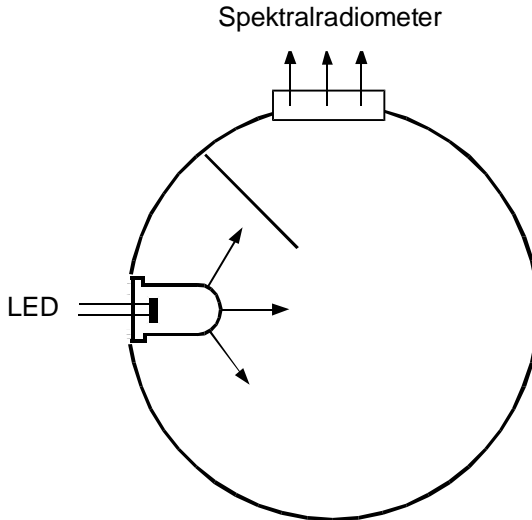


Abbildung 9: zeigt einen Schnitt durch eine Ulbricht-Kugel. Seitlich ist die Öffnung für LEDs, unter 90° befindet sich der Detektor.

Die beschriebenen Zusammenhänge gelten nur dann, wenn die Kugelinnenfläche eine Lambertsche Charakteristik mit konstanten spektralen Eigenschaften aufweist, der Detektor eine perfekte Kosinuskorrektur hat und sich keine absorbierenden Flächen in der Kugel befinden [3, 4]. Es gibt aber etliche Fehlerquellen unter realen Meßbedingungen. Eine perfekt diffus reflektierende Struktur mit einem konstanten Reflexionsgrad über die gesamte Kugelwand ist nicht herstellbar. Spektrale Abhängigkeiten der Beschichtung und die Größe der Meß- und Beobachtungsöffnungen sind weitere Fehlerquellen.

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Abstrahlcharakteristiken von LEDs kann es gegenüber der Kalibrierung zu Fehlern bei der Lichtstrommessung kommen. Bei diffus strahlenden Bauteilen können Genauigkeiten von +/- 5% erreicht werden, bei engwinkligen LEDs sind Abweichungen über 10 % möglich. Für die Lichtstrommessung an LEDs hat sich als Kugeldurchmesser 80 und 150 mm etabliert. Die genannten Meßfehler werden mit der größeren Kugel kleiner gehalten, da dort das Verhältnis der Kugeloberfläche zur Größe der Öffnungen und der LED günstiger ist. Allerdings ist dieser Vorteil mit einem Intensitätsverlust verbunden.

Noch offen ist, wo genau die LED für eine Messung positioniert werden sollte. Die aktuellen Diskussionen in der CIE zielen darauf, den gesamten Körper

der LED bis zum Beginn der Kontakte in der Ulbrichtkugel zu positionieren (siehe Abbildung 9). Diese Anordnung wird als 2π Lichtstrommessung bezeichnet und kommt am besten der tatsächlichen Verwendung der LED nahe (z.B. als Hintergrundbeleuchtung).

Das Goniophotometer

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des Lichtstroms bzw. der Strahlungsleistung bietet das Goniophotometer. Am besten stellt man sich die LED von einer fiktiven Kugel umhüllt vor. Auf der Kugeloberfläche bewegt sich in bestimmten Bahnen ein kosinuskorrigierter Detektor im Abstand r des Kugelradius. Mit Hilfe des Detektors wird die Bestrahlungsstärke E , die durch den partiellen Strahlungsfluß $d\Phi$ auf der Detektorfläche dA hervorgerufen wird, in Abhängigkeit von ϑ und φ bestimmt.

$$E(\vartheta, \varphi) = \frac{d\Phi}{dA}$$

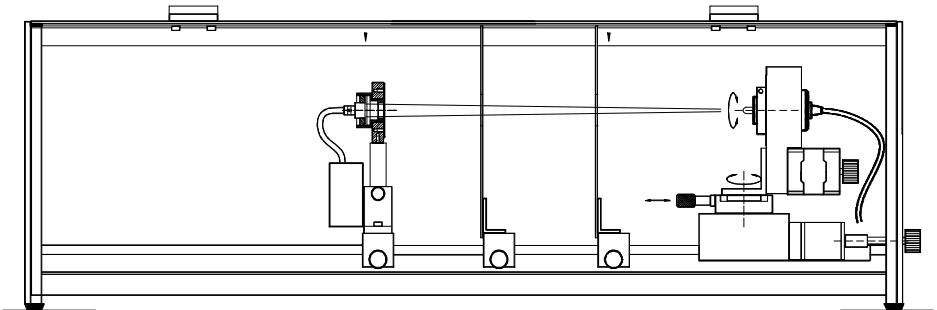


Abbildung 10: zeigt das LED-Goniophotometer von Instrument Systems, bei dem anstelle des Detektors die LED bewegt wird.

Zur Bestimmung der Gesamtstrahlungsleistung wird der Detektor schrittweise um den Winkel ϑ verdreht. Für jeden Winkel ϑ werden mehrere Messungen bei verschiedenen Winkeln φ von 0° bis 360° aufgenommen. Es werden jeweils einzelne Zonen, die einem konstanten Breitengrad des Globus entsprechen, abgetastet. Die Gesamtstrahlungsleistung Φ ergibt sich aus dem Integral:

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

Anstatt den Detektor zu bewegen, was einen großen mechanischen Aufwand erfordert, ist es ebenso möglich, nur die LED um ihre Spitze zu drehen. Messungen bei der PTB haben gezeigt, daß es keinen Unterschied macht, ob der Detektor oder die LED bewegt wird [6]. Der Abstand zwischen LED und Detektor sollte ca. 30 cm betragen. Eine Meßfläche von 1 cm² ist bei diffusen Bauteilen empfehlenswert, bei engwinkligen LEDs sollte die aktive Fläche verkleinert werden. In Abbildung 10 ist der Aufbau eines solchen LED-Goniophotometers gezeigt. Durch eine Drehung der LED um ihre mechanische Achse wird der φ -Winkel verändert und durch eine Drehung um ihre Spitze der ϑ -Winkel. Der Detektor sitzt auf einem optischen Reiter, um so den Abstand zur LED den Meßanforderungen anpassen zu können.

4.4 Wellenlänge und Spektrum

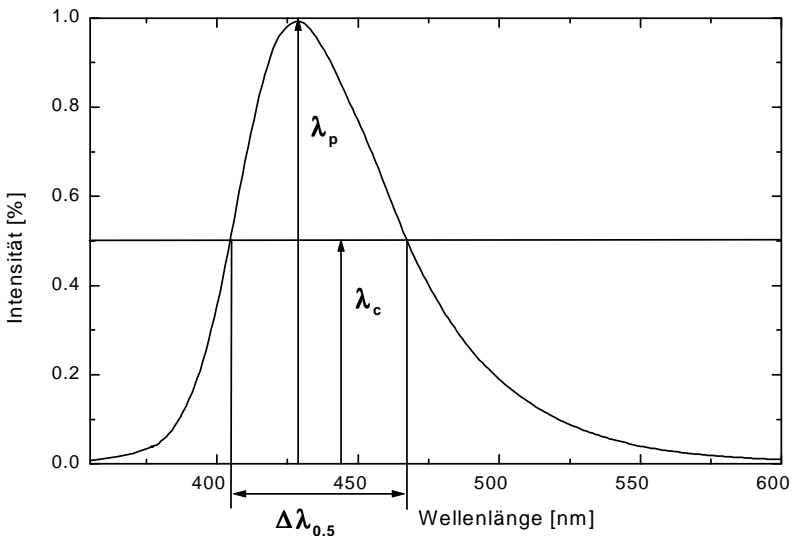


Abbildung 11: Die spektrale Verteilung einer blauen LED und wichtige spektrale Kenngrößen zu deren Charakterisierung

Die spektrale Verteilung der optischen Strahlung von LEDs weicht in vielen Aspekten von anderen Strahlungsquellen ab. Sie ist weder monochromatisch wie ein Laser noch breitbandig wie eine Halogenlampe sondern zwischen diesen beiden Extremen. Je nach Herstellungsprozeß weist das Spektrum einer LED eine bestimmte Peakwellenlänge λ_p auf, wobei die Halbwertsbreite typischerweise einige 10 Nanometer beträgt (Abbildung11).

Nachstehend sind die spektralen Kenngrößen von LEDs zusammengefaßt:

Peakwellenlänge λ_p :

Wellenlänge mit der maximalen Intensität des Spektrums. Die Peakwellenlänge ist einfach zu definieren und findet sich deshalb meistens in den Datenblättern von LEDs. Für den praktischen Einsatz hat die Peakwellenlänge jedoch eine geringe Bedeutung, da beispielsweise LEDs eine gleiche Peakwellenlänge, jedoch unterschiedliche Farbwirkung aufweisen können.

Halbwertsbreite:

Die spektrale Bandbreite bei der halben Intensität $\Delta\lambda_{0,5}$ wird aus den zwei Wellenlängen $\lambda_{0,5}^{\prime}$ und $\lambda_{0,5}^{\prime\prime}$ zu beiden Seiten von λ_p berechnet: $\Delta\lambda_{0,5} = \lambda_{0,5}^{\prime} - \lambda_{0,5}^{\prime\prime}$

Mittenwellenlänge $\lambda_{0,5m}$:

entspricht der mittleren Wellenlänge zwischen den Halbwertswellenlängen $\lambda_{0,5}^{\prime}$ und $\lambda_{0,5}^{\prime\prime}$.

Schwerpunktwellenlänge λ_c :

Die Schwerpunktwellenlänge λ_c ist die Wellenlänge, die das Integral eines Spektrums in zwei gleiche Teile gemäß folgender Formel aufteilt:

$$\lambda_c = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda \cdot S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) d\lambda}$$

Die Schwerpunktwellenlänge bietet sich zur radiometrischen Charakterisierung von LEDs (z.B. Infrarot-LEDs) an.

Dominante Wellenlänge:

Die dominante Wellenlänge wird aus den x,y-Farbkoordinaten des gemessenen Spektrums ermittelt. Dazu wird eine Gerade durch die Farbkoordinaten einer Bezugslichtart und dem gemessenen Farbort F im Farbdigramm gelegt (siehe Abbildung 2). Als Bezugslichtart wird in der Regel der Unbuntpunkt E herangezogen. Der Schnittpunkt S der Geraden mit der äußeren Begrenzung des Farbdigramms ergibt die dominante Wellenlänge. Sie ist ein Maß für den Farbeindruck, den das menschliche

Auge von der LED gewinnt und wird als farbtongleiche Wellenlänge bezeichnet.

Farbsättigung:

Die Farbsättigung ist als das Verhältnis der Strecke von der Bezugslichtart zum Farbort F und der Strecke von der Bezugslichtart bis zum Schnittpunkt S im Farbdigramm definiert. Bei schmalbandigen Strahlern, wie den meisten LEDs, beträgt die Farbsättigung nahezu 100%, d.h. die Farbe ist von monochromatischer Strahlung nicht unterscheidbar.

5 Anforderungen an optische Meßgeräte

In diesem Kapitel wird auf die wichtigsten Eigenschaften von optischen Meßgeräten eingegangen, die für eine genaue Messung der lichttechnischen Parameter von LEDs relevant sind.

Dabei gibt es zwei unterschiedliche Meßtechniken, um photometrische und farbmetrische Werte von Lichtstrahlung zu bestimmen:

- die integrale Methode, basierend auf einem Photometer, und
- die spektral aufgelöste Methode, basierend auf einem Spektralradiometer

5.1 Vergleich Photometer und Spektralradiometer

Bei Photometern wird beispielsweise ein Siliziumdetektor zusammen mit einem $V(\lambda)$ -Filter verwendet, um Lichtstärke zu messen. Der Ausgangsstrom des Detektors ist dabei direkt proportional zum photometrischen Meßwert, d.h. das Photometer wird in cd/A kalibriert.

Ein Spektralradiometer mißt die gesamte spektrale Verteilung der LED und hinterher wird aus dem gemessenen Spektrum und den Normtabellen der CIE der photometrische Wert errechnet. Dieser entscheidende Unterschied zwischen Spektralradiometern und Photometern hat in der LED-Meßtechnik eine wichtige Bedeutung.

Aus historischen Gründen werden $V(\lambda)$ -Filter optimal für Messungen von Lichtquellen mit Normlichtart A (Planckscher Strahler mit 2850 K Farbtemperatur) angepaßt. Deren Strahlungsverteilung weist ihr Maximum im Infraroten auf und fällt über den sichtbaren Spektralbereich kontinuierlich ab. Der Wert bei 400 nm beträgt nur noch 8% vom Maximalwert. Bei der Optimierung der $V(\lambda)$ -Filter an diese Strahlungsverteilung ist die Genauigkeit der Anpassung in den Flanken der $V(\lambda)$ -Kurve nicht so entscheidend, da im blauen Spektralbereich relativ wenig Licht vorhanden ist und eine Abweichung des Filters dort zu einem geringen Fehler bei der Bestimmung des photometrischen Wertes führt.

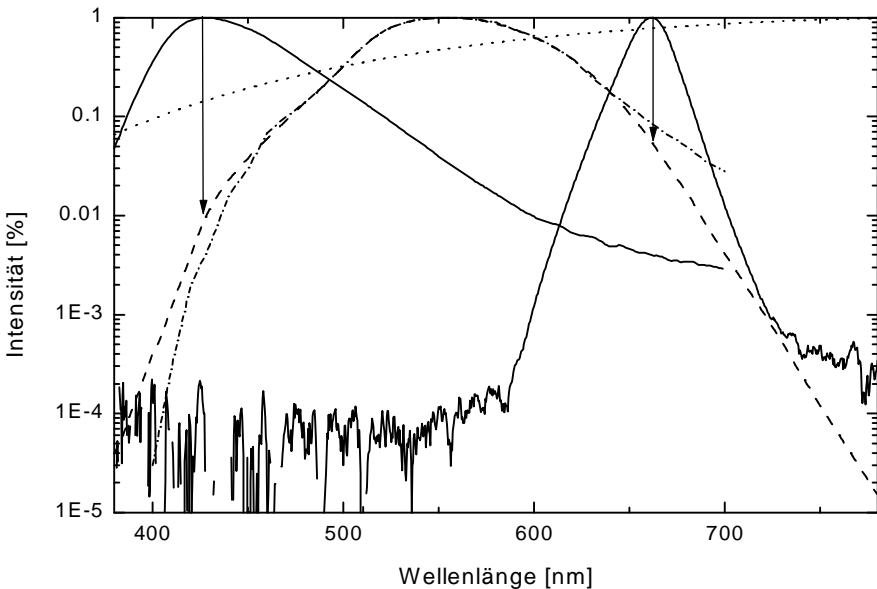


Abbildung 12: zeigt die theoretische V -Lambda Kurve (gestrichelt), die gemessene Kurve eines kommerziell erhältlichen $V(\lambda)$ -Filters (strichpunktiert), das Spektrum einer blauen und roten LED (durchgezogene Kurven) sowie das Spektrum von Normlichtart-A Strahlung (gepunktete Kurve).

LEDs hingegen weisen eine völlig andere Spektralverteilung auf und zwar eher gausförmig mit einer bestimmten Peakwellenlänge und einer Halbwertsbreite von wenigen zehn Nanometern. Insbesondere bei blauen, roten und weißen LEDs kommt es aufgrund der relativ schlechten Anpassung der Filter (siehe strichpunktierte Kurve in Abbildung 12) an den Flanken der $V(\lambda)$ -Funktion zu großen Abweichungen in der Lichtstärke und der dominanten Wellenlänge. So sind bei blauen LEDs Fehler von mehreren 100% keine Seltenheit [4, 5]. Bei weißen LEDs ist wiederum die richtige Bewertung des blauen Peaks von fundamentaler Bedeutung für die Genauigkeit der Farbkoordinaten (siehe auch Kap. 6.2.). Ein präzises Spektralradiometer (siehe nächstes Kapitel), vermeidet diesen Fehler, da eine rechnerische Bewertung des Spektrums mit genau definierten Funktionen der CIE erfolgt. Daher sind Spektralradiometer prinzipiell für die LED-Meßtechnik zu empfehlen.

5.2 Anforderungen an ein Spektralradiometer

Für korrekte radiometrische Messungen muß ein Spektrometer gewisse Grundvoraussetzungen erfüllen, die das Spektrometer erst zu einem Spektralradiometer machen. Die Genauigkeit ist dabei von dem Zusammenspiel aller Komponenten sowohl von der Optik (Monochromator, Strahlungseinkopplung) als auch von der Elektronik (Detektor, Verstärker und Analog/Digital-Wandler) bestimmt. Einfache Low-Cost Spektrometer erfüllen diese hohen Anforderungen in der Regel nicht.

Für den Monochromator bzw. Spektrographen sind folgende Kriterien zu berücksichtigen:
<p>Spektrale Auflösung</p> <p>Hängt von der Spaltbreite, der Brennweite und der Dispersion des Gitters ab und sollte ungefähr 3 nm betragen. Bei schlechterer spektraler Auflösung kann es bei schmalbandigen LEDs schon zu falschen Messergebnissen kommen.</p>
<p>Wellenlängengenauigkeit</p> <p>Sollte deutlich besser als +/- 0.5 nm sein. Abweichungen in der Wellenlänge gehen linear in Peak- und Schwerpunkswellenlänge ein, aber auch bei der Berechnung der dominanten Wellenlänge führen Fehler von 1 nm bei roten und blauen LEDs zu ähnlichen Abweichungen.</p>
<p>Streulichtunterdrückung</p> <p>Drei Größenordnungen sind mindestens erforderlich. In Kapitel 6 werden die vielfältigen Auswirkungen von Streulicht anhand von Beispielen eingehender diskutiert</p>
Für den Detektor und die Elektronik gelten ähnlich hohe Anforderungen:
<p>Empfindlichkeit</p> <p>Da die Einkoppeloptiken für Lichtstärke (Diffusor) und Lichtstrom (Ulbricht-Kugel) erhebliche Lichtverluste verursachen ist für den Test von LEDs im mcd-Bereich eine sehr hohe Detektorempfindlichkeit erforderlich</p>
<p>Signal/Rausch-Verhältnis des Detektors</p> <p>Für die Radiometrie ist ein sehr gutes Signal/Rausch-Verhältnis wichtig, da die gemessenen Spektren über den gesamten Meßbereich ausgewertet werden und ein hohes Rauschsignal in den Randbereichen zu falschen Ergebnissen führt. Gekühlte Detektoren sind vorzuziehen, da diese das thermische Rauschen deutlich vermindern und eine Langzeitstabilität des Dunkelstroms gewährleisten</p>
<p>Linearität des Detektors</p> <p>Die Linearität ist ein wesentliches Merkmal für ein Spektralradiometer. Eine Änderung der eingekoppelten Lichtleistung in das Spektrometer muß zu einer proportionalen Änderung des Detektorsignals führen, andernfalls ist das System nicht für radiometrische Messungen tauglich. Bei Array-Spektrometern muß die Linearität zusätzlich über die gesamte spezifizierte Integrationszeit gegeben sein.</p>
<p>Elektronische Dynamik</p> <p>Diese soll wie die Streulichtunterdrückung drei bis vier Größenordnungen betragen, was eine Analog-Digitalelektronik mit 14 Bit voraussetzt</p>

Es gibt zwei unterschiedliche Prinzipien, ein Spektralradiometer zu bauen. Scannende Spektrometer beruhen auf einem einzelnen Detektor und ein sich

drehendes Gitter. Bei Array-Spektrometern ist hingegen das Gitter fest montiert und der Detektor besteht aus einer Vielzahl von Einzeldioden, einem Dioden-Array, oder einem CCD-Chip. Das gesamte Spektrum wird hierbei simultan erfaßt.

Scannende Spektralradiometer

Diese zeichnen sich vorallem durch höchste Genauigkeit aus, die allerdings durch eine etwas längere Meßzeit von mehreren Sekunden erkauft wird. Eine elektronisch kontrollierte Dynamikumschaltung während des Scanvorganges erlaubt es, auch steile Flanken von Lasern oder sehr schmalbandigen LEDs präzise zu erfassen. Durch die Verwendung eines einzelnen Detektors ist es möglich, auf der Detektorseite des Spektrometers einen weiteren Spalt mit Blenden einzusetzen, um so das Streulicht zu minimieren. Man erhält so eine sehr gute optische Dynamik, die bei der Messung von LEDs bis zu 5 Größenordnungen betragen kann. Ein weiterer Vorteil von scannenden Spektrometern ist der große Spektralbereich bei gleichzeitig hoher Spektralaufösung und Wellenlängengenauigkeit. Der SPECTRO 320 von Instrument Systems beruht auf diesem Konzept und kommt vor allem als Referenzgerät für Entwicklungsabteilungen und Kalibrierungen in Frage.

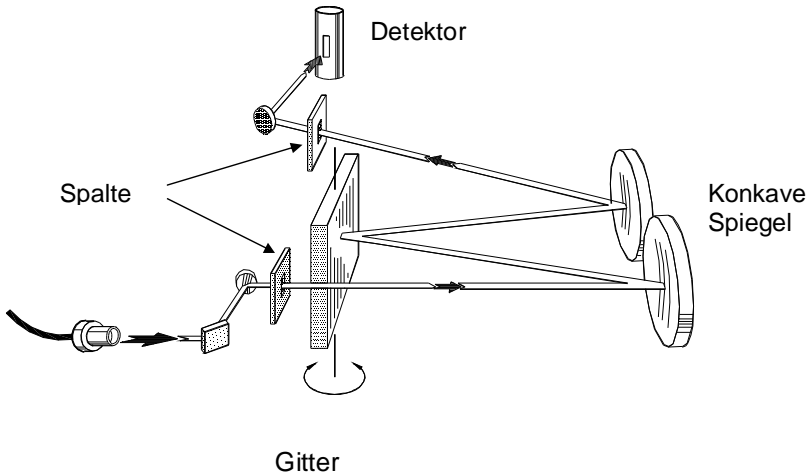


Abbildung 13: Technische Zeichnung eines scannenden Monochromators

Array-Spektralradiometer

Ein Array-Spektrometer ist hingegen in der Lage, deutlich schneller zu messen, da der gesamte Wellenlängenbereich simultan erfaßt wird. Schnellste Meßzeiten betragen um die 10 ms wobei eine Erhöhung der Empfindlichkeit durch längere Meßzeiten erreicht wird. Der fehlende Austrittsspalt hat einen Verlust an optischer Dynamik um mindestens eine Größenordnung im Vergleich zum scannenden Spektrometer zur Folge, da das Streulicht nicht mehr so wirksam ausgeblendet werden kann. Die spektrale Auflösung von Array-Spektrometern liegt im allgemeinen bei wenigen Nanometern. Der Abbildungsoptik im Spektrographen kommt bei diesem flächigen Detektor eine wichtige Bedeutung zu. Sie muß eine möglichst gute "Flatfield" Korrektur gewährleisten. Das bedeutet, daß es über die ganze Breite des Detektors keine Bildverzerrungen durch optische Abbildungsfehler wie Astigmatismus und Bildfeldwölbung geben darf. Abbildungsfehler dieser Art führen zu einer Verschlechterung der spektralen Auflösung am äußeren Rand des Detektors. Generell sind mit längeren Brennweiten bessere Abbildungseigenschaften zu erreichen. Wegen ihrer Meßgeschwindigkeit empfehlen sich diese Art von Spektralradiometern für Aufgaben in der Produktionskontrolle.

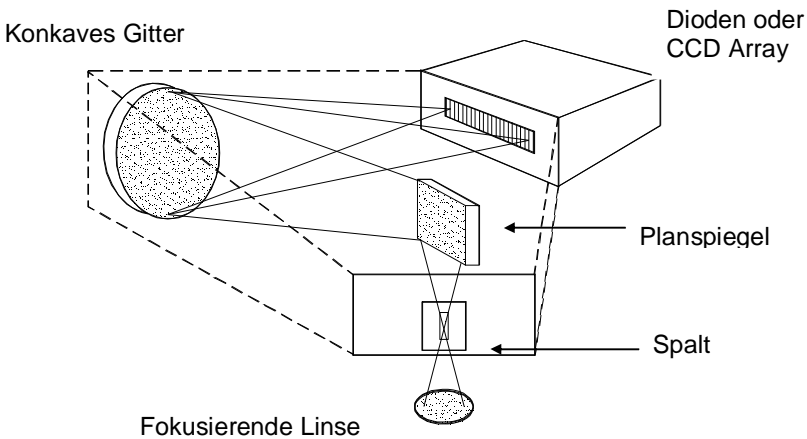


Abbildung 14: *Monochromator eines Array-Spektrometers, wie beispielsweise das CAS 140b von Instrument Systems*

5.3 Kalibrierung

Korrekte radiometrische Messungen setzen eine genaue Kalibrierung des Meßgeätes voraus. Spektralradiometer werden dazu in drei Schritten kalibriert:

Wellenlängenkalibrierung

Im ersten Schritt erfolgt die Kalibrierung der Wellenlänge. Hierzu kann ein Festfrequenz-Laser oder eine Quecksilber-Lampe mit mehreren Linien verwendet werden. Insbesondere bei Array-Spektrometern sollten möglichst viele Kalibrierpunkte gleichmäßig über den gesamten Spektralbereich verteilt sein.

Spektrale Kalibrierung

Im zweiten Schritt erfolgt die spektrale Kalibrierung des Spektralradiometers, d.h. die Messung der relativen spektralen Empfindlichkeit, die im wesentlichen von den Empfindlichkeitskurven des Detektors, des Gitters und der verwendeten Einkoppeloptik bestimmt werden. Für die Erzeugung der Korrekturfunktion wird die relative Empfindlichkeitskurve des Spektrometers mit den Spektraldaten einer 1000 W FEL-Lampe, die auf ein staatliches Kalibrierlabor rückführbar ist, verrechnet. Für einen konstanten Betriebszustand und damit eine exakte Reproduzierbarkeit des Spektrums muß der Lampenstrom auf $\pm 0,0001$ A stabilisiert sein. Eine Änderung des Stromes verursacht eine Veränderung der Lampentemperatur. Diese geht wiederum in die Plancksche Strahlungsverteilung mit einer Exponentialfunktion ein, wodurch schon geringe Farbtemperaturänderungen große Änderungen in der spektralen Verteilung, vor allem im kurzwelligen Bereich, bewirken. Ein relativer Stromfehler von $10E-04$ führt zu einem relativen Bestrahlungsstärkefehler von $10E-03$.

Absolutkalibrierung

Schließlich erfolgt die eigentliche Absolutkalibrierung des Spektralradiometers. Dazu wird eine LED verwendet, deren Lichtstärke ebenfalls von einem staatlichen Kalibrierlabor bestimmt wurde. Der Lichtstärkewert der Referenz-LED wird dem rechnerischem Ergebnis aus dem Integral des gemessenen LED-Spektrums, gewichtet mit der $V(\lambda)$ -Kurve, zugeordnet. Dadurch erfolgt eine Anpassung der breitbandigen spektralen Kalibrierung auf einen Absolutwert. Dieser Schritt entspricht der sogenannten Substitutionsmethode, die von allen nationalen Kalibrierstellen empfohlen wird [7, 4]. Substitutionsmethode bedeutet, daß zur Kalibrierung eines Meßgerätes ein Referenzstandard verwendet wird, dessen Eigenschaften so

gut als möglich denen des eigentlichen Meßobjektes entsprechen sollten. Nur so ist eine direkte Rückführbarkeit auf ein nationales Kalibrierlabor gewährleistet. Bei Instrument Systems wird zur Kontrolle der Kalibrierung die Lichtstärke von vier weiteren LEDs bei unterschiedlichen Farben gemessen. Über den gesamten Spektralbereich darf keine größere Abweichung als $\pm 5\%$ von I_v festgestellt werden.

Warum ist eine LED für die Absolutkalibrierung erforderlich?

Aufgrund der Tatsache, daß LEDs unter Standard-Meßbedingungen keine Punktlichtquellen sind und sich deren spektrale Verteilung sowie Abstrahlcharakteristik von einer Halogenlampe erheblich unterscheidet, kann nur eine LED als Bezug für die Absolutkalibrierung verwendet werden. Bestrebungen, den Detektor mit Hilfe der Halogenlampe absolut auf Bestrahlungsstärke zu kalibrieren – die Lampendaten sind ja bekannt – und die Strahlstärke mit Hilfe des Abstandsquadratgesetzes zu berechnen, scheitern, da die zwingende Voraussetzung für die Gültigkeit des Abstandsquadratgesetzes nicht gegeben ist. Eigene Messungen zeigen, daß sich für eine Bestrahlungsstärkekalibrierung des LED 430 mit Normlichtart A selbst bei sehr großem Abstand (3 Meter) des Diffusors von der FEL-lampe radiometrische Fehler von 15 % bei der Messung der Referenzstandards bei korrektem CIE-Abstand B ergeben.

Instrument Systems verwendet deshalb strom- und temperaturstabilisierte Referenz-LEDs, deren Lichtstärke von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt kalibriert wurde. Bei den LEDs und der Regelungselektronik handelt es sich um eine Spezialentwicklung der Firma Osram Opto Semiconductors. Um eine Lambertsche Abstrahlcharakteristik der LED zu erreichen wird ein spezielles Gehäuse mit Diffusor als Kappe für die LED verwendet.

6. Diskussion von Meßbeispielen und Fehlerquellen

In diesem Kapitel werden mögliche Fehlerquellen bei der Messung von LEDs diskutiert. Anhand von Beispielen wird vorallem der Einfluß der optischen und elektronischen Eigenschaften eines Spektrometers auf die Meßgenauigkeit dargestellt. Dabei zeigt sich, daß aufgrund der Verrechnung mit den CIE-Bewertungsfunktionen der Qualität des Spektrometers und der Kalibrierung eine weit höhere Bedeutung zukommt, als dies zunächst vermutet wird.

6.1 Auswirkungen der Meßdynamik

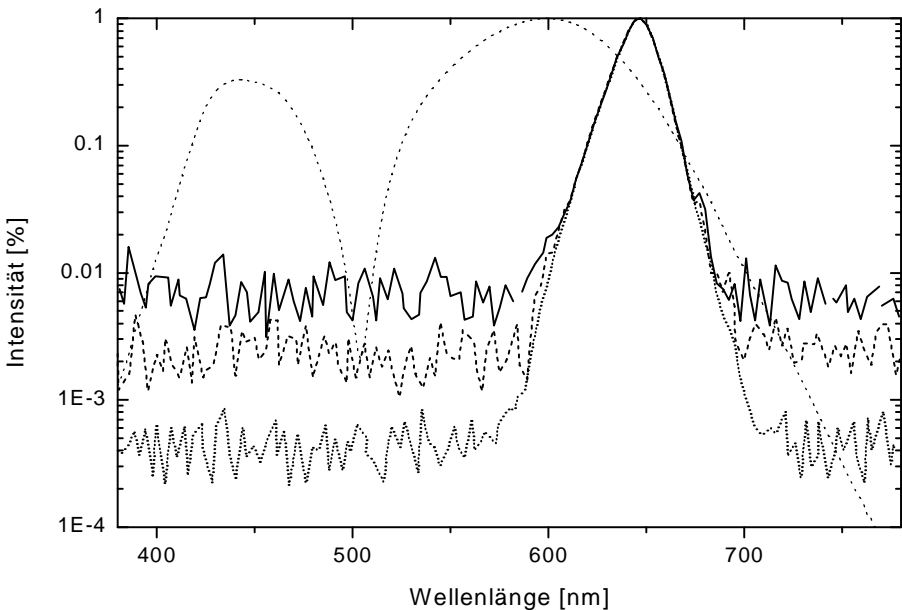


Abbildung 15: zeigt drei Messungen einer roten LED in relativ logarithmischer Darstellung mit unterschiedlicher Meßdynamik (durchgezogen = 10 E2, gestrichelt = 10 E2,5 und gepunktet = 10 E3,5). Die zweite gepunktete Linie entspricht der $x(\lambda)$ -Bewertungsfunktion.

Die Meßdynamik wird bei einem Spektrometer sowohl von den elektronischen als auch von den optischen Eigenschaften bestimmt. Die

elektronische Dynamik hängt von der Auflösung und Genauigkeit des A/D-Wandlers sowie vom Signal/Rausch-Verhältnis des Detektors ab. Die optische Dynamik ergibt sich aus den Streulichteigenschaften des Monochromators. Anhand von Messungen an einer roten LED wird exemplarisch der Einfluß der Meßdynamik dargestellt.

In Abbildung 15 sind in relativ logarithmischer Darstellung drei Messungen einer roten LED gezeigt, bei denen sukzessive die Dynamik reduziert wurde. Zur Veranschaulichung der Problematik, warum sich die verringerte Dynamik auf die Farbauswertung und dominante Wellenlänge auswirkt, ist ferner die Bewertungsfunktion für die x-Farbkoordinate eingezeichnet.

In Tabelle 3 sind die wichtigsten Meßergebnisse dieser Spektren zusammengefaßt:

Dynamik	x	y	λ dom [nm]	Farbsättigung
10 E2	0,675	0,282	648,1	87 %
10 E2,5	0,701	0,286	637,0	96 %
10 E3,5	0,714	0,287	634,3	100 %

Tabelle 3: faßt die Meßergebnisse der Spektren zusammen

Die Korrelation zwischen den Farbwerten und der entsprechenden Meßdynamik ist klar erkennbar. Je geringer die Meßdynamik ist, um so mehr trägt das Rauschen im Spektralbereich von 380 nm bis ca. 570 nm, wo das eigentliche Spektrum der LED erst beginnt, zur Berechnung der Farbkoordinate bei. Damit dieser Artefakt keinen Einfluß auf die Auswertung besitzt, muß die optische und elektronische Dynamik des Spektrometers mindestens eine Größenordnung besser sein als der Bereich über den sich die Bewertungskurven erstrecken.

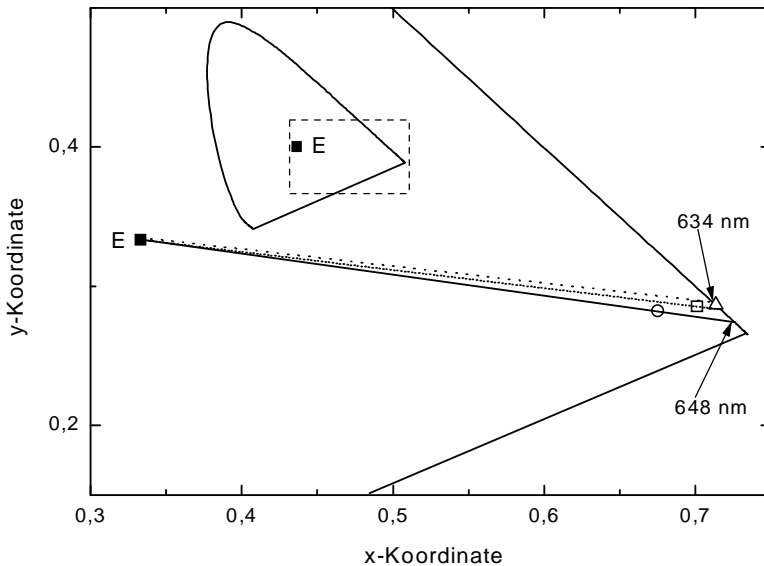


Abbildung 16: In diesem Ausschnitt des Farbdigramms sind die Punkte der Farbkoordinaten aus der vorstehenden Meßreihe eingezeichnet (Punkt = 87% Farbsättigung, Quadrat = 96 % Farbsättigung, Dreieck = 100% Farbsättigung).

Von der Veränderung der Farbkoordinaten ist auch die Berechnung der dominanten Wellenlänge und Farbsättigung betroffen. Werden bei der Farbsättigung kleinere Werte als 100% gemessen, so weist dies bei roten GaAs-LEDs immer auf eine schlechte Meßdynamik hin [8]. In Abbildung 16 wird aufgezeigt, wie in diesem Teil des CIE-Farbdigramms eine Verringerung der Farbsättigung eine Verschiebung der dominanten Wellenlänge zu größeren Werten bewirkt, obwohl das Rauschen im kurzwelligen Spektralbereich der betroffenen Spektren ansteigt.

6.2 Einfluß von Streulicht bei weißen LEDs

In diesem Kapitel soll noch einmal speziell das Thema Streulichtunterdrückung aufgegriffen und die Auswirkungen von Streulicht auf die Meßgenauigkeit von weißen LEDs diskutiert werden. Dabei ist zu beachten, daß Streulicht nicht mit Fremdlicht oder Umgebungslicht verwechselt werden darf, sondern eine Eigenschaft des Spektrometers ist.

Es gibt verschiedene Methoden, wie die Streulichtunterdrückung von Spektrometern bestimmt wird. Für ein Spektralradiometer ist die folgende Vorgehensweise am aussagekräftigsten: In das Spektrometer wird Licht einer Halogenlampe² unter Verwendung eines Gelbfilters mit einer Kantenwellenlänge von 455 nm eingekoppelt. Der Gelbfilter weist unterhalb dieser Wellenlänge ein Absorptionsvermögen von 6 Größenordnungen auf. Strahlung, die unterhalb der Kantenwellenlänge detektiert wird, muß deshalb von Streulichtartefakten des Monochromators verursacht werden.

Streulichteigenschaften von Spektrometern

In Abbildung 17 sind die Meßkurven von drei verschiedene Spektrometern zu sehen, mit denen der oben beschriebene Streulichttest durchgeführt wurde. Die Kurve mit der besten Streulichtunterdrückung wurde mit einem scannenden Spektrometer gemessen, die beiden anderen mit verschiedenen Array-Spektrometern.

Fehlerhafte Kalibrierung aufgrund von Streulicht

Im Kapitel zur Kalibrierung wurde beschrieben, daß für die spektrale Kalibrierung ein Planckscher Strahler mit einer Farbtemperatur von ca 3000 K verwendet wird, der sein Intensitätsmaximum im nahen Infrarot aufweist. Da im blauen Spektralbereich bei 400 nm nur noch ca. 10% der Maximalintensität vorhanden sind kommt es zu einer meßbaren Überlagerung des Streulichtanteils mit dem tatsächlichen Lampenspektrum (siehe Abbildung 17). Bei einem Streulichtanteil von 0,1% beträgt der Kalibrierfehler demnach 1% und bei einem Streulichtanteil von 1% sogar 10%.

² Halogenlampen entsprechen in ihrem spektralen Verlauf Planckschen Strahlern.

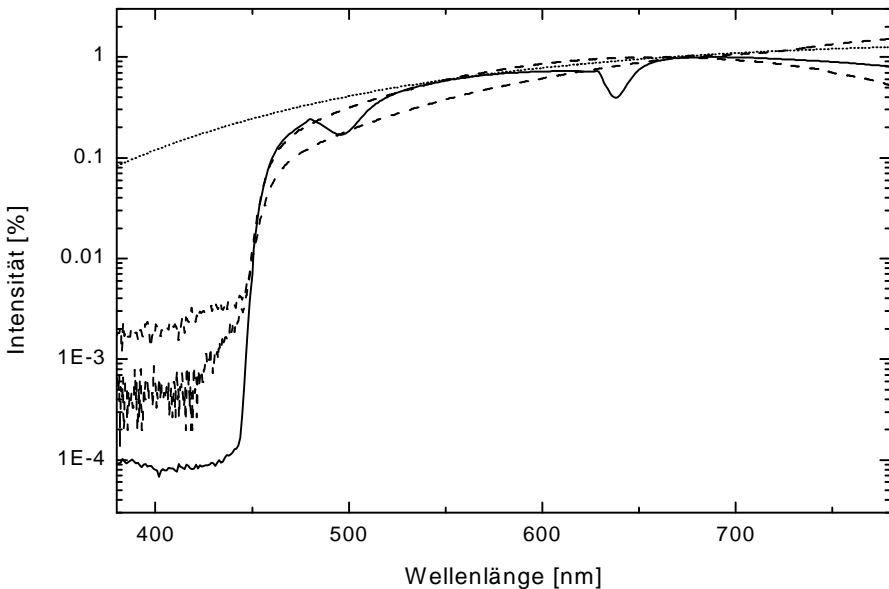


Abbildung 17: Hier ist das Ergebnis eines Streulichttests von drei verschiedenen Spektrometern zu sehen. Die durchgezogene Kurve wurde mit einem scannenden Spektrometer und die beiden gestrichelten mit zwei verschiedenen Array-Spektrometern aufgenommen. Zur Veranschaulichung ist das Spektrum einer Halogenlampe ebenfalls eingezeichnet (gepunktete Kurve). Alle Kurven wurden bei der gleichen Wellenlänge auf 1 normiert.

Meßfehler aufgrund der fehlerbehafteten Kalibrierung

Dieser Kalibrierfehler führt solange nicht zu großen Meßfehlern wie man einen ähnlichen Lampentyp testet. Bei weißen LEDs, deren Spektrum signifikant von Plankschen Strahlern abweicht, können jedoch große Meßfehler entstehen. In Abbildung 18 sind drei Spektren von jeweils der gleichen weißen LED zu sehen, die mit den Spektrometern aufgenommen wurden, deren Streulichtkurven in Abbildung 17 dargestellt sind.

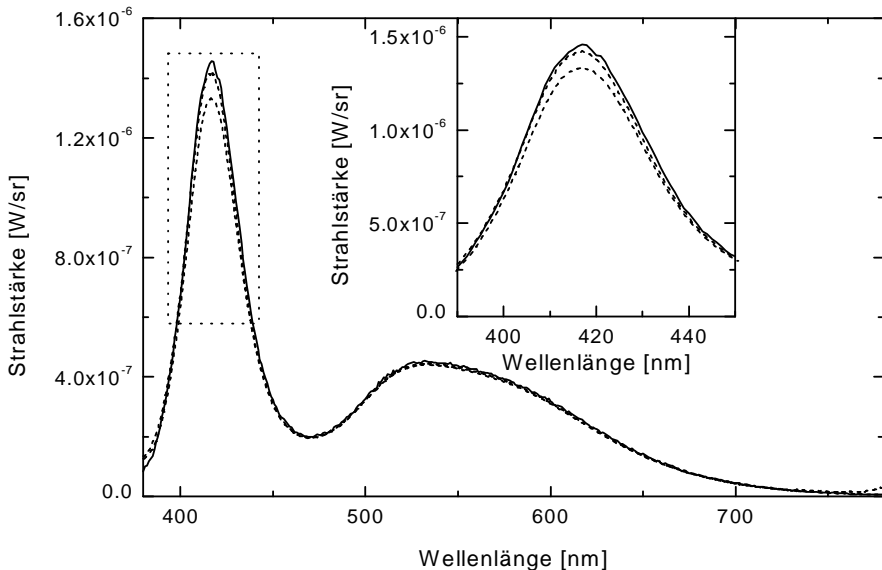


Abbildung 18: zeigt drei Messungen einer weißen LED (gepunktet: Messung mit scannendem Spektrometer – hier ist der blaue Peak am höchsten; gestrichelt: Messungen mit den beiden Array-Spektrometern). Bei abnehmender optischer Dynamik der Spektrometer nimmt auch die Höhe des blauen Peaks ab.

Da weiße LEDs ihren größten Strahlungsanteil im Blauen und Sichtbaren, aber keinerlei im nahen Infrarotbereich besitzt, ergibt sich ein gegenüber der Kalibrierung geringerer Streulichtanteil im Spektrometer. Dies führt zusammen mit dem fehlerbehafteten Kalibrierfile zu einer unterschiedlichen Bewertung des blauen Peaks. Die richtige Bewertung des blauen Peaks zum breitbandigen Anteil hat nun einen entscheidenden Einfluß auf die errechneten Farbkoordinaten. In Tabelle 4 sind diese für die in Abbildung 18 gezeigten Spektren aufgelistet.

Aufgrund der hohen Streulichtunterdrückung erhält man mit scannenden Spektralradiometern in der Regel das richtige Ergebnis. Bei den Messungen mit Array-Spektrometern ergeben sich je nach Spektrometerqualität zum Teil erhebliche Abweichungen.

Spektrometer	x	Fehler	y	Fehler
Scannend	0,2894	-	0,3041	-
Array 1	0,2903	0,0009	0,3065	0,0024
Array 2	0,2915	0,0021	0,3098	0,0058

Tabelle 4: zeigt die Ergebnisse der Farbkoordinaten für die drei Messungen aus Abbildung 18.

6.3 Einfluß des Bandpasses (Spektralauflösung)

Das Meßergebnis eines Spektrometers ist immer eine Faltung aus dem Bandpass des Spektrometers mit dem tatsächlichen Spektrum der Lichtquelle. Der Bandpass bestimmt das spektrale Auflösungsvermögen des Spektrometers. Solange das Spektrum der Lichtquelle deutlich breiter ist als das spektrale Auflösungsvermögen, wie z.B. bei einer Halogenlampe, wird das gemessene Spektrum auch dem tatsächlichen Spektrum der Lichtquelle entsprechen. Umgekehrt wird bei einer sehr schmalen Laserlinie die gemessene Halbwertsbreite dem Bandpass entsprechen.

In Tabelle 5 und Abbildung 19 ist dargestellt wie sich verschiedene Bandpassfunktionen auf die Meßergebnisse einer roten LED mit einer Halbwertsbreite von 20 nm auswirken.

Bandpass [nm]	Lambda dom. [nm]	Schwerpunktwellenlänge [nm]	Halbwertsbreite [nm]
0,5	634,18	644,71	20,75
1	634,16	644,59	20,80
2	634,13	644,62	20,95
5	633,91	644,56	21,82
10	633,26	644,44	24,49

Tabelle 5: Hier sind die Meßergebnisse einer roten LED bei verschiedenen Spaltbreiten aufgelistet.

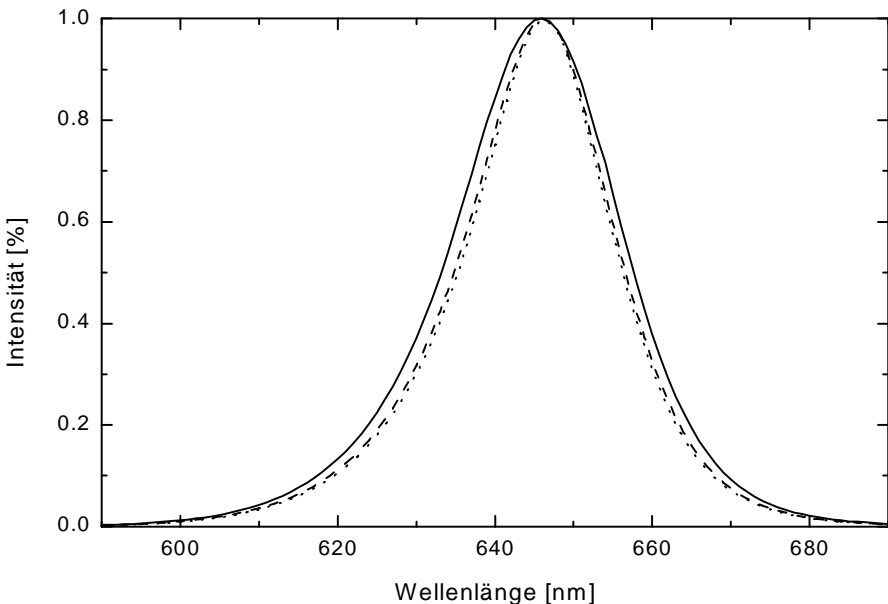


Abbildung 19: Es sind drei Messkurven der selben roten LED zu sehen, die mit unterschiedlicher spektraler Auflösung (durchgezogen: 10 nm, gestrichelt: 5 nm und gepunktet: 2 nm) gemessen wurde.

Die gemessene Halbwertsbreite nimmt ab einem Bandpass von 5 nm erheblich zu. Die Schwerpunkswellenlänge bleibt im Rahmen der Messgenauigkeit nahezu gleich. Die dominante Wellenlänge hingegen verschiebt sich durch die Zunahme der Halbwertsbreite bei großen Spalten um bis zu 1 nm. Durch die Verbreiterung des Spektrums errechnen sich andere Farbkoordinaten, die zu einer Änderung der dominanten Wellenlänge führen. Dieser Effekt tritt am stärksten an den äußeren Enden des Farbdiagramms auf.

Wie man sich dieses Verhalten theoretisch erklären kann ist in einer Veröffentlichung von Carolyn Jones dargelegt [9]. Mit Hilfe eines mathematischen Ansatzes wird das Zusammenspiel von Spektrum und den daraus resultierenden Farbkoordinaten modelliert. Diese Analyse zeigt, daß die dominante Wellenlänge in bestimmten spektralen Bereichen - unterhalb von 480 nm und oberhalb von 590 nm - stark von der spektralen Breite des gemessenen LED-Spektrums beeinflusst wird. Allerdings ergeben die

experimentellen Versuche geringere Abhängigkeiten als in der mathematischen Modellierung, da der Bandpass nicht voll zur gemessenen Halbwertsbreite beiträgt [10].

Aus diesen Untersuchungen läßt sich eine Empfehlung für das spektrale Auflösungsvermögen eines Spektrometers ableiten. Bei Messungen von schmalbandigen LEDs sollte der Bandpass nicht deutlich größer als 1/5 der Halbwertsbreite der LED sein, d.h. ca 3 bis 5 nm betragen.

6.4 Äußere Einflüsse

Neben dem Spektrometer gibt es etliche andere Parameter, die die Meßgenauigkeit von LEDs beeinflussen und die im folgenden kurz aufgelistet werden. Die angegebenen prozentualen Fehler wurden durch Vergleichsmessungen gewonnen.

- a) Die Genauigkeit und Stabilität der Stromquelle: Bei einer roten LED wurde bei einer Abweichung von 2% im Strom eine Änderung von mehr als einem Prozent im Lichtstärkewert beobachtet. Es empfiehlt sich, den Stromwert bei einfachen Stromquellen mit einem Multimeter zu überwachen.
- b) Eine große Rolle spielt auch die mechanische Meßanordnung. Gemäß der CIE Empfehlung muß der Abstand der LED-Spitze zum Diffusor genau 100 mm betragen [2]. Eine Abweichung von nur 2 Millimeter führt wegen des Abstandsquadratgesetzes zu einem Fehler von 4 %.
- c) Der Qualität der Testfassung kann eine wichtige Bedeutung zukommen, vorallem bei klaren, schiefwinkligen LEDs. Für eine reproduzierbare Lichtstärkemessung muß eine reproduzierbare Ausrichtung der mechanischen Achse der LED gewährleistet sein. Dies kann z.B. für klare 5 mm LEDs durch die Präzisionsfassung LED-511 mit Klemmechanismus erreicht werden (siehe Abbildung 4). Eine Untersuchung ergab, daß diese Präzisionsfassung eine Standardabweichung von 2 % bei Messungen einer grünen schiefwinkligen LED gewährleistet, während eine einfachere Testfassungen ohne Klemmvorrichtung eine Standardabweichungen von 3% und mehr aufweist.
- d) Einen sehr großen Einfluß besitzt die Stabilisierungszeit von LEDs (siehe Kap. 3.2.). Wie anhand von Abbildung 6 zu sehen ist, führt ein unterschiedlicher Startzeitpunkt der Messung zu unterschiedlichen Ergebnissen von bis zu einigen Prozent. Die Stabilisierungsdauer ist vom LED-Typ und äußeren Bedingungen wie der Umgebungstemperatur abhängig. Deshalb ist es nicht möglich, eine generelle Empfehlung für den Zeitpunkt der Messung zu geben. Einen Hinweis auf den stabilen Zustand

liefert die Vorwärtsspannung der LED. Ist diese stabil, kann gemessen werden.

6.5. Messanforderungen in der Produktion

Traditionell wurden in der Produktionskontrolle integral messende Photometer und Farbmessköpfe eingesetzt, da die Meßgeschwindigkeit ein wesentliches Kriterium für diese Anwendung darstellt. Die grundsätzliche Problematik von Photometern wurde in Kapitel 5.1. diskutiert. Hinzu kommt, daß die Qualität der für den Produktionseinsatz konzipierten Photometerköpfe auf den Test von grünen, gelben und roten LEDs abgestimmt wurde. Deshalb weisen diese besonders hohe Meßfehler bei blauen und weißen LEDs auf.

Array-Spektrometer sind aufgrund ihrer Robustheit und kurzen Meßzeit prinzipiell sehr gut für Produktionsanwendungen geeignet. Der größte Nachteil war bisher die fehlende Empfindlichkeit und Dynamik. Zusammen mit einer Einkoppeloptik, die zwar die CIE Empfehlung B erfüllt (Kap. 3.2.), aber aufgrund des verwendeten Diffusors den Lichtdurchsatz erheblich vermindert, konnten letztlich keine Meßgeschwindigkeiten im Millisekundenbereich realisiert werden.

Erst die Entwicklung einer neuen Generation von hochwertigen "back-illuminated" CCD-Chips als Detektoren, deren Empfindlichkeit nochmals entscheidend gegenüber herkömmlichen CCDs gesteigert wurde, ermöglicht eine CIE-konforme Messung bei kurzen Meßzeiten. Array-Spektrometer mit diesen Detektoren eignen sich besonders für den Einsatz in der Produktionskontrolle, da sie nicht mit den Nachteilen von einfachen Photometerköpfen behaftet sind.

Hohe Anforderungen werden hierbei an die mechanische Positioniergenauigkeit des Handlers gestellt. Die mechanische Achse der LED muß immer genau entlang der optischen Achse der Einkoppeloptik ausgerichtet sein. Zu beachten sind ebenfalls äußere Einflüsse wie Umgebungslicht und ungewünschte Reflexionen beim Zuführmechanismus für die LED.

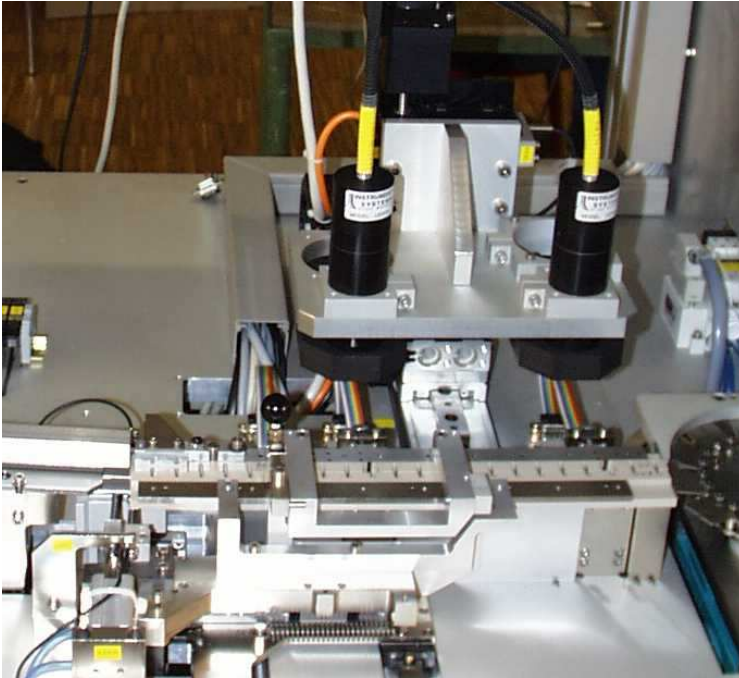


Abbildung 20: zeigt den optischen Messplatz für ein Sortiersystem von LEDs (Mit freundlicher Genehmigung der Firma Osram Opto-Semiconductor).

Meßtechnisch ergibt sich beim Test unter Produktionsbedingungen eine weitere Besonderheit. Wie in Kap. 3.2. ausführlich diskutiert wurde, benötigen LEDs eine gewisse Zeit, bis diese einen stabilen Zustand erreichen. Für den optischen Test in der Produktionskontrolle werden LEDs aber nur wenige Millisekunden bestromt. Diese Zeit reicht für die meisten LED-Typen nicht aus, um einen Zustand zu erreichen der Konstantstrombedingungen entspricht. Deshalb weichen die unter diesen Testbedingungen gemessenen Werte von denen unter Konstantstrombedingungen ab. In der Regel gibt es eine reproduzierbare Korrelation zwischen den beiden Testverfahren. Es ist Aufgabe der Hersteller von LEDs, diese Korrekturfunktion für die einzelnen LED-Typen zu bestimmen und bei der Auswertung zu berücksichtigen.

7. Zusammenfassung

Für die richtige lichttechnische Messung von LEDs müssen eine Vielzahl von Voraussetzungen erfüllt sein, um Genauigkeiten von besser 10% zu erreichen. Sie gliedern sich in vier Gruppen:

- CIE konforme Einkoppeloptik zur Messung der jeweiligen photometrischen Größe
- Kalibriermittel, die auf ein nationales Kalibrierlabor rückführbar sind
- Hohe Anforderungen an das Spektralradiometer
- Richtige Handhabung

Aufgrund der ungenügenden V-Lambda-Anpassung im kurzwelligen Spektralbereich sind industrielle Photometer für den Test von blauen und weißen LEDs nicht empfehlenswert.

CIE konforme Einkoppeloptik

Die CIE hat zwei klare geometrische Empfehlungen zur Messung der Lichtstärke von LEDs herausgegeben. Darin ist der Abstand der LED zu einem Sensor mit einer Fläche von 1 cm² definiert, woraus sich ein bestimmter Raumwinkel ergibt. Da LEDs keine Punktlichtquellen sind und ihre Abstrahlcharakteristik in der Regel nicht einem Lambertischen Strahler entspricht, ist eine exakte mechanische Realisierung dieser Geometrie, nämlich die Ausrichtung der mechanischen Achse der LED unter Einhaltung des Abstandes LED-Spitze zu Sensor, äußerst wichtig.

Für Lichtstrommessungen eignen sich zwei Meßprinzipien: Die Ulbrichtkugel, die den gesamten Lichtstrom integriert, und das Goniophotometer, mit dem die Strahlungskeule der LED bei verschiedenen Theta und Phi Winkeln gemessen und daraus der Gesamtlichtstrom berechnet wird. Bei der Ulbricht-Kugel sind zahlreiche geometrische und spektrale Fehlerquellen, insbesondere die sehr unterschiedliche Abstrahlcharakteristik von LEDs, zu beachten. Das Goniophotometer bietet hier die größte Genauigkeit.

Kalibrierung mit den richtigen Standards

Für präzise Lichtstärkemessungen von LEDs ist die richtige Kalibrierung des Meßgerätes eine unabdingbare Voraussetzung. Breitbandige Lichtquellen zur spektralen Kalibrierung eines Spektrometers, deren Spektraldaten auf eine Nationale Kalibrierstelle rückführbar sind, finden sich häufig in optischen Laboratorien. Man verwendet sie zur Kalibrierung der relativen spektralen Empfindlichkeit des Meßgerätes. Zur Absolutkalibrierung eines CIE konformen Aufbaus für Lichtstärkemessungen von LEDs eignen sich diese Lampen nicht. Da LEDs innerhalb der von der CIE vorgeschlagenen

Meßgeometrien keine Punktlichtquellen sind, ist das Abstandsquadratgesetz zur Berechnung der Strahlstärke aus der Bestrahlungsstärke ungültig. Man benötigt temperaturstabilisierte LEDs mit Lambertscher Strahlungscharakteristik, deren Licht- bzw. Strahlstärkewert von einer Nationalen Kalibrierstelle bestimmt wurde. Nur so kann zusammen mit der richtigen Einkoppeloptik eine korrekte und auf internationale Standards rückführbare Lichtstärkemessung erzielt werden.

Spektralradiometer hoher Meßdynamik und Genauigkeit

Die Kriterien, die ein Spektrometer zum Spektralradiometer machen, sind vielfältig. Die Wellenlängengenauigkeit des Monochromators muß besser als 0,5 nm betragen und die spektrale Auflösung ca 3 nm sein. Nur eine hohe Streulichtunterdrückung von mindestens drei Größenordnungen gewährleistet eine fehlerfreie Kalibrierung und Messung. Ansonsten muß mit erheblichen Abweichungen in den Farbkoordinaten gerechnet werden. Zu den wesentlichen Eigenschaften des Detektors gehört ein möglichst niedriges und stabiles Dunkelstromsignal, das am besten durch eine Kühlung des Detektors erreicht wird. Der Detektor muß über seinen gesamten Aussteuerungsbereich ein lineares Verhalten zeigen. Jede Abweichung davon führt zu falschen radiometrischen Ergebnissen. Die nachgeschaltete Elektronik sollte eine Meßdynamik von 4 Größenordnungen erlauben, um Fehler aufgrund von Rauschanteilen in den spektralen Randbereichen zu vermeiden. Bei blauen und weißen LEDs sind die meßtechnischen Anforderungen besonders hoch, da sich dort sämtliche Fehler verstärkt auswirken.

Die Richtige Handhabung

Die besten Meßgeräte können nicht eine richtige Handhabung ersetzen. Äußere Einflüsse wie die Temperatur, Stabilisierungszeit und Halterung der LED müssen genau beachtet werden, um präzise Meßergebnisse zu erzielen.

8. Literaturhinweise

- [1] Commission Internationale de l'Éclairage, "Colorimetry", Publication CIE 15.2-1986
- [2] Commission Internationale de l'Éclairage, "Measurements of LEDs", Publication CIE 127-1997
- [3] T.Q. Kahn, W. Dähn, "Die Ulbrichtsche Kugel", Photonik, 4, 1998
- [4] Y. Ohno, " Fundamentals in Photometry and Radiometry II – Photometers and Integrating Spheres", CIE LED Workshop and Symposium, Vienna, 1997
- [5] G. Heidel, "Actual problems at the industrial optical measurement of Leds", Proceedings of the CIE LED Symposium 1997 on Standard Methods for Specifying and Measuring LED Characteristics, 1997
- [6] Dr. G. Sauter, "private communication", Physikalisch - Technische Bundesanstalt PTB, 1999
- [7] Dr. G. Sauter, "LED radiation and measurement uncertainty", CIE LED Workshop and Symposium, Vienna, 1997
- [8] P.A. Boynton, Y. Ohno and E.F. Kelley, "Interference-Filter Characterization of Spectroradiometers and Colorimeters", SID Intl. Symp. Digest. Tech. Papers 18, 1997
- [9] C. Jones, "Colormetry, chromaticity space and LEDs", CORM Meeting 1998
- [10] Y. Ohno, "Colorimetric accuracies in spectroradiometry of LEDs", CORM Meeting 1999



www.instrumentsystems.com

INSTRUMENT SYSTEMS GMBH
Neumarkter Str. 83 • 81673 München
Tel: 089-4549430 • Fax: 089-45494311
E-mail: info@instrumentsystems.de