

LED-Messung in der Fertigung

Optische Messungen in der LED-Massenproduktion müssen schnell und präzise sein. Verschiedene Methoden können in den einzelnen Produktionsschritten eingesetzt werden, um verlässliche Ergebnisse zu erhalten.

Günther Leschhorn, Richard Young
Instrument Systems

Im Herstellungsprozess von LEDs werden unmittelbar an der Fertigungslinie elektrische, optische und thermische Messungen durchgeführt, um die LEDs in einem als „Binning“ bezeichneten Verfahren in Gütegruppen zu sortieren und die fehlerbehaftete von der hochwertigen Produktion zu trennen. Dabei enthalten sogenannte Bins (Englisch für „Behälter“) LEDs gleicher elektrooptischer Eigenschaften, die genauestens bestimmt werden können, obwohl es starke Schwankungen innerhalb eines Fertigungsloses gibt. Zusätzlich dienen die Ergebnisse der Inline-Tests dazu, den Herstellungsprozess unmittelbar während der Fertigung anzupassen und so den Produktionsertrag zu steigern. Im Folgenden werden wesentliche Aspekte optischer Messungen in der Fertigung beleuchtet.

Voraussetzungen und Anforderungen für Produktionstests

Produktionstests unterscheiden sich von Labormessungen vornehmlich durch die Geschwindigkeit: An einer Fertigungslinie werden etwa zehn LEDs pro Sekunde gemessen.

Die optischen Messinstrumente müssen entsprechend der Geschwindigkeit der Fertigungslinie getaktet und die

Messzeiten so kurz wie möglich sein. Neben mechanischen bzw. pneumatischen Positionierern, Kontaktieranlagen sowie Sichtprüfgeräten bleibt wenig Bauraum für die Einkoppeloptik und weitere Test-Vorrichtungen. Auch sind Temperatur und Feuchtigkeit in der Produktionsanlage oft nicht genügend geregelt und können deutlichen Schwankungen unterliegen. Zusätzlich können die Tester Vibrationsbelastungen ausgesetzt sein und müssen dem Dauerbetrieb standhalten. Daher sind für Messungen in der Produktion hochwiderstandsfähige, wartungsarme Geräte erforderlich, die zugleich genaue und reproduzierbare Ergebnisse liefern.

Das Messen von LED-Parametern in der Fertigung gestaltet sich insbesondere hinsichtlich des Messinstrumentariums als schwierig, da der Lichtdurchsatz von CIE-konformen Messadaptern gering ist und eine Vielzahl verschiedener Produkte von Low-Power- zu High-Power-LEDs getestet wird. Gleichzeitig müssen die Messzeiten kurz sein, um möglichst viele Einheiten pro Stunde (UPH: units per hour) produzieren zu können.

In der Fertigungskontrolle kamen früher im Allgemeinen Photometer und Farbmessköpfe für integrale Messungen zum Einsatz, da die Messgeschwindigkeit hier der entscheidende Faktor ist. Deren Messgenauigkeit reicht in der Fertigung jedoch nicht für die Prüfung von blauen und weißen LEDs aus, sodass hier in der

Regel Spektrometer verwendet werden.

Dank ihrer Robustheit und kurzer Messzeiten sind Array-Spektralradiometer ideal für den Einsatz in der Fertigung. Ihr größter Nachteil lag früher in der zu geringen Empfindlichkeit und einem zu kleinen Dynamikbereich. Weder mit einer Einkoppeloptik nach CIE Condition B noch mit einem den Lichtdurchsatz stark einschränkenden Diffusor konnten Integrationszeiten im Millisekundenbereich erzielt werden. Dieses Problem wurde mit der Entwicklung hochqualitativer „back illuminated“ CCD-Sensoren mit deutlich höherer Empfindlichkeit behoben. Die Steigerung der effektiven Full-Well-Kapazität durch den Flächendetektor erhöht auch den nutzbaren Dynamikbereich und verringert gleichzeitig das Rauschsignal, was wiederum die Reproduzierbarkeit verbessert (**Bild 1**). Array-Spektralradiometer dieser Bauweise eignen sich somit am besten für die Fertigungskontrolle von LEDs, da sie die Nachteile des Photometers beheben, ohne dabei die Messzeit zu beeinträchtigen.

Einsatz in der Praxis

Der für optische Prüfungen von LEDs relevante Fertigungsprozess kann in mehrere Schritte unterteilt werden. Üblicherweise wird zunächst ein Wafer in sogenannte Dies (Einzahl: Die) zerschnitten, die anschließend voneinander getrennt werden. Dadurch können sich ihre optischen Eigenschaften bis zu einem gewissen Grad verändern. Bei phosphorkonvertierten weißen LEDs wird im nachgeschalteten Produktionsschritt ein darauf angepasster Phosphor gewählt und in verschiedenen Verfahren auf dem Die aufgebracht. Bei Mehr-Chip-LEDs für Weißlicht werden drei oder vier Dies kombiniert. Die so kontaktierten Chips werden zum Schluss in einem Gehäuse zu einer LED zusammengefasst. Je nach Bestimmungszweck können die LEDs auf Leiterplatten montiert und mit Steuerungselektronik sowie gegebenenfalls Linsen und Reflektoren kombiniert werden.

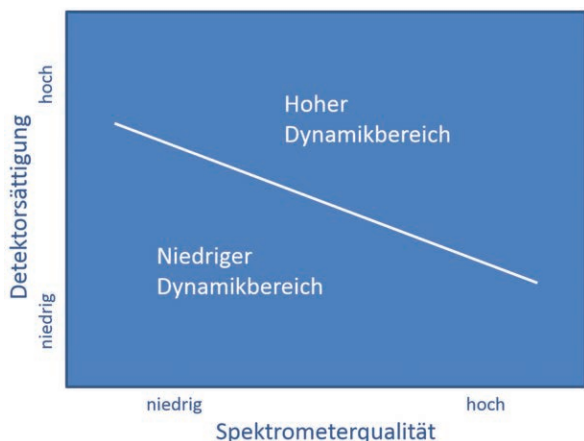


Bild 1: Die Linien-Integration eines Flächendetektors führt zu einem geringeren Rauschsignal und ermöglicht auch bei niedriger Detektorsättigung aufgrund eines günstigen Signal-Rausch-Verhältnisses ein größeres Messspektrum

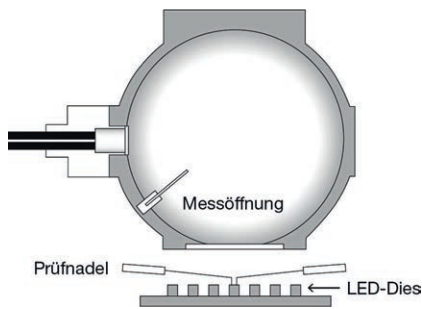


Bild 2: Wafertestanordnung, bestehend aus einer Ulbricht-Kugel mit einem Durchmesser von 100 mm und Quarzglas als Staubschutz

Die folgenden Abschnitte liefern einen Einblick in klassische, optische Messverfahren entlang der vier Hauptproduktionsschritte, wobei der Fokus auf weißen LEDs liegen soll, da sie am stärksten nachgefragt und am komplexesten sind.

Wafertests

Um frühzeitig die richtigen Entscheidungen zum weiteren Vorgehen treffen zu können und so die Ausbeute zu optimieren, sind Messungen auf Wafer-Ebene notwendig [1]. Wafer erfordern Reinraumbedingungen und werden gewöhnlich mithilfe einer über dem Wafer angeordneten Ulbricht-Kugel geprüft. Der Wafer wird mittig vor der Messöffnung der Kugel platziert und mit Prüfnadeln kontaktiert (**Bild 2**). Aus den optischen Prüfungen, die zumeist den Lichtstrom sowie die dominante Wellenlänge messen, ergibt sich eine sogenannte Wafermap (**Bild 3**), auf der die Lichtstärke der Dies über die x- und y-Ortskoordinaten des Wafers farbcodiert sind.

Wafertests mit Ulbricht-Kugel

Aufgrund des beschränkten Raums für Wafertestgeräte und der Notwendigkeit, optische Integrationszeiten möglichst kurz zu halten, sollte die Ulbricht-Kugel so klein wie nötig, aber so groß wie möglich sein. Kugeln mit einem Durchmesser von 100 mm entsprechen den Anforderungen an Genauigkeit und Größe bei Wafertests am besten. Je nach Anwendung können jedoch auch Durchmesser zwischen 75 und 250 mm eingesetzt werden. Die Messöffnung sollte dabei maximal ein Drittel des Kugeldurchmessers betragen; bei einer Kugel von 100 mm Durchmesser ent-

spricht dies einer Messöffnung von 33 mm. Zum Schutz der Bariumsulfat-Schicht der Kugel vor Verunreinigungen und Umwelteinflüssen eignet sich ein Quarzglasfenster (**Bild 2**).

Für die Messung von Flip-Chip-LEDs kann die Ulbricht-Kugel von unten in nächster Nähe zur LED platziert werden. Der Abstand kann dabei kleiner als 1 mm sein und ermöglicht die Messung des gesamten Lichtstroms in guter Näherung.

Wafertests mit Lichtleiter

Durch die Verwendung von Lichtleitern als Einkoppeloptik werden schnelle Wafermessungen ohne Einschränkung der Sichtprüfung ermöglicht. Durch diese Art der Einkopplung in das Spektralradiometer ergibt sich ein besonders hoher Lichtdurchsatz und gewährleistet selbst bei geringer Lichtstärke extrem kurze Messzeiten. Dank des kompakten Aufbaus dieser Einkoppeloptik kann der Lichtleiter zwischen Justiermikroskop und Wafer angeordnet werden, ohne die Sichtprüfung der Kontakte zu behindern (**Bild 4**). Das Messsystem wird gewöhnlich auf die Beleuchtungsstärke oder bei bekannten Messabständen auf die Lichtstärke, nicht aber auf den Lichtstrom kalibriert. Mit einem Diffusor lässt sich der Einfluss des Kopplungswinkels auf die Messung reduzieren. Der Lichtleiter eignet sich ebenfalls zum Messen einzelner Dies.

Wafertests mit Mikroskop

Oft erfolgt die optische Messung von LED-Dies in Wafertestanlagen auch per Mikroskop. Dieses Bildgebungsverfahren misst im Grunde die Leuchtdichte und eignet sich nicht für Lichtstrom- oder Lichtstärkemessungen, da die inhomogene Beschaffenheit des emittieren-

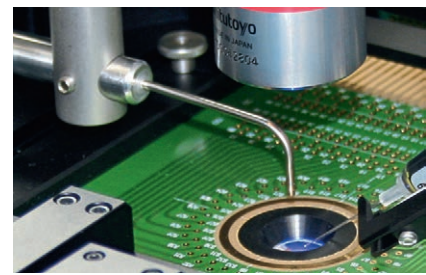


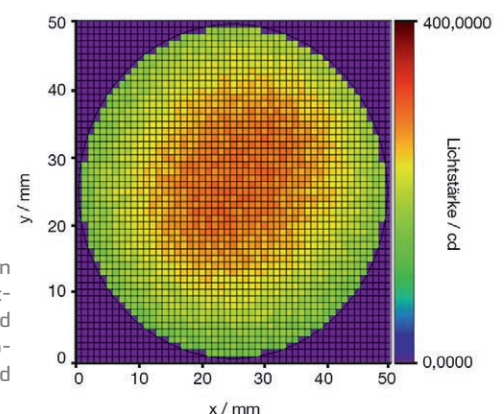
Bild 4: Lichtleitersensor zur schnellen Waferprüfung

den Chips zu Messfehlern führen kann. Auch Farbverschiebungen sind aufgrund der spektralen Transmission des Mikroskops wahrscheinlich.

Multi-Die-Testing

Das Multi-Die-Testing beschleunigt den Wafertest. Um die Zahl zeitaufwendiger mechanischer Bewegungen möglichst gering zu halten, werden 4, 8, 16 oder mehr Dies zeitgleich kontaktiert und die Einkoppeloptik wird über der Die-Gruppe platziert (**Bild 5**). Durch elektrisches Multiplexing wird die Stromquelle nacheinander auf die einzelnen Dies geschaltet. Über dieses Multi-Die-Testverfahren können somit mehrere Dies in Folge gemessen werden, ohne den Wafer zu bewegen. Da die elektrischen Schaltzeiten (eine oder mehrere Millisekunden) deutlich kürzer sind als die Verfahrzeit des Positionierers (zehn oder mehrere Dutzend Millisekunden), erhöht sich der Durchsatz. Während Multi-Die-Tests mit Multiplexing im Allgemeinen einen bis zu viermal höheren Durchsatz ermöglichen, stellen parallel betriebene Multikanal-Stromquellen eine noch schnellere Methode dar, da die elektrische Prüfung aller kontaktierten Dies gleichzeitig erfolgt. Im Anschluss daran wird über die optische Prüfung die emittierte Strahlung der einzelnen Dies gemessen. ➤

Bild 3: Bei Wafertests entstehen Wafermaps, auf denen die Lichtstärke der Dies über die x- und y-Ortskoordinaten des Wafers farbcodiert sind



Die-Tests

Die elektrooptischen Eigenschaften von Dies ändern sich, sobald diese aus dem Wafer geschnitten sind. Im nächsten Fertigungsschritt werden deshalb die optischen und elektrischen Prüfungen an den abgetrennten Chips durchgeführt. Bei LEDs geringerer Qualität kann dieser Schritt übersprungen werden. Für die Herstellung hochwertiger Produkte ist eine Prozesssteuerung an dieser Stelle unerlässlich.

Die Trennung erfolgt mittels eines sogenannten Blue Tape aus Polymerfolie, auf dem der zerschnittene Wafer platziert wird. Durch die Dehnung der Folie trennen sich die Dies, die dann ein spezieller Prober für die elektrische und optische Prüfung kontaktiert. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Dies zum Kontaktieren einzeln mechanisch auf eine gesonderte Testplatte zu setzen und mit einem speziellen Die-Prober zu testen.

Bei optischen Prüfungen werden im Allgemeinen der Lichtstrom sowie die dominante Wellenlänge gemessen. Bei weißen LEDs mit Lumineszenzkonversion werden zur Herstellung des gewünschten Weißtons die Phosphorplättchen mit ins Binning einbezogen. Da sich die optischen Eigenschaften des Phosphors durch die Kombination von mehreren Phosphorarten anpassen lassen, kann für jedes Die-Bin ein passendes Phosphor-Bin produziert werden. Durch die richtige Zuordnung der Phosphor-Bins zu den Die-Bins wird der gewünschte Weißton aus unterschiedlichen Die-Bins hergestellt und somit der Produktionsertrag erhöht. Eine andere Möglichkeit besteht darin, den Phosphor direkt auf den Chip aufzutragen. Hierzu ist die fundierte Kenntnis des Beschichtungsprozesses notwendig, um Phosphorkonzentration und -zusammensetzung zu steuern.

Die bevorzugte Einkoppeloptik für das optische Prüfsystem ist eine Ulbricht-Kugel mit einem Durchmesser von 75 bis 150 mm (je nach LED-Typ und verfügbarem Bauraum am Fördermittel).

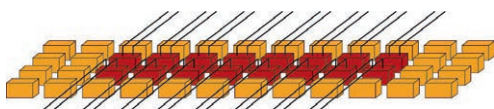


Bild 5: LED-Chips auf dem Wafer werden mit einer speziellen Prüfkarte kontaktiert, um mehrere Dies gleichzeitig zu testen

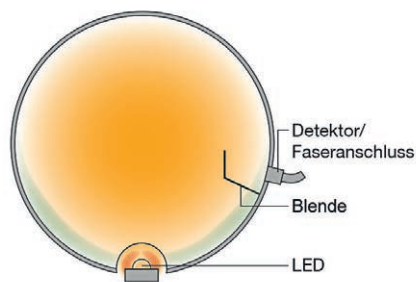
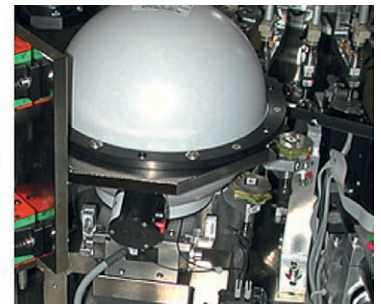


Bild 6: Ulbricht-Kugel für Gehäusetests mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Quarzglaskuppel (links). Die Ulbricht-Kugel ist dank der homogenen Oberfläche gegenüber der Messöffnung auf minimale Richtungsempfindlichkeit ausgelegt. Rechts eine beispielhafte Anordnung an einem LED-Handler.



LED-Tests

Bei bereits gehausten LEDs verändern sich die Messgrößen im Vergleich zum Wafer- und Die-Test. Bei optischen Tests weißer LEDs werden gewöhnlich Lichtstrom, Lichtstärke, Farbkoordinaten und korrelierte Farbtemperatur (correlated color temperature, CCT) gemessen. Für LEDs, die ganz allgemein zu Beleuchtungszwecken genutzt werden sollen, wird der Farbwiedergabeindex (CRI) als Variable für das Binning verwendet. Einige LED-Hersteller spezifizieren LED-Fertigungslose entweder nach einem festen CRI-Wert mit definiertem Toleranzbereich oder nach einem Mindest-CRI, der erreicht sein muss.

Im Vergleich zu den nackten Chips ändert sich bei den gehausten LEDs aufgrund von Kontaktieren, Packaging und Lichtausbreitung im Phosphor oder einer aufgesetzten Linse die Lichtverteilung. Durch Fertigungstoleranzen entstehen sehr individuelle Richtcharakteristiken.

LED-Tests mit Ulbricht-Kugel

Die individuelle Abstrahlcharakteristik verschiedener LEDs äußert sich bei der Lichtstrommessung derart, dass das emittierte Licht jeweils an einer anderen Stelle auf der Innenseite der Ulbricht-Kugel auftrifft. Unregelmäßigkeiten in der Kugelbeschichtung und -form würden zu Messabweichungen führen, weshalb die Verwendung einer hochwertigen Kugel von größter Bedeutung ist, um eine ausreichende Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zu gewährleisten. Hochqualitative, für die Fertigung geeignete Ulbricht-Kugeln besitzen auf dem direkten Weg des eintretenden Lichts bis

zur Kugelrückwand keine optischen Elemente. Dort befindet sich lediglich die homogene, mit Bariumsulfat beschichtete Wand, wodurch sich die Richtungsabhängigkeit des Messwerts verringert.

Wird die Kugel für die Messung sehr nah an der LED platziert oder die LED im genauen Abstand des Kugelradius positioniert, ist eine Quarzglaskuppel zu verwenden, um die Kugel vor dem Eintritt von Staub oder loser Teilchen zu schützen. Ein flaches Fenster würde aufgrund der bei großen Öffnungswinkeln auftretenden starken Reflektion den effektiven Öffnungswinkel verkleinern. **Bild 6** zeigt links die entsprechende Anordnung. Ein größerer Abstand zwischen LED-Gehäuse und Kugel erlaubt auch die Verwendung eines flachen Glasfensters.

LED-Tests mit LED-Lichtstärkemessadapter

Die Lichtstärke wird mit einem speziellen Adapter gemessen, der einen Kosinus-korrigierten Detektor mit einem genau definierten Detektionsbereich umfasst. Die LED wird mit Abstand zum Adapter positioniert, um die Bewegung durch den Positionierer nicht zu behindern. Hierdurch kann Streulicht in den Raum zwischen Emitter und Detektor eintreten sowie Licht aus dem Inneren des Adapters auch wieder nach außen dringen. Das verzerrt den Messwert. Zwar ist der Detektor durch das Adaptergehäuse und zwei Blenden abgeschirmt (siehe schematische Darstellung links in **Bild 7**), doch empfiehlt sich trotzdem eine ausreichend abgedunkelte Messumgebung. Die Messöffnung für den Adapter kann mittels einer Glasscheibe vor Staub ge-

schützt werden. Die Transmission des Lichtleiters, der den Messadapter mit dem Spektrometer verbindet, darf nicht von den durch die mechanischen Vibrationen des Positionierers hervorgerufenen Bewegungen beeinflusst werden.

Aufgrund der hohen Richtwirkung der LED-Strahlung ist eine präzise Positionierung der mechanischen Achse der LED entlang der optischen Achse des Lichtstärkensors entscheidend, da schon kleine Abweichungen zu deutlich unterschiedlichen Messwerten führen können. Daher muss die mechanische Positionierung höchsten Genauigkeitsansprüchen genügen.

Modultests

Ein Modul, das die Bestromung der LEDs sowie möglicherweise mehrere LEDs einschließt, erhöht die Komplexität des Testverfahrens. Da die optischen Eigenschaften einer LED von der Bestromung abhängen, kann jeweils nur für einen spezifischen Zustand getestet werden. Ergänzend kann die Prüfung bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen erfolgen. Hierdurch erhält man die notwendigen Messdaten zur intelligenten Steuerung der optischen Eigenschaften des Endproduktes.

- [1] D. Konjodžić, contribution to Technical Report from CIE TC 2-64, "High speed testing methods for LEDs", to be published by CIE
 [2] T. Kawabata, Y. Ohno, "Optical measurements of OLED panels for lighting applications", Journal of Modern Optics, 2013

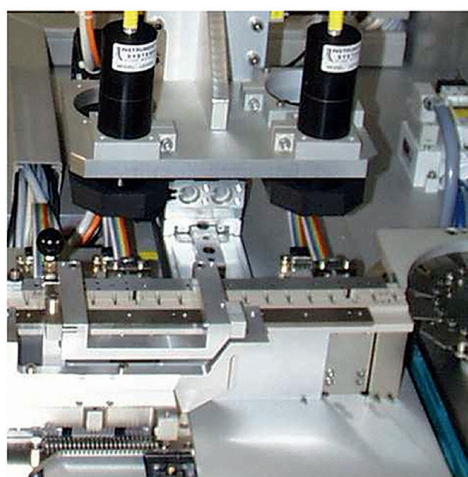
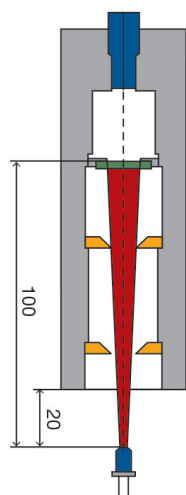


Bild 7: Schematische Darstellung (links) eines nach CIE Condition B genormten LED-Lichtstärkemessadapters für die Fertigung. Rechts ist die Anordnung für die optische Messung in eine LED-Sortieranlage integriert.

Messgröße	LED	OLED
Lichtstrom	Ja	Ja
Strahlungsfluss	Nicht-sichtbare LEDs (UV/NIR)	Nein
Leuchtdichte	Nein	Ja
Leuchtdichthehomogenität	Nein	Ja
Farbkoordinaten	Ja	Ja
CCT	Ja	Ja
CRI	Ja	Ja
Dominante Wellenlänge	Monochrom, z. B. blauer Chip für weiße LEDs	Selten
Schwerpunktwellenlänge	Selten	Nein
Winkelcharakteristik	Nur im Labor	Labor und Pilotlinien

Tabelle 1: Übersicht über Messgrößen für LEDs und OLEDs

Würden die Bins der LEDs nur für die Einzel-LEDs bestimmt werden, so würden sich für die Module mit mehreren LEDs - durch die Vielzahl möglicher Kombinationen - mehr Bins ergeben. Daher wird das Binning durch das gleichzeitige Messen und Zusammenfassen aller LEDs vereinfacht. Hierzu müssen entweder alle LEDs zeitgleich betrieben oder ihre einzeln gemessenen Spektren mittels einer Software kombiniert werden, um daraus die farb- und photometrischen Größen abzuleiten.

Da nun die Bestromung in die Messung einfließt, kann der für viele Endkunden bedeutsame Parameter Lumen/Watt für das Binning herangezogen werden.

Aufgrund ihrer Größe und Lichtleistung erfordert die Prüfung ganzer Module größere Ulbricht-Kugeln mit einem Durchmesser von 250 bis 1000 mm. Ansonsten folgt der Testablauf dem in den vorstehenden Abschnitten beschriebenen Verfahren.

OLED-Test

Ähnlich verhält es sich bei optischen Messungen in der noch recht jungen Massenerstellung von OLEDs. Die größere lichtemittierende Fläche macht zur Messung des Lichtstroms in 2π -Konfiguration größere Ulbricht-Kugeln notwendig. Die Leuchtdichte wird mit Einkoppeloptiken gemessen, die zwar in der klassischen LED-Fertigung ungewöhnlich, bei Tests in der Displayherstellung jedoch allgemein üblich sind. Auch zur Messung der Leuchtdichthehomogenität sowie der Winkelcharakteristik kann auf Display-Messgeräte zurückgegriffen werden.

Verfahren für optische Messungen sind bisher in der OLED-Herstellung noch die Ausnahme. Module verschiedener Hersteller weisen jedoch auf allgemeingültige Eigenschaften hin, deren Messung hilfreich sein könnte [2]. **Tabelle 1** listet Eigenschaften auf, die in ausgereiften Fertigungslinien gemessen werden könnten.

Dieser Artikel ist ein ins Deutsche übersetzter Auszug aus dem englischen Original „Handbook of LED and SSL Metrology“ von Günther Leschhorn und Richard Young. Weitere Informationen finden Sie unter www.instrumentsystems.com/handbook.

Kontakt

Dr. Günther Leschhorn
 Leiter Produktmanagement
 Instrument Systems GmbH
 Neumarkter Str. 83
 81673 München
 Tel. +49 (0)89 454943-0
 Fax +49 (0)89 454943-11
info@instrumentsystems.com
www.instrumentsystems.com