# Verhalten von Farbproben mit Hochleistungs-LEDs

#### Robert Burdick<sup>1</sup>, Udo Krüger<sup>2</sup> und Klaus Bobey<sup>1</sup>

<sup>1</sup> HAWK – Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst, Fakultät Naturwissenschaften und Technik, Von-Ossietzky-Straße 99, D-37085 Göttingen, email: burdick@hawk-hhg.de

<sup>2</sup> TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Werner-von-Siemens-Straße 10, D-98693 Ilmenau, Germany, email: udo.krueger@technoteam.de

#### 1. Einleitung

Mit einem sich ca. alle vier Jahre verdoppelnden externen Wirkungsgrad, sind mit Lumineszenzdioden (LEDs) Farbproben mit einer guten Homogenität und Stabilität, bei hoher Leuchtdichte und Farbsättigung realisierbar. Mögliche Anwendungen sind z.B. der Vergleich von Messsystemen, die Ermittlung von Korrekturfaktoren für die Leuchtdichte- und Farbmesstechnik, die Qualitätskontrolle von Systemen, die in [1] vorgestellte Kalibrierung von Farbkameras oder die in [2] vorgestellte Schätzung der spektralen Empfindlichkeit von Bildsensoren.

LEDs haben als Festkörperstrahlungsquellen grundsätzlich andere Eigenschaften als Temperaturstrahler. Wie in [3] dargestellt besitzen LEDs neben einer schmalbandigen spektralen Verteilung eine große mechanische Variabilität und Stabilität sowie eine hohe Lebensdauer. Der zurzeit bei 10 % liegende Wirkungsgrad kann theoretisch bis zu 100 % betragen, mit einer dementsprechend geringen Wärmeentwicklung. Dies hat zu einer großen und stetig steigenden Verbreitung geführt, und eine Vielzahl von LED-Herstellern sind am Markt (siehe Anhang).

### 2. Aufbau und Eigenschaften von LEDs

Es ist eine große Anzahl unterschiedlicher Gehäuseformen am Markt erhältlich, wobei zurzeit für das 5-mm-Gehäuse die größte Auswahl an verfügbaren Wellenlängen erhältlich ist.



Abbildung 1: Aufbau und Energieband-Ortsdiagramm einer roten GaAlAs-LED im 5-mm-Gehäuse

Der externe Wirkungsgrad lässt sich als das Produkt aus dem optischen Wirkungsgrad und dem internen Wirkungsgrad  $\eta_{ext} = \eta_{Opt} \cdot \eta_{Int}$  auffassen. Dabei beschreibt  $\eta_{Opt}$  die Verluste beim Austritt des erzeugten Lichts aus dem Gehäuse. Aufgrund des hohen Brechungsindex des Halbleitermaterials tritt nur ein Teil des erzeugten Lichts aus, was  $\eta_{Opt}$  auf ca. 12 % einschränkt. Optimierte Varianten, z.B. von Cree Inc. und Lumileds Lighting zeigen, dass bei weißen LEDs mit Leuchtstoffen ein  $\eta_{Opt} > 25$  % erreichbar ist. Der interne Wirkungsgrad  $\eta_{Int}$  beschreibt die Verluste durch nichtstrahlende Übergänge. Eine hohe Ladungsträgerkonzentration in Bereichen mit niedriger Lebensdauer der strahlenden Übergänge ist eine Voraussetzung für einen hohen internen Wirkungsgrad. Dies wird mit einer entsprechenden Strukturierung der aktiven Zone (band gap engineering) erreicht. Üblich sind Heteround Doppel-Heterostrukturen mit zusätzlichen Stromverteilungs- und Blockierschichten. Teilweise finden auch Mehrfachquantentöpfe Einsatz.

Der interne Wirkungsgrad und die spektrale Verteilung weisen je nach Halbleiterverbindung eine mehr oder weniger große Abhängigkeit von der Temperatur der Sperrschicht auf. In der folgen Tabelle sind Richtwerte für die dominante Wellenlänge und den Strahlungsfluss gegeben.

Halbleiterverbindung	Wellenlängenbereich in [nm]	$\Delta\lambda_d/T_j$ in nm/K	$\frac{ \Delta \Phi/T_j }{\text{in \%/K}}$
GaAlAs	630 – 870 (NIR) rot	ca. 0,3	ca. 1,5
GaAlInP	555 – 650 gelb - rot	0,05 - 0,1	0,9-0,7
InGaN	(UV) 400 – 525 blau - grün	ca0,02	ca. 0,3

Mit Halbwertsbreiten von einigen 10 nm und Abständen von 20 bis 30 nm zwischen den verfügbaren Peakwellenlängen sind im gesamten sichtbaren Spektralbereich von 380 nm bis 780 nm LEDs verfügbar. In der xy-Farbtafel zeigt sich am geringen Abstand vom Spektralfarbenzug eine hohe Farbsättigung. Lediglich im Grünen führt die Halbwertsbreite zu größeren Abständen.

Das am häufigsten implementierte Verfahren zur Erzeugung weißen Lichts mit einer LED ist die Mischung einer blauen LED mit einem gelben oder roten Leuchtstoff. Mit diesem Verfahren lassen sich auch farbige LEDs auf der Purpurgeraden mischen.





Abbildung 2: Spektrale Verteilungen und xy-Komponenten für eine Auswahl von LEDs im 5-mm-Gehäuse

Bei einer Betrachtung des externen Wirkungsgrades von LEDs über der Wellenlänge zeigt sich, dass im Grünen der Wirkungsgrad um mehr als das 10fache abfällt. Beim Halbleitermaterial GaAlInP fällt  $\eta_{ext}$  aufgrund einer Zunahme der nichtstrahlenden Übergänge (Übergang zum indirekten HL unterhalb von ca. 555 nm). Bei InGaN schränkt die Höhe des In-Anteils zurzeit die praktische Nutzbarkeit oberhalb von ca. 525 nm ein.



Abbildung 3: Externer Wirkungsgrad von LEDs im sichtbaren Spektralbereich

## 3. Verhalten von LEDs

Der optische Aufbau einer LED im 5-mm-Gehäuse mit einem Reflektor und einer Epxydharzlinse führt zu einer im Nahfeld je nach Wellenlänge (Farbe) sehr unterschiedlichen Abstrahlcharakteristik. Insbesondere bei den blauen und grünen LEDs sind die Strahlungskeulen des Dies und des Reflektors gut voneinander zu unterscheiden. Fertigungstoleranzen z.B. bei der Positionierung des Dies führen auch bei LEDs eines Typs zu Unterschieden in der Abstrahlcharakteristik im Nahfeld.



Abbildung 4: Abstrahlcharakteristiken 5 schmalbandiger LEDs und 8 roter LEDs

Für eine Homogenisierung oder Farbmischung ist zwischen einer hohen Effizienz und einer guten Homogenität abzuwägen. Die unterschiedlichen Verteilungen im Nahfeld erschweren den Entwurf einer abbildenden Optik. So erschweren z.B. die Abstrahlcharakteristik, die kleine Bauform und die Fertigungstoleranzen den Entwurf einer effizienten Beleuchtung nach Köhler. Ein Aufbau mit Ulbrichtkugel ist bei großen Kugeldurchmessern nahezu unabhängig von der Abstrahlcharakteristik der LEDs, mit dem Nachteil einer sehr kleinen Effizienz.



Eine materialabhängige Produktstabilität der LEDs erfordert für messtechnische Zwecke eine Klassifikation. Bei schmalbandigen LEDs streut innerhalb einer Produktionscharge insbesondere die Intensität um ein bis einige 10 %, während die spektrale Verteilung lediglich im Bereich einiger nm streut. Zwischen zwei Chargen sind die Unterschiede um einiges größer.



Abbildung 6: Verteilung der relativen Intensität über der Schwerpunktwellenlänge für GaAlInP-LEDs und der xy-Koordinaten 21 weißer LEDs

Für einen stabilen und reproduzierbaren Betrieb ist die Alterung der LEDs zu beachten. Diese unterscheiden sich je nach Halbleiterverbindung und Herstellungsqualität. Bei Untersuchungen zur Alterung bei Raumtemperatur und Nennstrom zeigen einige InGaN- und GaAlInP-LEDs einen sehr geringen Abfall der Intensität. GaAlAs-LEDs weisen dagegen eine so hohe Alterung auf, so dass sie nur eingeschränkt nutzbar sind. Insbesondere bei InGaN-LEDs sind aber auch Typen mit hoher Alterung vorzufinden.



Abbildung 7: Alterung von vier LED-Typen aus unterschiedlichen Halbleitermaterialien

Ein Anstieg des Durchlassstromes einer LED führt zu einem Anstieg der Temperatur. Aufgrund der negativen Temperaturabhängigkeit sinkt die Schwerpunktwellenlänge der anregenden blauen InGaN-LED. Die führt insbesondere zu einer kleineren y-Komponente. Die Schwerpunktwellenlänge des Leuchtstoffes weist dagegen keine wesentliche Temperaturabhängigkeit auf. Aufgrund der von der anregenden Wellenlänge abhängigen Effizienz des Leuchtstoffes ändert sich allerdings das Verhältnis der Intensitäten der anregenden blauen LED und des Leuchtstoffes.



Abbildung 8: Stromabhängigkeit der Schwerpunktwellenlängen der anregenden blauen LED und des Leuchtstoffes, der spektralen Verteilung und der xy-Koordinaten einer weißen LED

#### 4. Systemrealisierung langzeitstabiler Farbproben



Bei den in [3] realisierten Strahlungsquellen für die Leuchtdichte- und Farbmesstechnik werden für eine geringe Alterung optimierte Betriebsbedingungen realisiert. Ein PI-Regler stabilisiert die Temperatur der LEDs mit einem Peltierelement, welches mit möglichst geringem thermischem Widerstand an die LED gekoppelt ist. Für die eingesetzten LEDs werden Typen mit geringer Alterung selektiert und die verbleibenden Variationen der Intensität geeignet ausgeregelt.



Abbildung 9: Konzept der Temperatur- und Intensitätsregelung und Prinzipskizze der thermischen Kopplung

Der optische Aufbau realisiert eine homogen ausgeleuchtete Fläche von 27 mm Durchmesser, deren Intensität über eine Betriebsdauer von mehreren 100 h eine maximale Abweichung von 1 % zeigt. Die dominante Wellenlänge schmalbandiger LEDs zeigt über denselben Zeitraum eine maximale Abweichung von 0,1 nm und die xy-Komponenten weißer LEDs eine maximale Abweichung von 0,001. Diese Werte werden spätestens 5 Minuten nach dem Einschalten erreicht, was einen praktikablen Einsatz ermöglicht.



Abbildung 10: Langzeitmessung einer Farbprobe mit weißen InGaN-LEDs.

## 5. Zusammenfassung

Die Untersuchungen an kommerziell verfügbaren Hochleistungs-LEDs im 5-mm-Gehäuse und die Realisierung von langzeitstabilen Farbproben für die Leuchtdichte- und Farbmesstechnik zeigen die Einsetzbarkeit von GaAlInP- und InGaN-LEDs als Farbproben.

Halbleiter- verbindung	Wellenlängenbereich in [nm]	Temperatur- verhalten	Alterung	$\eta_{ext}$	Produkt- stabilität
GaAlAs	630 – 870 (NIR) rot	-	-	++	
GaAlInP	555 – 650 gelb – rot	+ -	+	+ -	++
InGaN	(UV) 400 – 525 blau – grün	++	++	+	+ -

## 6. Literatur

- [1] Büttner, C.: Digital-Kamera mit Echtzeit-Farbmanagement für medizinische Anwendungen; Masterarbeit HAWK FH HHG, Fakultät N, 2004
- [2] DiCarlo J.M., Montgomery G.E., Trovinger S.W.: Emissive chart for imager calibration; 12th Color Imaging Conference, pp. 295-301, 2004
- [3] Burdick, R.: Langzeitstabile und homogene Strahlungsquelle mit Lumineszenzdioden für die Leuchtdichte- und Farbmesstechnik; Masterarbeit, HAWK FH HHG, Fakultät N, 2006