

# Entwurf und Aufbau eines UV-LED Moduls mit hoher Leistungsdichte

*Christian Herbold<sup>1</sup>, Marc Schneider<sup>2</sup>, Manfred Scholdt<sup>1</sup>, Cornelius Neumann<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Lichttechnisches Institut*

*<sup>2</sup>Institut für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik*

*Karlsruher Institut für Technologie, Kaiserstrasse 12, 76131 Karlsruhe*

## Überblick

Die Grenzen des technologisch Machbaren auszuloten, war das Ziel dieses Projektes, bei dem ein skalierbares Hochleistungs-UV-LED-Modul entworfen und aufgebaut wurde. Dabei fand neben der Auswahl geeigneter LED-Chips vor allem das thermische Management des Moduls besondere Berücksichtigung. Die erreichte optische Flächenleistungsdichte von mehr als  $25 \text{ Wcm}^{-2}$  bei einer Wellenlänge von 395 nm übersteigt die Leistungsfähigkeit kommerziell am Markt erhältlicher Module deutlich.

## Einführung

Höhere Energieeffizienz und längere Lebensdauer sind bekannte Vorteile der LED-Technologie gegenüber herkömmlichen Glühlampen und Gründe für den zunehmenden Einsatz von Leuchtdioden in der Allgemeinbeleuchtung. Daneben ermöglicht die LED kurze Schaltzeiten, bietet ein schmalbandiges Spektrum und ist unempfindlich gegenüber Erschütterungen. Diese Eigenschaften sollen zukünftig nicht nur für Anwendungen im sichtbaren Spektralbereich Vorzüge bringen, sondern durch leistungsfähige LEDs mit Emission im Ultravioletten Einzug in den kurzwelligeren Spektralbereich halten. Speziell in industriellen UV-Strahlersystemen, welche heute mit Quecksilberdampf-Mitteldruck-, -Hochdruck- und -Höchstdrucklampen arbeiten, könnten die Vorteile der LED genutzt werden.

Der Entwurf und Aufbau des LED-Moduls soll die unter Laborbedingungen gegenwärtig erreichbare Leistungsfähigkeit von Leuchtdioden im UV demonstrieren. Durch die hohe Leistungsdichte ist das Modul in der Lage, neue Anwendungsbereiche für LEDs zu erschließen. Grundsätzlich kann es jedoch auch als Basis für Entwicklungen von Hochleistungs-LED-Modulen in anderen Spektralbereichen dienen.

Ein Beispiel für den gewinnbringenden Einsatz von UV-LEDs ist die Fertigung von optischen Datenträgern wie wiederbeschreibbaren DVDs oder Blu-ray Discs, bei welcher Polycarbonatscheiben durch UV-aushärtenden Klebstoff zusammengefügt werden [1]. Die aushärtende Strahlung muss dabei in einem engen, definierten Wellenlängenbereich liegen, um zum einen den Klebstoff zu vernetzen, zum anderen jedoch die umliegenden Materialien nicht zu schädigen. Stand der Technik, um das schmalbandige Spektrum zu erreichen, ist die Filterung der Strahlung einer Gasentladungslampe, die zu einer Verringerung der Effizienz führt. Weiterhin benötigen Gasentladungslampen eine Aufheizzeit von einigen Minuten, weshalb ein getakteter Betrieb, wie er durch den Herstellungsprozess erwünscht ist, nicht möglich ist. Durch die Wärmestrahlung der Lampe ist es zudem notwendig den bestrahlten Kunststoff vor Hitze zu schützen. Der Einsatz von Leuchtdioden bietet daher für diesen Anwendungsfall mehrere Vorteile. So muss die von LEDs emittierte Strahlung, dank schmalen Spektrum, nicht gefiltert werden und kann dem getakteten Herstellungsprozess folgend nur dann aktiviert werden, wenn sie im Prozess benötigt wird. Durch den geringen Anteil an infraroter Strahlung ist ein Schutz der bestrahlten Oberfläche vor Hitze nicht erforderlich. Mit der LED ist deshalb eine effiziente Alternative zum Einsatz konventioneller Gasentladungslampen gegeben.

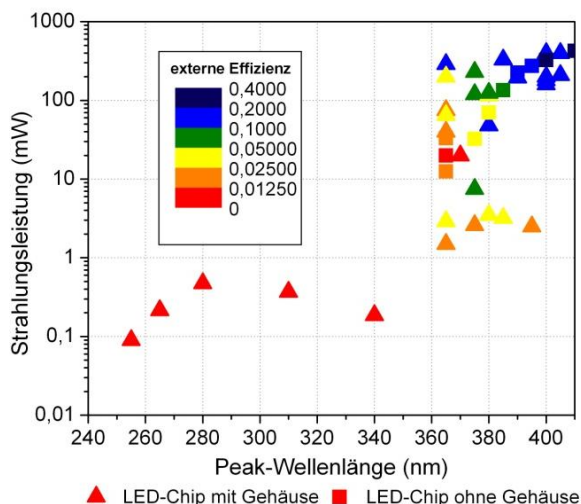
Der Entwurf umfasst neben der Auswahl geeigneter LED-Chips und der optischen Auslegung, vor allem das thermische Management des Moduls. Es optimiert den Abtransport der Wärme, indem geeignete Materialien und Aufbautechniken verwendet werden. Für den Aufbau des Moduls kommen Die- und Wirebonding zum Einsatz. Im Anschluss erfolgen die thermische sowie die spektrale Vermessung und die Bewertung der Ergebnisse.

## Auswahl der LEDs

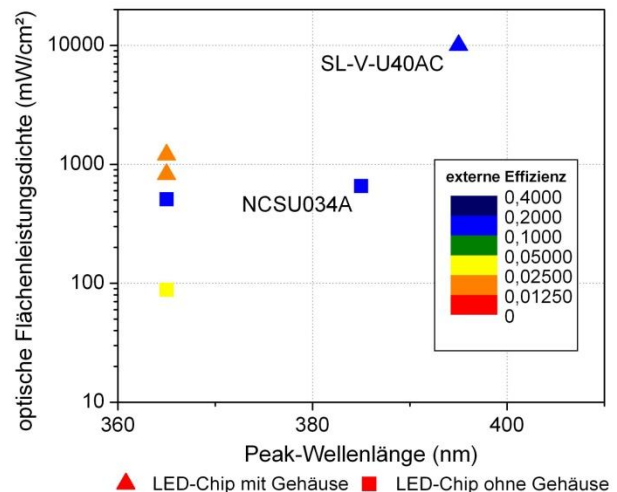
Ausgehend von den Anforderungen werden die im LED-Modul verbauten Leuchtdioden ausgewählt. Dabei sind vor allem die Leistung und die Wellenlänge der emittierten Strahlung zu berücksichtigen. Um eine hohe Leistungsdichte zu erreichen, ist weiterhin zu beachten wie eng die LEDs auf dem Schaltungsträger platziert werden können.

Leuchtdioden im ultravioletten Spektralbereich, das heißt bei Wellenlängen kleiner 400 nm, sind in sehr unterschiedlichen Leistungsklassen verfügbar. Die typischen Strahlungsleistungen auf dem Markt befindlicher gehäuseter und ungehäuseter LEDs in Abhängigkeit der Wellenlänge ihrer Strahlung ist in Abbildung 1 dargestellt.

Kurzwellig emittierende Leuchtdioden im UV-C Bereich sind ab einer Wellenlänge von 255 nm erhältlich. Die Strahlungsleistungen liegen in diesem Bereich jedoch unterhalb von 1 mW mit einer externen Effizienz von weniger als 1,25 %. Erst bei LEDs mit Emissionswellenlängen von 365 nm und größer wird ein deutlicher Anstieg der Strahlungsleistung erreicht. Des Weiteren ist festzustellen, dass die erreichbare externe Effizienz oberhalb von 365 nm ebenso ansteigt. Diese Eigenschaften kommen durch den Einsatz effizienter Materialsysteme zustande, welche auf Galliumnitrid mit einer Bandlücke von 3,4 eV (entspricht einer Wellenlänge von 365 nm) basieren. Daraus folgt, dass zum Erreichen möglichst hoher Strahlungsleistung und Effizienz im ultravioletten Spektralbereich, nur Leuchtdioden mit Emissionswellenlängen ab 365 nm geeignet sind.



**Abbildung 1 - Typische Strahlungsleistung und Peak-Wellenlänge sowie externe Effizienz verfügbarer Leuchtdioden im Wellenlängenbereich zwischen 255 nm und 410 nm (Stand 2010)**



**Abbildung 2 - Erreichbare optische Flächenleistungsdichte verschiedener LED-Typen in der Vergleichskonfiguration**

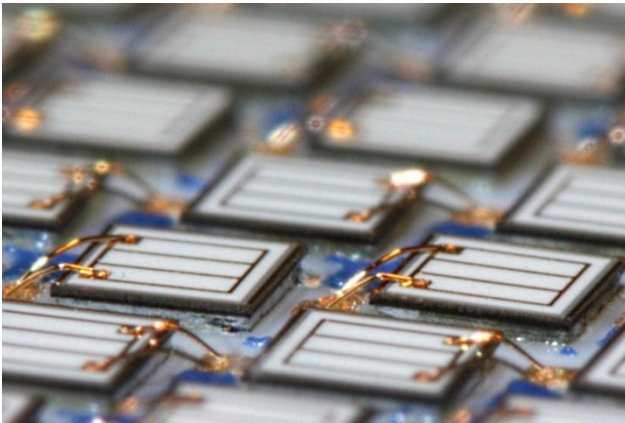
		Nichia NCSU034A	Semileds SL-V-U40AC
<b>Kenndaten</b>			
Wellenlänge (nm)	min / max	380 / 390	390 / 395
Strahlungsleistung (mW)	min / typ / max	350 / 370 / 390	250 / 275 <sup>*)</sup> / 300
Strom zur Bereitstellung der typ. Strahlungsleistung (mA)		500	350
Vorwärtsspannung (V)	max	4,3	3,8
el. Leistung zur Bereitstellung der typ. Strahlungsleistung (mW)	max	2.150	1.330
externe Effizienz	min	0,16	0,19
Abmessungen (mm x mm x mm)		6,8x6,8x2,1	1,07x1,07x0,145
<b>Modulkonfiguration</b>			
Packungsdichte (cm <sup>-2</sup> )		1,88	40,1
optische Flächenleistungsdichte (mWcm <sup>-2</sup> )	min / <b>typ</b> / max	658 / <b>695</b> / 733	10.025 / <b>11.027</b> <sup>*)</sup> / 12.030
elektrische Flächenleistungsdichte (mWcm <sup>-2</sup> )	max	4.042	53.333

<sup>\*)</sup> berechneter Mittelwert

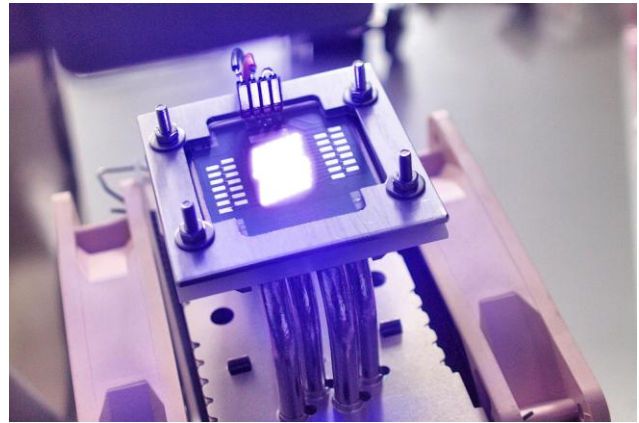
**Tabelle 1 - Kenndaten und Modulkonfigurationen für LEDs mit Wellenlängen bei 390 nm**

Die Auswahl der geeigneten Leuchtdioden erfordert den direkten Vergleich der Leistungsfähigkeit in der möglichen Modulkonfiguration. Dabei ist die Bauform der LED zu berücksichtigen welche bestimmt, wie dicht die Dioden auf dem Schaltungsträger platziert werden können. Eine gehäute LED benötigt weitaus mehr Platz auf dem Träger als der ungehäute LED-Chip. Zum Vergleich wird die Konfiguration so gewählt, dass zwischen den Leuchtdioden ein Abstand eingehalten wird, der als Raum für die elektrische Kontaktierung zur Verfügung steht. Als Richtmaß für diesen Abstand werden 0,5 mm angenommen. So kann die erreichbare Flächenleistungsdichte des Moduls beim Einsatz der unterschiedlichen Leuchtdioden ermittelt und als Vergleichskriterium verwendet werden.

Durch die Verwendung von Leuchtdioden mit Wellenlängen größer 365 nm kann die höhere Strahlungsleistung und bessere Gesamteffizienz von LEDs mit Emission in diesem Spektralbereich genutzt werden. Beispielhaft werden in Tabelle 1 die Kenndaten sowie die Modulkonfigurationen zweier Leuchtdioden mit Emission im Bereich von 380 nm bis 395 nm, die gehäute LED NCSU034A der Nichia Corporation und der ungehäute LED-Chip SL-V-U40AC der Semileds Corporation, verglichen. Die typische Strahlungsleistung des Semileds LED-Chips liegt mit 275 mW bei 74 % der Leistung der Nichia LED mit 370 mW. Diese Strahlungsleistung wird von der Semileds-LED bei 70 % des typischen Stroms der Nichia-LED erreicht. Durch die wesentlich geringeren Abmessungen des ungehäuten LED-Chips folgt zusätzlich eine um den Faktor 20 höhere realisierbare Packungsdichte als mit der gehäuten LED. Damit ergibt sich eine mit dem LED-Chip erreichbare optische Flächenleistungsdichte von mehr als 10 W bei typischem LED-Strom. Im Vergleich dazu sind beim Einsatz der gehäuten LED lediglich optische Flächenleistungsdichten von weniger als 1 W erreichbar. Die Effizienzen der LEDs liegen bei Werten von 16 % (NCSU034A) und 19 % (SL-V-U40AC). Neben diesen beiden Ausführungen sind in Abbildung 2 weitere, für kürzere Wellenlängen realisierbare, Modulkonfigurationen dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die leistungsstärkste Konfiguration unter den verfügbaren LEDs bei Wellenlängen kleiner 400 nm mit dem SL-V-U40AC erzielt werden kann. Deshalb wird dieser LED-Chip für den Modulaufbau ausgewählt.



**Abbildung 3 – LEDs auf dem Schaltungsträger nach dem Chip- und Drahtbonden**



**Abbildung 4 – LED-Modul montiert auf CPU-Kühlkörper während den thermischen Messungen**

## **Auslegung und Aufbau**

Die Anordnung der LEDs auf dem Schaltungsträger erfolgt in Form eines Rhomboids, die eine enge Platzierung der Chips erlaubt. Der Abstand zwischen den einzelnen LED-Chips beträgt  $300\text{ }\mu\text{m}$  beziehungsweise  $580\text{ }\mu\text{m}$  wenn ein Bondpad dazwischen liegt. So wird gewährleistet, dass genügend Platz zum Ausgleich von Toleranzen sowie für das Bondwerkzeug zum Setzen der Wirebonds besteht. Für das Modul werden 98 LED-Chips auf einer Fläche von  $20\text{ mm} \times 11\text{ mm}$  vorgesehen. Die elektrische Verschaltung erfolgt in Reihe wobei 14 Stränge von jeweils 7 LEDs über Anschluss pads separat betrieben werden können. Für den Betrieb des gesamten Moduls werden die Anschlüsse gebrückt, so dass alle 98 LEDs in Reihe verschaltet sind.

Das Schaltungslayout wird in Dickschichttechnik auf einen Schaltungsträger aus Aluminiumoxid der Dicke  $0,63\text{ mm}$  übertragen. Dabei wird Silber-Palladium-Dickfilmpaste verwendet. Der gesamte Schaltungsträger hat Abmessungen von  $40\text{ mm} \times 38\text{ mm}$ . Die elektrische Anbindung der LED-Chips erfolgt in zwei Schritten. Zunächst werden beim Diebonden die LED-Chips rückseitig mit dem Schaltungsträger verbunden, bevor beim Drahtbonden ein weiterer elektrischer Kontakt hergestellt wird.

Der SL-V-U40AC besitzt zwei Bondpads auf der Oberseite für die Kontaktierung der Kathode. Diese werden durch je einen  $30\text{ }\mu\text{m}$  dicken Golddraht mit einem Bondpad auf dem Schaltungsträger verschweißt. Für den Aufbau des Moduls werden Wedge-Wedge Bonds im Ultraschall-Verfahren eingesetzt. Die Bondkontakte der insgesamt für das Modul benötigten 392 Wedge-Bonds werden manuell platziert und automatisiert ausgeführt.

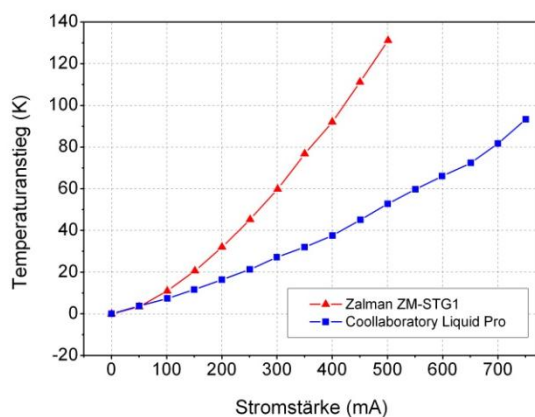
Das Diebonden erfüllt neben der mechanischen Befestigung des LED-Chips am Schaltungsträger weitere Aufgaben. Dadurch, dass sich die Anode auf der Rückseite des LED-Chips befindet und die Wärme über das Substrat des Chips an den Schaltungsträger abtransportiert wird, erfolgt mit dem Diebonden auch die elektrische und thermische Verbindung zwischen LED-Chip und Schaltungsträger. Nachdem in einem ersten Prototyp die LEDs mittels eines silbergefüllten, thermisch aushärtenden Klebstoffs angebunden werden [2], folgt der Aufbau des LED-Moduls mit reflow-gelöteten Chips. Das unterschiedliche thermische Ausdehnungsverhalten des Schaltungsträgers, der LED-Chips, sowie deren Anbindung führen zu mechanischen Spannungen zwischen den Materialien. Die geringere Elastizität der Lotverbindung im Vergleich zur Klebefuge hat zwar zur Folge, dass diese Spannungen schlechter abgebaut werden, jedoch wird durch die höhere Wärmeleitfähigkeit des SnAgCu-Lotes die thermische Anbindung der LEDs erheblich verbessert. Im Ver-

gleich zum im ersten Prototyp verwendeten silbergefüllten Klebstoff mit einer vom Hersteller angegebenen Wärmeleitfähigkeit von  $5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , besitzt das Lot mit  $65 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  eine um mehr als den Faktor 10 höhere Wärmeleitfähigkeit. Abbildung 3 zeigt die gelöteten und mit Golddrähten kontaktierten LED-Chips auf dem Schaltungsträger aus Keramik. Der in den Zwischenräumen aufgetragene blaue Isolationsdruck dient als Lötstopp und verhindert die Benetzung der Bondpads mit Lot während des Lötprozesses und ermöglicht dadurch das Verschweißen der Drahtbonds.

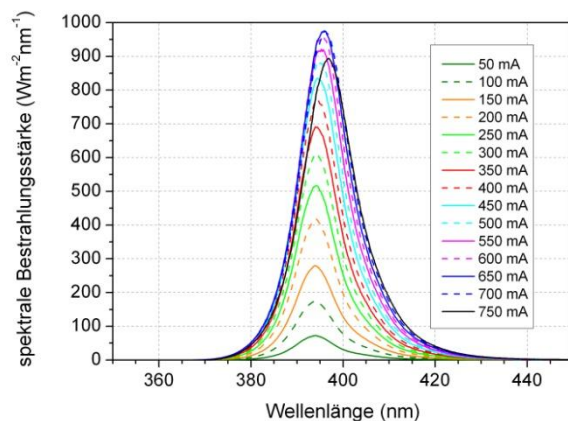
Das vollständig kontaktierte LED-Modul wird zur Wärmeabfuhr auf einen für Hochleistungsprozessoren in PCs ausgelegten, durch Heatpipes angebundenen und aktiv belüfteten Kühlkörper (Noctua NH-U12P) montiert (Abbildung 4). Der Keramik-Schaltungsträger ist mit Hilfe eines Anpressrahmens auf die polierte Montageplatte aus Kupfer geklemmt. Der Wärmeübergang an dieser Grenzfläche zwischen Keramik und Metall ist bedeutend für die Entwärmung der LEDs. Deshalb wird die thermische Anbindung sowohl mittels silbergefüllter Wärmeleitpaste (Zalman ZM-STG1) als auch mittels einer bei Raumtemperatur flüssigen Gallium-basierten Metalllegierung untersucht (Coolaboratory Liquid Pro) [3]. Die Wärmeleitfähigkeit der Paste beträgt  $4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , während die flüssige Metalllegierung eine Wärmeleitfähigkeit von  $32,6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  aufweist.

## Charakterisierung

Zur Beurteilung der thermischen Anbindung des LED-Moduls an den Kühlkörper wird mittels Wärmebildkamera die Temperatur der LED-Chips in Abhängigkeit der Stromstärke gemessen [4]. Abbildung 5 zeigt den Anstieg der LED-Temperatur mit der Stromstärke gegenüber der Umgebungstemperatur von  $23^\circ\text{C}$  für die Anbindung mit Wärmeleitpaste und Metalllegierung. Der Verlauf der Kurven macht den Unterschied in der Wärmeleitfähigkeit der Materialien deutlich. Mit der Wärmeleitpaste wird bei einer Stromstärke von 500 mA eine Chip-Temperatur von 131 K über der Umgebungstemperatur gemessen. Das ist bereits mehr als die vom LED-Hersteller angegebene maximal zulässige Temperatur von  $125^\circ\text{C}$ . Die blaue Kurve der Temperatur des durch die flüssige Metalllegierung angebundenen Moduls zeigt dagegen einen flacheren Verlauf. Bei einer Stromstärke von 500 mA ergibt sich in diesem Fall eine LED-Temperatur von 53 K über der Umgebungstemperatur. Selbst beim Betrieb des LED-Moduls mit einer Stromstärke von 750 mA wird mit einer absoluten LED-Temperatur des heißesten Chips von  $123^\circ\text{C}$  die zulässige Maximaltemperatur nicht überschritten. Die Vorwärtsspannung des Moduls beträgt dabei 312 V woraus eine elektrische Eingangsleistung von 234 W folgt.



**Abbildung 5 – Temperaturanstieg der LEDs gegenüber der Umgebungstemperatur in Abhängigkeit der Stromstärke für zwei unterschiedliche Materialien zur Kühlkörperanbindung**



**Abbildung 6 – Spektrale Bestrahlungsstärke beim Betrieb des LED-Moduls mit verschiedenen Stromstärken**

Bei der optischen Charakterisierung wird mit einem Doppel-Monochromator Scanning-Spektrometer Spectro 320D von Instrument Systems zum einen die spektrale Verteilung der emittierten Strahlung des LED-Moduls ermittelt, zum anderen wird die optische Flächenleistungsdichte bestimmt. Dabei wird jeweils auch die Abhängigkeit der Größen von der Stromstärke, mit der das LED-Modul betrieben wird, und damit der Chip-Temperatur berücksichtigt. Zunächst wird die vom Spektrometer am Diffusorfenster im Abstand von 23,5 mm von der LED-Oberfläche aufgezeichnete spektrale Bestrahlungsstärke betrachtet. Diese ist in Abbildung 6 für den Wellenlängenbereich zwischen 350 nm und 450 nm und die unterschiedlichen Stromstärken dargestellt. Die Peak-Wellenlänge liegt im Bereich zwischen 394 nm bei 50 mA und 396 nm bei 750 mA. Ihre Verschiebung mit steigender Stromstärke zu größeren Wellenlängen erfolgt aufgrund der Temperaturzunahme. Die spektrale Halbwertsbreite nimmt dabei Werte zwischen 10,3 nm und 13,5 nm an. Erwartungsgemäß steigt die spektrale Bestrahlungsstärke zunächst mit Erhöhung der Stromstärke an. Sie erreicht ihr Maximum bei 700 mA, um bei höheren Stromstärken aufgrund des Temperaturanstiegs und der damit sinkenden Effizienz wieder abzufallen. Die maximale Bestrahlungsstärke wird mit  $1,55 \text{ W cm}^{-2}$  im Betrieb mit 700 mA gemessen.

Um aus der gemessenen Bestrahlungsstärke am Diffusorfenster die Strahldichte und damit die optische Flächenleistungsdichte des LED-Moduls zu bestimmen, wird mit Hilfe der Raumwinkelprojektion ermittelt, welcher Anteil der vom LED-Modul emittierten Strahlung das Diffusorfenster erreicht. Näherungsweise werden dabei die emittierende Fläche als Rechteck und das Diffusorfenster als Punkt im Abstand von  $h = 23,5 \text{ mm}$  mittig über dieser Fläche angenommen. Mit den Ausdehnungen  $a$  und  $b$  des Moduls in die beiden Raumrichtungen  $x$  und  $y$  sowie dem Einheitsraumwinkel  $\Omega_0$  berechnet sich die Strahldichte  $L_e$ . Sie folgt mit der Annahme, dass sie als konstant angenommen werden kann, da die LED-Chips als Lambert-Strahler in den Halbraum emittieren, aus der Bestrahlungsstärke  $E_e$  gemäß [5] zu

$$L_e = E_e \left( \int_{x=0}^a \int_{y=0}^b \frac{h^2}{(x^2 + y^2 + h^2)} dx dy \Omega_0 \right)^{-1}.$$

Für das LED-Modul ergibt sich daraus bei einer Stromstärke von 700 mA eine in den gesamten Halbraum emittierte Strahlung von  $27,3 \text{ W cm}^{-2}$ .

Zur Überprüfung der Ergebnisse aus der Berechnung der Raumwinkelprojektion wird das LED-Modul in einem Nahfeld-Goniophotometer RiGO801 des Herstellers TechnoTeam vermessen, um die Abstrahlcharakteristik zu bestimmen. Die Bestrahlungsstärken in unterschiedlichen Abständen vom Modul liefert das Spektrometer. In einem Simulationsmodell in ORA LightTools werden die gewonnenen Messdaten aus dem Nahfeld-Goniophotometer und dem Spektrometer zusammengeführt und damit auf die Strahlungsleistung des Moduls geschlossen. Die so ermittelte optische Flächenleistungsdichte stimmt mit dem Ergebnis der Raumwinkelprojektion gut überein. Sie weist lediglich einen um den Faktor 1,20 höheren Wert auf.

## Zusammenfassung und Ausblick

Aus den Datenblattangaben des LED-Herstellers und der möglichen Packungsdichte wurde für das LED-Modul eine optische Flächenleistungsdichte von maximal  $12,0 \text{ W cm}^{-2}$  im Betrieb mit einer Stromstärke von 350 mA erwartet. Durch die Lötverbindung der LEDs mit dem Keramik-Schaltungsträger und dessen Anbindung an den Kühlkörper mittels einer flüssigen Metalllegierung



wurde die Wärmeabfuhr so verbessert, dass das Modul mit einer Stromstärke von 700 mA betrieben werden kann, ohne die zulässige Grenze der LED-Temperatur von 125°C zu überschreiten. Die optische Flächenleistungsdichte beträgt dann  $27,3 \text{ Wcm}^{-2}$  bei einer Peak-Wellenlänge von 396 nm. Typische kommerziell erhältliche UV-LED-Module zur Lack- und Klebstoffaushärtung erreichen Werte von maximal  $8 \text{ Wcm}^{-2}$ .

In einem nächsten Schritt soll die Wärmeabfuhr durch einen leistungsfähigen, flüssigkeitsgekühlten Mikrokanalkühler realisiert werden. Der Ersatz des Keramik-Schaltungsträgers durch Aluminium verspricht neben der Kostenersparnis eine zehnfach höhere Wärmeleitfähigkeit. Erste Testsubstrate werden bereits aufgebaut. Zur Verbesserung der optischen Auskopplung ist weiterhin ein Material zur Brechungsindexanpassung zwischen Halbleiter der LED und der Umgebungsluft einsetzbar. Eine weitere Steigerung der optischen Leistung ist deshalb sowohl durch diese thermischen als auch optischen Weiterentwicklungen des LED-Moduls zu erreichen.

## Literatur

- [1] Tom Molamphy, "New Light for Adhesive Curing", Phoseon Technology, Hillsboro, OR, online verfügbar unter [http://www.phoseon.com/whitepapers/Phoseon\\_New\\_Light\\_for\\_Adhesive\\_Curing.pdf](http://www.phoseon.com/whitepapers/Phoseon_New_Light_for_Adhesive_Curing.pdf)
- [2] Manfred Scholdt, Christian Herbold, Marc Schneider, Cornelius Neumann, "UV-LED Module Design with Maximum Power Density", OSA Technical Digest (CD), Optical Society of America, 2010, paper SOWC4.
- [3] Marc Schneider, Benjamin Leyrer, Christian Herbold, Klaus Trampert, Jürgen J. Brandner, "Thermal Improvements for High Power UV LED Clusters", Proc. 61<sup>st</sup> Electronic Components and Technology Conf. 2011, Lake Buena Vista, FL, May 2011, pp. 1636-1641.
- [4] Marc Schneider, Christian Herbold, Kay Messerschmidt, Klaus Trampert, Jürgen J. Brandner, "High Power UV-LED-Clusters on Ceramic Substrates", Proc. 60<sup>th</sup> Electronic Components and Technology Conf. 2010, Las Vegas, NV, June 2010, pp. 679-685.
- [5] Hans-Jürgen Hentschel, „Licht und Beleuchtung – Grundlagen und Anwendungen der Lichttechnik“, Heidelberg: Hüthig, 2002. – ISBN 3-7785-2817-3