



Peter Schreiber



Sergey Kudaev



Andreas Bräuer



Peter Dannberg



Dirk Michaelis



Uwe Detlef Zeitner

Einführung

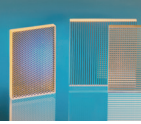
Hochleistungs-LEDs werden aufgrund ihrer hohen Lebensdauer und Effizienz klassische Lichtquellen wie Halogen- und Entladungslampen in vielen Anwendungsfeldern von der Raumbelichtung bis hin zur Display-hinterleuchtung und im Automotivbereich verdrängen. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür sind effiziente Optiken, die das Licht der LED-Chips bündeln und für die jeweilige Anwendung formen. Eine in Primär- und Sekundäroptik gegliederte, zweistufige Optik erlaubt eine flexible Auslegung effizienter Lichtquellen zur homogenen Ausleuchtung rechteckiger und runder Bereiche mit höchsten Leuchtdichten sowie die Realisierung bildgebender Strahlformer.

Primäroptik

Die Aufgabe der Primäroptik ist die Bündelung eines möglichst großen Teils des von der LED emittierten Lichts in einen von der nachfolgenden Optik akzeptierten Raumwinkelbereich. Wesentliche Designziele für die Primäroptik sind hohe Transmission und Erhaltung der Etendue, um hohe Leuchtdichten und eine optimale Refokussierbarkeit zu gewährleisten. Der Einsatz von Konzentratoroptiken bietet hierfür optimale Voraussetzungen. Das Konzentratordesign nutzt parametrische Elementmodelle basierend auf rationalen Bezier-Splines. Die Optimierung erfolgt für unterschiedliche Bewertungskriterien wie maximal nutzbare Transmission, minimale Restdivergenz und homogenes Nah- und/oder Fernfeld, zunächst global mit Splines niedriger Ordnung und dementsprechend einer geringen Anzahl variabler Parameter. Danach wird die Spline-Ordnung in einem

lokalen Optimierungsprozess schrittweise erhöht /1/. Da die Modellierung der Konzentratoren stückweise durch mehrere Splines erfolgt, werden parallel zur Optimierung der Anschluss der einzelnen Segmente justiert und mögliche Überschneidungen erkannt und korrigiert. Die Spline-Modellierung der Elemente und die Optimierungsalgorithmen sind als nutzerdefinierte Elemente und Makros in den Raytracer ZEMAX® implementiert.

Auf maximale Transmission in einen spezifizierten Divergenzbereich optimierte radialsymmetrische Konzentratoren für Dünnfilm-LED-Module (OSTAR® der Fa. OSRAM OS) mit jeweils vier 1 mm² LED-Chips zeigt Abb. 1. Der refraktiv/reflektive Konzentrator (RXI) kollimiert die Abstrahlung in einen Divergenzbereich mit 15° Vollwinkel (Abb. 1, links). Die Modellierung des Elements erfolgt durch insgesamt vier Bezierkurven bis zur 8. Ordnung. Rein brechend wirken die Flächen 1 und 4, während Fläche 2 als metallisierter Spiegel und Fläche 3 sowohl totalreflektierend (TIR) als auch brechend wirken. Die mit A und B gekennzeichneten Flächen dienen zur Halterung des Elements. Ein Beispiel für einen einfachen TIR-Konzentrator mit 40° Restdivergenz ist in Abb. 1 (rechts) dargestellt. Fernfeldmessungen an diamantgedrehten Mustern (Abb. 2) ergaben ca. 83 % eingeschlossene Leistung im Divergenzbereich 15° (Designwert 87 %) bei einer Gesamttransmission von 86 % für den RXI.



Introduction

High-power LED will replace classical light sources like halogen and discharge lamps in many application fields from room illumination over display back-lighting to automotive applications, because of their long lifespan and efficiency. Essential prerequisites are efficient optical modules collimating and homogenizing the LED light emerging from the chips for the respective application. Optical modules consisting of primary and secondary optics allow for efficient light sources illuminating rectangular or circular spots with high homogeneous luminance or for image forming beam shapers.

Primary Optics

The purpose of primary optics is to collect an essential part of the LED light and reshape it according to the angular cone of the subsequent optics. Essential targets for the design are high transmission and etendue conservation

resulting in high luminance and optimum refocusability. Optical concentrators are ideal elements for this purpose. Parametric models based on rational Bezier-splines are utilized for the concentrator design. Optimization is done for different evaluation criteria like maximum transmission, minimum residual divergence and homogeneous near and/or far field, starting with low order splines, i.e. a small number of variable parameters. Following that the spline orders are increased stepwise $/1/$. Because modelling of the concentrators is realized piecewise by a number of splines, possible overlaps during optimization are recognized and corrected by adjusting the intersecting points between the segments. Spline modelling of the elements and the optimization algorithms are implemented as add-ons in the raytracer ZEMAX[®].

Concentrators for thinfilm LED modules (OSTAR[®], Co. OSRAM Opto Semiconductors) containing four 1 mm² LED chips optimized for maximum transmission in a specified divergence angle are depicted in Fig. 1.

The refractive/reflective concentrator (RXI) collimates the light into a divergence of 15° full angle (Fig. 1, left). Modelling of this element is done by 4 Bezier curves up to the 8th order. Surfaces 1 and 4 are refractive, surface 2 acts as a metallized mirror, whereas surface 3 is both totally internally reflecting and refracting. Surfaces A and B serve for assembling purposes. An example of a simple TIR concentrator with residual divergence of 40° is shown in Fig. 1 right. Far field measurements at diamond turned concentrator samples (Fig. 2) showed that 83 % (compared to a designed value of 87 %) of the optical power is encircled in a divergence cone of 15°. The RXI total transmission is 86 %.

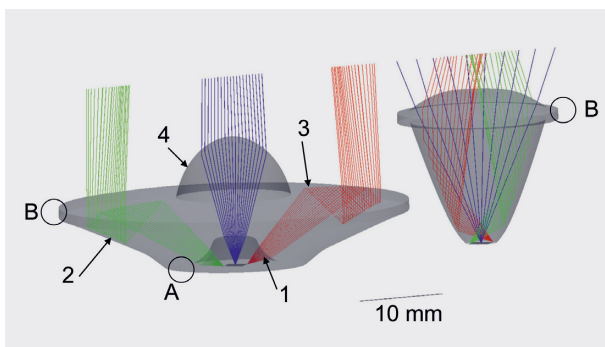


Abb. 1: Design eines refraktiv/reflektiven (RXI, links) und eines TIR-Konzentrators (rechts).

Fig. 1: Design of a refractive/reflective (RXI, left) and a TIR concentrator (right).



Abb. 2: Diamantgedrehte Prototypen für RXI (links) und TIR-Konzentrator (rechts).

Fig. 2: Diamond turned prototypes for RXI (left) and TIR concentrator (right).

Abbildung 3 zeigt eine Designvariante für einen TIR-Konzentrator mit quadratischem, homogenem Nahfeld mit 18 mm Kantenlänge bei 15° Restdivergenz. Die Vermessung der Homogenität an diamantbearbeiteten Mustern dieses Konzentrators ergibt – unabhängig von der Zahl der eingeschalteten LED-Chips des OSTAR®-Moduls – weniger als 15 % PV Abweichung am Ausgang.

Sekundäroptik

Die Sekundäroptik transformiert das Licht vom Ausgang der Primäroptik in die gewünschte Leuchtdichteverteilung in der Beleuchtungsebene. Häufig geforderte Verteilungen sind dabei homogen ausgeleuchtete rechteckige oder runde Flächen. Ein klassischer Ansatz zur Erreichung solcher Verteilungen ist der Wabenkondensator. Kernstück dieser Beleuchtungsoptik sind zwei Linsenarrays, die im Abstand der einfachen Brennweite zueinander angeordnet sind. Unabhängig von ihrem Einfallswinkel transformiert diese Anordnung kollimierte Bündel in eine

telezentrische, divergente Abstrahlung mit einer der numerischen Apertur (NA) des Arrays entsprechenden Strahldivergenz (Abb. 4). Die monolithische Realisierung als mikrooptisches Tandem-Linsenarray ermöglicht, verglichen mit klassischen einseitigen Linsenarrays mit Lensletaperturen im Millimeterbereich, eine wesentliche Verringerung der Baulänge der Beleuchtungsoptik und die Verlagerung der Justage der Arrays von der Systemassemblierung in den Herstellungsprozess.

Erforderlich sind Zentrierung und Fokussierung der beiden Arrays zueinander auf 5 µm bis 10 µm genau. Die Herstellung der Mikrolinsenarrays erfolgt durch beidseitige Abformung von Reflow-Masterstrukturen durch Reaktionsguss von UV-härtendem Polymer auf Glassubstrate (Abb. 5) [2]. Optional ist die Integration von ebenfalls lithographisch strukturierten vergrabenen Blendenstrukturen möglich (Abb. 6). Die NA der Arrays liegen typischerweise im Bereich zwischen 0,1 und 0,3 bei Array-Pitches von 300 µm bis 600 µm.

Abb. 3:
Konzentrator design mit
quadratischem, homogenisiertem Nahfeld.

Fig. 3:
Concentrator design with quadratic, homogenized nearfield.

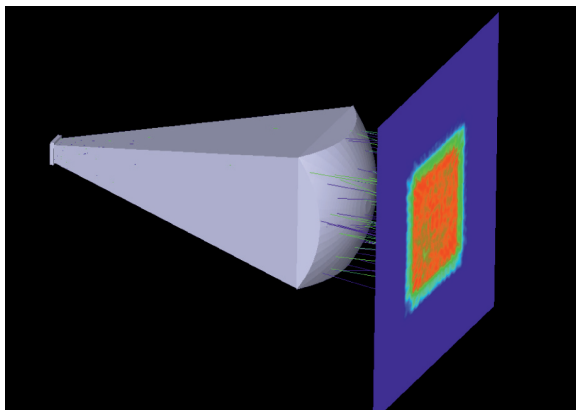
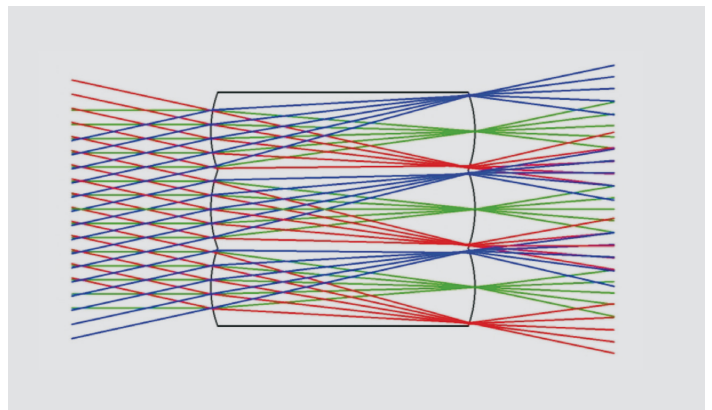


Abb. 4:
Wabenkondensordesign.

Fig. 4:
Fly's eye condenser design.



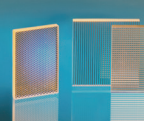


Figure 3 shows a design version for a TIR concentrator with quadratic homogeneous near field with 18 mm width and 30° residual divergence. Homogeneity measurements of diamond machined samples of this concentrator result in less than 15 % PV illuminance deviation at the output, independent of the number of switched-on LED chips of the OSTAR®-Module.

Secondary Optics

The secondary optics transforms the light from the exit plane of the primary optics into the wished illuminance distribution in the illuminated plane. In a large number of applications homogeneously illuminated rectangular or circular areas are demanded. A classical

approach to this is a fly's eye condenser. Essential parts of this illumination optics are two lens arrays being arranged in a distance of the focal length. Independent of the incident angle, this setup transforms collimated beams into telecentric divergent radiation with a divergence equal to the numerical aperture of the array (Fig. 4). The monolithic realisation of a microoptical tandem lens array enables for a drastic length reduction of the illumination optics compared with classical single-sided lens arrays with millimeter lenslet apertures. Additionally, this approach shifts adjustment from system assembly to the element manufacturing process.

Axial and lateral alignment accuracies of 5 to 10 µm between two arrays are necessary and have been reached. Lens arrays on glass substrates (Fig. 5) are realized by double-sided UV-replication of master structures fabricated by lithography and subsequent reflow technology [2]. Optionally, integration of lithographically patterned apertures is possible (Fig. 6). Numerical apertures of the lenslets are typically between 0.1 and 0.3 and array pitches vary between 300 µm to 600 µm.

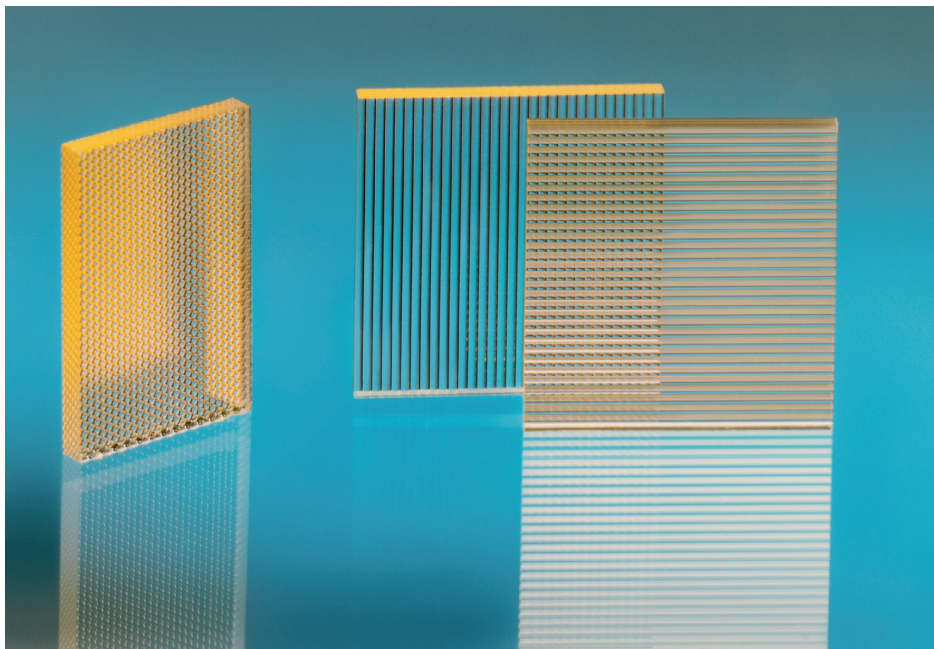


Abb. 5: Replizierte Tandemarrays: Zylinderlinsenarrays (rechts) und hexagonal angeordnete runde Lenslets mit Blendenarray (links).

Fig. 5: Replicated tandem lens arrays: Cylindrical lens arrays (right) and hexagonally arranged circular lenslets with diaphragms (left).

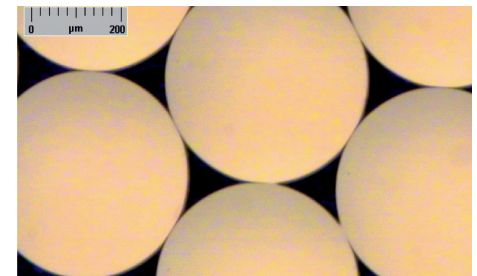


Abb. 6: Mikroskopaufnahme eines hexagonalen Arrays runder Linsen mit vergrabenen Blenden.

Fig. 6: Microscopic view of a hexagonal array of circular lenses with buried diaphragms.

Abbildung 7 zeigt den schematischen Aufbau einer LED-Lichtquelle zur homogenen Ausleuchtung eines rechteckigen Bildfelds /3/. Die Sekundäroptik besteht aus je einem senkrecht und einem waagrecht angeordneten Tandem-Zylinderlinsenarray mit Füllfaktoren $> 99\%$ und einer Kollektorlinse. In der Brennebene der Kollektorlinse erhält man einen homogen ausgeleuchteten rechteckigen Bereich, dessen Aspektverhältnis dem Verhältnis der NA der beiden Tandem-Arrays entspricht (Abb. 8). Zur Erzielung runder Leuchtfelder sind Tandemarrays mit hexagonal angeordneten, runden Lenslets mit integrierten Blendenarrays geeignet. Hier sind Füllfaktoren und somit Transmissionen bis ca. 90% erzielbar.

Einen neuartigen Ansatz zur Erzeugung beliebiger gewünschter Leuchtdichteverteilungen stellt der Einsatz von Freiformoptiken dar. Derartige Elemente – realisierbar als Spiegel oder transmittive Optiken – bestehen aus einer Basisfläche zur Strahlablenkung und Fokussierung auf die Beleuchtungsebene, versehen mit einer Feinstruktur zur Umverteilung des Lichts in die gewünschte Leuchtdichteverteilung. Spezielle Designalgorithmen sorgen für kontinuierliche Elementprofile ohne Stufen und Abschattungseffekte.

Abbildung 9 zeigt schematisch den Strahlengang einer LED-Beleuchtung mit einem reflektiven Freiformelement zur Bilderzeugung. Die Abmaße des Spiegels betragen $(5 \times 5) \text{ cm}^2$ bei einem Krümmungsradius von 100 mm . Die Abweichungen der Feinstruktur von der Basisfläche belaufen sich auf nur $\pm 200 \mu\text{m}$. Das als diamantgedrehter Aluminium-Freiformspiegel realisierte Element /4/ zeichnet bei Ausleuchtung mit einer OSRAM Dragon®-LED ein präzises Bild mit hohem Kontrast von $> 10 : 1$ und vernachlässigbaren Störlichtanteilen.

Die Arbeiten zur Primäroptik und zur Strahlhomogenisierung sind zusammen mit der Dünnfilm-LED-Chipentwicklung und der angepassten Assemblierungstechnik (OSTAR) von OSRAM-OS mit dem Deutschen Zukunftspreis 2007, dem Preis des Bundespräsidenten für Technik und Innovation, ausgezeichnet worden.

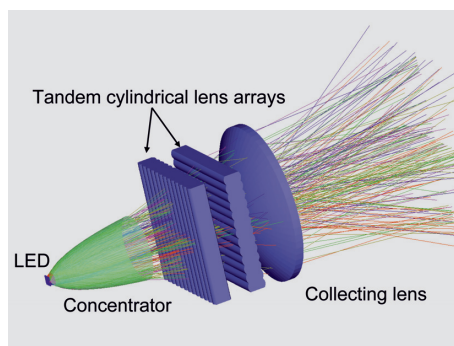


Abb. 7:
Schematischer Aufbau einer homogenisierten LED-Rechteckquelle.

Fig. 7:
Schematic view of a homogenized rectangular LED source.

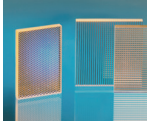
Literatur:

- /1/ Kudaev, S.; Schreiber, P.: Parametric Design of Non-Imaging Collimators, IODC 2006, Proc. SPIE Vol. 6432 (2006), p. 634212.
- /2/ Dannberg, P.: Complex micro-optical modules generated by lithography and UV-molding, Jahresbericht Fraunhofer IOF 2005, S. 37.
- /3/ Schreiber, P.; Kudaev, S.; Dannberg, P.; Gebhardt, A.: Microoptics for homogeneous LED illumination, Photonics Europe 2006, Proc. SPIE Vol. 6196 (2006) p. 61690P.
- /4/ Steinkopf, R.; Gebhardt, A.; Risse, S.: Diamantbearbeitung von ultrapräzisen Freiformen, Jahresbericht Fraunhofer IOF 2007, S. 38.



Abb. 8:
Labordemonstrator für LED-Rechteckquelle.

Fig. 8:
Lab demonstrator for rectangular LED source.



In Fig. 7 an LED light source for homogeneous illumination of a rectangular image field is shown schematically /3/. The secondary optics consists of two tandem cylindrical lens arrays with fill factors better than 99 % which are arranged vertically and horizontally respectively, and an additional collector lens. In the focal plane of the collector lens a homogeneously illuminated rectangular area with aspect ratio equal to the ratio of the numerical apertures of the two tandem lens arrays is obtained (Fig. 8). For circular illumination spots tandem arrays with hexagonally arranged circular lenslets with integrated diaphragms are used. Fill factor and accordingly transmission for these arrays amount to about 90 %.

A new approach for the generation of well determined arbitrary illumination distribution is the use of free form optics. These types of elements realized either as mirror or transmissive components consist of a curved surface for beam deflection and focussing and additionally with a fine structure for the desired light redistribution. Special design algorithms serve for continuous profiles without discontinuities and shadowing effects.

Figure 9 shows schematically the ray pattern of an LED illumination with a reflective free form element for image generation. The size of this free form mirror is 5 x 5 cm² with a radius of curvature of 100 mm. Typical maximum profile depths of the fine structure are $\pm 200 \mu\text{m}$. The aluminium free form mirror realized by fast tool servo assisted diamond turning transforms the light of a OSRAM Dragon[®]-LED into a precise image with high contrast $> 10 : 1$ and negligible straylight /4/.

The work on LED primary optics and beam homogenization together with the thin-film LED chip development and the assembling technology OSTAR by OSRAM-OS have been awarded the "German Future Prize 2007".

Literature

- /1/ Kudaev, S.; Schreiber, P.: Parametric Design of Non-Imaging Collimators, IODC 2006, Proc. SPIE Vol. 6432 (2006), p. 634212.
- /2/ Dannberg, P.: Complex micro-optical modules generated by lithography and UV-molding, Jahresbericht Fraunhofer IOF 2005, S. 37.
- /3/ Schreiber, P.; Kudaev, S.; Dannberg, P.; Gebhardt, A.: Microoptics for homogeneous LED illumination, Photonics Europe 2006, Proc. SPIE Vol. 6196 (2006) p. 61690P.
- /4/ Steinkopf, R.; Gebhardt, A.; Risse, S.: Diamantbearbeitung von ultrapräzisen Freiformen, Jahresbericht Fraunhofer IOF 2007, S. 38.

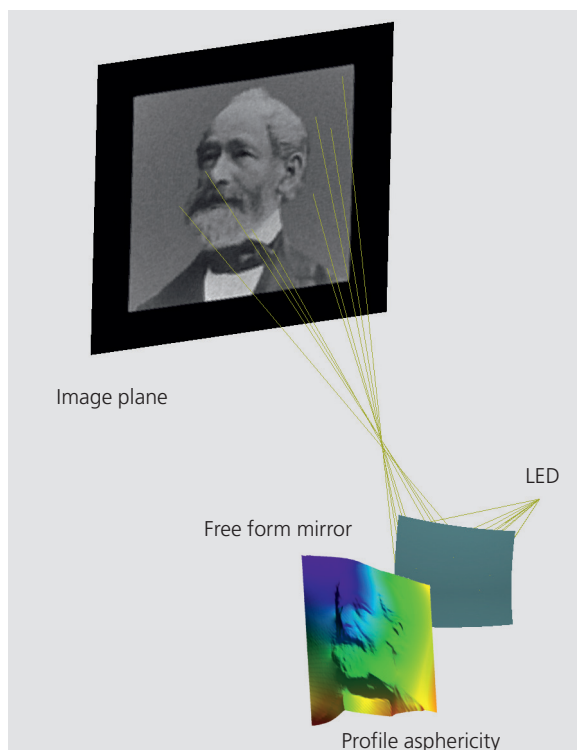


Abb. 9:
Designschema des bildgebenden LED-Strahlformers.

Fig. 9:
Design for image-forming LED beam shaper.