

Prototypenbau von Beleuchtungssystemen aus optischen Standardkomponenten

Edwin Diaz, Edmund Optics Inc., Barrington, New Jersey, USA
Matthias Knobl, Edmund Optics GmbH, Karlsruhe

Beim Design abbildender Systeme richten sich die Entwicklungsbemühungen meist auf die Abbildungsoptik – dabei kann die Beleuchtung ebenso wichtig für den Erfolg eines solchen Systems sein. In der Beleuchtungsoptik sind nicht Aberrationen und Bildqualität die primären Anliegen, sondern der Lichtdurchsatz, gute räumliche oder Winkel-Homogenität und die Fähigkeit, das Licht in einem bestimmten Abstand von der Quelle effizient über eine vorgegebene Fläche zu verteilen. Dieser Beitrag erläutert, wie asphärische Linsen, Konzentratoren und Mikrolinsen-Arrays eingesetzt werden können, um die Lichtverteilung der Quelle für eine bestimmte zu beleuchtende Fläche maßzuschneidern. Außerdem wird die Verwendung von Lichtleiterstäben und Mikrolinsen-Arrays zur Verbesserung der Beleuchtungs-Gleichförmigkeit erörtert.



Bild 2: Einige typische Asphären

1 LED-Kollimation

Angenommen, man beabsichtigt die Kollimation einer LED mit einer Intensitätsverteilung wie in **Bild 1** dargestellt. Der Öffnungswinkel θ des von der LED emittierten Lichts (gemessen als volle Breite beim halbem Maximum, FWHM) beträgt etwa $\pm 50^\circ$ oder 100° . Die Numerische Apertur (NA_{beam}) des von der Lichtquelle ausgehenden Strahls, definiert als Sinus des halben Öffnungswinkels, ist:

$$NA_{\text{beam}} = \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) = \sin\left(\frac{100^\circ}{2}\right) = \sin(50^\circ) \approx 0.77 \quad (\text{Gl.1})$$

Kollimieren lässt sich die LED mit einer asphärischen Linse entsprechend **Bild 2**,

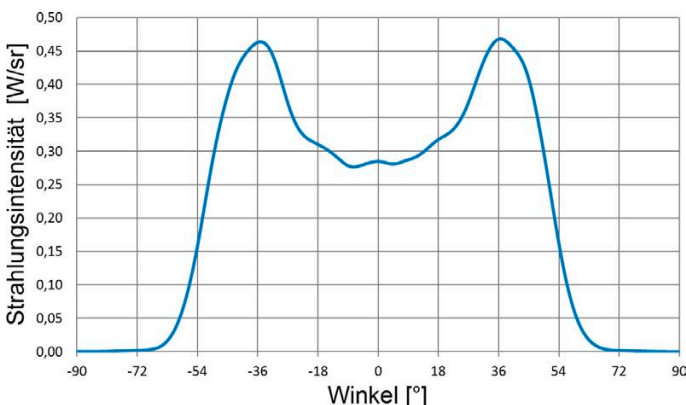


Bild 1: Repräsentatives räumliches Abstrahlmuster des roten Luxeon-Emitters LXHL-BD01

deren NA größer oder gleich NA_{beam} ist. Diese Vorgabe maximiert den Lichtdurchsatz, weil sichergestellt wird, dass der Großteil der LED-Emission auf die Kollimationslinse trifft. Da die Lichtquelle nicht beliebig klein ist, divergiert der Strahl nach der Kollimation ein wenig. Für einen gegebenen Durchmesser D_s der Lichtquelle und eine Brennweite f_{col} der Linse ergibt sich nach der Kollimation die volle Strahldivergenz (θ') im Bogenmaß gemäß:

$$\theta' = \frac{D_s}{f_{\text{col}}} \quad (\text{Gl.2})$$

Die leichte Divergenz des Strahls kann vorteilhaft sein, wenn in einiger Entfernung von der Kollimationslinse ein größerer Leuchtfleck

gefordert ist. Andere Anwendungen könnten allerdings eine geringe Strahldivergenz erfordern, was sich entweder durch Verkleinerung der Lichtquelle oder durch Vergrößerung der Brennweite der Kollimationslinse erreichen lässt. Da für einen vorgegebenen Linsendurchmesser eine längere Brenn-

weite auch eine kleinere NA bedeutet, muss immer ein Kompromiss zwischen maximalem Lichtdurchsatz und minimaler Divergenz gefunden werden.

Es ist festzuhalten, dass jedes optische System, welches die Strahldivergenz einer Lichtquelle reduziert, proportional auch deren Strahldurchmesser vergrößert. Der kollimierte Strahldurchmesser (D_c) unmittelbar nach der Kollimationslinse kann folgendermaßen abgeschätzt werden:

$$D_c = 2 NA_{\text{beam}} f_{\text{col}} \quad (\text{Gl.3})$$

Die Kollimation einer LED kann komplizierter als in diesem Beispiel sein. So zeigt sich jede Ungleichmäßigkeit in der Intensitätsverteilung der Lichtquelle als Ungleichmäßigkeit im Profil des kollimierten Strahls. Außerdem emittieren manche LEDs über große Winkel bis zu 180° , was es erschwert, das gesamte Licht effizient zu sammeln. Diese Probleme kann man mit optischen Komponenten wie Konzentratoren (CPCs), Lichtleiterstäben und Mikrolinsen-Arrays angehen, wie in den Abschnitten 3 – 5 gezeigt wird.

2 Asphärische Linsenpaare

Eine zweite asphärische Linse kann vor der Kollimationslinse eingesetzt werden, um das Licht auf eine gewünschte Fläche zu fokussieren. Der Durchmesser des beleuchteten Flecks in der Brennebene

(focal plane, FP) ist gegeben durch:

$$\text{Spot Diameter} = D_s \left(\frac{f_{\text{focus}}}{f_{\text{col}}} \right) \quad (\text{Gl.4})$$

Dabei ist D_s der Durchmesser der LED-Lichtquelle, während f_{focus} und f_{col} die effektiven Brennweiten der fokussierenden und der kollimierenden Linse sind.

Wählt man für die zweite Linse eine größere Brennweite als für die kollimierende Linse, dann lässt sich die Numerische Apertur auf einen Wert unter dem der Lichtquelle (NA_{beam}) reduzieren. Für Abstände größer als f_{focus} wird die volle Strahldivergenz (θ') im Bogenmaß zu:

$$\theta' = 2 NA_{\text{beam}} \left(\frac{f_{\text{col}}}{f_{\text{focus}}} \right) \quad (\text{Gl.5})$$

Ein Nachteil des asphärischen Linsenpaares ist, dass es jegliche Struktur der Lichtquellen-Oberfläche direkt in die Brennebene abbildet. Um die Struktur der Quelle aus dem fokussierten Strahl zu entfernen, kann die Position entweder der Lichtquelle oder des Linsenpaares relativ zur Brennebene angepasst werden. Andere Ansätze sind z.B. das Einfügen eines Lichtleiterstabes in der Brennebene oder der Einsatz eines für kleine Winkel ausgelegten holographischen Diffusors oder eines Paares von Mikrolinsen-Arrays zwischen den beiden asphärischen Linsen.

3 Konzentratoren

In den vorherigen Abschnitten wurden Asphären zur Kollimation der LED eingesetzt. Manche LEDs emittieren ihr Licht allerdings über eine volle Hemisphäre (d.h. $\pm 90^\circ$ Strahldivergenz), was es unmöglich macht, den gesamten Lichtkegel mit einer gewöhnlichen asphärischen Linse einzufangen. Für solche Quellen eignet sich ein parabolischer Konzentrator, der sogenannte Compound Parabolic Concentrator (CPC, **Bild 3**). Dieser sammelt das Licht und reduziert zugleich die Strahldivergenz der LED.

CPCs werden oft eingesetzt, um Sonnenlicht auf Solarzellen zu konzentrieren, die

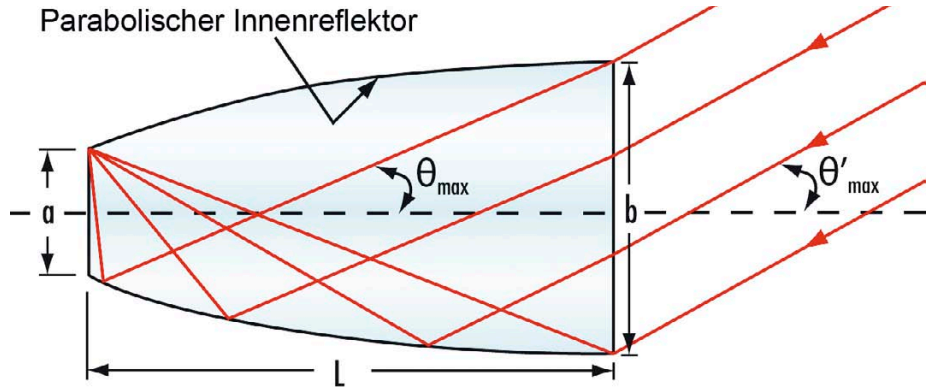


Bild 3: Ein "Compound Parabolic Concentrator" (CPC) ist aus zwei Kurvenformen zusammengesetzt

sich in Kontakt mit Apertur a befinden. Diese optische Komponente kann als hohler Reflektor ausgeführt sein, oder als solides Dielektrikum (z.B. Glas oder Polymer). Soll der CPC als Kollimator für eine LED eingesetzt werden, bringt man seine kleine Apertur (a) in Kontakt mit der LED oder so nahe wie möglich an diese heran.

Der wichtigste Vorteil eines CPC im Einsatz als Kollimator ist, dass die Divergenz des Ausgangsstrahls im Falle eines hohlen Reflektors auf einen Winkel θ_{max} begrenzt ist, oder θ'_{max} im Falle eines dielektrischen CPC. Dies gilt über die gesamte minimal mögliche Apertur b , während Apertur a einen Akzeptanzwinkel von 180° bietet [1]. Durch Wahl eines kleineren Wertes für θ_{max} wird ein höherer Kollimationsgrad erreicht. Allerdings nimmt dabei die erforderliche Länge L des CPC schnell zu. Für einen hohlen Reflektor ergibt sich folgender Zusammenhang von L , a und θ_{max} [2]:

$$L = \frac{a(1 + \sin(\theta_{\text{max}}))}{2 \sin(\theta_{\text{max}}) \tan(\theta_{\text{max}})} = \left(\frac{a+b}{2} \right) \cot(\theta_{\text{max}}) \quad (\text{Gl.6})$$

Ein ähnlicher Ausdruck lässt sich für dielektrische CPCs angeben, dabei gilt lediglich $\sin(\theta'_{\text{max}}) = n \sin(\theta_{\text{max}})$.

Ist eine kleinere Strahldivergenz gefordert, kann eine asphärische Kollimationslinse mit einer NA größer als oder gleich $\sin(\theta_{\text{max}})$ oder $\sin(\theta'_{\text{max}})$ vor dem CPC platziert werden.

4 Homogenisierende Lichtleiterstäbe

Wie oben erwähnt liegt ein Nachteil asphärischer Linsenpaare darin, dass sie Oberflächenstrukturen der Lichtquelle direkt in die Brennebene abbilden. Handelt es sich bei der abgebildeten Lichtquelle z.B. um mehrere einzelne LEDs oder um einen gewöhnlichen Glühdraht, dann ist die resultierende Bestrahlungsstärke in der Brennebene vielleicht nicht so gleichmäßig wie für bestimmte Anwendungen erforderlich. In

solchen Fällen können Lichtleiterstäbe die Homogenität des projizierten Lichtflecks verbessern.

So kann z.B. ein elliptischer Reflektor eingesetzt werden, um einen Glühfaden, der sich im Brennpunkt f_1 des Ellipsoids befindet, in einen hexagonalen Lichtleiterstab abzubilden, dessen Eingangsfläche sich im oder nahe dem Brennpunkt f_2 befindet (**Bild 4**). Die Gleichmäßigkeit der Intensitätsverteilung vor und nach dem Lichtleiterstab lässt sich mit geeigneten Größen quantitativ auswerten.

Entlang eines Linienprofils der Länge X durch den geforderten Lichtfleck-Querschnitt berechnet sich die gemittelte Gleichmäßigkeit ($\bar{U}(x)$) oder die Gleichmäßigkeit von Spitze zu Tal ($U_{\text{pp}}(x)$, peak-to-peak) wie folgt:

$$\bar{U}(x) = \frac{E_{\text{avg}}}{E_{\text{max}}} \quad \text{oder} \quad U_{\text{pp}}(x) = \frac{E_{\text{min}}}{E_{\text{max}}} \quad (\text{Gl.7})$$

wobei E_{max} , E_{min} und E_{avg} die maximalen, minimalen und durchschnittlichen Werte der Intensität sind. Es ist auch hilfreich, die rms-Variation $\phi(x)$ des Lichts zu ermitteln, in welche der Durchschnitt und die Standardabweichung s der Bestrahlungsstärke über die gleiche Linienprofil-Länge einfließen:

$$\phi(x) = \frac{s}{E_{\text{avg}}} \quad (\text{Gl.8})$$

Der Vorteil der Verwendung von $\phi(x)$ wie oben definiert liegt darin, dass unterschiedlich skalierte Datensätze miteinander verglichen werden können.

Aus **Tabelle 1** wird ersichtlich, dass das Hinzufügen eines Lichtleiterstabes die Gleichmäßigkeit verbessert. Die Werte legen auch nahe, dass ein Verlängern des Stabes immer geringere Zuwächse in der Gleichmäßigkeit bringt. Der Schlüsselparаметer für die Homogenisierung ist der Grad der Durchmischung, oder die Anzahl der Lichtreflexionen innerhalb der Komponente. Lichtleiterstäbe mit hexagonalem oder quadratischem Querschnitt bieten

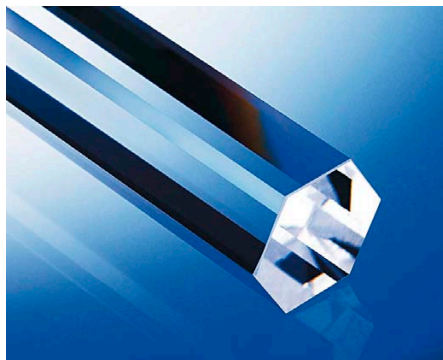


Bild 4: Hexagonaler Lichtleiterstab aus N-BK7-Glas

bessere Vermischung als solche mit rundem Querschnitt. Generell ist die Anzahl N der Reflexionen proportional zur Länge L des Stabes sowie zu NA_{beam} und umgekehrt proportional zu seinem Brechungsindex (n) und seiner Apertur (A):

$$N \propto \frac{NA_{\text{beam}} L}{n A} \quad (\text{Gl.9})$$

Für einen stärker divergierenden Strahl genügt ein kürzerer Lichtleiterstab zum Erreichen derselben Gleichmäßigkeit wie bei einem Strahl mit geringerer Divergenz. Auch müssen Stäbe aus Gläsern mit höherem Brechungsindex länger ausgeführt werden als solche, die aus einem niedrig brechenden Material bestehen, um dieselbe Gleichmäßigkeit zu erreichen¹.

Bisher wurden hexagonale Lichtleiterstäbe mit gleich großen Eintritts- und Ausgangsflächen besprochen. Sie verbessern die Homogenität, erhalten aber die Divergenz (die Numerische Apertur) des einfallenden Strahls.

Konisch verlaufende Lichtleiterstäbe haben dagegen eine unterschiedlich große Eintritts- und Ausgangsapertur (**Bild 5**). Typischerweise sind ihre Eintritts- und Ausgangsflächen quadratisch, und ihre Oberfläche unterscheidet sich um den Vergrößerungsfaktor M . Licht, das wie in **Bild 6** durch die kleinere Apertur einfällt, tritt homogenisiert und mit verringerter Strahldivergenz wieder aus:

¹ Dies ergibt sich aus $n_{\text{air}} \sin(\theta_1) = n_{\text{glass}} \cdot \sin(\theta_2)$, angewandt auf die gleiche Eintritts-Apertur des Lichtleiterstabes.

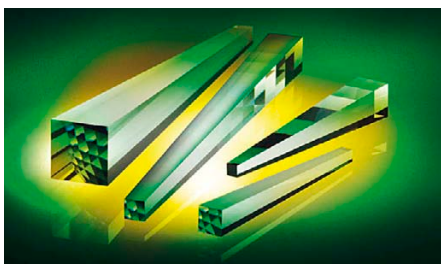


Bild 5: Konisch verlaufende Lichtleiterstäbe

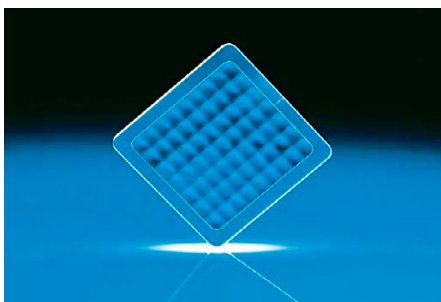


Bild 7: Mikrolinsen-Array mit einem quadratischen Linsenmuster

	Gleichmäßigkeit vor Eintritt in den Lichtleiterstab	Gleichmäßigkeit nach Durchgang durch den Lichtleiterstab		
Länge des Lichtleiters		50 mm	100 mm	150 mm
$U_{pp}(6)$	44,34%	82,70%	94,47%	96,49%
$\bar{U}(6)$	78,70%	87,80%	97,29%	98,01%
$\phi(6)$	15,75%	6,17%	1,46%	0,90%

Tabelle 1: Gleichmäßigkeits-Berechnungen für Lichtleiterstäbe mit 8 mm Apertur-Querschnitt basierend auf normierten Bestrahlungsstärke-Werten, gemessen über die mittleren 6 mm des Apertur-Querschnitts eines Lichtleiterstabes

$$M = \frac{D_{\text{out}}}{D_{\text{in}}} = \frac{NA_{\text{small aperture}}}{NA_{\text{large aperture}}} \approx \frac{u}{u'} \quad (\text{Gl.10})$$

Ein Beispiel für ein typisches Beleuchtungssystem, in dem Licht-homogenisierende Stäbe eingesetzt werden, ist ein digitaler Mikrospiegel-Projektor, wie er auf der Titelseite dieser Ausgabe skizziert ist.

5 Mikrolinsen-Arrays

Aus Platzgründen ist es manchmal nicht möglich, Lichtleiterstäbe zur Lichthomogenisierung einzusetzen. Eine gute Alternative in solchen Anwendungen sind einzelne oder paarige Mikrolinsen-Arrays (**Bild 7**). Sie verbessern die Gleichmäßigkeit, indem das einfallende Licht in mehrere Teilbündel aufgespalten wird, die dann überlagert werden [4].

Betrachten wir einen kollimierten Lichtstrahl, der wie in **Bild 8** auf ein Mikrolinsen-Array fällt: Beim Durchgang wird er in Teilstrahlen aufgespalten, die durch eine sphärische Konvexlinse in der Brennebene

(FP) wieder abgebildet werden, was einen Mittelungseffekt bewirkt. Für eine Mikrolinse mit Mittenabstand (pitch) P_{LA} und Brennweite f_{LA} , die von einer sphärischen Konvexlinse mit Brennweite f_{FL} abgebildet wird (vgl. [3]), ergibt sich die Größe des homogenisierten Leuchtflecks (D_{FT}) zu:

$$D_{FT} = P_{LA} \left(\frac{f_{FL}}{f_{LA}} \right) \quad (\text{Gl.11})$$

D_{FT} ist eine skalierte Version der Mikrolinsen-Apertur. Ist diese quadratisch, dann wird auch der homogenisierte Leuchtfleck quadratisch, selbst wenn der Eingangsstrahl rund ist.

Für Anwendungen, bei denen die Beleuchtung einer großen Fläche gefordert ist (d.h. großes D_{FT}), genügt oft schon ein einzelnes Mikrolinsen-Array. Wird aber eine gleichmäßige Ausleuchtung mit wohldefinierten Rändern benötigt, dann ist es besser, eine Kombination aus zwei Arrays einzusetzen. Das Zweite wirkt dann als Array von Kondensorlinsen, welche den Überlapp zwischen axialen und schräg verlaufenden

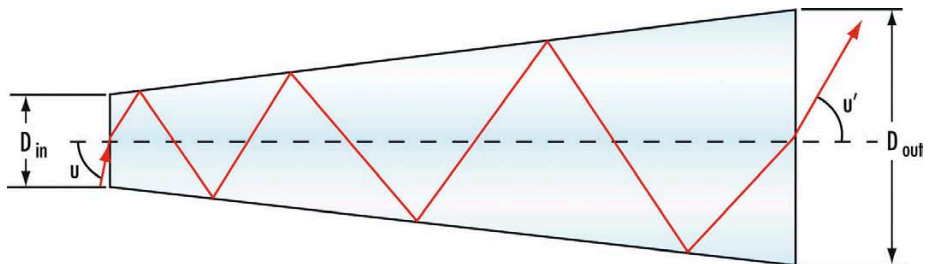


Bild 6: Strahlverfolgung durch einen konisch verlaufenden Lichtleiterstab

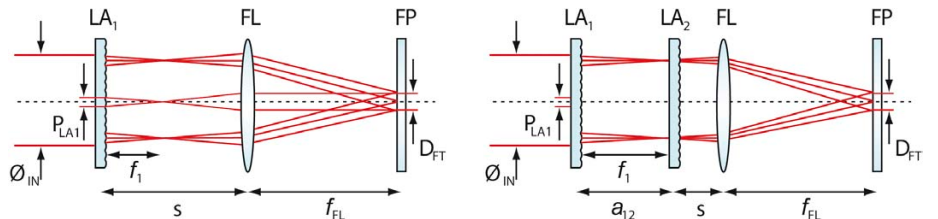


Bild 8: Das Mikrolinsen-Array LA1 zerteilt den einfallenden Strahl in Teilstrahlen, die dann von einer Kondensorlinse FL auf die Bildebene abgebildet werden. Die Einführung eines zweiten Mikrolinsen-Arrays LA2 in oder nahe der Brennebene von LA1 erzeugt, wie rechts gezeigt, eine Beleuchtung mit besserer Gleichmäßigkeit und wohldefinierten Rändern

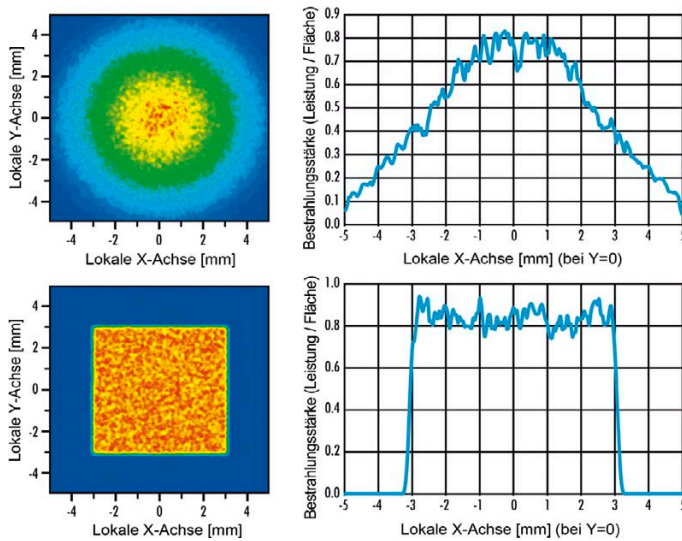


Bild 9: Oben: Bestrahlungsstärke-Profil einer inkohärenten Quelle. Unten: Bestrahlungsstärke-Profil in der Brennebene

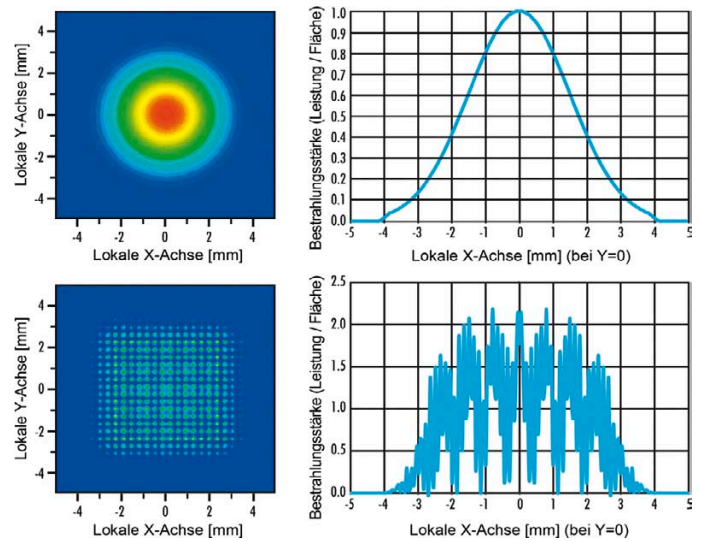


Bild 10: Oben: Bestrahlungsstärke-Profil einer kohärenten Quelle (Gauß'scher Laserstrahl). Unten: Bestrahlungsstärke-Profil in der Brennebene

Strahlenbündeln in der Brennebene (FP) verbessern und so zu besserer Gleichmäßigkeit führen [4]. Beim Einsatz zweier Mikrolinsen-Arrays wird die Größe des homogenisierten Leuchtflecks zu:

$$D_{FT} = P_{LA1} \left(\frac{f_{FL}}{f_{eff}} \right) \quad (Gl. 12)$$

$$\text{Dabei gilt } f_{eff} = \frac{f_{LA1} f_{LA2}}{f_{LA1} + f_{LA2} - a_{12}} \quad (Gl. 13)$$

mit $f_{LA1} < a_{12} < f_{LA1} + f_{LA2}$ bei einem Abstand a_{12} der zwei Mikrolinsen-Arrays. In diesem Fall hängt die Größe (D_{FT}) des homogenisierten Leuchtflecks vom Abstand a_{12} der beiden Mikrolinsen-Arrays ab. Der Mittenabstand der Mikrolinsen wird oft bei beiden Arrays gleich gewählt.

Bild 9 zeigt das Intensitätsprofil einer inkohärenten Lichtquelle vor und nach Durchgang durch einen Aufbau mit zwei Mikrolinsenarrays mit $P_{LA1} = P_{LA2} = 300 \mu\text{m}$, $f_{LA1} = f_{LA2} = 4,8 \text{ mm}$ und $f_{FL} = 100 \text{ mm}$. **Bild 10** zeigt das Intensitätsprofil eines Gauß'schen Laserstrahls vor und nach dem Durchgang durch denselben Aufbau. Für kohärente Strahlen verhalten sich die Mikrolinsen-Arrays wie ein Beugungsgitter und erzeugen ein Punkte-Raster statt einer gleichmäßigen Ausleuchtung, da jeweils mehrere Teilstrahlen in der Brennebene interferieren. Methoden zur Verminderung dieser Interferenzeffekte sind u.a. die Verwendung von

Mikrolinsen mit größerem Mittenabstand, Defokussierung der Mikrolinsen-Komponenten oder im Fall von Dauerstrich-Lasern ein rotierender Diffusor [3].

6 Zusammenfassung

Asphärische Linsen, Mikrolinsen-Arrays, CPCs und Lichtleiterstäbe haben alle ihre jeweils eigenen besonderen Eigenschaften, die sie für verschiedenste Beleuchtungs-Anwendungen nützlich machen. Asphärische Linsen können dank ihrer großen Numerischen Aperturen Licht von hoch divergenten Quellen sammeln. CPCs können Licht von Quellen einfangen, die über eine volle Hemisphäre abstrahlen, was die Emission auf eine leichter zu handhabende Divergenz beschränkt. Lichtleiterstäbe und Mikrolinsen-Arrays nutzen das Überlagerungsprinzip zur Homogenisierung der Lichtverteilung einzelner oder mehrerer Quellen.

Übersetzung: J. Kuppe

Literaturhinweise:

- [1] W.T. Welford, R. Winston, *High Collection Non-imaging Optics*, San Diego, Academic Press, Inc, 1989, p. 206
- [2] W.T. Welford, R. Winston, *High Collection Non-imaging Optics*, San Diego, Academic Press, Inc, 1989, p. 57

- [3] SMO Techinfo Sheet 10: Beam Homogenizing, Version 2008-1.0, Suss MicroOptics SA, Jan. 2008, Web. 8 Jan. 2012, www.suss-microoptics.com/downloads/SMO_TechInfo_Sheet_10.pdf

- [4] W. Cassarly, *Nonimaging Optics: Concentration and Illumination*, Handbook of Optics, Vol. 2, McGraw Hill, 2010

Ansprechpartner:

Edwin Diaz
Product Support Engineer
Edmund Optics Inc.
101 East Gloucester Pike
Barrington,
New Jersey 08007, USA
Tel. +1/856/573-6250
Fax +1/856/573-6295
eMail: ediaz@edmundoptics.com
www.edmundoptics.com



Matthias Knobl
Vertriebs- & Anwendungsingenieur
Edmund Optics GmbH
Zur Gießerei 19-27
D-76227 Karlsruhe
Tel. 0721/62737-30
Fax 0721/62737-33
eMail: mknobl@edmundoptics.de
www.edmundoptics.de



Optatec 2012: Stand 3.0/G26

www.photonik.de

►Webcode 3001