

# Homogenisierung von Laserstrahlen

Reinhard Völkel, Suss MicroOptics SA, Neuchâtel, Schweiz  
Maik Zimmermann, Bayerisches Laserzentrum gGmbH, Erlangen

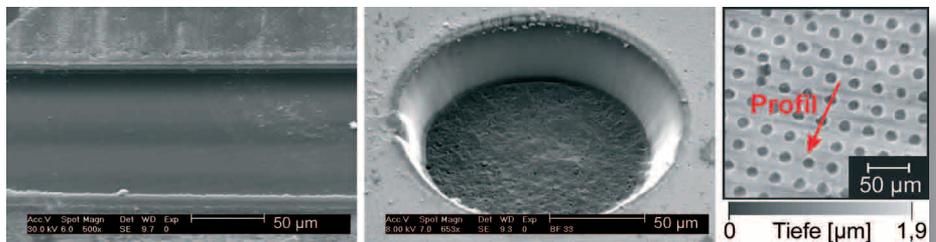
Für viele Verfahren der Lasermaterialbearbeitung, der Photolithographie, der Messtechnik und der Analytik ist die Homogenisierung von Laserlicht von entscheidender Bedeutung. Die Wahl der geeigneten Homogenisierungsmethode ist aber selbst für Laserexperten oftmals schwierig. Der folgende Beitrag bietet eine Übersicht und erläutert die Funktionsweise von Strahlhomogenisierern mit Mikrolinsenarrays und hocheffizienten Streuscheiben.

## 1 Motivation

Anhand einiger Anwendungen soll zunächst exemplarisch veranschaulicht werden, welche Bedeutung der Bereitstellung homogener Laserstrahlung zukommt. Beispielsweise ist es für das Laserbohren von Tintenstrahldruckerdüsen oder von Mikrokavitäten in Tiefziehwerkzeugen notwendig, gleichbleibende Lochigenschaften hinsichtlich Durchmesser, Kantenqualität oder Bohrungstiefe zu erzielen [1,2] – Bearbeitungsbeispiele siehe **Bild 1**. Die Anforderungen an die Strahlgleichförmigkeit liegen hier typischerweise im Bereich von  $\pm 5\%$  rms. Ähnliche Anforderungen bestehen auch bei der Laserbestrahlung von Proben zu Analyse Zwecken, z.B. in der Fluoreszenzanalytik.

Maskenprojektionsverfahren erfordern eine homogene Intensitätsverteilung besser als  $\pm 2\%$  rms in der Masken- und in der Bildebene auf dem Werkstück oder Wafer. Anwendungsbeispiele sind die Halbleiterlithographie [3], der selektive Schichtabtrag von Multischichtsystemen oder die Bestrahlung von Silizium zur Rekristallisation in der Dünnschicht-Transistorfertigung [4].

Bei solchen Anwendungen wird der Laserstrahl homogenisiert und das Strahlprofil als Rechteckprofil (Flat-Top) auf die Probe projiziert. Bei vielen Anwendungen, wie z. B. dem Laserstrahlbiegen dünner Metallfolien, wird anstelle einer homogenen Fläche eine homogene Lichtlinie benötigt. Da der Biegewinkel wesentlich von der ins Material eingekoppelten Wärmeenergie abhängt, muss zur Erzeugung eines gleichförmigen Biegewinkels über die gesamte Breite der Folie eine homogene Intensitätsverteilung bereitgestellt wer-



**Bild 1:** Anwendungsbeispiele (v.l.): Ablation einer 100µm-Linie in Glas mit Liniengenerator (Excimer Laser, 193 nm), Loch mit  $\varnothing = 150 \mu\text{m}$  in BF33-Glas, Lochraster für Tiefziehwerkzeuge (homogene Beleuchtung der Lochmaske mit Homogenisierer). Bilder aus [2]

den [5]. Weitere Anwendungsbeispiele für eine homogene Lichtlinie findet man in der Messtechnik und Analytik. Hier wird der Laser z.B. zur Untersuchung von Strömungen verwendet. Bei Verfahren wie der Particle Image Velocimetry (PIV) oder der Planaren Laserinduzierten Fluoreszenz (PLIF) wird ein dünner Laserlichtschnitt in das zu untersuchende Medium erzeugt. Die Strömung wird mithilfe einer Kamera senkrecht zum Lichtschnitt betrachtet. Voraussetzung für eine quantitativ präzise Auswertung der Ergebnisse ist auch hier eine gleichmäßige Intensitätsverteilung.

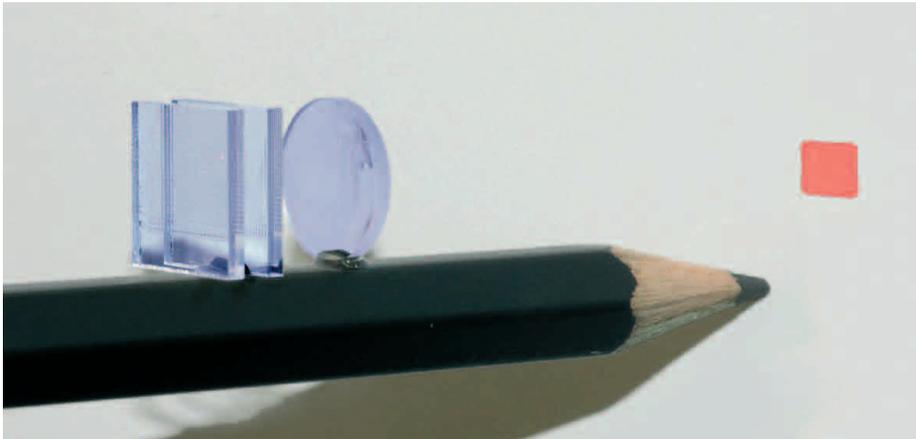
## 2 Grundprinzipien der Strahlformung

Die homogene Ausleuchtung einer Fläche ist eine sehr alte Aufgabenstellung in der Optik. Bereits im Mittelalter wurden verschiedene Beleuchtungsoptiken für Projektion und Mikroskopie konstruiert. Seit über hundert Jahren werden so genannte Wabenkondensoren (engl. Fly's-Eye Condensator, **Bild 2**) für Dia- und Filmprojektion

eingesetzt [6]. Dieses Verfahren wird auch heute noch nahezu unverändert angewandt.

Bei Strahlhomogenisierern [7] unterscheidet man zwischen Optiken, die Teilbereiche eines kollimierten Lichtstrahls gezielt umsortieren, und Optiken, die eine Homogenisierung durch Vervielfältigung von Bildern der Lichtquelle erreichen. Im ersteren Fall kann z.B. das Gaußprofil eines Laserstrahls durch zwei asphärische Flächen in ein Kasten- oder Flat-Top-Profil umsortiert werden. An Stelle der refraktiven Asphären werden auch häufig diffraktive optische Elemente (DOEs) eingesetzt. Ein wesentlicher Nachteil solcher umsortierender Homogenisierungsoptiken ist die Notwendigkeit ihrer präzisen Anpassung an das jeweilige Strahlprofil und die erforderliche Ausrichtung zum Laserstrahl. Ein lateraler Strahlversatz oder eine Fluktuation im Gaußprofil beeinträchtigen die Homogenisierung.

Im zweiten Fall wird beim Wabenkondensator ein Multipupillensystem mit Linsenarrays eingesetzt. Diese Arrayoptiken erzeugen



**Bild 2:** Einfacher Wabenkondensator aus zwei Mikrolinsen-Arrays und einer sphärischen Linse

eine Vielzahl von Bildern der Lichtquelle. Die Strahlpropagation beruht auf dem aus der Mikroskopie bekannten Prinzip der Köhlerschen Beleuchtung, bei dem jeder einzelne Punkt einer Lichtquelle die gesamte Bildebene ausleuchtet. Bei einem Wabenkondensator erzeugen die Linsen des Arrays eine Vielzahl paralleler Köhlerscher Beleuchtungssysteme. Die erreichbare Güte der Strahlhomogenisierung mittels Arrayoptiken wird durch Beugungs- und Interferenzeffekte begrenzt. Die Beugungseffekte können durch den Einsatz rotierender oder statischer Streuscheiben reduziert werden (s. Abschnitt 4).

Der wesentliche Vorteil eines Wabenkondensators ist die Entkopplung der Intensitätsverteilung im Fernfeld von der Lichtquelle. Nachteilig sind die begrenzte Verfügbarkeit geeigneter Arrayoptiken und deren teilweise aufwendige Herstellung. Arrayoptiken werden in der klassischen Optikfertigung durch Blankpressen oder durch Montage einzelner Linsenelemente gefertigt. Die in der Lasertechnik verwendeten Gläser sind in der Regel sehr hochschmelzend, sodass Blankpressen nur eingeschränkt möglich ist. Wabenkondensoren aus Quarzglas werden deshalb auch heute noch aufwendig aus einzelnen Zylindernlinsen montiert. Eine kostengünstige Alternative sind Mikrolinsenarrays, die unter Verwendung mikrotechnischer Herstellungsverfahren wie Photolithographie und Ätzverfahren mit hoher optischer Qualität in einen

Wafer transferiert werden. Wafer-basierte Herstellungsverfahren erlauben höchste Präzision und Uniformität der Arrays. Für Laseranwendungen im ultravioletten, sichtbaren und nahinfraroten Wellenlängenbereich bietet sich synthetisches Quarzglas (Fused Silica) oder Kalziumfluorid ( $\text{CaF}_2$ ) als Linsenmaterial an.

### 3 Strahlhomogenisierung mit Mikrolinsenarrays

Bei Strahlhomogenisierern auf Basis von Mikrolinsen unterscheidet man zwischen abbildenden und nicht-abbildenden Typen (**Bild 3** und **4**). Beide verwenden entweder Arrays mit gekreuzten Zylinderlinsen oder mit quadratischen Mikrolinsen, die den einfallenden Strahl in kleine Teilstrahlen aufspalten. Durch eine sphärische Linse werden diese Teilstrahlen überlagert, und zwar in der Brennebene der Einzellinse, wodurch sich ein homogen ausgeleuchtetes Feld ergibt. Da diese Linse eine zweidimensionale (räumliche) Fouriertransformation ausführt, wird sie auch als Fourierlinse bezeichnet.

Die Wahl zwischen abbildendem und nicht-abbildendem Homogenisierer hängt stark von der Laserquelle und der geplanten Anwendung ab. Eine Orientierungshilfe gibt die Fresnelzahl  $FN$  eines Mikrolinsenarrayhomogenisierers, die für kleine Öffnungswinkel mit der Näherung  $\tan(\alpha) = \alpha$  folgendermaßen definiert ist:

$$FN \approx \frac{P_{LA} \cdot D_{FT}}{4 \cdot \lambda \cdot f_{FL}} \quad (\text{Gl. 1})$$

Hierbei ist  $P_{LA}$  der Mittenabstand (Pitch) des Mikrolinsenarrays,  $D_{FT}$  der Durchmesser des Rechteckprofils (Flat-Top) in der Homogenisierungsebene,  $f_{FL}$  die Brennweite der Fourierlinse und  $\lambda$  die Wellenlänge. (Die Linsenarray-Brennweite ist dabei in  $D_{FT}$  enthalten, vgl. Gl. 2.) Je größer die Fresnelzahl ist, desto besser ist die Strahlgleichförmigkeit in der Homogenisierungsebene. Die Fresnelzahl ist daher die wichtigste Kenngröße bei der Laserstrahlhomogenisierung mit Mikrolinsenarrays.

Nicht-abbildende Homogenisierer (**Bild 3**) bestehen aus einem Mikrolinsenarray („LA1“) und einer sphärischen Linse. Die Homogenisierungsebene befindet sich in der Fokusebene der Fourierlinse (FL), der Durchmesser  $D_{FT}$  des Rechteckprofils in der Brennebene der Fourierlinse ergibt sich aus

$$D_{FT} = \left| \frac{P_{LA1} \cdot f_{FL}}{f_{LA1}} \right| \quad (\text{Gl. 2})$$

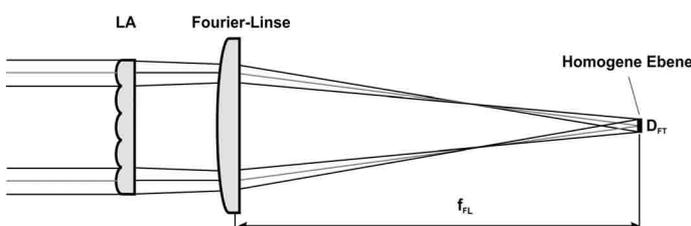
wobei  $f_{LA}$  die Brennweite des Linsenarrays ist. Nicht-abbildende Homogenisierer zeigen häufig starke Beugungseffekte als Resultat der Fresnelbeugung am Mikrolinsenarray. Erst Fresnelzahlen  $FN > 10$ , besser  $FN > 100$ , führen in der Praxis zu gleichmäßigen Intensitätsverteilungen. Aufgrund der Proportionalität des Rechteckprofil-Durchmessers zur Fresnelzahl eignen sich nicht-abbildende Homogenisierer somit am besten für die Ausleuchtung größerer Flächen. Für kleine Fresnelzahlen  $FN < 10$  oder sehr gleichmäßige Verteilungen ist abbildenden Homogenisierern der Vorzug zu geben.

Abbildende Homogenisierer (**Bild 4**) bestehen aus zwei Mikrolinsenarrays und einer sphärischen Fourierlinse (FL), in deren Fokusebene sich die Homogenisierungsebene befindet. Für den Rechteckprofil-Durchmesser  $D_{FT}$  ergibt sich folgender Zusammenhang:

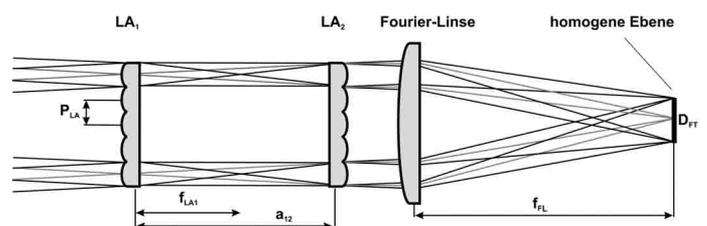
$$D_{FT} = P_{LA1} \frac{f_{FL}}{f_{LA1} \cdot f_{LA2}} [(f_{LA1} + f_{LA2}) - a_{12}] \quad (\text{Gl. 3})$$

mit  $f_{LA1} < a_{12} < f_{LA1} + f_{LA2}$

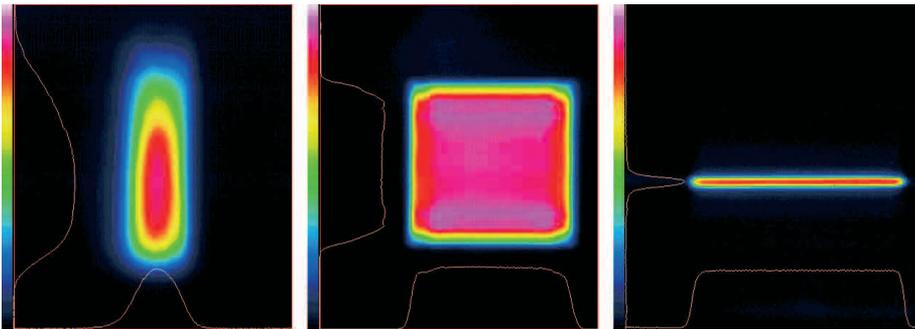
Dabei bezeichnet  $a_{12}$  den Abstand der beiden Mikrolinsenarrays. Bei einem abbildenden Homogenisierer zerteilt das erste



**Bild 3:** Schema eines nicht-abbildenden Homogenisierers



**Bild 4:** Schema eines abbildenden Homogenisierers



**Bild 5:** Gemessene Intensitätsverteilung eines Excimer Lasers: links der Rohstrahl, in der Mitte ein homogenisiertes Quadrat, rechts eine homogenisierte Linie

Mikrolinsenarray den einfallenden Strahl in viele kleine Teilstrahlen. Das zweite Array verhält sich in Kombination mit der sphärischen Linse wie ein Array von Objektivlinsen, das die Bilder der Teilstrahlen des ersten Arrays in der Homogenisierungsebene überlagert.

Der abbildende Homogenisierer entspricht dem eingangs besprochenen klassischen Wabenkondensator, bei dem durch eine Vielzahl paralleler Köhlerscher Beleuchtungssysteme eine homogene Ausleuchtung unabhängig von der Beleuchtung erzeugt wird. Beim abbildenden Homogenisierer hängt der Rechteckprofil-Durchmesser  $D_{FT}$  vom Abstand  $a_{12}$  der beiden Arrays ab. Somit lässt sich durch Verschiebung des zweiten Arrays die Größe des Rechteckprofils korrigieren. Üblicherweise bestehen abbildende Homogenisierer aus zwei Arrays mit identischem Mittenabstand (Pitch)

und Brennweite. Quadratische Mikrolinsen generieren eine quadratische Intensitätsverteilung, runde oder hexagonale Mikrolinsen generieren dementsprechend runde oder hexagonale Profile. Bei sehr hochenergetischer Laserstrahlung kann das zweite Mikrolinsenarray durch fokussierte Laserstrahlung beschädigt werden. Die Brennweite des ersten Mikrolinsenarrays muss dann angepasst werden, um eine bessere Ausleuchtung der Pupillen des zweiten Arrays und somit eine geringere energetische Belastung des Linsematerials zu erreichen. **Bild 5** zeigt Beispiele für die Homogenisierung von Laserlicht mit abbildenden Homogenisierern.

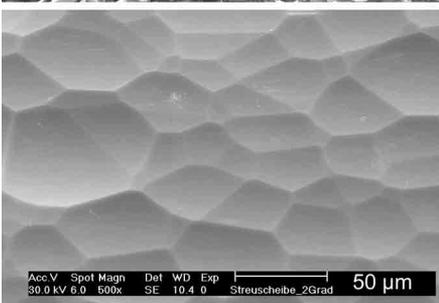
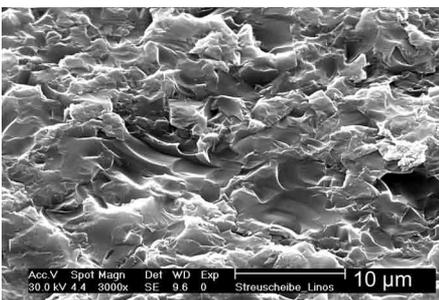
## 4 Reduzierung von Beugungseffekten mittels Streuscheiben

Abbildende Homogenisierer mit Mikrolinsenarrays werden bevorzugt bei Lasern mit niedrigem Kohärenzgrad eingesetzt, wie z.B. bei Excimerlasern. Bei hochkohärenten Lasern (wie z.B. Nd:YAG) wird das Rechteckprofil eines Homogenisierers oftmals durch Beugungs- und Interferenzeffekte an den Arrayoptiken beeinträchtigt. Beugung entsteht an den Pupillen der Mikrolinsen, Interferenzeffekte (Gitterbeugung) durch die Periodizität des Arrays. Im Intensitätsprofil können gemäß der Gittergleichung  $\sin \alpha = m \cdot \lambda / P_{LA}$  diskrete Be-

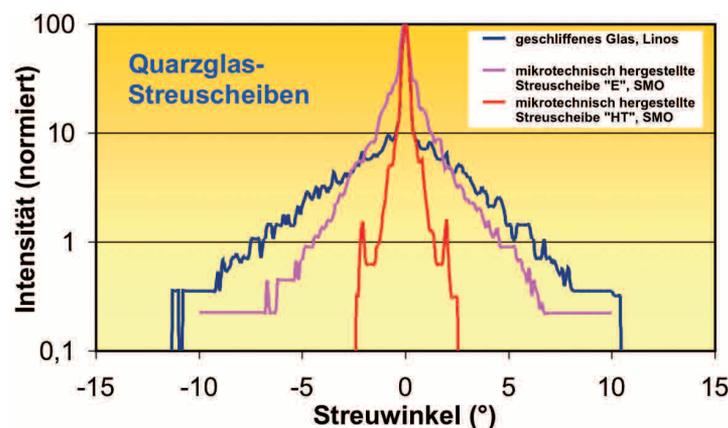
gungsordnungen auftreten, die zu einer Modulation der Intensitäten im Rechteckprofil führen. Die Interferenzeffekte können bei kohärenten Lasern entscheidend vermindert werden: durch Reduzierung des Kohärenzgrads, durch Erhöhung der Strahldivergenz, durch Vergrößerung des Mittenabstands der Mikrolinsen, durch Verwendung von nicht-periodischen Mikrolinsenarrays, durch Verkürzung der Brennweite der Fourierlinse oder durch ein geringes Verschieben der Bearbeitungsebene relativ zur Fourierebene.

Eine weitere Reduzierung der Interferenz- und Beugungseffekte lässt sich durch den Einsatz spezieller Streuscheiben erreichen. Bei cw-Lasern kann mit einer rotierenden oder lateral bewegten Streuscheibe der Kohärenzgrad stark vermindert werden. Für gepulste Laser ist dies nur möglich, wenn die Streuscheibe sehr schnell bewegt wird und in der Bearbeitungsebene über mehrere Pulse zeitlich gemittelt werden kann, z.B. durch Mehrfachbelichtung eines photosensitiven Lackes. Eine statische Streuscheibe mit kleinen Streuwinkeln kann zum Verschmieren der Intensitätsmodulation eingesetzt werden. Streuscheiben werden in der Praxis vor, nach oder auch innerhalb des Mikrolinsen-Homogenisierers platziert. Ein wesentlicher Nachteil herkömmlicher Streuscheiben sind die teilweise hohen Verluste.

Das Oberflächenprofil verschiedener Streuscheiben zeigt Bild 6. Bei Streuscheibenprofilen ähnlich den im oberen SEM-Bild gezeigten wird das einfallende Licht durch die scharfen hochfrequenten Strukturen in den gesamten Halbraum gestreut. Mikrotechnische Herstellungsverfahren ermöglichen die Fertigung von Streuscheiben, die über 90% des einfallenden Lichtes in einen sehr kleinen Winkelbereich streuen. Wie im SEM-Bild unten (**Bild 6**) gezeigt, bestehen diese Streuscheiben z.B. aus einer statistischen Ansammlung unterschiedlicher konkaver Mikrolinsen. Wie aus der gemessenen Fernfeldverteilung in **Bild 7** zu ent-



**Bild 6:** SEM-Aufnahmen typischer Oberflächenstrukturen: oben eine Streuscheibe, wie sie durch Sandstrahlen oder Lappen hergestellt werden kann, darunter eine mikrotechnisch gefertigte Streuscheibe



**Bild 7:** Gemessene Fernfeld-Streuverteilungen verschiedener Streuscheiben

nehmen ist, können so Streuwinkel von kleiner  $1^\circ$  (FWHM) realisiert werden. Die Kombination dieser hocheffizienten Streuscheiben mit Mikrolinsen-Homogenisierern ermöglicht es Flat-Top und Linien-Intensitätsprofile mit Gleichförmigkeits-Abweichungen unter  $\pm 2\%$  zu erreichen.

## 5 Zusammenfassung

Eine verlustarme Homogenisierung von Laserlicht hat entscheidenden Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und Güte vieler optischer Systeme in der Produktion, Messtechnik und Forschung. Mehr Licht und eine homogenere Ausleuchtung sind oft gleichbedeutend mit einem höheren Durchsatz, einer besseren Ausbeute und niedrigeren Kosten. Dies führt zu einer starken Nachfrage nach leistungsfähigen Strahlhomogenisierern (**Bild 8**). Mit modernen mikro-optischen Fertigungsverfahren können refraktive und diffraktive Strahlhomogenisierer hergestellt werden, die Rechteck-Intensitätsprofile mit Inhomogenitäten unter  $\pm 2\%$  ermöglichen. Für hochkohärente Laser ist eine gute Homogenisierung nur teilweise realisierbar. Ebenso kann es aus physikalischen Gründen nicht gelingen, einen sehr dünnen homogenen Laserstrahl mit großer Schärfentiefe zu erzeugen. Dem Kauf eines Strahlhomogenisierers sollte deshalb in jedem Fall eine eingehende Beratung und Analyse vorausgehen.



**Bild 8:** Systeme zur Homogenisierung von Laserstrahlen (v.l.): Mikrolinsenarray, Homogenisierer des BLZ für den professionellen Einsatz, Homogenisierer für das Linos-Mikrobanksystem

### Literaturhinweise:

- [1] P. Oesterlein, A. Koch, *Das Erzeugen kleiner Strukturen mit Excimerlasern*, in: M. Geiger, M. Fleckenstein, *Laser in der Elektronikproduktion und Feinwerktechnik*, LEF 2001, 207-218
- [2] U. Popp, S. Weidel, U. Engel, *Charakterisierung von lasererzeugten Mikrostrukturen*, in: M. Geiger, M. Polster (Hrsg.), *Laser in der Elektronikproduktion und Feinwerktechnik*, LEF 2005, 175 - 183, Meisenbach Verlag Bamberg 2005
- [3] R. Völkel, H.P. Herzig, P. Nussbaum, R. Dändliker, *Mikrolinsenarrayimagingssystem for photolithography*, in: *Optical Engineering* 45(11), 3323 - 3330, Nov. 1996
- [4] U. Urmonet, G. Eber, *Kristallisation amorpher Si-Schichten für die Displayherstellung*, in: M. Geiger, M. Fleckenstein (Hrsg.), *Laser in der Elektronikproduktion und Feinwerktechnik*, LEF 2002, 67 - 79, Meisenbach Verlag Bamberg 2002
- [5] F.H. Meyer-Pittroff, *Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie*, in: M. Geiger, K. Feldmann, *Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie*, Meisenbach Verlag Bamberg 2003
- [6] K. Rantsch, L. Bertele, H. Sauer, A. Merz, *Illuminating System*, US-Patent 2186123, United States Patent Office, 1940
- [7] F.M. Dickey et al., *Laser Beam Shaping*, ISBN 0-8247-0398-7, 2000, und: *Laser Beam Shaping Applications*, ISBN 0-8247-5941-9, 2006

### Ansprechpartner:

Dr. Reinhard Völkel  
Geschäftsführer  
Suss MicroOptics SA  
Rue Jaquet-Droz 7  
CH - 2007 Neuchâtel  
Tel. +41/32/7205103  
Fax +41/32/7205713  
eMail: voelkel@suss.ch  
Internet: www.suss-microoptics.com



### OPTATEC: Stand 3.0 B54

Maik Zimmermann  
Bayerisches Laserzentrum gGmbH (BLZ)  
Konrad-Zuse-Str. 2-6  
D-91052 Erlangen  
Tel. +49/9131/97790-28  
Fax +49/9131/97790-11  
m.zimmermann@blz.org  
Internet: www.blz.org



www.photonik.de ▶ Webcode 3006