

Laserlicht formt Mikrolinsen

Autor: Lajos Bogнар CH-Gisikon

Publikation in F&M Elektronik, Optik und Mikrosystemtechnik 103 (1995) C. Hansen Verlag München

Glasfasern bieten eine Reihe von Vorteilen gegenüber elektrischen Leitern. Doch stehen diesen Vorteilen auch Nachteile gegenüber: Ein- und Auskoppelung von Lichtenergie, verlustreiche Steckverbindungen und Anpassung an die Opto-Sensorik fordern eine ständige Weiterentwicklung. Die Mikrolinsenfertigung mittel Laserlicht ist die derzeit vielversprechendste Innovation auf dem Gebiet der Optik-Fertigung.

Laserlight forming microlensis

Glass fibres offer a series of advantages compared to electric conductors. But these benefits are opposed by drawbacks; the coupling and uncoupling of light energy, plug connections with high losses, and the adaptation to optosensory technology make constant further advancements imperative. The production of microlenses by means of laser light is at present the most promising innovation on the sector of optical production.

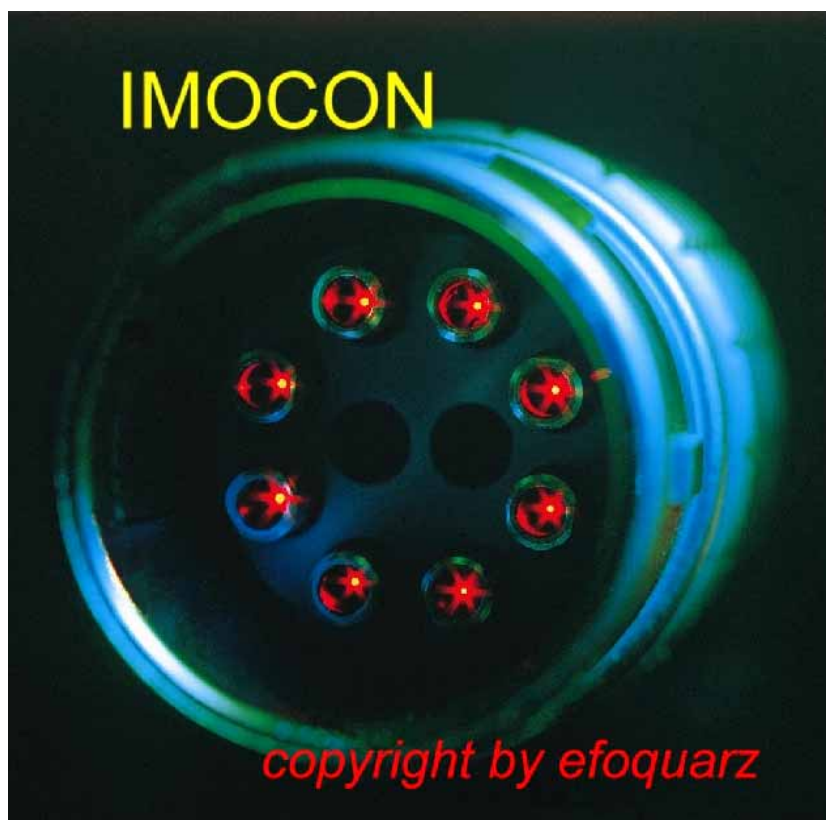


Bild 1 Steckverbindung für acht parallele LWL- Datenleitungen

Glasbearbeitung mit dem Laser

Es bietet sich förmlich an, damit Mikrolinsen aus reinem Quarzglas gebrauchsfertig zu bearbeiten. Da sich die Energie des Laserstrahls auf kleinsten Raum verdichten lässt, wird das Material Quarzglas (SiO_2) in Bruchteilen von Sekunden in einen anderen Aggregatzustand (Dampfphase) versetzt.

Die vorrangige Aufgabe besteht darin, den fokussierten Laserstrahl so einzukoppeln, dass möglichst die Gesamtstrahlleistung von der Quarzglasoberfläche absorbiert wird. Glas- ebenso wie Quarzglas absorbiert im Infrarotbereich nahezu 90 Prozent der einfallenden Strahlung. Auf den Absorptionsgrad von Gläsern kann jedoch in grossem Umfang über die Temperatur, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Glases Einfluss genommen werden, so dass in der Praxis geringe Abweichungen an der Tagesordnung sind.

Trifft der Laserstrahl auf eine Glasoberfläche, so wird er durch Oberflächenabsorption in Wärme umgewandelt. Bei ausreichend hoher Laserleistung kann die auf diese Weise eingebrachte Wärmemenge zur Bearbeitung von Quarzglas genutzt werden. Dabei findet eine schnelle und berührungslose Erwärmung statt, im Glas wird die Strahlungsenergie in Bewegungsenergie der Gitterschwingungen umgesetzt, dabei verflüssigt sich das Quarzglas und verdampft schliesslich.

Seit den 60er Jahren wird die Lasertechnik in ganz unterschiedlichen Bereichen der Industrie mit grossem Erfolg eingesetzt und bietet eine Vielfalt von Lösungen und Anwendungsmöglichkeiten. Da diese ständig zunehmen, ist davon auszugehen, dass der Lasermarkt auch in Zukunft weiter boomt und bald ein Mehrfaches seines heutigen Volumens erreichen wird.

Der Erfolg des Lasers in der Materialbearbeitung ist auf seine besondere physikalische Funktionsweise zurückzuführen, für die zur Zeit noch keine gleichwertige Alternative bekannt ist. Trotz der bisher erreichten Erfolge muss jedoch betont werden, dass die Lasertechnik in der Glas- beziehungsweise Quarzglasbearbeitung – insbesondere in der Linsenherstellung – noch in den Kinderschuhen steckt.

Laserstrahlung als Energieform ist dadurch gekennzeichnet, dass sie mit hohem Wirkungsgrad Materialien in andere Energieformen oder andere Aggregatzustände umwandelt. Die gute Fokussierbarkeit, hohe Leistungsdichte und leichte Manipulierbarkeit eines Laserstrahls prädestinieren ihn für Bearbeitungsanwendungen. Neben den Grossserienanwendungen existieren eine Reihe von Spezialfällen – wie die Herstellung der Lichtwellenleiter benötigten Mikrolinsen – die zur Zeit nur durch Einsatz der Lasertechnik realisierbar sind.

Unter Berücksichtigung der charakteristischen Eigenschaften des Laserstrahls einerseits und eingehender Untersuchungen der Glas- und Quarzglaseigenschaften andererseits, lassen sich unterschiedliche Bearbeitungsmöglichkeiten finden. Wegen der erforderlichen Laserleistung sowie der Strahlhomogenität stehen dabei vor allem die Laserwellenlängen CO beziehungsweise CO_2 im Vordergrund.

Mikrolinsen werden immer wichtiger

Da die Elektronik bereits an ihre physikalischen Grenzen gekommen ist, gewinnt das Licht als Datenträger mehr und mehr an Bedeutung. Einige Forscher träumen von optischen Computern, an der setzen auf die Photonik, eine Symbiose aus Elektronik und Optik.

Optische Leitungen lassen sich problemlos zusammenspleissen (fest verschmelzen) oder zusammenstecken durch Ein- und Mehrfach-Steckverbindungen. Bild 1 zeigt beispielhaft eine Steckverbindung für acht parallele LWL- Datenleitungen.

Der Anforderungskatalog an eine faseroptische Steckverbindung ist indes entsprechend gross. Die wichtigsten Punkte des Pflichtenhefts sind:

- Minimale Dämpfung,
- Berührungsfreiheit,
- Unempfindlichkeit gegen Verunreinigungen,
- Leicht zu ersetzen,
- Einfache Reinigung und Wartung.

Ziel bei der Konstruktion eines optischen Steckersystems ist es, ein Maximum an Lichtenergie von einem Lichtsender (oder aus einem Lichtwellenleiter-Ende) in einen weiteren Lichtwellenleiter zu übertagen. Man spricht von einer optimalen optischen Anpassung.

Das erste Entwicklungsziel

Die erste Stufe des gesteckten Zieles wurde bereits erreicht, indem die Enden eines Lichtwellenleiters zuerst aufgeweitet werden und anschliessend eine Kugellinse geschmolzen wird. In Bild 2 lässt sich erkennen, dass der Laserstrahl quasiparallel die Kugellinse verlässt. Bei Monomode-Fasern beträgt die Strahlkohärenzlänge bis zu 100 mm, bei Multimode-Fasern dagegen nur wenige Millimeter. Um bei den Multimode-Fasern diesen Nachteil zu eliminieren, spricht die austretende Strahlkohärenz im Distanzbereich bis zu 100 mm oder mehr zu erhalten, benötigt man eine Mikrolinse mit einem Aussendurchmesser von 0.8 mm und einer Länge von 1.7 mm.

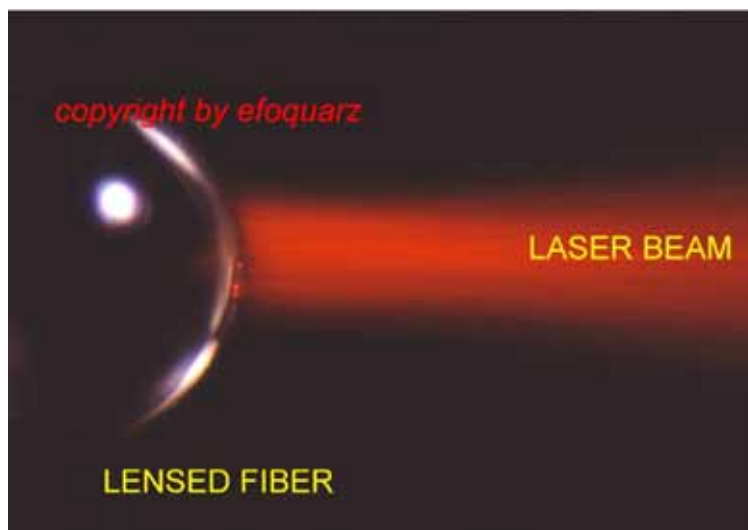


Bild 2. Integrierte Mikro-Optik: Deutlich erkennt man den Laserstrahl 680 nm, der quasiparallel die Kugellinse mit einem Durchmesser von gerade einmal 50 μm verlässt.

Integrierte Mikro-Optik in Sensor Anwendungen

Der Quarzglas Lichtwellenleiter (im Längenbereich zwischen 20 und 100 mm) an beiden Enden mit integrierter Mikro-Optik, kurz IMO, abgeschlossen, kann in unzähligen Sensoraufgaben eingesetzt werden. Man denke an Messapplikationen wie Weg, Schwingungen, Strömung, Neigung, Biegung und Dehnung,

die mittels linearen Positionsdetektoren, kurz PSD, erfasst werden können. Durch PSD-Elemente lassen sich platzsparende, ein- und zweidimensionale Lageabweichungen problemlos registrieren. Die PSD-Signalverarbeitung kann analog, aber auch digital erfolgen. Wird eine IR-Diode gemäss Bild 3 mit Wechselsignalen betrieben, so kann das PSD-Signal drifffrei verstärkt und beispielsweise mit einem 16 Bit (maximal 24 Bit) AD-Wandler digitalisiert werden. Ergebnis sind Wegauflösungen im nm-Bereich.

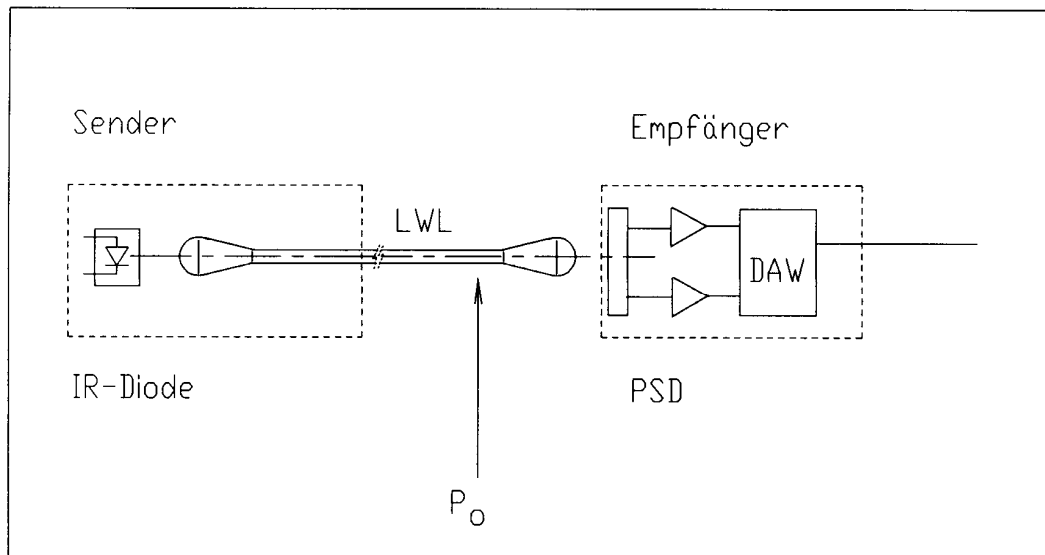


Bild 3. Interessante Anwendungen für integrierte Mikro-Optik sind beispielsweise Sensoren, bestehend aus IR-Sender und Positionsdetektoren (PSD).

Der Grundaufbau eines solchen Sensors – bestehen das Sende- und Empfangseinheit – zeigt Bild 3. Der Sender als eine Einheit beinhaltet eine IR-Diode und den Lichtwellenleiter mit IMO an den enden. Der Empfänger für analoge Wegerfassung besteht aus einem PSD-Element. Für digitale Auswertung genügt nur ein Photoelement mit zwei lichtempfindlichen Zellen und entsprechender Signalauswertung. Ändert das freie Ende des Lichtwellenleiters aufgrund minimaler Kräfteeinwirkung (P_o) gegenüber dem PSD seine Position, ändert sich somit auch der Lichtpunkt auf dem PSD, was eine Signaländerung zur Folge hat.

Das zweite Entwicklungsziel

Der Entwicklungsschwerpunkt besteht darin, den austretenden Strahl nach Bild 2 über längere Distanzen (> 100 mm) kohärent zu halten und eine optische Anpassung beim Einkoppeln zu ermöglichen. Hierzu benötigt man eine Kollimatorlinse. Aus Herstellungsgründen ist es ratsam abzuwägen, ob mit einer einzigen Kollimatorlinse bereits eine Kompromisslösung gefunden werden kann. Der Einfachheit halber

geht man hier von einem Grenzfall aus und vernachlässigt Verluste und Absorption ($N = 1$). Unter Anwendung der geometrischen Optik kommt man zu folgender Gleichung:

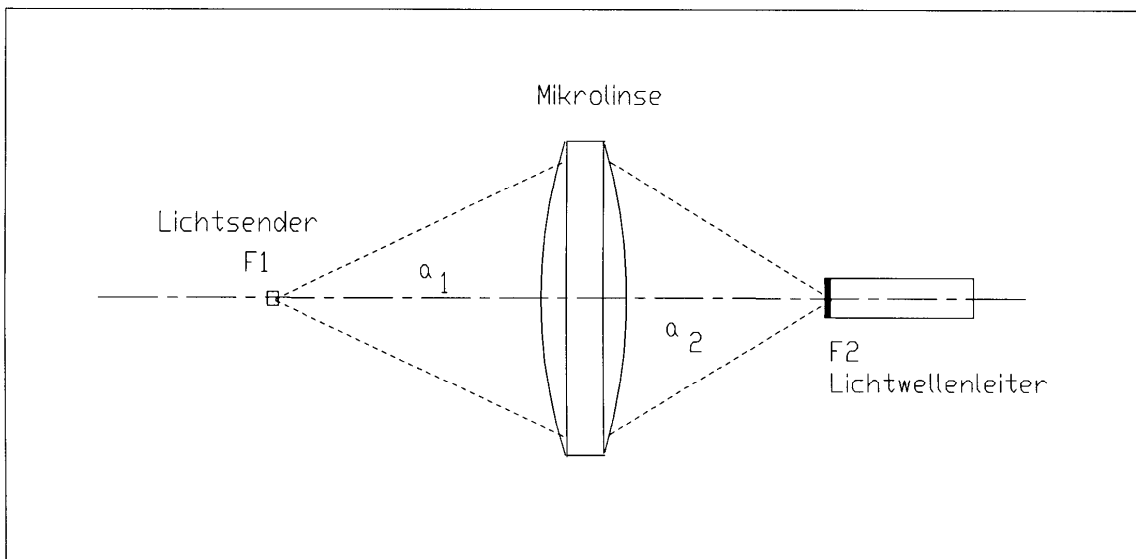


Bild 4. Die Abbildung eines Lichtsenders mittels einer Mikro-Kollimatorlinse in den Eingang eines Lichtwellenleiters ist eine der häufigsten Anwendungen.

$$dF_1 \cdot \alpha_1 = dF_2 \cdot \alpha_2 \quad (1)$$

dF_1	=	Fläche des Lichtsenders
dF_2	=	LWL Fläche
α_1	=	Eintritts-Raumwinkel
α_2	=	Austritts-Raumwinkel

Bei einer Sammellinse wird angenommen, dass $\alpha_1 = \alpha_2$ ist, somit wird α als Raumwinkel eingeführt und $F_2 = F_1$ wird F als Einheitsfläche definiert.

Das Produkt Lichtsenderfläche und Raumwinkel ist:

$$F \cdot \alpha = S$$

S = Systemkonstante

Bei der Faseroptik wird S durch die Apertur und den Öffnungswinkel der Lichtwellenleiter bestimmt. Alles, was S einschränkt, bestimmt den Wirkungsgrad, und keine noch so raffinierte Lindenkonstruktion kann den Wirkungsgrad verbessern.

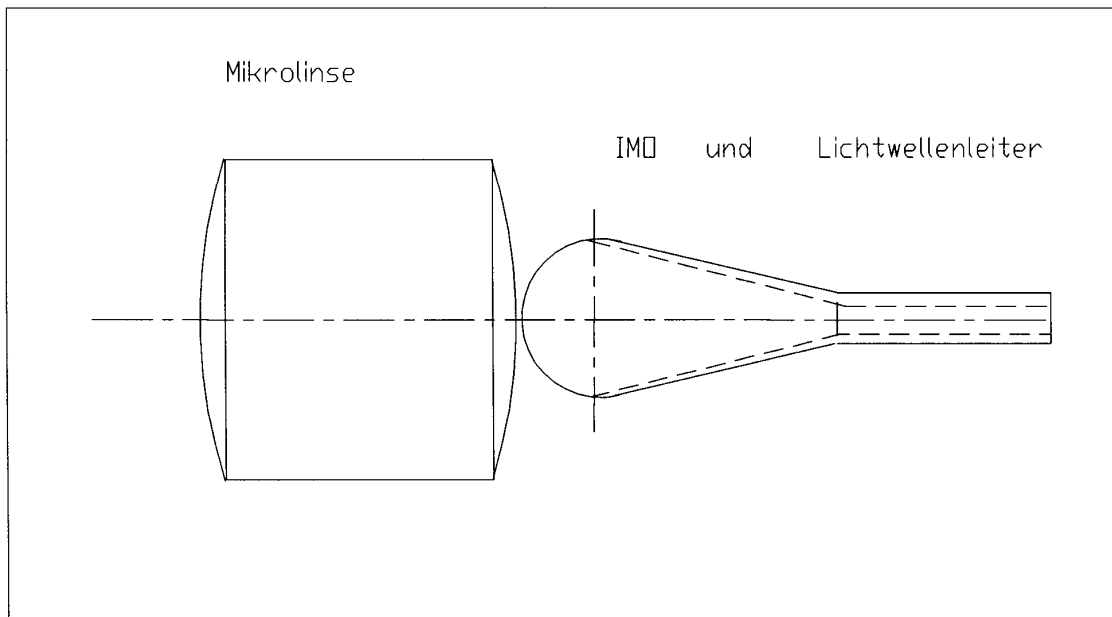


Bild 5. Eine optimale faseroptische Anpassung besteht aus einer lasergefertigten Ampassoptik und einer integrierten Mikrolinse, die am LWL-Ende aufgeschmolzen ist.

Die Anpass- oder Sammeloptik sollte einen S-Wert haben, der gleich dem S_{\max} , einem Maximum entspricht. Höhere S-Werte sind zulässig, denn es wird mehr Lichtenergie eingeführt, die jedoch durch geometrische Ausdehnung nicht vollständig passieren kann.

Für einen Lichtwellenleiter-Steckverbinder bedeutet dies, dass ein Teil der Lichtenergie verloren geht oder im Inneren des Lichtwellenleiters reflektiert. Dies kann zu Bandbreitenstörungen führen. Eine optimale faseroptische Anpassung (Bild 5) besteht einerseits aus einer Anpassoptik, die mittels Laser hergestellt wird, und andererseits aus der integrierten Mikrolinse, die am LWL-Ende angeschmolzen ist. Durch die Mikrolinse wird die optische Anpassung in zweifacher Hinsicht optimiert: Zum einen bei der Lichteinkoppelung, die bis zu sechs bis acht Mal höhere Energieeinkoppelungen ermöglicht. Und zum anderen bei der Auskoppelung. Hier wird eine kohärente Lichtstrahlführung auch im Bereich über 100 mm möglich. Diese Angaben beruhen auf normalem Quarzglasstab-Kollimatoren mit einem Aussendurchmesser von 0.8 mm und einem Stufenindexmantelprofil. Über die gradientendotierte Hybridlinse mit zwei unterschiedlichen Brechungsindizes wird die F&M noch in diesem Jahr berichten.

Optimale Resultate dank guter Laserprozessbeherrschung

Das Verfahrensprinzip der Lasersublimation lässt sich aus Bild 6 ersehen. Eine im Strahlführungskopf befindliche Fokussiereinrichtung (Spiegelsystem) fokussiert den Laserstrahl auf das Werkstück (SiO_2 Quarzglas). Bei typischen Leistungswerten von 10^8 W/cm^2 schmilzt und verdampft das Quarz im Brennpunkt. Das aus der Strahldüse austretende Schutzgas schützt den Optikkopf von Verschmutzungen. Da das überschüssige Quarzglas im Absorptionspunkt verdampft wird, spricht man von Lasersublimation.

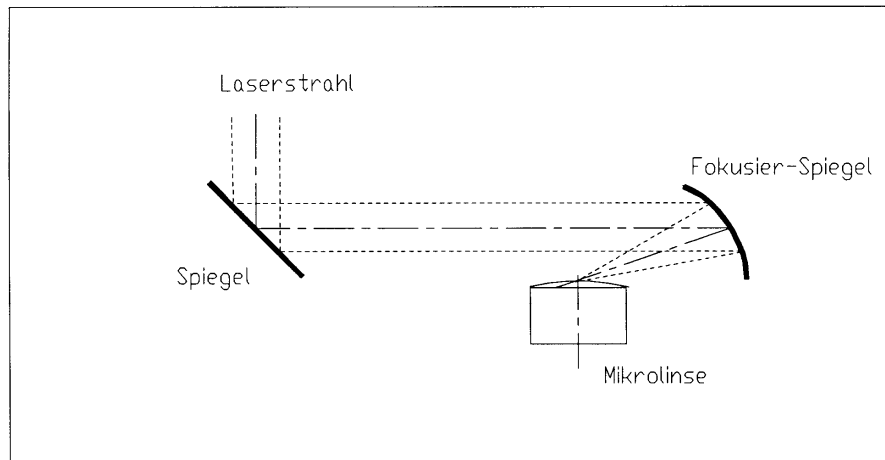


Bild 6. Bei der Lasersublimation wird ein Laserstrahl auf das zu bearbeitende Werkstück fokussiert. Im Brennpunkt genügt die Energiedichte, um das überschüssige Quarzglas zu verdampfen.

Die Wellenlänge ist durch das laseraktive Medium gegeben. Sie ist von grosser Bedeutung, weil die Absorption von Quarzglas mit sinkender Wellenlänge zunimmt ($\text{CO} = 5\text{ nm}$ / $\text{CO}_2 = 10,6\text{ nm}$). Auch die Fokussierbarkeit wird besser. Der Mode TEM 007 die Intensitätsverteilung, Strahldurchmesser und Divergenz sind von entscheidender Bedeutung für die Fokussierbarkeit eines Laserstrahls.

Der Sublimationsprozess hängt stark von der eingestrahnten Laserleistung ab. Bei hoher Leistung ist die Wärmeleitung des Quarzglases so langsam, dass die absorbierende Quarzschicht bereits verdampft, bevor die Temperaturfront in das Quarzglas eindiffundiert.



Bild 7. Die bei der Bearbeitung von Mikrolinsen entstehende, hell leuchtende Quarzdampf- oder -schmelzwolke überstrahlt das gesamte Bild, nur die Konturen sind schwach erkennbar.



Bild 8. Bei der Feinabtragung wird die Mikrolinse mit reduzierter Laserstrahlleistung bearbeitet.



Bild 9. Die Linsenaufnahmeeinrichtung bildet zusammen mit der Steuerung und Prozesskontrolle eine Einheit zur Erzeugung der Relativbewegung zwischen fokussiertem Laserstrahl und Linse.

In der Sublimationsphase entsteht ein thermisches Gleichgewicht, in dem die aufgeheizte Oberflächenschicht fortlaufend verdampft. Gleichzeitig schreitet die fest/flüssige Phasengrenze proportional zur Sublimation in die Tiefe. Die absorbierte Laserenergie wird als Verdampfungs- und zu

EFOQUARZ

einem geringen Teil als Schmelzwärme für die optische Oberflächen-Zonenverschmelzung verbraucht. Die Verhältniszahl φ lässt sich aus Verdampfung und Schmelzwärme ermitteln.:

$$\varphi = \begin{array}{ll} 0,15 & \text{bis } D \leq 1,0 \text{ mm} \\ 0,18 & 2,0 \text{ mm} \\ 0,22 & 3,0 \text{ mm} \end{array}$$

D = Linsendurchmesser

Es muss erwähnt werden, dass ähnlich wie bei der spanabhebenden Bearbeitung auch in der Sublimationsphase zwischen grob- und Feinabtragung unterschieden wird.

Wesentliche Komponenten von Laser-Sublimations-Anlagen sind die Strahlquelle, der Bearbeitungskopf mit integrierter Strahlführung und Fokussierung. Zur Erzeugung der Relativbewegung zwischen Linse und fokussiertem Strahl bildet die Linsenaufnahme-Einrichtung (Bild 9), Prozesskontrolle und Steuerung eine Einheit.

Zukunft in der Mikrooptik (Dotierung durch Laserstrahl)

Mit der optimalen Steuerung der Laserleistung (in die Tiefe gerichtete breite Strahlführung, Homogenitätsverteilung sowie der Prozessdauer und Beimischung von Zusätzen wie $\text{GeCl}_4 + \text{SiCl}_4$) können an der Quarzglasoberfläche Dotierungen vorgenommen werden. Die dabei eingeleitete Gefügeveränderung verläuft bedeutend rascher als bei Diffusionsverfahren.

Bei der Dotierung wird der Prozess so geführt, dass Material durch eine Deckschicht zugeführt und nicht von der Quarzbasis aufgenommen wird. Das Laser-Dotierungsverfahren hat auch den Vorteil, dass die Schichtenbildung kontrolliert und gezielt erfolgen kann. Es handelt sich hierbei um eine zonenbeziehungsweise stufenweise Veränderung des Brechungsindizes. Dadurch ist es möglich, den Strahlengang innerhalb einer Linse zu optimieren.

Das zukünftige Marktpotential in der Glas- und Quarzglasbearbeitung ist sehr schwer abzuschätzen. Gesichert scheint die Zukunft der Mikrolinsenfertigung durch Laser für Anwendungen in der Lichtwellenleitertechnik (LWL). Schliesslich erlauben nur Mikrolinsen die Realisierung zuverlässiger Optostecker und Hybridstecker für die immer wichtiger werdende elektrooptische Informationsübertragung.

Der Autor dieses Beitrages:

Dipl. Ing. HTL Lajos Bogнар, Jahrgang 1937, studierte Optik und Feinwerktechnik in Ungarn, Elektrotechnik an der HTL Luzern. Im Jahr 1970 gründete er die Firma *Efoquarz GmbH*, CH-6038 Gisikon, deren Eigentümer und Geschäftsführer er bis zum heutigen Tage ist. Schwerpunkt seiner Tätigkeit ist die Entwicklung spanloser Quarzglasbearbeitungsverfahren und die Produktion von Quarzglaslinsen.

Alle Bilder: Werkbilder EFOQUARZ GmbH