

# Hochgeschwindigkeitsdrehoptik zum Mikrobohren mit ultrakurzen Laserpulsen

Eckhard Langenbach, Frank Saupe  
FISBA AG, CH-9016 St. Gallen  
<mailto:eckhard.langenbach@fisba.com>

In einer Optik zum Mikrobohren mit ultrakurzen Laserpulsen wirkt ein Porro-Prisma in einer Hochgeschwindigkeitsspindel als rotierende Spiegelachse, die den Laserfokus mit verdoppelter Drehzahl kreisförmig auf dem Werkstück bewegt. Die im Vergleich zu bestehenden Produkten höhere Umdrehungsgeschwindigkeit führt zu einer deutlich besseren Prozesseffizienz.

## 1 Einleitung

Bei der Materialbearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen werden aktuell Laser mit 120  $\mu\text{J}$  Pulsenergie, 10 ps Pulsdauer und 100 kHz Pulsfrequenz verwendet. Zukünftig sind noch kürzere Pulse mit höherer Energie zu erwarten. Während der kurzen Pulsdauer kann die absorbierte Leistung nicht durch Wärmeleitung abgeführt werden, und die Pulsenergie reicht dann aus, den Werkstoff zu verdampfen. Damit das Werkstück nicht wesentlich erwärmt wird, dürfen sich die Brennpunkte aufeinanderfolgender Pulse nur wenig überlappen.



**Abbildung 1** Laserbohren mit geringem Pulsüberlapp

Beim Bohren kleiner Löcher mit z. B. 50  $\mu\text{m}$  Durchmesser erfordert die Pulswiederholfrequenz eine hohe Drehzahl der Brennpunktbewegung von ca.  $200\,000\text{ min}^{-1} \approx 3.3\text{ kHz}$ , um den geringen Überlapp der einzelnen Laserpulse zu gewährleisten (siehe Abb. 1). In den folgenden Abschnitten wird ein optisches System vorgestellt, bei dem optische Komponenten in einer Präzisionsspindel schnell rotiert werden, um diese Drehbewegung des Laserstrahls zu erreichen.

## 2 Funktionsprinzip

Ursprünglich ist eine Optik untersucht worden, bei der optische Komponenten, die in einer Drehspindel rotieren, den parallel zur Spindelachse verlaufenden Laserstrahl seitlich versetzen und ablenken. Anschließend wird das Licht von einem feststehen-

den Objektiv fokussiert, und der Laserfokus rotiert in der Bildebene synchron mit der Spindeldrehung. Bei den angestrebten Drehzahlen treten dann aber so große Fliehkräfte auf, dass die optischen Flächen bereits merklich deformiert werden, und die von Materialspannungen bewirkte Doppelbrechung verändert den Polarisationszustand des Laserstrahls. Außerdem erschwert der Strahlverlauf durch die Spindel deren Lagerung und Antrieb. Deshalb wird der Laserstrahl jetzt nicht mehr versetzt und abgelenkt, sondern mit optischen Bauteilen an einer Gerade gespiegelt, die senkrecht auf der Spindelachse steht und sich mit der Spindeldrehzahl um deren Achse dreht. Ein zur Spindelachse seitlich versetzter oder verkippter Laserstrahl rotiert nach der Achsen Spiegelung mit der doppelten Spindeldrehzahl um die Spindelachse.

Eine solche Strahlspiegelung lässt sich z. B. mit einem Porro-Prisma realisieren, bei dem die Spiegelachse mit der Dachkante zusammenfällt. Abbildung 2 zeigt den Strahlverlauf in einem solchen System mit zwei um  $90^\circ$  verdrehten Prismenpositionen. Der seitliche Versatz des Laserstrahls hat sich dabei um  $180^\circ$  um die Spindelachse gedreht. In der Abbildung werden die folgenden Komponenten dargestellt:

1. Laserstrahl
2. Polarisationsstrahlteiler
3.  $\lambda/4$ -Platte
4. rotierendes Porro-Prisma
5. Drehachse
6. Fokussierobjektiv
7. Werkstück

Durch diesen modifizierten Aufbau mit nur einer rotierenden Optikkomponente werden durch die Halbierung der Spindeldrehzahl die Fliehkräfte um 75% reduziert. Außerdem ist das Porro-Prisma ein zur Drehachse symmetrisches Bauteil, bei dem keine Massenkräfte und Massenmomente auftreten. Die Strahlführung erfordert keine hohle Spindel, was den Aufbau und Antrieb der Spindel erheblich erleichtert.

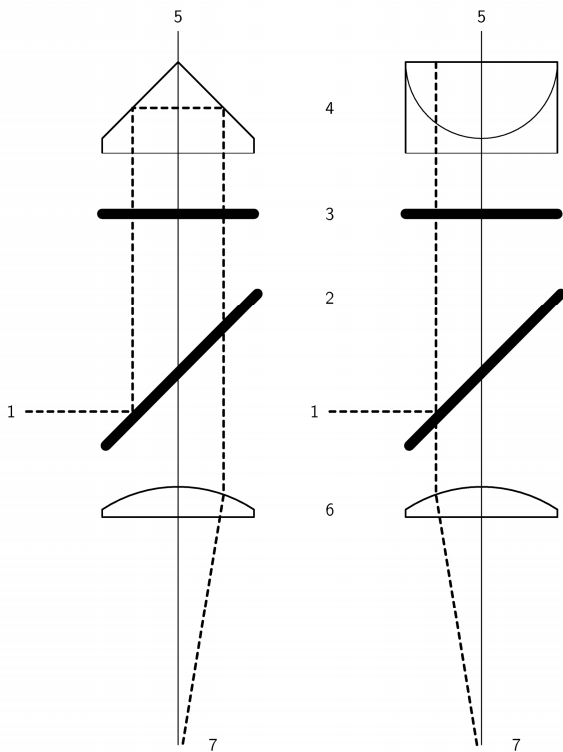


Abbildung 2 Strahlverlauf für zwei Prismenpositionen

### 3 Polarisierungseigenschaften

Bei dem gewählten Strahlverlauf befinden sich Eingangs- und Ausgangsstrahlen auf der selben Seite der Drehoptik und werden mit ihrer unterschiedlichen linearen Polarisierung durch den Polarisationsstrahlteiler (2 in Abb. 2) getrennt. Zwischen dem Strahlteiler und dem rotierenden Porro-Prisma (4) befindet sich eine  $\lambda/4$ -Platte (3), die das einfallende, linear polarisierte Licht in zirkular polarisiertes Licht umwandelt. Die beiden totalreflektierenden Spiegelflächen des Porro-Prismas werden mit einer dielektrische Beschichtung versehen, die jeweils  $90^\circ$  Phasenverschiebung zwischen s- und p-polarisiertem Licht bewirkt. Das Porro-Prisma wirkt damit wie eine  $\lambda/2$ -Platte, die den Drehsinn der zirkularen Polarisierung umdreht. Beim zweiten Durchgang durch die  $\lambda/4$ -Platte (3) wird das Licht wieder linear polarisiert, wobei die Polarisationsrichtung gegenüber der ursprünglichen Polarisationsrichtung um  $90^\circ$  gedreht ist, und deshalb wird das Licht vom Strahlteiler (2) jetzt durchgelassen und vom Objektiv (6) auf das Werkstück (7) fokussiert.

### 4 Materialauswahl

Da das Prisma auch bei hohen Drehzahlen trotz der dabei auftretenden mechanischen Spannungen unveränderte Polarisierungseigenschaften behalten soll, ist die Verwendung von hochbleihaltigen Gläsern wie Schott SF57 oder Ohara PBH56 erwogen

worden, deren spannungsoptische Konstante  $K \approx 0$  ist. Diese Gläser werden auch bei mechanischen Spannungen nur wenig doppelbrechend. Allerdings deformieren sich Prismen aus solchen Gläsern wegen der hohen Dichte und des geringen E-Moduls bei den vorgesehenen Drehzahlen so stark, dass die Strahlqualität bereits deutlich leidet. Deshalb sind die aktuell gefertigten Prismen aus Quarzglas gefertigt worden, das im Vergleich zu den bleihaltigen Gläsern nicht nur leichter und steifer ist, sondern auch wesentlich höheren Laserstrahlbelastungen standhalten kann. FEM-Analysen zeigen, dass bei den bisher realisierten Prismen für Laserstrahlen mit 3 mm Strahldurchmesser sowohl die Prismendeformationen als auch die Spannungsdoppelbrechung auf einem niedrigen, nicht störenden Niveau bleiben.

### 5 Montage

Beim Einbau des Porro-Prismas in die Spindel müssen sehr enge Toleranzen eingehalten werden, denn wenn die Dachkante des Prismas nicht genau die Drehachse der Spindel schneidet oder nicht genau senkrecht darauf steht, dann wird bei der Drehung des Prismas die angestrebte Strahlbewegung mit doppelter Spindeldrehzahl von einer Bewegung mit einfacher Drehzahl überlagert. Um die notwendige Positionsgenauigkeit zu erreichen, wird das Prisma zunächst in eine Hilfsfassung montiert und dann mit Autokollimatoren mit und ohne Fokussiervorsatzoptik auf einer Zentrierdrehbank so ausgerichtet, dass sich die Dachkante auf der Drehachse befindet und dazu senkrecht verläuft. Dann werden die Außenflächen der Fassung so nachbearbeitet, dass diese spielfrei und gut zentriert in die Hochgeschwindigkeitsspindel eingebaut werden kann.

Erste Messungen an Testsystemen haben bestätigt, dass sowohl das Funktionsprinzip als auch das Montagekonzept gut funktionieren. Dadurch kann die Prozesseffizienz beim Mikrobohren mit ultrakurzen Laserpulsen deutlich verbessert werden.

### 6 Danksagung

Die Entwicklung der hier vorgestellten Laseroptik ist im Projekt *SPEEDO* von der schweizerischen Kommission für Technologie und Innovation KTI gefördert worden. Dank gilt auch allen Mitarbeitern der beteiligten Projektpartner:

- Fachhochschule Nordwestschweiz, Brugg-Windisch
- Berner Fachhochschule, Burgdorf
- Fischer AG, Herzogenbuchsee
- Trumpf Maschinen AG, Baar
- FISBA AG, St. Gallen