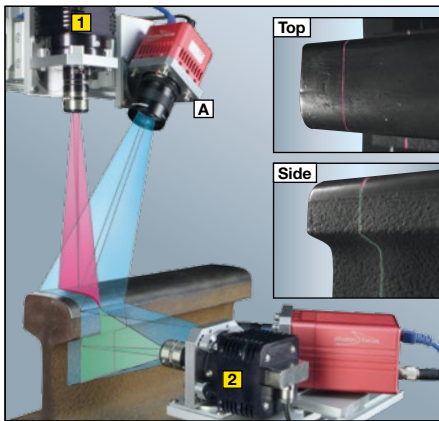


## Applikationen: Laserlinien, Laserspots und Laserpattern für 3D-Messtechnik und Prozesskontrolle



**3D-Konturkontrolle eines Schienenprofils mit Laser-Makroliniengeneratoren 13LRM-... 1 und 2**

**A** und **B** CMOS Matrixkamera

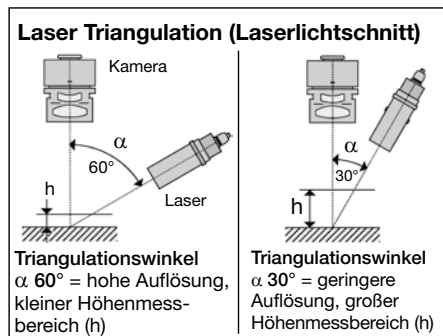
**Top** mit Kamera **A** aufgenommenes Bild der Laserlinie **1**

**Side** mit Kamera **B** aufgenommenes Bild der Laserlinie **2**

### 1 Laserlinien zur Profilmessung in der 3D-Messtechnik

Das Laserlichtschnitt-Verfahren ist ein 3D-Verfahren zur Profilmessung in einer Schnittebene. Nach dem Prinzip der Lasertriangulation (Bild 2) registriert eine senkrecht über dem Objekt angeordnete Kamera den Lateralversatz und die Verformung einer in einem Winkel  $\alpha$  auf die Objektfläche projizierten Laserlinie. Das Kamerabild enthält die Höheninformation entlang der durch den Laserstrahl definierten Schnittebene, zur vollständigen Ermittlung des dreidimensionalen Höhenprofils wird das Objekt in einer scannenden Bewegung unter der Apparatur hindurchgeführt.

Messbereich und Messauflösung werden festgelegt durch den Triangulationswinkel  $\alpha$  zwischen der Ebene der Laserlinie und der optischen Achse der Kameraoptik. Je streifender der Laserstrahl auf die Objektebene fällt, desto größer ist der bei einer Höhenänderung beobachtete Lateralversatz der Linie (vgl. Bild 3). Die Messauflösung wird gesteigert, bei gleichzeitiger Reduzierung des Höhenmessbereichs. Begrenzend auf die erreichbare Auf-



**Bild 2: Prinzip der Lasertriangulation**  
Aus dem Versatz des im Winkel  $\alpha$  auf die Objektfläche einstrahlenden Laserstrahls wird die Objekthöhe am Auftreffpunkt des Lasers bestimmt

lösung wirken Faktoren wie die Eigenschaften der Objektfläche, die Kamera-Apertur und die Breite und Schärfentiefe der Laserlinie.

### 1.1 Oberflächeneigenschaften

Voraussetzung für die Anwendung des Laserlichtschnittverfahrens ist eine zumindest anteilig diffus reflektierende Objektfläche [1]. Bei einem idealen Spiegel gelangt keine Laserstrahlung in das Objektiv. Bei einer rein diffus streuenden Oberfläche ist die Winkelverteilung der reflektierten Strahlung unabhängig vom Einfallswinkel der auftreffenden Strahlung. Reale technische Oberflächen haben im allgemeinen ein gemischt diffus/spiegelndes Reflexionsverhalten. Der diffuse Anteil ist nicht isotrop, d.h. je streifender der Einfall der Strahlung, desto weniger Strahlung wird in senkrechter Richtung zur Objektfläche gestreut. Abhängig von der Laserleistung und Kameraempfindlichkeit begrenzt daher beim Laserlichtschnitt das Reflexionsverhalten der Oberfläche den realisierbaren Triangulationswinkel  $\alpha$ .

### 1.2 Schärfentiefe einer Laserlinie

Um eine weitgehend konstante Signalamplitude auf dem Sensor zu gewährleisten, muss sowohl die Schärfentiefe des Kamerasystems, als auch der Schärfentiefebereich des Laserliniengenerators den gesamten Höhenmessbereich überdecken.

Die Laserlinie wird auf einen festen Arbeitsabstand fokussiert. Bei abweichenden Abständen wird die Linie breiter und die Leistungsdichte sinkt. Als Schärfentiefe einer Laserlinie wird der Bereich um den Nenn-Arbeitsabstand bezeichnet, in dem sich die Linienbreite um nicht mehr als einen Faktor 1,41 vergrößert. Wir unterscheiden zwei Typen von Laserliniengeneratoren (vgl. Bild 4): für dünne Mikrolinien und für breitere Makrolinien.

### 1.3 Laser-Mikroliniengeneratoren

Laser-Mikroliniengeneratoren erzeugen dünne Laserlinien mit senkrecht zur Linie gaußförmigem Intensitätsprofil. Der Schärfentiefebereich einer Laserlinie mit Breite  $B$  (auf dem 13,5%-Niveau) und Wellenlänge  $l$  ist gegeben durch den sogenannten Rayleigh-Bereich  $2z_R$ :

$$2z_R = \frac{\pi B^2}{2\lambda}$$

### 1.4 Laser-Makroliniengeneratoren

Laser-Makroliniengeneratoren erzeugen Laserlinien mit erweitertem Schärfentiefebereich. Bei gleichem Arbeitsabstand sind Makrolaserlinien um einen Faktor 2–5 breiter als Mikrolinien. Für den Schärfentiefebereich  $2z_M$  gilt die Beziehung:

$$2z_M = \frac{4\pi B^2}{6\lambda}$$

Bei gleicher Breite ist die Schärfentiefe der Makrolinien fast doppelt so groß wie die der Mikrolinien. Bei gleichem Arbeitsabstand haben Makrolinien wegen ihrer größeren Breite einen insgesamt um etwa 7- bis 35-fach vergrößerten Schärfentiefebereich.

### 1.5 Linienbreite

Die Breite der Laserlinie beschränkt nicht die Höhenauflösung des Lichtschnitt-Verfahrens. Die Höheninformation wird aus dem Linienversatz gegenüber der Nulllage ermittelt, was mit geeigneten Algorithmen bei breiten Linien sogar genauer möglich ist als bei dünnen Linien.

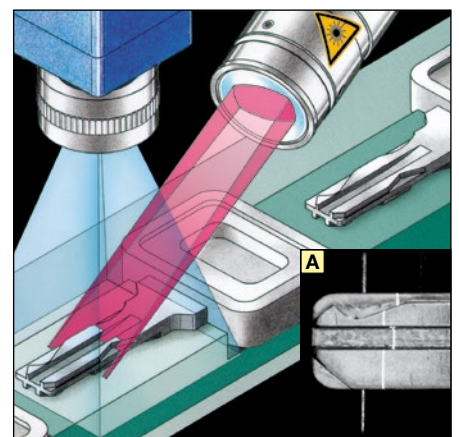
Für die Messauflösung in Scanrichtung ist die Breite der Laserlinie allerdings entscheidend. Höhenänderungen, die sich in dieser Richtung über einen Bereich erstrecken, der schmaler ist als die Linienbreite, können nicht detektiert werden.

Für die kleinste erzielbare Breite einer Laser-Mikrolinie gibt es physikalische Grenzen. Mit einer idealen Optik gilt für die Breite  $B$  einer auf den Abstand  $A$  fokussierten Linienbreite die Beziehung:

$$B = \frac{4\lambda A}{\varnothing_s \pi}$$

mit  $l$  als Wellenlänge und  $\varnothing_s$  als den am Ort der Linienoptik senkrecht zur Linie gemessenen Strahldurchmesser. Da bei einer gaußförmigen Intensitätsverteilung keine scharfe Strahlbegrenzung vorhanden ist, gibt man Linienbreiten und Strahldurchmesser konventionsgemäß auf dem  $1/e^2$ -Niveau an, d.h. bei etwa 13,5% der Maximalintensität.

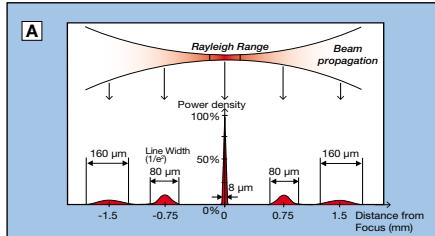
Die Linienbreite wächst also proportional mit dem Arbeitsabstand und der Wellenlänge sowie umgekehrt proportional zum Strahldurchmesser an der Linienoptik. Gerade der Zusammenhang zwischen Linienbreite und Strahldurchmesser wird oft übersehen. So wird z.B. für eine 15  $\mu\text{m}$  breite Laserlinie in 250 mm Abstand bei der Wellenlänge 660 nm einen Strahldurchmesser von etwa 14 mm gebraucht. Ein Ding der Unmöglichkeit, wenn man nur den Bauraum für einen Laser mit 12 mm Gehäusedurchmesser vorsieht.



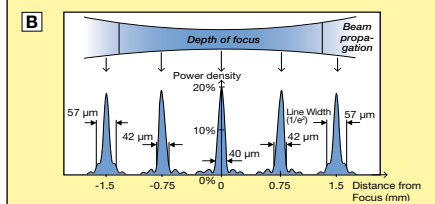
**Bild 3: Laser-Lichtschnitt ist die zweidimensionale Erweiterung der Lasertriangulation.**

Durch Projektion einer ausgedehnten Laserlinie wird ein Höhenprofil des Messobjekts gewonnen.

Insert **A**: Von der Kamera aufgenommenes Bild. Der Versatz der Laserlinie gibt die Objekthöhe am Auftreffpunkt der Laserlinie an.

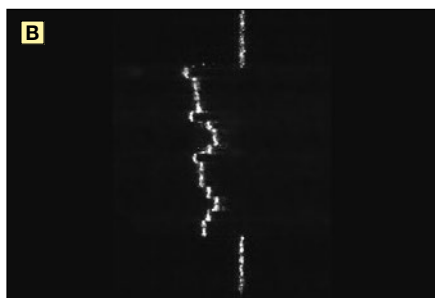


**Mikrolinie: Intensitätsprofil und Linienbreite z. B. Mikroliniengenerator**  
Hohe Leistungsdichte und schmale Laserlinie im Fokus. Linienverbreiterung und stark reduzierte Leistungsdichte bei Abstandsänderung.



**Makrolinie: Intensitätsprofil und Linienbreite z. B. Makroliniengenerator**  
Leistungsdichte und Linienbreite bleiben in einem um den Faktor 35 (im Vergleich zur Mikrolinie A) vergrößerten Arbeitsbereich annähernd konstant.

**Bild 4: Vergleich von Laser-Mikroliniengeneratoren und Laser-Makroliniengeneratoren**



**Bild 5: Laserlichtschnitt eines Schlüsselpfils - Objektivblende und Laserspeckling**  
A: Aufnahme mit kleiner Blendenzahl (k=2.8)  
B: Aufnahme mit großer Blendenzahl (k=22).

Die Blende des abbildenden Objektivs wirkt als Ortsfrequenzfilter. Bei kleiner Blendenzahl erscheint ein weniger störendes, hochfrequentes Speckelmuster. Bei großer Blendenzahl verursachen die Speckle Brüche und Lücken in der Linienkontur.

**1.6 Intensitätsverteilung in Linienrichtung**

Eine rein auf sphärischen Zylinderlinsen beruhende Strahlformung transformiert das Seitenverhältnis des von der Laserdiode abgestrahlten elliptischen Strahls. Auch eine dünne Laserlinie ist dann nichts anderes als eine Ellipse mit extremen Seitenverhältnis, die Intensitätsverteilung in Linienrichtung ist weiterhin gaußförmig. Im Kamerabild führt dies zu einer mittenbetonten Linie, die in der Mitte dicker und heller erscheint als am Rand. Dies verkleinert den nutzbaren Messbereich und vermindert die Auflösung des Verfahrens. Laserlinien mit konstanter Linienbreite und homogener Intensitätsverteilung steigern das Auflösungsvermögen und die Leistungsfähigkeit eines Laser-Lichtschnittsensors.

**1.7 Störende Laserspeckle**

Laserspeckle sind Interferenzerscheinungen, die aufgrund der Kohärenz der Laserstrahlung bei der Reflexion an einer rauen Oberfläche entstehen. Laserspeckle stören die Homogenität der Laserlinien. Quer zur Linienrichtung wird der Intensitätsschwerpunkt stochastisch verschoben. Da eine diffus reflektierende und somit auch optisch raue Objektoberfläche eine Voraussetzung für die Anwendung des Verfahrens ist (s. 1.1), sind Laserspeckle beim Laserlichtschnitt grundsätzlich nicht zu vermeiden. Der Kontrast des Specklemusters wird durch die Kohärenzlänge der verwendeten Laserstrahlquelle beeinflusst. Beim Einsatz der rauscharmen Strahlquellen der LNC-Serie mit reduzierter Kohärenz erscheint die projizierte Linie homogener. Die Granularität der Speckle hängt auch von der Blendeneinstellung des Objektivs ab, mit der das Messobjekt beobachtet wird. Bei einer kleinen Blendenzahl erscheinen feine Speckle mit hoher Ortsfrequenz (Bild 5a), bei einer großen Blendenzahl grobe, besonders störende Speckle (Bild 5b). Ein starkes Abblenden des Objektivs sollte daher vermieden werden.

**1.8 Aufnahmetechnik**

Die über den gesamten Höhenmessbereich scharfe Abbildung der Laserlinie auf der Objektoberfläche ist nur eine Voraussetzung für eine erfolgreiche Ermittlung des Höhenprofils. Ebenso wichtig ist, dass die Kamera die Linie scharf auf den Kamerasensor abbildet. Die Schärfentiefe, mit der das Messobjekt auf den Kamerasensor abgebildet wird, steigt linear mit der Blendenzahl k und dem Pixelabstand Δx. Sie sinkt annähernd quadratisch mit dem Abbildungsmaßstab β (=Sensorgröße/Bildfeld). Für den Schärfentiefebereich 2z<sub>k</sub> gilt:

$$2 z_k = 2 \Delta x k \frac{1 + \beta}{\beta^2}$$

Änderungen von bis zu ± z<sub>k</sub> um den optimalen Objektabstand haben keinen Einfluss auf die Schärfe der Bildaufnahme. Bei fester Abbildungsgeometrie vergrößert ein Abblenden des Objektivs den Schärfentiefebereich. Eine große Blendenzahl k hat negative Auswirkungen auf die Signalamplitude, die um einen Faktor 2 pro Blendstufe abnimmt, auf die optische Auflösung des Objektivs und wie erwähnt auf den Speckleeffekt. Bei Anwendungen mit großem Höhenmessbereich wer-

den daher im Allgemeinen der Kamerasensor und das Objektiv in Scheimpflug-Anordnung relativ zur Einstrahlebene des Lasers angebracht.

**1.9 Scheimpflug-Anordnung**

Bei einer normalen Abbildung sind Objekt-, Objektiv- und Bildebene (Sensor oder Film) parallel zueinander. Beim Laserlichtschnitt steht die vom Laser markierte Objektebene prinzipbedingt nicht parallel zur Objektivenebene. Die von Theodor Scheimpflug 1904 formulierte Bedingung gibt an, wie die Bildebene (d.h. der Sensor) zu neigen ist, um eine scharfe Abbildung einer schräg stehenden Objektebene zu erreichen: Die Objektebene wird scharf auf eine Bildebene abgebildet, wenn sich Objekt-, Bild- und Objektivenebene in der gleichen Schnittgeraden treffen.

Bild 6 zeigt die entsprechende Anordnung beim Laserlichtschnitt. Aufgrund perspektivischer Verzeichnung besteht ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen der Höhendifferenz h und der Peak-Position auf dem Kamerasensor x (gemessen jeweils ab der optischen Achse des Objektivs):

$$h = \frac{A x \cos \gamma}{A' \sin \alpha - x \cos(\alpha - \gamma)}$$

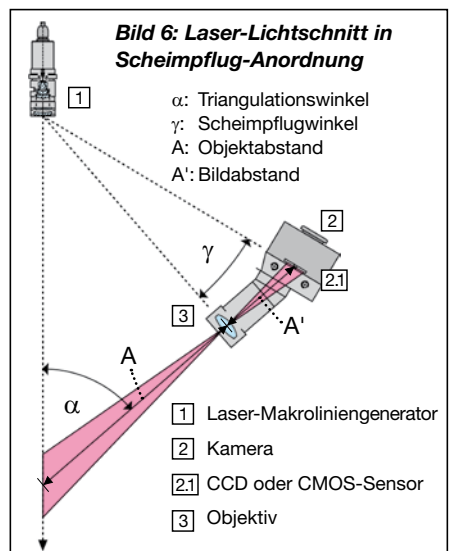
A und A' sind die von den Hauptebenen des Objektivs gemessenen Objekt- und Bildabstände, γ ist der in Bild 6 markierte Scheimpflugwinkel.

Auch bei kleiner Blendenzahl (also weit geöffnetem Objektiv) kann in Scheimpfluganordnung eine über den gesamten Messbereich nahezu konstante Signalamplitude gewährleistet werden.

Für die Messgenauigkeit gilt:

$$\Delta h = \frac{A A' x \cos \gamma \sin \alpha}{(A' \sin \alpha - x \cos(\alpha - \gamma))^2} \Delta x$$

Eine Höhenänderung Δh des Messobjektes führt auf dem Sensor zu einer Verschiebung des Linienbildes um eine Pixelbreite Δx. Die Gleichungen für h und Δh gelten auch, wenn das Scheimpflug-Prinzip nicht zur Anwendung kommt. Hier ist γ=0 einzusetzen.



LaserLine-Applications, Lohmeyerstraße 10, DE-Hamburg