

Beidseitige Telezentrie -

eine Voraussetzung für hochgenaue optische Meßtechnik

Autor : Dr. Rolf Wartmann, Bad Kreuznach

In den letzten Jahren erlebten die Techniken der berührungslosen, optischen Meßtechnik einen rasanten Aufstieg. Dieser kam in erster Linie dadurch zustande, dass es über die Ausnutzung der Möglichkeiten der elektronischen Bildverarbeitung gelang, ganze Prozeßketten zu automatisieren. Im Zuge dieser Entwicklung setzten sich die objektseitig telezentrischen Objektive zunehmend durch. Ihre Eigenschaft, einen Gegenstand unabhängig von seiner Ent-

fernung immer mit der gleichen Größe abzubilden, ist die Grundvoraussetzung für einen erfolgreichen, automatisierten Meßvorgang. Während die objektseitige Telezentrie ins Zentrum der Aufmerksamkeit rückte, geriet die Bildseite, d.h. der Raum zwischen Objektiv und Kamera, fast völlig aus dem Blickwinkel. Dabei ist im Falle der hochgenauen Meßtechnik die Gestaltung dieser Seite genau so wichtig wie die der Objektseite.

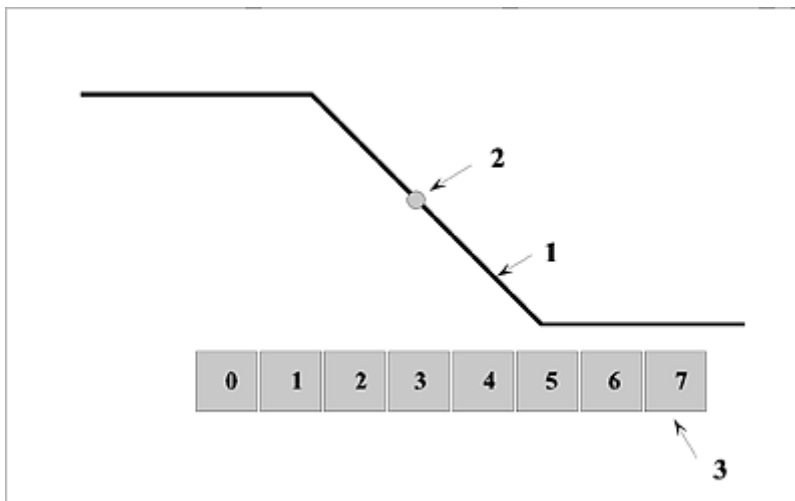
- [Grundprinzipien der Kantendetektion](#)
- [Symmetriänderung des Kantenbildes bei Defokussierung](#)
- [Vorteile der beidseitigen Telezentrie](#)
- [Beidseitig telezentrische Meßobjektive von SCHNEIDER-KREUZNACH](#)
- [Zusammenfassung](#)

1. Grundprinzipien der Kantendetektion

Die optische Meßtechnik steht vor dem Problem, mit relativ großflächigen Sensoren eine Genauigkeit erreichen zu müssen, die die Sensordimensionen um ein vielfaches unterschreitet. In der Regel wird dieses Problem dadurch gelöst, daß man mit Hilfe einer unscharfen optischen Abbildung die Kanten des Prüflings über mehrere Pixel verschmiert. Diese Technik ermöglicht dann die sogenannte Subpixel-Kantendetektion, bei der Genauigkeiten von bis zu einem Zehntel der Pixelgröße (teilweise sogar darunter) erreicht werden. In Bild 1 ist das Grundprinzip der Kantendetektion dargestellt worden. Hier wurde eine idealisierte Prüflingskante defokussiert abgebildet. Sie verläuft mit linearem Anstieg über mehrere (in diesem Beispiel sind es 5) Pixel.

Bild 1:
Defokussiert abgebildete
Kante

- 1 - Kantenbild,
- 2 - zu detektierender
Kantenort
- 3 - Pixel des Sensors



Im Mittelpunkt der Kantenfunktion, dort wo das Energieniveau 50 % beträgt, liegt der zu detektierende Kantenort. Die Pixel mit den Nummern 1, 2, ..., j liegen innerhalb des Kantenbildes und empfangen die Energien I_1, \dots, I_j . Die Pixel mit den Nummern 0 und j+1 seien die Pixel oberhalb und unterhalb der Kante. Ihre empfangene Energie sei I_0 bzw. I_{j+1} . Der Kantenort b, gemessen als Abstand vom Anfang des Pixels mit der Nummer 1, hat den Wert

$$b = a \left\{ \frac{j}{2} + \frac{1}{j-1} \sum_{k=2}^j \frac{I_k - f_m}{I_{k-1} - I_k} \right\} \quad (1)$$

wobei a die Pixelgröße und f_m das Energieniveau für 50 % ist. f_m berechnet sich aus

$$f_m = \frac{I_0 + I_{j+1}}{2} \quad (2)$$

Diese Formel (1) ist nur eine Möglichkeit zur Kantendetektion. Es gibt noch einige andere, gleichwertige Formeln. (1) steht hier stellvertretend für alle Kantendetektionsformeln. Da der mathematische Hintergrund immer ähnlich ist, gelten die hier getroffenen Aussagen für (1) auch für andere Kantendetektionsalgorithmen.

Mit Hilfe der Kantendetektion kann man den Kantenort nicht nur dann exakt bestimmen, wenn die Kantenfunktion linear ist, sondern auch für alle symmetrischen Kantenverläufe. Der Algorithmus arbeitet allerdings ungenau, wenn die Kantenfunktion unsymmetrisch ist. Insbesondere bewirkt in diesem Fall die Verschiebung des Sensors relativ zur Kante eine Wanderung des Kantenortes.

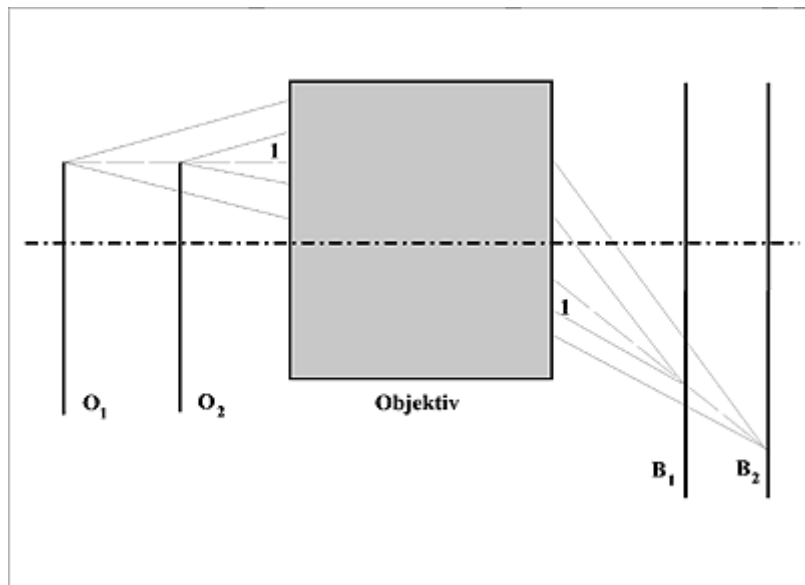
2. Symmetrieänderung des Kantenbildes bei Defokussierung

Bei der automatisierten, berührungslosen Messung ist es unmöglich, die Prüflinge immer wieder exakt von der gleichen Position aus zu messen. Dieser Umstand hat letztendlich zur Entwicklung der objektseitig telezentrischen Objektive geführt. Bildseitig hat die ungenaue Positionierung des Prüflings aber auch Einfluß auf die Meßgenauigkeit. Dieser Einfluß wurde in Bild 2 dargestellt.

Bild 2:
Objektseitig telezentrisches
Objektiv

O_1, O_2 - Prüflingspositionen,
1 - Hauptstrahl

B₁ - Sensorposition,
B₂ - Bildebene für Prüflings-
position O₂



Es wurde von zwei Prüflingspositionen O₁ und O₂ ausgegangen. Von der Position O₁ aus wird der Prüfling in die Sensorebene B₁ scharf abgebildet. Befindet sich der Prüfling in O₂ erfolgt die scharfe Abbildung nach B₂. In B₁ entsteht ein verschwommenes Bild des Prüflings, welches aber formal gesehen die gleiche Größe aufweist, wie bei der Abbildung von O₁ aus. Zu dieser Größenkonstanz kommt es, weil der Hauptstrahl objektseitig **telezentrisch**, d.h. parallel zur optischen Achse, verläuft. Die Art und Weise, wie es zu dem verschwommenen Bild in B₁ kommt ist aber unsymmetrisch. Man sieht in Bild 2 sehr gut, daß das Lichtbündel, welches in B₁ das Bild von O₂ erzeugt, unsymmetrisch ist. Der obere Bündelteil beleuchtet ein größeres Gebiet von B₁ als der untere. In der Realität kann man die Auswirkungen dieses Effektes bereits bei Defokussierungen von einigen zehntel Millimetern beobachten.

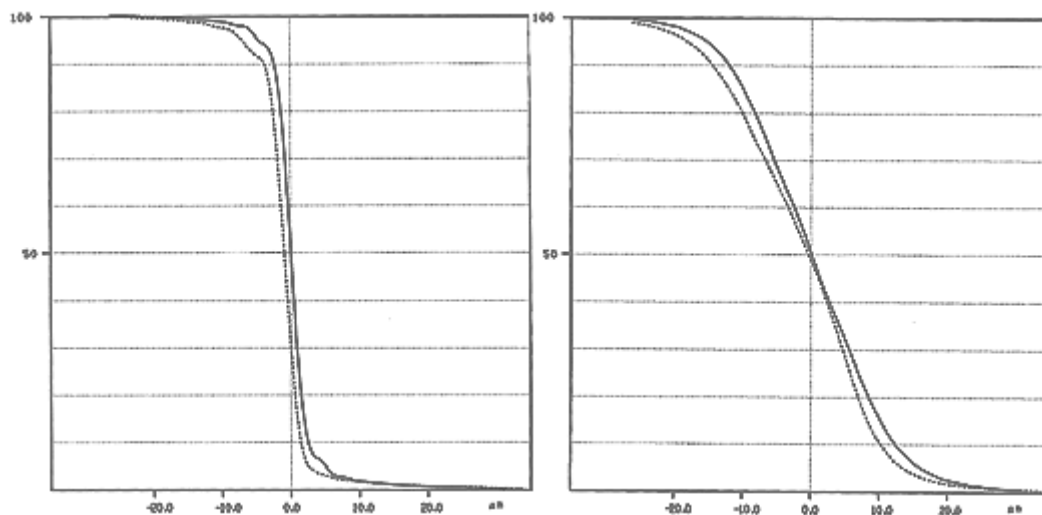


Bild 3: Kantenbilder eines Objektivs ohne bildseitige Telezentrie
exakt fokussiert und um -0.3 mm defokussiert ◆◆◆◆ radial ----- tangential

Bild 3 zeigt die Kantenbildfunktion zu einem Objektiv, das bei korrekter Fokussierung keinerlei Unsymmetrie aufweist (1. Darstellung). Wird um -0.3 mm defokussiert, wird das tangentiale Kantenbild unsymmetrisch. Den gleichen Effekt beobachtet man auch bei einer Defokussierung um +0.3 mm. Obendrein stellt man eine Drift des Kantenortes in tangentialer Richtung fest. Berücksichtigt man in diesem Beispiel beide Effekte, so muß mit einer Unsicherheit von bis zu ◆ 4 µm bei der Detektion der tangentialen Kante gerechnet werden. Wenn man bedenkt, daß eine Detektionsgenauigkeit von ◆ 1 µm durchaus möglich ist und bei optimaler Beleuchtung sogar noch unterschritten werden kann, so bedeutet diese Unsicherheit eine signifikante Beeinträchtigung der Meßgenauigkeit. Ähnliche Ungenauigkeiten entstehen auch wenn der Sensor uneben ist bzw. nicht senkrecht zur optischen Achse steht.

3. Vorteile der beidseitigen Telezentrie

Die oben beschriebenen Effekte der Symmetrieänderung des Kantenbildes bei Defokussierung bewirken eine deutliche Verschlechterung der Meßgenauigkeit. Sie können vermieden werden, wenn das verwendete Meßobjektiv nicht nur objektseitig, sondern auch bildseitig telezentrisch ausgelegt wurde. Bild 4 zeigt die Grundprinzipien der Abbildung mit solch einem Objektiv.

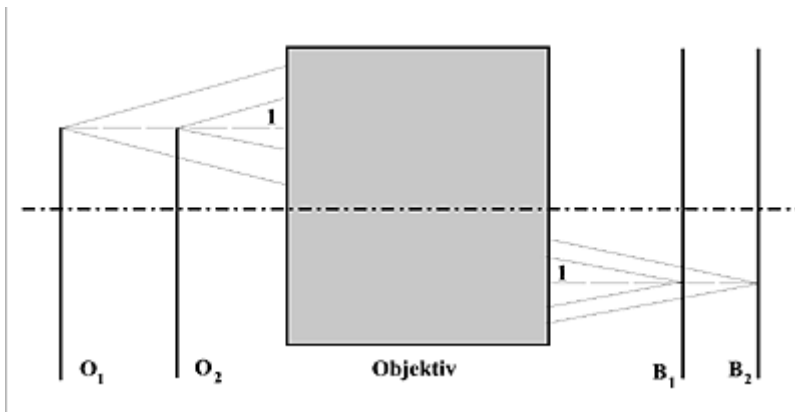


Bild 4:
Beidseitig telezentrisches
Objektiv

 $O_1 O_2$ - Prüflingspositionen,
1 - Hauptstrahl

 B_1 - Sensorposition,
 B_2 - Bildebene für
Prüflingsposition O_2

Dabei entspricht die Abbildungssituation der aus Bild 2, d.h. O_1 wird in die Sensorebene B_1 scharf abgebildet und von O_2 entsteht in B_1 ein unscharfes Bild. Der wesentliche Unterschied zu Bild 2 besteht in der **bildseitigen Telezentrie**, dem achsparallelen Verlauf des Hauptstrahls 1 im Bildraum. Wegen dieser Telezentrie im Bildraum erfolgt die Verwaschung des Bildes von O_2 in B_1 symmetrisch, denn das Schnittbild von B_1 mit dem dargestellten Lichtbündel ist kreisförmig. Folglich bleibt das Kantenbild trotz Defokussierung symmetrisch und die Kante kann exakt detektiert werden. Im Resultat kann man beim Einsatz beidseitig telezentrischer Objektive davon ausgehen, daß die theoretisch mögliche Detektionsgenauigkeit erreichbar ist, wenn Beleuchtungssituation und Kantenstruktur optimal sind.

4. Beidseitig telezentrische Meßobjektive von Schneider Kreuznach

Wegen der ständig steigenden Anforderungen an die Genauigkeit von berührungslosen Meßsystemen haben wir uns entschlossen, eine Reihe von beidseitig telezentrischen Meßobjektiven auf den Markt zu bringen. Die Reihe umfaßt **fünf Objektive** mit den **Abbildungsmaßstäben 1:1 bis 1:5**. Neben dem entscheidenden Merkmal der beidseitigen Telezentrie weisen diese Objektive folgende zusätzliche Merkmale auf:



- Die Lichtstärke wurde im Vergleich zu den derzeit am Markt verfügbaren Objektiven deutlich erhöht. Die numerische Apertur beträgt 0.14 bzw. 0.13.
- Die Objektive sind in einem Bereich von \diamond 3 mm bildseitig fokussierbar. Auf der Objektseite kann man deshalb den Arbeitsabstand variabel gestalten. Die Grenzen hierfür sind allerdings vom Abbildungsmaßstab abhängig. Die Arbeitsbereiche für die fünf Objektive mit den Abbildungsmaßstäben 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 und 1:5 sind 6 mm, 24 mm, 54 mm, 96 mm und 150 mm groß. Der Abbildungsmaßstab bleibt beim Umfokussieren konstant.
- Die Objektive weisen eine sehr geringe Verzeichnung auf. Mit einer entsprechenden Kalibrierung kann leicht Verzeichnungsfreiheit erreicht werden.

5. Zusammenfassung

Fehlende bildseitige Telezentrie bei Meßobjektiven bewirkt bei Defokussierung unsymmetrische Kantenbilder bzw. deren Drift. Das führt zu einer ungenauen Kantendetektion, so daß die theoretisch mögliche Genauigkeit deutlich verfehlt wird. Beidseitig telezentrische Objektive weisen diese Schwächen nicht auf und ermöglichen somit eine erfolgreiche Annäherung an die mögliche Meßgenauigkeit.

FON : +49 (0) 671 601-0 **FAX** : +49 (0) 671 601-286 **E-mail** : industrie@schneiderkreuznach.com