

# Telezentrische Objektive für die industrielle Bildverarbeitung

Eine Einführung für den Anwender

**Telezentrische Objektive halten vermehrt Einzug in die industrielle Bildverarbeitung. Dieser Artikel soll dem Anwender die Funktionsweise dieses Objektivtyps sowie Vor- und Nachteile erläutern. Zudem wird eine Hilfestellung zur Auswahl gegeben, sowie Anwendungsbeispiele aufgezeigt.**

**Telecentric lenses are getting more and more important for machine vision applications. In this report the user will get some information about the performance of these lenses and as well about the pros and cons. In addition to that a support for selection of a appropriate lens and some application examples will be given.**

Die Anforderungen an Bildverarbeitungssysteme werden immer größer. Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahren die Bildverarbeitungskomponenten Schritt für Schritt verbessert. Die Bilderzeugungskomponente oder anders ausgedrückt 'das Objektiv' wurde dagegen oftmals außer acht gelassen. In letzter Zeit wird jedoch auch vermehrt versucht das Potential der Optik aus zu reizen. Ein Ansatzpunkt ist der Einsatz von telezentrischen Objektiven.

Neu ist diese Technologie aber nicht. So fertigt z.B. die Firma Sill Optics seit über 15 Jahren telezentrische Objektive für die



Bild 1: Telezentrische Objektive Correctal® T von Sill Optics

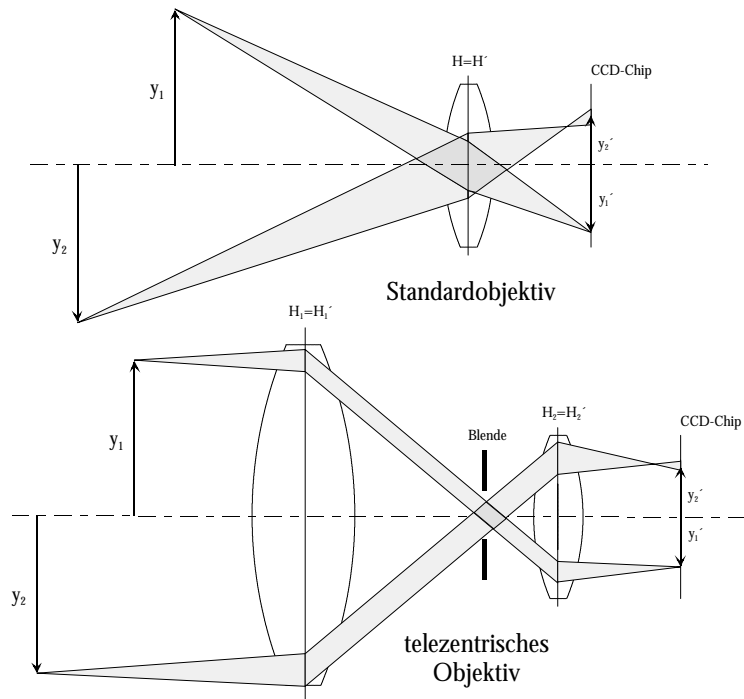


Bild 2: schematische Gegenüberstellung

Profil Projektion. Dieses vorhandene Know How wurde nun verwendet um eine Reihe von telezentrischen Objektiven zu realisieren die speziell für CCD Matrix- und Zeilenkameras ausgelegt sind.

## Was sind telezentrische Objektive?

Bei dem Versuch, den Durchmesser einer großen Bohrung in einer dicken Stahlplatte mit Hilfe einer CCD-Kamera und eines Standardobjektivs zu messen, stellt man fest, daß man verschiedene Meßergebnisse ermittelt, je nachdem ob auf den

oberen oder unteren Bereich des Loches focussiert wird.

Die Ursache liegt darin, daß die Eintrittspupille des CCD-Kameraobjektivs kleiner als der Lochdurchmesser ist. Das Objektiv muß also nach links, rechts, oben und unten 'schauen', um den Lochrand zu sehen. Aufgrund der perspektivischen Projektion auf den CCD-Chip, erscheint die Kontur des Loches an der Vorderseite des Profils größer als die, durch das Loch hindurch betrachtete, Kontur an der Rückseite.

Diese Meßproblem kann gelöst werden, wenn man ein System realisiert, bei dem alle Lichtstrahlen das Objektfeld parallel zur optische Achse passieren. Der Fachausdruck für diesen Strahlengang nennt sich 'telezentrisch'.

Telezentrische Objektive können aus diesem Grund überall dort ihre Stärken ausspielen, wo der Abstand zum Objektiv nicht exakt definiert ist oder die optische Weglänge bei der Auswertung verschiedener Merkmale variiert und zudem ein exakt definierter Abbildungsmaßstab gefordert ist.

### Telezentrischer Strahlengang

Im allgemeinen muß man zwischen drei verschiedenen Typen von telezentrischen Strahlengängen unterscheiden:

- objektseitig,
- bildseitig oder
- beidseitig telezentrische Systeme

Der Unterschied besteht darin, daß die oben erwähnte Abstandsinvarianz entweder einseitig oder auf beiden Seiten besteht, d.h. die Objektlage, die Bildlage -Position des CCD Sensors- oder beides können variieren. In der Bildverarbeitung genügt zumeist eine objektseitige Telezentrie da sich die

Bildwandlerposition im allgemeinen nicht ändert.

Ein normales CCD Objektiv bildet mit Hilfe eines Projektionszentrums ab. Von einem telezentrischen Objektiv wird eine Art Parallelprojektion erwartet, die ein unverfälschtes 2D Bild auf dem Sensor erzeugt. Solch eine Abbildung wäre aber nur mit idealen Lichtstrahlen möglich. In der Realität hat man es aber mit Strahlenbündeln zu tun. Das bedeutet, daß ein telezentrisches genauso wie ein Standard Objektiv nur eine optimale Focusebene besitzt. Generell kann aber eine gewisse Unschärfe toleriert werden, was zu einem Schärfentiefebereich führt. Aus Bild 2 kann leicht ersehen werden, daß die Größe dieses Bereiches vom Blendendurchmesser und somit vom Divergenzwinkel der Strahlenbündel abhängt. Beim Einsatz von telezentrischen Objektiven sollte deshalb versucht werden, die Blende möglichst weit zu schließen um einen maximalen Schärfentiefebereich zu erhalten. Es darf jedoch nicht außer Acht gelassen werden, daß es bei sehr kleinen Blendendurchmessern zu Beugungserscheinungen kommen kann.

Der wesentliche Punkt ist nun, daß sich bei einem Standard Objektiv der Abbildungsmaßstab im Schärfentiefebereich ändert und bei einem telezentrischen Objektiv nicht. Zudem

kann aber davon ausgegangen werden, daß ein telezentrisches Objektiv einen größeren Schärfentiefebereich besitzt als ein vergleichbares Standardobjektiv.

Objektseitig telezentrische Objektive besitzen im allgemeinen die gleiche Bauweise. Als Resultat der gewünschten Parallelprojektion muß die Eintrittspupille des optischen Systems im 'Unendlichen' liegen. Konstruktiv bedeutet das, daß sich die Blende in der Focusebene des Frontglieds befinden muß. Die hinter der Blende sitzenden Komponenten sorgen dann für die Abbildung auf den Sensor.

### Auflicht und Durchlicht

Ein Objektiv kann nur Licht aufnehmen, daß zuvor von einer Beleuchtungsquelle ausgesendet wurde. Grundsätzlich kann ein telezentrisches Objektiv im Auflicht und/oder im Durchlicht verwendet werden. Bei der Verwendung von Durchlicht sollte entweder komplett diffus oder mit Hilfe eines Kondensors sehr gut kollimiert, sprich telezentrisch, beleuchtet werden [3].

Bei Auflicht können z.B. handelsübliche Lichtleiter oder Ringlichter verwendet werden. Zudem ist es jedoch möglich, Licht direkt ins Objektiv ein zu koppeln und dadurch eine koaxiale telezentrische Auflichtbeleuchtung zu realisieren [4].

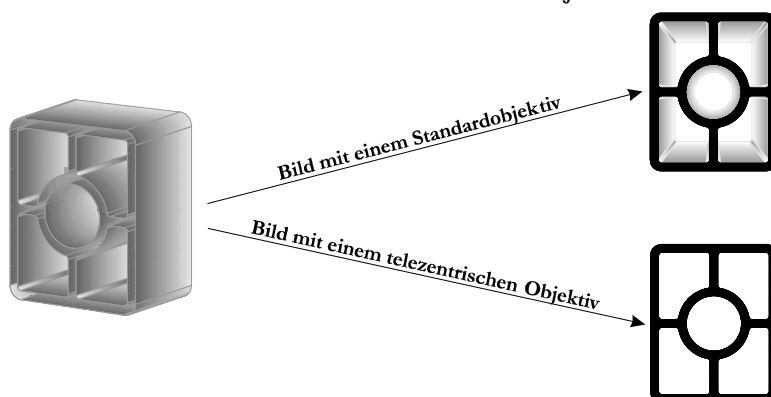


Bild 3: Ein telezentrisches Objektiv erzeugt ein unverfälschtes 2D Bild

## Vor- und Nachteile von telezentrischen Objektiven

Vorteile:	Nachteile:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• konstanter Abbildungsmaßstab bei variablem Arbeitsabstand</li> <li>• unverfälschte 2D Bilder</li> <li>• keine toten Winkel am Fuß von erhöhten Objekten</li> <li>• Hohe erzielbare Meßgenauigkeit</li> <li>• Großer Schärfentiefebereich</li> <li>• Keine Bildkorrekturalgorithmen nötig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufgrund der Parallelprojektion muß das optische Frontglied mindestens so groß wie der zu beobachtende Gegenstand sein. Aus diesem Grund werden telezentrische Systeme für große Objektfelder sehr unhandlich.</li> <li>• feststehende Abbildungsverhältnisse</li> </ul>

### Wo werden telezentrische Objektive eingesetzt?

Telezentrische Objektive werden bereits in vielen Industrieapplikationen eingesetzt, wo es auf hohe Präzision und zumeist auch auf Geschwindigkeit ankommt.

- Vermessung von vibrierenden oder beweglichen Teilen
- Steuerung von Wire Bond Maschinen
- Druckmarkenkontrolle
- Online Qualitätssicherung von Extruder Profilen

Applikationsbeispiele sind:

- höhenunabhängige Konturvermessung
- Exakte Vermessung von Merkmalen auf verschiedenen Ebenen
- Profil Projektion (Schattenwurfprojektion)
- Vermessung von Bohrungen
- Vermessung von Durchmessern
- Optische Koordinatenmesstechnik
- Überprüfung von mechanischen und elektrischen Verbindungsteilen
- Fehlersuche bei bestückten Leiterplatten

### Leistungsmerkmale

Ein Leistungsmerkmal ist das Auflösungsvermögen, das bei hochwertigen Objektiven nahezu beugungsbegrenzt sein kann. Dies hat zur Folge, daß in der Praxis das maximale Auflösungsvermögen eines BV-Systems durch den CCD Chip und nicht durch das Objektiv bestimmt wird. Ein Beispiel, die maximale Auflösung eines telezentrischen Objektivs mit einem Abbildungsmaßstab von 0,66 ist ca. 5 µm, die Pixelgröße ist ca. 10 µm.

Ein weiteres Kriterium ist die maximale relative Verzeichnung der Optik. Die Verzeichnung ist der relative Fehler des Abstandes eines Bildpunktes zur optischen

Achse im Bezug auf den theoretischen Abstand der durch den paraxialen (idealen) Abbildungsmaßstab errechnet werden kann. Sehr gute Optiken können eine max. rel. Verzeichnung von unter 0,05% besitzen. Falls telezentrische Objektive zur Sichtprüfung eingesetzt werden sollen oder die Verzeichnung mit Hilfe von Algorithmen korrigiert werden kann, ist auch der Einsatz von Objektiven mit einer maximale relative Verzeichnung im Prozentbereich möglich, die im allgemeinen wesentlich preisgünstiger sind.

Wie schon erläutert arbeitet man bei einem telezentrischen Objektiv im Schärfentiefebereich. Die Größe dieses Bereichs hängt von einigen Parametern ab. Mit Hilfe einer Faustformel kann die Größe des Schärfentiefebereichs  $\Delta F$  jedoch abgeschätzt werden:

$$\Delta F \approx \pm \frac{1}{|b'|} \text{ mm}$$

$\Delta F$  Schärfentiefebereich  
 $b'$  Abbildungsmaßstab

Wichtigstes Merkmal ist natürlich die Güte der Telezentrie. Im idealen Fall verlaufen die Strahlenbündel parallel zur optischen Achse. Die Winkelabweichung der realen Strahlen zu einer Parallelen beträgt, bei den Objektiven der Firma Sill Optics, weniger als 1 mrad. Bei einer Variation des Arbeitsabstandes bedeutet diese eine Veränderung des Abbildungsmaßstabes der um mindestens Faktor 20 kleiner ist als bei einem konventionellen 25 mm Objektiv.

Eine andere Möglichkeit die Güte der Telezentrie zu quantifizieren ist die Definition eines Telezentriebereiches, in dem sich die Bildgröße um z.B. nicht mehr als 3 µm ändert. Mit Hilfe der Tangensfunktion und des Abbildungsmaßstabes kann dann

die max. Winkelabweichung der Strahlenbündel ermittelt werden:

$$\alpha = \arctan \frac{3\mu\text{m} \cdot \frac{1}{b'}}{\frac{\Delta T}{2}}$$

$\alpha$  Winkelabweichung  
 $\Delta T$  Telezentriebereich  
 $b'$  Abbildungsmaßstab

### Hilfestellung zur Auswahl

Bei konventionellen Objektiven kann der Abbildungsmaßstab mit dem Abstand zum CCD Chip eingestellt werden. Diese Verfahrensweise ist bei telezentrischen Objektiven nicht möglich. Sie besitzen einen bestimmten Abbildungsmaßstab der im allgemeinen nicht verändert werden kann. Aus diesem Grund werden bei telezentrischen Objektiven in den Datenblättern zumeist Arbeitsbereiche angegeben, die sich aus dem

Abbildungsmaßstab und der max. möglichen Sensorgröße errechnen lassen.

Um das für Ihre Applikation geeignete Objektiv zu finden, sollten Sie wissen, welchen Bereich Sie vermessen oder betrachten möchten, wie groß der Sensor Ihrer Kamera ist und evtl. welche maximale relative Verzeichnung Sie tolerieren können.

#### Die Autoren dieses Beitrages:

Dipl. Phys. Konrad Hentschel studierte in Würzburg und ist nun Technischer Leiter beim Optischen Werk J.E. Sill GmbH & Co. KG in Wendelstein. Er sieht zurück auf über 10 Jahre Erfahrung in der Entwicklung und Fertigung von telezentrischen Objektiven.

Dipl. Ing. (FH) Michael Müller studierte Feinwerktechnik an der Georg Simon Ohm Fachhochschule Nürnberg. In seiner Diplomarbeit befaßte er sich mit telezentrischen Objektiven. Heute ist er Projekt Manager beim Optischen Werk J.E. Sill GmbH & Co. KG in Wendelstein.

#### Literaturverzeichnis:

- [1] H. Haferkorn, Optik, Johann Ambrosius Barth Verlag, 1994
- [2] Abbildungsfehler telezentrischer Objektive, Michael Müller, Diplomarbeit an der Georg Simon Ohm Fachhochschule Nürnberg, Fachbereich Nachrichten- und Feinwerktechnik, SS1996
- [3] Scharfe Konturen, W. Richter, R. Jahn, F&M 105 (1997) Ausg. 7-8, S. 519-523
- [4] Licht aus dem Objektiv, J. Schlichting, F&M 105 (1997) Ausg. 6, S. 447-450