

# Keine Perspektive?

## Grundlagen der optischen Messtechnik: Telezentrische Objektive

Standardobjektive für die Bildverarbeitung arbeiten in Zentralprojektion. Diese Perspektive ist für Vermessungsaufgaben oft ungünstig. Telezentrische Objektive bilden Objekte in Parallelprojektion ab und eliminieren die perspektivische Verzerrung. Dieser Beitrag erläutert das Konzept der telezentrischen Abbildung.

### Klassische Objektive

Die typische Abbildungssituation der industriellen Bildverarbeitung ist ein Objekt auf einem Förderband, das senkrecht von oben mit einem Standardobjektiv auf den Detektor der Kamera abgebildet wird. Wenn es um die Berechnung der erforderlichen Brennweite, des Sensorformats und der Gegenstandsweite geht, kann man das Objektiv meist in hinreichender Näherung als dünne Sammellinse behandeln. Ein scharfes Bild entsteht nur, wenn die Brennweite  $f'$ , die Objektweite  $a$  und die Bildweite  $a'$  in einem definierten Zusammenhang stehen. Sind zwei dieser drei Parameter vorgegeben, liegt der dritte Parameter eindeutig fest. Die Verhältnisse werden quantitativ durch die elementare Abbildungsgleichung beschrieben. Sie reicht für die Spezifikation der wichtigsten Parameter einer Abbildungsoptik für Bildverarbeitungsanwendungen häufig völlig aus [1]. Bei einem Standardobjektiv kann man mit dem „Scharfstelling“ eine Linsengruppe längs der optischen Achse

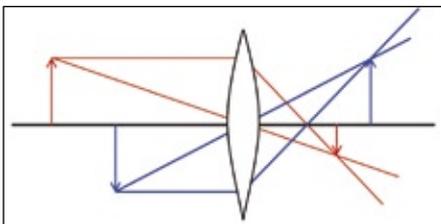


Abb. 1: Abbildung zweier gleich großer Objekte mit einem Standardobjektiv: Die Bildgröße hängt von der Objektentfernung ab



verschieben. Dadurch wird die Bildweite so angepasst, dass die Abbildungsgleichung erfüllt ist und ein scharfes Bild entsteht. Für viele Anwendungen ist damit die Abbildungsoptik abgearbeitet. Was passiert aber, wenn bei einer Prüfaufgabe in der laufenden Produktion Variationen bei der Zuführung auftreten und der Abstand zum Objekt sich ändert? Noch schlimmer: was passiert bei Objekten, die eine Ausdehnung längs der optischen Achse haben, wie z.B. Bohrungen, Rohre, Stifte, Schrauben oder Federn? In dieser Situation treten zwei Effekte gleichzeitig auf: das Bild wird unscharf (es ist defokussiert), und die Bildgröße ändert sich. Beide Phänomene können sich störend auf die quantitative Vermessung von Objekten auswirken.

### Elementare Abbildungsgleichung

Um die Situation genauer zu verstehen, betrachten wir zunächst zwei gleich große Objekte, die sich in verschiedenen Abständen vom Objektiv befinden. In Abbildung 1 ist diese Situation dargestellt. Zur Verdeutlichung sind ein roter und ein blauer Pfeil senkrecht zur optischen Achse gezeichnet, jeweils mit

ihrem Fußpunkt auf der optischen Achse, aber entgegengesetzt gerichtet. Für jeden der beiden Pfeile kann man die Lage des scharfen Bildes konstruieren, wenn man weiß, dass Lichtstrahlen, die parallel zur optischen Achse in das Objektiv einfallen, durch den bildseitigen Brennpunkt verlaufen und Lichtstrahlen, die durch das Zentrum des Objektivs verlaufen, nicht gebrochen werden. Zur Konstruktion verwendet man die Spitze des Pfeils; dort, wo sich die beiden Konstruktionsstrahlen im Bildraum schneiden, liegt das scharfe Bild der Pfeilspitze. Entsprechend kann man für den Mittelpunkt und weitere Punkte des Pfeils konstruieren und stellt fest, dass das Bild in einer Ebene senkrecht zur optischen Achse entsteht. Insbesondere wird auch der Fußpunkt des Pfeils von der optischen Achse aus wieder auf die optische Achse abgebildet. Die Konstruktion zeigt sofort, dass die beiden gleich großen Pfeile zu verschiedenen großen scharfen Bildern abgebildet werden: das weiter entfernte Objekt erscheint im Bild kleiner als das näher liegende Objekt. Der Abbildungsmaßstab, das ist das Verhältnis zwischen der Bildgröße und der Objektgröße, ist für die beiden Positionen verschieden, er

hängt von der Objektweite ab. Quantitativ kann man diesen Zusammenhang für diese Situation noch mit der elementaren Abbildungsgleichung berechnen. Die beiden scharfen Bilder sind jedoch nicht unterschiedlich groß, sondern entstehen zudem in verschiedenen Bildebenen, also in unterschiedlichen Bildebenen. Wenn der Objekt-Abstand variiert, wie im oben beschriebenen Anwendungsszenario, müsste man folglich das Objektiv nachfokussieren, damit ein scharfes Bild entsteht. In der Praxis ist das nur in Ausnahmefällen handhabbar. Man wird vielmehr mit einer festen Bildebene arbeiten und in Kauf nehmen, dass das Bild unscharf wird.

Abbildung 2 zeigt, wie die Unschärfe entsteht. Die geometrischen Verhältnisse sind dieselben wie in Abbildung 1, es ist jedoch nur der Fußpunkt der beiden Pfeile gezeichnet. Aus der Konstruktion in Abbildung 1 ist bereits bekannt, wo die jeweiligen Bildebenen liegen. In Abbildung 2a sind nur die Randstrahlen eines Strahlenbündels gezeichnet, das zur Bildentstehung beitragen kann, wenn die Fassung der Linse als Blende wirkt. Wir nehmen an, dass sich der Detektorchip der Kamera in der Bildebene des näher liegenden Objekts befindet. Da sich die Strahlen für das weiter entfernte Objekt bereits vor der Bildebene schneiden, werden sie als divergentes Strahlenbündel auf den Detektor fallen und dort ein Scheibchen als Bild erzeugen. Je weiter das Objekt entfernt ist, desto größer wird das Scheibchen, desto unschärfer das Bild. Abbildung 2b verdeutlicht dieselbe Situation, jedoch nun für einen Objektpunkt außerhalb der optischen Achse. Die Spitze des weiter entfernten Pfeils wird ebenfalls unscharf abgebildet. Qualitativ ist erkennbar, dass das entstehende Bild kleiner ist als das Bild des scharf abgebildeten Objekts. Folglich wird auch bei festste-

hender Bildebene ein Objekt mit zunehmender Entfernung von der Kamera in ein kleiner werdendes Bild abgebildet – eine Erkenntnis, die man innerhalb kürzester Zeit empirisch gewinnen kann, wenn man im Labor eine Kamera von einem Objekt wegbewegt. Alternativ genügt es, mit offenen Augen bewusst in die weite Welt zu schauen, denn unsere Augen verhalten sich

dann in dieser Hinsicht ebenfalls wie Standardobjektive. Quantitativ können die Verhältnisse nun jedoch nicht mehr mit der elementaren Abbildungsgleichung beschrieben werden, sondern erfordern komplexere Methoden der technischen Optik. Insbesondere müssen die wirksamen Blenden im System und Beugungseffekte berücksichtigt werden [2].

## Zentralprojektion und Parallelprojektion

Die Abbildung mit einem Standardobjektiv ist eine Zentralprojektion. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 3 beide Objekte aus Abbildung 1 in beiden Abständen gezeichnet und nur die Strahlen eingetragen, die durch das Zentrum der Linse verlaufen. In dieser einfachen



## High-end trifft Know-how.

### Bildverarbeitungs-Systeme mit Mehrwert:

- Speziell auf Ihre Anforderungen zugeschnittene Kombinationen von Bildverarbeitungs-Komponenten führender Hersteller auf dem neuesten Stand der Technik
- Alles aus einer Hand: Kameras, Beleuchtungen, Optiken, Bilderfassung, Software, Systeme, Kabel, Zubehör

► Eine perfekte Kombination für Ihren Erfolg: Die System-Kompetenz von STEMMER IMAGING verbindet die optimalen Bildverarbeitungs-Komponenten für Ihre Anwendung mit einzigartigem Wissen und zuverlässigem Service. Ihr Vorteil: maßgeschneiderte, wirtschaftliche und sichere Lösungen mit einem Erfahrungsbonus, den nur STEMMER IMAGING bietet. Für diesen Mehrwert stehen wir europaweit. Vor und nach dem Kauf. *Imaging is our passion.*

Telefon 089 80902-0  
www.stemmer-imaging.de

**STEMMER**<sup>®</sup>  
IMAGING

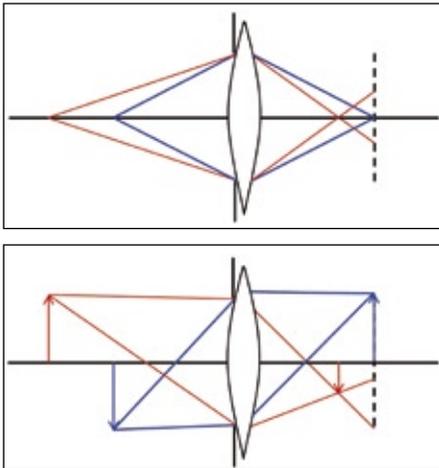


Abb. 2: Wenn der Detektor in der Bildebene des blauen Pfeils liegt, wird der rote Pfeil unscharf abgebildet; Abbildung 2a zeigt den Strahlengang für den Fußpunkt, Abbildung 2b für die Spitze des roten Pfeils

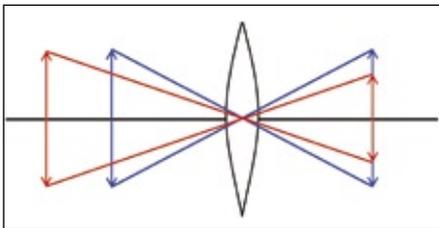


Abb. 3: Die Abbildung mit einem Standardobjektiv ist eine Zentralprojektion

Darstellung wird sofort klar, dass die Bildgröße bei der Zentralprojektion vom Objektstand abhängt. Wenn wir die Zentralprojektion durch eine Parallelprojektion ersetzen könnten, wäre diese Abhängigkeit eliminiert. Wir benötigen folglich eine optische Anordnung, bei der nur diejenigen Strahlen zur Bildentstehung beitragen, die parallel zur optischen Achse verlaufen. Bei einer einfachen Sammellinse verlaufen alle Strahlen, die parallel zur optischen Achse in die Linse eintreten, im Bildraum durch den Brennpunkt – das ist die Definition des Brennpunkts. Folglich wird eine Blende, die im bildseitigen Brennpunkt positioniert ist, dafür sorgen, dass nur die gewünschten Strahlen das System bis zum Detektor durchlaufen können, während alle anderen Strahlen abgeblockt werden. Abb. 4a zeigt diese Situation: das Konzept eines objektseitig telezentrischen Objektivs. Man kann zeigen, dass mit diesem Verfahren in einer feststehenden Bildebene die Bildgröße unabhängig von der Objektweite ist, der Abbildungsmaßstab also unabhängig von der Objektentfernung gleich bleibt [2]. Aus Intensitätsgründen kann der Blendendurchmesser nicht beliebig weit reduziert werden, so dass die Telezentrie nur näherungsweise realisiert werden kann. Telezentrische

Objektive sind meist für einen festen Arbeitsabstand ausgelegt und haben einen definierten Telezentriebereich um diesen Arbeitsabstand herum. Innerhalb des Telezentriebereichs ist die verbleibende Änderung des Abbildungsmaßstabs spezifiziert. Für ein gutes telezentrisches Objektiv kann beispielsweise im Telezentriebereich eine Bildgrößenänderung von maximal 1  $\mu\text{m}$  im gesamten Bildkreis angegeben sein. Wenn man diese Grenze bei einer Vermessungsaufgabe nutzen will, ist es sinnvoll, auch die übrigen optischen Parameter eines solchen Objektivs zu optimieren. Ein Restfehler, der wesentlich zur Ungenauigkeit einer Vermessung beitragen kann, ist die Verzeichnung. Daher sind telezentrische Objektive häufig auch in dieser Hinsicht hochwertig und mit Verzeichnungen von weit unter 1 % spezifiziert.

### Beidseitige Telezentrie

Die Konstanz des Abbildungsmaßstabs im Telezentriebereich eines objektseitig telezentrischen Objektivs gilt nur für eine feste Bildebene senkrecht zur optischen Achse. Eine Verkippung der Detektorebene kann bereits zu Bildgrößenänderungen führen. Außerdem können Kanten im Bild asymmetrisch werden, weil die Strahlen schräg auf die Detektorebene fallen. Da sich die Bildgröße im Telezentriebereich in der Regel nur um Bruchteile einer Pixelkantenlänge ändert, werden meist Subpixelverfahren zur Vermessung eingesetzt, die empfindlich auf Veränderungen im Kantenprofil reagieren. In einem zweistufigen System können diese Nachteile verhindert werden. Dazu wird die Blende in den Brennpunkt eines zweiten Linsensystems gestellt und so ins Unendliche abgebildet, d.h. die Strahlen treten parallel zur optischen Achse aus der zweiten Linsengruppe aus und fallen symmetrisch auf den Detektor, unabhängig von der Höhe im Bildkreis (s. Abb. 4b). Man kann zeigen, dass bei diesen sog. beidseitig telezentrischen Objektiven die Bildgröße auch bei variabler Bildebene konstant bleibt [2]. Der Abbildungsmaßstab ist dann das Verhältnis der beiden Brennweiten. Solche Objektive werden auch mit der Möglichkeit zur Nachfokussierung angeboten, so dass der Arbeitsabstand an die Applikation angepasst werden kann. Insgesamt hat dieses Konzept große Ähnlichkeit mit dem Kepler-Fernrohr, allerdings mit dem Unterschied, dass im telezentrischen Objektiv nur Strahlen parallel zur optischen Achse zugelassen werden. Eine für die Anwendung wesentliche Konsequenz dieser Ein-

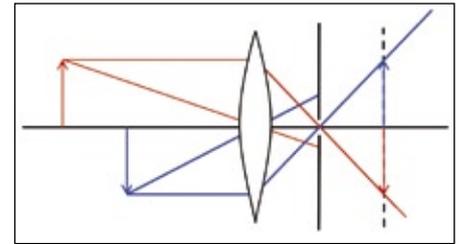


Abb. 4a: Ein objektseitig telezentrisches System entsteht durch eine Blende im Brennpunkt; für die feste Detektorebene ist der Abbildungsmaßstab unabhängig von der Objektentfernung

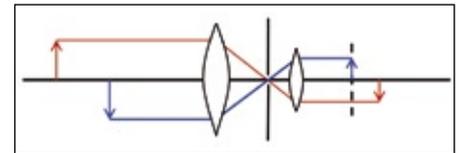


Abb. 4b: Beim beidseitig telezentrischen System ist zusätzlich die Bildgröße unabhängig von der Lage der Detektorebene

schränkung auf eine Parallelprojektion ist die Tatsache, dass der Durchmesser der Eintrittsoptik eines telezentrischen Objektivs mindestens so groß sein muss wie das Objekt, das damit abgebildet werden soll. Für die Prüfung von Bahnware über Breiten in der Größenordnung von Metern oder andere ausgedehnte Objekte sind telezentrische Objektive daher schwerlich als ein einziges Bauelement realisierbar. Ein Ausweg ist eine gestaffelte Phalanx von mehreren telezentrischen Objektiven, deren Bildbereiche sich überlappen. Aufgrund ihrer optischen Konstruktion haben telezentrische Objektive zudem im Vergleich zu Standardobjektiven eine relativ große Baulänge [3], können eine Masse von mehreren Kilogramm haben, sind lichtschwach und teuer. Für hochgenaue Vermessungsaufgaben gibt es jedoch oft keine Alternative zu diesen Spitzenprodukten der technischen Optik.

### Literatur

- [1] s. z. B. INSPECT 2/2003, Grundlagen der Bildverarbeitung: Objektive
- [2] Lenhardt, K., Optical measurement techniques with telecentric lenses, Schneider-Kreuznach, [www.schneiderkreuznach.com/knowhow.htm](http://www.schneiderkreuznach.com/knowhow.htm)
- [3] Schuhmann, R., Thöniß, T., Technisches Messen 65 4, S. 131 ff. (1998)

► **Autor**  
**Prof. Dr. Christoph Heckenkamp**  
 Hochschule Darmstadt  
 Studiengang Optotechnik und Bildverarbeitung  
[heckenkamp@h-da.de](mailto:heckenkamp@h-da.de)  
[www.fbmn.h-da.de](http://www.fbmn.h-da.de)

