

Objektseitige und bildseitige Telezentrie – Wann ist die Kante symmetrisch?

Claudia Link, Peter-Michael Merbach

Vision & Control GmbH, Suhl

<mailto:dr.link@vision-control.com>

Die Symmetrieeigenschaften des Kantenbildverlaufs bei objekt-, bild- bzw. beidseitiger Telezentrie besonders im Hinblick auf Defokussierung werden untersucht und deren Bedeutung für die optische Messtechnik gefolgert.

1 Einführung

Die objektseitige Telezentrie bietet eine ganze Reihe von Vorteilen: Der Objektivaufbau damit ist wesentlich einfacher als bei beidseitig telezentrischen Objektiven. Prinzipiell sind sie kürzer und daher leichter und kostengünstiger als beidseitig telezentrische Objektive. Der Vorteil von beidseitig telezentrischen Objektiven ist die Konstanz des Abbildungsmaßstabs bei Änderung des Arbeitsabstands. Hingegen sind sie prinzipbedingt länger, benötigen mehr Komponenten und sind daher schwerer und teurer. Jedoch wird objektseitig telezentrischen Objektiven nachgesagt, sie verlören bei Defokussierung die Kantensymmetrie [1]. Dies soll im Folgenden genauer untersucht werden. Des Weiteren wird der Einfluss der Beleuchtungsart ermittelt. Denn auch sie hat wesentlichen Einfluss auf die Symmetrie der abgebildeten Kante.

2 Rechenmodelle

Für die Herleitung wird das kollineare Modell verwendet. Das kollineare Modell ist die Erweiterung des paraxialen Modells auf reale Feldhöhen. Hierbei werden die Linsen bzw. optischen Elemente durch ihre Brennweite und ihre Hauptebenen beschrieben, also durch die Kardinalpunkte. Es ermöglicht ein Verständnis der prinzipiellen Funktionsweise optischer Systeme, was so durch reines Raytracing nicht möglich ist. Um die Grafiken für diese Modelle zu erstellen, wurde das Optikdesignprogramm Ansys Zemax OpticStudio® verwendet. Des Weiteren wurde dessen FFT (Fast Fourier Transformation)-Funktion verwendet, um die theoretischen Kurvenverläufe vorherzusagen.

3 Telezentriearten

Im Folgenden wird kurz auf die prinzipiellen Funktionsweisen der einzelnen Telezentriearten eingegangen. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in [2]. Im Wesentlichen unterscheiden sie sich durch die Position der Öffnungsblende: Bei objektseitig telezentrischen Objektiven befindet sich diese im bildseitigen Brennpunkt der Frontoptik. Bei bildseitig telezentrischen Objektiven im objektseitigen Brennpunkt des rückwärtigen abbildenden Systems. Die beidseitige Telezentrie kombiniert

beide Varianten. Dadurch entstehen afokale Systeme, wie bei einem Fernrohr, mit einem Teil vor und einem Teil hinter der Öffnungsblende. Der objektseitig parallele Hauptstrahlverlauf ermöglicht es, dass Objekte unabhängig von ihrem Abstand vom Objektiv immer gleichgroß abgebildet werden. Innerhalb der Schärfentiefe erscheinen diese Objekte scharf auf dem Sensor. Im Folgenden wird genauer untersucht, wie sich für diesen Fall bildseitig das Strahlenbündel zum Hauptstrahl verhält.

4 Ableitung mit dem Strahlensatz

In Abb. 1 ist das kollineare Optikschem eines objektseitig telezentrischen Objektivs dargestellt. B1 ist der ideale Bildort von Objekt O1 und B2 ist der von O2. O1 und O2 sind gleich groß, nur unterschiedlich weit von der Optik entfernt. Hier wird ersichtlich, dass durch die Positionierung der Öffnungsblende ÖB im bildseitigen Brennpunkt F' die Hauptstrahlen objektseitig parallel verlaufen.

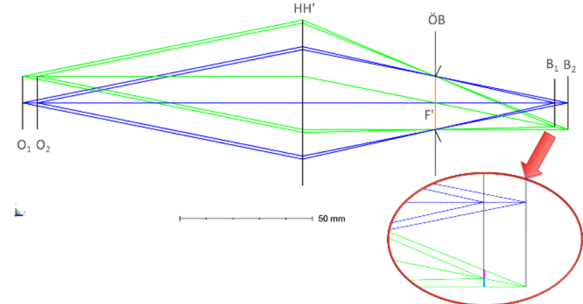


Abb. 1: Optikschem: Objektseitige Telezentrie.

Wird das Bild von O2 im Bildort B1 betrachtet, so ist erkennbar, dass es gleich groß wie O1 erscheint, da die Hauptstrahlen von O1 und O2 bildseitig kollinear verlaufen, jedoch zerstreut. Nun interessiert, ob das Strahlenbündel von O2 sich symmetrisch zu diesem Hauptstrahl in B1 verhält. Denn in [1] wird dies als Ursache für die entstehende Asymmetrie genannt. Dafür betrachten wir die Strecken a (cyan) und b (magenta). Es interessiert, ob diese beiden Strecken gleich groß sind. Um dies herauszufinden, betrachten wir nun genauer das rote und das blaue Dreieck in Abb. 2. Sind die Öffnungsblende und die Bildaufgabenebene parallel, so können folgende Relationen mit dem Strahlensatz aufgestellt werden:

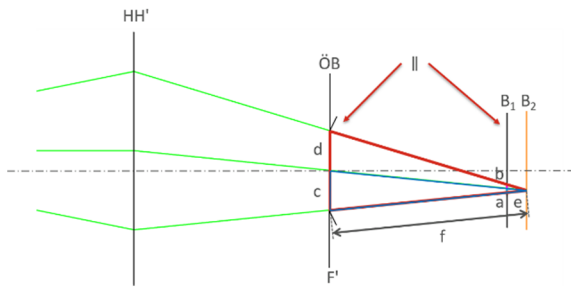


Abb. 2: Dreiecke für Strahlensatzableitung.

$$\frac{e}{f} = \frac{a+b}{c+d} \quad (1)$$

Ist die Öffnungsblende symmetrisch zur optischen Achse angeordnet, so gilt:

$$c = d \quad (2)$$

und damit für das rote Dreieck:

$$\frac{e}{f} = \frac{a+b}{2 \cdot c} \quad (3)$$

Für das blaue Dreieck gilt:

$$\frac{e}{f} = \frac{a}{c} \quad (4)$$

Durch Umstellen und Einsetzen erhält man:

$$a = b \quad (5)$$

Demnach verläuft das Strahlenbündel bei Defokussierung symmetrisch um den Hauptstrahl. Das lässt sich sogar auch für entozentrische Objektive ableiten. Denn immer wenn für die Öffnungsblende $c = d$ gilt, dann folgt $a = b$. Und so gilt dies auch für die bild- und beidseitige Telezentrie.

5 Kantenbildfunktionen – inkohärent

Die Position der Kante ($x = 0$) im Fokus befindet sich immer bei der Hälfte der maximalen Intensität $I_{\max}$. Dies wurde analytisch auch so durch R. E. Hufnagel im Jahr 1971 hergeleitet. Es handelt sich dabei um eine antisymmetrische Funktion bzgl. des Wendepunktes bei $0,5I_{\max}$ (Punktsymmetrie).

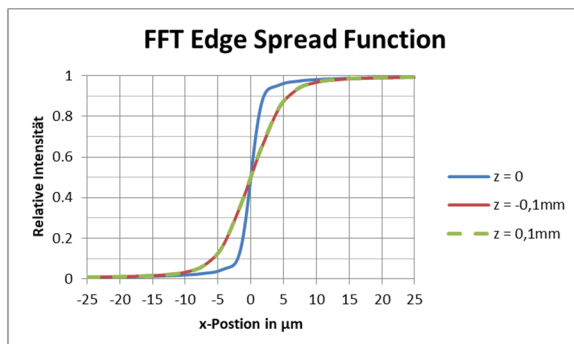


Abb. 3: Kantenbildfunktion für die Fokusposition und einen Defokus von $\pm 0,1$ mm; inkohärent, Feldhöhe $y = 15$ mm, Kante in y -Richtung, $F/6$; 470 nm.

Des Weiteren zeigen die Zemax-Simulationen (siehe Abb. 3), dass dies unabhängig von der Fokusposition ist: Auch bei Defokussierung sind die

Kantenbilder punktsymmetrisch bzgl. $(0; 0,5)$. Es ändert sich lediglich die Kantensteilheit. Sie ist im idealen Fokus maximal und sinkt bei Defokussierung. Dieser ideale Kantenverlauf gilt aber nur für die völlig inkohärente Beleuchtung. Anders sieht es bei kohärenter Beleuchtung aus:

6 Kantenbildfunktionen – kohärent

Hier kommt es zu einem asymmetrischen Kantenverlauf mit typischen Überschwüngen (Abb. 4). Der Kantenort ($x = 0$) wird hier bei ca. 25% der maximalen Intensität vorhergesagt. Bei Defokussierung bleibt dieser jedoch erhalten. Wie zuvor verläuft die Kante auch hier flacher. Vermutet man die Kante jedoch bei der halben Intensität, so ergibt sich eine Verschiebung von ca. $1 \mu\text{m}$ im idealen Fokus und von $2,5 \mu\text{m}$ bei Defokussierung.

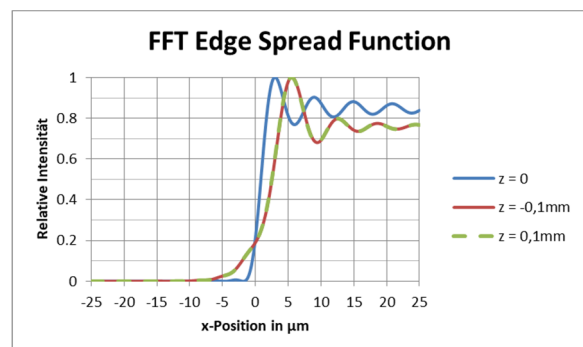


Abb. 4: Kantenbildfunktion für die Fokusposition und einen Defokus von $\pm 0,1$ mm; kohärent; Feldhöhe $y = 15$ mm, Kante in y -Richtung, $F/6$; 470 nm.

7 Schlussfolgerung und Ausblick

Ein symmetrischer Kantenverlauf zeigt sich im Fokus und bei Defokussierung bei vollständig inkohärenter Beleuchtung, unabhängig von der Telezentrie. Die Kohärenz der Beleuchtung hingegen hat einen entscheidenden Einfluss auf die Kanten-symmetrie und damit auf den detektierten Kantenort. Eine weitere wesentliche Ursache für unsymmetrische Kantenverläufe sind Abbildungsfehler. Hier ist es das Ziel des Optikdesigns die Objektive möglichst beugungsbegrenzt auszulegen.

Mit diesem Wissen kann nun passgenau ein telezentrisches Objektiv (objekt- oder beidseitig) für die jeweilige Messaufgabe ausgewählt werden.

Ziel von Folgearbeiten ist die Untersuchung von realen Kantenbildverläufen bei verschiedenen Beleuchtungsarten.

Literatur

- [1] R. Wartmann: „Beidseitige Telezentrie – eine Voraussetzung für hochgenaue optische Meßtechnik“, Schneider-Kreuznach 2005
- [2] C. Brückner: „Telezentrische Objektive – Grundlagen, Anwendungen, Herausforderungen“ in: *Jahrbuch Optik und Feinmechanik*, W.-D. Prenzels (Hrsg.) (Optik-Verlag 2013), S. 51-74