

# Warum sind glänzende Oberflächen optisch nicht kooperativ?

*Rainer Tutsch<sup>1</sup>, Marcus Petz<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Institut für Produktionsmesstechnik, TU Braunschweig, Schleinitzstraße 20, 38106 Braunschweig*

## Zusammenfassung

Auch bei gut kalibrierten Kameras werden in der Kameramesstechnik teilweise deutliche Positionsabweichungen im Bild beobachtet, wenn die Oberfläche des abgebildeten Objekts spiegelnd reflektierende Anteile enthält. Dies wird in der Literatur häufig auf lokale Überbelichtung des Bildsensors zurückgeführt. In unserem Beitrag zeigen wir, dass eine ungleichmäßige Ausleuchtung der Eintrittspupille in Verbindung mit optischen Aberrationen des Objektivs die Ursache sind. Dies wird anhand einer Simulationsrechnung und experimenteller Daten nachgewiesen. Ein möglicher Lösungsansatz wird beschrieben.

**Keywords:** Kameramesssysteme, optisch nicht kooperative Flächen, Aberrationen

## Einleitung

In der Kameramesstechnik werden Bilder eines Werkstückes mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung mit dem Ziel ausgewertet, dimensionelle Größen (Längen, Abstände, Durchmesser, Winkel, ...) quantitativ zu bestimmen. Dies erfordert einen präzisen Bezug zwischen der 2D-Position eines Merkmals im Bild und der 3D-Position des dazu konjugierten Objektpunktes. Im einfachsten Fall erfolgt dies durch Anwendung des sogenannten Lochkameramodells, bei dem Objekt- und Bildpunkte durch geradlinige Strahlen verbunden werden, die alle durch den selben Punkt, das „Projektionszentrum“ laufen. Bei höheren Anforderungen an die Genauigkeit müssen allerdings die optischen Aberrationen des Objektivs berücksichtigt werden. Außerdem hat ein Objektiv nur genau eine zur durch den Bildsensor vorgegebenen Bildebene konjugierte Objektebene, während reale Objekte stets eine endliche Tiefenausdehnung aufweisen.

In der Praxis kommen unterschiedliche Abbildungsmodelle mit bis zu ca. 20 Parametern zum Einsatz, um die Effekte der Aberrationen und die Defokussierung zu berücksichtigen [1]. Diese Parameter werden bestimmt, indem ein Kalibrierobjekt mit einem bekannten Kalibriermuster in unterschiedlichen Positionen und Winkellagen aufgenommen wird, wobei nach Möglichkeit das gesamte Messvolumen abgedeckt wird. Ein gut kalibriertes Kameramesssystem kann eine relative Unsicherheit von ca.

$10^{-5}$  erreichen. Treten an glänzenden Oberflächenbereichen jedoch direkte Reflexe auf, so kann dies erhebliche Messabweichungen bewirken, weshalb glänzende Oberflächen oft als „optisch nicht kooperativ“ bezeichnet werden. Abb. 1 zeigt das Ergebnis einer Messung einer metallischen Kugel mit einem Stereophotogrammetriesensor. Dargestellt ist die Abweichung von einer best-fit Kugelfläche. Diese liegt durchweg innerhalb eines Bereichs von  $\pm 20 \mu\text{m}$ , mit Ausnahme zweier Stellen mit Abweichungen  $> 100 \mu\text{m}$ . Dies sind die Stellen, an denen jeweils eine der beiden Kameras eine direkte Reflexion der Lichtquelle abbildet.

In der Literatur wird dieses Problem häufig auf eine lokale Überbelichtung des Bildsensors zurückgeführt. Im vorliegenden Fall kann das ausgeschlossen werden, da durch Anwendung einer HDR-Belichtungsreihe mit 5 Belichtungsstufen ein hinreichend großer Dynamikbereich sichergestellt war. Wir haben sowohl experimentelle Untersuchungen als auch Simulationsrechnungen durchgeführt und gefunden, dass die ungleichmäßige Ausleuchtung der Apertur des Objektivs die eigentliche Ursache des Fehlers ist.

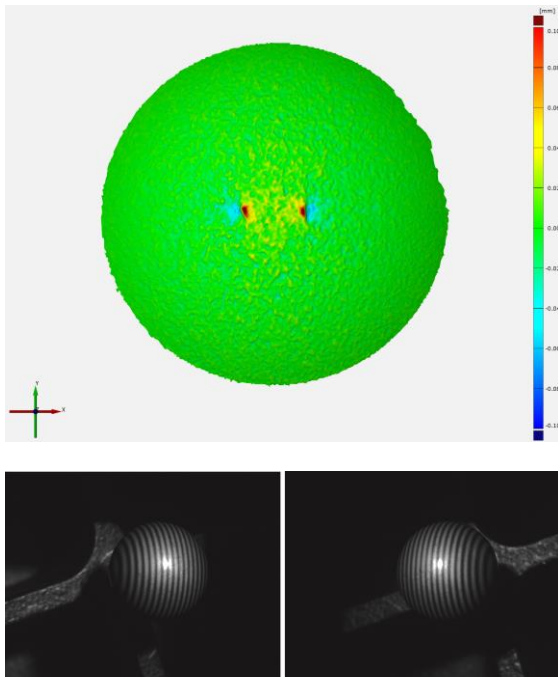


Abb. 1: oben: Optisch gemessene Formabweichung einer Metallkugel. An zwei Stellen, an denen Licht spiegelnd in eine der beiden Kameras reflektiert wird, treten lokale Artefakte auf.  
unten: Einzelbildpaar der Belichtungssequenz mit auf die Kugel projiziertem Streifenmuster und lokalem Reflex.

### Optische Aberrationen

Im Strahlenmodell der optischen Abbildung verlaufen von einem Gegenstandspunkt unendlich viele Lichtstrahlen durch die Abbildungsoptik zum zugeordneten Bildpunkt. Jedem durch die Polarkoordinaten  $(r, \varphi)$  lokalisierten Punkt der Apertur der Optik kann ein solcher Strahl zugeordnet werden (Abb. 2). Bei einer idealen Abbildung sollten alle diese Strahlen sich in einem Bildpunkt treffen, jedoch treten in der Praxis Abweichungen auf. Philipp Ludwig von Seidel ordnete 1855 diese gemäß ihrer Abhängigkeit von  $y$ ,  $r$  und  $\varphi$  den fünf nach ihm benannten Aberrationen zu. Einem Objektpunkt ist daher in der Bildebene ein endlich großer Lichtfleck zugeordnet, der durch die Beugung an der Apertur und gegebenenfalls aufgrund einer Defokussierung zusätzlich vergrößert wird.

In der Kameramesstechnik erhält man Bildpunktkoordinaten, indem mit geeigneten Algorithmen dem ausgedehnten Lichtfleck ein Punkt zugeordnet wird, z.B. der Schwerpunkt der Intensitätsverteilung. Diese Intensitätsverteilung ist eine Funktion der Intensitätsverteilung

in der Apertur. Für die Kalibrierung der Optik kommen durchweg Kalibrierobjekte zum Einsatz, deren Strukturen das Licht diffus streuen, so dass die Apertur der Optik gleichmäßig ausgeleuchtet wird. Eine glänzende Stelle auf einem Messobjekt dagegen führt aufgrund der zum Teil gerichteten Reflexion zu einer ungleichförmig ausgeleuchteten Apertur. Der Auswertalgorithmus liefert dann einen Bildpunkt, dessen Position von derjenigen abweicht, die gemäß Kalibrierung zu erwarten wäre.

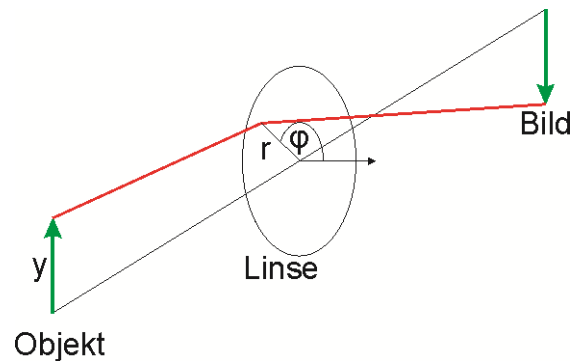


Abb. 2: Strahlengang bei der optischen Abbildung. Durch jeden Punkt  $(r, \varphi)$  der Apertur verläuft genau ein Abbildungsstrahl

### Experimentelle Verifizierung

Für die experimentellen Untersuchungen war eine Anordnung erforderlich, bei der von festen Objektpunkten aus Lichtstrahlen mit einstellbarer Intensitätsverteilung durch die Apertur der Abbildungsoptik zur Bildebene laufen. Dies wurde wie folgt realisiert:

Messobjekt ist eine schwarz gefärbte ebene Platte, auf der ein regelmäßiges Raster weißer, diffus streuender Kreismarken mit Durchmesser 1 mm angebracht ist, so dass die Apertur des Kameraobjektivs gleichmäßig ausgeleuchtet wird. Ein Referenzbild wird mit offener Blende der Kamera aufgenommen. Dann wird eine Kreisblende mit 2 mm Durchmesser unmittelbar vor dem Objektiv angebracht, die quer zur optischen Achse in vertikaler Richtung verschiebbar ist (Abb. 3). Für verschiedene Positionen der Blende werden Vergleichsbilder aufgenommen. Alle Aufnahmen werden jeweils 50 mal wiederholt.

Der verwendete Auswertalgorithmus setzt als Geometrie der Kreisbilder Ellipsen an und ermittelt deren geometrischen Mittelpunkt. Für jede Blendenposition werden die berechneten

Mittelpunktskoordinaten der 50 aufgenommenen Bilder gemittelt. Dann erfolgt die Zuordnung der Punktbildkoordinaten zu denen des Referenzbildes und die Berechnung der Verschiebungsvektoren.

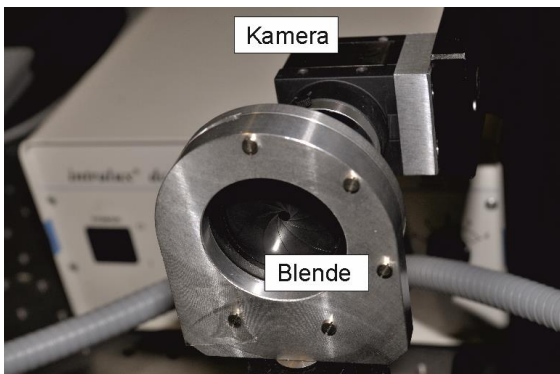
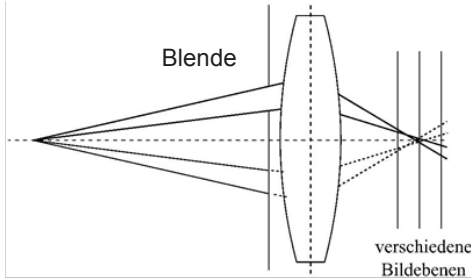


Abb. 3: oben: Strahlengang mit außerhalb der optischen Achse positionierter Blende  
 unten: Blende in verschiebbarer Halterung vor der Kamera

Die Verschiebungsvektoren in der Bildebene sind in Abb. 4 für 5 verschiedene Positionen der Blende dargestellt. Durch die Blende sind zwar  $r$  und  $\varphi$  näherungsweise festgelegt, die einzelnen Objektpunkte des Rasters unterscheiden sich jedoch in der Gegenstandshöhe  $y$ . Nach Seidel wird die zu erwartende Verschiebung durch ein Polynom 3. Ordnung in  $y$  beschrieben (Verzeichnung  $\sim y^3$ , Astigmatismus und Bildfeldwölbung  $\sim y^2$ , Koma  $\sim y$ ).

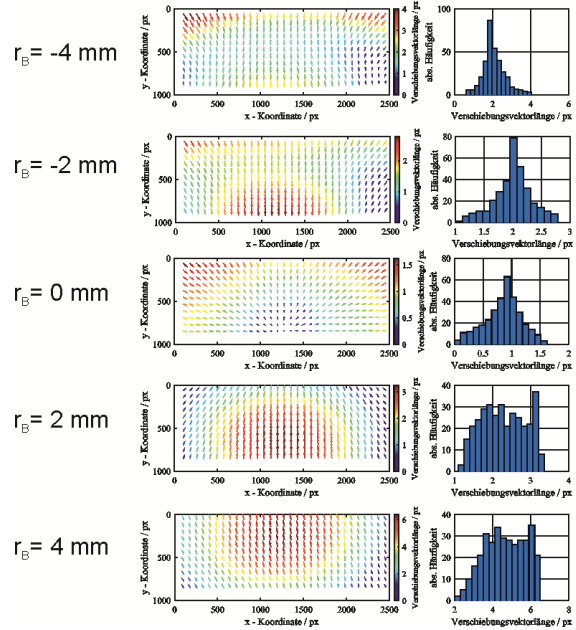


Abb. 4: Verschiebungsvektorfelder der Bildpunkte für 5 unterschiedliche Positionen  $r_B$  der Blende.  $r_B = 0$  mm entspricht der Position symmetrisch zur optischen Achse. Dargestellt ist jeweils die obere Hälfte des Bildes.

**Verifizierung durch Simulationsrechnung**  
 Die Simulationsrechnungen erfolgten mit der Software Zemax OpticStudio. Es wurde eine Doppel-Gauß-Optik ausgewählt, die der im Experiment verwendeten Optik ähnelt [2] (Abb. 5).

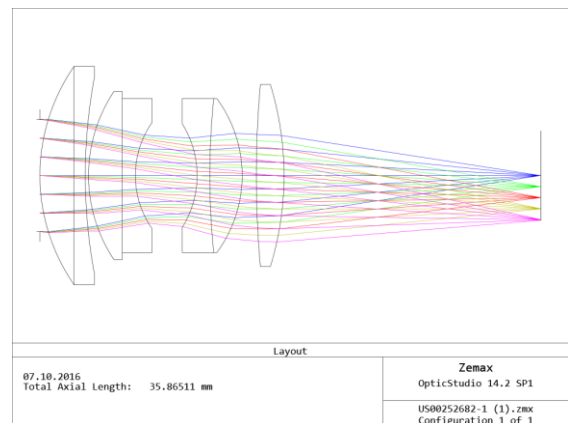


Abb. 5: Für die Simulationsrechnung verwendete Doppel-Gauß-Optik

Aus technischen Gründen erfolgte die Untersuchung anders als im Experiment. Anstelle der Kreismarkenmatrix wurde eine einzelne isotrop abstrahlende Punktlichtquelle als Objekt eingesetzt. In der Ebene der Eintrittspupille wurde die Lochblende in x- und y-Richtung

rasterförmig verschoben und für jede Lochblendenposition wurde der Verschiebungsvektor des Bildpunktes in der Bildebene relativ zur Position im Referenzbild (ohne Lochmaske) berechnet. Abb. 6 zeigt für 5 verschiedene Positionen des Quellpunktes (unterschiedlicher Wert von  $y_0$ ) jeweils die kreisförmige Eintrittspupille und darin den für die jeweilige Lochblendenposition berechneten Verschiebungsvektor.

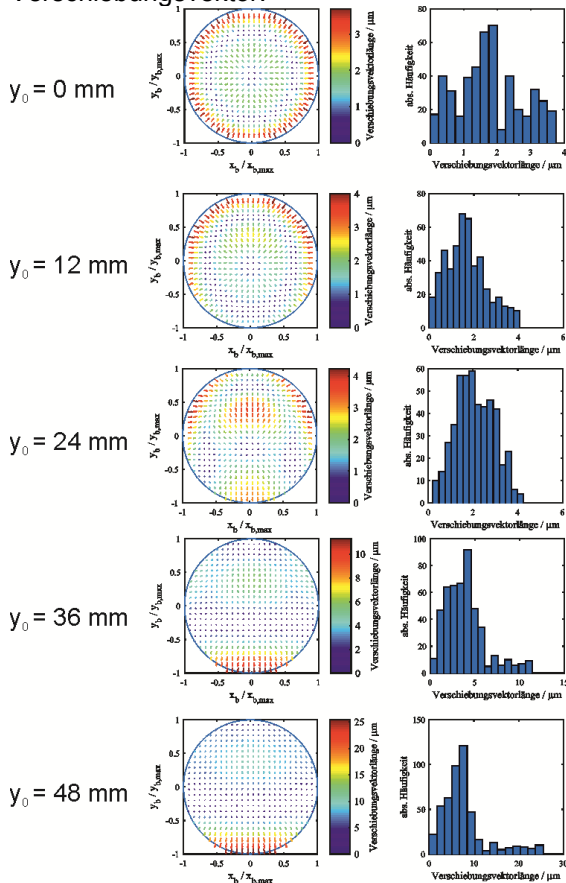


Abb. 6: Verschiebungsvektorfelder der Bildpunkte für 5 unterschiedliche Positionen  $y_0$  der Blende.

$y_0 = 0\%$  entspricht der Position symmetrisch zur optischen Achse.

### Schlussfolgerungen

Simulation und Experiment zeigen, dass ungleichförmige Ausleuchtung der Eintrittspupille, wie sie bei der Abbildung glänzender Objekte auftreten kann, zu systematischen Abweichungen im Bild führt. Dieser störende Effekt kann durch Verwendung von Objektiven mit geringer Aberration minimiert werden. Aufgrund der Proportionalität zu  $r^3$  ist hier besonders auf die sphärische Aberration zu achten. Doch selbst ein ideales Objektiv wäre keine vollständige Lösung, da auch die Beugung und die bei der Abbildung dreidimensio-

ner Objekte unvermeidliche partielle Defokussierung Beiträge zur beschriebenen Messabweichung liefern. Das Einstellen einer kleinen Blende verringert die Seidelschen Aberrationen und die Unschärfe durch Defokussierung, bei zu kleiner Blende wird jedoch die Beugung dominant.

Mittlerweile sind Lichtfeldkameras kommerziell verfügbar, die zu jedem Pixel des Bildes auch eine Information über die Richtungsverteilung der Lichtstrahlen liefern [3]. Auf dieser Basis können Störungen aufgrund von glänzenden Bereichen des Objekts zumindest erkannt und ausgeblendet, grundsätzlich sogar korrigiert werden. Die derzeit verfügbaren Lichtfeldkameras haben jedoch noch eine recht begrenzte Ortsauflösung. Der anhaltende Trend zu Bildsensoren mit immer höherer Pixelauflösung (in Smartphones bereits  $> 10^8$  Pixel) lässt erwarten, dass künftig auch messtechnisch einsetzbare Lichtfeldkameras auf den Markt kommen werden.

### Danksagung

Die Autoren danken Herrn Johannes Steger, der im Rahmen seiner Studienarbeit Messungen und Berechnungen durchgeführt hat.

### Literaturnachweis

- [1] Luhmann, T. (2010): Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie. Habilitationsschrift, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 645
- [2] <http://www.lens-designs.com/PhotoPrime>
- [3] <https://raytrix.de/>