

# Untersuchungen zur Bestimmung der inneren Orientierung von Glasfaserendoskopen

Christina STEINER, Manfred WIGGENHAGEN und Christian HEIPKE

## Zusammenfassung

Glasfaserendoskope ermöglichen Filmaufnahmen auch in engen, schwer zugänglichen Bereichen eines Fahrzeugs. Um auch während eines Crashtests im Fahrzeug filmen zu können, wird ein solches Glasfaserendoskop über einen Objektivadapter an eine Highspeedkamera angeschlossen. Die Verwendung von zwei nacheinander geschalteten optischen Systemen führt dazu, dass es geometrische Verzeichnungen im optischen Strahlengang gibt. Um in einem Bild quantitativ messen zu können, müssen diese Abbildungsbedingungen bekannt sein. Im folgenden Beitrag werden Untersuchungen beschrieben, die zur Bestimmung der inneren Orientierung der verwendeten Endoskope durchgeführt wurden.

## 1 Einleitung

### 1.1 Hintergrund

Die Aufzeichnung hochdynamischer Prozesse mittels Highspeedkameras gehört in der Fahrzeugsicherheit zum Alltag. Komponenten- und Gesamtfahrzeugversuche werden mit statischen und mitfahrenden Kameras aufgezeichnet. Dennoch gibt es vor allem im Fahrzeug Bereiche, in denen die gängigen beschleunigungsfesten Kameras aus Platz- und Kostengründen nicht eingesetzt werden können. Dies ist beispielsweise in Bereichen wie dem Motorraum oder dem Türinnenraum der Fall. Daher lassen sich Deformationen und Schäden an diesen Stellen erst nach dem Abrüsten des Fahrzeugs untersuchen, der eigentliche Deformationsvorgang bleibt häufig unklar. Dieses Problem soll mit dem Einsatz von Glasfaserendoskopen angegangen werden, die an die Highspeedkameras angeschlossen sind. Dadurch ist es möglich, die Kamera im Fahrzeug zu montieren und den Glasfaserschlauch flexibel an die zu beobachtenden Stellen des Fahrzeugs zu leiten. Die Erzeugung von qualitativ hochwertigen Highspeedaufnahmen (Bildaufnahmefrequenz  $> 500\text{Hz}$ ) mittels Glasfasern ist schon durch den Beleuchtungsaufwand eine Herausforderung. Sollen Aufnahmen später mit einer Genauigkeit im Bereich weniger mm messtechnisch ausgewertet werden, muss die innere Orientierung dieser flexiblen Endoskope mit der entsprechenden Genauigkeit bekannt sein.

Der Einsatz von flexiblen Endoskopen in der Industrie ist gerade bei der zerstörungsfreien Prüfung von Produkten und Fertigungsanlagen weit verbreitet. Auch werden bei vielen Geräten Vorrichtungen zum Messen von Abständen mitgeliefert. Bei den Genauigkeitsangaben dieser Geräte werden jedoch Einflussfaktoren wie Verzeichnungen und innere Orientierung der verwendeten Optiken in der Regel nicht berücksichtigt. Untersuchungen zum Auflösungsvermögen und der Messgenauigkeit von flexiblen Endoskopen finden sich prak-

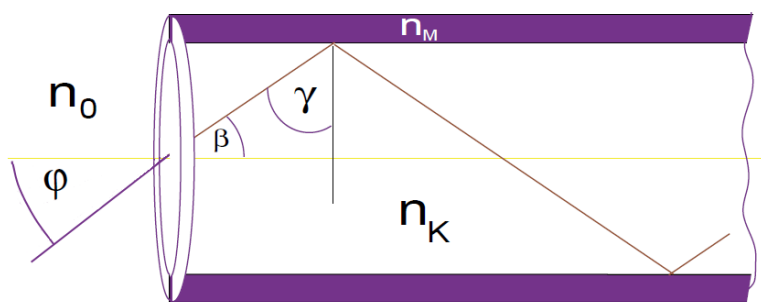
tisch ausschließlich bei Anwendern. KLAR (2005) verwendet für sein Particle Tracking sowohl flexible als auch starre Endoskope. Das Kalibrieren der flexiblen Endoskope verwirft KLAR allerdings auf Grund schlechter Ergebnisse, die er auf Abweichungen durch die Glasfasern zurückführt.

Das Ziel unserer Arbeiten ist es, die innere Orientierung von flexiblen Endoskopen zu bestimmen, um sie für photogrammetrische Messaufgaben einsetzen zu können. Der folgende Artikel behandelt im ersten Teil Grundlagen zum Aufbau von Glasfasern und flexiblen Endoskopen und geht auf deren Besonderheiten ein. Schwerpunkt in Abschnitt 2 sind die Problemstellungen, Vorgehensweisen und die verwendeten Geräte für unsere Untersuchungen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in Abschnitt 3 behandelt. Abschnitt 4 gibt einen Ausblick auf offene Fragen und zukünftige Arbeiten.

## 1.2 Glasfaserendoskopie

Glasfaserendoskope fallen in die Kategorie der flexiblen Endoskope (vgl. RELING (1988)). Im Gegensatz zu den starren Endoskopen, die sich aus einem festen Linsensystem zusammensetzen, bestehen sie aus bis zu 50000 gebündelten Glasfasern. Die hohe Anzahl von sortierten Fasern erlaubt dabei die punktweise Übertragung von Bildern.

Eine Faser hat einen Durchmesser von ca.  $10\mu\text{m}$  und besteht aus dem Faserkern und einer Mantelfläche, die unterschiedliche Brechungsindizes aufweisen. Der Kern einer Quarzglasfaser hat üblicherweise einen Brechungsindex von  $n_K = 1,50$ , während der Mantel mit  $n_M = 1,47$  einen kleineren Brechungsindex hat. Durch den sprunghaften Übergang zwischen den Brechungsindizes wird der einfallende Lichtstrahl an der Grenzfläche totalreflektiert und durch die Faser transportiert (s. Abb. 1), wenn der Einfallswinkel  $\gamma$  einen vorgegebenen Grenzwert  $\gamma_c$  überschreitet.



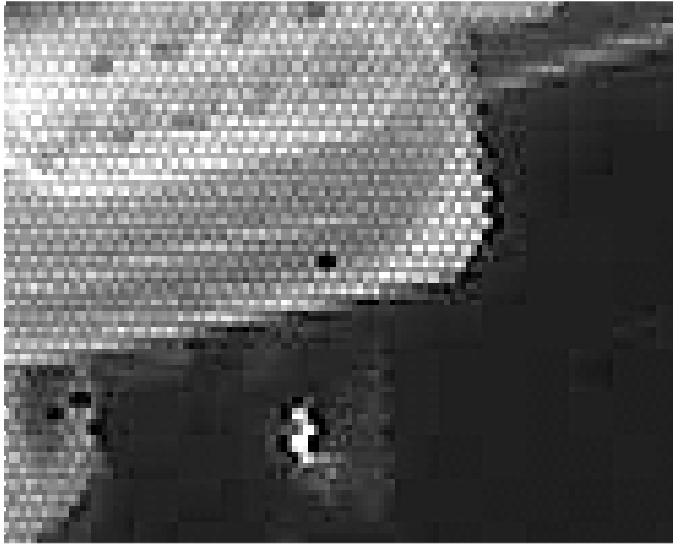
**Abb. 1:**  
Lichtweg im Faserkern  
(nach JANBEN 2000)

Das Snelliussche Brechungsgesetz gibt mit  $\gamma_c = \arcsin(n_M / n_K)$  den Grenzwinkel für die Totalreflexion an. Für den größten Einfallswinkel  $\varphi_c$  des Lichtes aus dem Medium mit Brechungsindex  $n_0$  (s. Abb. 1), bei dem gerade noch Totalreflexion auftritt, gilt dann:

$$\sin \varphi_c = \frac{n_K}{n_0} \sin \beta = \frac{n_K}{n_0} \cos \gamma_c$$

Da über die Mantelfläche kein Licht übertragen wird, erscheint diese als schwarzer Rand auf der Abbildung und man erhält für Endoskopbilder ein charakteristisches Wabenmuster (s. Abb. 2). In der Literatur findet man Methoden zur Entfernung dieser Wabenstruktur,

bspw. durch Superposition bei WINTER (2006). Dafür werden verschiedene Endoskopaufnahmen eines Objektes herangezogen, zwischen denen man das Endoskop leicht bewegt. Dadurch ist immer ein anderer Objektbereich durch das Wabenmuster verdeckt. Somit sind über viele Aufnahmen hinweg alle Bereiche des Objektes abgebildet, und durch Zusammenfügen dieser Informationen wird ein einheitliches Gesamtbild erzeugt.

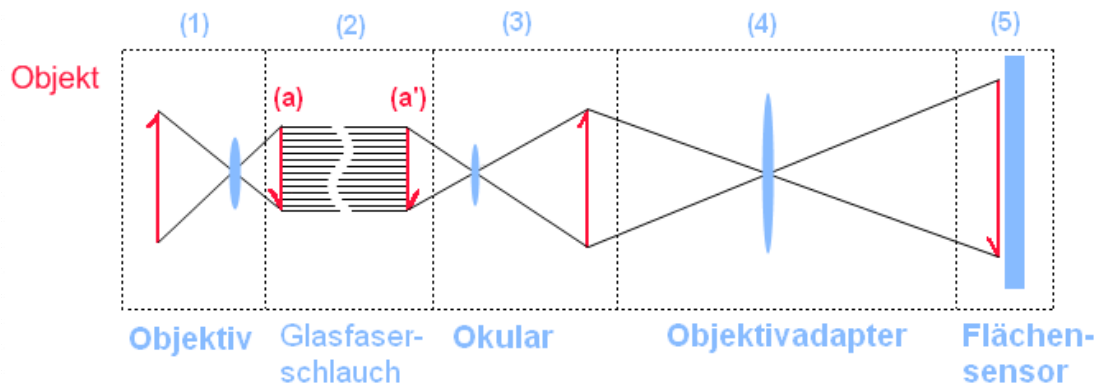


**Abb. 2:**  
Wabenmuster bei der Abbildung der Türschlossmechanik.

## 2 Untersuchungen

### 2.1 Untersuchte Geräte

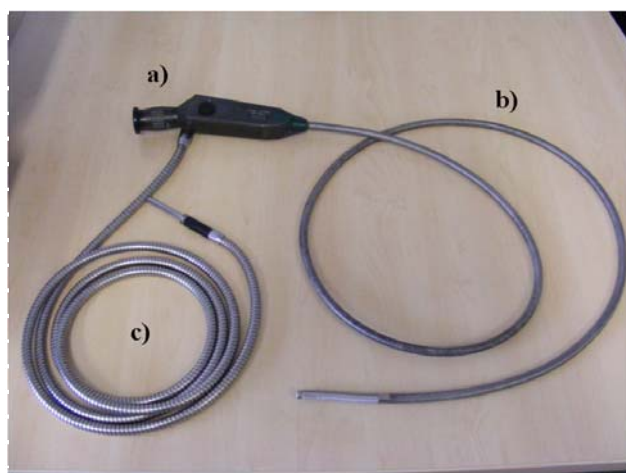
Für die Untersuchungen zur Stabilität der inneren Orientierung wird ein Flexoskop der Firma Karl Storz GmbH verwendet (s. Abb. 3), bestehend aus einem festen Objektiv (1), einem Glasfaserschlauch (2) und einem Okular (3) zur visuellen Betrachtung von Objekten. Ein fokussierbarer Objektivadapter (4, Brennweite  $f = 25\text{mm}$ ) dient zur Befestigung an der Highspeedkamera (5). Der Objektivadapter wird über einen Klemmverschluss an das Okular (3) angeschlossen und über ein c-Mount-Gewinde an die Kamera geschraubt.



**Abb. 3:** Schematischer Aufbau des Strahlenganges durch Endoskop und Objektivadapter zur Kamera

In Abbildung 3 ist schematisch der Aufbau der Versuchsanordnung mit dem angenommenen Strahlenweg abgebildet, den das Licht durch das System nimmt. Dabei wird das Licht über eine Linse (1) in den Glasfaserschlauch eingekoppelt. Am Anfang des Glasfaserschlauchs entsteht ein Bild des Objekts (a). Dieses Bild wird wegen der Parallelität aller Glasfasern am Schlauchende wieder abgebildet (a') und kann über das Okular (3) betrachtet werden. Von dort überträgt der Objektivadapter (4) das Bild auf den Flächensensor (5) der Kamera. Zusätzlich besitzt das Endoskop einen Lichtleiter zur Beleuchtung der aufzunehmenden Szene (s. Abb. 4).

Bei der verwendeten Highspeedkamera handelt es sich um das GX-5 Kamerasystem der Firma NAC, das standardmäßig in den Fahrzeugversuchen bei Audi eingesetzt wird. Die Kamera leistet bei einer Bildfrequenz von 1000 Hz eine maximale Auflösung von 640x480 Pixel bei einer quadratischen Pixelgröße von  $10\mu\text{m}$ . Auf dem Sensor wird ein kreisrundes Bild erzeugt, in den Randbereichen sind keine Bildinformation vorhanden (vgl. Abb. 5).



**Abb. 4:**  
Storz Flexoskop: (a) Okular,  
(b) Glasfaserschlauch, (c) Lichtleiter



**Abb. 5:**  
Das Endoskop erzeugt ein kreisförmiges  
Bild auf dem Sensor.

## 2.2 Aufbau und Datenaufnahme

Der Versuchsaufbau mit Kamera und Endoskop besteht aus mehreren einzelnen optischen Elementen, die getrennt voneinander untersucht werden müssen, um ihr Verhalten analysieren zu können. Das ist zum einen der Glasfaserschlauch (vgl. Abb. 3). Hier ist zu hinterfragen, ob messbare Abweichungen in der Fertigungsqualität Auswirkungen auf die Geometrie der Bildübertragung haben und ob man wirklich von einer 1:1 Übertragung des Bildes zwischen den beiden Enden des Glasfaserschlauchs ausgehen kann. Ein weiteres Element ist das Okular, welches das Bild aus den Glasfasern für den Betrachter vergrößert und das eine eigene Brennweite besitzt. Zum optischen System des Endoskops muss neben dem Okular auch das Objektiv gezählt werden. Als letztes Element ist der Objektivadapter zu betrachten. Für das Storz-Okular gibt der Hersteller eine Brennweite von 10mm an, der Objektivadapter hat ca. 25mm. Die Frage ist, welche kalibrierte Kamerakonstante man für das gesamte System annehmen kann, wenn diese beiden Objektive nach einander geschaltet sind. Mit dem Objektivadapter kann man auch ohne Endoskop, also nur mit den Elementen

(4) und (5) Aufnahmen machen. So ist es möglich, die Eigenschaften dieses Objektivs separat zu untersuchen.

Die Aufnahmen für die Kalibrierung des Objektivadapters erfolgen mit einer AICON-Kalibriertafel nach ISO8721(2010) mit 5 erhöhten Punkten. Die Tafel enthält eine Reihe von Punkten mit bekannten Koordinaten, die im Folgenden als Passpunkte verwendet werden. Der Aufbau sieht so aus, dass die Kamera auf einem Tisch fixiert ist und in ca. 4m Abstand die Kalibriertafel aufgestellt wird. Diese wird von zwei Seiten mit je einem Halogenscheinwerfer ausgeleuchtet. Von der Kalibriertafel werden dann mehrere gekantete sowie gedrehte Aufnahmen mit der maximal möglichen Auflösung der Kamera (640x480 Pixel) erstellt. Dabei wird darauf geachtet, für den Objektivadapter diejenige Fokussierung zu wählen, die auch eingestellt ist, wenn das Endoskop im Versuch verwendet wird, um das zu beobachtende Objekt scharf zu stellen.

Für die Aufnahmen mit dem Endoskop wird eine 30x30 cm große Spanholzplatte mit zwei erhöhten Punkten als Kalibriertafel verwendet. Da Endoskop und Objektivadapter nur über einen Klemmverschluss miteinander verbunden sind und sich das Okular im Objektivadapter frei drehen kann, müssen die beiden Elemente für die Aufnahmen fixiert werden. Der Glasfaserschlauch wird an eine Metallstange geklemmt, um die Ausrichtung beizubehalten. Endoskop und Kamera werden auf einem Tisch befestigt. Für die einzelnen Aufnahmen wird dann die Tafel in einem Abstand von 300 mm für die Aufnahmen nach demselben Schema wie beim Adapter bewegt.

In diesen Aufnahmen werden nun die Bildkoordinaten der Passpunkte der Kalibriertafel ermittelt. Dazu wird die bei Audi genutzten Videoanalyse- Software MovXact der Firma FalCon genutzt. Außerdem werden mit dieser Software Werte für die äußere Orientierung aller Bilder bestimmt.

Während die Passpunkte als Konstanten betrachtet werden, gehen die Bildkoordinaten mit ihren Standardabweichungen als Beobachtungen in die Ausgleichungssoftware Ax.Ori.Con V1.10 der Firma AXIOS 3D Services ein. Die berechneten Werte der äußeren Orientierung werden in der Ausgleichung als Näherungswerte einbezogen. Ax.ori.Con berechnet die Elemente der inneren und äußeren Orientierung nach dem Verfahren der Bündelblockausgleichung. Für die Verzeichnung der Optik werden die bekannten Brown'schen Parameter angesetzt.

Das Programm stellt im Ausgabeprotokoll auch statistische Angaben zur Verfügung, wie beispielsweise Redundanzen. Für die Werte der inneren und äußeren Orientierung werden Standardabweichungen ausgegeben, um die Bestimmbarkeit dieser Parameter beurteilen zu können. Aus der Varianz-Kovarianz-Matrix lassen sich Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Unbekannten ablesen. Außerdem werden bei der Ausgleichung Ausreißer gekennzeichnet.

Für die Analysen der vorliegenden Arbeit wird davon ausgegangen, dass das Endoskop, der angeschlossene Adapter und die Kamera dem Prinzip der Zentralperspektive folgen (vgl. Abb. 3). Unter diesen Voraussetzungen gelten die Kollinearitätsgleichungen auch für mit dem Endoskop aufgenommene Bilder.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Adapter

Der Objektivadapter ist ein optisches Element des verwendeten Gesamtsystems, das sich getrennt vom restlichen Versuchsaufbau kalibrieren lässt. Dadurch kann man ermitteln, ob bereits der Adapter Auffälligkeiten in der optischen Abbildung aufweist.

Mit diesem Adapter, der an die Highspeedkamera angeschlossen wurde, wurden vier Aufnahmeserien *Calib\_Adapter 1-4* so wie in Abschnitt 2.2 beschrieben unabhängig voneinander erstellt. Aus diesen Aufnahmeserien wurden die Kamerakonstante  $c$  und die Koordinaten des Bildhauptpunktes  $x_H$  und  $y_H$  bestimmt. Diese Parameter sind in Tabelle 1 zusammen mit ihren Standardabweichungen für die jeweilige Aufnahmeserie dargestellt.

**Tabelle 1:** Kamerakonstante und Koordinaten des Bildhauptpunktes inkl. Standardabweichungen bei den Aufnahmen mit dem Objektivadapter

| Aufnahmeserie   | $c$      | Stabw. $c$ | $x_H$   | Stabw. $x_H$ | $y_H$   | Stabw. $y_H$ |
|-----------------|----------|------------|---------|--------------|---------|--------------|
| Calib_Adapter 1 | 25,17 mm | 0,078 mm   | 3,29 mm | 0,024 mm     | 2,31 mm | 0,031 mm     |
| Calib_Adapter 2 | 25,06 mm | 0,082 mm   | 3,23 mm | 0,021 mm     | 2,50 mm | 0,027 mm     |
| Calib_Adapter 3 | 25,33 mm | 0,076 mm   | 3,39 mm | 0,023 mm     | 2,29 mm | 0,036 mm     |
| Calib_Adapter 4 | 25,71 mm | 0,054 mm   | 2,98 mm | 0,024 mm     | 2,31 mm | 0,020 mm     |
| <b>Mittel</b>   | 25,32 mm | 0,073 mm   | 3,22 mm | 0,023 mm     | 2,35 mm | 0,030 mm     |

Die Standardabweichungen der Unbekannten sind relativ klein, was für eine gute Bestimmbarkeit spricht. Die Schwankungen in den Werten der Kamerakonstanten sind wahrscheinlich durch Änderungen des Fokusringes von einer Aufnahme zur nächsten zu erklären; der Fokusring hat keine Skala oder Markierung, die es ermöglicht, die Fokuseinstellung zwischen den Aufnahmen exakt zu reproduzieren.

Die Abweichung der  $x$ -Koordinate des Bildhauptpunktes zum Mittelwert hat in Aufnahmeserie 4 eine Größenordnung von 0,24 mm. Der Wert von  $x_H$  aus Aufnahmeserie 3 weicht um 0,17 mm ab, während die Abweichungen der anderen Aufnahmeserien in der Größenordnung der Standardabweichung liegen. Bei den  $y$ -Koordinaten hat  $y_H$  von Aufnahmeserie 2 eine Abweichung von 0,16 mm zum Mittelwert. Die Kalibrierung des Objektivadapters weist damit relativ hohe Schwankungen in den Koordinaten des Bildhauptpunktes auf, die sich negativ auf die Messgenauigkeit auswirken können. Der Grund für diese Schwankungen ist derzeit unklar.

#### 3.2 Gesamtaufbau

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse für die Versuche mit dem Endoskop aufgeführt. Angegeben sind die Werte der Kamerakonstanten, sowie die Koordinaten des Bildhauptpunktes mit ihren jeweiligen Standardabweichungen. *Calib\_Endo 1-8* bezeichnet ähnlich wie im ersten Versuch verschiedene Aufnahmeserien. Die Aufnahmeserien 1-3 sind zu voneinander unabhängigen Zeitpunkten entstanden, die Serien 4 bis 8 wurden unmittelbar nacheinander

erstellt. Bei den Serien 4-8 wurde der Grundaufbau mit Tafel, Kamera und Endoskop nicht verändert, allerdings wurde zwischen den Aufnahmen die Verbindung zwischen Endoskop und Objektivadapter (vgl. Abb. 3) bewegt bzw. kurzzeitig getrennt. Hierdurch sollte geprüft werden, wie stabil die innere Orientierung trotz Bewegungen und Veränderungen im Aufbau ist.

**Tabelle 2:** Kamerakonstante und Koordinaten des Bildhauptpunktes inkl. Standardabweichungen bei den Aufnahmen mit dem Endoskop

| Aufnahmeserie | c       | Stabw. c | $x_H$   | Stabw. $x_H$ | $y_H$   | Stabw. $y_H$ |
|---------------|---------|----------|---------|--------------|---------|--------------|
| Calib_Endo 1  | 2,98 mm | 0,028 mm | 3,22 mm | 0,017 mm     | 2,28 mm | 0,017 mm     |
| Calib_Endo 2  | 2,61 mm | 0,059 mm | 2,02 mm | 0,025 mm     | 2,03 mm | 0,020 mm     |
| Calib_Endo 3  | 2,91 mm | 0,041 mm | 3,28 mm | 0,016 mm     | 2,19 mm | 0,017 mm     |
| Calib_Endo 4  | 2,83 mm | 0,057 mm | 3,18 mm | 0,024 mm     | 2,79 mm | 0,023 mm     |
| Calib_Endo 5  | 2,87 mm | 0,056 mm | 2,96 mm | 0,023 mm     | 1,93 mm | 0,024 mm     |
| Calib_Endo 6  | 2,69 mm | 0,078 mm | 2,95 mm | 0,027 mm     | 2,89 mm | 0,029 mm     |
| Calib_Endo 7  | 2,75 mm | 0,056 mm | 2,96 mm | 0,021 mm     | 1,89 mm | 0,019 mm     |
| Calib_Endo 8  | 2,83 mm | 0,060 mm | 2,71 mm | 0,021 mm     | 2,14 mm | 0,026 mm     |
| <b>Mittel</b> | 2,81 mm | 0,05 mm  | 2,91 mm | 0,02 mm      | 2,27 mm | 0,02 mm      |

Die für das gesamte System bestimmte Kamerakonstante beträgt durchschnittlich 2,81 mm. Daraus ergibt sich mit einem Aufnahmeabstand zum Objekt  $b = 300$  mm eine Bildmaßstabszahl von  $m_b \approx 107$ . Zusammen mit der Sensorelementgröße von  $10\mu\text{m}$  berechnet sich daraus eine Bildelementgröße am Objekt von 1mm. Mit der in FalCon ermittelten Bildmessgenauigkeit von 0,5 Pixel, ergibt sich eine Messgenauigkeit am Objekt von 0,5 mm. Die Anforderungen für die Messgenauigkeit im Realversuch, wonach Bewegungen von etwa 3 mm messbar sein sollen, wären damit erfüllt.

Für die Bildserie Calib\_Endo 2 aus Tabelle 2 ergeben sich für alle drei Elemente der inneren Orientierung deutlich kleinere Werte als in den anderen Serien. Da sich die Standardabweichungen für  $x_H$  und  $y_H$  über alle Serien hinweg im Wesentlichen in einer ähnlichen Größenordnung bewegen, sind diese Unterschiede wahrscheinlich auf einen anderen Bildmasstab, ggf. verursacht durch eine schlechte Befestigung des Klemmverschlusses am Endoskopokular, zurückzuführen. Die y-Koordinaten des Bildhauptpunktes haben insgesamt eine größere Streuung als die x-Koordinaten, beide Schwankungen sind recht groß. Diese große Streuung ist bereits bei der Kalibrierung des Objektivadapters aufgetreten (s. Tabelle 1). Die Instabilität des Objektivadapters setzt sich offensichtlich auch im Gesamtsystem durch, noch verstärkt durch die lockere Verbindung zwischen Adapter und Okular.

Ein Problem ergibt sich aus dieser Instabilität für den Einbau des Aufnahmesystems ins Fahrzeug. Durch die geringe Stabilität des Aufbaus kann sich beim Bewegen die ggf. vorher kalibrierte innere Orientierung des Aufnahmeaufbaus bewegen. Dieser Effekt dürfte sich beim Einsatz des Endoskopes im Crashversuch noch verstärken, da hier hohe Kräfte wirken.

## 4 Ausblick

Die Ergebnisse zur Bestimmung der inneren Orientierung des Endoskops sind nicht zufrieden stellend, da für die einzelnen Aufnahmeserien deutlich unterschiedliche Werte berechnet wurden. Dies ist wahrscheinlich auf die relativ instabile Befestigung zwischen Endoskop-Okular und Objektivadapter zurückzuführen. Die erzielten Ergebnisse müssen als Ausschlusskriterium für den Einsatz des Endoskops in der beschriebenen Form für die geplanten Messzwecke interpretiert werden, denn während der Montage im Fahrzeug kann kaum gewährleistet werden, dass die Einstellungen der beiden optischen Elemente unverändert bleiben bzw. sich das Okular nicht im Klemmverschluss dreht.

In Zukunft wird ein bauähnliches Endoskop verwendet, das als Sonderanfertigung keinen Objektivadapter benötigt, so dass die Kamera unmittelbar und fest an den Glasfaser-schlauch anschließbar ist.

## Literatur

- Norm ISO 8721: 2010: Road vehicles – *Measurement techniques in impact tests – Optical Instrumentation*. Second Edition, 01.09.2010.
- Janßen C. (2000): *Ein miniaturisiertes Endoskop-Stereomesssystem zur Strömungsvisualisierung in Kiesbetten*. Diplomarbeit. Fakultät für Physik und Astronomie, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, unveröffentlicht.
- Klar M. (2005): *Design of an endoscopic 3D-Particle-Tracking Velocimetry system and its application in flow measurements within a gravel layer*. Dissertation. Combined Faculties for the Natural Sciences and for Mathematics of the Ruperto-Carola University of Heidelberg
- Reling J. (1988): *Technical Endoscopy – Systems-Components-Applications*. verlag moderne industrie AG & Co., Landsberg/Lech
- Winter C., Rupp S., Wittenberg T. (2006): *Bewegungsanalyse für fiberskopische Superposition*. Conference Paper. 51. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Medizinische Informatik, Biometrie und Epidemiologie