

# Untersuchung und Modellierung des Rolling-Shutter-Effekts für photogrammetrische Einzel- und Mehrbildauswertungen

ROBIN ROFALLSKI<sup>1</sup> & THOMAS LUHMANN<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: CMOS-Sensoren nutzen ein elektronisches Verschlussverfahren, welches das Bild sequentiell aufnimmt und ausliest. Dieses als „Rolling Shutter“ bezeichnete Prinzip führt in kinematischen Anwendungen zu charakteristischen Bildverzerrungen, die sich qualitätsmindernd auf photogrammetrische Messbilder auswirken.*

*Der vorliegende Beitrag behandelt das Thema des Rolling-Shutter-Effekts und führt eine Erweiterung der Kollinearitätsgleichungen mit zwei äußeren Orientierungen und geschwindigkeitskonstanter Interpolation ein. Das Modell kommt in Anwendungen der Einzel- und Mehrbildphotogrammetrie zum Einsatz, wird anhand eines Versuches im Nahbereich untersucht und die Ergebnisse mit Hilfe eines unabhängigen Messsystems verifiziert. Die Ergebnisse zeigen Genauigkeitssteigerungen von > Faktor 5 gegenüber klassischen Berechnungsverfahren.*

## 1 Einleitung

CMOS-Sensoren sind in digitalen Spiegelreflexkameras mittlerweile als Standard etabliert und drängen zunehmend CCD-Sensoren aus dem Markt. Neben vielen Vorteilen hinsichtlich der Bildqualität, Komprimierbarkeit und Geschwindigkeit besitzt die CMOS-Technologie einen bauartbedingten Nachteil bei der elektronischen Verschlusssteuerung. Bei diesem als *Rolling Shutter* bezeichneten Verfahren werden die Sensorzeilen sequentiell belichtet und anschließend ausgelesen. Für kinematische Anwendungen, wie etwa der UAV-Photogrammetrie, resultieren dadurch Bildverzerrungen, welche als *Rolling-Shutter-Effekt* bezeichnet werden. Abhängig von Geschwindigkeit, Bildmaßstab und Auslesedauer des Sensors entstehen nichtlineare Bildverzerrungen, die von photogrammetrischen Berechnungsverfahren bislang nicht berücksichtigt werden.

In der Disziplin des Computer Vision ist die Thematik seit etwa zehn Jahren Forschungsgegenstand und es existieren Modelle, welche auf der projektiven Geometrie basieren und vorrangig für die Generierung einer möglichst dichten Punktwolke vorgesehen sind (siehe bspw. MEINGAST et al. 2005 oder AIT-AIDER et al. 2006). Obgleich einige Beiträge zum Thema veröffentlicht sind, ist eine Lücke im Bereich der Photogrammetrie mit signalisierten Punkten vorhanden. Diese soll mit Fokus auf Vergleichbarkeit und Genauigkeit durch die Validierung mit einem unabhängigen Messsystem geschlossen werden.

Der vorliegende Beitrag behandelt die Ergebnisse einer Masterarbeit, die zum Abschluss des Studiengangs *Geodäsie und Geoinformatik* an der Jade Hochschule Oldenburg vorgelegt wurde. Ziel war eine funktionale Modellierung der vorliegenden Problematik, Umsetzung in photogrammetrischen Berechnungsverfahren und deren Verifikation anhand eines geeigneten Versuchsaufbaus.

---

<sup>1</sup> Jade Hochschule Oldenburg, Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik, Ofener Straße 16/19, D-26121 Oldenburg, E-Mail: [robin.rofallski,thomas.luhmann]@jade-hs.de

## 2 Funktionale Modellierung

Klassisch sehen die Kollinearitätsgleichungen (Gl. 1) für jedes Bild genau eine äußere Orientierung mit sechs Parametern für Translation und Rotation vor (LUHMANN 2010). Dieses Modell wird als *Global-Shutter-Modell* (GS) bezeichnet, da es die Annahme trifft, dass die Bildaufnahme global – also zu genau einem Zeitpunkt – stattfindet.

$$\begin{aligned} x' &= x'_0 + z' \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x' \\ y' &= y'_0 + z' \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y' \end{aligned} \quad (1)$$

Aufgrund der zeilenweisen Belichtung gilt diese Annahme im Rolling-Shutter-Modell (RS) nicht mehr, weshalb eine Erweiterung des zentralperspektivischen Lochkameramodells vorgenommen wird. Für eine hypothesenfreie Beschreibung des Modells müsste für jede Sensorzeile eine äußere Orientierung geschätzt werden. Da dies in praktischen Anwendungen zu einem hochgradig unterbestimmten Gleichungssystem führt, wird das Modell auf zwei äußere Orientierungen an den Rändern beschränkt und dazwischen unter Annahme einer konstanten Geschwindigkeit interpoliert. Für die Abbildung des Rolling-Shutter-Effekts in den Kollinearitätsgleichungen werden der Verschiebungsvektor  $\vec{V} = [V_x \ V_y \ V_z]^T$  für die Translation und zwei unabhängige Einheitsquaternionen  $q_1, q_2$  für die Parametrisierung der Rotation eingeführt. Gesteuert wird die Interpolation in Abhängigkeit von der  $y'$ -Komponente der Bildkoordinate, indem der normierte Interpolationsfaktor  $\tau$  unter Berücksichtigung der vertikalen Sensorgröße gebildet wird zu:

$$\tau = \frac{y'_{max} - y'_i}{y'_{max} - y'_{min}} \quad (2)$$

Die Interpolation geschieht für die Translation linear mit einer Steigungsfunktion und für die Rotation mit Hilfe von *Spherical Linear Interpolation* (SLERP), einem Verfahren zur Interpolation von Quaternionen unter konstanter Winkelgeschwindigkeit (SHOEMAKE 1985). Aus den interpolierten Quaternionen ergibt sich anschließend die interpolierte orthonormale Rotationsmatrix  $\mathbf{R}_{int}$ . Zusammengefasst und formalisiert in einer Erweiterung der Kollinearitätsgleichungen resultiert für die Anpassung an das RS-Modell folgender im Rahmen dieser Arbeit entwickelter funktionaler Zusammenhang:

$$\begin{aligned} x' &= x'_0 + z' \frac{r_{int}(\tau)_{11}(X - (X_0 + \tau V_x)) + r_{int}(\tau)_{21}(Y - (Y_0 + \tau V_y)) + r_{int}(\tau)_{31}(Z - (Z_0 + \tau V_z))}{r_{int}(\tau)_{13}(X - (X_0 + \tau V_x)) + r_{int}(\tau)_{23}(Y - (Y_0 + \tau V_y)) + r_{int}(\tau)_{33}(Z - (Z_0 + \tau V_z))} + \Delta x' \\ y' &= y'_0 + z' \frac{r_{int}(\tau)_{12}(X - (X_0 + \tau V_x)) + r_{int}(\tau)_{22}(Y - (Y_0 + \tau V_y)) + r_{int}(\tau)_{32}(Z - (Z_0 + \tau V_z))}{r_{int}(\tau)_{13}(X - (X_0 + \tau V_x)) + r_{int}(\tau)_{23}(Y - (Y_0 + \tau V_y)) + r_{int}(\tau)_{33}(Z - (Z_0 + \tau V_z))} + \Delta y' \end{aligned} \quad (3)$$

Offensichtlich geht  $\tau$  in jeden Parameter der äußeren Orientierungen ein und steuert damit kontinuierlich die Veränderung ebenjener. Es ergeben sich damit 14 unbekannte Parameter mit zwei Bedingungsgleichungen für die Bestimmung der äußeren Orientierungen. Abb. 1 verdeutlicht das gegebene Modell anhand der beiden äußeren Orientierungen in farbiger Darstellung und zwei exemplarischen interpolierten Orientierungen in grauer Darstellung. Zu beachten ist hierbei in Grün die ausgelesene Zeile, welche mit dem Wert von  $\tau$  bezogen auf die Bildhöhe korrespondiert.

Das funktionale Modell wird in den photogrammetrischen Berechnungsverfahren der Bestimmung eines räumlichen Rückwärtsschnittes und der Bündelausgleichung implementiert, wodurch die äußeren Orientierungen und Objektpunkte unter Annahme einer bewegten Kamera bestimmt werden können. Dazu wird eine eigene Bildkoordinatensimulation zu Test- und Simulationszwecken entwickelt, welche aufgrund der nichtlinearen Bewegungsform mittels Newton-Verfahren aufgelöst wird.

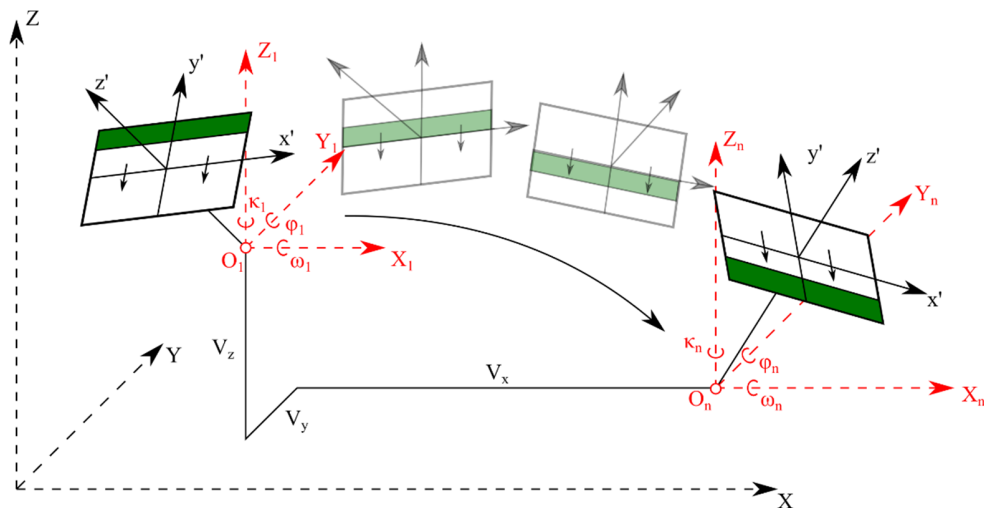


Abb. 1: Darstellung der beiden geschätzten und exemplarischen interpolierten äußeren Orientierungen

### 3 Verifikation des Modells

Zur Verifikation des dargestellten Modells wird ein Versuch mit einem rotierenden Messobjekt durchgeführt, welches von einer Nikon D4 im Videomodus (1920 x 1080 Px) beobachtet wird. Die Kamera besitzt einen CMOS-Sensor mit Rolling Shutter und ist damit zur Überprüfung des Modells geeignet. Die Bilddaten werden zum einen mittels Methoden der Einzelbilddatenauswertung und zum anderen mit einer Bündelausgleichung zur Berechnung von Objektpunkten ausgewertet. Vergleichend dazu werden die Daten ohne Berücksichtigung des Rolling-Shutter-Effekts mit Hilfe der Kollinearitätsgleichungen (GS-Modell) ausgewertet und die Ergebnisse gegenübergestellt.

#### 3.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht im Wesentlichen aus:

- Nikon D4 mit 28 mm-Objektiv (vorab kalibriert)
- AICON MoveInspect HF4 für die Referenzmessung (vorab kalibriert)
- Bewegtes Messobjekt der Dimension 600 x 400 x 120 mm mit retroreflektierenden Targets und vier Hochpunkten (vorab eingemessen)
- Referenzrahmen zur geometrischen Transformation der Messsysteme (vorab eingemessen)

Vorab werden einige Simulationen durchgeführt, um eine bestmögliche Versuchsgeometrie zu gewährleisten. Die Ergebnisse zeigen, dass das Modell erst mit mindestens einem Hochpunkt lösbar wird. Weiterhin wird der Kamerastandort in einem Meter Entfernung von schräg unten auf das

Messobjekt blickend gewählt. Eine Abschätzung über die zu erwartende Bildwanderung durch Rolling-Shutter-Effekt wird auf Grundlage des Verfahrens von MEINGAST et al. (2005) durchgeführt. Hierbei wird die Auslesedauer jeder Bildzeile mit Hilfe einer LED, welche mit fester Frequenz ausgelöst wird, zu  $14 \mu\text{s}/\text{Zeile}$  (entsprechend  $15,5 \text{ ms}/\text{Bild}$ ) bestimmt. Die Belichtungsdauer wird auf  $1/1000 \text{ s}$  reduziert, um den Rolling-Shutter-Effekt nicht durch Bewegungsunschärfe zu überlagern und die Rotationsgeschwindigkeit mit  $30 \text{ RPM}$  (entsprechend  $1,1 \text{ m/s}$  am Rand) angepasst. Mit diesen Versuchsparametern ist eine Bildwanderung durch den Rolling-Shutter-Effekt von ca.  $15 \text{ Px}$  zu erwarten.

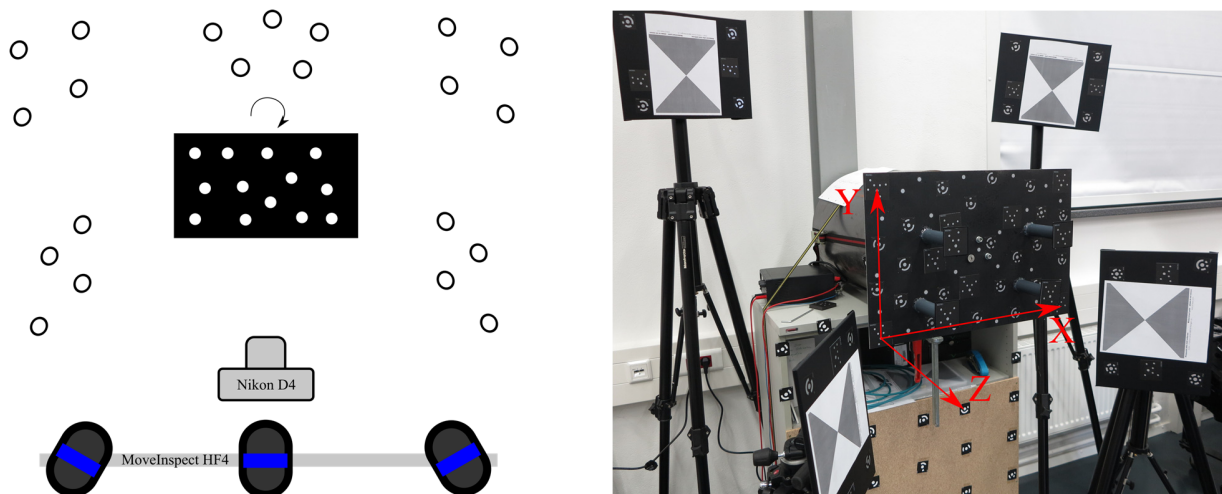


Abb. 2: Schematischer Versuchsaufbau (links) und Realisierung des Aufbaus mit Referenzrahmen und Messobjekt (rechts)

Zur unabhängigen Überprüfung der Ergebnisse aus Kameradaten wird das AICON MoveInspect HF4 als weiteres optisches 3D-Messsystem eingesetzt. Dies beobachtet die Rotation des Messobjekts sowie den statischen Referenzrahmen simultan und liefert Vergleichswerte mit einer Genauigkeit von  $0,1 \text{ mm}$  im gewählten Versuchsvolumen (AICON 3D SYSTEMS GMBH 2016).

Abb. 2 zeigt den Versuchsaufbau, der von beiden Systemen über einen Zeitraum von 40 Sekunden beobachtet wird. Die Kamera nimmt im Videomodus mit einer Bildwiederholrate von  $24 \text{ Hz}$  auf (entspricht ca.  $960$  Bildern im Versuchszeitraum), während das MoveInspect mit  $100 \text{ Hz}$  etwa  $4000$  Messepochen aufzeichnet. Währenddessen vollführt das Messobjekt etwa  $20$  Umdrehungen, dessen Bewegung den Rolling-Shutter-Effekt auf dem Bildsensor bewirkt.

### 3.2 Einzelbildauswertung

Zur Realisierung eines gemeinsamen Punktes aus Kamera- und MoveInspect-Daten werden Rückwärtsschnitte aus dem Referenzrahmen und dem Messobjekt berechnet. Letzterer wird jeweils mit dem Global- und dem hier entwickelten Rolling-Shutter-Modell gebildet. Mittels 6DoF-Berechnung wird der Ursprung des Messobjekts (Lokatorpunkt) anschließend in das Referenzsystem transformiert. Die Parameter einer Transformation der vorab bestimmten Objektkoordinaten auf die MoveInspect-Daten liefern die Ursprungscoordinate auch aus diesem Messsystem.

Da die Kamera im Videomodus kein Triggersignal aussendet, kann das MoveInspect nicht ohne zusätzliche Komponenten synchronisiert werden. Daher wird mit dem Ansatz von LÖSLER & NITSCHKE (2010) aus den Lokatorpunkten des MoveInspects eine räumliche Ellipse im Gauß-Helmert-Modell geschätzt und diese als Referenz zugrunde gelegt. Der Abstand des Lokatorpunkts von der Ellipse ist die Zielgröße. Die benötigten Näherungswerte resultieren aus dem Global-Shutter-Modell, sodass für die Einzelbildauswertung im gegebenen Versuch keine Näherung für die Bewegungsparameter nötig ist.

Tab. 1: Ergebnisse der Einzelbildauswertung

	RMS (XYZ)	Max. Abweichung	Nicht konvergierte Bilder
Global Shutter	1,302 mm	6,072 mm	0,0 %
Rolling Shutter	0,246 mm	0,920 mm	2,7 %

Tabelle 1 unterstreicht dies mit zugehörigen statistischen Kennziffern. Die Ergebnisse sind um Faktor 5 genauer, als die Lösung im GS-Modell (s. auch Abb. 3). Einschränkend ist darauf hinzuweisen, dass etwa 3 % der Bilder zu keiner Lösung konvergieren. Dies resultiert vermutlich aus geometriebedingten Problemen, da das Messobjekt zum Zeitpunkt der jeweiligen Bildaufnahme nahezu horizontal ausgerichtet ist, was im gegebenen Modell scheinbar zu den Problemen führt.

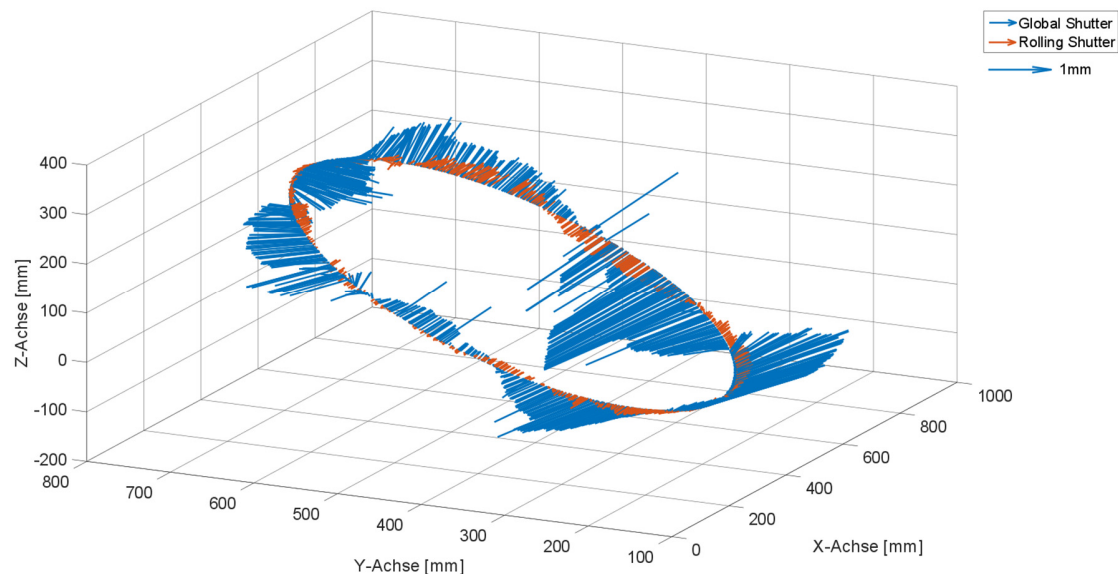


Abb. 3: Abweichungen des Lokatorpunkts von der Ellipse im Global- und Rolling-Shutter-Modell

### 3.3 Mehrbildauswertung

Die konvergent zum Messobjekt ausgerichtete Kameraposition sorgt für einen Rundumverband um das Messobjekt, der mit einer Bündelausgleichung ausgewertet werden kann. Die entstehenden 3D-Koordinaten des Messobjekts können anschließend mit den aus der Einmessung bekannten Punkten verglichen und die Restklaffen einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation untersucht werden.

Tab. 2: Ergebnisse der Mehrbildauswertung

	RMS (XYZ)	Max. Abweichung
Global Shutter	0,864 mm	1,910 mm
Rolling Shutter	0,101 mm	0,183 mm

Die dargestellten Restklaffen in Abb. 4 zeigen deutlich größere Abweichungen im Global-Shutter-Modell und implizieren ebenfalls einen systematischen rotatorischen Effekt in den Hochpunkten, der sich gegenläufig zur Rotationsbewegung äußert. Die Ergebnisse des RS-Modells zeigen hingegen homogen verteilte Restklaffen, die sich vorrangig in Aufnahme­richtung (Z) widerspiegeln, betragsmäßig aber deutlich kleiner sind (siehe auch Tabelle 2). Damit sorgt auch in der Mehrbildauswertung das RS-Modell für genauere Ergebnisse von mehr als Faktor 8 gegenüber dem GS-Modell.

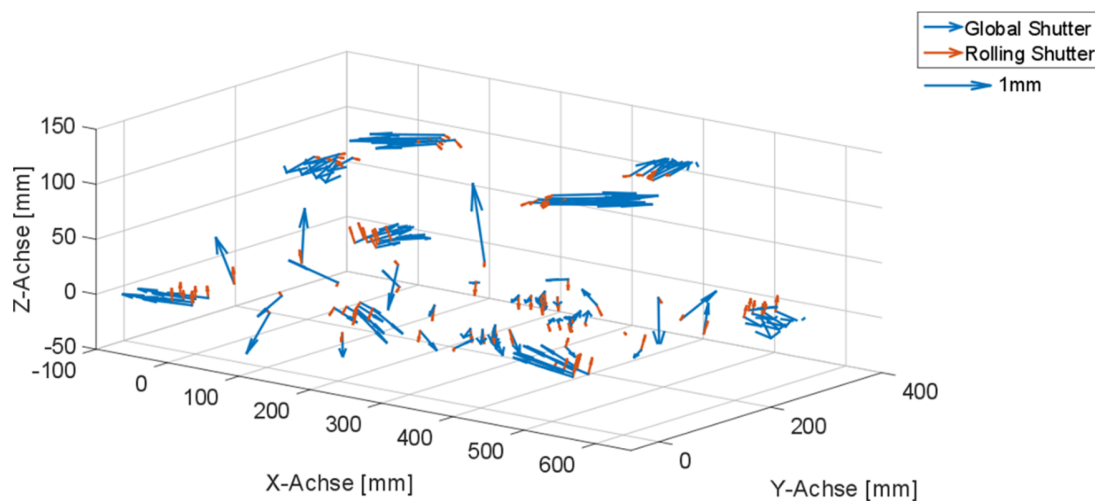


Abb. 4: Restklaffen der räumlichen Ähnlichkeitstransformation

## 4 Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen deutliche Genauigkeitssteigerungen in beiden Auswertemethoden von mehr als Faktor 5. Das RS-Modell ist damit deutlich zutreffender, als das Global-Shutter-Modell und vermag im beschriebenen Versuch Genauigkeiten zu produzieren, die nahe der zu erwartenden Messgenauigkeit liegen. Die Restabweichungen können u. a. durch die Nichtberücksichtigung des Rolling-Shutter-Effekts bei der Markenmessung und der unvollkommenen Trajektorienbeschreibung durch eine Ellipse entstanden sein, was ggf. zu untersuchen ist.

Mit dem entwickelten Modell wird es möglich, die Daten, welche zuvor nur unter hohen Qualitätseinbußen genutzt werden konnten, mit ihren Verzerrungen zu berücksichtigen und Bildverbände mit hoher Genauigkeit auszuwerten. Insbesondere im Falle der UAV-Photogrammetrie kommen gewichts- und kostenbedingt häufig Kameras mit Rolling Shutter zum Einsatz, für die mit diesem Modell ein signifikanter Qualitätsgewinn geschaffen werden könnte. Auch ist hiermit die Nutzung von günstigen CMOS-Kameras mit Bildwiederholraten von mehr als 200 Hz, wie etwa der *GoPro Hero4 Black*, als kostengünstige Alternative zu High-Speed-Kameras künftig denkbar.

## 5 Literaturverzeichnis

- AICON 3D SYSTEMS GMBH, 2016: MoveInspect HF – Technische Daten. <http://aicon3d.de/produkte/moveinspect-technology/moveinspect-hf/technische-daten.html>, letzter Zugriff am 18.10.2016.
- AIT-AIDER, O., ANDREFF, N., LAVEST, J.M. & MARTINET, P., 2006: Exploiting Rolling Shutter-Distortions for Simultaneous Object Pose and Velocity Computation Using a Single View. International Conference on Computer Vision Systems, IEEE (Hrsg.), 35-41.
- LÖSLER, M. & NITSCHKE, M., 2010: Bestimmung der Parameter einer Regressionsellipse in allgemeiner Raumlage. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten **3/2010**, 113-117.
- LUHMANN, T., 2010: Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden, Anwendungen. 3. Auflage, Wichmann VDE, Berlin/Offenbach.
- MEINGAST, M., GEYER, C. & SASTRY, S., 2005: Geometric models of rolling-shutter cameras. Computing Research Repository, arXiv preprint cs/0503076.
- SHOEMAKE, K., 1985: Animating Rotation with Quaternion Curves. SIGGRAPH '85: Proceedings of the 12th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 245-254.