

# Modellierung und Kalibrierung eines virtuellen Vier-Kamerasystems auf Basis eines verstellbaren Spiegel-systems

Torsten PUTZE, Klaus HOYER

## Zusammenfassung

Zur photogrammetrischen Bestimmung von Objektkoordinaten ist eine Mehrbildauswertung in den meisten Fällen zwingend erforderlich. Bei bewegten Objekten erfordert dies den Einsatz mehrerer synchronisierter Kameras. Der Beitrag gibt einen Überblick über die Möglichkeit, ein Mehrkamerasystem durch ein Strahlteilerelement zu ersetzen. Damit kann der Bedarf an mehreren kostenintensiven Kameras, z.B. Hochgeschwindigkeitskameras, reduziert und gleichzeitig die manchmal schwierige Synchronisation gelöst werden. Die im Handel erhältlichen Stereovorsätze erlauben jedoch nur einen beschränkten Einsatz mit einer starren, kleinen Basis und einem zweifachen Strahlteiler. Eine erweiterte Funktionalität bietet ein flexibler Vierfach-Strahlteiler. Dieses System wurde aufgebaut und die zu erreichende Genauigkeit in praktischen Versuchen ermittelt.

## 1 Einleitung

Zur Rekonstruktion von dreidimensionalen Objekten auf der Grundlage von zweidimensionalen Bildern gibt es verschiedenste Möglichkeiten. Voraussetzung für die Bestimmung der Objektkoordinaten ist das Vorhandensein von zuordenbaren Merkmalen, homologe. Diese können signalisierte oder natürliche Punkte sein oder durch eine Projektion erzeugt werden. Im Allgemeinen wird eine Mehrbildauswertung zur 3D Objektkoordinatenberechnung notwendig. Je nach Aufgabenstellung und Rahmenbedingung unterscheiden sich die Anzahl und Ausführung der eingesetzten Kameras. Projektorsysteme können auch mit einer einzelnen Kamera 3D Objektkoordinaten bestimmen, folgen aber in der Auswertung ebenfalls dem Grundprinzip der Mehrkamerasysteme.

Statische Objekte erlauben den Einsatz nur einer einzelnen Kamera, mit welcher die Aufnahmen für den Bildverband nacheinander erzeugt werden. Die Anzahl der Bilder ist bei diesem Verfahren nicht limitiert. Jedoch wird vorausgesetzt, dass sich das Objekt während der gesamten Beobachtungsdauer nicht verändert. Ist dies dennoch der Fall, so ergeben sich Fehler in der Objektkoordinatenberechnung, wie in RAGUSE & HEIPKE (2005) gezeigt wurde. Um dies zu vermeiden, müssen alle Bilder denselben Zustand repräsentieren.

Für dynamische Prozesse sind synchronisierte Aufnahmen durch mehrere Kameras notwendig, um zu gewährleisten, dass alle Abbildungen eines Merkmals denselben Objektpunkt repräsentieren, also keine asynchronitätsbedingten Homologiedestruktionen vorliegen. Kann die Synchronität nicht hergestellt werden, so hängt der Fehlereinfluss auf die Objektkoordinaten von der Bewegungsrichtung und der Geschwindigkeit der Merkmale und dem zeitlichen Versatz der Aufnahmen ab.

Herkömmliche Industriekameras werden meist mit einer Bildrate von 25 oder 30 Hz betrieben werden. Übersteigt die Dynamik die zeitliche Auflösung solcher Kameras, ist der Einsatz von Hochgeschwindigkeitskameras unumgänglich.

Zur 3D Koordinatenberechnung mittels räumlichem Vorwärtsschnitt sind im Prinzip zwei Bilder ausreichend. Dennoch erfordern bestimmte Rahmenbedingungen den Einsatz mehrerer Kameras. Die Mehrbildzuordnung kann im Fall einer Punktwolke mit hoher Punktdichte nicht eindeutig bestimmt werden. Diese Mehrdeutigkeiten der Mehrbildzuordnung sind jedoch, wie in MAAS (1992) gezeigt, mit dem Einsatz zusätzlicher Kameras lösbar.

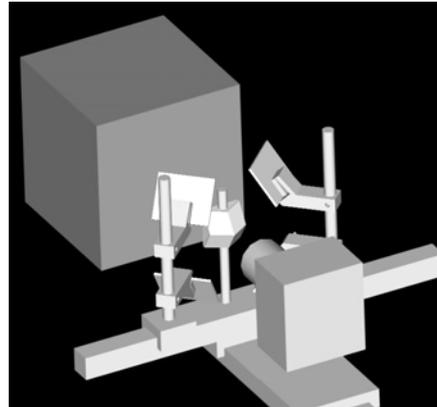
In speziellen Anwendungen (z.B. 3D PTV, MAAS et al. (1993)) müssen die 3D Objektkoordinaten von hochdynamischen, dichten Punktwolken bestimmt werden. Wie beschrieben, ist der Einsatz von drei oder mehr Hochgeschwindigkeitskameras notwendig, um diese Aufgaben zu lösen. Diese Konfiguration weist jedoch zwei grundlegende Probleme auf. Zum einen sind Hochgeschwindigkeitskameras sehr kostenintensiv und damit für nur gelegentliche Anwendungen nicht finanzierbar. Zum anderen ist eine Synchronisation dieser Kameras nicht immer möglich. Dies führt aber vor allem bei hochdynamischen Prozessen zu großen Fehlern (RAGUSE & HEIPKE 2005).

## 2 Spiegelsystem

Das Ziel, multiokulare Aufnahmen mit einer Kamera zu machen, kann durch ein vorge-setztes Spiegelsystem erreicht werden. Es werden mehrere virtuelle Kameras bzw. Kamera-standorte durch Strahlteilung und Umlenkung erzeugt. Auf dem Sensor der Kamera werden verschiedene Blickrichtungen abgebildet. Stereovorsätze für Spiegelreflexkameras (LUHMANN 2005) arbeiten nach dem gleichen Prinzip. Dabei ist die Basis fest und klein, die Aufnahmerichtungen sind parallel zueinander. Für einige Anwendungen sind jedoch spezielle Anordnungen der Blickrichtungen und Umlenkwinkel notwendig (WILLNEFF & MAAS 2000).

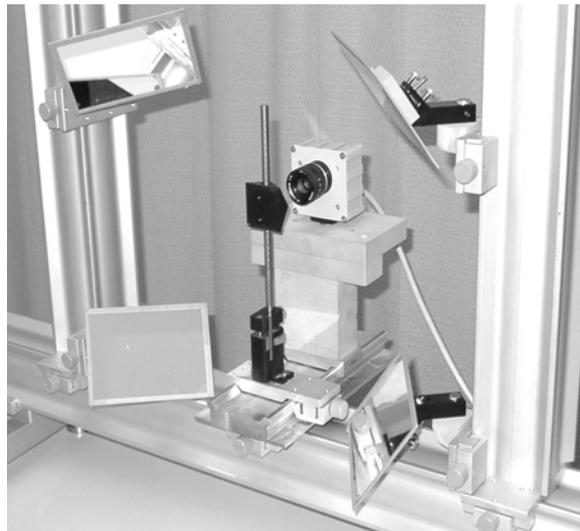
### 2.1 Aufbau

Der entwickelte Spiegelvorsatz besteht aus einem Strahlenteiler, welcher direkt vor dem Objektiv der Kamera sitzt. Dieser kann in Höhe und Abstand auf die Kamera angepasst werden. Die resultierenden Strahlen verlaufen etwa rechtwinklig zur Aufnahmerichtung der montierten Kamera. Im Verlauf der geteilten Strahlen werden die Umlenkspiegel so angebracht, dass die virtuellen Kameras den vorbestimmten Objektraumausschnitt beobachten können.



**Abb. 1:** Schematische Darstellung des Spiegelvorsatzes

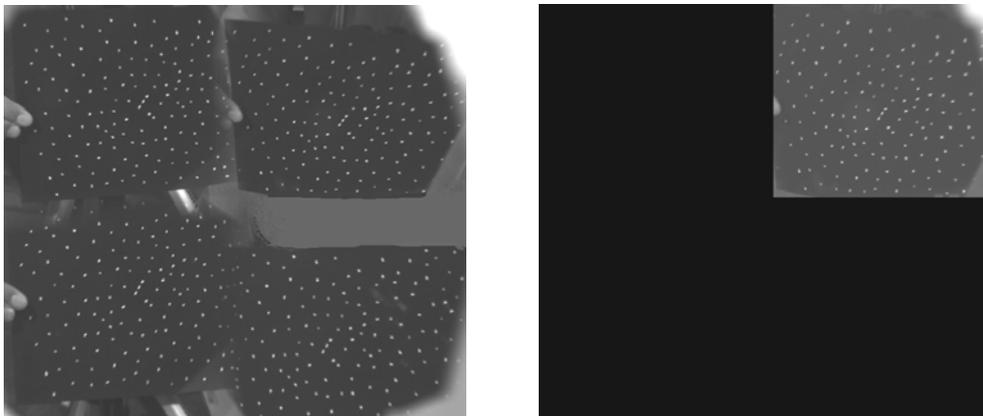
Abb. 1 zeigt die schematische Darstellung des Strahlenteilers und der Umlenkspiegel. Die Umlenkspiegel sind an einer speziellen Halterung befestigt, die es erlaubt, diese in der Höhe und Ausrichtung einzurichten. Außerdem können die Umlenkspiegel durch Justierschrauben auf den zu beobachtenden Objektraum ausgerichtet werden. Die praktische Umsetzung der eben beschriebenen Bestandteile ist in Abb. 2 zu sehen. Zur flexiblen Nutzung (Abschnitt 2.3) der Konstruktion ist eine Vielzahl an Verstellmöglichkeiten notwendig. Es kann die Entfernung und Höhe der Kamera und des Strahlenteilers variiert werden, um eine Vielzahl von Kameras und Objektiven nutzen zu können. Die Baugruppe „Kamera und Strahlteiler“ kann senkrecht zur Ebene der Umlenkspiegel verschoben werden. Die Umlenkspiegel wiederum sind in der Ebene frei positionierbar.



**Abb. 2:** Anordnung der Spiegel vor der Fastcam Ultima 1024

## 2.2 Bildverarbeitung

Die Rohbilder sind die Bilder der Kamera hinter dem Strahlenteiler. Dieses Bild enthält die Bildinformationen aller vier virtuellen Kameras in den jeweiligen Sektoren (Abb. 3 links).



**Abb. 3:** Originalbild (links) und Bild der virtuellen Kamera (rechts)

Zur weiteren Auswertung müssen diese voneinander getrennt werden. Es gibt die Möglichkeit, die Bildgrößen der virtuellen Kamera zu vierteln und diese mit den jeweiligen Bildinformationen zu füllen. Der Bildhauptpunkt der virtuellen Kamera befindet sich bei dieser Art der Bildtrennung in einer (der entsprechenden) Bildecke. Eine weitere Möglichkeit ist,

die Originalbildgröße beizubehalten und  $\frac{3}{4}$  des Bildes zu löschen (Abb. 3 rechts). Der Bildhauptpunkt bleibt in der Mitte des Bildes. Für die Bestimmung der Verzeichnungs- und Orientierungsparameter hat die Wahl der Bildgröße der virtuellen Kameras keinen Einfluss.

### 2.3 Flexibilität

Die in Abschnitt 2.1 erläuterten Einstellmöglichkeiten können genutzt werden, um verschiedene Konfigurationen zu realisieren. Durch die Wahl der Verschwenkungswinkel der Umlenkspiegel wird der Schnittwinkel der Strahlen der virtuellen Kameras bestimmt. Letztendlich wird damit das Basis-Tiefen-Verhältnis des Mehrkameranensystems festgelegt. Limitiert wird diese Einstellung durch die begrenzte Positionierungsmöglichkeit der Umlenkspiegel. Bei dem in Abbildung 2 gezeigten Aufbau sind Basis-Tiefen-Verhältnisse größer 1:2 nicht realisierbar.

Die Variation der Position der Umlenkspiegel bestimmt die Basislänge zwischen den virtuellen Kameras. Hierbei können bei dem gezeigten Aufbau drei verschiedene Basislängen eingestellt werden. Eine Basislänge wird durch den horizontalen Abstand der Spiegelständer bestimmt. Durch die vertikale Anordnung der Umlenkspiegel an den Spiegelständern können zwei weitere Basislängen konfiguriert werden. Die maximale Entfernung eines Umlenkspiegels von dem Strahlteiler ist abhängig von der Spiegelgröße des äußeren Spiegels. Je weiter die Entfernung ist, desto größer muss dieser sein. Die notwendige Größe wird weiterhin beeinflusst von dem Öffnungswinkel des Objektivs.

Für die Nutzung eines Spiegelsystems für größere Basislängen muss beachtet werden, dass die gesamte Konstruktion steif genug ist. Bewegungen und Deformationen der Spiegel haben großen Einfluss auf die Orientierungswerte der virtuellen Kameras. Kann die Stabilität nicht gewährleistet werden, so müssen andere Maßnahmen getroffen werden, um die Veränderungen zu korrigieren.

### 2.4 Einflussgrößen

Die Genauigkeit der berechneten Objektkoordinaten wird durch eine Vielzahl von äußeren Parametern beeinflusst. Die Qualität und Genauigkeit der inneren Orientierung und der Verzeichnung der virtuellen Kameras wird zum einen durch die verwendete reale Kamera als auch von der Qualität der verwendeten Spiegel bestimmt. Wie in Abschnitt 4 noch gezeigt wird, sind gute Ergebnisse nur mit hochwertigen Oberflächenspiegeln zu erreichen.

Zur Bestimmung der äußeren Orientierung wird ein Passpunktfeld mit genügend Tiefeninformationen benötigt. Dies ist vor allem wegen der ungünstigen Geometrie der virtuellen Kameras zu beachten. Der Sensor der virtuellen Kamera ist maximal zu  $\frac{1}{4}$  mit Bildinformation gefüllt. Das ist für die Auswertung mit einer Verdoppelung der Brennweite zu vergleichen. Ebenso, wie die Notwendigkeit der Tiefeninformationen bei größerer Brennweite steigt, muss dies auch bei der Verkleinerung der Sensorfläche gewährleistet werden.

Der Einsatz des Spiegelsystems zu Herstellung von multiokularen Sichten ist eine Ersatzlösung für sonst nicht zu realisierende Probleme. Die Vorteile der geringen Kosten und der unnötigen Synchronisation stehen der Praktikabilität des Gesamtsystems und der Einschränkung, vor allem bezogen auf das Sensorformat gegenüber.

### 3 Auswertestrategien für virtuelle Kamera

Für die Kalibrierungs- und Orientierungsberechnungen der virtuellen Kameras sind mehrere Ansätze denkbar. Zum einen kann man verschiedene Modelle ansetzen, um die Abbildungsgeometrie vom Kamera und Spiegel bestmöglich zu erfassen. Zum anderen gibt es verschiedene Möglichkeiten, Parameter für die virtuellen Kameras als gleich, korreliert oder unabhängig zu setzen. Es liegt auf der Hand, dass die Einflüsse der Spiegel für jede virtuelle Kamera unabhängig, die Lage des Bildhauptpunktes aber zumindest stark korreliert sind. Aus diesen Überlegungen ergeben sich folgende Varianten für die Parameterzuordnung:

- Für jede virtuelle Kamera wird ein vollständiger und eigenständiger Satz an Orientierungs- und Verzeichnungsparametern erstellt
- Für alle virtuellen Kameras wird die innere Orientierung als gleich gesetzt, aber die Verzeichnungsparameter separat bestimmt
- Sowohl innere Orientierung als auch Verzeichnung wird für jede virtuelle Kamera von der realen Kamera übernommen

Ein wichtiger Punkt zur Genauigkeitssteigerung ist die Nutzung des optimalen mathematischen Ansatzes für die Abbildung. Die Standardverzeichnungsparameter modellieren nur wenige Fehler der Spiegel. Zusätzlich eingeführte Parameter, die Eigenschaften des Spiegels berücksichtigen, sind aber unter Umständen mit den Parametern der Kamera stark korreliert. Bei der Verwendung von hochpräzisen Oberflächenspiegeln in Laserqualität, deren Planität von den Herstellern mit  $\lambda/10$  angegeben wird, ist die Notwendigkeit von Parametern zur Korrektur von systematischen Fehlern nicht gegeben. Zum einen werden Systematiken wie konvexe oder konkave Krümmungen durch Parameter der Kameraverzeichnung teilweise mit aufgefangen, zum anderen gibt es von der Herstellerseite keine Hinweise auf systematische Fehler. Die Richtigkeit der Aussagen der Hersteller ist jedoch zu überprüfen. Ein weiterer Ansatz zur Korrektur des Kamera-Spiegelsystems kann durch die Nutzung der finiten Elemente erfolgen (LUHMANN 2005).

Für die im nächsten Abschnitt durchgeführten Untersuchungen wurden zwei verschiedene Kameras in verschiedenen Konfigurationen getestet. Zum einen handelt es sich um eine Industriekamera *Sony X700*, zum anderen um eine Hochgeschwindigkeitskamera *Fastcam Ultima 1024* mit folgenden Eigenschaften:

**Tabelle 1:** Eigenschaften der verwendeten Kameras

	Sensorgroße	Chipgröße
Sony X 700	1024 x 768	$1/3$ "
Fastcam Ultima 1024	1024 x 1024	$2/3$ "

Jeder der Kameras wurde in denselben Konfigurationen untersucht, zum einen die Genauigkeit der Kamera für sich und zum anderen im Einsatz im Spiegelsystem mit Rück- und Vorderflächenspiegeln. Die Orientierungs- und Kalibrierungswerte wurden mit Hilfe einer

Bündelausgleichung der Software *Aicon 3D Studio* bestimmt. Es wurden die Verzeichnungsparameter nach dem Brown'schen Ansatz mitgeschätzt.

## 4 Ergebnisse

Die Konfigurationen wurden für alle Untersuchungen ähnlich aufgebaut, die mittlere Entfernung zwischen Objekt und Kamera beträgt circa 1,0 Meter. Die Hochgeschwindigkeitskamera wurde mit 60 Hz betrieben.

### 4.1 Kameravergleich

Tabelle 2 zeigt den Vergleich der beiden genutzten Kameras ohne Verwendung des Spiegelsystems. Die Aufnahmeentfernung beträgt 0,8 – 1,0 Meter. Der Vergleich zeigt, dass beide Kameras etwa das gleiche Genauigkeitspotential besitzen.

**Tabelle 2:** Vergleich der Einzelkameras ohne Spiegelsystem

	Sony X 700		Fastcam Ultima 1024	
	$\mu\text{m}$	Pixel	$\mu\text{m}$	Pixel
$\sigma_{\text{BPM}}^*$	0,11	1/55	0,26	1/50
$\sigma_0^+$	0,12	1/55	0,27	1/45
$\sigma_{\text{XY}}^\#$	6		5	
$\sigma_Z^\#$	12		15	

\*: Standardabweichung der Bildpunktmessung  
 +: Standardabweichung der Gewichtseinheit  
 #: Standardabweichung der Objektkoordinaten

### 4.2 Test des Spiegelsystems

Um das Potential des Spiegelsystems zur Objektkoordinatenmessung zu bestimmen, wurden verschiedene Tests mit denselben Konfigurationen durchgeführt. Verwendet wurden einfache Rückflächenspiegel und hochwertige Oberflächenspiegel. Tabelle 3 und Tabelle 4 zeigen die gemittelten Ergebnisse aus einer Serie von Einzelkonfigurationen. Aus der Übersicht der Messungen der beiden Kameras lassen sich nun folgende Schlussfolgerungen ziehen:

Die Genauigkeit der Bildpunktmessung wird erwartungsgemäß nicht durch die Verwendung von Spiegeln im Strahlengang beeinflusst. Der Wert der Standardabweichung der Gewichtseinheit,  $\sigma_0$ , als Maß der Genauigkeit der gesamten Messung wird um den Faktor 3 bei der Verwendung von Vorderflächenspiegel, bzw. um den Faktor 4,5 bei Rückflächenspiegeln, größer. Hier wird deutlich, dass die Verwendung von Oberflächenspiegeln die Genauigkeit stark positiv beeinflusst. Ebenso verhält es sich mit den Standardabweichungen der Objektkoordinaten. Auch hier hat die Verwendung von Vorderflächenspiegel einen positiven, wenn auch nicht so starken, Einfluss auf die Genauigkeit. Die Verwendung von

Spiegelsystemen zur Herstellung multiokularer Sichten wirkt mit einem Faktor von etwa 4 auf die Lagekomponente und mit einem Faktor 5 auf die Tiefenkomponente.

**Tabelle 3:** Fastcam Ultima 1024 in verschiedenen Konfigurationen

	einzeln		Rückflächenspiegel		Oberflächenspiegel	
	$\mu\text{m}$	Pixel	$\mu\text{m}$	Pixel	$\mu\text{m}$	Pixel
$\sigma_{\text{BPM}}^*$	0,26	1/50	0,23	1/50	0,20	1/60
$\sigma_0^+$	0,27	1/45	1,20	1/10	0,89	1/13
$\sigma_{\text{XY}}^\#$	5		25		25	
$\sigma_Z^\#$	15		90		80	

\*: Standardabweichung der Bildpunktmessung  
 +: Standardabweichung der Gewichtseinheit  
 #: Standardabweichung der Objektkoordinaten

**Tabelle 4:** Sony X 700 in verschiedenen Konfigurationen

	einzeln		Rückflächenspiegel		Oberflächenspiegel	
	$\mu\text{m}$	Pixel	$\mu\text{m}$	Pixel	$\mu\text{m}$	Pixel
$\sigma_{\text{BPM}}^*$	0,11	1/55	0,12	1/50	0,10	1/65
$\sigma_0^+$	0,12	1/55	0,51	1/13	0,32	1/20
$\sigma_{\text{XY}}^\#$	6		40		17	
$\sigma_Z^\#$	12		60		60	

\*: Standardabweichung der Bildpunktmessung  
 +: Standardabweichung der Gewichtseinheit  
 #: Standardabweichung der Objektkoordinaten

Die Aufnahmeentfernung ist für alle Versuche ähnlich, geringfügige Variationen konnten jedoch nicht vermieden werden. Dies ist ein Grund für die Variation der Verhältnisse aus Standardabweichung der Gewichtseinheit und Standardabweichung der Objektkoordinaten.

Die Verschlechterung der erreichbaren Genauigkeit ist nicht allein auf die Qualität und Modellierung der Spiegel zurückzuführen. Vielmehr spielt die in Abschnitt 2.4 angesprochene Verkleinerung des Sensorformates und eine damit verbundene, scheinbare Vergrößerung der Kamerakonstante eine große Rolle. Die notwendigen Tiefeninformationen zur Orientierung von Kameras sind abhängig von deren Brennweite. Für alle Versuche wurde dieselbe Passpunkttafel genutzt. Durch die scheinbar größere Kamerakonstante bei gleicher Tiefeninformation wird die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Bestimmung der Orientierungselemente negativ beeinflusst.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Notwendigkeit der Nutzung von multiokularen Kamerasystemen zur Bestimmung von 3D-Objektkoordinaten kann durch die Verwendung eines Spiegelsystems vermieden wer-

den. Dies bedeutet, dass multiokulare Sichten mit einer einzelnen Kamera erzeugt werden können. Die Vorteile sind vor allem in der Wirtschaftlichkeit des Systems und der nicht notwendigen Synchronisierung zu finden. Die Nachteile sind die Einschränkung des Sensorformates und die Verkleinerung der Genauigkeit, verursacht durch die Fehlereinflüsse des Spiegels. Die Verkleinerung beeinflusst sowohl die Auflösung der virtuellen Kameras als auch die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Orientierung und Kalibrierung. Eine Viertelung des Sensors wirkt wie eine Verdoppelung der Brennweite. Eine Möglichkeit zur Verminderung dieses Einflusses ist die Nutzung von Passpunktfeldern mit erhöhter Tiefeninformation.

Die Untersuchungen mit verschiedenen Kameras zeigten, dass die Bildpunktmessung nicht durch die Verwendung von Spiegeln im Strahlensatz beeinflusst wird. Die Standardabweichung der Gewichtseinheit  $\sigma_0$  und der Lagekoordinaten verschlechtert sich um den Faktor 3 – 4, die Standardabweichung der Tiefenkoordinate verschlechtert sich um den Faktor 5. Diese Werte gelten für die Verwendung von präzisen Oberflächenspiegeln.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Nutzung von Spiegelsystemen zur Erzeugung von multiokularen Sichten genutzt werden kann. Jedoch wird die Vereinfachung des Aufnahmesystems mit der Verringerung der Genauigkeit und der Verkleinerung des Sensorformates erkauft.

Für die weitere Arbeit mit Spiegelsystemen ist die Verwendung von hochpräzisen Spiegeln und Passpunktfeldern mit genügend Tiefeninformationen unumgänglich. Weiterhin muss für die Orientierung der virtuellen Kameras ein erweiterter Ansatz zur Fixierung der relativen Orientierung verwendet werden.

## 6 Literatur

- Luhmann, T. (2005): *Zum photogrammetrischen Einsatz von Einzelkameras mit optischer Strahlenteilung*. Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, Heft 1, Jahrgang 2005.
- Maas, H.-G. (1992): *Complexity analysis for the determination of image correspondences in dense spatial target fields*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 29, Part B5, S. 102-107.
- Maas, H.-G., Grün, A. & Papantoniou, D. (1993): *Particle tracking in threedimensional turbulent flows*. Part I: Photogrammetric determination of particle coordinates. Experiments in Fluids Vol. 15, S. 133-146.
- Raguse, K. & Heipke, C. (2005): *Photogrammetrische Auswertung asynchroner Bildsequenzen*. Tagungsband Oldenburger 3D-Tage.
- Willneff, J. & Maas, H.-G. (2000): *Design and calibration of a four-headed camera system for use in microgravity research*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33, Part 5B, S. 894-899, Amsterdam.