

Mehrmedienphotogrammetrie an schwer zugänglichen, komplexen Körpern

TORSTEN PUTZE¹

Zusammenfassung: Für verschiedene Anwendungen war und ist es unumgänglich, durch unterschiedlich lichtbrechende Medien hindurch zu beobachten. Im vorliegenden Fall sollen Phänomene im Wasser in einem Plexiglasquader mit zylindrischer Innenbohrung beobachtet werden. Bisher entwickelte Ansätze planparalleler Trennflächen sind nicht mehr umsetzbar. Auf Grund der geringen Größe und der komplexen Struktur ist zunächst ein schrittweiser Ansatz für die Kalibrierung und Orientierung gewählt. Das System der Kameras wird relativ zueinander orientiert und es werden die Parameter der inneren Orientierung und der Verzerrung bestimmt. Ebenso werden die geometrischen Parameter des Mehrmedienkörpers vorab bestimmt. Die Zusammenführung beider Systeme erfolgt über Verknüpfungspunkte. Die Bildpunkte jeder Kamera gehen via Raytracing in Raumstrecken über, die für jeweils ein Medium Gültigkeit besitzen. Die Zuordnung homologer Punkte geschieht nicht mehr auf der Basis von Kernlinien im Bildraum, sondern im Objektraum, basierend auf den Raumstrecken.

1 Einleitung

Der Einsatz bildbasierter Methoden zur Ermittlung von statischen oder dynamischen Geometrien bezieht sich zum Großteil auf Einmedienprobleme, d.h. zwischen dem Objektiv und den zu messenden Marken ist Luft das einzige Medium. Die hierzu notwendigen mathematischen Modelle und Vorgehensweisen sind hinreichend oft beschrieben. Sollen Phänomene in abgeschlossenen Behältnissen oder anderen Medien mit Hilfe optischer Verfahren analysiert und ausgewertet werden, ist das Standardmodell nicht mehr ohne weiteres anzuwenden. Beispiele für solche Anordnungen sind unter anderem:

- Geometrische Analysen von Objekten in Kammern mit hoher Temperatur und Druck
- Wasserströmung hinter planparallelen Trennflächen aus Plexiglas
- Unterwasserphotogrammetrie durch bewegte Gewässeroberflächen
- Wasserströmung innerhalb eines komplexen Objektes

Im vorliegenden Fall sollen Strömungsphänomene in einem Zylinder analysiert werden. Die Ausmaße des Probekörpers sind $11,5 \times 11,5 \times 10 \text{ cm}^3$. Im Inneren ist ein Zylinder mit einem Durchmesser von $7,5 \text{ cm}$ gebohrt. Das Modell ist aus Plexiglas gefertigt und wird für die späteren Versuche mit Wasser befüllt. Für die Vorversuche und die Entwicklung der Algorithmen ist der Zylinder ebenfalls mit Luft gefüllt. Eine Skizze des Modells mit der eingesetzten Kamera-konfiguration ist in Abbildung 1 zu sehen

¹ Torsten Putze: Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden, Deutschland

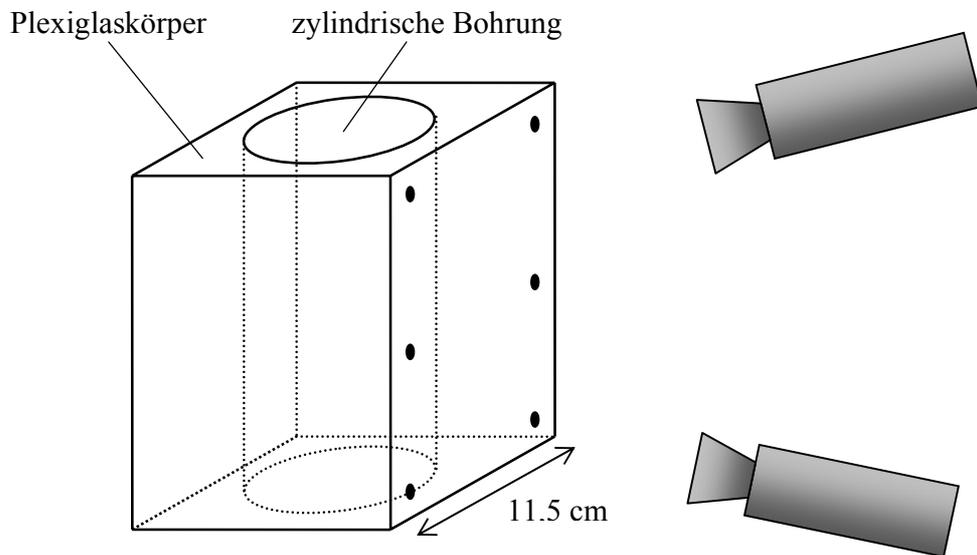


Abbildung 1: Darstellung des Messaufbaus und des Modells

1.1 Bisherige Ansätze

In manchen Versuchsaufbauten kann durch Index Matching (z.B. Budwig, 1994) das mathematische Modell für gewöhnliche Anwendungen in Luft erhalten werden. Hierbei werden alle Medien so gewählt, dass für den gesamten Strahlengang ein einziger Brechungsindex gilt. Vor allem wird die Luft durch eine Flüssigkeit mit erhöhtem Brechungsindex ersetzt. Es ist jedoch nicht möglich, alle Aufnahmesysteme mittels Index Matching anzupassen. Dann muss der Effekt der Brechung (Hentschel, 2001) mit berücksichtigt werden.

Es gab in der Vergangenheit verschiedene Ansätze, die den Mehrmediendurchgang modelliert haben. Auf Grund der Komplexität der Brechung kamen zumeist planparallele Trennflächen zum Einsatz (z.B. Maas et. al, 1993). Solche Trennflächen bewirken einen radialen Versatz der Bildpunkte vom Nadirpunkt aus. Dieser Versatz kann als zusätzlicher Korrekturterm, wie in Maas (1995) angebracht werden. Ein einfacher Korrekturterm für die Verwendung bei parallelwandigen Regelflächen oder zusammengesetzten Flächenelementen ist auf Grund der ortsabhängigen Normalenvektoren nicht ohne weiteres darstellbar.

Im Fall der Unterwasserphotogrammetrie ist die Annahme einer ebenen Trennfläche nur ungenügend geeignet. Daher beschreibt Okamoto (1982) ein Wellenmodell als Grundlage, dessen Parameter jedoch nur sehr schwer exakt modelliert werden können.

1.2 Spezielle Anwendung

In Kotowski (1987) wurde ein allgemeingültiger Ansatz für beliebig parametrisierbare Trennflächen aufgestellt. Mit genügend zusätzlichen Beobachtungen können alle benötigten Parameter innerhalb einer Bündelblockausgleichung bestimmt werden. Für die ersten Schritte mit einer solchen komplexen Versuchsanlage soll die sequentielle Abarbeitung der notwendigen Schritte vorerst genügen. Die Einzelschritte teilen sich wie folgt auf:

- Kalibrierung und relative Orientierung des Kamerasystems
- Bestimmung der geometrischen Parameter der Trennflächen
- Schaffung eines Bezugssystems zur Zusammenführung von Modell und Kamera
- Raytracing
- Objektkoordinatenberechnung

In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Schritte näher erläutert und die erzielten Ergebnisse vorgestellt.

2 Vorvermessung

Der aktuell entwickelte Algorithmus sieht eine sequentielle Bearbeitung zur Ermittlung der Objektkoordinaten vor. Die einzelnen Schritte sind oben bereits aufgeführt. Hierbei ist gewährleistet, dass die einzelnen Komponenten für sich mit optimaler Genauigkeit bestimmt werden können. Ein Nachteil dieser sequentiellen Methode ist eine ungünstigere Fehlerfortpflanzung gegenüber einer Bündelausgleichung.

2.1 Kamerasystem

An das Design der Kamerakonfiguration sind im vorliegenden Fall erhöhte Bedingungen gestellt. Auf der einen Seite muss durch eine konvergente Anordnung ein bestmöglicher Strahlenschnitt gewährleistet werden, während auf der anderen Seite die Sichtbedingungen zu berücksichtigen sind. Besonders problematisch stellt sich bei dem verwendeten Körper die Totalreflexion dar. Eine mögliche Konfiguration zweier Kameras ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Erweiterung um zwei weitere Kameras gestaltet sich in gleicher Art und Weise, jedoch wird die benachbarte, senkrecht stehende Außenfläche, als erstes Interface genutzt. Somit ergibt sich zwischen den beiden Kamerateilsystemen ein Schnittwinkel von annähernd 90° .

Die Kameras sind fest auf einem Träger montiert, der von dem eigentlichen Messobjekt gelöst werden kann. Damit ergibt sich die Möglichkeit, das Kamerasystem unabhängig von dem Modell zu kalibrieren und Parameter der relativen Orientierung zu bestimmen. Dies geschieht mittels einer kommerziellen Software. Da die Bestimmung der Parameter losgelöst von dem Messobjekt erfolgt, werden die Koordinaten aller Objektpunkte in einem lokalen Koordinatensystem bestimmt. Die Modellierung des Lichtweges durch die verschiedenen Medien erfordert die Kenntnis der Trennflächenparameter und der Orientierungsparameter der Kameras im selben Koordinatensystem. Über die in Abbildung 2 zu sehenden Verknüpfungspunkte auf dem Messobjekt wird das lokale Koordinatensystem der Kameras in das des Messobjektes transformiert.

Für die ersten Versuche dienten zwei konvergent angeordnete Sony XC 55 (640 x 480 Pixel, 1/3") mit 6 mm Objektiven als Aufnahmesystem. Die Genauigkeit der Kalibrierung beträgt $\sigma_0 = 0,37 \mu\text{m}$ bzw. 1/20 Pixel.

2.2 Mehrmedienkörper

Um das Raytracing durch den Mehrmedienkörper berechnen zu können, sind die mathematische Beschreibung der Trennflächen, die Verknüpfungspunkte (siehe oben) und die Brechungsindizes aller Medien notwendig. Relevant sind hier die Parameter der zwei begrenzenden Ebenen, die den Zugang für die beiden Kamerteilsysteme darstellen, und der Kreiszyylinder. Zur Formbestimmung der Trennflächen sind verschiedene Oberflächenmesssysteme (taktil und optisch) denkbar. Da aber die Verknüpfungspunkte, welche später mittels Bildpunktmessverfahren für signalisierte Punkte bestimmt werden, ebenso zu bestimmen sind, bietet sich an dieser Stelle die Auswertung von vielen signalisierten Punkten an.

Zusätzlich zu den Markierungen der Verknüpfungspunkte wurden zahlreiche Punktmarken auf dem gesamten Messobjekt angebracht und deren Objektkoordinaten mit Hilfe von Standardsoftware bestimmt. Aus den jeweiligen Punkten wurden die ausgleichenden Flächen berechnet. Hierbei ist die Stärke des Markenmaterials zu berücksichtigen. Die gewonnenen Ergebnisse liegen alle im selben Koordinatensystem vor.

Für die aktuellen Auswertungen wurde der Brechungsindex für Plexiglas ($n = 1,49$) aus Tabellen entnommen.

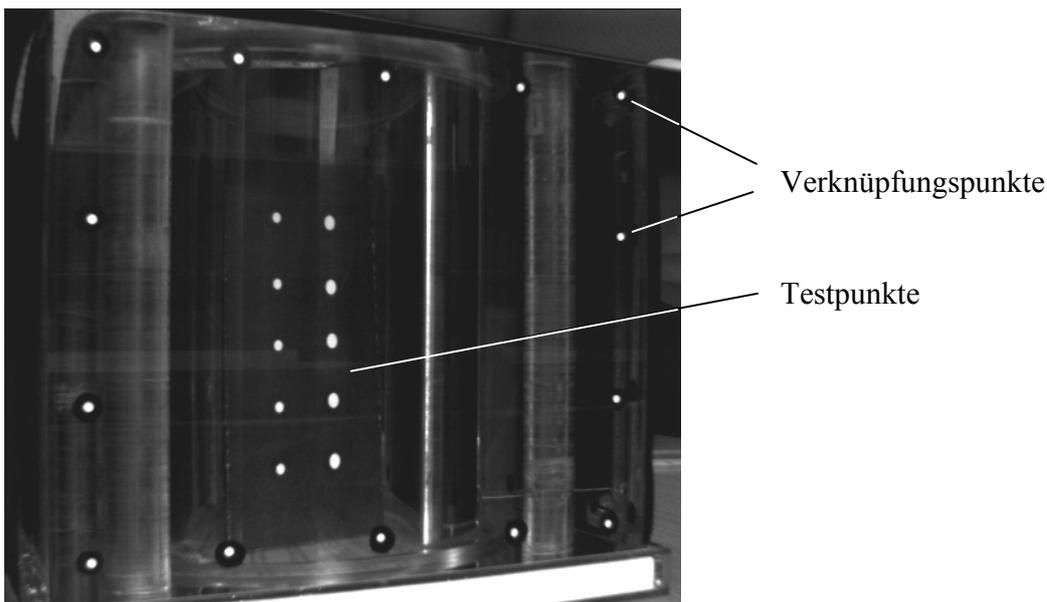


Abbildung 2: Kamerabild auf das Interface mit den Verknüpfungspunkten

Die Formparameter der Flächenelemente konnten mit einer Genauigkeit von $\sigma_{0, \text{Ebene}} = 10 \mu\text{m}$ und $\sigma_{0, \text{Zylinder}} = 80 \mu\text{m}$ unter Zuhilfenahme einer digitalen SLR Kamera bestimmt werden. Die Genauigkeit der einzelnen Lagekomponenten der Verknüpfungspunkte beträgt $\sigma_{X/Y/Z} = 2 \mu\text{m}$.

3 Schrittweise zu den Ergebnissen

Wie in Abschnitt 1.2 dargestellt, setzen sich die Ergebnisse aus mehreren Schritten zusammen. Unter Zuhilfenahme der ermittelten Parameter der Vorvermessung kann der Bildstrahl jedes ein-

zelen Bildpunktes rekonstruiert werden. Die Koordinatensysteme des Kamerasystems und des Modellsystems sind dafür in ein Gemeinsames zu überführen.

Die Koordinaten der Verknüpfungspunkte wurden mit Hilfe des Vorwärtsschnittes mit einer Lage- und Tiefengenauigkeit von $\sigma_{\text{Lage/Tiefe}} = 50 / 90 \mu\text{m}$ bestimmt. Die damit berechnete Parameter der 3D Helmert-Transformation der beiden Systeme zueinander konnten mit einer Genauigkeit von $\sigma_0 = 40 \mu\text{m}$ bestimmt werden.

3.1 Raytracing

Unter Zuhilfenahme der Parameter der inneren und äußeren Orientierung einer Kamera kann aus jedem Bildpunkt der Bildstrahl, eine Abfolge aus Strecken und einem Strahl, bestimmt werden (siehe Abbildung 3). Die Knickpunkte ergeben sich an Medienwechseln. Innerhalb eines Mediums ist der Lichtweg gerade, sofern der Brechungsindex des Materials konstant ist. Die Berechnung der Einzelstrecken zwischen den Medienwechseln erfolgt nacheinander, beginnend im Projektionszentrum. Es wird je nach Anzahl der Medienwechsel folgendes Schema abgearbeitet:

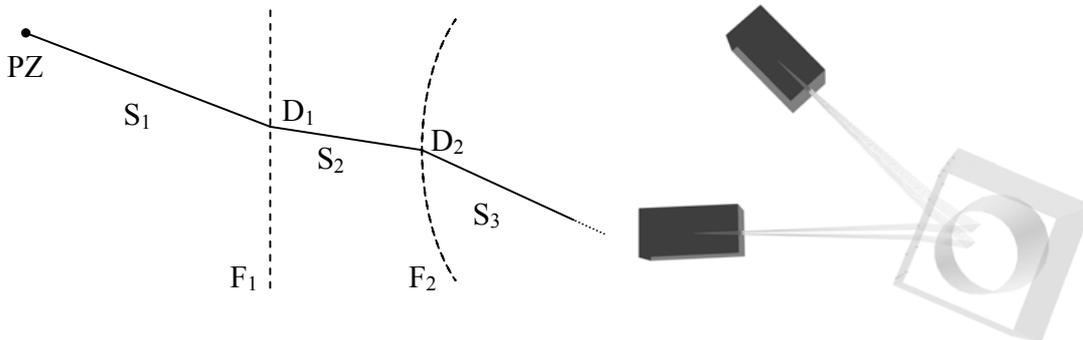
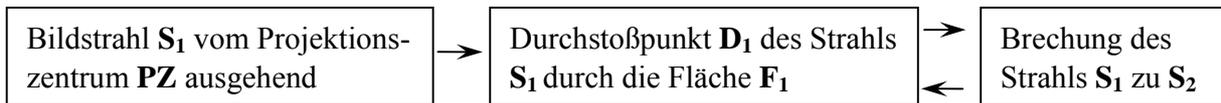


Abbildung 3: Strahlenverlauf durch verschiedene Medien

Ist das Medium oder der Bereich bekannt, in dem sich die zu messenden Objekte befinden, geht für die weitere Berechnung jeder zweidimensionale Bildpunkt (x', y') in eine dreidimensionale Strecke $(P1, P2)$ über.

Viele Parameter haben Einfluss auf die Genauigkeit des Raytracing. Neben den Parametern der Trennflächen und der Brechungsindizes hat auch die Länge des optischen Weges durch optisch dichtere Medien Auswirkungen auf die Fehlerfortpflanzung während des Raytracing.

3.2 Objektkoordinatenberechnung

Ein Bildpunkt ist durch verschiedene Strecken in den jeweiligen Medien charakterisiert. Um aus Bildpunkten ein Objektpunkt zu berechnen, muss die Mehrbildzuordnung im Medium des Objektpunktes gelöst sein. Kernlinien in komplexen Mehrmedienkörpern stellen gekrümmte Linien

dar, die sich durch Polygonzüge mit einer Vielzahl von Stützpunkten (Maas, 1992) approximieren lassen. Da die mathematische Abbildung von Objektpunkten in den Bildraum nicht direkt möglich ist, würde dieser übliche Ansatz der Nutzung von Kernlinien/Polygonzügen im Bild sehr rechenaufwendig werden. Betrachtet man jedoch den Kernlinienansatz im dreidimensionalen Raum, so ist die Projektion vom Objekt- in den Bildraum nicht notwendig. Jeder Bildpunkt (2D) geht in eine Strecke (3D) über. Der Abstand Punkt-Gerade² (2D) geht über zum kürzesten Abstand zweier Geraden³ (3D). Der Kernlinienabstand im Bildraum ist äquivalent zu dem Abstand zweier Strecken (siehe Abbildung 4).

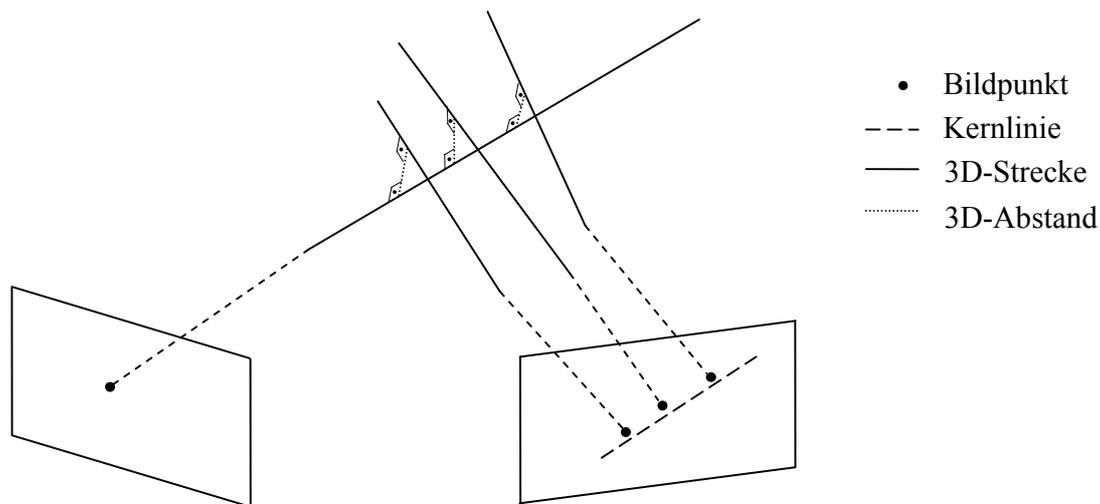


Abbildung 4: Vergleich Kernlinienabstand und Abstand von Raumstrecken

Die Berechnung der Objektkoordinaten basiert nicht wie im Einmediumfall auf den Bildkoordinaten, sondern auf den Raumstrecken. Dabei ergibt sich der Objektpunkt durch Minimierung der Abstände d zu den einzelnen Strecken nach:

$$\sum_{\text{Bilder}} dd \rightarrow \min \tag{1}$$

wobei

$$d = \overline{Pg} = \min \{ \overline{XP} \text{ für alle } X \in g \} \tag{2}$$

Auch im Einmediumfall können Näherungen über die Minimierung der Abstände der Raumstrecken durchgeführt werden. Bei der Verwendung zweier Kameras reduziert sich die Bestimmung auf die Berechnung des Mittelpunktes der Strecke des kürzesten Abstandes. Für den Fall einer symmetrischen Anordnung der Kameras oder der Einführung von entfernungsabhängigen Gewichten, ist mit der Methode mittels kürzesten Abstands das gleiche Ergebnis zu erzielen wie durch die Minimierung der Verbesserungen der Bildpunktkoordinaten.

² entspricht dem Abstand des Bildpunktes von einer Kernlinie

³ entspricht dem Abstand der Bildstrahlen

Die mit der oben beschriebenen Konfiguration ausgewerteten Testpunkte (vgl. Abbildung 2) konnten mit einer mittleren Genauigkeit von $\sigma_{XYZ} = 66 \mu\text{m}$ bestimmt werden. Die berechneten Ergebnisse entsprechen nicht den Erwartungen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wird eine grundlegende Möglichkeit gezeigt, innerhalb komplexer Mehrmedienkörper Objektkoordinaten zu berechnen. Im ersten Schritt wird die Form und Lage der Trennflächen vor der eigentlichen Berechnung der Koordinaten bestimmt. Mit Hilfe des anschließenden Raytracing kann das Problem auf den Schnitt bzw. kürzesten Abstand zweier Geraden im Raum zurückgeführt werden. Die Mehrbildzuordnung der Bildpunkte geschieht zur Verringerung der Rechenzeit im Objektraum.

Erste Versuche zeigten, dass die Methode funktioniert und einsatzbereit ist. Schaut man sich die verschiedenen Ergebnisse an, so ist deutlich ein Defizit zu erkennen. Trotz guter Kalibrierung des Kamerasystems sind die bestimmten Objektkoordinaten der Verknüpfungspunkte (ohne Mehrmediendurchgang) mit $\sigma_{XYZ} = 50 / 90 \mu\text{m}$ schlechter als zu erwarten wäre. Die Berechnung der Testpunkte (mit Mehrmediendurchgang) mit einer Genauigkeit von $\sigma_{XYZ} = 66 \mu\text{m}$ ist somit nicht weiter verwunderlich. Für die Qualität der Ergebnisse sind zwei grundlegende Probleme, die beide Auswirkung auf die Bildpunktmessung haben: Die Aufnahmen wurden mit zwei VGA Kameras durchgeführt. Durch die geringe Auflösung konnten die Verknüpfungspunkte nicht ideal abgebildet werden. Das Messmodell ist für ein höher auflösendes Messsystem entwickelt worden, welches bis zum Zeitpunkt der Einreichung des Papers leider nicht zur Verfügung stand. Ein zweiter Grund für die nicht optimale Bildpunktmessung ist die Verwendung es Schwerpunktoperators. Die Beleuchtungsverhältnisse während der Aufnahme führten zu einem Versatz des Beleuchtungsmaximums jeder Marke. Für die weiteren Auswertungen steht ein Ellipsenoperator zur Verfügung.

Bei den zukünftigen Arbeiten steht die Verbesserung der Genauigkeit im Vordergrund. Wie erwähnt, kann durch ein neues Kamerasystem (4 Kameras) und einen verbesserten Punktmessoperator in erster Linie die Punktmessgenauigkeit um den Faktor 5 gesteigert werden.

5 Literaturverzeichnis

BUDWIG, R., 1994: Refractive index matching methods for liquid flow investigations. *Experiments in Fluids*. Vol 17 (5), pp. 350-355, Sept. 1994.

HENTSCHEL, K., 2001: Das Brechungsgesetz in der Fassung von Snellius - Rekonstruktion seines Entdeckungspfadens und eine Übersetzung seines lateinischen Manuskriptes sowie ergänzender Dokumente. *Arch. Hist. Exact Sci.* 55, pp. 297–344, Springer-Verlag.

KOTOWSKI, R., 1987: Zur Berücksichtigung lichtbrechender Flächen im Strahlenbündel. *Schriften der DGK, Reihe C, Heft 330*.

MAAS, H.-G., 1992: Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmeßtechnik. *ETH Zurich - Dissertation Nr. 9665*.

MAAS, H.-G., 1995: New developments in multimedia Photogrammetry. Optical 3-D Measurement Techniques III (Eds.: A. Grün, H. Kahmen), Wichmann Verlag, Karlsruhe.

MAAS H. G., GRUEN A., PAPANTONIOU, D., 1993: Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows. Experiments in Fluids. Vol. 15 (2), pp. 133-146, Juli 1993

OKAMOTO, A., 1982: Wave influences in two-media Photogrammetry. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 48, pp. 1487-1499, Sept. 1982.