

Erweiterte Verfahren zur Mehrmedienphotogrammetrie komplexer Körper

Torsten PUTZE

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. Nach einer Vorabbestimmung der Orientierungsparameter des Kamerasystems und der geometrischen Parameter des Mehrmedienkörpers wird die Zusammenführung über Verknüpfungspunkte gewährleistet. 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. Die Objektkoordinatenbestimmung kann mit Hilfe numerische Ableitung, basierend auf Rückwärts Raytracing, in einer MkQ-Schätzung bestimmt werden.

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
- 3D Analyse von Prozessen hinter transparenten Trennflächen
- Wasserströmung hinter planparallelen Trennflächen aus Plexiglas
- Wasserströmung innerhalb eines komplexen Objektes
- Unterwasserphotogrammetrie durch bewegte Gewässeroberflächen

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 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 Kamerakonfiguration ist in **Abb. 1** zu sehen.

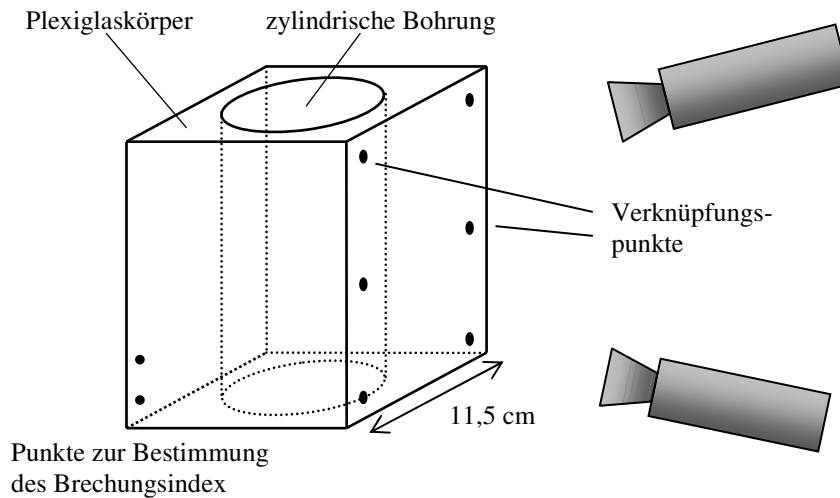


Abb. 1: Darstellung des Messaufbaus und des Modells

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 Allgemeine Betrachtung

KOTOWSKI (1987) stellte einen allgemeingültigeren Ansatz für beliebig parametrisierbare Trennflächen auf. Mit genügend zusätzlichen Beobachtungen können alle benötigten Parameter innerhalb einer Bündelblockausgleichung bestimmt werden. Da die Beobachtungsbe-
reiche der einzelnen Kameras lediglich ein kleines Volumen umfassen, sind die benötigten

zusätzlichen Parameter nicht in ausreichender Anzahl und Ausprägung vorhanden. Deshalb wird die Auswertung dieser Versuche durch eine sequentielle Abarbeitung der notwendigen Schritte durchgeführt. 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, mit Mehrbildzuordnung und 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 notwendigen Schritte sind oben bereits aufgeführt (ausführlich in PUTZE 2007). 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 Anforderungen 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. Eine mögliche Konfiguration zweier Kameras ist in **Abb. 1** dargestellt. Die Erweiterung um zwei weitere Kameras (**Abb. 2**) gestaltet sich in gleicher Art und Weise, jedoch wird die benachbarte Außenfläche als erstes Interface genutzt. Somit ergibt sich zwischen den beiden Kamerteilsystemen ein Schnittwinkel von annähernd 90° .

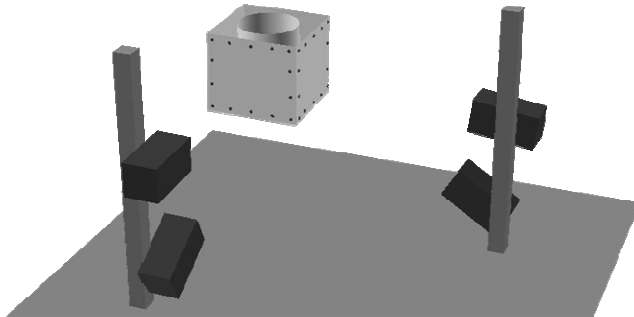


Abb. 2: Darstellung des Messaufbaus mit 4 Kameras

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. Über die in **Abb. 1** zu sehenden Verknüpfungspunkte auf dem Messobjekt wird das lokale Koordinatensystem der Kameras in das des Messobjektes transformiert (vgl. Abschnitt 3).

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 Kamerateilsysteme darstellen, und der Kreiszyylinder. Die Bestimmung der Formparameter ist in PUTZE (2007) gezeigt.

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.

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 $\sigma_{XYZ} = 2 \mu\text{m}$.

$$n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \alpha_2 \quad (1)$$

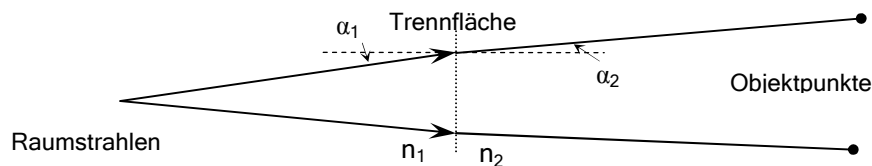


Abb. 3: Skizze zur Anordnung des Brechungsindex

Der Brechungsindex des Plexiglasses wurde im Rahmen einer speziellen Messreihe bestimmt. Im Zuge der Trennflächenparameterbestimmung sind die Koordinaten von Punkten auf der Rückseite des Interfaces mitbestimmt wurden (**Abb. 1**). Diese sind so angeordnet, dass diese unter verschiedenen Winkeln durch das Plexiglas beobachtet werden können. Nach Berechnung des Durchstoßpunktes der Trennfläche sind die Winkel α_1 und α_2 und damit der Brechungsindex n_2 bestimmbar (**Abb. 3** und **Gl. 1**).

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 einzelnen Bildpunktes rekonstruiert werden. Die Koordinatensysteme des Kamerasys-

tems und des Modellsystems sind dafür in ein Gemeinsames zu überführen. **Abb. 4** zeigt schematisch die Vorgehensweise der Zusammenführung.

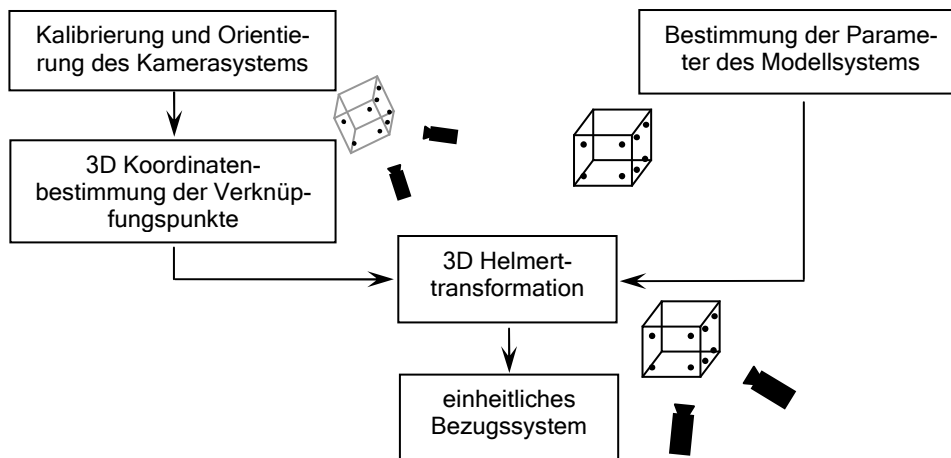


Abb. 4: Schema der Zusammenführung von Kamera- und Modellsystem

3.1 Raytracing

Unter Zuhilfenahme der Parameter der inneren und äußeren Orientierung einer Kamera kann aus jedem Bildpunkt (x', y') der Bildstrahl, eine Abfolge aus Strecken und einem Strahl, bestimmt werden (siehe **Abb. 5**). 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. 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.

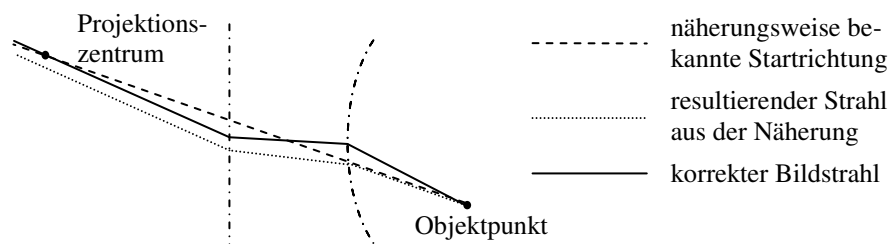


Abb. 5: Raytracing von Objektpunkt zum Projektionszentrum

Das Raytracing ausgehend vom Objektpunkt muss iterativ erfolgen, da die Startrichtung nicht bekannt ist. Näherungsweise kann hier die Richtung zum Projektionszentrum angesetzt werden. Der Strahlenverlauf durch die Medien wird im Allgemeinen das Projektions-

zentrum enthalte. Iterativ ist die Startrichtung so zu verändern, dass im Rahmen der Messgenauigkeit (hier speziell der Bildmessgenauigkeit) das Projektionszentrum Element des Strahlenganges ist. Notwendig ist dieses rückwärtige Raytracing, um die numerischen Ableitungen zur Besetzung der Designmatrix zu ermitteln.

3.2 Objektkoordinatenberechnung

Ein Bildpunkt ist durch verschiedene Strecken in den jeweiligen Medien charakterisiert. Um aus Bildpunkten ein Objektpunkt zu berechnen, muss die Mehrbildzuordnung gelöst sein. In PUTZE (2007) ist dargestellt, dass es sinnvoll ist, die Betrachtung der Mehrbildzuordnung im Objektraum durchzuführen. Dabei gehen die Bildpunkte in Raumgeraden über.

Näherungsweise können die Objektkoordinaten durch Minimierung der Abstände zu den einzelnen Raumgeraden bestimmt werden (Gl. 2). Jedoch ergibt diese Methode nur dann korrekte Ergebnisse, wenn der zu bestimmende Objektpunkt mit demselben Bildmaßstab in allen Kameras abgebildet wird.

$$\sum_{i=1}^{\text{AnzBilder}} d_i \rightarrow \min, \quad \text{wobei} \quad d = \overline{Pg} = \min\{\overline{XP} \text{ für alle } X \in g\} \quad (2)$$

Eine strenge Lösung wird durch die Minimierung der Verbesserungen der Bildkoordinaten nach der Methode der kleinsten Quadrate erreicht.

$$\sum_{i=1}^{\text{AnzBilder}} v_i v_i \rightarrow \min \quad (3)$$

Auf Grund der vielfältigen Berechnungen (u.a. Lösung einer quadratischen Gleichung) während des Raytracing ist eine Bestimmung der direkten Abbildungsgleichung durch Substitution aller Zwischenschritte nicht praktikabel. Die notwendigen Ableitungen der Beobachtungen als Funktion der Unbekannten nach den Unbekannten kann jedoch durch numerische Differenziation (Gl. 4) ersetzt werden.

$$f'(x') \approx \frac{f(z+h) - f(z-h)}{2h} \quad (4)$$

4 Ergebnisse

Der vorgestellte Algorithmus wurde mit verschiedenen Konfigurationen validiert. Zusätzlich sollte der Berechnungsindex während eines Mehrfachvorwärtsschnitt mitbestimmt werden. Auf Grund des eingeschränkten Blickfeldes der Kameras ist dieser zusätzliche Parameter nicht mit zu bestimmen. Im Ausblick wird eine Mögliche Abhilfe beschrieben.

Versuch A

Für diesen Versuch 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. 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. Die mit dieser Konfiguration ausgewerteten Testpunkte (Punkte in Luft im inneren des Zylinders) konnten mit einer mittleren Genauigkeit von $\sigma_{XYZ} = 66 \mu\text{m}$ bestimmt werden.

Versuch B

In Anlehnung an den Versuch A wurde das Aufnahmesystem um eine Kamera erweitert, die (KWD LogLux (1280 x 1024 Pixel, $2/3''$) mit 16 mm Objektiven als Aufnahmesystem. Die Genauigkeit der Kalibrierung beträgt $\sigma_0 = 0,43 \mu\text{m}$ bzw. $1/20$ Pixel. Die Koordinaten der Verknüpfungspunkte wurden mit Hilfe des Vorwärtsschnittes mit einer Lage- und Tiefengenauigkeit von $\sigma_{\text{Lage/Tiefe}} = 30 / 60 \mu\text{m}$ bestimmt. Die damit berechnete Parameter der 3D Helmert-Transformation der beiden Systeme zueinander konnten mit einer Genauigkeit von $\sigma_0 = 60 \mu\text{m}$ bestimmt werden. Die mittleren Standardabweichungen des Vorwärtsschnittes der Testpunkte (Punkte in Luft im inneren des Zylinders, **Abb. 6 mitte**) betragen: $\sigma_{XY} = 50 \mu\text{m}$, $\sigma_Z = 140 \mu\text{m}$.

Versuch C

Mit einem 4 Kamerasystem (LogLux, 16 mm) wurde eine reale Wasserströmung beobachtet. Die Genauigkeit der Kalibrierung beträgt $\sigma_0 = 0,73 \mu\text{m}$ bzw. $1/10$ Pixel. Die Koordinaten der Verknüpfungspunkte wurden mit Hilfe des Vorwärtsschnittes mit einer Lage- und Tiefengenauigkeit von $\sigma_{\text{Lage/Tiefe}} = 120 / 250 \mu\text{m}$ bestimmt. Die damit berechnete Parameter der 3D Helmert-Transformation der beiden Systeme zueinander konnten mit einer Genauigkeit von $\sigma_0 = 290 \mu\text{m}$ bestimmt werden. Die einzelnen Tracer wurden mit einer mittleren Genauigkeit von $\sigma_{XYZ} = 250 \mu\text{m}$ bestimmt. Die resultierenden Trajektorien **Abb. 6 rechts** sind in gezeigt.

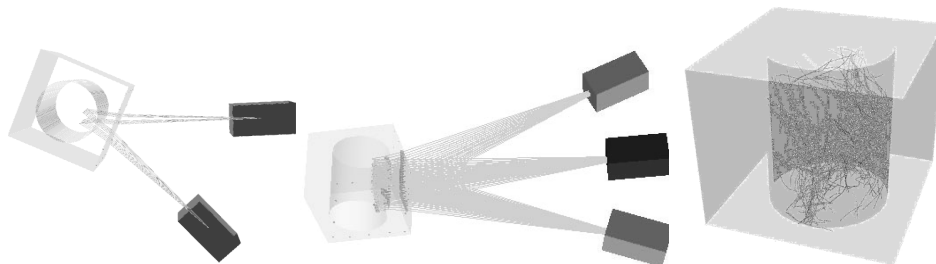


Abb. 6: Ergebnis der Versuche A, B und C (von links)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein sequentieller Ansatz zur Modellierung von komplexen Mehrmedienkörpern beschrieben. Auf Grund der begrenzten Sichtbereiche der Kameras ist eine gemeinsame Bestimmung der Trennflächenparameter nicht zu erreichen. In einer Vorvermessung werden deshalb alle notwendigen Parameter bestimmt und anschließend durch Transformation

ineinander überführt. Durch strenge Strahlmodellierung (Raytracing) können für beliebige Modelle die Objektkoordinaten durch eine MkQ Schätzung bestimmt werden. Die Designmatrix ist in dem Fall mit den numerischen Ableitungen zu füllen, eine explizite Formulierung ist nicht praktikabel.

Die gemeinsame Bestimmung der Kamera- und Modelparameter kann bei solchen Aufnahmesystemen durch eine kaskadierte Anordnung durchgeführt werden. Das System der Kameras mit dem eingeschränkten Beobachtungsbereich wird durch Kameras mit erweitertem Beobachtungsbereich ergänzt. Diese dienen nur zur Stabilisierung der Bestimmung der Modelparameter und beobachten Signalisierungen der Trennflächen sowie zusätzlich außerhalb angebrachte Marken (Abb. 7).

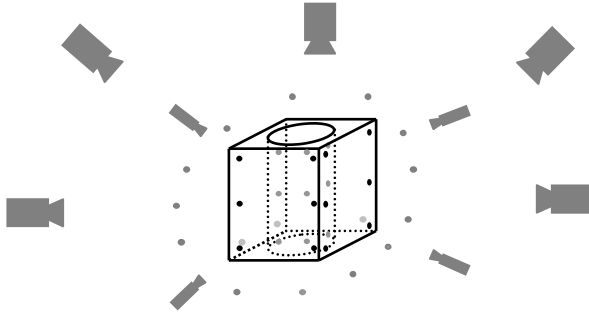


Abb. 7: kaskadierte Anordnung zur gemeinsamen Bestimmung

6 Literatur

- 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 Entdeckungspfades 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., 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.
- PUTZE, T., 2007: *Mehrmedienphotogrammetrie an schwer zugänglichen, komplexen Körpern*. In: Publikationen der Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Herausgeber Eckardt Seyfert, 19.-21.Juni, 2007, Basel, Schweiz.