

Einsatz einer Highspeedkamera zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern in Gasströmungen

TORSTEN PUTZE¹

Zusammenfassung: Der Beitrag gibt einen Überblick über die Verwendung von 3D Particle Tracking Velocimetry zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern in Gasströmungen. Im Besonderen soll auf die Verwendung von nur einer Kamera zur Generierung von multiokularen Aufnahmen unter zu Hilfenahme eines Strahlteilers eingegangen werden. Weiterhin wird ein Überblick über die Konzeption der Aufnahmeconfiguration und die Einsatzgebiete gegeben. Die maximal zu bestimmenden Strömungsgeschwindigkeiten sind dabei vor allem von der möglichen Beleuchtung, den verwendeten Partikel und der radiometrischen Empfindlichkeit der Kamera abhängig.

1 Einleitung

Es gibt verschiedene Verfahren, mit denen sich Geschwindigkeitsfelder in Strömungen bestimmen lassen. Dabei handelt es sich um Punktmessverfahren wie Laser Doppler Anemometrie, Hitzedrahtanemometrie oder die Messung mit Drucksonden. Flächige Messungen werden mit Particle Imaging Velocimetry (PIV) durchgeführt. All diese Messungen weisen eine räumlich oder zeitlich beschränkte Auflösung auf; die Ergebnisse repräsentieren einen mittleren Zustand im Strömungsgebiet. Particle Tracking Velocimetry (PTV) ist ein Verfahren, welches in einem Messvolumen Trajektorien der Strömung, repräsentiert durch Tracer, bestimmt. 3D-PTV beruht auf der Objektkoordinatenbestimmung von Partikeln in der Strömung, aufgenommen durch ein Mehrkammersystem, und der spatio-temporalen Zuordnung der Partikel zwischen den einzelnen Epochen. Die Zuordnungen ergeben für jedes Partikel 3D-Bewegungsbahnen im Messvolumen.

In Zusammenarbeit des IPF mit dem Institut für Luft- und Raumfahrt der TU Dresden wird ein solches Messverfahren entwickelt. Die multiokularen Bildsequenzen werden mit einer Hochgeschwindigkeitskamera FASTCAM ultima 1024 und einem Prismensystem aufgenommen. Die Messungen können in einem Saugkanal mit etwa 50 x 50 cm² Messquerschnitt oder in einem Windkanal Göttinger Bauart mit einem Durchmesser von 3m durchgeführt werden.



Abb. 1: Hochgeschwindigkeitskamera FASTCAM ultima 1024.

¹ Dipl.-Ing. Torsten Putze, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden, Helmholtzstraße 10, 01062 Dresden, E-Mail: torsten.putze@mailbox.tu-dresden.de

2 3D PTV – 3D Particle Tracking Velocimetry

Das 3D PTV ist eine flexible Technik zur Bestimmung von zeitaufgelösten, räumlichen Geschwindigkeitsfeldern. Diese werden durch geeignete Partikel visualisiert (vgl. 3.3). Durch die Aufnahme und Auswertung einer Bildsequenz können Partikelbahnen rekonstruiert werden. Eine relativ lange Beobachtungsdauer ermöglicht es, Informationen über Schwankungsgrößen in instationären Strömungen zu erhalten.

Zur Bestimmung der 3D Koordinaten aller Partikel zu allen Epochen muss eine Mehrbildauswertung durchgeführt werden. Hierzu können mehrere synchronisierte Kameras oder eine Kamera mit Strahlenteiler genutzt werden. Um eine umfassende Beschreibung des Geschwindigkeitsfeldes zu erhalten, werden viele Partikel in die vorhandene Strömung eingeführt. Um während der räumlichen Zuordnung die Mehrdeutigkeiten lösen zu können, reicht bei einer hohen Teilchendichte ein Stereoaufnahmesystem nicht mehr aus. Die Erweiterung auf ein 3- oder 4-Kamerasystem kann Mehrdeutigkeiten bei der Bildzuordnung lösen, und damit die Zuverlässigkeit steigern (MAAS 1992).

Der Erfolg der spatio-temporalen Zuordnung ist von der Komplexität der Strömung, der Anzahl der Partikel und der Bildrate der Kamera im Vergleich zur Strömungsgeschwindigkeit abhängig. Die Zuordnung kann zum einen in allen Bildern als ein 2D-Tracking und zum anderen im Objektraum als ein 3D-Tracking durchgeführt werden. Somit können Mehrdeutigkeiten gelöst und die Zuverlässigkeit erhöht werden. Ein iterativer Ansatz mit verschiedenen Methoden zur Bestimmung und Verbesserung der Geschwindigkeitsfelder vermeidet einen falschen Ansatz der Ausgangsströmung und somit eine nicht konvergierende Lösung.

Die Strömungsgeschwindigkeiten und die durchströmten Volumina sind nicht ausschlaggebend für die zu erreichende Genauigkeit. Ebenso ist das Verfahren nicht an ein bestimmtes Medium gebunden. Es lässt sich sowohl in Flüssigkeiten (MAAS 1992) als auch Gasen (MACHACEK 2002) realisieren. Der grundlegende Auswertalgorithmus kann für verschiedene Anwendungen adaptiert werden. Von großer Bedeutung sind jedoch die eingesetzten Hardwarebausteine. Die limitierenden Faktoren für die zu bestimmende Strömungsgeschwindigkeit sind die Bildrate und die Lichtempfindlichkeit der Kamera in Kombination mit der vorhandenen Beleuchtung.

3 Versuchsaufbau

3.1 Aufnahmesystem

Die Konfiguration des Aufnahmesystems ist stark abhängig vom Modell, an welchem die Strömung bestimmt werden soll. Auf der einen Seite ist für eine möglichst gute geometrische Konfiguration zu sorgen, auf der anderen Seite müssen Verdeckungen durch das zu messende Objekt vermieden werden. Ein wichtiger Punkt ist die Anordnung der Lichtquellen. Die Kamera darf nicht durch Streulicht und direktes Licht beeinflusst werden.

3.1.1. Strahlteileroptik

Wie oben erwähnt, ist ein Mehrkamerasystem notwendig. Die übliche Nutzung von mehreren Kameras hat bei der Aufnahme von Gasströmungen, die auf Grund ihres Geschwindigkeitspektrums meist die Verwendung von Hochgeschwindigkeitskameras erfordern, entscheidende wirtschaftliche und technische Nachteile. Zum einen ist die Anschaffung mehrerer Hochgeschwindigkeitskameras sehr kostenintensiv. Zum anderen müssen mehrere Kameras synchronisiert werden, was nicht bei allen Hochgeschwindigkeitskameras möglich ist.

Eine Alternative zur Verwendung mehrerer Kameras ist die Nutzung einer einzelnen Kamera unter Zuhilfenahme eines Strahlteilers. Hierbei werden mehrere Kameras simuliert, indem der Strahlengang einer Kamera direkt vor dem Objektiv aufgeteilt und umgelenkt wird (Abb. 2). Die oben angesprochenen Nachteile einer Synchronisation entfallen vollständig. Ebenso sind die Anschaffungskosten für ein Prismen-Spiegelsystem geringer als für zusätzliche Kameras. Ein Nachteil dieser Methode ist jedoch, dass auf einem Sensor mehrere Teilbilder (Abb. 3) abgebildet werden.

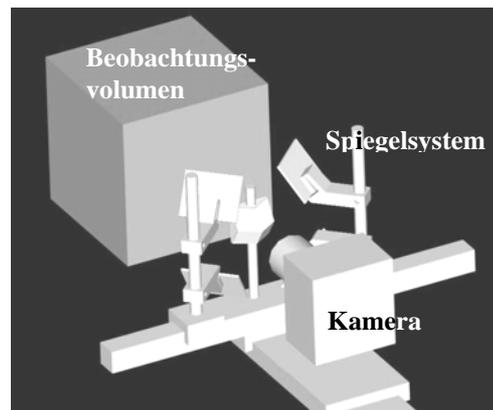


Abb. 2: Schema des Optiksystems (Klaus Hoyer, ETH Zürich).



Abb. 3: Aufnahme der Kamera (Bildformat 1024 x 512) über ein Stereoprismensystem.

3.1.2. Kamera

Neben dem Sensorformat der Kamera ist bei der Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern auch die zeitliche Auflösung von besonderer Bedeutung. Die Bildrate der Kamera hat entscheidenden Einfluss auf den Erfolg des Tracking. Je kleiner das Zeitintervall zwischen zwei Bildern ist, desto kleiner sind die Verschiebungen im Bild und im Objektraum. Weiterhin ergibt sich aus der Bildrate, der Größe des Beobachtungsfensters und der Strömungsgeschwindigkeit die Anzahl der Bilder, in denen ein Partikel abgebildet wird. Die Bewegungen der aufzunehmenden Objekte erzeugen eine Bewegungsunschärfe. Die sich bewegenden,

runden Partikel werden als Streaks abgebildet, dessen Länge abhängig ist von der Geschwindigkeit und der Belichtungszeit.

Um eine zuverlässige zeitliche Zuordnung durchführen zu können, wird die Bildrate der Kamera auf ihr Maximum eingestellt. Die maximale Bildrate der Kamera bzw. die Auslesezeit des gesamten Sensors ist von der zugrunde liegenden Technologie abhängig. Bei der Verwendung von CMOS-Sensoren kann die Auslesezeit durch das Auslesen von Teilen des Sensors erhöht werden. Die einzelnen Bildelemente können unabhängig von deren Nachbarn ausgelesen werden. Somit kann die maximale Fläche berechnet werden, die, korrespondierend zu einer gegebenen Bildfrequenz, ausgelesen werden kann. Eine höhere Bildrate lässt sich somit durch die Verkleinerung des aktiven Sensors erreichen. Bei der Nutzung des Prismenvorsatzes ist zu bemerken, dass die Erhöhung der Bildrate durch Verkleinerung der aktiven Sensorfläche nur eingeschränkt durchgeführt werden kann.

Um eine hohe Bildrate über eine längere Zeit (1000 – 4000 Bilder) zu erreichen, ist die Art des Zwischenspeichers von besonderer Bedeutung. Das Ablegen der einzelnen Bilder auf einem Festspeicher ermöglicht keine hohen Bildraten. Die Bilder werden kontinuierlich im Arbeitsspeicher zwischengespeichert und mittels Triggersignal vollständig auf einen Festspeicher kopiert.

Zur Vermeidung von Bewegungsunschärfen ist es bei einigen Kameramodellen möglich, neben der Bildwiederholrate die Belichtungszeit einzustellen. Extern kann dieser Effekt auch durch mechanische Shutter (Chopper) oder gepulstes Licht erzeugt werden. Begrenzt wird die Dauer der Belichtungszeit durch die radiometrische Empfindlichkeit des Sensors. Der Grauwert ist ein Maß für die Anzahl der Photonen, die während der Belichtungszeit auf das jeweilige Sensorelement gefallen sind. Je kürzer die Belichtungszeit ist, desto empfindlicher muss ein Sensor bei gleicher Beleuchtungsstärke sein. Der Umkehrschluss ist, dass die Partikel in der Strömung sehr hell beleuchtet werden müssen. Die Größe der Partikel kann nicht variiert werden (vgl. 3.3). Um die Beleuchtung von Volumen zu verstärken ist ein enormer technischer Aufwand zu betreiben. Für die praktische Anwendung bedeutet dies, dass ein Kompromiss zwischen Bildrate, Shutterzeit, Beleuchtung und Strömungsgeschwindigkeit gefunden werden muss. Durch die begrenzten technischen Möglichkeiten gibt es für jedes Aufnahmesystem eine maximal auswertbare Strömungsgeschwindigkeit.

Standardabweichung in μm	FASTCAM ultima 1024 1024 x 1024	Nikon D100 3008 x 2000
$\overline{\sigma_{BPM}^*}$	0,21	0,44
$\hat{\sigma}_0$	0,15 (1/80 Pixel)	0,40 (1/20 Pixel)
$\overline{\sigma_X}$	3,5	3,5
$\overline{\sigma_Y}$	3,3	3,5
$\overline{\sigma_Z}$	6,0	4,5

* Bildpunktmessung

Tabelle 1: Vergleich FASTCAM ultima 1024 (Pixelgröße 12 μm) und Nikon D100 (Pixelgröße 7,8 μm)

Tabelle 1 enthält den Vergleich zwischen der FASTCAM ultima 1024 (60Hz) und der Nikon D100. Die Auswertung der Kalibrierung wurde mit dem 3D Studio von AICON durchgeführt. Eine Genauigkeitsuntersuchung der CMOS-Hochgeschwindigkeitskamera FASTCAM ultima 1024 zeigt, dass das Genauigkeitspotential der Kamera gleich dem von digitalen Spiegelreflexkameras ist.

3.2 Beleuchtung

Wie bereits beschrieben, ist die Bildwiederholrate der Kamera durch die Strömungsgeschwindigkeit vorgegeben. Variationen der Blende und der Belichtungszeit können nur begrenzt zur Steigerung der Objekthelligkeit im Bild genutzt werden. Einziger freier Parameter ist die Wahl der Beleuchtung. Die hohe Beleuchtungsstärke der Anlage ist ebenso wichtig wie die Möglichkeit, das Licht auf das Beobachtungsvolumen zu konzentrieren. Die Lampen müssen eine geringe Lichtstrommodulation aufweisen, um einem Flackern und somit verschiedenen Belichtungsbedingungen während der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen vorzubeugen. Für die Beleuchtungsrichtung gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die Beleuchtung kann frontal aus Richtung der Kamera erfolgen oder seitlich, senkrecht zur Aufnahme-richtung. Die zweite Anordnung hat den entscheidenden Vorteil, so dass Objekte, welche sich im Hintergrund befinden, nicht direkt angestrahlt werden und somit die Detektierung der Partikel nicht beeinflusst wird.

Für die vorliegende Aufgabe werden 1000W Halogenlampen genutzt, deren Glühwendeln durch Fresnellinsen leicht unscharf in der Messentfernung abgebildet werden. Damit lassen sich beispielsweise Volumina von $15 \times 15 \times 5 \text{ cm}^3$ gut ausleuchten. Durch eine seitliche Abschirmung der Lampen wird die Lichtausbeute erhöht und das Streulicht minimiert.

3.3 Tracer

An die physikalischen Eigenschaften der Partikel (Tracer), welche die Strömung visualisieren, werden besondere Anforderungen gestellt. Die Partikel sollen weder die Strömung noch durch ihre physikalischen Eigenschaften die eigene Bahn beeinflussen. Die Anforderungen können wie folgt beschrieben werden:

- Auftriebsneutral im Medium (Dichte des Materials)
- Verfolgung Komplexer Strömungen (Durchmesser der Tracer)
- Keine Trägheitseigenschaften (Masse der Tracer)
- Keinen Einfluss auf den Verlauf der Strömung (Größe und Form)
- Erkennbarkeit in den Kameraaufnahmen (Größe und Streueigenschaften)

Je nach umgebenem Medium und Beobachtungsvolumen müssen verschiedene Tracermaterialien verwendet werden. Dennoch lassen sich nicht alle dieser geforderten Eigenschaften realisieren. Geeignete Tracer zur Visualisierung in Flüssigkeiten mit einem relativ großen Beobachtungsvolumen lassen sich wesentlich einfacher herstellen als Tracer für Gasströmungen.

Neben den Eigenschaften der Tracer ist auch das Seeding (Einbringen der Tracer in die Strömung) von entscheidender Bedeutung. Die Apparatur darf mit ihren Ausmaßen die Strömung nicht beeinflussen und den Tracern keinen zusätzlichen Impuls geben. Damit die Strömung im gesamten Beobachtungsvolumen erfasst werden kann, müssen die Partikel so verteilt ein-

gebracht werden, dass das gesamte Beobachtungsvolumen gleichmäßig durchströmt wird. Die Dauer und der Umfang der Durchströmung sind ausschlaggebend, ob und in wieweit instationäre Prozesse beschrieben werden können.

Für Strömungen in Flüssigkeiten eignen sich Kunststoffpartikel mit der jeweiligen Dichte, die oberhalb der Messstelle zugegeben werden. Diese sind in verschiedenen Größen und Dichten erhältlich. In MACHACEK & RÖSGEN (2002) wird für Gasströmungen die Nutzung von Helium gefüllten Seifenblasen beschrieben. Diese haben die geeignete Dichte, sind jedoch schwieriger herzustellen. Die Sichtbarkeit kann durch die Füllung der Blasen mit fluorisierenden Stoffen verbessert werden. Alternativ werden Styroporkugeln mit einem Durchmesser von 0,5 mm genutzt. Hier ist aber vor allem durch die relativ hohe Masse ein unerwünschter Trägheitseffekt zu beobachten.

4 Auswertung von Bildmaterial

Die in Kapitel 4 gezeigten Auswertelgorithmen befinden sich noch in der Implementationsphase, so dass hier noch keine Endergebnisse gezeigt werden können.

4.1 Bildverarbeitung

Die aufgenommenen Bildsequenzen werden in mehreren Schritten verarbeitet, um als Ergebnis die Bildkoordinaten aller Partikel zu erhalten. Aus der gesamten Bildsequenz wird durch eine pixelweise zeitliche Histogrammanalyse das Hintergrundbild extrahiert und von den rohen Bilddaten subtrahiert. In diesen wird durch ein Region Growing Verfahren eine Segmentierung durchgeführt. Über ein Schwerpunktverfahren wird der grauwertgewichtete Mittelpunkt bestimmt.

In WIERZIMOK & HERING (1993) wurde gezeigt, dass der Schwerpunkt des Abbildes eines Objektes mit Bewegungsunschärfe der mittleren Position über die Belichtungszeit entspricht. Somit beeinflussen kleine Bewegungsunschärfen die Bildkoordinaten nicht. Aber diese Bewegungsunschärfen beinhalten Informationen über die Bewegungsrichtung und die Geschwindigkeit der einzelnen Partikel. Es ist noch zu prüfen, ob abgeleiteten Größen nur als Näherung für das Tracking oder eigenständig genutzt werden können.

4.2 3D-Koordinatenberechnung

Aus den durch Bildverarbeitung gewonnenen Bildkoordinaten aller Partikel in allen Bildern werden durch räumlichen Vorwärtsschnitt die Objektkoordinaten der einzelnen Partikel berechnet. Wie oben erwähnt, wird eine hohe Anzahl von Partikeln je Bild aufgenommen. Um dennoch eine eindeutige Zuordnung durchführen zu können, werden die Kernlinien des Mehrkamerasystems zu Hilfe genommen. Eine detaillierte Beschreibung dieses Verfahrens ist in MAAS (1992) nachzulesen.

Als Ergebnis dieser Berechnung werden Koordinatendatensätze gespeichert, die je Epoche zu jedem Partikel die Objektkoordinaten und die Bildkoordinaten aller Bilder beinhalten. Hieraus ergeben sich die Informationen der homologen Bildpunkte zu jeweils einer Epoche.

4.3 Tracking

Die Verknüpfung der einzelnen Partikel zwischen den einzelnen Epochen ergibt einen Pfad für jeden einzelnen Tracer und somit in der Gesamtheit einen Überblick über die Strömung. Grundlage hierfür ist die Koordinatendatenbank mit den Verknüpfungen von Bild- und Objektkoordinaten.

Die spatio-temporale Zuordnung kann sowohl im Bild- als auch im Objektraum durchgeführt werden. Die Verkettung der einzelnen Informationen wird iterativ durchgeführt, wobei entweder der Bild- oder der Objektraum die Referenz darstellt und die jeweilig anderen Informationen die Entscheidungsfindung unterstützen (WILLNEFF 2003). Die Näherungslösung für die Zuordnung wird durch die Prädiktion der Bewegungsbahn bestimmt. Sind genügend Vorgängerepochen vorhanden, kann der Folgeort durch Beschleunigung, Geschwindigkeit, berechnet aus den Vorgängerepochen, und dem momentanen Ort extrapoliert werden. Ein Datenausfall von nur einer Epoche führt bei dem ersten Lösungsschritt dazu, dass keine Extrapolation durchgeführt werden kann. In diesem Fall ist ein mittleres Strömungsfeld, bestimmt durch abgeleitete Größen der Streaks und mittlere Werte der Nachbarschaft, die einzige Möglichkeit, die Näherungslösung für die Zuordnung zu finden.

Die Entscheidung nach der richtigen Zuordnung wird durch viele Bedingungen gestützt. Durch die spatio-temporale Zuordnung ist es möglich, iterativ Fehlzusordnungen aufzudecken. Für jeden Bild- und den Objektraum wird eine Zuordnung durchgeführt. Die richtige Zuordnung ist dann gegeben, wenn sich für jedes Partikel und zwei aufeinander folgende Epochen konsistente Daten ergeben. Im Umkehrschluss findet man zu einer richtigen Zuordnung in einem Bild- oder dem Objektraum die weiteren Verkettungen in der Datenbank (Abb. 4).

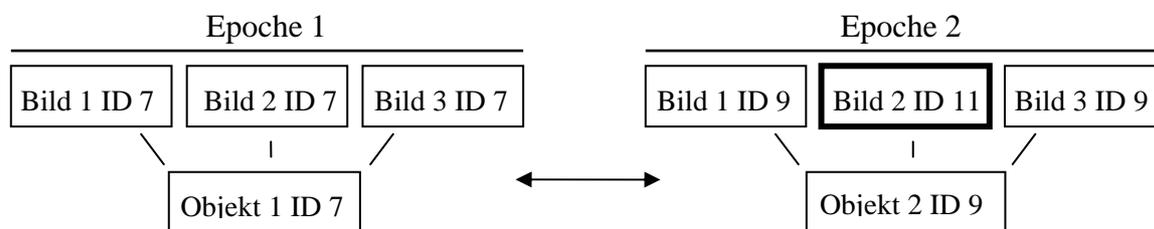


Abb. 4: fehlende Konsistenz der Zuordnung.

Zur weiteren Prüfung der Zuordnung können geometrische Größen genutzt und kombiniert werden. Je nach Anwendung eignen sich Abstände, Beschleunigungen, Grauwertsummen oder Größen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Artikel wurde ein photogrammetrisches Verfahren zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern in Gasströmungen dargestellt. Besonders im Vordergrund stand dabei die wirtschaftliche Nutzung einer einzelnen Kamera. Durch ein vorgeschaltetes Prismensystem ist es dabei möglich, multiokulare Aufnahmen zu erhalten. Je nach Anwendung muss das gesamte Aufnahmesystem auf die zu messende Strömungsgeschwindigkeit

hin abgestimmt werden. Limitierender Faktor bei der Messung hoher Geschwindigkeiten und den draus zwingend erforderlichen kurzen Belichtungszeiten ist die Beleuchtung.

Grundsätzlich kann der Auswertalgorithmus der Bildsequenzen für verschiedene Anwendungen genutzt werden. Sowohl die zu erreichenden Genauigkeiten der Objektkoordinatenbestimmung als auch die Zuverlässigkeit des Trackings sind nicht von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig. Somit wird das relative Fehlermaß besser, je höher die Geschwindigkeiten sind.

Der Erfolg des Tracking ist abhängig von dem zurückgelegten Weg zwischen zwei Epochen. Je kleiner dieser ist, desto einfacher ist die Zuordnung. Werden viele Tracer beobachtet, die einen großen Abstand zwischen aufeinander folgenden Epochen haben, wird die Zuordnung schwieriger. Hierfür muss ein genähertes Geschwindigkeitsfeld bekannt sein und die Bewegung der Teilchen möglichst genau beschrieben werden. Das Bewegungsmodell sollte jedoch nur wenige Parameter enthalten, damit die Initialisierungsphase zur Bestimmung der vollständigen Bahnparameter nicht zu viele Epochen in Anspruch nimmt.

6 Danksagung

Dieses Forschungsprojekt wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 1147 „Bildgebende Messverfahren für die Strömungsanalyse“ gefördert. Für die Herstellung des Spiegelsystems danke ich Herrn Dr. K. Hoyer (IHW, ETH Zürich).

7 Literaturverzeichnis

- HERING, F. 1996: Lagrangesche Untersuchungen des Strömungsfeldes unterhalb der wellenbewegten Wasseroberfläche mittels Bildfolgenanalyse. Dissertation, URL: <http://klimt.iwr.uni-heidelberg.de/Projects/paper/doktor/doktor.html>, Zugriff 09.06.04.
- MAAS, H.-G., 1992: Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmesstechnik. Dissertation, ETH Zürich, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Nr. 50.
- MACHACEK, M. 2002: A Quantitative Visualization Tool for Large Wind Tunnel Experiments. Dissertation, ETH Zürich, Institute for Fluid Dynamics.
- MACHACEK, M.; RÖSGEN, T., 2002: A Quantitative Visualization Method for Wind Tunnel Experiments Based on 3D Particle Tracking Velocimetry (3D-PTV), PAMM, Proc. Appl. Math. Mech. 1.
- WIERZIMOK, D.; HERING, F., 1993: Quantitative Imaging of Transport in Fluids with Digital Image Processing, Imaging in Transport Processes, Begell House, pp 297-308, 1993.
- WILLNEFF, J., 2003: A Spatio-Temporal Matching Algorithm for 3D Particle Tracking Velocimetry, Dissertation, ETH Zürich, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie.