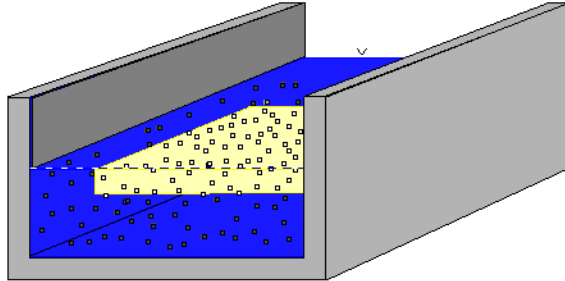


Dreidimensionale Strömungsmesstechnik im hydro-mechanischen Versuchswesen

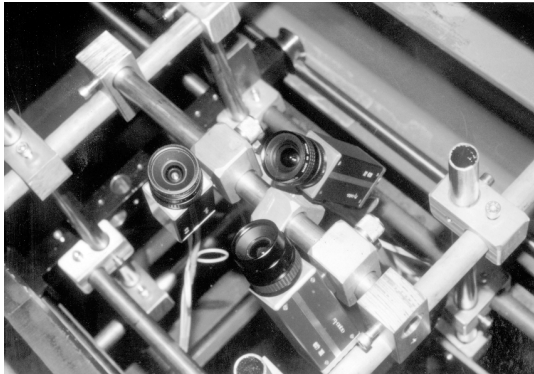
Aufgabe:

Eine häufige Meßaufgabe im hydromechanischen Versuchswesen besteht in der Bestimmung von dreidimensionalen Geschwindigkeitsfeldern in Versuchsanlagen. Anhand solcher Geschwindigkeitsfelder werden beispielsweise Erosionsrisiken bestimmt oder die Folgen von baulichen Eingriffen beurteilt und ggf. optimiert. Idealerweise besteht ein solches quantitatives Geschwindigkeitsfeld aus Geschwindigkeitsvektoren mit allen drei Komponenten, verteilt über ein dreidimensionales Beobachtungsvolumen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung.



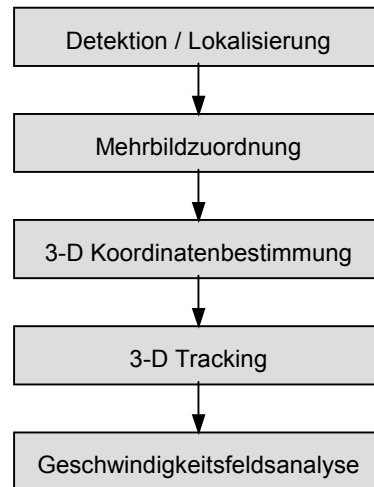
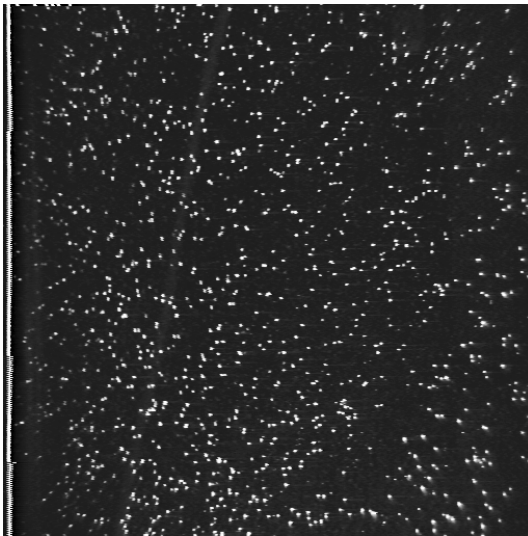
Das hier vorgestellte Verfahren ist unter der Bezeichnung **3-D PTV** (particle tracking velocimetry) bekannt. Es basiert auf der Markierung einer Strömung mit kleinen, auftriebsneutralen Partikeln und der Aufnahme von Bildfolgen dieser Partikel mit einem Stereokamerasystem.

Datenakquisition:



Die verwendeten Partikel haben eine physikalische Dichte von 1,0 und einen Durchmesser von ca. 50 μm . Sie folgen der Strömung, ohne sie nennenswert zu beeinflussen. Durch eine geeignete Beleuchtungseinrichtung können Partikel in einem dreidimensionalen Beobachtungsvolumen sichtbar gemacht und mittels eines Mehrkamerasystems durch eine Glaswand oder einen Glasboden aufgenommen werden.

Bei den verwendeten Kameras handelt es sich typischerweise um Kameras nach der europäischen oder amerikanischen Videonorm, welche beispielsweise Bildsequenzen von 25 Hz bei einer Auflösung von 768x576 Pixel (CCIR) direkt an einen Steuerrechner liefern. Alternativ können zwecks höherer zeitlicher Auflösung auch Hochgeschwindigkeitskameras verwendet werden. Da die Strömungen zwecks hoher geometrischer Auflösung typischerweise mit etwa 1000 im Beobachtungsvolumen sichtbaren Partikeln visualisiert werden, wird eine Echtzeitverarbeitung nicht möglich sein; statt dessen müssen Bildsequenzen abgespeichert und anschließend verarbeitet werden. Aus Gründen der Zuverlässigkeit bei der automatischen Verarbeitung der Bildsequenzen wird es in der Regel notwendig sein, ein System aus mindestens drei synchronisierten Kameras zu verwenden.

Datenverarbeitung:

Die Verarbeitung der aufgenommenen Bildsequenzen kann in folgende Einzelschritte unterteilt werden:

- Zunächst werden Partikel in allen Bildern einer Sequenz detektiert und lokalisiert. Dazu wird ein modifizierter Schwerpunktoperator verwendet, welcher in der Lage ist, die Bildkoordinaten der Partikel mit Subpixelgenauigkeit zu bestimmen und auch Partikel, die sich im Bild teilweise überlappen, zu trennen.
- Danach müssen homologe Partikel in den Bildern der drei Kameras und den Bildtripeln aller Aufnahmezeitpunkte gefunden werden. Die Vorgehensweise wurde so gewählt, daß zunächst homologe Partikel in den einzelnen Bildtripeln gesucht wurden, so daß die Verfolgung auf der Zeitachse nach der 3-D Koordinatenbestimmung im dreidimensionalen Raum erfolgen konnte.
- Die Zuordnung von 1000 oder mehr Partikeln zwischen Bildern aus verschiedenen Betrachtungsrichtung stellt eine keineswegs triviale Aufgabe dar. Wichtigste Grundlage für die Zuordnung ist die Kernliniengeometrie: Bei bekannter relativer Orientierung von zwei Kameras kann, ausgehend von einem Partikel in einem Bild, eine Kernlinie im anderen Bild berechnet werden, auf der das zugehörige Partikel zu liegen hat. Bei Vorwissen über den möglichen Tiefenbereich im Objektraum kann die Länge der Kernlinie ggf. beschränkt werden. Es läßt sich jedoch zeigen, daß die Wahrscheinlichkeit, daß in dem so definierten Suchbereich mehr als ein Partikel gefunden wird, mit dem Quadrat der Anzahl der Partikel ansteigt und bereits bei 400 Partikeln so groß ist, daß die Anwendbarkeit der Methode in Frage gestellt wird. Eine Lösung dafür bietet die Verwendung einer dritten Kamera, welche die Zuordnung konsistenter Tripel von Partikelabbildungen in allen drei Bildern erlaubt ('trinokulares Sehen') und dadurch die Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung um ein bis zwei Größenordnungen reduziert. Entsprechend ist eine Erweiterung auf vier oder mehr Kameras möglich ('multiokulares Sehen').

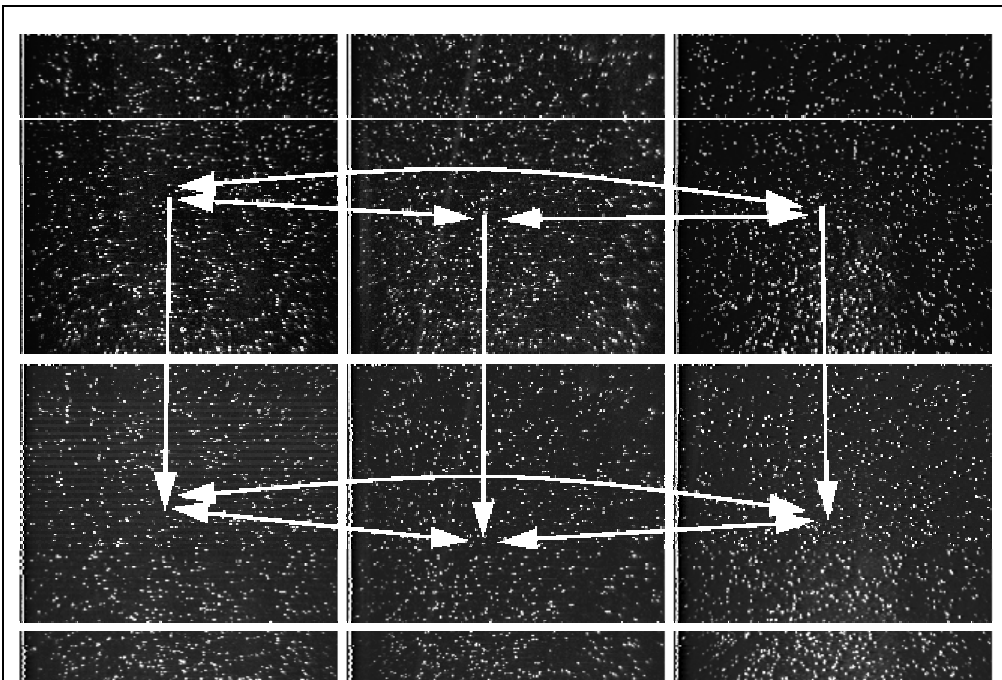


Abbildung: Trinokulare und multi-temporale Zuordnung von Partikelabbildungen.

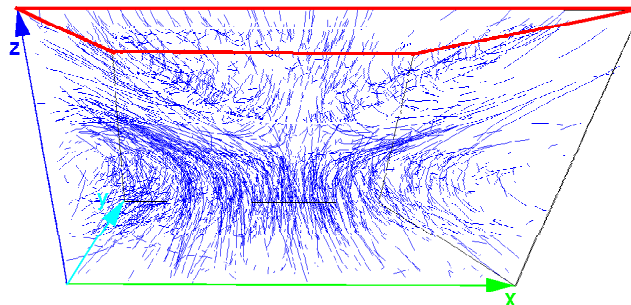
- Mit den auf diese Weise ermittelten homologen Partikelabbildungen lassen sich im räumlichen Vorwärtsschnitt die 3-D Koordinaten der entsprechenden Partikel bestimmen. Dazu ist das Gesamtsystem zuvor zu kalibrieren; dies kann beispielsweise anhand von Aufnahmen eines Punktfeldes mit bekannter Geometrie im Räumlichen Rückwärtsschnitt geschehen. Desweiteren ist die sogenannte Mehrmediengeometrie zu beachten, welche sich dadurch ergibt, daß sich die Partikel in Wasser befinden und die Kamera, abgetrennt durch eine Glasscheibe, in Luft. Dadurch wird jeder Strahl von einem Partikel zum Sensor an den optischen Schnittstellen Wasser/Glas/Luft nach Snellius zweimal gebrochen. Durch Modelle der Mehrmedienphotogrammetrie können die so entstehenden Abweichungen von der Kollinearität streng berücksichtigt werden.
- Aus den Differenzen von 3-D Koordinaten aufeinanderfolgender Zeitpunkte lassen sich 3-D Geschwindigkeitsvektoren bestimmen. Dazu sind zunächst Partikel in den Datensätzen der einzelnen Zeitpunkte einander zuzuordnen. Dies geschieht durch grobes Vorwissen über das vorliegende Geschwindigkeitsfeld. Durch dieses Vorwissen läßt sich, ausgehend von einem Partikel in einem Datensatz, bei Kenntnis der minimalen und maximalen Geschwindigkeit ein Suchvolumen im Datensatz des nächsten Zeitpunktes definieren. Sollten sich in diesem Suchvolumen mehrere Partikel befinden, lassen sich mögliche Zuordnungen unter Kenntnis der maximalen Beschleunigung in den Datensatz des darauf folgenden Aufnahmezeitpunktes extrapolieren und dort verifizieren oder zurückweisen.
- Die so bestimmten 3-D Geschwindigkeitsvektoren (bzw. 3-D Trajektorien aus Datensätzen von mehr als zwei aufeinanderfolgenden Zeitpunkten) stellen eine numerische Basis für detaillierte hydromechanische Analysen des Geschwindigkeitsfeldes dar.

Resultate:

Das Verfahren erlaubt bei Verwendung von CCIR Kameras die vollautomatische Bestimmung der 3-D Trajektorien von etwa 1000 Partikeln bei einer zeitlichen Auflösung von 25 Hz. Bei Verwendung von hochauflösenden Kameras oder Hochgeschwindigkeitskameras läßt sich die Anzahl von Partikeln bzw. die zeitliche Auflösung entsprechend steigern.

Als entscheidend für die Zuverlässigkeit des automatischen Systems erwies sich die Verwendung eines Drei- oder Mehrkamerasystems als Voraussetzung für Verfahren des trinokularen oder multiokularen Sehens.

Durch die Möglichkeit der simultanen Bestimmung einer großen Anzahl von 3-D Trajektorien in einem dreidimensionalen Beobachtungsvolumen stellt 3-D PTV ein Werkzeug für bislang nicht lösbare Meßaufgaben in der Hydromechanik dar.



Geschwindigkeitsfeld in einem Experiment zur thermokapillaren Konvektion

Literaturhinweise:

Maas, H.-G., 1992: Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmeßtechnik. ETH Zürich - Dissertation Nr. 9665, Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, Nr. 50

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, pp. 102-107

Maas, H.-G., Virant, M., Becker, J., Bösemann, W., Gatti, L., Henrichs, A., 1997: Photogrammetric methods for measurements in fluid physics experiments in space. 48th International Astronautical Congress, Torino/Italy

Kontakt:

Adresse	Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung Technische Universität Dresden Helmholtzstr. 10 01062 Dresden		
Tel.:	+49 (0)351 - 4633 2859	Fax:	+49 (0)351 - 4633 7266
E-Mail:	hmaas@rcs.urz.tu-dresden.de		
Internet:	http://rcswww.urz.tu-dresden.de/~hmaas/hg_maas.html		