

Diss. ETH Nr. 9665

# Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmeßtechnik

Abhandlung zur Erlangung des Titels  
**Doktor der technischen Wissenschaften**  
der **Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich**

vorgelegt von  
**Hans-Gerd Maas**  
**Dipl.-Ing. Universität Bonn**  
geboren am 7. 8. 1959  
in Kleve (Bundesrepublik Deutschland)

Angenommen auf Antrag von:  
Prof. Dr. A. Grün,      Referent  
Prof. Dr. T. Dracos,    Korreferent

Zürich, 1992

# **Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmeßtechnik**

Hans-Gerd Maas  
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie  
ETH - Hönggerberg, CH - 8093 Zürich

## **Kurzzusammenfassung:**

Dreidimensionale Particle-Tracking-Velocimetry (3D-PTV) ist eines der vielseitigsten Werkzeuge in der Strömungsmeßtechnik. Das Verfahren basiert auf einer diskreten Visualisierung von Strömungen durch kleine, reflektierende, auftriebsneutrale Partikel und stereoskopische Aufnahmen von Bildsequenzen dieser Partikel. Diese Arbeit beschreibt und analysiert eine auf elektronische Bildaufnehmer und Methoden der digitalen Photogrammetrie gestützte Implementation eines vollautomatischen 3D-PTV Systems.

Nach einer einleitenden Übersicht über verschiedene Methoden der Strömungsmeßtechnik folgt zunächst eine Zusammenstellung der Hardwarekomponenten eines 3D-PTV, wobei unterschieden wird zwischen einer Implementation am IHW/IGP der ETH Zürich, welche weitgehend aus Hardwarekomponenten des Videobereichs zusammengestellt wurde, und einer idealen Konfiguration unter Ausnutzung modernster Hardwarekomponenten.

Schwerpunkt der Arbeit sind die geometrische Modellierung der Problemstellung, algorithmische Aspekte der Bildverarbeitung und der Stereozuordnung in dichten, echt dreidimensionalen Punktfeldern sowie die Kalibrierung des Systems. Die Auswertung der Bildsequenzen zur Bestimmung von Partikeltrajektorien beginnt mit der Bestimmung von Bildkoordinaten aller Partikel durch einen speziell entwickelten Schwerpunktoperator in hochpaßgefilterten Bildern. Die stereoskopische Zuordnung der Partikelabbildungen kann sich mangels eindeutiger Merkmale der Partikel lediglich auf das geometrische Kriterium der Kernlinie stützen. Bei hoher Anzahl von abgebildeten Partikeln (üblicherweise 1000 - 2000 je Bild) treten dabei in der Regel bei einem System mit nur zwei Kameras so viele Mehrdeutigkeiten auf, daß eine robuste Lösung des Korrespondenzproblems unmöglich wird. Erst der geometrische Zwang einer dritten Kamera vermag die Anzahl der Mehrdeutigkeiten auf ein akzeptables Maß zu reduzieren, wobei verschiedene Kameraanordnungen und Vorgehensweisen diskutiert und analysiert werden. Bei der geometrischen Modellierung und bei der Kalibrierung ist die Mehrmedienproblematik von zentraler Bedeutung. Sie bewirkt zum einen, daß jeder Strahl von einem Partikel in Wasser zum Bildaufnehmer zweimal gebrochen wird, was durch ein in die Kollinearitätsbedingung implementiertes

Mehrmedienmodul berücksichtigt wird, und zum anderen, daß wegen optischer Effekte das Gesamtsystem nur unter Einsatzbedingungen kalibriert werden kann.

Das beschriebene System ist in der Lage, nach Initialisierung durch einen Operateur vollautomatisch Geschwindigkeitsfelder in Strömungen mit einer räumlichen Auflösung von bis zu 1000 simultanen Geschwindigkeitsvektoren bei einer zeitlichen Auflösung von 25 Geschwindigkeitsfeldern pro Sekunde und theoretisch beliebig großer Sequenzlänge zu bestimmen.

# Digital Photogrammetry in Threedimensional Flow Measurement Technique

Hans-Gerd Maas

Institute of Geodesy and Photogrammetry, Swiss Federal Institute of Technology  
ETH - Hoenggerberg, CH - 8093 Zurich

## **Abstract:**

Threedimensional particle tracking velocimetry (3D-PTV) is one of the most versatile instruments in flow measurement technique. It is based on discrete visualization of flows with small, reflecting, neutrally buoyant tracer particles and a stereoscopic recording of image sequences of the particles marking the flow. This thesis describes and analyzes an implementation of a fully automatic 3D-PTV based on solid state image sensors and methods of digital photogrammetry.

After an overview on competing methods of flow measurement the hardware configuration of a 3D-PTV will be shown. An implementation at ETH Zurich, which mainly consists of off-the-shelf hardware components will be presented and some state-of-the-art components capable of improving the system will be discussed.

Central points of the work is an exact modelling of the geometry of the experiment and the recording system, algorithmic aspects of image processing and establishment of stereoscopic correspondences in dense, truly threedimensional target fields and the calibration of the system. The processing of the image sequences with the aim of deriving particle trajectories begins with the determination of particle image coordinates by a modified thresholding operator in highpassfiltered images. Due to lack of features allowing a reliable distinction of particles the establishment of stereoscopic correspondences can only be based on the geometric criterium of the epipolar line. The large number of particles imaged (typically 1000 - 2000) will often lead to ambiguities, which cannot be solved by a system based on only two cameras. Therefore different arrangements and algorithms based on three or more cameras are being discussed, which are able to reduce the probability of the occurrence of ambiguities drastically by exploiting the geometric constraint of a third camera. The geometric modelling has to consider the multimedia environment causing a twice broken beam from any particle in water to the sensor, which is accounted for by a multimedia module implemented into the collinearity condition; optical effects of the multimedia environment necessitate a calibration of the complete system in situ under the conditions of the experiment.

The system described in the thesis is capable of determining velocity fields in flows with a spatial resolution of up to 1000 simultaneous velocity vectors at a temporal resolution of 25 vector fields per second and almost arbitrary sequence length completely automatically after an initialization by an operator.