



Doctoral Thesis

## **Anwendung des dreidimensionalen "Particle-Tracking-Velocimetry" auf die Untersuchung von Dispersionsvorgängen in Kanalströmungen**

**Author(s):**

Virant, Marko

**Publication Date:**

1996

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001687941> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

---

Diss. ETH Nr: 11678

ANWENDUNG DES DREIDIMENSIONALEN  
"PARTICLE-TRACKING-VELOCIMETRY" AUF DIE UNTERSUCHUNG  
VON DISPERSIONSVORGÄNGEN IN KANALSTRÖMUNGEN

Abhandlung zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

Marko Virant

Dipl.-Ing., Technische Hochschule Darmstadt

geboren am 8. November 1963

von Hanau/ Hessen, Deutschland

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. Th. Dracos, Referent

Prof. Dr. G. Yadigaroglu, Korreferent

Prof. Dr. A. Grün, Korreferent

Juni 1996

---

## Zusammenfassung

In der Hydromechanik sind in der Vergangenheit eine Reihe von Theorien entwickelt worden, um die verschiedenen Aspekte der Turbulenz und turbulenten Diffusion zu beschreiben. Da es auf diesen Gebieten schwierig ist, exakte experimentelle Daten zu erhalten, beruhen diese Theorien zu einem großen Teil auf Annahmen und Näherungen. Eine besondere Schwierigkeit stellt die Messung Lagrange'scher Größen dar, denn solche Messungen erfordern das Verfolgen von Fluidteilchen entlang ihrer komplizierten räumlichen Bahn. Dennoch sind in der Literatur einige strömungsmechanische Phänomene Lagrange'sch beschrieben worden. Ein herausragendes Beispiel ist die Theorie der turbulenten Diffusion von G.I. Taylor [1921]. Mit dieser Theorie führte Taylor die Diffusion von Fluidteilchen oder passiven Skalaren auf ihr Lagrange'sches Verhalten zurück.

Die heute zur Verfügung stehende digitale Daten- und Bildverarbeitung eröffnete die Möglichkeit, ein dreidimensionales "Particle-Tracking-Velocimetry" (3D-PTV) zu entwickeln, das neue Strömungsinformationen liefert. Es basiert auf der sequentiellen stereoskopischen Aufnahme von beleuchteten Strömungsmarkieren ("Particle"), deren Positionsrekonstruktion im dreidimensionalen Raum und der anschließenden Verfolgung ("Tracking") dieser Markierer über die Zeit. Als Ergebnis stehen nun nicht nur die dreidimensionalen Geschwindigkeitsvektoren ("Velocimetry") im dreidimensionalen Raum und deren zeitliches Verhalten, sondern auch die dreidimensionalen Bahnlinien sowie die dreidimensionale Partikelverteilung und deren zeitliches Verhalten zur Verfügung. Auf diesem Weg erhält man gleichzeitig eine Euler'sche wie auch eine Lagrange'sche Quantifizierung der Strömung.

Mit dem Ziel, Turbulenz und turbulente Dispersionsvorgängen in Kanalströmungen zu untersuchen, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Versuchsanordnung zur 3D-PTV Messung in turbulenten Kanalströmungen entworfen und implementiert. Durch automatische Verarbeitung der experimentellen Daten konnten die Bahnlinien auftriebsneutraler Partikel bis zu einer Länge von 13 m in einem Querschnitt von 23 cm Breite und 9 cm Höhe bei durchschnittlichen Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 90 - 230 mm/s rekonstruiert werden. Die Reynoldszahlen  $Re_H$  der ausgewerteten Versuche lagen zwischen 3000 und 20'000. Die maximale Anzahl von Vektoren pro Zeitschritt ( $\Delta t = 0,04$  s) betrug 1300.

Die vorliegenden Informationen des Verhaltens von passiven Skalaren in einer turbulenten Scherschicht wurden zur statistischen Auswertung Euler'scher und Lagrange'scher Strömungsgrößen herangezogen. Die durch die neue Meßmethode des 3D-PTV gemessenen turbulenten Geschwindigkeitsprofile, Standardabweichungen der turbulenten Schwankungsgeschwindigkeiten und turbulenten Schubspannungen stimmen mit den theoretischen und empirischen Werten der Literatur sehr gut überein. Mit der Berechnung der Lagrange'schen Autokorrelationsfunktion der Geschwindigkeit konnten Dimensionen wie das Lagrange'sche integrale und das Taylor'sche Zeitmaß sowie das Lagrange'sche Energiespektrum bestimmt werden. Die berechneten Lagrange'schen Partikelbeschleunigungen und deren Autokorrelationen lieferten Abschätzungen der Kolmogorov Maße. Die Verteilung der Lagrange'schen Beschleunigungen zeigte auch, daß die verwendeten Tracking-Kriterien - Etablierung der Partikelverbindung mit der kleinsten Änderung der Lagrange'scher Beschleunigung - zu keiner unzulässigen Glättung der Bahnlinien geführt hat.

Der gemessene zeitliche Verlauf der räumlichen Partikelverteilung konnte zur Bestätigung der Batchelor'schen Modifizierung des Diffusionsmodells nach Richardson

herangezogen werden. Im Gegensatz zu Richardson, der die Diffusion zweier Partikel mit ihrer Distanz in Beziehung setzt ( $D \propto l^{4/3}$ ), führte Batchelor die statistische Größe der Diffusion nicht auf eine Zufallsgröße, sondern auf die Varianz der Distanz ( $D \propto (\overline{l^2})^{2/3}$ ) zurück. Gleichwohl diese Theorien nur für die homogene isotrope Turbulenz entwickelt wurden, ist die Übereinstimmung der PTV-Daten mit dem theoretischen Verlauf nach Batchelor für alle drei Raumrichtungen sehr gut.

Schließlich konnte aufgrund des gleichzeitigen Vorliegens der Varianz der Partikelverteilung, des Lagrange'schen integralen Zeitmaßes und der Standardabweichung der turbulenten Schwankungsgeschwindigkeiten die von Taylor hergeleitete Diffusionsgleichung für Diffusionszeiten, die größer sind als ein Lagrange'sches integrale Zeitmaß, für eine Dimension verifiziert werden. Die vorausgesetzte Ergodizität in horizontalen Ebenen der Kanalströmung - die auch bei den statistischen Auswertungen Euler'scher Größen wie dem Geschwindigkeitsprofil und dem turbulenten Schubspannungsverlauf verwendet wurde - erlaubte die Anwendung der experimentellen Daten auf das Taylor'sche Diffusionstheorie, die für homogene isotrope Turbulenz hergeleitet wurde.

Die Genauigkeit der Partikelpositionsbestimmung im Beobachtungsvolumen wurde aus den redundanten geometrischen Informationen der photogrammetrischen Koordinatenberechnung ermittelt. In einem Volumen der Größe  $427 \times 90 \times 230 \text{ mm}^3$  betrug die Standardabweichungen der Partikelkoordinaten, gemittelt über das ganze Volumen:  $\sigma_{x1} = 0,097 \text{ mm}$ ,  $\sigma_{x2} = 0,224$  und  $\sigma_{x3} = 0,096 \text{ mm}$ . Die kleinsten absoluten Fehler in der Partikelpunktbestimmung lagen bei  $\sigma_{x1} = 0,038 \text{ mm}$  und bei Referenzpunktbestimmungen bei  $\sigma_{x1} = 0,014 \text{ mm}$ . Die Geschwindigkeitsfehler konnten auf drei sehr unterschiedlichen Wegen bestimmt werden. Die Auswertung einer Fahrt über ruhende Referenzpunkte einerseits und die Fehlerauswertung der Lagrange'schen Autokorrelationsfunktionen der Partikelgeschwindigkeiten andererseits ergaben in Strömungsrichtung nahezu identische Werte von  $\sigma_{u1} = 1,18 \text{ mm/s} = 0,047 \text{ mm}/\Delta t$  beziehungsweise  $\sigma_{u1} = 1,30 \text{ mm/s} = 0,052 \text{ mm}/\Delta t$ . Ein Vergleich mit der oben angegebenen Genauigkeit der Punktbestimmung zeigt, daß die Geschwindigkeitsbestimmung ( $\sigma_{u1} = 0,052 \text{ mm}/\Delta t$ ) pro Zeitschritt circa um den Faktor zwei genauer ist als die Koordinatenbestimmung im korrespondierenden Fall ( $\sigma_{x1} = 0,097 \text{ mm}$ ). Dieser exemplarische Fall verdeutlicht das Vorhandensein von systematischen Fehlern, welche vor allem durch Beleuchtungseinflüsse und unvollständige geometrische Modellierung der komplexen Mehrmedienumgebung bewirkt werden, die bei kleinen Partikelversetzungen zwischen zwei Zeitschritten teilweise herausfallen. Bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von  $230 \text{ mm/s}$  ergibt sich daraus ein relativer Fehler von  $0,6\%$ .

Mit der Arbeit wurde das Potential der 3D PTV-Meßmethode aufgezeigt. Da die Begrenzung der zeitlichen und räumlichen Auflösung ausschließlich auf die verwendeten Geräte nach der europäischen Videonorm zurückzuführen ist, werden die Weiterentwicklungen auf dem Gebiet Bildgewinnung, -speicherung und -verarbeitung noch deutliche Verbesserungen dieser Qualitätsmerkmale zu finanzierbaren Kosten ermöglichen.

Die Tatsache, Lagrange'sche und Euler'sche dreidimensionale Felder in ihrer zeitlichen Entwicklung messen und stochastisch sowie deterministisch auszuwerten zu können, eröffnet eine große Anzahl von Einsatzmöglichkeiten der PTV-Methode in Forschung und Entwicklung auf vielen Gebieten der Strömungsmechanik, wie der Konvektion, Ablösung, Turbulenz und turbulenten Diffusion.

## Abstract

In the field of hydromechanics, many theories to describe different aspects of turbulence and turbulent diffusion have been developed in the past. As exact experimental data is difficult to obtain in this field, these theories are often based on assumptions and approximations. Especially Lagrangian quantities are difficult to obtain, since they require measurements following the trajectories of fluid particles. Nevertheless, theories of several phenomena are described in a Lagrangian way.

Digital image processing techniques available today opened the possibility to develop a three-dimensional Particle-Tracking-Velocimetry (3-D PTV), which delivers new flow information. This technique is based on the acquisition of stereoscopic image sequences of flow tracers, their reconstruction in three-dimensional space and their subsequent tracking over time. The results of 3-D PTV are not only three-dimensional velocity vectors in three-dimensional space and their temporal behavior, but also three-dimensional trajectories, the particle distribution and their temporal behavior. Therefore this techniques delivers Eulerian as well Lagrangian flow properties.

The aim of the work presented in this thesis was the investigation of turbulence and turbulent dispersion in a channel flow. To achieve these aims, an experimental set-up for 3-D PTV measurement was designed and implemented. The automatic and digital processing of the experimental image data allowed the reconstruction of trajectories of neutrally buoyant particles with a length of up to 13 m in an observation volume of the size of 23 cm in width and 9 cm in height in a flow velocity range between 90 - 230 mm/s. The Reynolds number  $Re_h$  of the experiments conducted varied between 3000 and 20'000. The maximum number of vectors per time step ( $\Delta t = 0.04$  s) was 1300.

The obtained information of the behavior of a passive scalar in a turbulent shear flow were used for the calculation of Eulerian and Lagrangian flow quantities. The mean velocity profile, the standard deviations of the turbulent fluctuation velocity and the Reynolds stresses were extracted from the three-dimensional data sets and showed good agreement with experimental and numerical results available in the literature. From the calculated Lagrangian correlations Lagrangian integral time scales and Lagrangian energy spectra were derived. The computed Lagrangian particle accelerations and their correlations delivered estimates of the Kolmogorov scales. The standard deviation of the Lagrangian acceleration proved that the tracking criteria - minimum change of Lagrangian acceleration - did not impair the result of tracking.

A further quantity derivable from the reconstructed trajectories is the temporal behavior of the spatial particle distribution. The analysis of this quantity proved Batchelor's modification on the diffusion model of Richardson. In contrary to Richardson, who related the diffusion of two particles to their actual distance ( $D \propto l^{4/3}$ ), Batchelor derived the statistical property of diffusion from the statistical property of variance of the particle distance ( $D \propto (\bar{l}^2)^{2/3}$ ). Although these

---

theories are stated for homogenous isotropic turbulence, their agreement with the measured data is significant.

Taylor [1921] reduced the one-particle diffusion on the relation of the variance of the particle distribution on the Lagrangian integral time scale and the standard deviation of the fluctuation velocity. As these quantities were measured simultaneously the theory was proven for one dimension for diffusion times larger than one Lagrangian integral time scale. The assumption of ergodicity was also used for the above mentioned statistical properties and proved to be adequate.

The redundant geometrical information of the multiple observation directions were used to determine the accuracy of the point determination. In a flow observation volume of the dimensions  $430 \times 90 \times 230 \text{ mm}^3$  the average standard deviation of the particle coordinates was averaged over the whole volume  $\sigma_{x1} = 0.097 \text{ mm}$ ,  $\sigma_{x2} = 0.224$  and  $\sigma_{x3} = 0.096 \text{ mm}$ . The velocity errors were determined in two ways independently. The measurement of resting target points from the moved observation system on one side and the error estimation of the Lagrangian correlation on the other side delivered an almost identical error of  $\sigma_{u1} = 1.18 \text{ mm/s} = 0.047 \text{ mm}/\Delta t$  and  $\sigma_{u1} = 1.30 \text{ mm/s} = 0.052 \text{ mm}/\Delta t$ , respectively. A comparison of these results with the accuracy of the point determination yields that due to correlated errors the velocity error is as twice smaller than the point determination error. The typical relative error in flow direction was 0.6% of the mean flow velocity.

This work defines the potential of the 3-D PTV method used. As the temporal and spatial resolutions are only limited by the standard video components used the fast ongoing developments on the area of digital image acquisition, storage and processing the potential of the method will improve in the near future with decreasing costs.

The fact that Eulerian and Lagrangian three-dimensional flow field information can be measured over a longer time period and stochastic and deterministic processing are possible, makes this method suitable for a variety of applications in research and development in fields like turbulence, convection, separation and turbulent diffusion.

---