



Doctoral Thesis

## Tomographie in einem turbulenten Freistrahл mit Hilfe von PH-abhangiger Laser induzierter Fluoreszenz

**Author(s):**

Merkel, Gerhard Johann

**Publication Date:**

1995

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001475141> →

**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. 11174

**TOMOGRAPHIE IN EINEM TURBULENTEN FREISTRABL  
MIT HILFE VON  
PH-ABHÄNGIGER LASER INDUZIERTER FLUORESZENZ**

**ABHANDLUNG**

zur Erlangung des Titels eines  
Doktors der Technischen Wissenschaften  
der

**EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN  
HOCHSCHULE ZÜRICH**

vorgelegt von

**GERHARD JOHANN MERKEL**

Dipl.-Ing.  
Universität Fridericiana zu Karlsruhe TH  
geboren am 30. August 1964  
von Deutschland

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. P. Rys, Referent  
Prof. Dr. T. Dracos, Korreferent

Zürich 1995

## Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation befaßt sich mit der Entwicklung eines tomographischen Beobachtungsverfahren zur vollständig dreidimensionalen und quasi zeitlich konstanten Aufnahme von Wirbelstrukturen und Grenzflächen im Fernfeld eines turbulenten, auftriebsneutralen Freistrahls.

Mit einem Argon Ionen Laser als Lichtquelle und einer geeigneten optischen Einrichtung ist es möglich, ein Beobachtungsvolumen der Größe  $15 \times 15 \times 3 \text{ mm}^3$  bzw.  $33 \times 33 \times 7 \lambda_v^3$  im Mikroskalenbereich schichtenweise zu beleuchten und abzutasten. Der dem Freistrahл zugeführte Farbstoff Dinatrium-Fluoreszein (Uranin) markiert aufgrund seiner geringen Eigendiffusion ( $Sc = 2075$ ) die Strömung. Er wird von einer geeigneten Wellenlänge des Laserlichtes angeregt und zeigt in einem bathochromen Wellenlängenbereich ein ausgeprägtes Fluoreszenzverhalten. Die auftretende Fluoreszenz, welche direkt proportional zu der Konzentration des Farbstoffs ist, wird in einem Sensor einer Hochgeschwindigkeitskamera mit einer maximalen Bildrate von 500 Bilder pro Sekunde in Form von Grauwerten aufgenommen.

Die Aufnahmezeit für eine Volumenzelle, die aus 50 einzelnen Bildern rekonstruiert wird, beträgt 0,1 Sekunden oder  $1/2$  der viskosen Zeit  $t_v$ . Diese benötigte Aufnahmezeit ist im Vergleich der Zeitskalen der turbulenten Strömung klein genug, um von einem quasi zeitlich konstanten und räumlichen Aufnahmeverfahren zu sprechen. Die räumliche Auflösung ist dabei in allen drei Richtung gleich und beträgt  $1/7$  der viskosen Länge  $\lambda_v$ . Zum Studium der zeitlichen Entwicklung von Strukturen ist eine Aufnahme von 20 Volumenzellen in einer Zeit von 2,1 Sekunden möglich.

Eine radiometrische Kalibrierung erlaubt eine Bestimmung des räumlichen Konzentrationsfeldes  $c(\vec{x}, t)$ . Von diesem Konzentrationsfeld kann das dreidimensionale Konzentrationsgradientenfeld  $\nabla c(\vec{x}, t)$  und das skalare dreidimensionale Dissipationsfeld  $\nabla^2 c(\vec{x}, t)$  berechnet werden. Mit einer affinen Transformation, die auf einer Korrelation von Grauwerten beruht, ist es möglich aus dem skalaren Konzentrationsfeld das dreidimensionale Geschwindigkeitsfeld sowie das Feld des Dehnungstensors und Rotationstensors zu berechnen. Als ein Maß für die Qualität des erhaltenen Geschwindigkeitsfeldes bzw. des Dehnungstensors wird die Inkompressibilitätsbedingung für die 3500 berechneten Geschwindigkeitsvektoren bzw. Dehnungstensen geprüft. Die Volumenerhaltung ist zu 99,1% erfüllt. Aus den Dehnungstensen können die drei Eigenvektoren, welche die Richtung der Dehnung und Kompression des Fluids

anzeigen, berechnet werden. Aus den Rotationstensoren ergeben sich die Wirbelvektoren.

Die Grenzflächen zwischen Strahlflüssigkeit und eingemischter Umgebungsflüssigkeit, welche mit den Flächen hoher Konzentrationsgradienten übereinstimmen, sind für den Ablauf chemischer Reaktionen von besonderem Interesse. Für diese Flächen kann eine raumausfüllende Eigenschaft sowie eine multifraktale Eigenschaft nachgewiesen werden. Dieses steht im Einklang mit den in der Literatur berichteten Ergebnissen. An den Grenzflächen wird die Orientierung der Eigenvektoren, des Wirbelvektors und des Konzentrationsgradientenvektors aufgezeigt. Dabei wird eine ausgeprägte Parallelität zwischen Wirbelvektor und mittlerem Eigenvektor festgestellt. Beide Vektoren liegen in der Ebene gleicher Konzentration. Senkrecht auf diese Ebene steht der Konzentrationsgradientenvektor, der in der Ebene der Dehnungs- und Kompressionsrichtung liegt. Die Grenzfläche wird im Laufe ihrer Entwicklung im turbulenten Freistrahls gestaucht, gedehnt und gefaltet. Sie stellt eine materielle Oberfläche dar.

An dieser materiellen Oberfläche wird eine Säure-Base Reaktion durchgeführt. Dabei wird in der Strahlflüssigkeit die Fluoreszenz durch Zugabe von Säure unterdrückt. Der Umgebungsflüssigkeit wird im Fernfeld des Strahls eine Base zugegeben. Kommen beide Flüssigkeiten an diesen materiellen Oberflächen in Kontakt, so erfolgt ein pH-Sprung, was ein Leuchten (Fluoreszenz) der Grenzflächen verursacht. Diese Fluoreszenz kann mit der entwickelten tomographischen Methode im Mikroskalenbereich aufgenommen werden.

Die durchgeführte Säure-Base Reaktion bestätigt zum einen den Reaktionsablauf von schnellen chemischen Reaktionen an Grenzflächen hoher Gradienten (materiellen Oberflächen) bevor eine vollständige Durchmischung bis auf molekularer Ebene stattgefunden hat und zum anderen beschreibt sie die Form und die räumliche Ausbreitung dieser Grenzflächen.

## Abstract

The present thesis deals with the development of a fully three-dimensional and instantaneous tomographic imaging technique to observe eddies and interfaces in the far field of a turbulent, non buoyant jet.

An Argon ion laser as light source and an appropriate optical arrangement which generates a focused laser sheet is used to move this light sheet through an observation volume with the dimension  $15 \times 15 \times 3 \text{ mm}^3$ , e.g.  $33 \times 33 \times 7 \lambda_\nu^3$ , in the order of the Taylor microscale. Disodium-fluorescein, with a negligible molecular diffusion ( $Sc = 2075$ ), as a passive dye, marks the motion of the fluid. Disodium fluorescein absorbs light energy at an appropriate wavelength and emits energy at a higher wavelength (fluorescence). The fluorescence, which is directly proportional to the dye concentration, is recorded as grey values in the sensor of a high-speed camera with a maximum image rate of 500 Hz.

The observation time of one observation volume, which is reconstructed from 50 single images, is 0.1 seconds, e.g.  $1/2$  of the viscous time scale  $\tau_\nu$ . The observation time required is much shorter than the time scale of the turbulent flow. The observation technique is quasi instantaneous and fully three-dimensional. The spatial resolution is in all three directions  $1/7$  of the viscous length scale  $\lambda_\nu$ . For studying the time development of turbulent structures and interfaces, 20 consecutive observation volumes can be recorded in 2.1 seconds.

A radiometric calibration allows to determine the spatial concentration field  $c(\vec{x}, t)$ . From the concentration field the three-dimensional vector representation of the concentration gradient  $\nabla c(\vec{x}, t)$  and the three-dimensional scalar dissipation field  $\nabla^2 c(\vec{x}, t)$  can be calculated.

The three-dimensional velocity field is determined with an affine transformation technique which is based on a grey value correlation technique. The three-dimensional velocity field, the symmetric and skew-symmetric tensor are determined. A quality test for the 3500 calculated deformation tensors and velocity vectors is the incompressibility condition. The incompressibility is very well fulfilled for 99.1 % of the calculated vectors. The three principal rates of strain (elongation, compression, intermediate rate of strain) and their directions can be calculated. The vorticity vector follows from the skew-symmetric tensor.

The interfaces between jet fluid and ambient fluid, which are identical with the surfaces of high concentration gradients, are very important for chemical reactions. These interfaces show, as reported in the literature, a completely space filling and multifractal behaviour.

At these interfaces the orientation of the three directions of the rate of strain, the vorticity vector and the concentration gradient vector are shown. A very strong tendency for the vorticity vector to align with the direction of the intermediate rate of strain is observed. Both vectors are to be found in the plane of isoconcentration. The concentration gradient vector is perpendicular to this isoconcentration plane. The concentration gradient vector and the direction of the stretching and the most compressive rate of strain are lying in the same plane. The interfaces are compressed, stretched and convoluted during their development. These interfaces are known as material surfaces.

An acid base reaction has been conducted at the material surface. If acid is added to the jet fluid, the fluorescence will be suppressed. A base is added to the entrainment fluid. If acid and base are in contact at the material surface, a rapidly increasing pH is the reason for the intense fluorescence observed. The tomographic method developed is used to look at small fluorescent material surfaces.

On the one hand, the results of the acid base reaction confirm the interface of high concentration gradients as the reaction zone of fast chemical reactions in turbulent flows before any micromixing down to the molecular level takes place. On the other hand, the shape and the space filling behaviour of the material surfaces can be observed.