

Transport Phenomena in Complex Flows

Miniaturized Systems

Doctoral Thesis

Author(s):

Zenklusen, Adrian W.

Publication date:

2014

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010210642>

Rights / license:

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

Diss. ETH No. 21953

TRANSPORT PHENOMENA
IN COMPLEX FLOWS:
MINIATURIZED SYSTEMS

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

Adrian Werner Zenklusen
MSc ETH Process Engineering

born on September 23, 1983

citizen of
Simplon (VS)
Switzerland

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr., Dr. h.c. Philipp Rudolf von Rohr (ETH Zürich), examiner
Prof. Dr. Thomas Rösgen (ETH Zürich) co-examiner
Assoc. Prof. Dr. Saša Kenjereš (TU Delft) co-examiner

Zurich, 2014

Abstract

In this thesis transport phenomena in complex flows are investigated in miniaturized systems, which have gained importance in process engineering during the last decades. Miniaturization of unit operations is favored due to increased energy efficiency, resource savings and enhanced safety. Little knowledge about transport phenomena within miniaturized systems involving complex geometries is available. Thus in this thesis transport phenomena based on large-scale structures present in the flow fields are considered for two miniaturized systems relevant for process engineering. The first case consists of turbulent flows over a wavy wall at reduced channel heights. Flows over wavy walls are often seen as reference case of complex flows. By reducing the channel height at constant wave amplitude and wavelength, this reference case is studied under miniaturized conditions. The second case identifies and analyzes a transport phenomenon in a continuous chemical millireactor developed at our institute. The novel reactor type contains highly porous inserts or highly porous structures (porosity $\geq 75\%$) and generates unsteady flows at industrial relevant flow rates.

Experiments were carried out in water channel facilities. Two dimensional Particle Image Velocimetry (2D PIV) were performed to access velocity fields. Concentration fields were measured by planar Laser Induced Fluorescence (LIF). In case of the highly porous structures the dynamic of the flows was additionally determined by a method measuring the frequency of an oscillating dye plume. Flows over wavy walls were analyzed for Reynolds numbers ranging from 4600 to 10'900. The Reynolds number is based on the half channel height. Miniaturization was studied here at three different blockage ratios β (half channel height to wave amplitude ratio) 3.3, 6.7 and

II

10. In the case of the novel reactor type two highly porous inserts were examined differing in the ligament shape and thickness. A wide Reynolds number range was applied ranging from 6 to 1500, in which the Reynolds number was based on the characteristic length of the ligament. In addition to experiments performed in the highly porous structures, simulations were conducted in the laminar and in the turbulent regime to obtain a more complete picture. Large eddy simulations (LES) were chosen in the turbulent cases, in which special care was taken for proper modeling of subgrid-scale stresses and subgrid-scale mass fluxes.

First and second order turbulent statistics were used to analyze velocity and concentration fields. Large-scale structures were extracted by Proper Orthogonal Decompositions (POD) on the velocity field.

In the case of the wavy wall large-scale structures are influenced by the channel height. At the smallest considered channel height large-scale structures exhibit a relative enlargement of the characteristic length scale and a less dominant contribution to the flow field. In the case of the highly porous inserts vortex shedding is identified as large-scale transport phenomenon. The complex geometry of the inserts enables vortex shedding at various locations. The emerging of vortices behind interconnections of ligaments, so called nodes, are in this regard a novelty for vortex shedding. Onset of vortex shedding and transition from laminar to turbulent shedding occurs at a lower Reynolds number compared to the generic case of a single cylinder. PODs on velocity fields of different inserts reveal that vortex shedding gets more intense in cases of thicker and more sharp edged ligaments. The study of mass transfer shows a strong connection between vortex shedding and transport of mass.

The major finding of this thesis is the presence of large-scale structures in both miniaturized cases which influence the transport of momentum and scalars. It is interesting to note that in both cases the large-scale structures are sensitive to geometrical alterations, what offers the opportunity to control transport phenomena by specific design.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden Transportphänomene vorkommend in komplexen Strömungen von miniaturisierten Systemen untersucht. In den letzten Jahrzehnten haben miniaturisierte Systeme in verfahrenstechnischen Anlagen aus Gründen der Energieeffizienz, des Ressourcenverbrauchs und der Sicherheit zunehmend an Bedeutung gewonnen. Über Transportphänomene, welche in den komplexen Strukturen und Einbauten von miniaturisierten Komponenten vorkommen, ist wenig Wissen vorhanden. In dieser Arbeit werden deshalb Transportphänomene zweier verfahrenstechnisch relevanter Fälle untersucht, denen Grobstrukturen im Strömungsfeld zu Grunde liegen. Der erste Fall betrachtet turbulente Strömungen über eine gewellte Oberfläche in Abhängigkeit der Kanalhöhe. Strömungen über gewellte Oberflächen werden häufig als Referenzfall für komplexe Strömungen angesehen. Suksessive Verkleinerung der Kanalhöhe bei gleich bleibender Wellenamplitude und Wellenlänge der sinusförmigen Wellenoberfläche ermöglichen diesen Referenzfall unter miniaturisierten Bedingungen zu untersuchen. Der zweite Fall identifiziert und analysiert ein Transportphänomen in einem kontinuierlicher Milli-Reaktor entwickelt in unserem Institut. Dieses neuartige Reaktorsystem ist mit hochporösen Einbauten oder hochporösen Strukturen (Porösität $\geq 75\%$) ausgestattet, die instationäre Strömungen bei industriell relevanten Durchsätzen erzeugen. Die Experimente wurden in unterschiedlichen Wasserkanälen durchgeführt. Die instationären, lokalen Geschwindigkeitsfelder wurden mittels zweidimensionalen Particle-Image-Velocimetry (2D PIV) bestimmt. Zur Messung der Konzentrationsfelder kam die planar laserinduzierte Fluoreszenz (LIF) zur Anwendung. Zusätzlich wurde die Dynamik der Strömungen in

hochporösen Strukturen mit einer Messmethode untersucht, welche die Frequenz einer oszillierenden Farbfahne bestimmt. Strömungen über gewellte Oberfläche wurden im Reynolds-Zahl Bereich von 4600 -10'900 untersucht. Die Reynolds-Zahl wurde auf die halbe Kanalhöhe bezogen. Miniaturisierung wurde in diesem Fall für drei Blockierungsfaktoren (Verhältnis halbe Kanalhöhe zur Wellenamplitude) von 3.3, 6.7 und 10 untersucht. Im Falle des Reaktorsystems wurden zwei hochporöse Strukturen betrachtet, welche sich in Stegdicke und Stegform unterscheiden. Der Reynolds-Zahl Bereich erstreckte sich in diesem Fall von 6 bis 1500, wobei die Reynolds-Zahl mit der charakteristischen Länge des Steges definiert wurde. Des Weiteren wurden Simulationen im laminaren und im turbulenten Bereich durchgeführt, um ein tieferes Verständnis der vorliegenden Strömungen zu gewinnen. In den turbulenten Fällen wurde das Grobstrukturmodell (LES) als Turbulenzmodell gewählt, in welchem besonderer Wert auf die korrekte Modellierung der nicht aufgelösten Reynoldsspannungen sowie der nicht aufgelösten turbulenten Massenströme gelegt worden ist.

Turbulente Statistiken erster und zweiter Ordnung wurden für die Analyse der Geschwindigkeits -und der Konzentrationsfelder angewandt. Grobstrukturen wurden mittels Proper Orthogonal Decomposition (POD) von Geschwindigkeitsfeldern quantitativ bestimmt.

Die Resultate im Falle der gewellten Wand zeigten, dass Grobstrukturen von der Kanalhöhe beeinflusst werden. Bei der kleinsten Kanalhöhe wurden einerseits eine relative Vergrößerung der charakteristischen Längenskala der Grobstrukturen und andererseits ein verminderter Anteil der Grobstrukturen im Strömungsfeld festgestellt. Im Falle des neuartigen Reaktorsystems wurden Wirbelablösungen als grobstrukturiges Transportphänomen identifiziert. Die komplexe Struktur der Einbauten ermöglicht es, dass Wirbelablösungen an verschiedenen Positionen auftreten. Als neuartig wird das Auftreten von Wirbelablösungen hinter Verstreben von Stegen, sogenannten Knoten, erachtet. Die Entstehung der Wirbelablösungen und der Übergang von laminaren zu turbulenten Wirbelablösungen erfolgen bei geringeren Reynolds-Zahlen als im Falle eines einzelnen Zylinders, was sich positiv für die Anwendung des Millireaktors erweist. PODs, ange-

wandt auf Geschwindigkeitsfelder, haben gezeigt, dass Wirbelablösungen für den Fall von dickeren und scharfkantigeren Stegen intensiver werden. Stofftransportuntersuchungen belegten, dass die Verbreitung der Konzentrationsspezies und Wirbelablösung miteinander gekoppelt sind.

Die Haupteckenniss ist das Vorhandensein von Grobstrukturen in beiden miniaturisierten Fällen, welche Einfluss auf Impuls -und Skalartransport aufweisen. Geometrieänderungen wirken sensitiv auf die Grobstrukturen, was uns die Möglichkeit eröffnet durch geometrische Auslegung und Dimensionierung der Einbauten gezielt Transportphänomene zu beeinflussen.