

DISS. ETH NO. 22142

***MICROSCALE ENGINEERING FOR ADVANCED
INTERFACIAL FLUIDICS: FROM EXTREME
MICROCHANNEL HEAT TRANSFER TO
RESILIENT SUPERHYDROPHOBIC
CONDUCTIVE SURFACES***

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

ASHISH ASTHANA

M.Sc. (Engg)
Indian Institute of Science, Bangalore

born on 11.04.1980
citizen of India

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Dimos Poulikakos, examiner
Prof. Dr. Hyung Gyu Park, co-examiner
Dr. Manish K. Tiwari, co-examiner

2014

Abstract

This dissertation focusses on the micro-engineering of interfacial fluidic interactions targeting desired advanced functionalities. Such interactions can be manifested at either fluid-fluid or solid-fluid interfaces, can occur in either “internal” or “external” flow configurations and are often related to simultaneous heat and mass transfer phenomena. The interfaces of both kinds are ubiquitous in a broad swath of emerging micro and nanotechnology applications. Thus, a deep understanding and the ability to manipulate these interactions is crucial. The current dissertation explores exploitation of two distinct cases: liquid-liquid interfacial interaction between two immiscible liquids in a microchannel (typical internal flow configuration) and dynamic interaction of water droplets on functional solid surfaces (typical external/free surface flow configuration).

In the first case investigated, the interfacial interaction between mineral oil and water is used to generate regular droplets of the former within a continuous, shearing flow of water in a microchannel. Such a “segmented” flow is investigated aiming at heat transfer augmentation by causing regulated flow disturbances in the continuous flow of water, and inducing and enhancing mixing within the microchannel. The effect of inter-droplet spacing is quantitatively studied using micro-Particle Image Velocimetry for flow fields and micro-Laser Induced Fluorescence for local temperature measurements in the flow. The heat transfer efficiency, quantified by Nusselt number, is found to be factorially (four fold) higher with the segmented flow compared to the single fluid flow.

In the second case, the dynamic interaction of water with nanoengineered superhydrophobic surfaces is explored. Polymer nanocomposite based superhydrophobic coatings are formed using carbon nanoparticles as fillers in a fluoropolymer matrix. As additional functionalities to the surface, very high electrical conductivity is imparted along with impressive impalement resistance against impinging water droplets. The results clarify the role of carbon nanoparticle geometry and chemistry on the performance of

the resulting superhydrophobic surfaces. Further, a synergistic effect is found that helps obtain the best conductivity and impalement resistance, by using a mixture of the employed carbon fillers; as compared to coatings with single carbon fillers. In addition, the simultaneous superhydrophobicity and oleophilicity of the synthesized surfaces is proven and exploited to separate oil from oil-water mixture using filters coated with the above mentioned surface textures.

Zusammenfassung

Diese Dissertation konzentriert sich auf die Mikrotechnik von Grenzflächen-Wechselwirkungen in Fluiden, welche erweiterte Funktionalitäten ermöglichen. Solche Wechselwirkungen können sich entweder an Flüssig-Flüssig oder Fest-Flüssig Grenzflächen manifestieren. Sie können sowohl in "internen" oder "externen" Strömungskonfigurationen auftreten und werden oft mit simultanen Wärme- und Stofftransportphänomenen in Verbindung gebracht. Die Schnittstellen der beiden Möglichkeiten sind in einer breiten Schneise der Mikro- und Nanotechnologie-Anwendungen allgegenwärtig. Deshalb ist es entscheidend ein tieferes Verständnis und die Fähigkeit der Manipulation dieser Wechselwirkungen zu entwickeln. Die aktuelle Dissertation erforscht die Nutzung zweier verschiedener Fälle. Die Flüssig-flüssig-Grenzflächen-Wechselwirkung zwischen zwei nicht mischbaren Flüssigkeiten in einem Mikrokanal und die Fest-flüssig-Grenzflächen-Wechselwirkung von Wassertropfen auf funktionalisierten Oberflächen.

Im ersten Teil dieser Arbeit wird die Grenzflächen-Wechselwirkung zwischen Mineralöl und Wasser verwendet um normale Öl Tropfchen innerhalb einer kontinuierlichen Schärströmung von Wasser in einem Mikrokanal zu erzeugen. Solch ein "segmentierten" Fluss wird hat das Ziel die Wärmeübertragung zu verbessern indem regulierte Verwirbelungen im ansonsten kontinuierlichen Wasserfluss kreiert werden. Die zusätzlich entstehende Vermischung innerhalb des Mikrokanals erhöht den Wärmeübergangskoeffizient substanziell. Die Wirkung des Abstands zwischen den einzelnen Tropfen wird quantitativ mit Hilfe von Mikro-Particle Image Velocimetry für Strömungsfelder und Mikro-Laser Induzierte Fluoreszenz für lokale Temperaturmessungen in der Strömung untersucht. Die Wärmeübertragungseffizienz wird anhand der Nusselt-Zahl quantifiziert, wobei eine vierfach höhere Effizienz mit der segmentierten Flusses gegenüber dem Einzelfluidstrom erreicht wird

Im zweiten Teil dieser Arbeit wird die dynamische Wechselwirkung von Wasser mit im Nanometerbereich strukturierten superhydrophoben Oberflächen erforscht. Polymer-Nano-Verbunde

auf Basis von superhydrophoben Beschichtungen werden mit Kohlenstoff-Nanopartikel als Füllstoffe in einer Fluorpolymermatrix gebildet. Die Oberfläche wird zusätzlich mit einer sehr hohen elektrischen Leitfähigkeit und mit beeindruckendem Aufprallwiderstand gegen auftreffende Wasser Tröpfchen vermittelt. Die Ergebnisse dokumentieren die Rolle der Geometrie von Kohlenstoff-Nanopartikel und deren Chemie auf die Leistung der resultierenden superhydrophoben Oberflächen. Zusätzlich wird ein synergistischer Effekt gefunden, welcher die beste Leitfähigkeit und den besten Aufprallwiderstand durch eine Mischung der verwendeten Komponenten garantiert. Zusätzlich wird die gleichzeitige Superhydrophobie und Oleophilie der synthetisierten Oberflächen bewiesen und verwendet um Öl aus einem Öl-Wasser-Gemisch mit Hilfe von Filtern, die mit den oben genannten Oberflächenstrukturen beschichtet sind, herauszufiltern.