



Doctoral Thesis

Continuous drop formation at a capillary tip and drop deformation in a flow channel

Author(s):

Cramer, Carsten

Publication Date:

2004

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004778612> →

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 NO. 15460

Continuous Drop Formation at a Capillary Tip and Drop Deformation in a Flow Channel

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by

Carsten Cramer

Dipl.-Ing. Universität Karlsruhe (TH)
born May 21, 1974
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr.-Ing. Erich J. Windhab, examiner
Dr. Jo Janssen, co-examiner
Dr. Peter Fischer, co-examiner

2004

Abstract

Emulsions are meta-stable systems of liquids dispersed in another immiscible matrix fluid. They are encountered in a large variety of application areas including food, cosmetics, pharmaceuticals and polymers. The mean size and the size distribution of the droplets represent important characteristics of an emulsion which affect the emulsion quality significantly. These physical properties are adjusted by a proper choice of the dispersing apparatus and the process conditions. Examples of well-established dispersing devices include rotor-stator systems or homogenizers. In these operation units droplets are subject to shear and elongational stresses and fragment into smaller droplets provided that the flow-generated stresses are supercritical. Generally, the dispersed droplets underlie a certain size distribution. Recently, the demand for almost monodisperse emulsions has been rising due to new advances in the production of microcapsules or specially structured multiphase systems.

In this study an emulsification process was developed aiming to generate monodisperse emulsions. The disperse phase was injected via a capillary into a co-flowing matrix fluid. The capillary was positioned on the centerline of a flow channel where the velocity of the continuous phase is at a maximum. Two different drop formation mechanisms were distinguished: Either the drops break up close to the capillary - dripping - or they break up from an extended liquid jet - jetting. The effect of the various process parameters on the droplet size depends on the breakup mechanism and was investigated for each flow domain separately. Consequently, the transition point between the flow domains represents an important operating point which was determined experimentally by varying the material and process parameters. In the dripping mode the interplay of the counteracting forces, drag force of the continuous phase and interfacial tension force at the capillary, governs the drop breakup. Through the application of a well-defined flow field of the continuous phase the droplet size could be controlled externally. The effect of the process and material parameters on the mean droplet size and the size distribution in the dripping regime was studied. It could be shown that drop formation at a capillary tip represents a promising technique for the produc-

tion of monodisperse droplets. In the jetting domain the drop breakup occurs due to the propagation of interfacial waves. Besides the droplet size and their size distribution, the jet length and jet diameters represented further parameters to be investigated. It was found that the droplet size distribution is not necessarily as narrow as in the dripping mode. Nevertheless, flow conditions were found where almost monodisperse droplets were generated in the jetting mode, too. The experimental results were compared with theoretical values obtained from stability theories. It is shown that under specific flow conditions the validity of the theory is limited.

This work was embedded in the project "Structure engineering of emulsions by micro-machined elongational flow processing". The focus of this project was on generating, deforming and fixating droplets in order to manipulate the microstructure of a dispersion. Therefore, in addition to investigations on drop formation, this work involves studies on drop deformation in laminar channel flow. Droplets were injected eccentrically into a narrowing flow channel via a specially designed injection tool where monodisperse droplets were generated. Since the droplets left the injection tool on a well-defined streamline, they experienced same stresses and adopted identical shapes along the flow channel. The drop deformation could be correlated to the process and material parameters. Further, the possibility of imprinting large deformations on droplets in laminar channel flow is demonstrated.

In summary, a flow device was constructed where droplets were both generated and deformed. This study provides new insight into the behavior of multiphase systems in flow. A comprehensive study on the drop formation in a co-flowing liquid-liquid system was still lacking although it is of relevance in a large variety of dispersing processes. This work may be regarded as a first experimental step in pointing out the effect of the various parameters on the drop breakup at a capillary in a co-flowing environment.

Zusammenfassung

Emulsionen sind metastabile Fluidsysteme, in welchen eine Flüssigkeit in einer kontinuierlichen Matrixflüssigkeit dispergiert vorliegt. Sie spielen eine wichtige Rolle unter anderem bei der Herstellung und Verarbeitung von Lebensmitteln, Pharmazeutika, Kosmetika oder Polymeren. Die mittlere Grösse und die Grössenverteilung der dispergierten Tropfen sind Charakteristika, welche die Eigenschaften und Qualität einer Emulsion massgeblich beeinflussen. Diese physikalischen Grössen werden durch geeignete Wahl des Dispergierverfahrens und der Prozessbedingungen kontrolliert. Oft werden Rotor-Stator-Systeme oder Hochdruckhomogenisatoren zur Herstellung von Emulsionen verwendet. In diesen Prozessen sind Tropfen einem Scher- und Dehnströmungsfeld ausgesetzt. Dabei werden die Tropfen deformiert und bei hinreichend grossen Spannungen im Strömungsfeld zerteilt. Normalerweise unterliegen die entstehenden Tropfen einer gewissen Grössenverteilung. Aufgrund wissenschaftlicher Fortschritte in der Produktion von Mikrokapseln oder speziell strukturierten Mehrphasensystemen ist die Nachfrage nach Emulsionen mit einer besonders engen Tropfengrössenverteilung in den letzten Jahren stark gestiegen.

In dieser Arbeit wurde ein Emulgierverfahren zur Herstellung monodisperser Emulsionen entwickelt. Hierbei wurde die disperse Phase durch eine Kapillare in eine parallel strömende kontinuierliche Phase eingespritzt. Die Kapillare wurde in der Mitte eines Strömungskanals platziert, wo das parabolische Geschwindigkeitsprofil der Matrixflüssigkeit sein Geschwindigkeitsmaximum aufweist. Es wird zwischen zwei Tropfenaufbruchmechanismen unterschieden: Entweder bilden sich die Tropfen unmittelbar an der Kapillarspitze oder sie brechen am Ende eines Flüssigkeitsstrahls ab. Der Einfluss der Material- und Prozessparameter auf die Tropfengrösse und die Tropfengrössenverteilung hängt stark vom Aufbruchmechanismus ab und wurde deshalb für die beiden Tropfenbildungstypen gesondert untersucht. Demzufolge stellt der Grenzwert zwischen den Aufbrucharten einen wichtigen Betriebspunkt dar, welcher in dieser Arbeit durch Variation der relevanten Parameter experimentell ermittelt wurde. Die Tropfenabscheidung direkt an

der Kapillare wird durch das Zusammenspiel der entgegengerichteten Kräfte, Zugkraft der kontinuierlichen Phase und Grenzflächenspannungskraft an der Kapillare, gesteuert. Durch die Erzeugung eines Strömungsfeldes der äusseren Phase konnte die Tropfengrösse durch geeignete Wahl der Prozessparameter extern eingestellt und kontrolliert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluss der Prozessparameter und Materialeigenschaften auf die Tropfengrösse bei der Tropfenabscheidung an der Kapillare quantifiziert. Desweiteren wurde herausgestellt, dass die Tropfenbildung an der Kapillare eine vielversprechende Technik zur Herstellung monodisperser Emulsionen darstellt. Unter gewissen Strömungsbedingungen bilden sich die Tropfen am Ende eines Flüssigkeitsstrahls. Hier führt die Ausbreitung von Kapillarwellen an der Grenzfläche zur Tropfenabscheidung. Neben der Tropfengrösse und Tropfengrössenverteilung bildeten die Länge und der Durchmesser des Flüssigkeitsstrahls weitere Grössen, die in dieser Arbeit untersucht wurden. Es wurde gezeigt, dass die Grössenverteilung der Tropfen, welche durch den Aufbruch eines Flüssigkeitsstrahls entstehen, nicht notwendigerweise genauso eng ist wie bei der Tropfenabscheidung unmittelbar an der Kapillare. Dennoch wurden Strömungsbedingungen herausgearbeitet, unter welchen sich fast monodisperse Tropfen am Ende des Flüssigkeitsstrahls bildeten. Desweiteren konnten die experimentellen Ergebnisse mit Resultaten einer Stabilitätstheorie für Flüssigkeitsstrahlen verglichen werden. Dabei wurden Gültigkeitsgrenzen der Theorie klar aufgezeigt.

Diese Arbeit war Bestandteil eines Projektes, in welchem Tropfen erzeugt, deformiert und in verformten Zustand fixiert werden sollten, mit dem Ziel, die Mikrostruktur einer Dispersion gewünscht zu beeinflussen. Aus diesem Grund stellte die Tropfendeformation in einem laminaren Strömungsfeld ein weiteres Forschungsgebiet dar, welches im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurde. Hierfür wurden monodisperse Tropfen durch eine speziell konstruierte Einspritzvorrichtung exzentrisch in einen sich verengenden Strömungskanal eingespritzt. Da die Tropfen die Einspritzvorrichtung auf einer genau definierten Strömungslinie verliessen, erfuhren alle Tropfen dieselben Spannungen und Deformationszustände entlang des Strömungskanals. Korrelationen zwischen Tropfendeformation und Material- und Prozessparametern konnten herausgearbeitet werden. Desweiteren wurde demonstriert, dass es möglich ist, den Tropfen in einer Kanalströmung sehr grosse Deformationen aufzuprägen. Somit ist es gelungen, eine Strömungszelle zu konstruieren, in welcher monodisperse Tropfen kontinuierlich produziert und anschliessend deformiert wurden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden neue Einblicke in das Verhalten von Mehrphasensystemen in Strömung gewonnen. Eine umfassende experimentelle Untersuchung der Tropfenabscheidung an der Kapillare in einem Strö-

mungsfeld der kontinuierlichen Phase fehlte bis zur Fertigstellung dieser Arbeit gänzlich, obwohl fundiertes Wissen auf diesem Gebiet essentiell für viele Dispergierprozesse ist. Die vorliegende Arbeit kann als ein erster experimenteller Schritt angesehen werden, welcher den Einfluss der zahlreichen Parameter auf die Tropfenabscheidung an einer Kapillare in einem Strömungsfeld beschreibt.