

Verfahrenstechnik

Philipp Schmitt

**Flüssig-flüssig Mehrphaseströmung
in Zentrifugalpumpen**

**SHAKER
VERLAG**

Flüssig-flüssig Mehrphasenströmung in Zentrifugalpumpen

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Philipp Schmitt

aus Merzig

Datum der wissenschaftlichen Aussprache: 20.05.2022

Dekan: Prof. Dr.-Ing. Tilmann Beck

Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Martin Böhle

1. Berichterstatter: Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hans-Jörg Bart

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Andreas Jupke

Kaiserslautern 2022

D 386

Berichte aus der Verfahrenstechnik

Philipp Schmitt

**Flüssig-flüssig Mehrphasenströmung
in Zentrifugalpumpen**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Düren 2022

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8857-1

ISSN 0945-1021

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Kaiserslautern.

Herr Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hans-Jörg Bart hat als Leiter des Lehrstuhls für Thermische Verfahrenstechnik gemeinsam mit Herr Prof. Dr.-Ing. Andreas Jupke die Arbeit angeregt und mich zur selbstständigen und zielorientierten Bearbeitung angeleitet. Ich danke den beiden herzlich für den wissenschaftlichen Rat.

Meine Kollegen, Diplom- und Studienarbeiter haben mich sehr bei der Durchführung der Arbeit unterstützt. Besonders danken möchte ich meinen Kollegen Adam Mühlbauer und Dirk Otter sowie meinen studentischen Hilfskräften Ellen Friedrich und Marc Klein, die mich durch ihre freundschaftliche Hilfe unterstützt haben.

Der Forschungsvereinigung Forschungs-Gesellschaft Verfahrens-Technik e.V., der AiF sowie dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie danke ich für die Förderung des Projektes.

Allen voran möchte ich meiner lieben Sandra, die mich in der entscheidenden finalen Phase des Zusammenschreibens unterstützt hat, danken, sowie meiner Schwiegermutter, meinen lieben Eltern und meinen Geschwistern.

Birgden, im September 2022

Philipp Schmitt

Abstract

Centrifugal pumps play an essential role in the chemical and petrochemical industry. They convey liquid flows, which makes many continuously and discontinuously driven processes in chemical industry possible. The design of this fluid machinery is generally based on pure water flow and, in addition to the pump speed, is dependent on the volume flow rate and the pump head. However, centrifugal pumps are also used in processes in which liquid-liquid mixtures are conveyed. The turbulent flow conditions inside the centrifugal pumps cause mixing processes of the liquid-liquid flow, which can have both negative and positive effects.

The present work investigates and quantifies droplet breakage of non-miscible liquid-liquid flows within centrifugal pumps. For this purpose, two transparent model pumps and a test rig were designed and built. The transparent pump design allowed optical investigations of local droplet breakage phenomena in the impeller region by means of high-speed analysis. In addition, the test rig enabled integral measurements of liquid-liquid hydrodynamics downstream of the centrifugal pumps by means of optical probe measurement technology, the measurement of the pump differential pressure, the mixture flow rate and the phase fraction as well as the torque acting on the pump coupling. The measurements were carried out for paraffin oil-water mixtures, where the kinematic viscosity of the dispersed phase paraffin oil was in the range of 0.5 and 213 mm² s⁻¹ and the interfacial tension was approx. 40 mN m⁻¹. The influence of pump geometry, i. e. the number of blades and the impeller diameter as well as the influence of the operating parameters, i. e. the mixture flow rate, the dispersed phase fraction and the pump speed, were investigated.

Based on the experimental results, correlations could be given for the Sauter mean diameter as well for the droplet size distributions in dependence of the Weber-number and the energy dissipation rate, taking into account the influence of pump speed, mixture flow rate and dispersed phase viscosity. Theoretical analysis of the pump head losses in the centrifugal pumps at the investigated operating points confirm the experimental investigations. In addition, CFD-models of the centrifugal pumps were generated and validated using experimental data of integral flow variables for different operating points. The energy dissipation rate was correlated with the maximum stable droplet diameter, subsequently simulative conclusions could be drawn about the droplet breakage.

The combination of experiment, theoretical calculation and CFD enables a description of the local and global phenomena of drop breakage of the liquid-liquid flow within centrifugal pumps on different scales. Thus, local characteristics of the droplet breakage in

the zones of the pump blade inlet and outlet as well as the global liquid-liquid hydrodynamics are highlighted. The results of the investigations suggest that the approach used here can be transferred to other fluids and centrifugal pumps on an industrial scale.

Kurzfassung

Der Zentrifugalpumpe kommt eine bedeutsame Rolle in der chemischen und petrochemischen Industrie zu. Sie treibt Flüssigkeitsströmungen an, wodurch viele kontinuierlich und diskontinuierlich betriebene verfahrenstechnische Prozesse möglich gemacht werden. Die Auslegung dieser Strömungsmaschine basiert im Allgemeinen auf der reinen Wasserströmung und ist neben der Drehzahl von dem Fördervolumenstrom und dem Förderdruck abhängig. Ferner werden Zentrifugalpumpen jedoch auch in verfahrenstechnischen Prozessen eingesetzt in welchen Flüssig-flüssig-Gemische transportiert werden. Dabei kommt es durch die Laufradrotation und generell durch turbulente Strömungsbedingungen im Inneren der Zentrifugalpumpen zu Mischvorgängen der Flüssig-flüssig-Strömung, die sich sowohl negativ als auch positiv auf die Verfahren auswirken können.

Die vorliegende Arbeit untersucht und quantifiziert den Tropfenbruch von nicht ineinander mischbaren Flüssig-flüssig-Strömungen in Zentrifugalpumpen. Zu diesem Zweck wurden zwei transparente Modellpumpen und ein Prüfstand konstruiert. Durch die transparente Pumpenbauweise konnten optische Untersuchungen lokaler Tropfenbruchphänomene in der Laufradregion mittels Hochgeschwindigkeitsanalyse angestellt werden. Darüber hinaus ermöglichte der Prüfstand integrale Messungen zur Flüssig-flüssig-Hydrodynamik stromabwärts der Zentrifugalpumpen mittels Sonden-Messtechnik, die Erfassung des Pumpen-Differenzdrucks, des Gemischvolumenstroms und des Phasenanteils sowie des an der Pumpenkupplung wirkenden Drehmoments. Die Messungen wurden für Paraffinöl-Wasser-Gemische durchgeführt, wobei die kinematische Viskosität der dispersen Phase Paraffinöl zwischen $0,5$ und $213 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ und die Grenzflächenspannung bei ca. 40 mN m^{-1} lag. Es wurden der Einfluss der geometrischen Größen Schaufelanzahl und Laufraddurchmesser sowie der Einfluss der Betriebsparameter Gemischvolumenstrom, Dispersphasenanteil und Pumpendrehzahl untersucht.

Auf Basis der experimentellen Ergebnisse konnten Korrelationen für den Sauter-Durchmesser und die Tropfengrößenverteilungen mittels Weber-Zahl und Energiedissipationsrate unter Berücksichtigung des Einflusses der Pumpendrehzahl, des Gemischvolumenstroms und der Dispersphasenviskosität gegeben werden. Theoretische Berechnungen zur Analyse der Förderhöhenverluste in den untersuchten Zentrifugalpumpen stützen die experimentellen Untersuchungen. Darüber hinaus wurden CFD-Modelle der Zentrifugalpumpen erstellt und anhand experimentell ermittelter integraler Strömungsgrößen für verschiedene Betriebspunkte validiert. Die Energiedissipationsrate

wurde mit dem maximal stabilen Tropfendurchmesser korreliert, sodass simulativ Rückschlüsse auf den Tropfenbruch getätigt werden konnten.

Die Kombination von Experiment, theoretischer Berechnung und Simulation ermöglicht eine Beschreibung der Einzel- und Gesamtphänomene des Tropfenbruchs der Flüssig-Flüssig-Strömung in Zentrifugalpumpen in verschiedenen Maßstäben. So werden lokale Besonderheiten des Tropfenbruchs in den Zonen des Schaufelein- und -austritts als auch die globale Flüssig-flüssig-Hydrodynamik beleuchtet. Die Ergebnisse der Untersuchungen legen nahe, dass die hier angewendete Vorgehensweise auf weitere Stoffsysteme und Zentrifugalpumpen im industriellen Maßstab übertragen werden kann.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	III
Abstract	V
Kurzfassung.....	VII
Inhaltsverzeichnis.....	IX
1 Motivation.....	1
2 Zielsetzung.....	2
3 Pumpen	3
3.1 Klassifizierung von Pumpen.....	3
3.1.1 Verdrängerpumpen	5
3.1.2 Kreislumpen	5
3.2 Die Pumpenkennlinie und -regelung.....	7
3.3 Dimensionslose Kennzahlen	9
3.4 Die Laufradströmung radialer Kreislumpen	9
3.4.1 Stromfädentheorie	11
3.4.2 Die theoretische Förderhöhe	11
3.4.3 Minderleistung und Schaufelversperrung	13
3.4.4 Die Rotationswirkung	16
3.4.5 Die Wirkung der Meridiankrümmung	20
3.4.6 Einfluss des Fördermediums auf die Kennlinie	20
3.4.7 Verlustarten, Leistung und Wirkungsgrad	22
3.4.8 Bewegungsgleichung der Einphasenströmung	29
4 Disperse Mehrphasenströmung in Kreislumpen.....	30
4.1 Allgemeine Grundlagen der Mehrphasenströmung	30
4.1.1 Partikelgrößenverteilung	31
4.1.2 Mittelwerte und Kenngrößen von Verteilungen	33
4.1.3 Strömungsparameter zur Beschreibung eines Zweiphasengemischs	35
4.2 Disperse Mehrphasenströmung in Zentrifugalpumpen	36
4.2.1 Fest-flüssig-Strömung.....	36
4.2.2 Kavitation.....	39
4.2.3 Gas-flüssig- / Flüssig-flüssig-Gemische	40
4.3 Bewegung von Einzelpartikeln.....	48
4.3.1 Die Widerstandskraft	49
4.3.2 Die Druck- und Volumenkraft.....	51
4.3.3 Die virtuelle Massenkraft.....	52

4.3.4	Die Querkraft durch Partikelrotation.....	52
4.3.5	Die Querkraft in Scherströmungen	53
4.4	Bewegung von Partikelschwärmen	54
5	Experimentelle Untersuchungen	55
5.1	Aufbau Prüfstand TUK	55
5.2	Untersuchte Zentrifugalpumpen.....	57
5.3	Messeinrichtung.....	61
5.3.1	Bildaufnahme	62
5.3.2	Bildanalyse	64
5.4	Stoffsysteme	68
5.5	Experimente.....	69
5.6	Ergebnisse und Diskussion	71
5.6.1	Pumpenkennlinie Fristam FPE 3402	71
5.6.2	Variation des Laufraddurchmessers	74
5.6.3	Variation des Volumenstroms	76
5.6.4	Variation der Drehzahl	80
5.6.5	Modellierung des Sauter-Durchmessers und der TGV für verdünnte Flüssig-flüssig-Strömungen	85
5.6.6	Variation der Dispersphasenviskosität	93
5.6.7	Variation des Dispersphasenanteils.....	96
5.6.8	Variation der Schaufelzahl	98
6	Numerische Untersuchung	101
6.1	Vernetzung	102
6.2	Rechengebiet und Randbedingungen	102
6.3	Wahl des Rechnernetzes	103
6.4	Ergebnisdiskussion.....	105
7	Zusammenfassung.....	111
8	Ausblick.....	113
9	Literaturverzeichnis.....	115
10	Anhang	121
10.1	Experimentelle Daten zu Kapitel 5 und 6.....	121
10.2	Veröffentlichungen	128
10.3	Vorträge.....	128
10.4	Poster.....	129
10.5	Auszeichnungen.....	130
10.6	Betreute studentische Arbeiten	130
10.7	Lebenslauf	132