

---

# **Forschungsreihe der FH Münster**

Die Fachhochschule Münster zeichnet jährlich hervorragende Abschlussarbeiten aus allen Fachbereichen der Hochschule aus. Unter dem Dach der vier Säulen Ingenieurwesen, Soziales, Gestaltung und Wirtschaft bietet die Fachhochschule Münster eine enorme Breite an fachspezifischen Arbeitsgebieten. Die in der Reihe publizierten Masterarbeiten bilden dabei die umfassende, thematische Vielfalt sowie die Expertise der Nachwuchswissenschaftler dieses Hochschulstandortes ab.

---

Michael Ehrentraut

# Numerische Untersuchungen zur Mischgüte beim Rühren von viskoplastischen Fluiden

Strömungssimulation  
für die Analyse von gerührten,  
rheologisch komplexen Fluiden

 Springer Spektrum

Michael Ehrentraut  
Fachhochschule Münster, Deutschland

Forschungsreihe der FH Münster  
ISBN 978-3-658-14533-0 ISBN 978-3-658-14534-7 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-658-14534-7

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

Springer Spektrum

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist Teil von Springer Nature  
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

## Zusammenfassung

In der Industrie werden Fluide mit komplexen rheologischen Eigenschaften eingesetzt, die hohe Anforderungen an die verwendete Rührtechnik stellen. In der vorliegenden Arbeit wird die Mischgüte beim Rühren viskoplastischer Fluide untersucht, um die Leistungsfähigkeit eines Rührprozesses bewerten zu können. Hierfür wird die numerische Strömungssimulation eingesetzt. Grundlage für diese Untersuchung ist die Analyse der beim Rühren erzeugten Kavernen, welche durch das pseudoplastische Fließverhalten der Fluide unter Einfluss von Scherung erzeugt werden.

Die Simulationen nutzen das stationäre Multiple Reference Frame-Modell zur Abbildung der Rührerrotation. Die Kavernengrenze wird auf Grundlage eines Geschwindigkeitskriteriums definiert. Um die Leistungsaufnahme beim Rühren nicht-Newton'scher Fluide in Form einer Leistungscharakteristik beschreiben zu können, wird die Metzner-Otto-Methode angewendet.

Die Analyse der Simulationsergebnisse zeigt, dass die nicht-Newton'sche Leistungscharakteristik aus den Simulationen der experimentellen Leistungscharakteristik in [Pakzad 2007] gleicht. Ebenso wird der experimentelle Kavernendurchmesser durch die Simulationen passend wiedergegeben.

Durch die Analyse der Scherung im Rührsystem kann geschlossen werden, dass die Kaverne einen Bereich guter Durchmischung abbildet. Im laminaren Strömungsregime nimmt das Kavernenvolumen nur einen geringen Anteil des Gesamtbehälters ein. Das Kavernenvolumen steigt bei zunehmender Reynolds-Zahl an. Eine effektive Durchmischung des gesamten Rührbehälters ist somit nur bei erhöhten Reynolds-Zahlen im Übergangsbereich möglich.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Strömungsmechanische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1.1	Kontinuitätsgleichung	3
2.1.2	Impulserhaltung	3
2.1.3	Rheologie	4
2.1.4	Turbulenzmodellierung	8
<b>2.2</b>	<b>Experimentelle Grundlagen</b>	<b>9</b>
2.2.1	Leistungsaufnahme beim Rühren	9
2.2.2	Flüssigkeitsförderung von Rührern	11
2.2.3	Experimentelle Messsysteme	11
2.2.4	Kavernenmodelle	14
<b>2.3</b>	<b>Numerische Grundlagen</b>	<b>16</b>
2.3.1	Räumliche Diskretisierung	16
2.3.2	Zeitliche Diskretisierung	16
2.3.3	Eingesetzte Löseinstellungen	17
2.3.4	Rotationsmodelle	17
2.3.5	Berechnung der Leistungsaufnahme	23
<b>3</b>	<b>Numerisches Vorgehen</b>	<b>25</b>
<b>3.1</b>	<b>Viskositätsmodellierung</b>	<b>25</b>
<b>3.2</b>	<b>Kavernengrenzkriterien</b>	<b>27</b>
3.2.1	Geschwindigkeitskriterium	28
3.2.2	Scherratenkriterium	28
<b>3.3</b>	<b>Auswertemethodik zum Kavernendurchmesser</b>	<b>28</b>
<b>4</b>	<b>Simulation Laborrührer Scaba 6SRGT</b>	<b>31</b>
<b>4.1</b>	<b>Experimenteller Aufbau</b>	<b>31</b>
<b>4.2</b>	<b>Räumliche Diskretisierung durch ein Rechengitter</b>	<b>32</b>
<b>4.3</b>	<b>Rheologie</b>	<b>33</b>
<b>4.4</b>	<b>Randbedingungen</b>	<b>34</b>
<b>4.5</b>	<b>Studie zur Rechengitterunabhängigkeit</b>	<b>35</b>
<b>4.6</b>	<b>Leistungsaufnahme des Rührsystems</b>	<b>37</b>
<b>4.7</b>	<b>Simulative Bestimmung der Metzner-Otto-Konstanten</b>	<b>38</b>
4.7.1	Bestimmung über die Leistungscharakteristiken	38

4.7.2 Bestimmung durch die Auswertung gemittelter Scherraten .....	41
<b>4.8 Förderkapazität .....</b>	<b>42</b>
<b>4.9 Kavernengrenzgeschwindigkeit .....</b>	<b>43</b>
<b>4.10 Kavernendurchmesser .....</b>	<b>45</b>
<b>4.11 Durchmischungsbeurteilung anhand des Kavernenkriteriums .....</b>	<b>47</b>
4.11.1 Geschwindigkeitsprofile .....	47
4.11.2 Scherratenprofile .....	49
4.11.3 Kavernenscherrate .....	50
<b>4.12 Kavernenvolumen .....</b>	<b>52</b>
<b>4.13 Kavernenform .....</b>	<b>53</b>
<b>4.14 Einfluss der Interfacelage .....</b>	<b>55</b>
4.14.1 Leistungsaufnahme .....	57
4.14.2 Kavernenvolumen .....	58
<b>5 Fazit und Ausblick .....</b>	<b>59</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>63</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>67</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>69</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>73</b>

### **Lesehinweis für die Printversion:**

Die ursprünglich farbig angelegten Abbildungen stehen auf der Produktseite zu diesem Buch unter [www.springer.com](http://www.springer.com) zur Verfügung.

## Nomenklatur

Skalare Größen werden als blanke Symbole  $\phi$ , Vektoren mit Pfeildarstellung  $\vec{\phi}$  und Tensoren zweiter Stufe mit doppeltem Überstrich  $\overline{\overline{\phi}}$  dargestellt. Mathematische Operatoren werden entsprechend der üblichen nachfolgenden Definitionen verwendet, wobei  $\vec{e}_i$  einen Einheitsvektor darstellt:

$$\nabla = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \vec{e}_i = \begin{pmatrix} \partial/\partial x \\ \partial/\partial y \\ \partial/\partial z \end{pmatrix}$$

$$\nabla^2 = \nabla \cdot \nabla = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} \vec{e}_i = \begin{pmatrix} \partial^2/\partial x^2 \\ \partial^2/\partial y^2 \\ \partial^2/\partial z^2 \end{pmatrix}$$

$$\nabla \phi = \text{grad} \phi = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \vec{e}_i = \begin{pmatrix} \partial \phi / \partial x \\ \partial \phi / \partial y \\ \partial \phi / \partial z \end{pmatrix}$$

$$\nabla \cdot \vec{\phi} = \text{div} \vec{\phi} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \vec{\phi}_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \phi_x}{\partial x} + \frac{\partial \phi_y}{\partial y} + \frac{\partial \phi_z}{\partial z}$$

$$\nabla \vec{\phi} = \text{grad} \vec{\phi} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \phi_j}{\partial x_i} \vec{e}_i \vec{e}_j = \begin{pmatrix} \partial \phi_x / \partial x & \partial \phi_x / \partial y & \partial \phi_x / \partial z \\ \partial \phi_y / \partial x & \partial \phi_y / \partial y & \partial \phi_y / \partial z \\ \partial \phi_z / \partial x & \partial \phi_z / \partial y & \partial \phi_z / \partial z \end{pmatrix}$$

$$\vec{\phi} \times \vec{\psi} = \begin{pmatrix} \phi_2 \psi_3 - \phi_3 \psi_2 \\ \phi_3 \psi_1 - \phi_1 \psi_3 \\ \phi_1 \psi_2 - \phi_2 \psi_1 \end{pmatrix}$$



## Abkürzungsverzeichnis

CFD	Computational Fluid Dynamics	PLIF	Planar Laser-Induced Fluorescence
ERT	Electrical Resistance Tomography	SMM	Sliding Mesh-Modell
FVM	Finite-Volumen-Methode	SRF	Single Reference Frame
MRF	Multiple Reference Frame	UDF	User Defined Function
		UV	Ultraviolett

### Griechische Symbole

$\nabla$	Nabla-Operator	$\bar{\gamma}_{\text{Stag.zone}}$	Scherrate der Stagnationszone, $s^{-1}$
$\mu$	scheinbare, nicht-Newton'sche Viskosität, $N s m^{-2}$	$\eta$	dynamische Viskosität, $N s m^{-2}$
$e_i$	Einheitsvektor	$\rho$	Dichte, $kg m^{-3}$
$\dot{\gamma}$	Scherrate, $s^{-1}$	$\tau$	Scherspannung, $N m^{-2}$
$\dot{\gamma}_c$	Kritische Scherrate, $s^{-1}$	$\phi$	Transportgröße
$\bar{\gamma}_{\text{Kaverne}}$	Kavernenscherrate, $s^{-1}$	$\psi$	beliebiger Vektor
		$\omega$	Winkelgeschwindigkeit, $rad s^{-1}$

### Lateinische Symbole

A	Fläche, $m^2$	r, $\theta$ , z	Zylindrische Koordinaten
d	Interfacedurchmesser, m	$r_c$	Kavernenradius, m
D	Rührerdurchmesser, m	$S_m$	Quellterm, $kg m^{-3} s^{-1}$
$D_c$	Kavernendurchmesser, m	t	Zeit, s
F	Kraft, Körperkräfte, Nm	T	Rührbehälterdurchmesser, m
h	Interfacehöhe, m	v	Geschwindigkeit, $m s^{-1}$
H	Rührbehälterhöhe, m	$v_c$	Kavernengrenzgeschwindigkeit, $m s^{-1}$
I	Einheitstensor	$V_c$	Kavernenvolumen, $m^3$
$k_{MO}$	Metzner-Otto-Konstante	$V_{fl}$	Flüssigkeitsvolumen, $m^3$
M	Drehmoment, Nm	x, y, z	Kartesische Koordinaten
N	Rührerdrehzahl, $s^{-1}$		
R	Rührbehälterradius, m		