

# Koaxialrührwerk zum Rühren hochviskoser und nicht-Newtonscher Medien

M. Heiser<sup>1</sup>, J. Ritter<sup>2</sup>, R. Sperling, M. Kraume<sup>3</sup>

## Abstract

Vorgestellt werden Ergebnisse aus experimentellen und numerischen Untersuchungen bezüglich einer koaxialen Anordnung aus Schrauben- und Wendelrührer. Der Einsatz dieser Kombination ist für anspruchsvolle Anwendungen mit höherer Viskosität und bei Vorliegen von strukturviskosem Verhalten geeignet.

## 1 Problemstellung

Die Verfahren der industriellen Praxis sind zu einem großen Anteil durch Unterschiede in den Zustandsgrößen der verarbeitenden Stoffe bzw. Stoffgemische geprägt, im ungünstigsten Fall während des gesamten Prozesses. Um eine marktfähige Qualität zu gewährleisten, ist eine Vergleichmäßigung bestimmender Stoffeigenschaften unerlässlich. Der dazugehörige verfahrenstechnische Schritt wird als Homogenisieren bzw. Mischen bezeichnet.

Ein Teilgebiet der angewandten Mischmethoden umfasst das Rühren, bei dem ein rotierendes Mischorgan die Ausgleichsvorgänge auf mikroskopischer Ebene durch makroskopische Transportvorgänge des Fluids stark unterstützt. Mit zunehmender Zähigkeit des zu rührenden Fluids steigen allerdings die Anforderungen an den Rührer. Dem sich bei üblichen Fluidgeschwindigkeiten unter diesen Stoffeigenschaften ausbildenden laminaren Strömungsprofil mangelt es an kleinskaligen Wirbeln, die ansonsten in turbulenten Strömungen zu kurzen Mischzeiten führen. Zusätzliche Anforderungen an das Rührorgan stellen strukturviskose Fluide, da sich in diesen die unmittelbare Reichweite des Rührers verringert.

Das Rührorgan sollte deshalb auf einen wesentlich größeren Teil des Behältervolumens direkt einwirken, als bei Fluiden niedriger Viskosität. Eine solche Strategie wurde mit dem untersuchten Koaxialrührwerks aus Wendel und Schraube verfolgt. Im vorliegenden Artikel werden Ergebnisse vorgestellt, die aus den experimentellen und numerischen Untersuchungen gewonnen wurden.

## 2 Hintergründe

Dem Ingenieur stehen heute eine ganze Reihe von Methoden zur Charakterisierung und Auslegung von Einrührersystemen zur Verfügung, insbesondere für niedrigviskose und Newtonsche Fluide. Um vergleichende Aussagen verschiedener Rührertypen vornehmen zu können, wird die REYNOLDSzahl

$$Re = \frac{\rho \cdot N \cdot d^2}{\eta} \quad (1)$$

als Bezugsgröße verwendet.

Im Hinblick auf den Mischvorgang sind in technischer und ökonomischer Hinsicht der notwendige Energie- und Zeitaufwand interessant. Erster lässt sich beispielsweise mit der NEWTONzahl beschreiben

---

<sup>1</sup> Hochschule Anhalt (FH), Köthen, Fachbereich Angewandte Biowissenschaften und Prozesstechnik

<sup>2</sup> Bayer Technology Services GmbH, Leverkusen, PT-RPT High Viscosity, Mixing & Reactor

<sup>3</sup> Technische Universität Berlin, Fakultät III: Prozesswissenschaften, Institut für Verfahrenstechnik

$$Ne = \frac{P}{\rho \cdot N^3 \cdot d^5} = \frac{2 \cdot \pi \cdot M}{\rho \cdot N^2 \cdot d^5}, \quad (2)$$

die den Leistungseintrag des Rührorgans charakterisiert. Für den Vergleich der Mischwirkung von Rührorganen kann der ebenfalls dimensionslose Mischzeitbeiwert

$$c_H = N \cdot t_M \quad (3)$$

herangezogen werden.

Diese Standardgleichungen sind für monoaxiale Einzelrührer bzw. Mehrrührersysteme mit gleichen Durchmessern der einzelnen Organe geeignet. Der Bezug auf die charakteristischen Werte Drehzahl und Durchmesser in den Kennzahlen erschwert allerdings die Übertragung auf Systeme mit Rührorganen unterschiedlicher Durchmesser bzw. bei Systemen mit mehreren Achsen und/oder unterschiedlichen Drehzahlen. Zu Klären ist hierbei, ob und wie eine Kombination der kennzeichnenden Größen vorgenommen werden kann.

In der Literatur sind kaum Untersuchungen zum Thema Koaxialrührwerke zu finden. Unter den wenigen Veröffentlichungen treten vor allem die Ergebnisse um die Forschungsgruppe von TANGUY hervor. In einer Veröffentlichung von 2003 [1] wurden von FOUCALT, ASCANIO, TANGUY die folgenden Formeln für die oben genannten Kennzahlen

$$Re_{a+i} = \frac{\rho \cdot (N_i - N_a) \cdot d_i^2}{\eta}, \quad (4)$$

$$Ne_{a+i} = \frac{P_{gesamt}}{\rho \cdot (N_i - N_a)^3 \cdot d_i^5}, \quad (5)$$

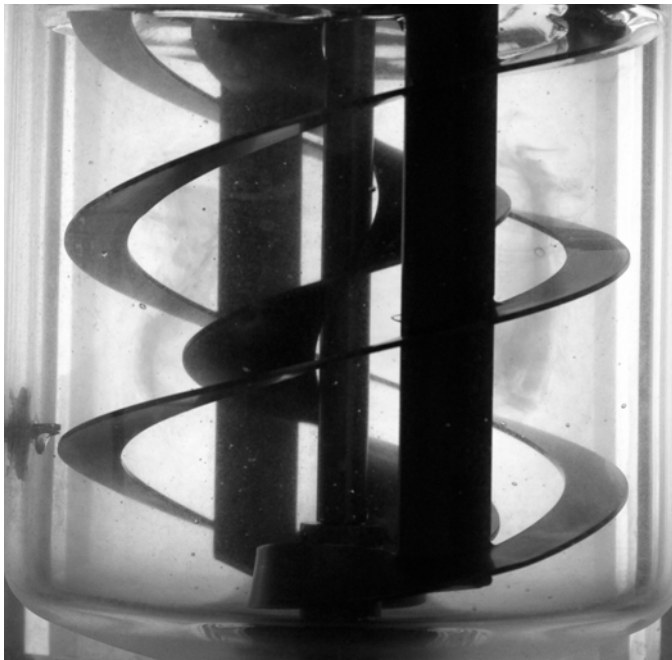
$$c_H = (N_i - N_a) \cdot t_M = A \cdot (Re_{i+a})^a \quad (6)$$

vorgelegt. Für den Fall des Gegenlaufs erfolgte eine analoge Formulierung mit der Summe der Drehzahlen von Innen- und Außenrührer. Für nicht-Newtonsche Fluide wurde von FOUCALT et al. eine Erweiterung der Gleichung (4) um den Fließindex  $n$ , entsprechend des Fließgesetzes nach OSTWALD-DE WAELE  $\eta = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$ , vorgenommen

$$Re_{a+i} = \frac{\rho \cdot (N_i - N_a)^{(2-n)} \cdot d_i^2}{\eta}. \quad (7)$$

### 3 Experimente

Untersucht wurde ein Koaxialrührwerk in der Kombination Wendel- und Schraubenrührer mit drei verschiedenen Durchmesser des Innenrührers,  $d_i/d_a = \{0,34; 0,45; 0,56\}$ , bei einem Füllhöhenverhältnis  $H/D = 1$ . Angetrieben wurden die Einzelrührer durch voneinander unabhängige Antriebe, die einen Betrieb im Gegen- und Gleichlauf sowie eine Änderung der Richtung der axialen Umförderung ermöglichten. Im Unterschied zu den vorgestellten Ergebnissen von FOUCALT et al. [1], in denen eine Kombination aus Ankerrührer und zentral wirkenden Impeller-Typen (Rushton-, Sevin-, Hybrid-Rührer) betrachtet wurde, waren Schrauben- und Wendelrührer konstruktiv über die gesamte Füllhöhe ausgeführt, wie dies exemplarisch in Abb. 1 zu erkennen ist. Links unten im Bild ist zudem der günstige Zugabepunkt für die Entfärbungsversuche zu erkennen.



**Abb. 1** DN200-Versuchsbehälter mit dem Wendel-/Schrauben-Koaxialrührer; Beispiel für die Entfärbung im Großteil des Behälters nach 34s Zugabe- und Rührzeit in einer 1,5%igen CMC-Lösung bei Gegenlauf und einem Drehzahlverhältnis von  $n_i/n_a = 6$ ; Verbleib von langsam entfärbenden Zonen im Zwischenraum zwischen den Rührern

Die Experimente bestanden aus Messungen der an den Antriebswellen anliegenden Drehmomente und der Bestimmung der notwendigen Zeit zur Entfärbung eines Indikators bei einer Neutralisationsreaktion. Variiert wurde in den Versuchen Drehzahlniveau und -verhältnis, der Betriebsmodi Gegen- und Gleichlauf und die Förderrichtung der Primärströmung. Als Testsubstanzen dienten Glycerin als Vertreter der Newtonschen Fluide und 0,75%ige und 1,5%ige CMC-Lösungen als strukturviskose Repräsentanten.

Die Messung der Drehmomente erfolgte mittels Messwellen der Fa. HBM zum einem im jeweiligen Fluid und zum anderen in Luft, so dass die Messwerte um die Reibmomente der Wellenlager korrigiert werden konnten.

Für die Mischzeitversuche fand die Entfärbung des Indikators Phenolphthalein bei der Neutralisation von Natronlauge mit Salzsäure mit einem Säureüberschuss von 5% Verwendung. Gemessen wurden hier zwei Zeiten:

1. soweit sich dies feststellen ließ, bis zur Entfärbung des überwiegenden Behälterinhalts, aber verbleibenden Zonen, in denen die Entfärbung langsamer ablief;
2. bis zur vollständigen Entfärbung des Behälterinhalts

Weiterhin erfolgten Messungen der axialen und tangentialen Geschwindigkeitskomponente des Strömungsfeldes mittels eines Zweikomponenten-LDA in einem Punktraster bei verschiedenen Radien und Höhenkoordinaten im Behälter. Diese Messungen wurden für die Validierung numerischer Simulationen verwandt.

## 4 Numerische Simulationen

Zentrales Anliegen der durchgeführten numerischer Simulationen war die Klärung der Frage, mit welcher Güte sich die experimentellen Messwerte mit Hilfe der CFD nachvollziehen lassen. Die Motivation hierzu liegt in der möglichen Reduktion experimenteller Untersuchungen zugunsten von Simulationen, um den Aufwand für die Auslegung größerer Behälter bzw. bei Änderung der geometrischen Verhältnisse der Rührer

zu verringern.

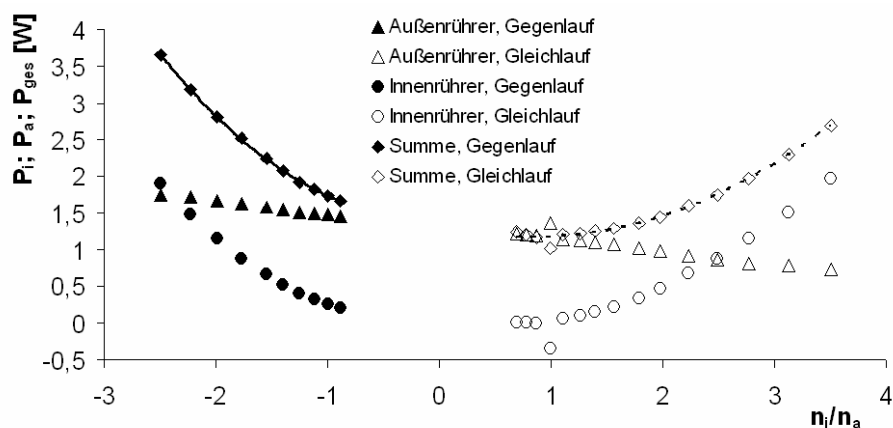
Verwendet wurde das Simulationspaket CFX für parallel verteilte Berechnungen auf einem 16-CPU-Cluster. Die Geometrie wurde durch etwa 5 Mio. unstrukturierte finite Volumenelemente aufgelöst und die Rotation der Rührer mit einem „Multiple Frame of Reference“(MFR)-Ansatz modelliert. Eine zusätzliche Transportvariable ermöglichte es, den Mischvorgang in zeitaufgelösten Simulationen zu nachzustellen.

Ausführliche Details zu Voruntersuchungen, den angewandten Modelle, Simulationsverfahren und den Ergebnissen der Validierung finden sich in früheren Veröffentlichungen von 2004 [2] und 2005 [3].

## 5 Ergebnisse und Diskussion

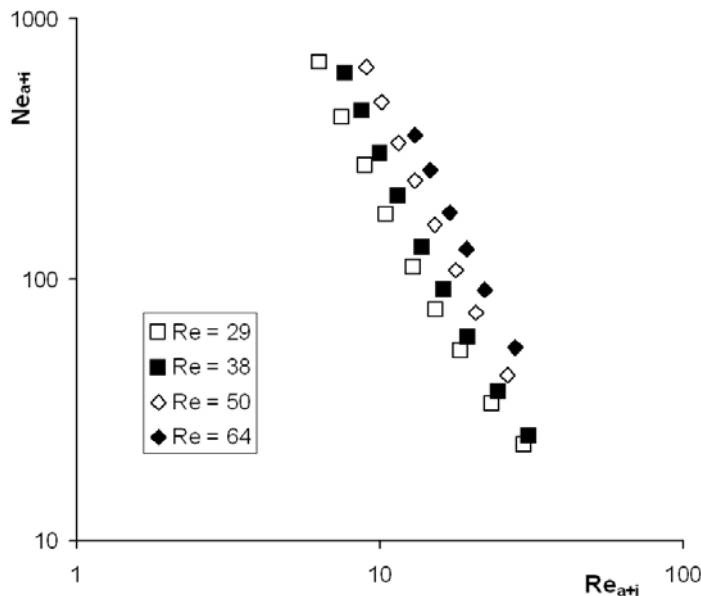
### 5.1 Experimente

Die Auswertung zur Leistungsaufnahme der Einzelrührer zeigte überwiegend jeweils lineare Abhängigkeiten von der Drehzahl des jeweils anderen Rührers. Dieses Verhalten wurde für beide Betriebsmodi – Gegen- und Gleichlauf – festgestellt. Für kleine Drehzahlverhältnisse  $n_i/n_a < 2$  weist die Charakteristik des Innenrührers einen potenziellen Verlauf auf, ein Beispiel dieser Daten findet sich in Abb. 2. Die Summe der Leistungseinträge beider Rührer ließ sich mit einem Polynom 2. Ordnung annähern.



**Abb. 2** Gegenüberstellung des Leistungseintrags der Einzelrührer und deren Summe für die beiden Betriebsmodi Gegen- und Gleichlauf am Beispiel der Daten für die 0,75%ige CMC-Lösung für eine Außendrehzahl von  $90\text{min}^{-1}$  des größten Innenrührerdurchmessers

In der kombinierten Darstellung der Daten nach Gleichung (4) und (5) zeigte sich, dass das von FOUCALT et al. vorgestellte Konzept nicht auf die Ergebnisse der Untersuchungen übertragbar ist. Die in Abb. 3 beispielhaft für einen Datensatz bei Gegenlauf und ein Newtonsches Fluid aufgetragenen Werte lassen sich nicht einer einzigen Kurve zusammenfassen, wie dies im Falle der Daten von FOUCALT et al. der Fall war.



**Abb. 3** Beispiel des  $Ne-Re$ -Diagramms nach dem Kombinationskonzept von FOUCALT et al. [1] für ein Newtonsches Fluid bei vier verschiedenen Drehzahlen des Außenrührers und mehreren Drehzahlen des Innenrührers im Betriebsmodus Gegenlauf

Für diesen Sachverhalt ließ sich folgende Ursache finden: Der relative Größenunterschied zwischen den Rührerflächen der Wendel-/Schraubenkombination ist deutlich kleiner. Als Folge sind deshalb nur relativ kleine Drehzahlverhältnisse für einen Betrieb geeignet, wenn als sinnvolle Bedingung formuliert wird, dass die Einzelrührer einen Leistungseintrag vergleichbarer Größenordnung in das Fluid einbringen sollen. Untersucht wurden am Wendel-/Schraubenrührer Verhältnisse  $n_i/n_a = 1..10$ . FOUCALT et al. wiesen am Beispiel der  $Ne-Re$ -Funktion des Rushtonrührers darauf hin, dass sich eine gute Überlagerung der ausgewerteten Daten aber erst bei einem Drehzahlverhältnis größer 10 zeigte.

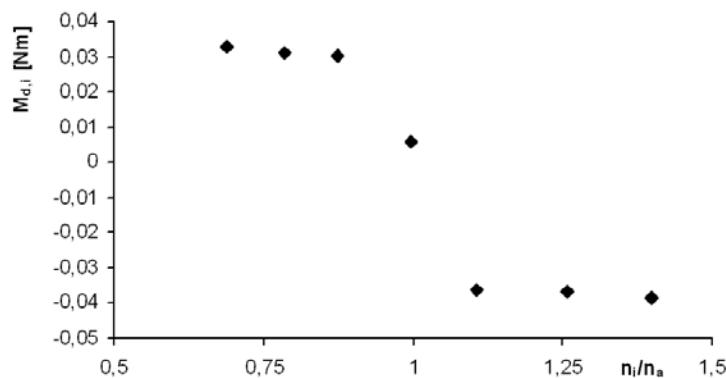
Bestätigt werden können aber weitere, vor allem qualitative Aussagen. In Bezug auf den Betriebsmodus ist der Gleichlauf vorzuziehen. Dies ließ sich sowohl aus der Betrachtung der Leistungsaufnahme als auch der Mischzeitcharakteristik schließen. Was zunächst vielleicht überraschen mag, so gilt es doch der vorwiegend tangentialen, laminaren Hauptströmung im gerührten Behälter einen möglichst großen zusätzlichen Anteil in axialer und radialer Richtung hinzuzufügen. Das Umbrechen der tangentialen Strömung lässt zunächst den Gegenlauf vorteilhaft erscheinen. Neben dem erwarteten höheren Leistungseintrag (vgl. Abb. 1) birgt aber eben diese Richtungsänderung der tangentialen Strömung auch einen weiteren schwerwiegenden Nachteil. Zwischen den Rührern entsteht prinzipiell ein Gebiet, in dem die Geschwindigkeit sehr klein ist (s. auch Abb. 5). In den Entfärbungsversuchen bei  $n_i/n_a > 5$  war so eine Zone zu erkennen, die deutlich länger gefärbt blieb und somit der zweiten Mischzeit zugeschlagen wurde. Mit steigendem Drehzahlverhältnis erhöhte sich auch die benötigte Zeit zu deren Entfärbung.

Für beide Betriebsmodi gilt indes: eine großräumige Umströmung, in dem ein Rührer nach oben und der andere nach unten fördert, ist die deutlich bessere Wahl. Die Alternative axial gleich gerichtet fördernder Rührer zeichnet sich durch eine verstärkte Sekundärströmung aus, aus der eine Unterteilung des Volumens in mehrere Regionen folgen kann, die durch verringerten Volumenaustausch und somit längere Mischzeiten gekennzeichnet sind.

Möglichkeiten zur weiteren Verbesserung der Mischleistung eines Mehrachsenrührers bestehen in exzentrischer Anordnung z.B. des Innenrührers, wie von KÖHLER [4] beschrieben, oder auch pulsierenden bzw. schwingender Drehzahlen, um durch hochvariable

Strömungsfelder die Mischzeit deutlich zu verkürzen. Einer industriellen Anwendung stehen in den allermeisten Fällen aber die derzeit noch hohen Kosten der notwendigerweise hochwertigen Technik entgegen.

Abschließend sei eine kurze Betrachtung zu zwei prinzipiellen Fragen angefügt. In Abb. 2 fällt für das Drehzahlverhältnis von  $n_i/n_a = 1$  ein deutlicher Sprung in den Daten für den Gleichlauf auf. Einen detaillierten Einblick in diesen Bereich bietet Abb. 4. Es zeigt sich, dass bei mitlaufendem Innenrührer, d.h. mit gleichem Drehsinn und gleicher Drehzahl rotierend, der geringste Leistungseintrag am Innenrührer zu erreichen ist. Für eine genauere Definition des Betriebsmodus ist deshalb die Verwendung von z.B. „Vorlauf“, „Nachlauf“, „Mitlauf“ zu empfehlen. Daraus ergibt sich auch der Ansatz, die Differenzgeschwindigkeit des Innenrührers in Relation zum äußeren für weitere Charakterisierungsansätze zu nutzen. Ergebnisse hierzu stehen noch aus, da diese Untersuchungen noch nicht abgeschlossen sind.

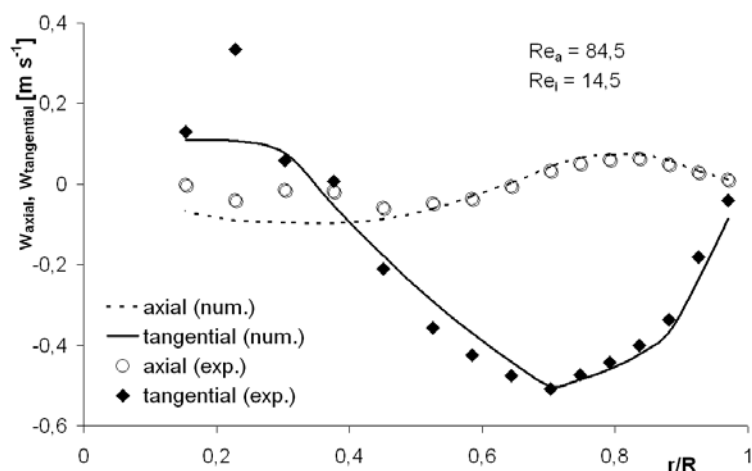


**Abb. 4** Detaillierte Betrachtung der Abhängigkeit des am Innenrührer anliegenden Drehmoments vom Drehzahlverhältnis in der Umgebung von  $n_i/n_a = 1$ ; Vorzeichenwechsel = Richtungswechsel des wirkenden Reibungsmomentes in den Lagern

Die zweite Fragestellung betrifft die Sinnfälligkeit einer gesuchten Kombinationsmöglichkeit für die Charakterisierung. Durch die wie auch immer geartete mathematische Zusammenfassung der Drehzahlen, Durchmesser etc. der Einzelrührer in den Kennzahlen ergibt sich für die Auslegung ein Freiheitsgrad, der so nicht gegeben ist. Nimmt man beispielsweise an, dass sich aus der empirisch ermittelten Charakteristik eine „Gesamtdrehzahl“ von  $120\text{min}^{-1}$  bestimmen lässt, so können dafür unendlich viele Paare aus innerer und äußerer Drehzahl bestimmt werden!

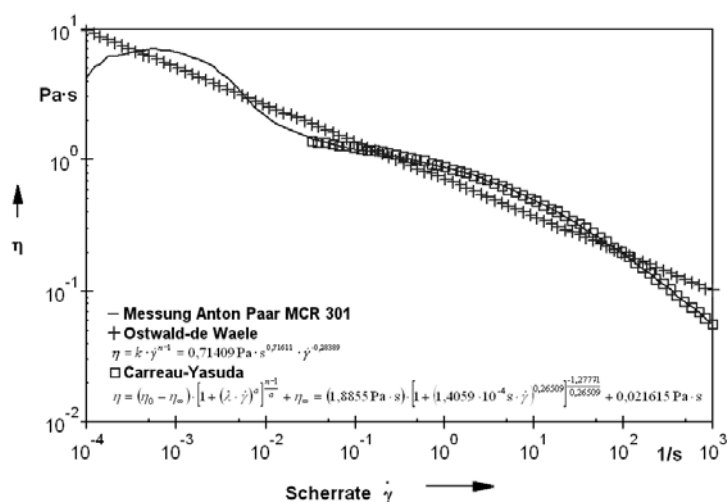
## 5.2 Numerische Simulationen

Die Validierung des einfachen, da laminaren numerischen Modells zeigte eine sehr gute qualitative Übereinstimmung. Abb. 5 soll an dieser Stelle als Beispiel dafür dienen. Dargestellt ist der radiale Verlauf der tangentialen und axialen Geschwindigkeitskomponente, wie sie im Experiment beim Rühren des Newtonschen Testfluids und mit Hilfe der CFD-Simulation ermittelt wurden. Die Abweichungen zur Behältermitte hin waren auf Messfehler zurückzuführen, da der Laserstrahl für die LDA-Messung dort stark abgeschwächt wird und das Messsignal nur noch ungenügend aus dem überlagerten Rauschen herausgefiltert werden konnte.



**Abb. 5** Gegenüberstellung der mittels LDA-Messung bestimmten mittleren Geschwindigkeit in den Messpunkten und den Werten aus einer CFD-Simulation bei gleichen Randbedingungen für ein Newtonsches Fluid bei  $Re_i = 84,5$  und  $Re_a = 14,5$

Im Bereich der nicht-Newtonschen Fluide zeigten sich allerdings größere Abweichungen. Hier fand sich die Ursache in der unzureichenden Beschreibung der rheologischen Funktion. Als anschauliches Beispiel soll an dieser Stelle Abb. 6 dienen. Dort ist die Viskosität in Abhängigkeit von der Scherrate aufgetragen, wie sie mit einem Rheometer für die 0,75%-CMC-Lösung ermittelt wurde. Weiterhin finden sich in der Abbildung die mit dem OSTWALD-DE WAELE- und dem CARREAU-YASUDA-Ansatz ermittelten Regressionsfunktionen zur mathematischen Wiedergabe der Messdaten. Die in der industriellen Anwendung beliebte Zweiparametergleichung nach OSTWALD-DE WAELE gab den Verlauf nur unzureichend wieder. Eine deutlich bessere Annäherung ließ sich mit dem CARREAU-YASUDA-Modell finden.



**Abb. 6** Grafische Darstellung der typischen, mittels Rheometer Anton Paar MCR 301 gemessenen Fließfunktion und die nach dem OSTWALD-DE WAELE- bzw. CARREAU-YASUDA-ANSATZ ermittelten Funktionen zur mathematischen Wiedergabe der Abhängigkeit der lokalen Viskosität von der Scherrate

Inwieweit das rheologische Modell die Simulationsergebnisse beeinflusst, soll abschließend ein Beispiel zum Leistungseintrag zeigen. In Tab. 1 wurden die entsprechenden Werte für Innen- und Außenrührer aus einem Experiment mit dem strukturviskosen Testfluid und zwei CFD-Simulationen mit den in Abb. 6 aufgeführten rheologischen Modellen zusammengetragen. Abweichungen zeigen sich vor allem für die Werte des Innenrührers. Die

Differenzen, die sich auch mit dem CARREAU-YASUDA-Modell zeigen, gehen vermutlich auf elastische Anteile des Fluids zurück, die besonders bei hoch konzentrierten CMC-Lösungen auftreten.

**Tab. 1** Vergleich von experimentellen mit in CFD-Simulationen bestimmten Drehmomenten für Schrauben- und Wendelrührer, bei  $n_a = 90 \text{ min}^{-1}$ ;  $n_i = 160 \text{ min}^{-1}$  für das 0,75%ige CMC-Lösung bei Gleichlauf

	$M_{D, \text{Experiment}} [\text{mNm}]$	$M_{D, \text{CFD, Ostw.-de Waele}} [\text{mNm}]$	$M_{D, \text{CFD, CFD-Carreau-Yasuda}} [\text{mNm}]$
<b>Schraube</b>	18,07	9,6485	12,0348
<b>Wendel</b>	110,065	89,2844	101,028

## 6 Zusammenfassung

Es wurde eine koaxiale Anordnung aus einem Schrauben- und einem Wendelrührer vorgestellt, die für das Rühren von Fluiden mit höheren Viskositäten und auch nicht-Newton'schem Charakter prädestiniert ist. Es zeichnet sich durch eine Zwangsumströmung mit erhöhter axialer und radialer Komponente sowie einer guten Rührwirkung über die gesamte Füllhöhe aus, die bauartbedingt zudem variabel eingestellt werden kann.

Teilergebnisse der Arbeiten um TANGUY konnten bestätigt werden. Der Betriebsmodus Gleichlauf wurde ebenso wie bei FOUCALT et al. als der vorteilhaftere bewertet. Die Charakterisierung von Koaxialrührwerken bei kleinen Drehzahlverhältnissen konnte aber noch nicht zufrieden stellend geklärt werden.

Die numerische Simulation zeigt gute Übereinstimmungen mit den experimentell ermittelten Werten. Entscheidend für die Aussagekraft ist dabei aber die Wiedergabe der rheologischen Funktion des verarbeiteten Fluids. Mit der Zuwachsrate der Rechenleistung kann in nächster Zukunft somit ein Teil der Auslegungsarbeiten für Rührbehälter auch bei anspruchsvollen Prozessen durch CFD-Simulationen ergänzt bzw. ersetzt werden.

## 7 Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen eines Projektes erstellt, das mit Mitteln des BMBF im Rahmen des aFuE-Programmes der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungs-gemeinschaften „Otto-von-Guericke“ e.V. (AiF) mit dem Förderkennzeichen 1700303 gefördert worden ist.

Weiterhin wurden Teile der Mess- und Simulationstechnik durch Mittel der DFG und aus dem EFRE-Programm bereitgestellt.

Besonderer Dank gilt auch den Mitarbeitern bei unserem Kooperationspartner, der Bayer Technology Services GmbH, die zum Gelingen dieses Forschungsprojektes einen wertvollen Beitrag geleistet haben.

## 8 Symbole

$a$	[1]	Exponent im CARREAU-YASUDA-Ansatzes
$c_H$	[1]	Homogenisierbeiwert
$d$	[m]	Rührerdurchmesser
$D$	[m]	Behälterdurchmesser
$g$	$[\text{m s}^{-2}]$	Erdbeschleunigung
$H$	[m]	Füllhöhe
$h$	[m]	Höhenkoordinate ausgehend vom Behälterboden
$k$	$[\text{Pa s}^m]$	Konsistenzfaktor
$N$	$[\text{s}^{-1}]$	Drehzahl
$Ne$	[1]	NEWTONzahl



$n$	[1]	Fließindex
$r$	[m]	laufender Radius
$R$	[m]	Behälterradius
$Re$	[1]	REYNOLDSzahl
$w$	[m s <sup>-1</sup> ]	Geschwindigkeit

#### Griechische Buchstaben

$\dot{\gamma}$	[s <sup>-1</sup> ]	Scherrate, Deformationsgeschwindigkeit
$\lambda$	[1]	Koeffizient im CARREAU-YASUDA-Ansatzes
$\eta$	[Pa s]	Dynamische Viskosität
$\rho$	[kg m <sup>-3</sup> ]	Dichte

#### Indices

$a$	Außenrührer
$i$	Innenrührer

## 9 Literaturquellen

- [1] S. Foucalt, G. Ascanio, P. A. Tanguy, in *11<sup>th</sup> Europ. Conf. on Mixing*, Bamberg Oktober **2003**
- [2] M. Heiser et al., in *6. Köthener Rührer-Kolloquium*, Hochschule Anhalt, Köthen **2004**
- [3] M. Heiser et al., in *7. Köthener Rührer-Kolloquium*, Hochschule Anhalt, Köthen **2005**
- [4] S. Köhler, in *P&A Prozesstechnik und Automation* **2004**, (6), 20-21,