

# Validierung instrumentierter Strömungsfolger in einem Rührbehälter

*Sebastian Reinecke<sup>1</sup>, Uwe Hampel<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> *Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), Bautzner Landstrasse 400 01328 Dresden, s.reinecke@hzdr.de*

<sup>2</sup> *AREVA-Stiftungsprofessur für bildgebende Messverfahren für die Energie- und Verfahrenstechnik, Institut für Energietechnik, TU Dresden, 01062 Dresden*

## Kurzfassung

Zur Untersuchung der Prozesse in Mischbehältern wurde am HZDR das Konzept instrumentierter, Strömungsfolger entwickelt. Diese können als auftriebsneutrale Sensorpartikel in großen Behältern, wie z. B. Biogasfermentern, Bioreaktoren und Belebtschlammbecken, eingesetzt werden und erfassen dabei kontinuierlich Prozessparameter. Nach der Rückgewinnung der Sensorpartikel aus dem Prozess werden die Daten einem computergestützten Analysesystem zur Verfügung gestellt. Die entwickelten prototypischen Sensorpartikel bestehen aus auftriebsneutralen Kapseln, welche mit einer integrierten Messelektronik ausgestattet sind. Das Systemkonzept berücksichtigt derzeit miniaturisierte Sensoren für die Umgebungstemperatur, die vertikale Position als Funktion des hydrostatischen Drucks sowie für die Beschleunigung. Die Funktionstüchtigkeit der Sensorpartikel wurde bereits unter realen Strömungsbedingungen von Biogasfermentern nachgewiesen. Im Beitrag werden die Ergebnisse weiterführender Validierungsexperimente mit den Sensorpartikeln in einem Rührbehälter mit Wasser und einer viskosen Glycerin-Lösung bei verschiedenen Rührerdrehzahlen vorgestellt. Die Messdaten der Sensorpartikel lassen Aussagen über die Homogenität der Vermischung, das axiale Strömungsprofil und die Struktur groballiger Wirbel zu. Weiterhin wurden mit den Sensorpartikeln Zirkulationszeiten ermittelt und mit Referenzdaten aus Salztracermessungen verglichen. Basierend auf den Zirkulationszeiten wurden relevante Parameter von Rührwerksmodellen, wie z. B. Zirkulationsbeiwerte, und Parameter von Dispersionsmodellen, wie die PECLÉT-Zahl, bestimmt. Zudem wurde in dem Rührbehälter das Strömungsfolgeverhalten der Sensorpartikel untersucht und Rückschlüsse auf die Anwendung in z. B. Biogasfermentern gezogen.

**Schlagwörter:** Strömungsfolger, Sensorpartikel, Autonomer Sensor, Makrovermischung, Modellparameter

## Einleitung

Die Beschreibung und die Überwachung der in großen Anlagen und Behältern ablaufenden verfahrens- und energietechnischen Prozesse werden durch die erschwerte oder unmögliche messtechnische Zugänglichkeit erheblich eingeschränkt und sind deshalb oft ungenügend. Die Installation von lokalen Sonden mit Kabelverbindungen ist häufig nicht realisierbar oder aufgrund erheblicher Kosten unerwünscht. Weiterhin sind in den großen Behältern und den oft undurchsichtigen Prozessmedien bildgebende Messtechniken, wie z. B. Videometrie, Thermografie, PIV oder Prozesstomografie, nicht einsetzbar.

Im Anwendungsfeld von gerührten Bioreaktoren und Fermentern sind beispielsweise Temperaturprofile, pH-Wertverteilungen, Gas-, Flüssigkeits- und Feststoffverteilungen im

Substrat sowie der lokale Vergärungsgrad von Biomasse für die Einschätzung der Prozesseffizienz und für die Entwicklung und Auslegung von Anlagen von außerordentlichem Interesse. Zur Beschreibung der Prozesszustände stehen außerdem hydrodynamische Größen, wie Strömungsgeschwindigkeiten, Totzonenverteilungen, Kurzschlussströmungen und Zirkulationszeiten, im Fokus. Der Einsatz intelligenter Strömungsfolger und autonomer Sensortechnologien kann hier bereits durch die Aufnahme weniger physikalischer Basisparameter, wie Temperatur und Druck, wesentliche Erkenntnisse über die Effektivität der Begasungs-, Misch- und Heizregime geben und gewinnt deshalb zunehmend an Bedeutung für Anwendungen in der Prozessindustrie [1]. Diese Informationen sind aktuell bestenfalls an wenigen lokalen Messstellen verfügbar,

weshalb beim Anlagendesign und –betrieb oft auf Erfahrungswerte zurückgegriffen wird.

Aus diesem Grund wurde am HZDR das Konzept autonomer Sensorpartikel entwickelt, welche als auftriebsneutrale Strömungsfolger in großen Behältern, wie z. B. Bioreaktoren, Biogasfermentern und Belebtschlammbecken eingesetzt werden können und dabei kontinuierlich Prozessparameter erfassen, speichern und diese nach Rückgewinnung der Partikel aus dem Prozess einem computergestützten Analysesystem zur Verfügung stellen [2]. Die Anwendung dieses Messsystems in einem Rührbehälter ist in Abb. 1 schematisch dargestellt. Nach dem Einbringen werden die Sensorpartikel zusammen mit den Substraten durch die Strömungen im Fermenter verteilt und bewegen sich auf Grund der auftriebsneutralen Eigenschaft frei mit den vorherrschenden Strömungen im Fermenter. Während der Verweilzeit der Sensorpartikel im Fermenter messen sie die zeitlichen Verläufe der ausgewählten Prozessparameter. Die Messdaten werden in den integrierten Speicher geschrieben. Bei dem Austrag der Substrate aus dem Fermenter verlassen auch die Sensorpartikel den Prozess. Das Auslesen und die Auswertung der gespeicherten Datensätze erfolgt nach dem Filtern der Sensorpartikel aus dem Prozess. Nach einer Revision können die Sensorpartikel wieder verwendet werden. Nur das Einbringen und die Entnahme aus dem Filter erfolgen manuell.

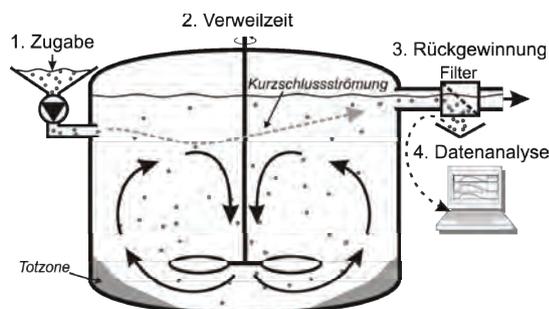


Abb. 1. Schematische Darstellung zur Anwendung autonomer Sensorpartikel in großskaligen Behältern.

In ersten Validierungsexperimenten mit realen Strömungsbedingungen von Biogasfermentern wurden die Funktionstüchtigkeit der Sensorpartikel und die Relevanz der gemessenen Daten bereits gezeigt [3].

### Aufbau der Strömungsfolger

Die entwickelten prototypischen Sensorpartikel bestehen aus auftriebsneutralen Kapseln, welche mit einer integrierten Messelektronik ausgestattet sind (Abb. 2) [2]. Die derzeitige Konfiguration berücksichtigt miniaturisierte

Sensoren für die Umgebungstemperatur (10...70 °C), die vertikale Position als Funktion des hydrostatischen Drucks (98...158 kPa) und die 3D-Beschleunigung (-6...+6 g). Bereits diese grundlegenden physikalischen Parameter lassen Rückschlüsse auf Strömungszustände, den Zustand des Prozesses und Modellparameter zu. Das Systemkonzept erlaubt außerdem die Einbindung ergänzender miniaturisierter Messfühler zur Erfassung weiterer analytischer Prozessparameter, wie z. B. pH/OPR Sensoren, biochemische Sensoren oder Gassensoren. Die Steuerung des autonomen Messregimes erfolgt durch einen integrierten Mikrocontroller. Auf diese Weise wird ein energieeffizienter Betrieb der Erfassungselektronik und der Messfühler erreicht, der Laufzeiten von bis zu 140 Tagen ermöglicht. Die Sensorpartikel haben einen äquivalenten Durchmesser von  $d_p = 58,2 \text{ mm}$  und eine Sphärizität von  $\Psi = 0,91$ . Das Ausgangsgewicht der Sensorpartikel von  $m_p = 95,3 \text{ kg}$  bestimmt die minimale Dichte  $\rho_p = 922,6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Die Einstellung der Auftriebsneutralität erfolgt durch das Platzieren von Lastgewichten in einem integrierten Reservoir.



Abb. 2. Sensorpartikel: (a) geöffnet mit der innenliegenden Erfassungselektronik und (b) montiert mit der Schutzkappe am Druckmessfühler.

### Validierungsexperimente im Rührbehälter

In Validierungsexperimenten konnten die Möglichkeiten der Sensorpartikel für die Erfassung und Analyse der Strömungsbedingungen in Rührbehältern und der Bestimmung relevanter Modellparameter aufgezeigt werden. Dabei kamen die Sensorpartikel in einem kleinskaligen Rührbehälter zum Einsatz (Abb. 3). Der Behälter ist vollbewehrt, hat eine Füllhöhe  $H_0 = 0,755 \text{ m}$  und einen effektiven Durchmesser  $d_1 = 1,53 \text{ m}$  ( $H_0/d_1 = 0,49$ ). Das Behältervolumen ist  $V_B = 1390 \text{ l}$ . Es wird ein dreiflügliger Schrägblattrührer mit dem Durchmesser  $d_2 = 0,5 \text{ m}$  bei der Einbauhöhe  $h_{2m} = 0,265 \text{ m}$  verwendet. Die Sensorpartikel wurden im Rührbehälter bei verschiedenen Rührerdrehzahlen in reinem Wasser (Deionat) und einer 90%-igen Glycerin-Lösung eingesetzt. Die Versuchsbedingungen wurden so gewählt, dass unterschiedliche

hydrodynamische Zustände vorlagen. Während für die Versuche in Wasser die REYNOLDS-Zahlen im Bereich turbulenter Strömung liegen ( $Re_{\text{Rührer}} > 10^5$ ), kann bei den Versuchen in der Glycerin-Lösung auf Grund der deutlich höheren Viskosität von 0,25 Pa-s in den rührerfernen Zonen bereits von einem Übergang zu laminaren Strömungsverhältnissen ausgegangen werden ( $Re_{\text{Rührer}} \approx 10^3$ ).

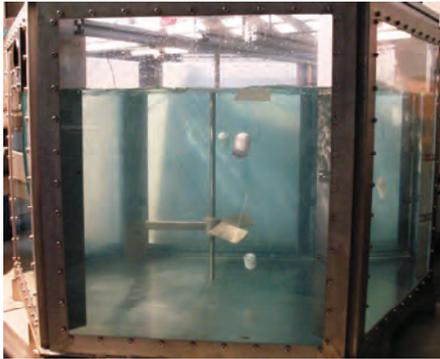


Abb. 3. Rührbehälter mit strömenden Sensorpartikeln.

Zur Validierung der ermittelten Zirkulationszeiten sind Referenzmessungen mit Leitfähigkeitsnadelsonden erfolgt. Mit diesen Sonden ist die zeitliche Erfassung des Konzentrationsverlaufes eines in den Rührbehälter injizierten Salztracerbolus und damit die direkte Messung der für die Fluidelemente repräsentativen Zirkulationszeiten möglich. Die Sonden haben einen triaxialen Aufbau, eine Länge von 1 m und einen Hüllrohr-Durchmesser von 6 mm und wurden zusammen mit einem mehrkanaligen Leitfähigkeitssonden-Messsystem des HZDR eingesetzt [4]. Durch diese kleine Bauart ist die Strömungsbeeinflussung der Sonden vernachlässigbar. Um räumlich repräsentative Daten zu erhalten, kamen vier Leitfähigkeitssonden parallel an insgesamt 16 Positionen im Behälter zum Einsatz.

## Ergebnisse

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass mit den Sensorpartikeln die typischen Strömungsformen und deren Veränderungen in Abhängigkeit von der Rührerdrehzahl und den Fluideigenschaften eindeutig abgebildet werden.

Aus den gemessenen Zeitreihen  $z(t)$  der vertikalen Position wurden mit statistischen Methoden globale Informationen über den Prozess extrahiert. Die axialen Aufenthaltsprofile der Sensorpartikel ermöglichen den Vergleich der Homogenität im Behälter bei den untersuchten

Rührerdrehzahlen in den beiden Fluiden (Abb. 4). Die axialen Aufenthaltsprofile in Wasser weisen keine signifikante Abweichung in Abhängigkeit von der Rührerdrehzahl auf. Dies deutet auf eine gleichbleibende Homogenität hin und kann als guter Austausch zwischen Fluidelementen interpretiert werden. Der Bereich nahe am Flüssigkeitsspiegel zeigt deutlich kleinere Werte als der Bereich nahe am Boden, was sich durch die abgeschwächte Zirkulationsströmung in dieser weiter vom Rührwerk entfernten Zone ergibt. Für die Glycerin-Lösung nehmen die Häufigkeitswerte für  $z/H_0 > 0,5$  stärker ab als in Wasser (Abb. 4). Dies lässt auf eine schlechtere Vermischung schließen. Weiterhin ist der Einfluss der Rührerdrehzahl an der leichten Abflachung der Aufenthaltsprofile für die höheren Rührerdrehzahlen zu erkennen.

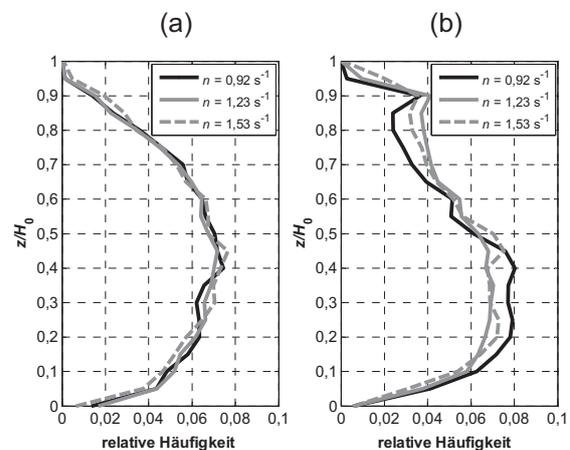


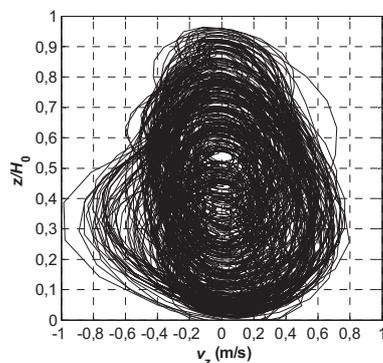
Abb. 4. Axiale Aufenthaltsprofile (20 Klassen, Klassenbreite  $\Delta z/H_0 = 0,05$ ) für (a) Wasser und (b) Glycerin-Lösung für die untersuchten Drehzahlen aus jeweils  $2 \cdot 10^4$  Messwerten von einem ausgewählten Sensorpartikel.

Ergänzende Informationen über den Strömungsprozess liefert das Phasenportrait der axialen Bewegung, d. h. die Abhängigkeit des Aufenthaltsortes  $z(t)$  von der axialen Geschwindigkeit  $v_z(t) = dz(t)/dt$ . Es gibt den Einfluss der Strömungsbedingungen auf die axiale Verteilung der axialen Geschwindigkeitskomponente wieder (Abb. 5). Die verdichteten Bereiche im Phasenportrait heben charakteristische Trajektorien hervor, welche den axialen Verlauf der Zirkulationsströmung markieren. Für Wasser sind die Trajektorien gleichmäßig über der Behälterhöhe verteilt, was auf eine gleichmäßige Vermischung hindeutet. Hingegen sind die Trajektorien für die Glycerin-Lösung in Richtung der Flüssigkeitsoberfläche deutlich enger. Es ist eine charakteristische kreisförmige Trajektorie unterhalb von  $z/H_0 = 0,6$  erkennbar. Dies deutet darauf hin,

dass die Zirkulationsströmung in der Glycerin-Lösung nicht den gesamten Behälter erfasst und Bereiche oberhalb von  $z/H_0 = 0,6$  im Vergleich zu Wasser weniger intensiv durchmischt werden.

Das Maximum der axialen Geschwindigkeit im Bereich negativer Amplituden (abwärts) wird nahe dem Rührwerk bei  $z/H_0 \approx 0,35$  erreicht. Die ist zu erwarten, da in dieser Zone die Energieübertragung von den Rührerblättern auf das Fluid und damit eine abwärtsgerichtete Beschleunigung der Fluidelemente erfolgt. Nach dem Passieren des Rührerstrahles wird die bodennahe Zirkulationsströmung in eine aufwärtsgerichtete Wandsströmung umgelenkt. Daher erreicht die axiale Geschwindigkeit der Sensorpartikel im Bereich positiver Amplituden bei  $z/H_0 \approx 0,3$  ebenfalls ein globales Maximum.

(a)



(b)

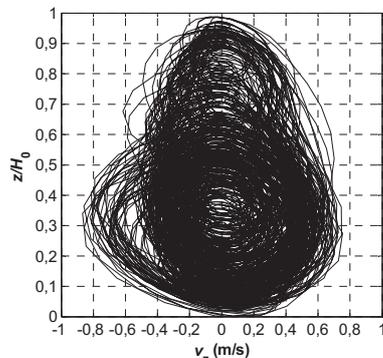


Abb. 5. Phasenportraits aus  $1 \cdot 10^4$  Messwerten eines ausgewählten Sensorpartikels bei verschiedenen Rührerdrehzahlen für (a) Wasser und (b) Glycerin-Lösung bei  $n = 1,53 \text{ s}^{-1}$ .

Weiterhin ist mit den Daten der Sensorpartikel die Abschätzung der Zirkulationszeit  $t_z$  der Fluidelemente möglich, welche ein Schlüsselparameter in Vermischungsmodellen ist. Die Zirkulationszeit ist auf eine horizontale Ebene im Behälter bezogen und wird aus der gemessenen Zeitreihe  $z(t)$  der Sensorpartikel im Behälter ermittelt. Es ergibt sich für eine festgelegte Bezugsebene eine logarithmische

Normalverteilung der Zirkulationszeit, die durch den Mittelwert  $\bar{t}_z$  und die Streuung  $\sigma_z$  charakterisiert wird (Abb. 6). Die erwartete Abhängigkeit der Zirkulationszeit des Fluids von der Rührerdrehzahl ist anhand der Zirkulationszeitverteilung der Sensorpartikel klar erkennbar.

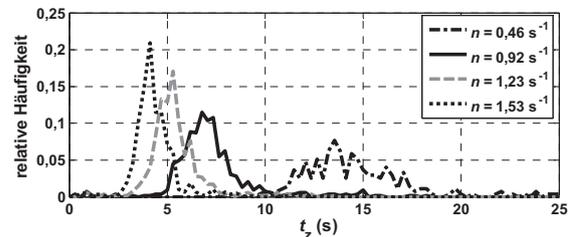


Abb. 6. Zirkulationszeitverteilungen eines Sensorpartikels in der Rührwerksebene für die untersuchten Rührerdrehzahlen  $n$  für die Messungen in Wasser.

Mit dem Bezug zu mehreren Ebenen im Behälter, wird aus den Daten der Sensorpartikel das axiale Profil der mittleren Zirkulationszeiten ermittelt (Abb. 7). Die Profile zeigen deutlich die Abhängigkeit der mittleren Zirkulationszeit von der Rührerdrehzahl und der Höhe im Behälter. Bei der Glycerin-Lösung steigen die Werte oberhalb der Rührwerksebene stärker an als in Wasser, was durch die schwächere Zirkulationsströmung im oberen Behälterbereich bedingt ist. Dies bestätigt die Schlussfolgerungen über die geringere Homogenität der Vermischung im Behälter.

Der Vergleich der mittleren Zirkulationszeiten  $\bar{t}_{z,p}$  der Sensorpartikel mit den mittleren Zirkulationszeiten  $\bar{t}_{z,LF}$  der Leitfähigkeitsnadelsonden zeigt, dass die Sensorpartikel die effektiven Zirkulationszeiten der Fluidelemente proportional abbilden (Tab. 1). Aus diesen Messwerten kann der Schlupf des Sensorpartikels gemäß

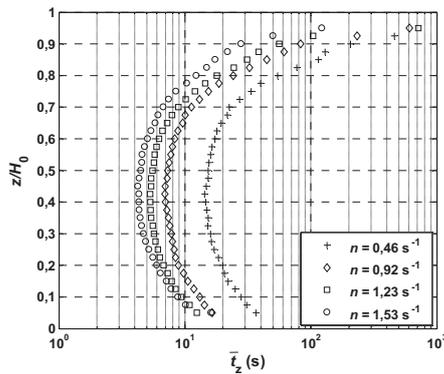
$$\phi = \frac{\bar{t}_{z,LF}}{\bar{t}_{z,p}} \approx 1 - \frac{v_p}{v_f} \quad (1)$$

mit der Strömungsgeschwindigkeit  $v_p$  des Sensorpartikels und der Strömungsgeschwindigkeit  $v_f$  des Fluids abgeschätzt werden (Tab. 1). Im Vergleich zu Wasser ist der Schlupf der Sensorpartikel gegenüber dem Fluid in der Glycerin-Lösung deutlich geringer. Es ist davon auszugehen, dass bei dem Einsatz der Sensorpartikel in Fluiden mit noch höheren Viskositäten, wie sie z. B. bei typischen Biogassubstraten auftreten, der Schlupf weiter abnimmt bzw. vernachlässigbar wird.

Tab. 1: Vergleich der gemittelten Zirkulationszeiten  $\bar{t}_{z,p}$  der Sensorpartikel und  $\bar{t}_{z,LF}$  der Leitfähigkeitsnadelsonden für verschiedene Rührerdrehzahlen  $n$ .

		Wasser			Glycerin-Lösung		
$n$	$s^{-1}$	0,92	1,23	1,53	0,92	1,23	1,53
$\bar{t}_{z,p}$	s	8,6	6,5	5,2	11,2	7,5	6,0
$\bar{t}_{z,LF}$	s	6,7	4,9	4,0	10,1	6,8	5,5
$\phi$		0,22	0,25	0,23	0,10	0,09	0,08

(a)



(b)

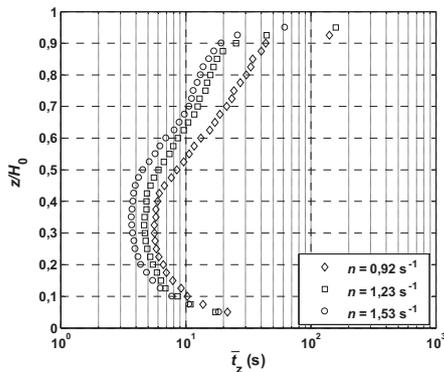


Abb. 7: Axiale Verteilung der Mittelwerte der Zirkulationszeitverteilungen eines Sensorpartikels in (a) Wasser und (b) Glycerin-Lösung in Abhängigkeit von der Rührerdrehzahl  $n$ .

Mit Kenntnis von  $\bar{t}_z$  und  $\sigma_z$  wird ein Bezug zur PECLÉT-Zahl

$$Pe = \frac{v \cdot L}{D_{Diff}} \approx 2 \cdot \left( \frac{\bar{t}_z}{\sigma_z} \right)^2 \quad (2)$$

hergestellt [5]. Diese beschreibt mit der charakteristischen Strömungsgeschwindigkeit  $v$  und der charakteristischen Länge  $L$  sowie dem Diffusionskoeffizienten  $D_{Diff}$  das Verhältnis des Stoffstromes der Strömung zum Diffusionsstrom und ist damit ein Maß für die Rückvermischung. Die mit Gl. (2) ermittelten

PECLÉT-Zahlen bestätigen das für den überwiegend turbulenten Rührprozess zu erwartende hohe Maß an Rückvermischung (Tab. 2). Die überschätzten Zirkulationszeiten in Wasser führen jedoch zu etwas größeren Werten für  $Pe$  als in Glycerin-Lösung.

Tab. 2: Normierte Streuung der Zirkulationszeitverteilung und PECLÉT-Zahl nach Gl.(2).

		Wasser				Glycerin-Lösung		
$n$	$s^{-1}$	0,46	0,92	1,23	1,53	0,92	1,23	1,53
$\frac{\sigma_z}{\bar{t}_{z,p}}$		2,5	2,6	2,9	2,7	2,6	2,2	2,4
$Pe$		13	14	16	15	13	10	12

Ein für die Modellierung des Rührprozesses grundlegender Modellparameter ist der Zirkulationsbeiwert  $c_z$ . Dieser charakterisiert die im Behältervolumen um die Zirkulationspunkte umgewälzte Fluidmenge (Zirkulationsmenge) [6]:

$$Q_z = c_z \cdot n \cdot d_2^3 \quad (3)$$

Die Zirkulationsmenge  $Q_z$  bestimmt wiederum die mittlere Zirkulationszeit  $\bar{t}_z$  der Fluidelemente im Behältervolumen  $V_B$  gemäß

$$\bar{t}_z = \frac{V_B}{Q_z} \quad (4)$$

Damit besteht die Beziehung

$$\bar{t}_z^{-1} = k_t \cdot n \quad (5)$$

mit dem Proportionalitätsfaktor  $k_t$ , der aus den Messreihen  $\bar{t}_{z,p}(n)$  der Sensorpartikel und der Sonden  $\bar{t}_{z,LF}(n)$  bestimmt wird. Mit Gln. (3) und (4) ergibt sich der Zirkulationsbeiwert gemäß

$$c_z = \frac{k_t \cdot V_B}{d_2^3} \quad (6)$$

Die Werte zeigen, dass für die Glycerin-Lösung bereits eine Veränderung des Strömungsregimes vorliegt (Tab. 3). Der Übergang zu laminaren Strömungsstrukturen bei der Glycerin-Lösung zeigt sich in kleineren Proportionalitätsfaktoren  $k_t$ , was automatisch zu kleineren Zirkulationsbeiwerten  $c_z$  führt. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Sensorpartikel  $c_z$  gegenüber den Sonden leicht unterschätzen. Das bessere Strömungsverhalten des Sensorpartikels in der Glycerin-Lösung zeigt sich hier in der geringen Abweichung von  $k_t$  bzw.  $c_z$  gegenüber den

Werten der Leitfähigkeitssonden von ca. 8% gegenüber ca. 19% bei Wasser. Der Sensorpartikel liefert demnach für die Glycerin-Lösung eine genauere Approximation des Zirkulationsbeiwertes.

Tab. 3: Proportionalitätsfaktoren  $k_t$  aus Gl. (5) und Zirkulationsbeiwerte  $c_z$  nach Gl. (6) für die Messreihen von Wasser und Glycerin-Lösung.

	Wasser		Glycerin-Lösung	
	Sensorpartikel	LF-Sonde	Sensorpartikel	LF-Sonde
$k_t$	0,13	0,16	0,11	0,12
$c_z$	1,45	1,78	1,22	1,33

### Zusammenfassung

Es wurde ein Konzept instrumentierter, strömungsfolgender Sensoren zur Erfassung räumlich verteilter Parameter in Mischbehältern entwickelt und in einem Rührprozess validiert. Bezogen auf die Makroskale von Mischprozessen in Großbehältern lässt die geringe Baugröße der Strömungsfolger deren Betrachtung als strömende Partikel bzw. Sensorpartikel zu. Aus den Messdaten können räumliche Parameterprofile der Aufenthaltswahrscheinlichkeit und der Zirkulationszeit sowie Phasenportraits der Bewegung extrahiert werden, welche schlüssige Interpretationen hinsichtlich der Strömungsform und des Zustandes des Mischprozesses zulassen. Damit ermöglichen die Sensorpartikel die Analyse hydro- und thermodynamischer Prozessbedingungen in Mischbehältern. Es können ablaufende Mischprozesse auf makroskopischer Ebene anhand der Homogenität, der Zirkulationsströmung und der Strömungsdynamik charakterisiert werden. Zudem können Parameter von Misch- und Rührwerksmodellen bestimmt werden. Damit sind auch die Anpassung theoretisch berechneter Modellparameter und die Validierung von Prozessmodellen möglich.

Die Weiterentwicklung des Konzeptes schließt die Einbindung von ergänzenden Messfühlern für die Position, wie Gyroskopen, Magnetometern und Schallsensoren, sowie Messfühler für analytische Parameter, wie pH-Wert, Redoxpotenzial, Gasgehalt, Leitfähigkeit und Dielektrizitätszahl ein. Zudem werden die Konzepte der Rückgewinnung für die Anwendung der Sensorpartikel in realen Belebtschlammbecken, Biogasfermentern und Rührreaktoren validiert.

### Literatur

- [1] M. Antoniou, M.C. Boon, P.N. Green, P.R. Green, and T.A. York, *Wireless Sensor Networks for Industrial Processes*, IEEE SAS, New Orleans, LA, USA, 2009, 13-18.
- [2] S. Thiele, M. J. Da Silva, U Hampel, *Autonomous sensor particle for parameter tracking in large vessels*, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 21 (8), 2010.
- [3] S. Reinecke, et al., *Flow following sensor particles - Validation and macro-mixing analysis in a stirred fermentation vessel with a highly viscous substrate*, *Biochem. Eng. J.*, 2012.
- [4] J. Zschau, T. Gocht, H.-M. Prasser, A. Böttger, *Needle shaped conductivity probes with integrated micro-thermocouple and their application in rapid condensation experiments with non-condensable gases*, *Kerntechnik*, 68(2003), 114–120.
- [5] O. Levenspiel, *Chemical Reaction Engineering*, 3. Auflage, John Wiley & Sons, New York, 1999.
- [6] H. Schubert, *Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik*, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2003.