

## Autonome Sensorpartikel zur räumlichen Parametererfassung in großskaligen Behältern

Sebastian Reinecke, Uwe Pöpping und Uwe Hampel  
 Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR)  
 Institut für Sicherheitsforschung, Abteilung Experimentelle Thermofluidynamik  
 Bautzner Landstraße 400, 01328 Dresden  
 Tel.: +49 351 260 2320, s.reinecke@hzdr.de  
 Tel.: +49 351 260 2397, u.poepping@hzdr.de  
 Tel.: +49 351 260 2772, u.hampel@hzdr.de

### Kurzfassung

Zur Langzeiterfassung räumlich verteilter Parameter in Prozessbehältern wurde das Konzept autonomer Sensorpartikel entwickelt und getestet. Die Sensorpartikel sind auftriebsneutral und bewegen sich frei mit der vorherrschenden Strömung im Prozess. Die integrierte Messelektronik erfasst die Signale der internen Messfühler für die Temperatur, die Eintauchtiefe und die Beschleunigung in einem autonomen und energieeffizienten Messregime. Die Validierung des Messsystems erfolgte unter realen Strömungsbedingungen in einem Versuchsfermenter. Die aufgenommenen Messdaten und die daraus extrahierten Prozesskennndaten charakterisieren den Zustand des Prozesses und die vorherrschenden Strömungsbedingungen.

### 1 Einleitung

Der Betrieb großer Anlagen und Behälter wird von dem Problem begleitet, dass darin ablaufende verfahrens- und energietechnische Prozesse aufgrund erschwerter oder unmöglicher messtechnischer Zugänglichkeit nicht genügend beschrieben und überwacht werden können. Die Installation von lokal installierten Sonden mit Kabelverbindungen ist in großen Behältern, wie Chemie- und Bioreaktoren, Fermentern oder Schüttgutbehältern, oft nicht realisierbar oder unerwünscht.

Speziell für Fermenter sind beispielsweise Temperaturprofile, pH-Wertverteilungen, Gas-, Flüssigkeits- und Feststoffverteilungen im Substrat, der lokale Vergärungsgrad von Biomasse, sowie lokale Strömungscharakteristiken (Geschwindigkeiten, Totzonen, Kurzschlussströmungen) für die Einschätzung der Prozesseffizienz und für die Entwicklung und Auslegung von Anlagen von außerordentlichem Interesse. 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 Heiz- und Rührregime 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.

Am HZDR wurde das Konzept autonomer Sensorpartikel entwickelt, welche als auftriebsneutrale Strömungsfolger in großen Behältern, wie Biogasfermentern, eingesetzt werden können und dabei kontinuierlich Prozessparameter erfassen, speichern und diese nach Rückgewinnung der Partikel aus dem Prozess einem computergestützten Analysesystem zur Verfügung stellen. Die Anwendung dieses Messsystems an einer Biogasanlage ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

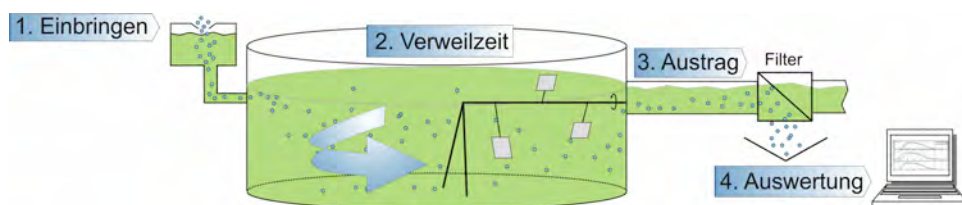


Abbildung 1. Schematische Darstellung zur Anwendung autonomer Sensorpartikel in Biogasfermentern.

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.

## 2 Aufbau des Messsystems

Das konzeptionierte Messsystem beinhaltet mehrere autonome Sensorpartikel und eine Basiseinheit (siehe Abbildung 2 und Abbildung 3). Jedes Sensorpartikel besteht aus einer robusten und auftriebsneutralen Gehäusekapsel (Durchmesser 45 mm und Höhe 73 mm; äquivalenter Partikeldurchmesser ~58 mm). Die Sensorpartikel sind mit einer Messelektronik ausgestattet, welche die Signale der integrierten Messfühler aufzeichnet. Die derzeitige Konfiguration berücksichtigt miniaturisierte Sensoren für die Umgebungstemperatur, die Eintauchtiefe als Funktion des hydrostatischen Drucks und die 3D-Beschleunigung. Die Messbereiche der integrierten Sensoren wurden im Hinblick auf die Anwendung in Biogasfermentern wie folgt angepasst: Druck von 100 kPa bis 200 kPa, Temperatur von 10 °C bis 70 °C und Beschleunigung von -2g bis +2g.

Das Systemkonzept erlaubt außerdem die Einbindung ergänzender miniaturisierter Messfühler zur Erfassung weiterer analytischer Prozessparameter wie z.B. pH/OPR Sensoren, biochemische Sensoren oder Gassensoren und zusätzlicher Lage- und Positionssensoren wie z.B. Magnetfeldsensoren und Gyroskope. Die Übertragung der Messdaten erfolgt nach der Rückgewinnung der Sensorpartikel aus dem Prozess über die Basiseinheit an einen PC.

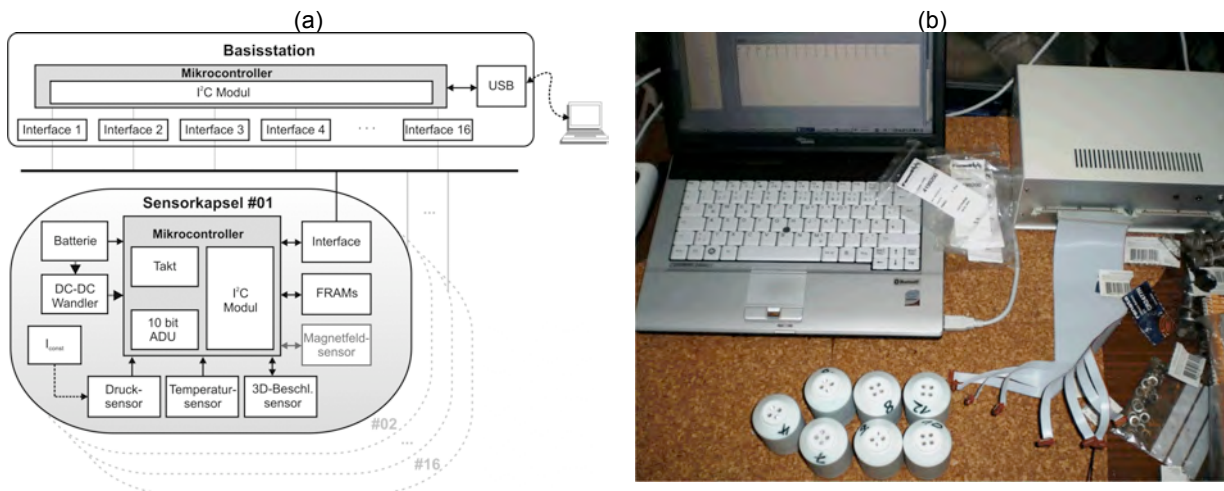


Abbildung 2. Blockschaltbild der integrierten Messelektronik der Sensorpartikel und der zugehörigen Basiseinheit zur Ankopplung an einen PC (a). Fotografie des Messsystems mit PC, Basiseinheit und sieben Sensorpartikeln (b).

Das Konzept des Sensorpartikels basiert auf dem ersten prototypischen Systemaufbau [2] und [3]. Der Auftrieb der Sensorpartikel wird durch die Anpassung der Zuladung im Reservoir der Gehäusekapseln auf die mittlere Dichte der Flüssigkeit eingestellt. Damit wird nahezu Auftriebsneutralität erreicht und die Sensorpartikel bewegen sich frei mit der sie umgebenden Strömung. Die Verweilzeiten in Biogasfermentern liegen im Bereich von mehreren Monaten (50-200 Tage sind typisch). Um die Verfügbarkeit während dieser Langzeitmessungen zu gewährleisten, werden Li/MnO<sub>2</sub> Primärbatterien als mitgeführter Energiespeicher verwendet. Die Rohspannung der Batterie wird von einem Gleichspannungswandler stabilisiert. Zudem dienen Pufferkondensatoren zur Verminderung der Batteriebeanspruchung durch das gepulste Leistungsprofil, welches während des autonomen Messregimes der Messelektronik auftritt. Als zentrale Verarbeitungseinheit wird ein energieeffizienter Mikrocontroller verwendet, der die autonome Messung steuert. Die Messung läuft in einem parametrierbaren Zyklus in folgender Reihenfolge ab. Der Sensorpartikel:

1. wird aus dem Ruhezustand aktiviert,
2. erfasst die Rohdaten aller Messfühler,
3. führt eine Datenkonditionierung durch und speichert die Daten mit einem Zeitstempel auf dem Speicher ab und
4. kehrt dann in den energiesparenden Ruhezustand zurück.

Dadurch wird der Energieverbrauch minimiert und die Laufzeit der Batterie optimiert, was den autarken Langzeiteinsatz der Sensorpartikel gewährleistet. Der Zyklus des Messregimes  $\Delta t_{\text{Mess}}$  ist im Bereich von derzeit 40 ms bis 60 s (Abtastrate 0,016 ... 25 Hz) parametrierbar.

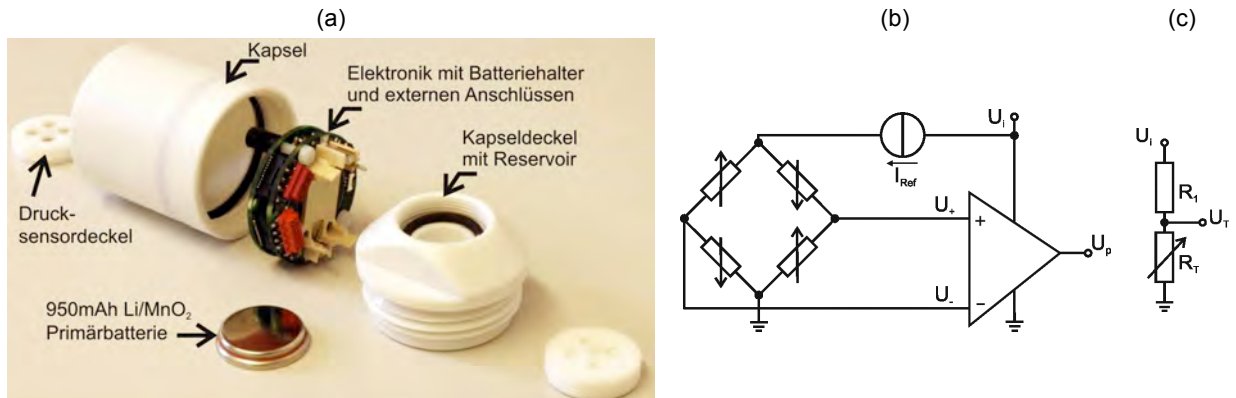


Abbildung 3. Fotografie eines geöffneten Sensorpartikels mit der integrierten Messelektronik und den Messfühlern (a). Schaltbild der Schnittstelle für (b) die piezoresistive Druckmesszelle und (c) den Temperatursensor (NTC Thermistor  $R_T$ ).

Zur Ankopplung des Druck- und des Temperatursensors an den Mikrocontroller wurden zwei analoge Schnittstellen konzipiert (Abbildung 3 b und c), die ebenfalls in [3] erläutert sind.

Der Umgebungsdruck wird dabei aus der gemessenen Ausgangsspannung  $U_p$  des Instrumentenverstärkers (siehe Abbildung 3 b) mit der linearen Regressionsgleichung

$$p = k_1 \cdot U_p - k_2 \quad (1)$$

berechnet. Die Parameter  $k_1 = 70,29 \text{ kPa} \cdot \text{V}^{-1}$  und  $k_2 = 3,71 \text{ kPa}$  wurden in einem Kalibrierverfahren für den Bereich 100...200 kPa ermittelt. Die Eintauchtiefe  $h$  wird nach dem Pascalschen Gesetz

$$h = \frac{p - p_0}{\rho_F \cdot g} \quad (2)$$

aus dem gemessenen hydrostatischen Umgebungsdruck  $p$ , dem wirkenden atmosphärischen Umgebungsdruck an der Oberfläche  $p_0$ , der mittleren Dichte der Flüssigkeit  $\rho_F$  und der Schwerebeschleunigung  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  berechnet. Im Rahmen einer Unsicherheitsbetrachtung nach [4] wurden neben dem Quantisierungsfehler und dem Rauschen auch die Temperaturdrift des Konstantstromreglers und des ADC berücksichtigt. Durch die Verringerung der Drift des Konstantstromreglers konnte die Messunsicherheit der Druckmessung gegenüber [3] reduziert werden. Für die Druckmessung im Temperaturbereich 10...70 °C ergibt sich eine Unsicherheit  $u_p = \pm 20,5 \text{ kPa}$ , die eine Unsicherheit der gemessenen Eintauchtiefe  $u_h = \pm 0,209 \text{ m}$  bedingt. Im Bezug auf typische Füllhöhen von Biogasfermentern von bis zu 10 m ist die resultierende Unsicherheit der vertikalen Positionsmessung mit  $\pm 4,2\%$  ein akzeptabler Wert.

Die Umgebungstemperatur  $T$  wird gemäß der Kalibrierfunktion

$$T = a_0 \cdot \left[ a_1 + \ln \left( \frac{U_T \cdot a_2}{a_3 - U_T} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

aus der am Ausgang des Spannungsteilers gemessenen Spannung  $U_T$  (siehe Abbildung 3 c) berechnet (siehe [3]). Die Parameter  $a_0 = 4402,79 \text{ K}$ ,  $a_1 = 16,52$ ,  $a_2 = 15,07$  und  $a_3 = 3,27 \text{ V}$  wurden in einem Kalibrierverfahren für den Temperaturbereich 10...70 °C ermittelt.

Die Unsicherheitsbetrachtung für die Temperaturmessung unter Einbeziehung des Quantisierungsfehlers, des Rauschens und der Temperaturdrift des ADC für den Temperaturbereich 10...70 °C ergibt eine akzeptable Unsicherheit  $u_T = \pm 0,51 \text{ K}$ .

Es ist zu erwarten, dass durch die Korrektur der Temperaturdrift des piezoresistiven Drucksensorelementes und des ADC eine weitere Reduzierung der Messunsicherheiten erzielt werden kann.

### 3 Validierung in einem Versuchsfermenter

Zur Validierung des Systemkonzeptes wurden die Sensorpartikel unter realen Strömungsbedingungen in einem Versuchsfermenter mit einem Innendurchmesser  $d_1 = 1,3$  m (ca. 1000L Volumen) und einem zentralen Rührwerk eingesetzt (siehe Abbildung 4 a-c)<sup>1</sup>. Der dreiflügelige zentrale Schrägblattrührer hatte einen Durchmesser von 0.324 m und eine maximale Umfangsgeschwindigkeit von  $4,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Der Fermenter wurde bei einer annähernd konstanten Temperatur von ca.  $19 \text{ }^\circ\text{C}$  mit einer Suspension aus Wasser und Stroh bei einem Füllstand  $H_0 = 0,8$  m betrieben. Es wurde ein Mischverhältnis von ca. 94,5% Wasser und 5,5% Stroh mit einer theoretischen mittleren Dichte von  $950 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  und einer Viskosität von ca.  $1500 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  bei einer mittleren Scherrate von  $5 \text{ s}^{-1}$  eingestellt. Zur Variation der Bedingungen im Fermenter wurde das zentrale Rührwerk auf zwei unterschiedlichen axialen Positionen  $h_a = 200$  mm und  $h_b = 324$  mm über dem Fermenterboden betrieben, wodurch eine signifikante Veränderung der vorherrschenden Zirkulationsströmung im Behälter und möglicher Totzonen bzw. sekundärer Mischzonen zu erwarten ist (siehe Abbildung 4 c).

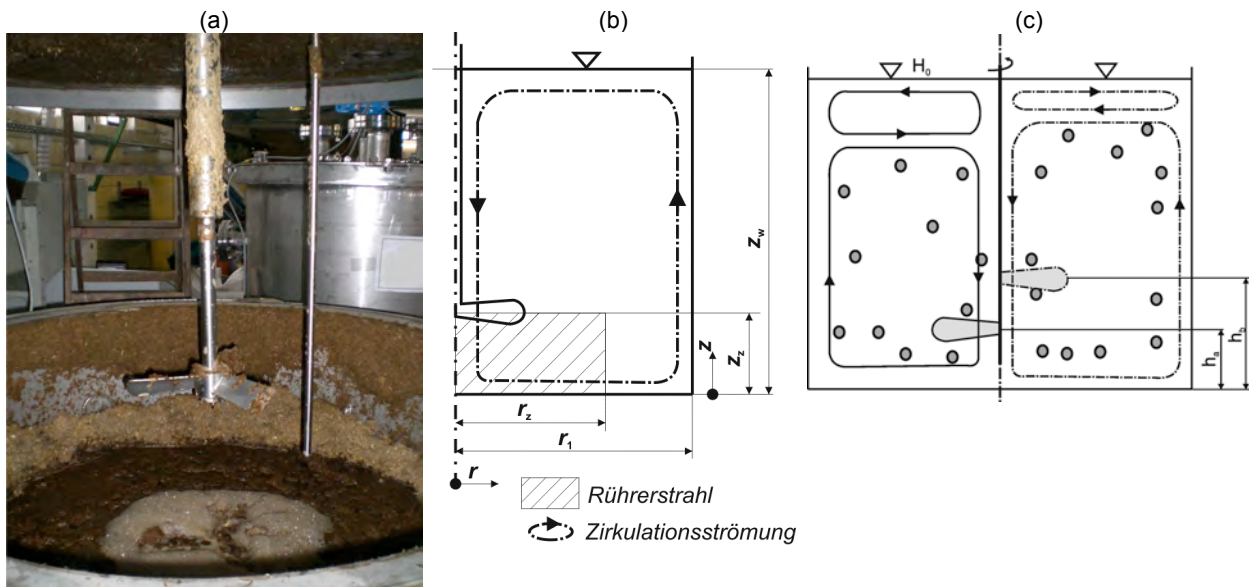


Abbildung 4. Fotografie des geöffneten Versuchbehälters mit angehobenem Rührwerk (a). Schematische Darstellung (b) des Behälters mit charakteristischen Abmessungen nach [6] und (c) der charakteristischen Zirkulationsströmung im Behälter bei zwei verschiedenen axialen Rührwerkspositionen.

Nach der Parametrierung und der Gewichtsanzpassung der Sensorpartikel wurden diese in den Fermenter gegeben und nach Beendigung des Versuchs manuell aus dem Behälter entnommen. Der Versuch dauerte 110 Minuten bei einer Datenerfassungsrate der Sensorpartikel von  $10 \text{ Hz}$  ( $\Delta t_{\text{Mess}} = 0,1 \text{ s}$ ), wobei nach ca. 70 Minuten der Wechsel der Rührwerksposition erfolgte.

Nach dem Auslesen der gespeicherten Datensätze aus den Sensorpartikeln, erfolgte die Datenauswertung, die mehrere Stufen beinhaltet:

1. Datenvorverarbeitung:
  - Tiefpassfilterung der gemessenen Zeitreihen
  - Segmentierung von quasistationären Versuchsphasen
  - Ermittlung des aktuellen Atmosphärendruckes als Druckreferenz
2. Berechnung der Messgrößen Druck, Eintauchtiefe, Temperatur und Beschleunigung aus den digitalen Messwerten
3. Zeitreihenanalyse zur Ermittlung charakteristischer Parameterprofile und Prozesskenndaten.

Die gemessenen Daten können grundlegend in Daten zur Positionsverfolgung und Daten analytischer Messgrößen unterschieden werden. Der derzeitige Parametersatz bietet die Möglichkeit die Eintauchtiefe zur vertikalen bzw. axialen Positions- und Geschwindigkeitsverfolgung zu nutzen. Bezogen auf die

<sup>1</sup> Wir danken dem Fraunhofer IKTS Dresden und der LEHMANN Maschinenbau GmbH für ihre Kooperation und Unterstützung während der Experimente im "Applikationszentrum Bio-Energie Pöhl".

charakteristischen Behälterabmessungen wird die axiale Position im Behälter  $z$  normiert auf die Füllhöhe  $H_0$  gemäß (4) aus der ermittelten Eintauchtiefe  $h$  berechnet.

$$\frac{z}{H_0} = \frac{H_0 - |h|}{H_0} \quad (4)$$

Abbildung 5 zeigt zwei Sequenzen der normierten axialen Position  $z/H_0$  eines Sensorpartikel als Rohdaten (blau) und als gefilterte Daten (schwarz). Es ist erkennbar, dass die Bewegung des Sensorpartikel in diesem Strömungsregime chaotischen Charakter mit periodischen Elementen hat. Weiterhin weist die Zeitreihe keine Plateaus auf, was darauf hindeutet, dass der Prozess von einer axialen Dynamik dominiert wird.

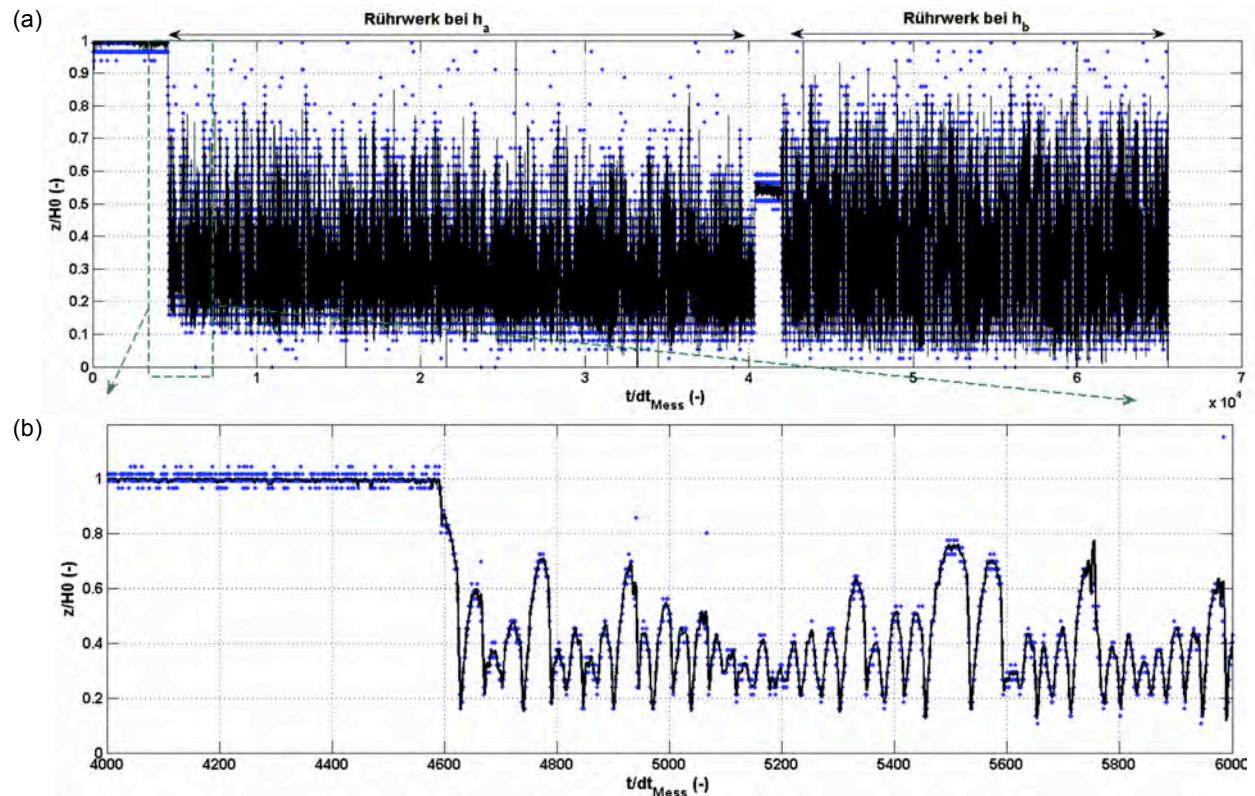


Abbildung 5. Sequenz der der normierten axialen Position  $z/H_0$  eines Sensorpartikel bei einer Messrate von 10 Hz (a) über den gesamten Verlauf des Versuchs mit zwei axialen Rührwerkspositionen und (b) kurz nach der Zugabe in den Behälter. Die Rohdaten sind blau und die gefilterten Daten sind schwarz markiert.

Die statistische Auswertung segmentierter Zeitreihen der axialen Position ermöglicht die Reduktion der Daten auf axiale Parameterprofile für Strömungsregime mit konstanten Betriebsparametern. In Abbildung 6 und Abbildung 7 sind die axialen Aufenthaltsprofile und die Häufigkeitsprofile der axialen Geschwindigkeitskomponente von drei ausgewählten Sensorpartikeln, die für die Charakterisierung der Strömungsbedingungen im Behälter herangezogen werden, für die beiden Rührwerkspositionen  $h_a$  und  $h_b$  dargestellt. Das axiale Aufenthaltsprofil wird aus dem Histogramm der axialen Position gebildet. Daher stellt die Ordinate im Diagramm die Häufigkeitsdichte dar. Anhand der Verschiebung des axialen Aufenthaltsprofils ist der Einfluss der Rührwerksposition deutlich erkennbar. Die Profile indizieren eine verbesserte axiale Durchmischung und damit eine verbesserte Homogenisierung des Substrates, welche durch das Anheben des Rührwerkes hervorgerufen wird. Außerdem ist im Bereich des Flüssigkeitsspiegels eine Totzone oder eine sekundäre Mischzone zu vermuten, da die Sensorpartikel auch nach Anheben des Rührwerkes nicht in diese separate Zone gelangen konnten. Beide Schlussfolgerungen gehen konform zu bekannten verfahrenstechnischen Modellen aus der Rührwerkstechnik [5] und [6]. Zudem zeigen die Messdaten der einzelnen Sensorpartikel im Vergleich ein sehr ähnliches Verhalten, womit die Reproduzierbarkeit der gemessenen Parameter durch mehrere Sensorpartikel deutlich wird.

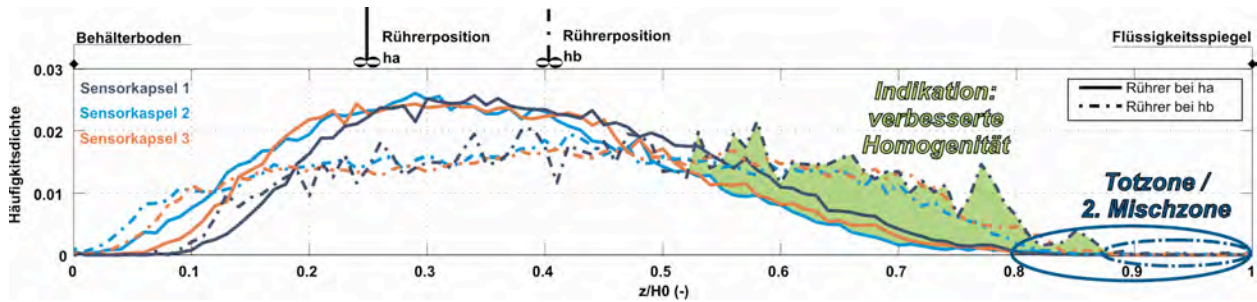


Abbildung 6. Axiale Aufenthaltsprofile von drei ausgewählten Sensorpartikeln für die Rührwerkpositionen  $h_a$  und  $h_b$ .

Die Häufigkeitsprofile der axialen Geschwindigkeitskomponente in Abbildung 7 spiegeln die axiale Dynamik im Behälter wider. Die axiale Geschwindigkeit wird aus der ersten zeitlichen Ableitung der Eintauchtiefe ermittelt. In diesem Profil zeichnet sich der Einfluss des Rührwerkes auf die Strömungsdynamik direkt ab. Für die obere axiale Rührwerkposition  $h_b$  ist eine Verschiebung zu positiven Geschwindigkeitsamplituden zu verzeichnen. Dies indiziert eine erhöhte aufwärtsgerichtete Strömungsdynamik und damit einen verbesserten axialen Feststofftransport. Weiterhin bildet sich in den Geschwindigkeitsprofilen das Strömungsverhalten der Sensorpartikel selbst ab. So ist zu erkennen, dass die Sensorpartikel im Bereich hoher Strömungsgeschwindigkeiten einen signifikanten Schlupf gegenüber der strömenden Flüssigphase haben können, da die erfassten Geschwindigkeitsamplituden deutlich unter der am Rührwerk vorliegenden Umfangsgeschwindigkeit von  $4,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  liegen.

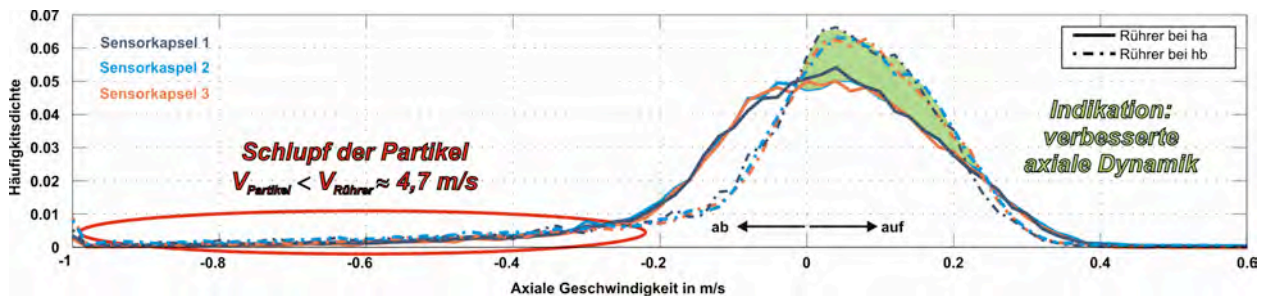


Abbildung 7. Häufigkeitsprofile der axialen Geschwindigkeitskomponente von drei ausgewählten Sensorpartikeln für die beiden Rührwerkpositionen  $h_a$  und  $h_b$ .

Ordnet man die gemessene Temperatur oder andere analytische Messparameter dem axialen Aufenthaltsprofil zu, können direkt axiale Profile dieser Parameter ermittelt werden. Abbildung 8 zeigt den zeitlichen Verlauf der gemessenen Temperatur eines Sensorpartikels. Nach der Zugabe des Sensorpartikels in den Prozess hat sich die Gehäusetemperatur an die konstante Prozesstemperatur angeglichen. Durch den konstanten Temperaturverlauf im Fermenter erübrigt sich hier jedoch die Darstellung axialer Temperaturprofile.

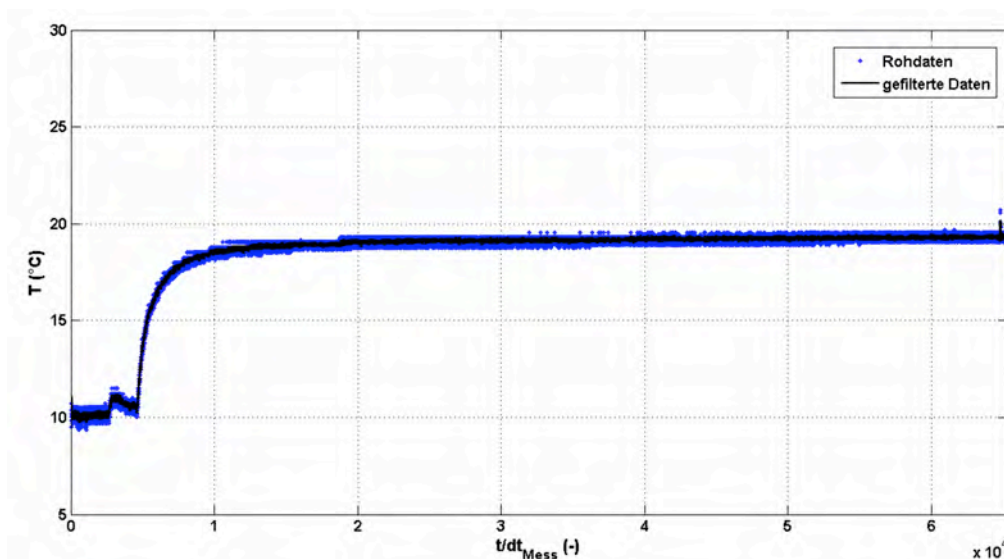


Abbildung 8. Zeitverlauf der gemessenen Temperatur eines Sensorpartikels während der Verweilzeit im Behälter.

Die Beschleunigungsdaten liefern zusätzliche Informationen über die Bewegung der Sensorpartikel und die Strömungsdynamik. Abbildung 9 zeigt die Zeitverläufe der gemessenen Komponenten der auf den Sensorpartikel wirkenden Inertialbeschleunigung in x-, y- und z-Richtung für den gesamten Versuchszeitraum. Bei dem Vergleich der Zeitbereiche für die beiden Rührwerkspositionen lässt sich in dieser Darstellung keine signifikante Änderung erkennen. Der aus der gemessenen Inertialbeschleunigung nach (5) berechnete Zeitverlauf des Beschleunigungsbetrages gibt jedoch eindeutige Informationen über die Strömung wieder.

$$|\mathbf{a}| = \frac{\sqrt{a_x(t)^2 + a_y(t)^2 + a_z(t)^2}}{g} - 1 \quad (5)$$

In Abbildung 10 sind Zeitsequenzen von jeweils 1000 erfassten Werten von  $|\mathbf{a}|$  zusammen mit  $z/H_0$  aus den Zeitbereichen der eingestellten axialen Rührwerkspositionen  $h_a$  und  $h_b$  dargestellt. Die unabhängig von der axialen Position gemessenen Beschleunigungswerte korrelieren zeitlich eindeutig mit dem axialen Positionsverlauf. Im Bereich der zyklisch wiederkehrenden negativen Flanke des axialen Positionsverlaufes weist die Beschleunigung deutliche lokale Spitzenwerte auf. In diesem Bereich bewegt sich der Sensorpartikel in axialer Richtung nach unten und passiert das Rührwerk bzw. den Bereich des schnellen Rührerstrahles. Dies gibt Aufschluß über die charakteristische Zirkulationszeit der Sensorpartikel in der Zirkulationsströmung. Im Vergleich ist in Abbildung 10 b gegenüber Abbildung 10 a eine tendenziell größere Zirkulationszeit bzw. Periodendauer zu erkennen. Die Zirkulationszeit variiert jedoch entsprechend der Komplexität der Bewegung der Sensorpartikel im Behälter relativ stark.

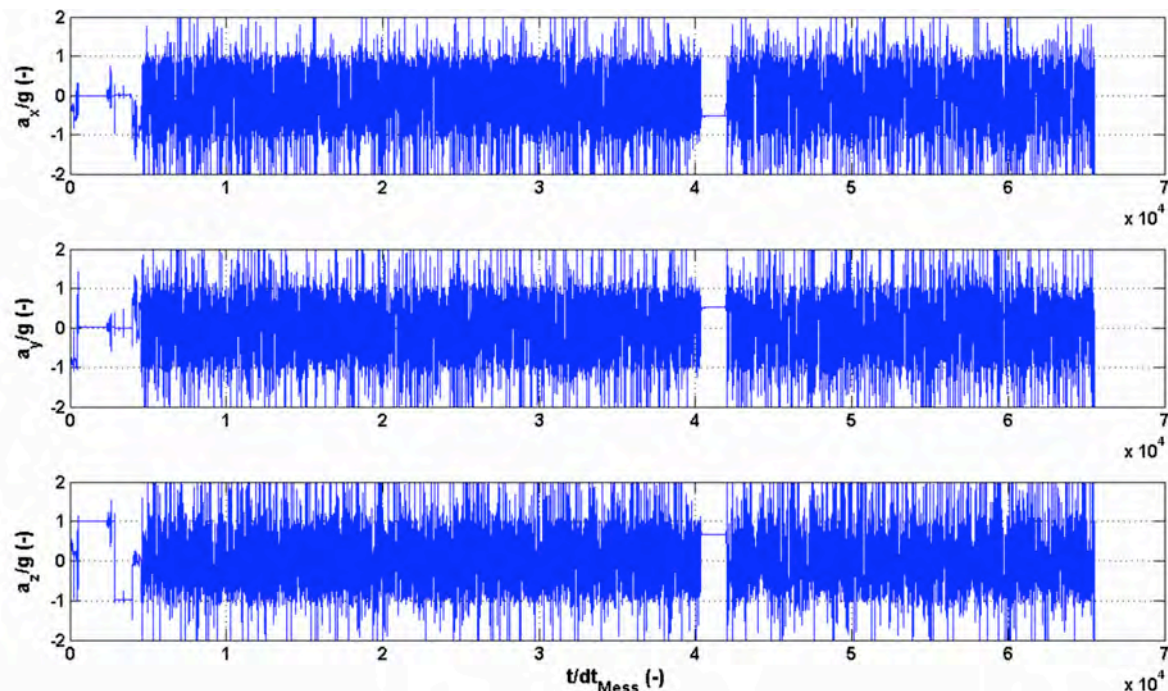


Abbildung 9. Zeitverlauf der gemessenen Inertialbeschleunigung eines Sensorpartikels in x-, y- und z-Richtung in Form normierter Beschleunigungswerte.

Betrachtet man das Beschleunigungssignal im spektralen Frequenzbereich, kann dieser Zusammenhang deutlicher betrachtet werden. Das Frequenzspektrum der Beschleunigungsamplituden  $|\mathbf{a}(f)|$  des ausgewählten Sensorpartikels ist in Abbildung 11 für beide Rührwerkspositionen  $h_a$  und  $h_b$  dargestellt. Für die Rührwerkspositionen  $h_a$  entsteht ein Maximum im Spektrum bei  $f_a = 0,27$  Hz ( $t_a = 3,7$  s bzw.  $t_a/\Delta t_{\text{Mess}} = 37$ ) welches für die Rührwerkspositionen  $h_b$  um  $\Delta f = 0,06$  Hz auf  $f_b = 0,21$  Hz ( $t_b = 4,8$  s bzw.  $t_b/\Delta t_{\text{Mess}} = 48$ ) verschoben wird. Diese Vergrößerung der charakteristischen Zirkulationszeit der Sensorpartikel von  $t_a - t_b = 1,1$  s unterstützt die Schlussfolgerungen aus den axialen Aufenthaltsprofilen. Die Sensorpartikel folgen dem Zirkulationsstrom, der für die Rührwerkspositionen  $h_b$  einen größeren Raum im Behälter erfasst und demzufolge längere Trajektorien der Sensorpartikel hervorruft. Die größere Zirkulationszeit deutet zudem auf einen verbesserten Suspensionsgrad hin [6]. Weiterhin spiegelt sich anhand der größeren Amplituden im Spektrum für die Rührwerkspositionen  $h_b$  insbesondere im Frequenzbereich von 0,5-3,5 Hz auch die generell erhöhte Strömungsdynamik wider.

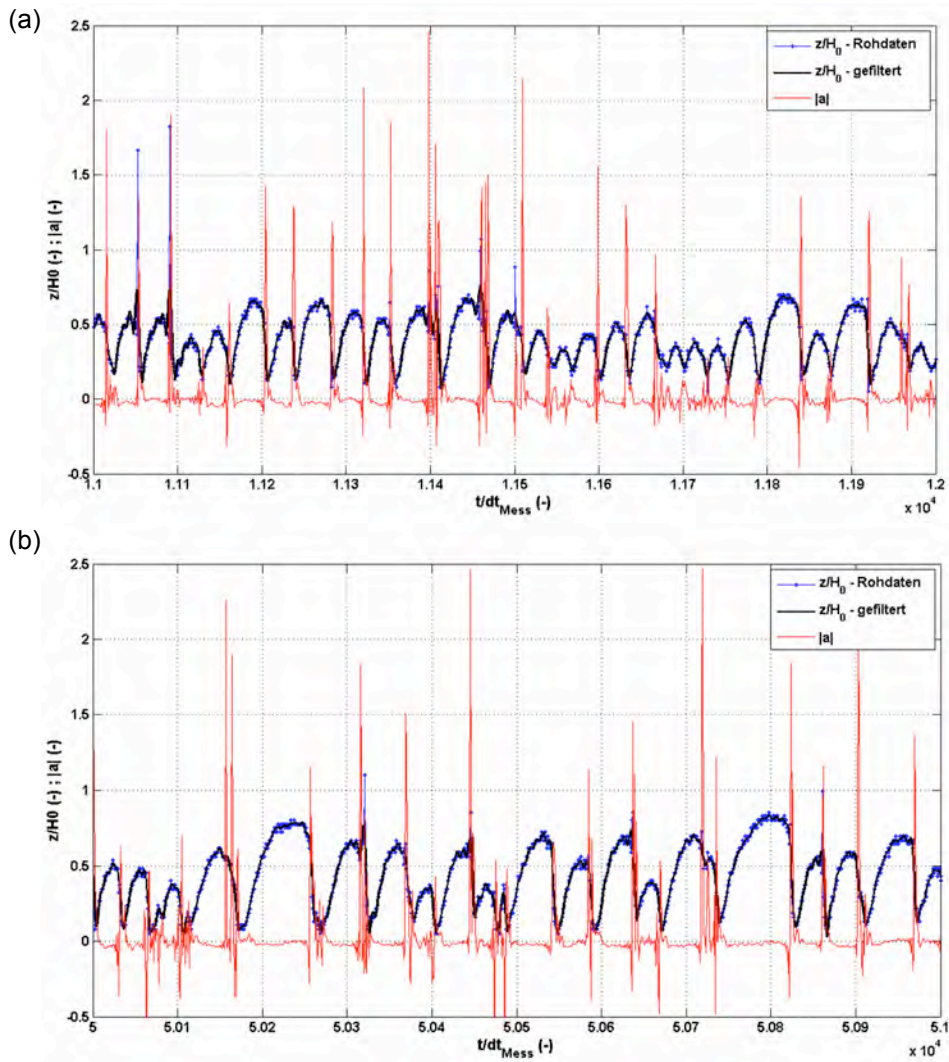


Abbildung 10. Zeitsequenzen von jeweils 1000 erfassten Werten von  $|a|$  zusammen mit  $z/H_0$  aus den Zeitbereichen der eingestellten axialen Rührwerkspositionen (a)  $h_a$  und (b)  $h_b$ .

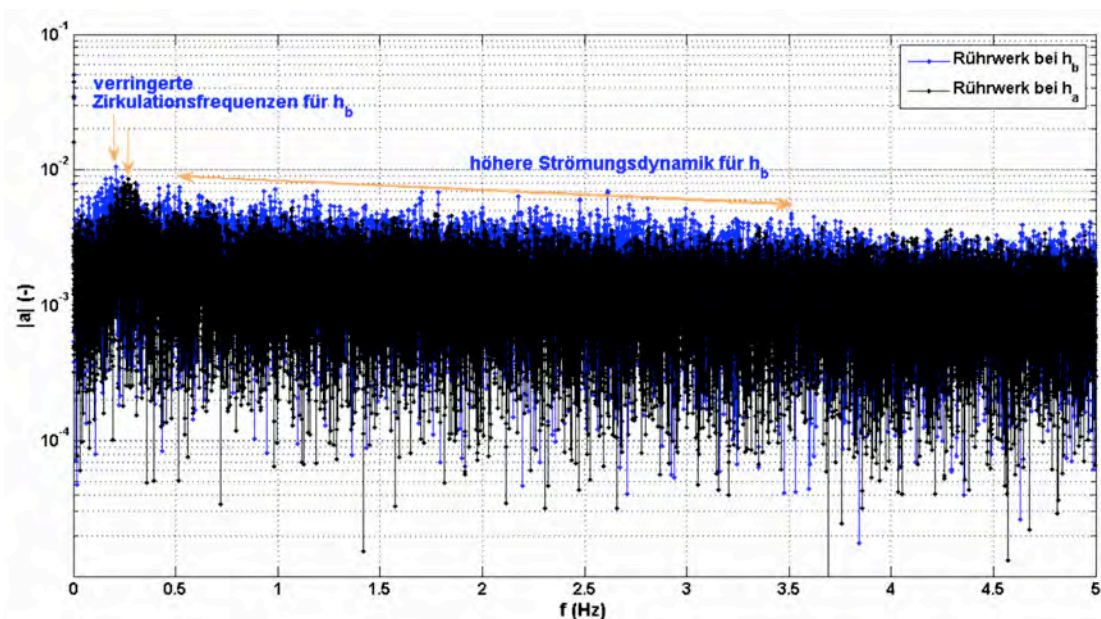


Abbildung 11. Amplitudenspektrum des Beschleunigungsbetrages  $|a(f)|$  aus den erfassten Zeitbereichen während der eingestellten axialen Rührwerkspositionen  $h_a$  und  $h_b$ .



## 4 Zusammenfassung

Es wurde ein Konzept autonomer Sensorpartikel für den Einsatz in großskaligen Prozessbehältern entwickelt und getestet. Die Sensorpartikel ermöglichen die Erfassung der Signale von drei integrierten Messfühlern für die Umgebungstemperatur, die Eintauchtiefe als Funktion des hydrostatischen Drucks und die 3D-Beschleunigung, in einem konfigurierbaren, autonomen Messregime. Das Sensorkonzept ist offen für die Einbindung zusätzlicher Sensorelemente für relevante Prozessparameter wie z.B. pH-Wert, Redoxpotential,  $pO_2$ ,  $pCO_2$ , elektrische Leitfähigkeit und relative Permittivität sowie weiterer Sensoren zur Positionsverfolgung.

Die experimentelle Validierung der Sensorpartikel erfolgte unter realen Strömungsbedingungen in einem Versuchsfermenter. Die Analyse der aufgenommenen Messdaten zeigt, dass die vorherrschenden Bedingungen innerhalb des Reaktorbehälters wie Temperatur, Druck, Strömungsdynamik und Verteilung von Totzonen über einen längeren Zeitraum erfasst werden können. Weiterhin können aus den Messdaten der Sensorpartikel räumliche Parameterprofile und Prozesskennndaten, die den Zustand des ablaufenden Prozesses charakterisieren, extrahiert werden. Basierend auf den positiven experimentellen Ergebnissen, ist der Langzeiteinsatz des Messsystemes in großskaligen Reaktorbehältern wie z.B. einem Biogasfermenter denkbar. Damit sollen grundlegende Untersuchungen der Bedingungen im Prozess und die Evaluierung der Effizienz der Heiz- und Rührregime erfolgen.

Das Anwendungsspektrum der Sensorpartikel beschränkt sich jedoch nicht nur auf großskalige Prozesse wie z.B. Biogasfermenter. Weitere denkbare Einsatzbereiche liegen in der Papierherstellung, der Abwasseraufbereitung, dem Umweltmonitoring und der chemischen Verfahrenstechnik.

## Referenzen

- [1] M. Antoniou, M.C. Boon, P.N. Green, P.R. Green, and T.A. York, "Wireless Sensor Networks for Industrial Processes," IEEE Sensors Applications Symposium, New Orleans, LA, USA, 17.-19. Februar, 2009.
- [2] S. Thiele, S. Schöne, F. Voigt, M. J. Da Silva, U. Hampel, „Design of a Neutrally Buoyant Self-Powered Multi-Parameter Sensor for Data Logging in Flow Applications,“ IEEE Sensors Conference, 25-28 Oct. 2009.
- [3] S. Thiele, M.J. Da Silva, and U. Hampel, „Autonomous sensor particle for parameter tracking in large vessels,“ Meas. Sci. Technol., vol. 21 (8), 2010, DOI: 10.1088/0957-0233/21/8/085201.
- [4] "Guide to the expression of uncertainty in measurement," GUM, German Version ENV 13005:1999, DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [5] M. Kraume, Mischen und Rühren, Grundlagen und moderne Verfahren, WILEY-VCH Verlag, Weinheim, 2003, ISBN 3-527-30709-5.
- [6] F. Liepe, W. Meusel, H.-O. Möckel, B. Platzer, H. Weißgärber, Verfahrenstechnische Berechnungsmethoden, Teil 4 Stoffvereinigen in fluiden Phasen, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1988, ISBN 3-342-00155-0.