

Instrumentierte Strömungsfolger mit erweiterter Positionsdetektion und Auftriebseinheit

Sebastian Reinecke¹, Uwe Hampel^{1,2}

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

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

Zusammenfassung

Zur Untersuchung der ablaufenden Prozesse in großen Behältern, wie z. B. Biogasfermentern, Bioreaktoren und Belebtschlammbecken, wurde am HZDR das Konzept instrumentierter, strömungsfolgender Sensorpartikel entwickelt. Die Sensorpartikel werden als auftriebsneutrale Strömungsfolger eingesetzt und erfassen dabei kontinuierlich Prozessparameter. Diese Daten werden nach der Rückgewinnung der Sensorpartikel aus dem Prozess einem computergestützten Analysesystem zur Verfügung gestellt. Die erweiterten Sensorpartikel bestehen aus robusten Kapseln, welche mit einer integrierten Messelektronik und einer mechanischen Auftriebseinheit ausgestattet sind. Das Systemkonzept berücksichtigt derzeit miniaturisierte Sensoren für die Umgebungstemperatur, die Eintauchtiefe als Funktion des hydrostatischen Drucks, die Beschleunigung und das Magnetfeld. Das Konzept ist zudem offen für die Einbindung ergänzender miniaturisierter Messfühler, wie z.B. für pH-Wert und Gelöst-Sauerstoff. Die Auftriebseinheit erlaubt eine automatisierte Tarierung der Sensorpartikel im ruhenden Prozessmedium, wodurch ein aufwändiges manuelles Justieren der Partikelmasse entfällt. Zudem ist mit der Auftriebseinheit eine erleichterte Rückgewinnung der Sensorpartikel von der Flüssigkeitsoberfläche nach Beendigung der Messung möglich. Weiterhin wurde die Detektion eines festen Positionsmarkers mit den Sensorpartikeln realisiert. Als Positionsmarker wird eine eigens entwickelte Tauschspule eingesetzt, deren kodiertes Anregungssignal über das entstehende Magnetfeld von den vorbeiströmenden Sensorpartikeln empfangen wird. Diese Positionsdetektion wurde erstmals in einem Laborfermenter genutzt, um über eine entsprechende Signalanalyse die Zirkulationszeitverteilung und daraus die PÉCLÉT-Zahl zu ermitteln.

Schlagwörter: Strömungsfolger, Sensorpartikel, Autonomer Sensor, Positionsdetektion, Auftrieb

Einleitung

Die messtechnische Zugänglichkeit großer Anlagen und Behälter in der Energie- und Verfahrenstechnik ist erschwert, so dass die Beschreibung und die Überwachung der darin ablaufenden verfahrens- und energietechnischen Prozesse erheblich eingeschränkt sind und deshalb oft ungenügend sind. Ein Grund ist die mangelnde Instrumentierung der Anlagen, da die Installation von lokalen Sonden mit Kabelverbindungen häufig nicht realisierbar oder aufgrund erheblicher Kosten unerwünscht ist. Zudem sind in den großen Behältern aufgrund der Umgebungsbedingungen, der Behälterdimensionen und der oft undurchsichtigen Prozessmedien relevante Messtechniken, wie z. B. Videometrie, Thermografie, PIV oder Prozesstomografie, nicht anwendbar.

In den Anwendungsfeldern von gerührten Bioreaktoren, Fermentern und biologischen Abwasseraufbereitungsanlagen 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]. Diese Sensorpartikel wurden bereits in praxisrelevanten Experimenten unter realen Umgebungsbedingungen von Biogasfermentern zur Bestimmung von charakteristischen Prozessparametern, wie Strömungsgeschwindigkeit, Zirkulationszeit, Zirkulationsbeiwert und Peclét-Zahl, eingesetzt [3],[4].

Die Erweiterung der Sensorpartikel umfasst eine Auftriebseinheit und die Detektion von festen Positionsmarkern. Die Auftriebseinheit erlaubt die automatische Tarierung der Sensorpartikel in einer separaten Substratprobe. Damit entfällt eine zeitlich aufwändige manuelle Tarierung. Weiterhin ist damit ein ereignisgesteuertes Auftreiben zur erleichterten Rückgewinnung der Sensorpartikel von der Flüssigkeitsoberfläche des Behälters möglich.

Die Detektion von festen Positionsmarkern erweitert die Erfassung der Position der Sensorpartikel. Die dafür entwickelte Tauchspule wird mit einem kodierten Signal angeregt, um beim empfangenden Magnetometer der Sensorpartikel eine eindeutige Unterscheidung zwischen dem Positionssignal und Störfeldern bzw. der Strömungsbewegung treffen zu können. Die so im Behälter markierte Position ermöglicht die Bestimmung der Zirkulationszeit der Sensorpartikel.

Die erweiterten Sensorpartikel wurden in einem Validierungsexperiment unter realen Strömungsbedingungen eines Laborfermenters mit einer neuartigen ovalen Geometrie getestet.

Aufbau der Strömungsfollower

Die erweiterten Sensorpartikel bestehen aus robusten Kapseln, welche mit einer integrierten Messelektronik ausgestattet sind (siehe Abb. 1) und basieren auf den prototypischen Sensorpartikeln von THIELE et al. [2]. Die derzeitige Konfiguration berücksichtigt miniaturisierte Sensoren für die Umgebungstemperatur (10...70 °C), die vertikale Position als Funktion des hydrostatischen Drucks (98...158 kPa), die 3D-Beschleunigung (-6...+6 g) und das umgebende Magnetfeld (-4...+4 Gauss). Die Einbindung ergänzender miniaturisierter Messfühler zur Erfassung weiterer analytischer Prozessparameter, wie z. B. pH/OPR Sensoren, biochemische Sensoren oder Gassensoren ist aufgrund des modularen Systemkonzeptes möglich. Die Steuerung des autonomen Messregimes erfolgt durch einen integrierten Mikrocontroller. Auf diese

Weise wird ein energieeffizienter Betrieb der Erfassungselektronik und der Messfühler erreicht.

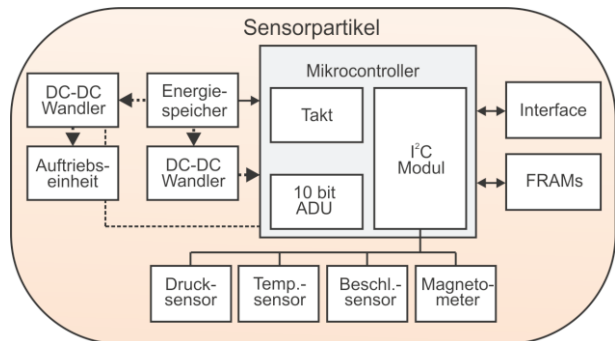


Abb. 1. Schematische Darstellung der Komponenten der innenliegenden Erfassungselektronik der Sensorpartikel mit Auftriebseinheit.

Das Gehäuse der Sensorpartikel wurde weiter modularisiert, um die Komponenten der Auftriebseinheit zu integrieren. In Abb. 2 ist das Gehäuse mit dem ausgefahrenen Hubkolben und der angeschlossenen Erfassungselektronik abgebildet. Die Sensorpartikel haben ein Volumen von $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$. Das Ausgangsgewicht der Sensorpartikel von $m_p = 0,145 \text{ kg}$ bestimmt die minimale Dichte von $\rho_p = 967 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

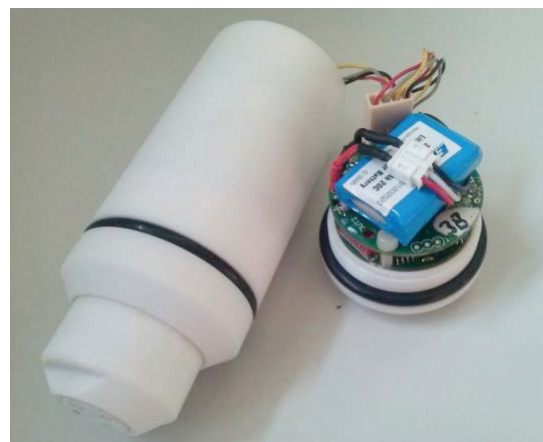


Abb. 2. Sensorpartikel geöffnet mit der innenliegenden Erfassungselektronik und dem Hubkolben der Auftriebseinheit.

Auftriebskonzept

Das Auftriebsverhalten bzw. die erforderliche Dichteänderung der Sensorpartikel für eine erleichterte Rückgewinnung wurde experimentell unter realen Strömungsbedingungen in einem Rührbehälter in Wasser (Dichte $\rho_f = 998 \text{ kg/m}^3$) ermittelt. In der Zirkulationsströmung von Rührbehältern treten im Ansaugbereich des Rührers große abwärts gerichtete Strömungsgradienten auf (siehe Abb. 3). Die

Sensorpartikel müssen zur Rückgewinnung unter diesen Bedingungen nahe der Oberfläche verweilen. Es kamen drei Sensorpartikel bei den Rührerdrehzahlen n von $0,92 \text{ s}^{-1}$, $1,23 \text{ s}^{-1}$ und $1,53 \text{ s}^{-1}$ zum Einsatz. Diese wurden manuell auf drei unterschiedliche Werte der Dichte ρ_{SP} der Sensorpartikel, nämlich $\rho_{SP} \approx \rho_f$, $\rho_{SP} \approx 0,98 \cdot \rho_f$ und $\rho_{SP} \approx 0,94 \cdot \rho_f$, eingestellt.

Aus den gemessenen Werten des hydrostatischen Drucks wurden die vertikalen Aufenthaltsprofile der Sensorpartikel entsprechend REINECKE et al. bestimmt [3]. Die vertikalen Aufenthaltsprofile der Sensorpartikel geben die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Sensorpartikel über der Höhe im Behälter wieder (siehe Abb. 4). Das Sensorpartikel mit $\rho_{SP} \approx \rho_f$ bildet das prozessrelevante Aufenthaltsprofil ab, welches zur Strömungscharakterisierung genutzt wird. Das mit $\rho_{SP} \approx 0,98 \cdot \rho_f$ um 2% leichtere Sensorpartikel zeigt bereits eine Verschiebung des Aufenthaltsprofils in Richtung der Flüssigkeitsoberfläche. Die Einstellung der Dichte von $\rho_{SP} \approx 0,94 \cdot \rho_f$ zeigt für alle untersuchten Rührerdrehzahlen eine überwiegende Präsenz des Sensorpartikels nahe der Flüssigkeitsoberfläche. Gegenüber der Tarierung mit $\rho_{SP} \approx \rho_f$ ist demnach zur Rückgewinnung der Sensorpartikel unter realistischen Strömungsbedingungen eine Dichteänderung der Sensorpartikel von mindestens 6% zu erreichen.

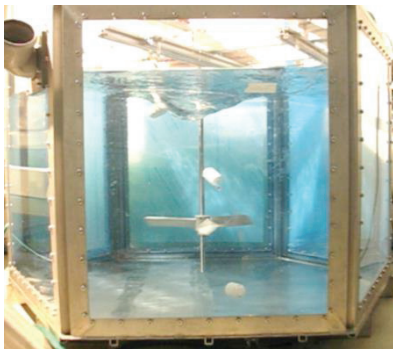


Abb. 3. Experiment mit Sensorpartikeln im Rührbehälter in Wasser zur Bestimmung der erforderlichen Dichteänderung für eine Rückgewinnung an der Flüssigkeitsoberfläche.

Basierend auf diesem Ergebnis erfolgte die Entwicklung und Umsetzung eines Auftriebskonzeptes, welches in die bestehenden Sensorpartikel integriert wurde. Die wesentlichen Komponenten sind in Abb. 5 schematisch dargestellt. Die Energieversorgung erfolgt mit einem Lithium-Polymer-Akkumulator und einem nachgeschalteten Spannungswandler. Zur Betätigung des Hubkolbens wird ein miniaturisierter Linearaktor, bestehend aus einem Schrittmotor und einem Lineargetriebe, eingesetzt. Der Linearaktor wird von einem Treiber, welcher vom zentralen Mikrocontroller angesteuert wird,

gespeist. Über den Druckmessfühler ist eine Rückkopplung zur aktuellen vertikalen Position des Sensorpartikels möglich. Dies erlaubt eine automatische Tarierung der Sensorpartikel.

Das Auftreiben der Sensorpartikel erfolgt ereignisgesteuert durch den Mikrocontroller. Als Ereignisse werden eine programmierte Zeitdauer, der Entladezustand des Akkumulators und das Erreichen des Datenspeichervolumens angesehen.

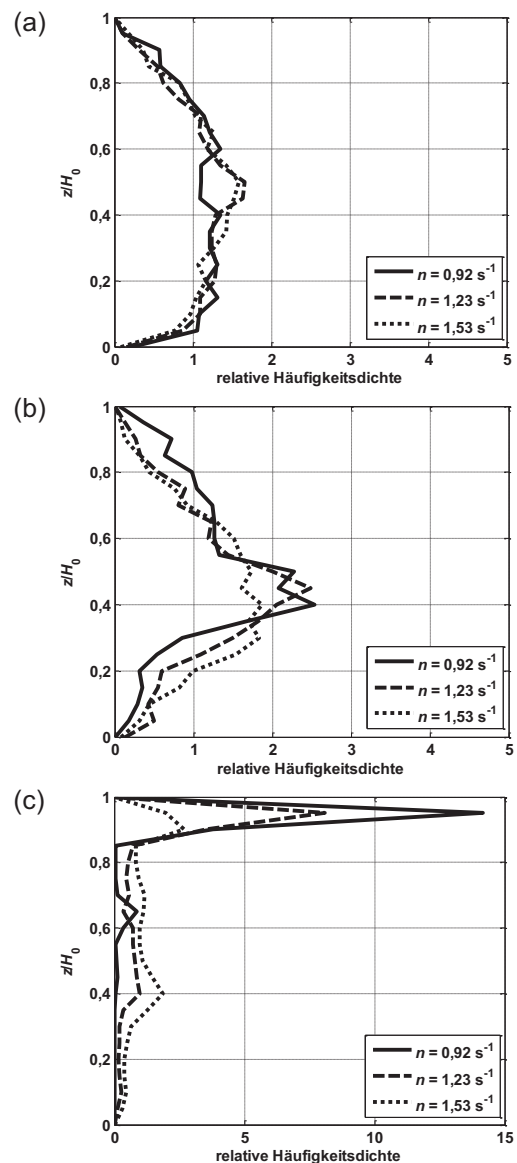


Abb. 4. Vertikale Aufenthaltsprofile der Sensorpartikel für das Experiment im Rührbehälter bei den Rührerdrehzahlen n von $0,92 \text{ s}^{-1}$, $1,23 \text{ s}^{-1}$ und $1,53 \text{ s}^{-1}$ mit unterschiedlichen Werten der Dichte ρ_{SP} der Sensorpartikel: a) $\rho_{SP} \approx \rho_f$, b) $\rho_{SP} \approx 0,98 \cdot \rho_f$ und c) $\rho_{SP} \approx 0,94 \cdot \rho_f$.

Der Hubkolben ist in die Stirnseite des Sensorpartikels integriert (siehe Abb. 6.). Dieser ist mit einem O-Ring ggü. dem Sensorkörper abgedichtet und gleichzeitig geführt. Der Kolbendurchmesser ist so angepasst, dass eine

minimale Verstellkraft für den Aktor von unter 10 N auftritt und trotzdem eine hinreichende Dichtigkeit bei den typischen Füllhöhen in den Behältern von bis zu 15 mWS (Prüfdruck 2,5 bar mit Sicherheitsfaktor 1,5) gewährleistet wird.

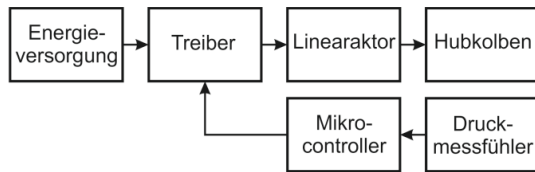


Abb. 5. Schema der wesentlichen Komponenten der Auftriebseinheit von Sensorpartikeln.

Das Getriebe des Linearaktors befindet sich im Hohlkörper des Hubkolbens und die Achse ist mit dem Kolben fest verbunden. Mit dieser Anordnung wird der maximale Verstellweg des Linearaktors von 15 mm auf den Hubkolben übertragen. Bezogen auf das Gesamtvolumen des Sensorpartikels ergibt dies eine maximale Änderung des Volumens von über 8%. In wässrigen Medien entspricht dies direkt der relativen Änderung der mittleren Dichte des Sensorpartikels. Im voll ausgefahrenen Zustand ist damit das Auftreiben der Sensorpartikel an die Flüssigkeitsoberfläche gesichert.

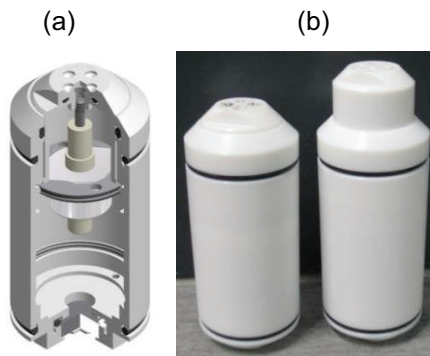


Abb. 6. Gehäuse der erweiterten Sensorpartikel: a) dreidimensionale Schnittdarstellung des Gehäuses mit innenliegendem Linearaktor und b) geschlossenes Sensorpartikel mit ein- und ausgefahrenem Hubkolben.

Die Genauigkeit der Dichteanpassung ist durch die Schrittlänge des Linearaktors von 0,0254 mm pro Schritt bestimmt und liegt unter 0,014% bezogen auf Wasser. Damit ist eine hochpräzise Dichteanpassung der Sensorpartikel möglich. Dies erlaubt weiterhin eine autarke und automatische Tarierung der Sensorpartikel. Dazu wurde ein Algorithmus für den Mikrocontroller entwickelt, welcher die Messwerte des integrierten Druckmessfühlers als Rückkopplung für die aktuelle vertikale Position nutzt. Dieser ist in Abb. 7. als Programmablauf dargestellt.

Diese automatische Tarierung erfolgt kurz vor dem Einsatz der Sensorpartikel an dem jeweiligen Behälter. Dazu wird jedes Sensorpartikel in einer Substratprobe in einem Testbehälter mit einer

Füllhöhe von ca. einem Meter eingesetzt. Die Sensorpartikel sind initial geringfügig beschwert und sinken nach der Zugabe im Testbehälter ab. Durch das schrittweise Ausfahren des Kolbens erfolgt ein langsames Aufsteigen des Sensorpartikels. Die Dichteanpassung erfolgt in einem Intervall von 250 ms. Dies entspricht der empirisch ermittelten Reaktionszeit t_{\min} des Sensorpartikels auf schrittweise Änderungen der Kolbenstellung in ruhenden wässrigen Medien.

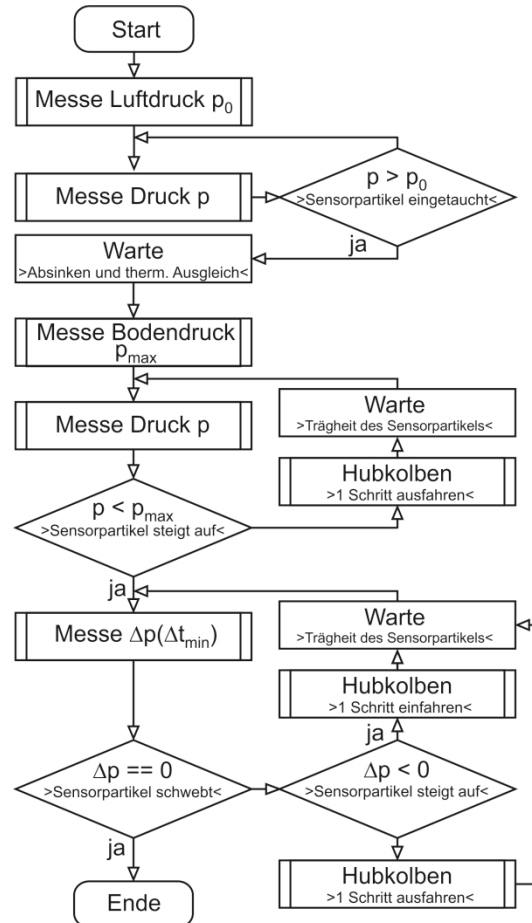


Abb. 7. Programmablaufplan der automatischen Tarierung der Sensorpartikel bei Zugabe in eine ruhende Substratprobe in einem Behälter mit ca. einem Meter Füllstand.

Nach dem automatischen Tarieren ist das Sensorpartikel auftriebsneutral mit einer minimalen Toleranz. Die theoretisch verbleibende Steig- bzw. Sinkgeschwindigkeit ergibt sich im Wesentlichen aus der Auflösung des Druckmessfühlers von ca. 6 Pa bzw. der Auflösung der gemessenen Eintauchtiefe von ca. 0,6 mmWS mit t_{\min} zu ca. $2,4 \cdot 10^{-3}$ m/s. Unter Laborbedingungen in Leitungswasser wurde mit der automatischen Tarierung jedoch überwiegend der Schwebeszustand der Sensorpartikel und damit eine kaum messbare verbleibende Steig- bzw. Sinkgeschwindigkeit erreicht. Mit einer manuellen Tarierung sind solche Werte nur mit einem hohen Aufwand erreichbar.

Erweiterung der Positionsdetektion

Das Konzept der erweiterten Positionsdetektion basiert auf der Detektion eines festen Positionsmarkers mit den Magnetfeldsensoren der Sensorpartikel. Von BRYANT und DAY wurde erstmals eine vergleichbare Anordnung zur Zirkulationszeitmessung in Fermentern genutzt [5], [6]. Dabei wurde von einer strömenden Radio-Pille ein Signal ausgesendet, welches von einer fest montierten Antenne lokal empfangen wurde.

Zur Positionsdetektion mit Sensorpartikeln wird als Positionsmarker eine Tauchspule direkt im Strömungsquerschnitt des Behälters eingesetzt (siehe Abb. 8a). Diese senden ein Signal mit einer begrenzten Reichweite aus, welches von den Sensorpartikeln lokal erfasst wird. Mit dem Magnetometer werden dabei die durch das umgebende Magnetfeld erzeugte magnetische Flussdichte und damit auch das Erdmagnetfeld gemessen. Der Positionsmarker wurde so ausgelegt, dass das bei dem Durchtritt des Sensorpartikels durch die Spule auftretende Magnetfeld am Magnetometer stärker als der Betrag des Erdmagnetfeldes von ca. 0,5 Gauss ist. Zusätzlich ist das Positionssignal kodiert, um eine Trennung von Einflüssen der Strömungsbewegung sowie Störfeldern und dem Positionssignal zu ermöglichen. Somit wird die Passage der Sensorpartikel an der Tauchspule eindeutig markiert. Dies ermöglicht die Extraktion der individuellen Zirkulationszeit der Sensorpartikel im Behälter, welche ein charakteristischer Prozessparameter für das Mischverhalten ist.

Dieses Konzept wurde zur Untersuchung des Mischverhaltens in einem Laborfermenter mit einer neuartigen ovalen Geometrie für Biogasfermenter erstmals angewendet (siehe Abb. 8b). Der Fermenter hat ein Volumen von 2 m³ bei einer Kanalbreite von 0,55 m und wird mit zwei horizontal fördernden Rührwerken an den Längsseiten mittig im Kanal als Umlaufreaktor betrieben. Das Ziel ist dabei eine gleichmäßige und schonende Vermischung der Substrate im Fermenter. Die beiden Rührwerke im Behälter wurden nacheinander mit den Umfangsgeschwindigkeiten von 5,5 m/s und 6,7 m/s betrieben. Zur Abbildung der realen Rheologie des Biogassubstrates wurde eine Xanthan-Lösung mit einer Konzentration von 5 g/l verwendet. Es kamen vier auftriebsneutrale Sensorpartikel bei einer Datenerfassungsrate von 8 Hz für jeweils 100 Minuten zum Einsatz. Als kodiertes Anregungssignal der Tauchspule wurde ein Frequenzsprung von der Frequenz 1 Hz auf 2 Hz mit einer Wiederholfrequenz von 0,5 Hz genutzt (siehe Abb. 9).

Die Zeitabstände im extrahierten Binärsignal stellen die Zirkulationszeiten der Sensorpartikel im

Behälter dar. Die Grundgesamtheit der individuellen Zirkulationszeiten erlaubt die Ermittlung der Zirkulationszeitverteilungen, welche in Abb. 11 für die beiden Umfangsgeschwindigkeiten des Rührwerks dargestellt sind. Der Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit ist anhand des Erwartungswertes und der Streuung dieser Verteilungen ersichtlich. Bei der niedrigeren Umfangsgeschwindigkeit ist der Erwartungswert der Verteilung $\bar{t}_z = 56,0$ s und die Streuung $\sigma_z = 66,1$ s. Bei der höheren Umfangsgeschwindigkeit sind die Werte mit $\bar{t}_z = 25,7$ s und $\sigma_z = 23,5$ s deutlich kleiner.

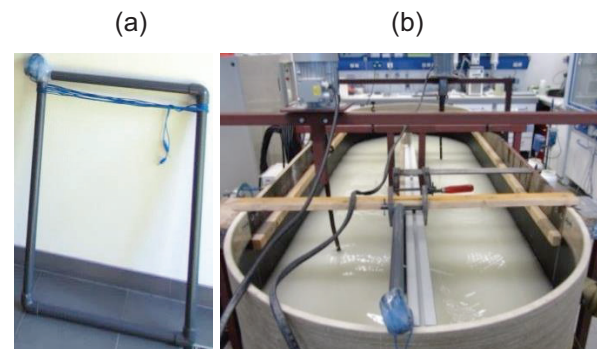


Abb. 8. Laborfermenter mit ovaler Geometrie: a) Tauchspule und b) Fermenter im Betrieb.

Zur Dekodierung des Empfangssignals vom Magnetometer wird dieses im Rahmen der Datenanalyse mit der charakteristischen Sequenz des Anregungssignales korreliert, dann gefiltert und letztlich anhand eines Schwellwertes binarisiert. In Abb. 10 ist eine beispielhafte Sequenz des analysierten Magnetfeldsignals zur Detektion des Positionsmarkers dargestellt.

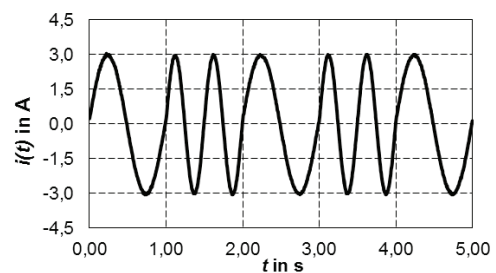


Abb. 9. Kodiertes Anregungssignal $i(t)$ der Tauchspule zur Positionsdetektion mit einem Frequenzsprung von 1 Hz auf 2 Hz und einer Wiederholfrequenz von 0,5 Hz.

Aus dem Erwartungswert und der Streuung kann die PECLÉT-Zahl nach LUO gemäß

$$Pe \approx 2 \cdot \left(\frac{\bar{t}_z}{\sigma_z} \right)^2$$

ermittelt werden [7].

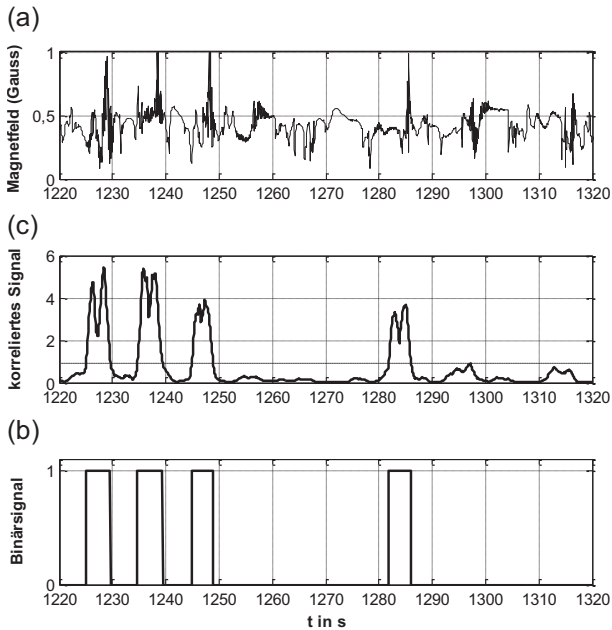


Abb. 10. Sequenz des analysierten Magnetfeldsignals zur Detektion des Positionsmarkers zur weiteren Zirkulationszeitbestimmung: a) Betrag des Magnetfeldes, b) korreliertes Signal mit Schwellwert und c) Binärsignal.

Für die kleinere Umfangsgeschwindigkeit ist $Pe = 1,43$ und für die größere Umfangsgeschwindigkeit ist $Pe = 2,4$, was für eine leichte Abnahme der Rückvermischung und eine Zunahme des konvektiven Strömungsanteils spricht. Im Ergebnis erscheint bei dieser Fermentergeometrie die untersuchte Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit zu keiner Steigerung der Durchmischung zu führen.

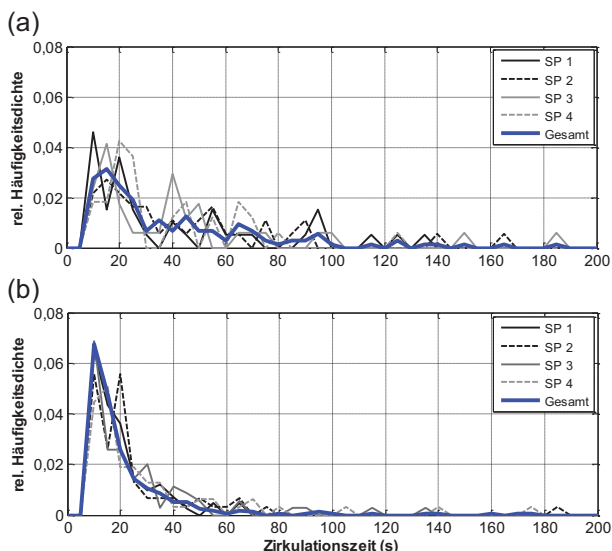


Abb. 11. Zirkulationszeitverteilungen der einzelnen Sensorpartikel im ovalen Laborfermenter bei den Umfangsgeschwindigkeiten der Rührer von a) 5,5 m/s und b) 6,7 m/s. Zusätzlich ist die Verteilung mit den Daten aller Sensorpartikel als Grundgesamtheit blau dargestellt.

Zusammenfassung

Die Erweiterung der Sensorpartikel durch eine Auftriebseinheit erleichtert deren Handhabbarkeit bei dem Einsatz an verfahrenstechnischen Anlagen durch die automatische Tarierung im Prozessmedium und das ereignisgesteuerte Auftreiben an die Flüssigkeitsoberfläche.

Die Detektion von festen Positionsmarkern wurde unter realen Strömungsbedingungen erfolgreich getestet und zur Bestimmung der Zirkulationszeitverteilung und der PÉCLÉT-Zahl genutzt. Die Positionsmarkierung kann durch effektivere Modulations- und Kodierungstechniken hinsichtlich der Robustheit verbessert werden. Zudem ist die Kombination der Positionsmarkierung mit einer auf Trägheitssensoren basierenden Positionserfassung denkbar.

Weiterhin ist der Einsatz des Positionsmarkers zum gesteuerten Auftreiben der Sensorpartikel vor Pumpen oder Absaugungen denkbar.

Danksagung

Ergebnisse dieses Beitrages sind auch im Rahmen des von der DBU geförderten Vorhabens LEOBEL (AZ30799) entstanden. Die experimentelle Validierung im Laborfermenter wurde in Kooperation mit dem Fraunhofer Institut Keramische Technologien und Systeme Dresden (IKTS) durchgeführt.

Literatur

- [1] ANTONIOU, M. et al.: Wireless Sensor Networks for Industrial Processes, IEEE SAS, New Orleans, LA, USA, 2009, 13-18.
- [2] THIELE, S. et al.: Autonomous sensor particle for parameter tracking in large vessels, Meas. Sci. Technol., 21(2010), Nr. 8.
- [3] REINECKE, S. 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] REINECKE, S. F.: Instrumentierte Strömungsfolger zur Prozessdiagnose in gerührten Fermentern, Dissertation, Dresdner Beiträge zur Sensorik, Band 52, TUDpress, 2014
- [5] BRYANT, J.: Mixing in Fermenters, Dissertation, University of Cambridge, 1969
- [6] DAY, A.: Mixing in stirred tanks, Dissertation, University of Exeter, 1975
- [7] LUO, H.-P.; AL-DAHMAN, M. H.: Macro-mixing in a draft-tube airlift bioreactor, Chem. Eng. Sci., 63(2008), 1572-1585.