

Richtungsaufgelöste Messung von Beschleunigungen mit Sensorpartikeln in industriellen Prozessbehältern

Lukas Buntkiel¹, Sebastian Reinecke¹, Uwe Hampel^{1, 2}

¹Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Dresden, Deutschland

²Institut für Energietechnik, TU Dresden, Dresden, Deutschland

Kontakt: l.buntkiel@hzdr.de

Einleitung

Prozesse wie sie in großen Behältern, etwa in Biogasfermentern, Bioreaktoren oder Belebtschlammbecken ablaufen, haben ein hohes Optimierungspotenzial hinsichtlich der Energieeffizienz der Vermischung. Schlechtes Mischen im Behälter führt zu Totzonen und einer ineffizienten Nutzung der eingebrachten Energie. Messungen in diesen Behältern sind aufgrund des opaken Fluids und der Größe und Beschaffenheit der Behälter mit konventioneller Messtechnik nur an lokalen Messstellen möglich. Um ortsaufgelöst Prozessparameter und die Strömung zu messen, wurde am HZDR das Konzept instrumentierter, strömungsfolgender Sensorpartikel entwickelt [1]. Strömungsfolgende Sensoren werden derzeit von einigen Gruppen weltweit entwickelt [2]. Ausgestattet sind sie mit mindestens einem Druck- und einem Temperatursensor. Auswerteschwerpunkt ist die vertikale Position (Tauchtiefe) im Behälter basierend auf einer Messung des hydrostatischen Drucks. Analysiert werden typischerweise vertikale Aufenthaltswahrscheinlichkeiten, vertikale Geschwindigkeitsprofile, Zirkulationszeiten, aus denen ein Zusammenhang mit der globalen Mischzeit des Reaktors hergestellt wird, sowie ein automatisiertes Einteilen des Behälters in vertikale Mischbereiche als neueste Analysemethode [3]. Um das Strömungsprofil zu vermessen und zielgerichtet, z. B. durch bauliche Veränderungen am Behälter oder reduzierte Rührerdrehzahlen bei Mischvorgängen, zu optimieren, müssen die im System auftretenden Beschleunigungen und deren Richtung bekannt sein.

Der vom HZDR entwickelte Sensorpartikel enthält zusätzlich zum Drucksensor eine inertielle Messeinheit bestehend aus einem Beschleunigungssensor und einem Gyroskop, sowie einem Magnetometer. Diese Sensoren bilden ein sogenanntes *Attitude Heading Reference System* (AHRS), mit dem die Orientierung und Beschleunigung des Sensorpartikels drifftfrei bestimmt werden kann [4]. In Kombination mit dem Drucksensor kann zusätzlich noch die vertikale Position der auftretenden Beschleunigungen analysiert werden. Ergebnisse aus der Analyse von Versuchen in einem Laborbehälter werden nachfolgend vorgestellt.

Der Sensorpartikel

Der am HZDR entwickelte Sensorpartikel ist kugelförmig und hat einen Außendurchmesser von 40 mm und wiegt ca. $32,5 \cdot 10^{-3}$ kg. Er besteht aus zwei Halbschalen, die über einen O-Ring gedichtet sind und über eine Schraubverbindung zusammengehalten werden (siehe Abb.1). Diese ermöglicht es außerdem, das Volumen des Sensorpartikels zu ändern, indem die Halbschalen zueinander verdreht



Abb. 1: Sensorpartikel (links) und geöffnete Gehäusekapsel (rechts).

und damit axial zueinander verschoben werden. Durch Verändern des Volumens ändert sich auch die Dichte über $\rho_{SF} = \frac{m}{V}$, die für ein optimales Strömungsverhalten möglichst identisch mit der Dichte ρ_{Fluid} sein sollte. Der Ursprung des Koordinatensystem K^{SP} ist im Volumenschwerpunkt des vollständig geschlossenen Gehäuses aufgehängt.

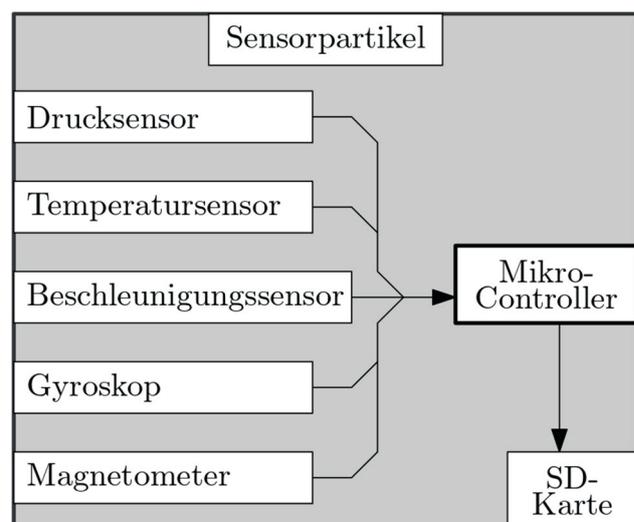


Abb. 2: Blockdiagramm der Komponenten im Sensorpartikel. Beschleunigungssensor und Gyroskop sind MEMS-Sensoren.

Das Blockdiagramm der Elektronikkomponenten ist in Abb. 2 dargestellt. Der Beschleunigungssensor, das Gyroskop und das Magnetometer messen jeweils in alle drei Raumrichtungen. Die von den Sensoren aufgezeichneten Daten werden auf einer SD-Karte gespeichert und nach Abschluss der Messung ausgelesen. Die Abtastraten der Sensorik finden sich in Tab. 1. Die Batterielaufzeit beträgt ca. 2 Stunden.

Aus Abb. 1 ist ersichtlich, dass die Platine mit den Sensoren nicht im Volumen- oder Masseschwerpunkt des Strömungsfolgers montiert ist. Des Weiteren sind die einzelnen Sensoren an unterschiedlichen Orten auf der Platine positioniert. Die Orientierung und der Ursprung der Sensorkoordinatensystem sind bis auf die Montageabweichungen bekannt. Das im allgemeinen angenommene Sensormodell für MEMS-Inertialsensoren

$$\mathbf{y} = \mathbf{S}\mathbf{x} + \mathbf{b} + \mathbf{v}_n \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{b}} = \mathbf{v}_w \quad (2)$$

mit dem wahren Wert \mathbf{y} , der Skalenfaktor- und Misalignmentmatrix \mathbf{S} , dem langsam driftenden Bias \mathbf{b} (z. B. modelliert als Gauß-Markov Prozess) und den beiden Rauschtermen $\mathbf{v}_n \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \boldsymbol{\eta}_n)$ und $\mathbf{v}_w \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \boldsymbol{\eta}_w)$. Die Rauschterme $\boldsymbol{\eta}_n$ und $\boldsymbol{\eta}_w$ werden üblicherweise über eine Allanvarianzanalyse bestimmt [5] und als Velocity/Angular Random Walk und Bias Instability bezeichnet. Für den hier eingesetzten Sensorpartikel wurden 3 Stunden statische Daten aufgezeichnet und die in Tab. 2 angegebenen Rauschterme ermittelt. Der Bias \mathbf{b} wird für jeden Messeinsatz individuell durch Mittelwertbildung über ca. 60 Sekunden statische Messung bestimmt. Die Skalenfaktor- und Misalignmentmatrix für den Beschleunigungssensor wurde nach der in [6] vorgeschlagenen Methode ermittelt und beträgt

$$\mathbf{S}_a = \begin{pmatrix} 1,03 & -0,002 & -0,005 \\ 0,002 & 1 & 0,003 \\ 0,005 & -0,003 & 1,011 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Für das Gyroskop wurde sie nicht ermittelt und wird als Einheitsmatrix modelliert, da kein geeignetes Kalibriergerät zur Verfügung stand.

Aus Sicht der Inertialsensoren ist der Strömungsfolger ein beschleunigtes Bezugssystem, das dazu führt, dass der Beschleunigungssensor neben der translatorischen Beschleunigung \mathbf{a}_t auch eine Zentrifugalbeschleunigung

$$\mathbf{a}_{ZF} = \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \quad (4)$$

misst, wenn sich der Sensorpartikel um den Masseschwerpunkt dreht. Ändert sich die Winkelgeschwindigkeit der Drehung, addiert sich die sogenannte Eulerbeschleunigung

$$\mathbf{a}_{Euler} = \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{r} \quad (5)$$

mit der Winkelgeschwindigkeit $\boldsymbol{\omega}$ gemessen vom Gyroskop, der Winkelbeschleunigung $\dot{\boldsymbol{\omega}}$ und dem Ortsvektor \mathbf{r} zum Volumen- bzw. Masseschwerpunkt

hinzu. Da sich die Winkelgeschwindigkeit in Spitzen bis an den Rand des Messbereichs von 2000 °/s bewegt und starken Schwankungen unterworfen ist, sind diese Termen nicht zu vernachlässigen.

Tab. 1: Abtastraten der internen Sensorik.

Sensor	Abstast rate (Hz)	Tiefpassfilter f_c (Hz)
Drucksensor	50	-
Temperatursensor	50	-
Beschleunigungssensor	500	125
Gyroskop	400	136,6
Magnetometer	100	-

Tab. 2: Rauschparameter der internen Sensorik.

	Angular/Velocity random walk	Bias Instability
Gyro x	18 m°/√s	8,7 °/h
Gyro y	18 m°/√s	9,7 °/h
Gyro z	18 m°/√s	3,8 °/h
Acc x	169 mm/s/√s	1 μm/s ² /h
Acc y	155 mm/s/√s	0,6 μm/s ² /h
Acc z	162 mm/s/√s	0,6 μm/s ² /h

Attitude Heading Reference System

Als *Attitude Heading Reference System* bezeichnet man den Teil eines Navigationssystems, welcher mittels geeigneter Sensorik (z. B. Gyroskopen, Magnetometern oder Sternensuchern) eine Schätzung der Orientierung/Lage des Navigationssystems (Sensorpartikelkoordinatensystem) in Bezug zum Referenzkoordinatensystem (Behälterkoordinatensystem) vornimmt (vgl. Abb. 3).

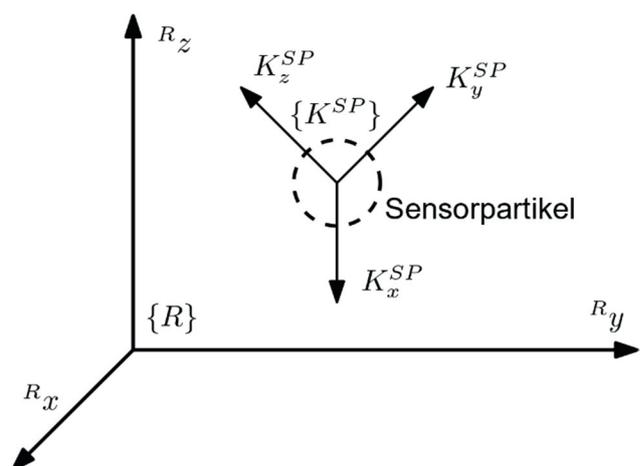


Abb. 3: Sensorpartikelkoordinatensystem und Behälterkoordinatensystem.

Die Lage des Sensorpartikels in Bezug zu den Behälterkoordinaten wird durch eine Rotationsmatrix \mathbf{R}

mit den Eigenschaften $\mathbf{R}\mathbf{R}^T = \mathbf{I}_3$ und $\det(\mathbf{R}) = 1$ beschrieben. Ein beliebiger Vektor \mathbf{v}^R lässt sich mit

$$\mathbf{v}^B = \mathbf{R}_R^B \mathbf{v}^R$$

in Körperkoordinaten darstellen. Die von der Rotationsmatrix beschriebene Lage lässt sich ebenfalls als Einheitsquaternion \mathbf{q} , d.h. $|\mathbf{q}| = 1$, mit

$$\mathbf{q} = q_w + q_x i + q_y j + q_z k = \begin{bmatrix} q_w \\ \mathbf{q}_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta / 2 \\ e_x \sin \theta / 2 \\ e_y \sin \theta / 2 \\ e_z \sin \theta / 2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

parametrisieren, wobei θ der Drehwinkel und \mathbf{e} die normierte Drehachse sind.

Das Fortschreiten der Lage lässt sich über

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0},5 * \mathbf{q} \otimes \boldsymbol{\omega} \quad (7)$$

beschreiben. Die Winkelgeschwindigkeit oder Drehrate $\boldsymbol{\omega}$ wird nach Gl. 1 und Gl. 2 modelliert. Damit ergibt sich für das Zustandsraummodell des AHRS

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0},5 * \mathbf{q} \otimes (\boldsymbol{\omega}_m - \boldsymbol{\omega}_b - \boldsymbol{\omega}_n) \quad (8)$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_b = \boldsymbol{\omega}_w \quad (9)$$

mit dem Zustandsvektor $\mathbf{x} = [\mathbf{q}, \boldsymbol{\omega}_b]^T$. Zur Lösung von Gl. 8 muss die initiale Lage \mathbf{q}_0 bekannt sein. Der Gyroskopbias $\boldsymbol{\omega}_b$ wird im Allgemeinen am Beginn jeder Messung durch Mittelwertbildung von Messungen in Ruhe bestimmt. Der durch verrauschte Messungen der Winkelgeschwindigkeit verursachte Lagedrift kann durch Sensorfusion über einen Error-State Kalmanfilter eliminiert werden. Dieser schätzt zusätzlich den Gyroskopbias. Der hier genutzte Error-State Kalman-Filter wurde nach [7-11] implementiert. Das Kalman-Filter führt zuerst eine a-priori Schätzung des Zustands auf Basis der Winkelgeschwindigkeit $\boldsymbol{\omega}_m$ durch. Dieser wird im zweiten Schritt, dem sogenannten Filterupdate, über die Messgleichungen korrigiert (vgl. Abb. 4).

In erdgebundenen Navigationsanwendungen werden im Allgemeinen das Erdmagnetfeld und die Erdbeschleunigung als Richtungsinformationen verarbeitet. Für Messungen des Magnetometers gilt unter der Annahme eines konstanten (lokalen) Magnetfeldes \mathbf{B}_0

$$\mathbf{B}_B = \mathbf{R}\{\mathbf{q}\}\mathbf{B}_0. \quad (10)$$

Das Magnetometer wurde über den ersten Teil des in [12] vorgeschlagenen Algorithmus kalibriert. Dieser schätzt auch das lokale Magnetfeld \mathbf{B}_0 . Ist die Orientierung des Behälters im Erdmagnetfeld nicht bekannt, kann das Sensorpartikelkoordinatensystem zu Beginn der Messung mit dem Behälterkoordinatensystem in Übereinstimmung gebracht werden. Zu beachten ist, dass das Magnetfeld bei Messungen in industriellen Prozessbehältern nicht konstant ist und deshalb nur an ausgewählten Messpunkten zur Korrektur der Lageschätzung genutzt werden kann. Für die Messungen des Beschleunigungssensors gilt

$$\mathbf{a}_m^B = \mathbf{a}_t + \mathbf{a}_{zf}(\boldsymbol{\omega}) + \mathbf{a}_{euler}(\boldsymbol{\omega}) + \mathbf{R}_R^B\{\mathbf{q}\}^T g_0 \mathbf{e}_3. \quad (11)$$

Unter der Annahme, dass außer der Erdbeschleunigung keine weiteren linearen Beschleunigungen gemessen werden, d.h.

$$|\mathbf{a}_m^B - \mathbf{a}_{zf}(\boldsymbol{\omega}) - \mathbf{a}_{euler}(\boldsymbol{\omega})| = g \quad (12)$$

und $\mathbf{a}_t = 0$ gilt

$$\hat{\mathbf{a}}_m = \frac{\mathbf{a}_m^B - \mathbf{a}_{zf}(\boldsymbol{\omega}) + \mathbf{a}_{euler}(\boldsymbol{\omega})}{|\mathbf{a}_m^B - \mathbf{a}_{zf}(\boldsymbol{\omega}) + \mathbf{a}_{euler}(\boldsymbol{\omega})|} = -\mathbf{R}^T \mathbf{e}_3. \quad (13)$$

Um sicherzustellen, dass die Annahmen eingehalten werden, wurden Lagekorrekturen basierend auf Messung der Erdbeschleunigung nur durchgeführt, wenn bei der Betragsbildung ein Nulldurchgang detektiert und die Updatebedingung nach [13] eingehalten wurde. Diese erlaubt das Update nur, wenn sich der Messwert innerhalb der 3-fachen Standardabweichung des Messrauschens des Beschleunigungssensors liegt. In den in [7-11] vorgeschlagenen Kalmanfiltern wird zusätzlich der Beschleunigungssensorbias in das Zustandsraummodell mit aufgenommen. Da der Biasdrift sich für den eingesetzten Sensor bei ca. $1 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ pro Stunde bewegt und die Messzeit bei ca. 45 Minuten lag, wurde auf die Modellierung verzichtet.

Das Prinzip des hier vorgestellten Algorithmus findet sich in Abb. 4.

Die Beschleunigung in Behälterkoordinaten berechnet sich nach

$$\mathbf{a}_m^R = \mathbf{R}_B^R\{\mathbf{q}\}(\mathbf{a}_t - \mathbf{a}_{zf}(\boldsymbol{\omega}) - \mathbf{a}_{euler}(\boldsymbol{\omega})) - g_0 \mathbf{e}_3 \quad (14)$$

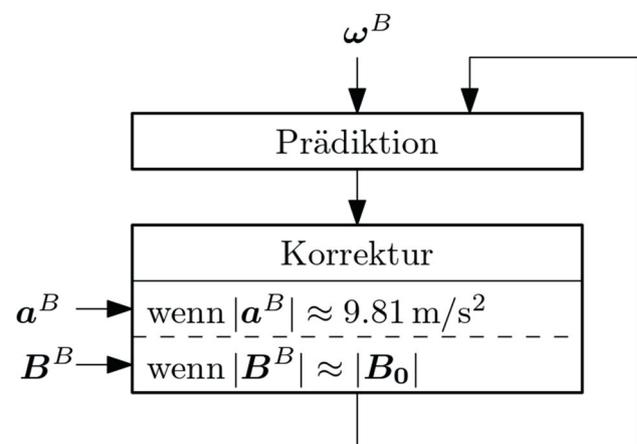


Abb. 4: Prinzip des Kalmanfilters.

Laborbehälter – Aufbau und Strömung

Zur Validierung der Beschleunigungsmessung kam der in [14] beschriebene gerührte Laborbehälter zum Einsatz. Dieser hat die Form eines Hexagons mit einem effektiven Durchmesser von 1,53 m und wurde bis zu einer Füllhöhe von 0,75 m mit Wasser befüllt. Der in der Mitte eingebaute Schrägblattrührer befindet sich ca. 25 cm über dem Boden des Behälters und kann bis zu einer Drehzahl von 92 U/min betrieben werden. In jeder Ecke des Behälters ist ein Stromstörer angebracht, die zu dem in Abb. 5 gezeigten axialen Strömungsprofil führen.

Der Rührer beschleunigt die Strömung Richtung Behälterboden. Dort trifft sie mit hoher Geschwindigkeit auf, wird abgebremst und nach außen umgelenkt. An der Wand des Behälters bewegt sich die Strömung dann deutlich langsamer nach oben, bevor sie sich an der Fluidoberfläche wieder in die Mitte des Behälters bewegt. Betrachtet man nur die axialen Komponenten der Strömung, tritt eine großen Abwärtsbeschleunigung im Bereich des Rührereinzugsbereichs und eine deutlich geringere Aufwärtsbeschleunigung auf. Diese sollte sich auch in den mit dem Sensorpartikel aufgenommenen und mit Gl. 14 ins Behälterkoordinatensystem transformierten Beschleunigungsmessungen zeigen.

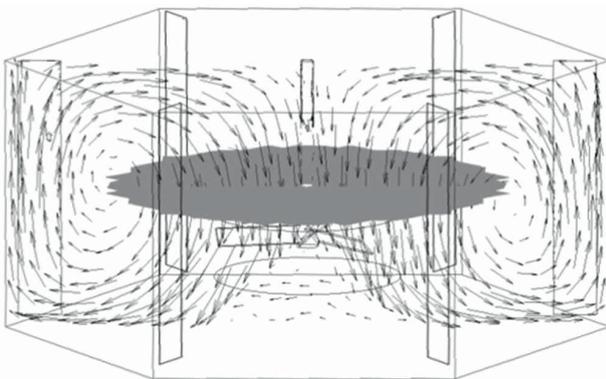


Abb. 5: Strömungsprofil im Laborbehälter

Durchführung der Messung

Vor dem Einsatz des Sensorpartikels muss die Dichte ρ_{Fluid} des Fluids bestimmt werden, da die vertikale Position über den hydrostatischen Druck mit

$$h = H_0 - (p_m - p_0) / \rho_{Fluid} * g \quad (15)$$

berechnet wird. Dabei ist $H_0 = 0,755$ m die Füllhöhe des Behälters, p_0 der Druck an der Fluidoberfläche, p_m der mit dem Drucksensor gemessene Druck, $\rho_{Fluid} = 997,3$ kg/m³ und g die Erdbeschleunigung. Anschließend wird die Dichte des Sensorpartikels so eingestellt, dass er in einer Probe (ca. 1 l) gerade so nach unten zu sinken beginnt. Um den initialen Bias der Inertialsensorik zu bestimmen, wurden über ca. 60 s statische Daten gesammelt und der Sensorpartikel im Anschluss sehr langsam um alle drei Achsen gedreht, damit genug Daten für die Magnetometerkalibrierung zur Verfügung stehen. Als letzter Schritt muss das Sensorpartikelkoordinatensystem mit dem Behälterkoordinatensystem in Übereinstimmung gebracht werden.

Nach Einbringen des Sensorpartikels in den Behälter wurde der Rührer eingeschaltet. Das Strömungsfeld ist nach ca. 10 min stationär. Es wurden zwei Versuche mit einer Rührerdrehzahl von

26,6 U/min und 53,2 U/min über ca. 30 min durchgeführt.

Ergebnisse

Die mit dem Error-State Kalmanfilter ausgewerteten Ergebnisse aus beiden Versuchen finden sich in Abb. 6. Dargestellt ist die Beschleunigung auf der z-Achse (vertikalen Achse) in Sensorpartikelkoordinaten und Behälterkoordinaten über der normierten Behälterhöhe. Zur Auswertung der Strömung wurden die Daten genutzt, die aufgezeichnet wurden, nachdem sich ein stationäres Strömungsfeld eingestellt hat. Wie zu erwarten, sind die Messdaten der Beschleunigung in Sensorpartikelkoordinaten nur begrenzt aussagekräftig. Es lässt sich ableiten, dass die Strömung mit steigender Drehzahl turbulenter wird und dass die Amplituden der Beschleunigung größer werden, je näher sie dem Behälterboden kommen.

Auch bei der in das Behälterkoordinatensystem transformierten Beschleunigung sieht man diesen Effekt, allerdings deutlich stärker ausgeprägt. Unterhalb der Rührwerksebene treten häufiger negative (d.h. in Richtung zum Behälterboden) Beschleunigungen mit größeren Amplituden als die positiven auf. Das steht im Einklang mit der sich im Behälter einstellenden Strömung in diesem Bereich.

In dem Bereich oberhalb des Rührers nehmen die negativen Beschleunigungsamplituden ab, während gleichzeitig die Positiven annähernd gleich groß bleiben. Dies entspricht der langsamen Wandströmung, mit der sich der Sensorpartikel in Richtung der Fluidoberfläche bewegt. Ab und zu kommt er dabei auch wieder in einen abwärtsführenden Strömungsbereich ohne durch den Rührer zu gehen. Dies entspricht den kleinen negativen Beschleunigungen. Erst im oberen fünftel treten wieder mehr negative Beschleunigungen auf, denn ab dieser Höhe werden die Sensorpartikel wieder häufiger vom Rührwerk eingezogen. Die sehr starken positiven Beschleunigungen sind auf Fehlschätzungen des Error-State Kalmanfilters zurückzuführen.

Diskussion und Ausblick

Mit dem Sensorpartikel und dem aktuell eingesetzten Kalmanfilter lassen sich prinzipiell richtungsaufgelöst Beschleunigungen messen. Allerdings ergeben sich Einschränkungen hinsichtlich der Nutzbarkeit der Messung des Magnetfeldes. Dies ist im Bereich des Behälters zum größten Teil so stark gestört, dass es nicht als Richtungsinformation verwendet werden kann. Ein Lösungsvorschlag ist

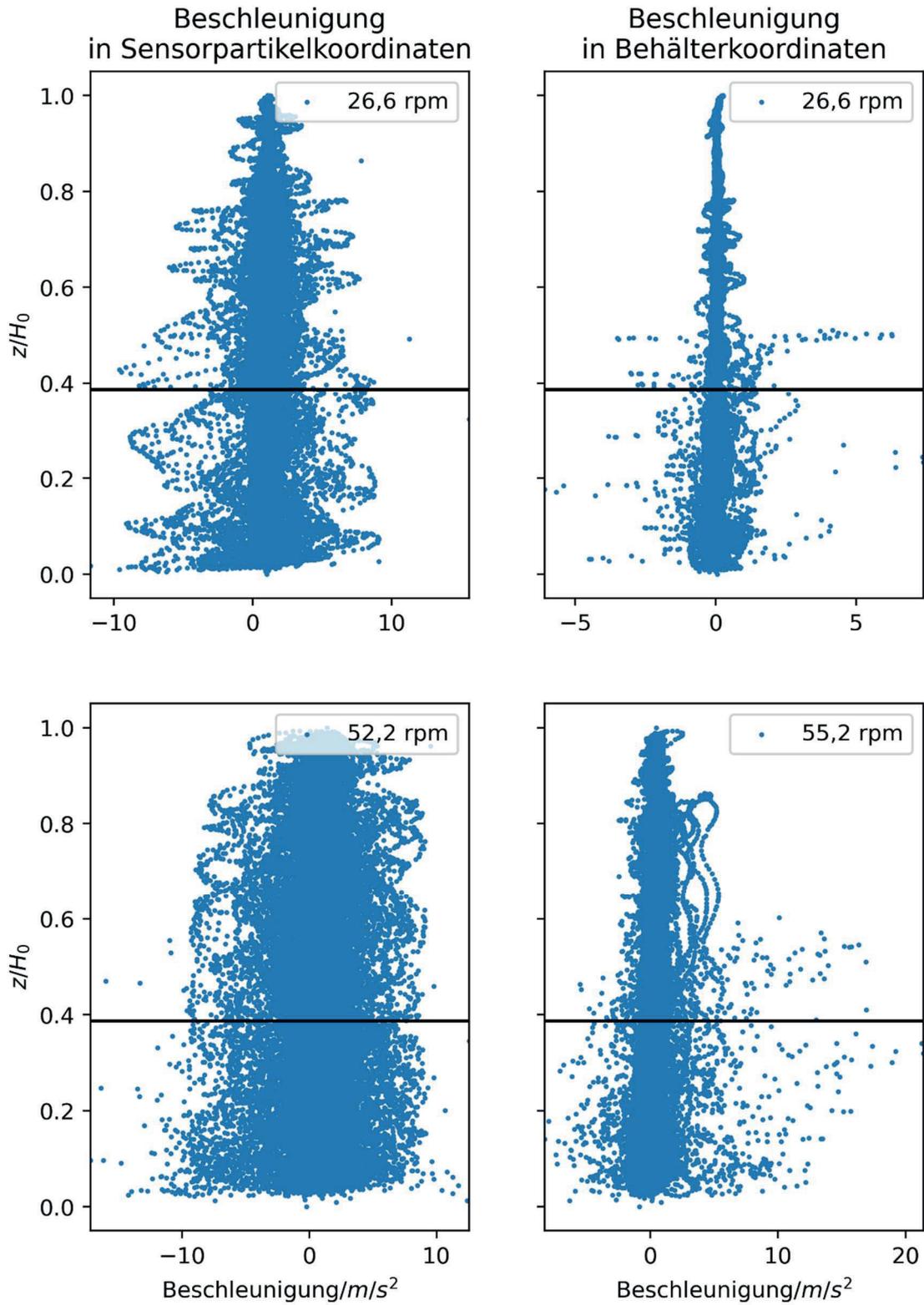


Abb. 3: Beschleunigungen in z-Richtung über der normierten Reaktorhöhe (links) in Sensorpartikelkoordinaten und (rechts) in Behälterkoordinaten für die beiden Rührerdrehzahlen 26,6 U/min und 52,2 U/min. Das Rührwerk befindet sich auf Höhe der schwarzen Linie.

ein externes Magnetfeld zu erzeugen, dass so moduliert ist, dass das Nutzsignal herausgefiltert werden kann. Des Weiteren beruht die Lageschätzung auf der Annahme, dass es genug Ruhezeiten gibt, in denen keine Beschleunigungen auftreten. Je kleiner der Behälter und desto mehr turbulente Strömung, desto weniger Ruhezeiten treten auf, was dazu führt, dass weniger oder falsche Korrekturen der Lageschätzung durchgeführt werden. Trotz dieser Einschränkungen, ist es erstmals gelungen Messungen aus dem Sensorpartikelkoordinatensystem in Behälterkoordinaten zu überführen und die Ergebnisse bilden das Strömungsverhalten auf der vertikalen Achse qualitativ ab.

Weitere Versuche müssen nun klären, inwiefern die Ergebnisse die Strömung auch quantitativ abbilden. Um die Bewegungsverfolgung zu verbessern, wird im nächsten Schritt der Drucksensor in das Kalmanfilter integriert und eine umfassende Kalibrierung der Inertialsensoren durchgeführt.

Literatur

- [1] Reinecke, S. F., Hampel, U.: Instrumented flow following sensor particles with magnetic position detection and buoyancy control, *J. Sens. Syst.*, vol. 5, 2016, S. 213-22.
- [2] Bisgaard, J., Muldbak, M., Cornelissen, S., Tajsoleiman, T., Huusom, J. K., Rasmussen, T., & Gernaey, K. V. (2020). Flow-following sensor devices: A tool for bridging data and model predictions in large-scale fermentations. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 18, 2908-2919.
- [3] Bisgaard J, Tajsoleiman T, Muldbak M, Rydal T, Rasmussen T, Huusom JK, Gernaey KV. Automated Compartment Model Development Based on Data from Flow-Following Sensor Devices. *Processes*. 2021; 9(9):1651. <https://doi.org/10.3390/pr9091651>.
- [4] L. Buntkiel, S. F. Reinecke, and U. Hampel. "B6. 3 Towards Standalone Attitude Estimation for Instrumented Flow Followers." *SMSI 2021-Sensors and Instrumentation* (2021): 141-142.
- [5] El-Sheimy, N.; Hou, H. & Niu, X. Analysis and Modeling of Inertial Sensors Using Allan Variance *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, 2008, 57, 140-149.
- [6] García JA, Lara E, Aguilar L. A Low-Cost Calibration Method for Low-Cost MEMS Accelerometers Based on 3D Printing. *Sensors*. 2020; 20(22):6454. <https://doi.org/10.3390/s20226454>.
- [7] Ding, W. & Gao, Y.: A Quaternion Based Error State Kalman Filter for Attitude Estimation Using Low-cost MEMS MARG Sensors *IEEE*, 2020.
- [8] Youn, W. & Gadsden, S.: A Combined Quaternion-Based Error State Kalman Filtering and Smooth Variable Structure Filtering for Robust Attitude Estimation *IEEE Access, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, 2019, 7, 148989-149004.
- [9] Buntkiel, L.; Reinecke, S. & Hampel, U.: B6.3 Towards Standalone Attitude Estimation for Instrumented Flow Followers *SMSI 2021 - Sensors and Instrumentation*, AMA Service GmbH, Von-Münchhausen-Str. 49, 31515 Wunstorf, Germany, 2021.
- [10] SOLA, Joan.: Quaternion kinematics for the error-state Kalman filter. *arXiv preprint arXiv:1711.02508*, 2017.
- [11] Buntkiel, L., Reinecke, S., Heller, A., Budelmann, C., & Hampel, U. (2021). 2.2-Mit UWB-Lokalisierung gekoppelte inertielle Lage- und Bewegungsverfolgung für instrumentierte Strömungsfollower. *Vorträge*, 22-27.
- [12] Kok, M. & Schon, T. B.: Magnetometer Calibration Using Inertial Sensors *IEEE Sensors Journal, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, 2016, 16, 5679-5689.
- [13] Rehlinger, H. & Hu, X.: Drift-free attitude estimation for accelerated rigid bodies *Automatica, Elsevier BV*, 2004, 40, 653-659.
- [14] Reinecke, S. F. (2014). Instrumentierte Strömungsfollower zur Prozessdiagnose in gerührten Fermentern, Dissertation, Dresdner Beiträge zur Sensorik Band 52, TUDpress, ISBN 978-3-944331-50-8.

Danksagung

Teile der Arbeiten des HZDR sind vom BMEL im Projekt SensOMix (FKZ 2219NR390) und im Projekt Neobio (FKZ 22032618), sowie aus dem Impuls- und Vernetzungsfonds der Helmholtz-Gemeinschaft im Rahmen des Clean Water Technology Lab – Ein Helmholtz Innovation Lab (HIL-A02) gefördert.