

# Mit UWB-Lokalisierung gekoppelte inertielle Lage- und Bewegungsverfolgung für instrumentierte Strömungsfolger

Lukas Buntkiel<sup>1</sup>, Andreas Heller<sup>2</sup>, Christoph Budelmann<sup>3</sup>, Sebastian Reinecke<sup>1</sup> und Uwe Hampel<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Deutschland

<sup>2</sup>Halbleiterlabor FH Münster, Münster, Deutschland

<sup>3</sup>Budelmann Elektronik GmbH, Münster, Deutschland

<sup>4</sup>Institut für Energietechnik, TU-Dresden, Dresden Deutschland

Kontakt: l.buntkiel@hzdr.de

## Einleitung

Zur räumlichen Vermessung von Prozessparametern und zur Strömungscharakterisierung in großen Behältern, wie z.B. Biogasfermentern und Belebtschlammbecken wurde am HZDR das Konzept strömungsfolgender Sensoren entwickelt [1,2]. Alle derzeit verfügbaren oder in Entwicklung befindlichen instrumentierten Strömungsfolger nutzen zur Strömungsanalyse lediglich vertikale Positionsprofile, gemessen über den hydrostatischen Druck [3].

Für eine weitere Analyse und Optimierung von Prozessen in großen Behältern soll deshalb der sog. Sensorpartikel aus [1, 2] derart weiterentwickelt werden, dass eine dreidimensionale Rekonstruktion der Trajektorie des Sensorpartikels im Behälter durchgeführt werden kann. Dazu wurde das System um eine inertielle Messeinheit und ein auf Ultrabreitbandfunkttechnologie (Ultra-Wide-Band, UWB) basierendes Lokalisierungssystem erweitert.

Im Folgenden wird das Sensorsystem vorgestellt. Daran anschließend wird die Problematik der Bewegungsverfolgung mit limitierter Sensorik eingeführt und die Bewegungsverfolgung basierend auf inertialer Sensorik und UWB-Lokalisierung präsentiert. Anschließend wird der gesamte Ablauf beispielhaft für ausgewählte Szenarien gezeigt.

## Messsystem

Das Sensorsystem besteht aus dem Sensorpartikel und mindestens vier Ankerknoten. Jeder Sensorpartikel (Abb. 1) hat integrierte Sensoren für die Drehrate, die Beschleunigung, die magnetische Feldstärke sowie den hydrostatischen Umgebungsdruck, der hier nicht weiter betrachtet werden soll. Diese Sensorik wird zur Bewegungsverfolgung während des Tauchganges genutzt. Das UWB-Modul dient zusammen mit den Ankerknoten zur Lokalisierung und Datenübertragung, wenn sich der Sensorpartikel an der Fluidoberfläche befindet. Die Dämpfung des elektrischen Feldes innerhalb des Fluids lässt eine Lokalisierung und Datenübertragung im getauchten Zustand nicht zu. Zum Ab- und Auftauchen verfügt der Sensorpartikel über eine Auftriebseinheit. Zur

Messung von Prozessparametern ist der Sensorpartikel mit einem Temperatursensor und einem Sensor für die elektrische Leitfähigkeit ausgestattet. Abb. 2 zeigt den Sensorpartikel mit einem Durchmesser von 90 mm.

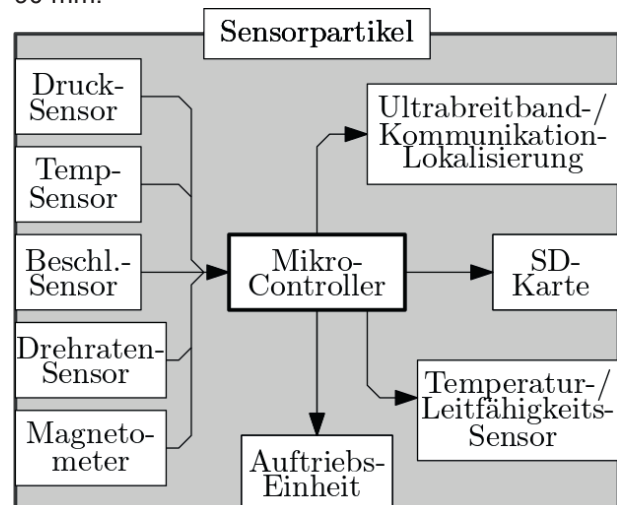


Abb. 1: Schema der Hauptkomponenten in einem Sensorpartikel mit interner Sensorik. Der Temperatursensor auf der linken Seite ist im Sensorpartikel verbaut, während sich der rechte auf der Leitfähigkeitsmessensolektrode befindet und die Medientemperatur misst.

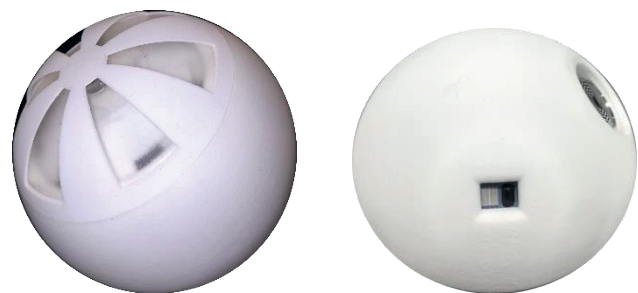


Abb. 2: Ansichten eines Sensorpartikels mit (links) Druck- und Leitfähigkeitssensor und (rechts) Auftriebseinheit.

## UWB-Lokalisierung

Zur Vermessung der Oberflächenströmung von offenen Behältern wurde an der FH Münster ein System zur Echtzeitlokalisierung von Strömungsfolgern basierend auf UWB-Kommunikation entwickelt [4, 5]. Das System besteht aus stationären Ankerknoten,

die um den Behälter herum befestigt sind, und schwimmenden Bojen (sog. Tags). Diese Knoten sind mit UWB-Transceivern ausgestattet. Im Gegensatz zur Lokalisierung über Satellitennavigationssysteme oder Ultraschall liegt die Genauigkeit unter 15 cm [4, 5].

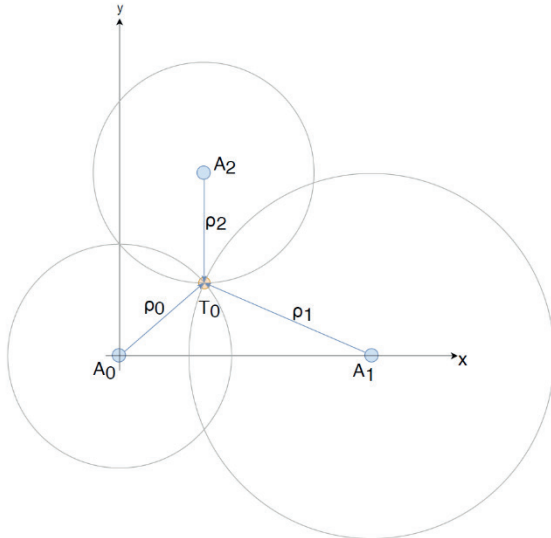


Abb. 3: Lateration in der Ebene (2D-Ansatz). Dargestellt sind die Ankerpositionen  $A_n$ , die gemessenen Distanzen  $\rho_n$  und die Position des Tags  $T_0$  im Schnittpunkt der Kreise. Abbildung aus [5]

Zur Lokalisierung im dreidimensionalen Raum werden mindestens vier Distanzen zu verschiedenen Ankerknoten benötigt. Zuerst werden die Abstände zwischen Tag und jedem Anker über eine Laufzeitmessung durchgeführt. Eine Laufzeit-/Distanzmessung mittels Alternative Double Sided Two Way Ranging (AltDS-TWR) wird eingesetzt, da dieses Schema keine Uhrensynchronisierung der Kommunikationspartner voraussetzt. Im Folgeschritt werden die gemessenen Distanzen mittels Lateration verarbeitet, womit eine Positionsbestimmung des Tags im dreidimensionalen Raum möglich ist. Bei der Lateration werden die Distanzen als Kugelradien interpretiert. Diese Kugeln weisen einen Schnittpunkt auf, an dem sich das Tag zum Zeitpunkt der Messung befindet (siehe Abb. 3).

## Inertiale Bewegungsverfolgung mit UWB

Inertiale Bewegungsverfolgung, d.h. die Bestimmung von Orientierung, Beschleunigung, Geschwindigkeit und Position (in der Gesamtheit als Pose bezeichnet) im 3D-Raum in den Koordinaten des Behälters, basierend auf den Messungen von Gyroskop und Beschleunigungssensor (in den Koordinaten des Sensorpartikels, i. Allg. Körperkoordinaten genannt), beruht auf dem als Dead Reckoning bezeichneten Verfahren. Dabei wird das Fortschreiten der Trajektorie auf Basis der Pose  $\mathbf{p}$  zum Zeitpunkt  $k$  und den Messwerten der Drehrate  $\boldsymbol{\omega}_m$  und der Beschleunigung  $\mathbf{a}_m$  in Körperkoordinaten fortgeschrieben:

$\mathbf{p}(k+1) = \mathbf{f}(\mathbf{p}(k), \boldsymbol{\omega}_m(k), \mathbf{a}_m(k))$ ,  
wobei  $\mathbf{f}(\dots)$  der ins zeitdiskrete transformierten Zustandsbeschreibung

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{v} \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{R}\{\mathbf{q}\}(\mathbf{a}_m - \mathbf{a}_b - \mathbf{a}_n) + \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0},5 * \mathbf{q} \otimes (\boldsymbol{\omega}_m - \boldsymbol{\omega}_b - \boldsymbol{\omega}_n) \quad (3)$$

$$\dot{\mathbf{a}}_b = \mathbf{a}_w \quad (4)$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_b = \boldsymbol{\omega}_w \quad (5)$$

entspricht. Dabei sind  $\mathbf{p}$  die Position und  $\mathbf{v}$  die Geschwindigkeit jeweils in Behälterkoordinaten. Die Lage des Sensorpartikel in Bezug zu den Behälterkoordinaten ist als Einheitsquaternion  $\mathbf{q}$ , d.h.  $|\mathbf{q}| = 1$  mit

$$\mathbf{q} = q_w + q_x i + q_y j + q_z k = \begin{bmatrix} q_w \\ \mathbf{q}_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta/2 \\ \mathbf{e}_x \sin \theta/2 \\ \mathbf{e}_y \sin \theta/2 \\ \mathbf{e}_z \sin \theta/2 \end{bmatrix}$$

parametrisiert, wobei  $\theta$  der Drehwinkel und  $\mathbf{e}$  die normierte Drehachse ist. Für die Rotationsmatrix  $\mathbf{R}$  gilt  $\mathbf{R} \triangleq \mathbf{R}\{\mathbf{q}\}$ . Das Zustandsraummodell aus Gl. 1 - 3 wird typischerweise um die langsam zeitveränderlichen Sensorbias  $\mathbf{a}_b$  und  $\boldsymbol{\omega}_b$  des Beschleunigungssensors (Gl. 4) und des Gyroskops (Gl. 5) erweitert. Damit ist der Zustandsvektor  $\mathbf{x} = [\mathbf{p}, \mathbf{v}, \mathbf{q}, \mathbf{a}_b, \boldsymbol{\omega}_b]^T$ .

Das Sensorrauschen  $\mathbf{a}_n, \boldsymbol{\omega}_n, \mathbf{a}_w$  und  $\boldsymbol{\omega}_w$  wird typischerweise über die Allanvarianzmethode [6] bestimmt und als Velocity/Angular Random Walk und die sog. Bias Instability bezeichnet. Die für diese Sensoreinheit bestimmten Rauschterme finden sich in Tab.1 und basieren auf einer statischen Messung über 4 Stunden.

Tabelle 1: Rauschparameter der Sensoren

	Angular/Velocity random walk	Bias Instabilities
Gyro x	4,74 m°/√s	4,16 °/h
Gyro y	6,4 m°/√s	4,76 °/h
Gyro z	4,59 m°/√s	3,97 °/h
Acc x	100,71 μm/s/√s	78.14 mm/s²/h
Acc y	96,63 μm/s/√s	64.59 mm/s²/h
Acc z	140,64 μm/s/√s	429.67 mm/s²/h

Um die langsam zeitveränderlichen Sensorbias zu korrigieren und eine drifffreie Lageschätzung zu realisieren, existieren bereits zahlreiche Lösungen [7, 8, 9]. Im Allgemeinen wird dazu die Inertialsensorik mit einem Magnetometer erweitert und eine Lageschätzung mit Hilfe eines linearisierten Kalmanfilters (eng. Error-state kalman filter ESKF) durchgeführt. Dabei werden das Erdmagnetfeld und die Erdbeschleunigung als Richtungsinformationen genutzt.

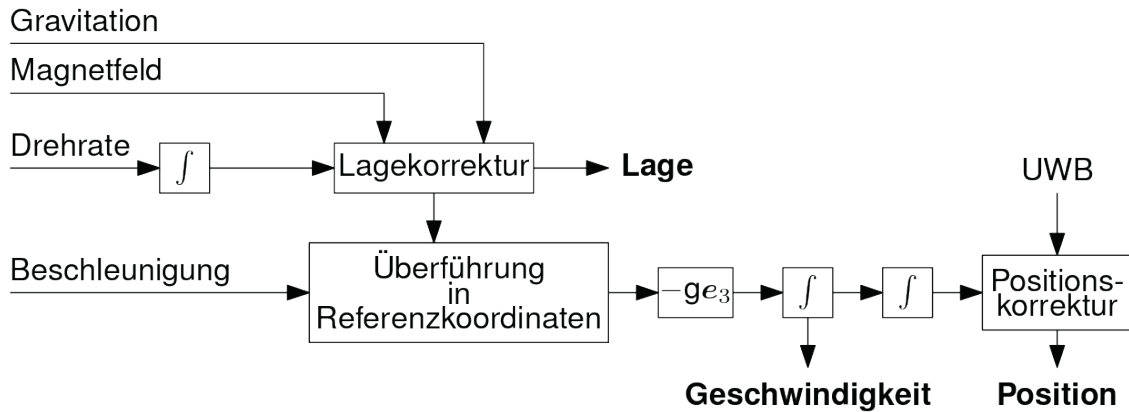


Abb. 4: Blockdiagramm des Algorithmus zur Bewegungsverfolgung. Im Falle des Dead Reckonings fallen alle Korrekturschritte weg.

Für die Messungen des Beschleunigungssensors gilt unter der Annahme das außer der Erdbeschleunigung keine weiteren linearen Beschleunigungen gemessen werden, d.h.  $|\mathbf{a}_m| = g$ ,

$$\hat{\mathbf{a}}_m = \frac{\mathbf{a}_m}{|\mathbf{a}_m|} = -\mathbf{R}^T \mathbf{e}_3$$

Für das Magnetometer gilt unter der Annahme eines konstanten (lokalen) Magnetfeldes  $\mathbf{B}_0$

$$\mathbf{B}_B = \mathbf{R}\{\mathbf{q}\}\mathbf{B}_0.$$

Die Lokalisierungsdaten des UWB liegen direkt in Positionsdaten in Behälterkoordinaten vor.

Das Kalman-Filter führt zuerst eine A-priori Schätzung des Zustands auf Basis der Eingangsgrößen  $\mathbf{a}_m$  und  $\boldsymbol{\omega}_m$  durch. Dieser wird im zweiten Schritt, dem sogenannten Filterupdate, über die Messgleichungen korrigiert. Der hier genutzte Error-State Kalman-Filter wurde nach [7 - 11] implementiert. Um das in Schritt 2 durchgeführte Filterupdate nicht unter Verletzung der Annahme kleiner Beschleunigungen durchzuführen, wurde die Updatebedingung nach [12] dem Filter hinzugefügt. Diese erlaubt das Update nur, wenn sich der Messwert innerhalb der 3-fachen Standardabweichung des Messrauschens des Beschleunigungssensors liegt. Das Prinzip des hier vorgestellten Algorithmus findet sich in Abb. 4.

## Versuchsaufbau und Durchführung

Der Versuchsaufbau besteht aus einem Hexapod, an dem ein 2 m langer Arm befestigt ist, um den Bewegungsradius zu erhöhen. An diesem Arm ist die inertielle Messeinheit mit UWB-Modul befestigt (siehe Abb. 5). Die Ankerknoten sind nach Abb. 6 um den Hexapod herum installiert. Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Bewegungsverfolgung und der Tauchzeitabschätzung wurden zwei verschiedene Bewegungsszenarien getestet. Das erste Szenario ist ein Stillstand an der Startposition und das Zweite umfasst 12 Kreise in der vertikalen yz-Ebene innerhalb 60 s gefolgt von 60 s Pause. Dieser Zyklus wurde 25-mal wiederholt.

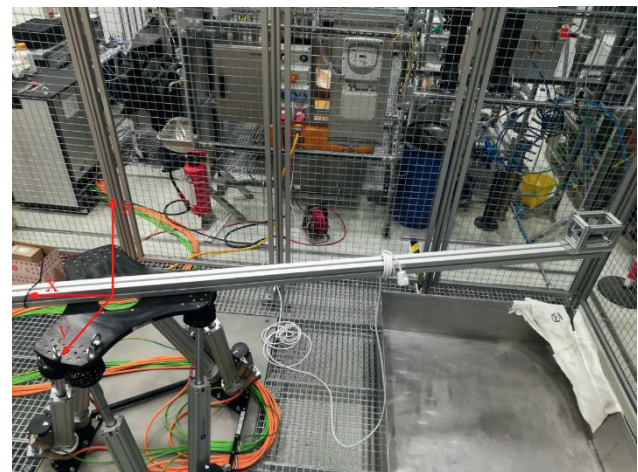


Abb. 5: Hexapod mit Arm und inertialer Messeinheit.

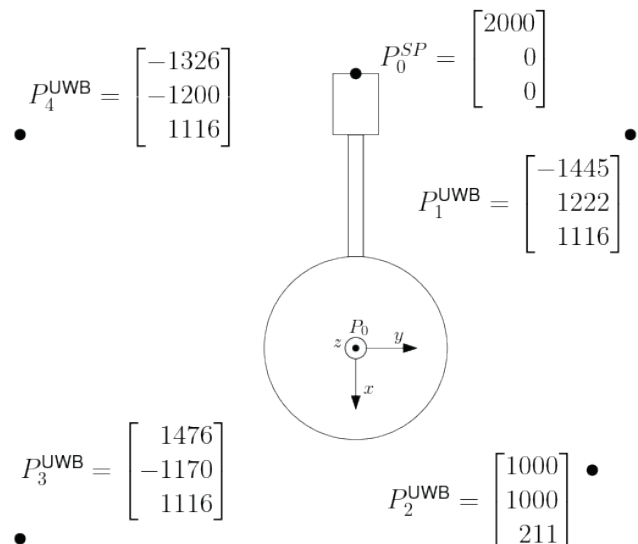


Abb. 6: Schema des Versuchsaufbaus mit Koordinaten der Ankerknoten und der Messeinheit.

Vor der Messung wurden Kalibrierdaten für das Magnetometer aufgenommen, indem die Messeinheit um alle Achsen gedreht wurde. Ist das Magnetometer kalibriert, liegen alle Messwerte auf einer Kugel. Der Kalibrieralgorithmus aus [13] wurde dazu genutzt. Der lokale Magnetfeldvektor  $\mathbf{B}_0$  bestimmt sich aus dem Mittelwert aus einer 60 s Periode der Messung, bevor die Bewegung startet.

## Messergebnisse

Ziel der Versuche ist eine Abschätzung der maximalen Tauchzeit, bevor aufgrund von zu großen Unsicherheiten in Position und/oder Geschwindigkeit wieder aufgetaucht werden muss. Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Algorithmen werden folgende Maße für die Messabweichung verwendet: Die mittlere quadratische Abweichung (root mean square error)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{k=1}^T (x_k - \hat{x}_k)^2},$$

der gemittelte absolute Bias (averaged absolute values of bias AAVB), als Metrik für einen Bias in der Zustandsschätzung

$$AAVB = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T |x_k - \hat{x}_k|$$

und die maximale Abweichung (maximum absolute

$$MAE = |x_k - \hat{x}_k|.$$

### Auswertung Stillstandsszenario

Um den Einfluss von verschiedenen Messfrequenzen der UWB-Lokalisierung auf die entstehende Positionsabweichung zu untersuchen, wurden neben dem nominellen UWB-Messintervall von 1 s, zusätzlich auch 1 min bzw. 10 min betrachtet. Die Ergebnisse für die Position in Behälterkoordinaten sind in Abb. 7 und 8 dargestellt. Wie zu erwarten, steigt die Positionsabweichung bei größer werdendem Updateintervall. D.h. insbesondere für große Behälter ist eine Verfolgung der Partikeltrajektorie nur an der Oberfläche oder bei geringen Tauchzeiten möglich. In Behältern im Labormaßstab mit relativ kurzen Zirkulationszeiten oder in besonders flachen Behältern ist die gekoppelte Bewegungsverfolgung hingegen eine gute Option.

Die Messabweichungen sind in Tab. 2 angegeben. Dabei fällt auf, dass insbesondere die z-Achse, d.h. die vertikale Position, starke Abweichungen aufweist. Durch die Integration der Messwerte des hydrostatischen Drucks ließe sich diese Abweichung deutlich reduzieren.

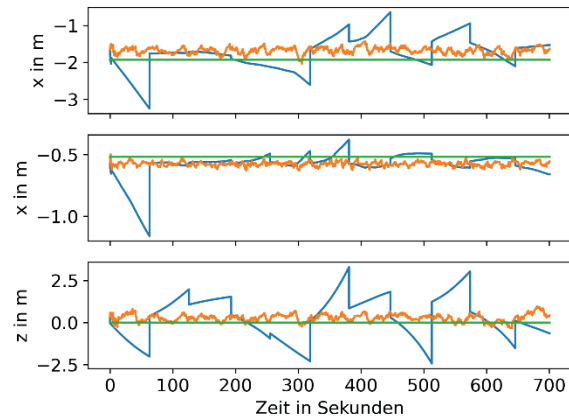


Abb. 7: Position der Messeinheit in Behälterkoordinaten bei Stillstand. Dargestellt sind die Referenz (grün) und die Schätzungen mit einem UWB-Update-Intervall von 1 s (orange), 1 min (blau).

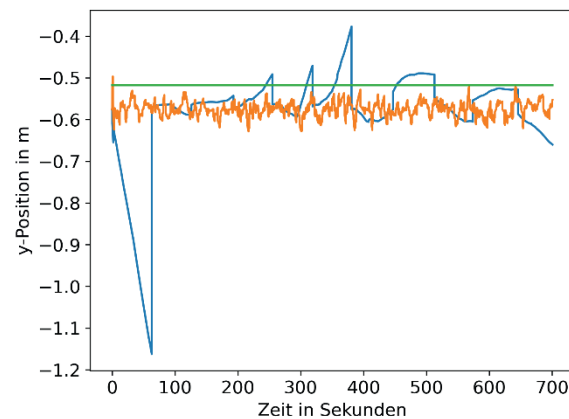


Abb. 8: Position der Messeinheit auf der y-Achse für die ersten 700 s Messdauer bei Stillstand. Dargestellt sind die Referenz (grün) und die Schätzungen mit einem UWB-Update-Intervall von 1 s (orange), 1 min (blau).

Tabelle 2: Auswertung der Zustandsschätzung in Bezug auf die Referenzposition.

Fehlermaß	UWB-Update	X [m]	Y [m]	Z [m]
RSME	1s	0,27	0,06	0,37
AAVB		0,26	0,06	0,32
MAE		0,51	0,13	1,16
RSME	1 min	0,56	0,13	1,42
AAVB		0,43	0,10	1,09
MAE		2,48	0,65	7,10
RSME	10 min	4,27	1,06	27,31
AAVB		3,52	0,69	20,49
MAE		12,09	4,07	75,05



## Auswertung Bewegungsszenario

Die initiale Lage ist  $\mathbf{v}_0 = [0 \ 0 \ 15^\circ]$ , das entspricht  $\mathbf{q}_0 = [0,99 \ 0 \ 0 \ 0,13]$  in Quaternionendarstellung. Die Kreisbewegung führt natürlicherweise dazu, dass bei der Bildung des zeitlichen Mittelwertes wieder die initiale Lage das Ergebnis ist. Das gemittelte Quaternion nach ca. 45 Minuten Messdauer ist  $\mathbf{q} = [0,991 \ 0 \ 0 \ 0,076]$  bzw.  $\mathbf{v} = [0,32^\circ \ 0 \ 16,5^\circ]$  als Rotationsvektor, was einer sehr driftarmen Schätzung der Lage entspricht.

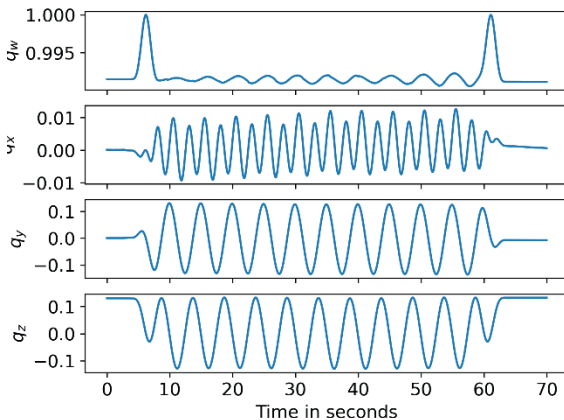


Abb. 9: Geschätzte Lage in Quaternionendarstellung für eine Umdrehung.

In Abb. 9 ist die Lageschätzung für eine Bewegungsperiode dargestellt. Wie zu erwarten war, sind die  $q_y$  und die  $q_z$  Komponente um  $90^\circ$  phasenverschoben um eine kreisförmige Bewegung zu erzielen. Der erste Anstieg und die noch nicht voll ausgeprägten Ausschläge zwischen 5 s und 10 s spiegeln den Sanftanlauf des Hexapods wider.

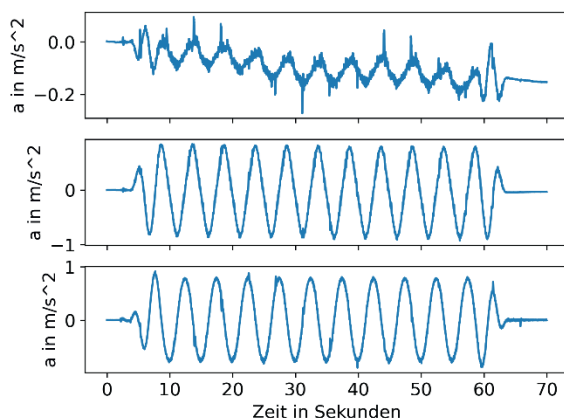


Abb. 10: Beschleunigung auf allen drei Achsen für eine Bewegungsperiode.

Die in Abb. 10 dargestellte Beschleunigung in Behälterkoordinaten zeigt anhand der fast konstant bleibenden Amplitude, die für eine kreisförmige Bewegung zu erwarten ist, dass eine sehr gute Schätzung

möglich ist. Wird diese jedoch integriert (Abb. 11 und 12), um die Geschwindigkeit zu bestimmen, zeigt sich, dass das Messrauschen und noch bestehende Abweichungen in der Lage zu einer quadratischen Drift führen. Das ist zu erwarten, da die Geschwindigkeit bereits die zweite Integrationsstufe ist (vgl. Abb. 4). In Abb. 11 wird bereits deutlich, dass eine höhere Updaterate der UWB-Lokalisierung eine bessere Schätzung der Geschwindigkeit ermöglicht. In Abb. 12 ist die Geschwindigkeit für zwei Bewegungsperioden dargestellt und zeigt, wie durch ein UWB-Update die Geschwindigkeitsschätzung wieder korrigiert wird. Durch eine bessere Kalibrierung kann dieser Drift noch reduziert werden.

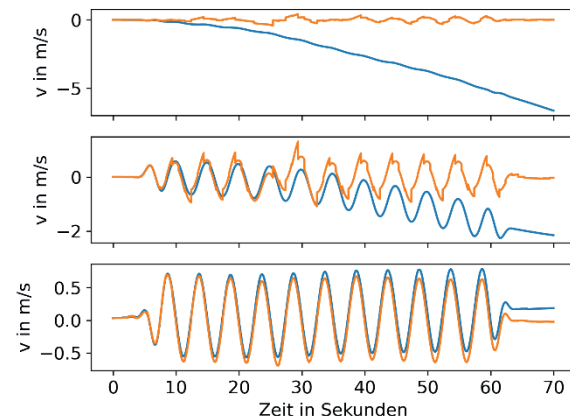


Abb. 11: Geschätzte Geschwindigkeit in Behälterkoordinaten. In orange ist das UWB-Update-Intervall mit 1 s dargestellt, in blau das mit ca. 60 s

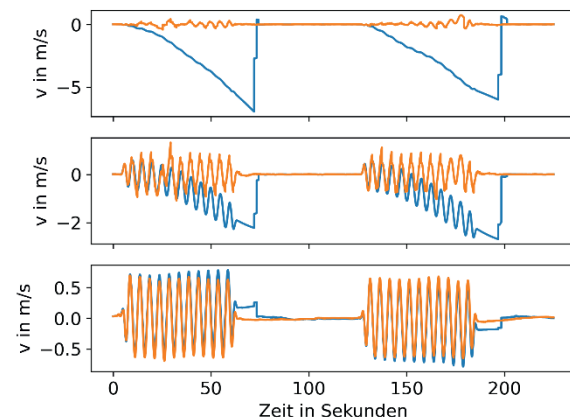


Abb. 12: Geschätzte Geschwindigkeit in Behälterkoordinaten für zwei Bewegungszyklen. In orange ist das UWB-Update-Intervall mit 1 s dargestellt, in blau das mit ca. 60 s

## Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass mit der vorgestellten Kombination aus inertialen Messungen und einer

UWB-Lokalisierung eine verbesserte Bewegungsverfolgung erzielt werden kann. Mit dem derzeitigen Algorithmus kann in Laborbehältern mit kurzen Zirkulationszeiten eine komplette Bewegungsverfolgung, d.h. Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Lage im Behälter, ermöglicht werden. Durch gezielte Datenanalyse können so, trotz der noch großen Abweichungen in der Geschwindigkeit, Aussagen über das Strömungsverhalten im Behälter getroffen werden. Basierend auf den Ergebnissen, kann durch eine optimierte Rauschanalyse und eine zusätzliche Kalibrierung der Inertialsensoren sowie durch eine Einbindung der Druckmesswerte die Zuverlässigkeit weiter erhöht werden. Damit soll der Einsatzbereich auch auf längere Tauchzeiten in größeren Behältern erweitert werden.

## Literatur

- [1] Thiele, S., Da Silva, M. J., Hampel, U.: Autonomous sensor particle for parameter tracking in large vessels, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 21(8), 2010
- [2] Reinecke, S. F., Hampel, U.: Instrumented flow following sensor particles with magnetic position detection and buoyancy control, *J. Sens. Sens. Syst.*, vol. 5, 2016, S. 213-22
- [3] Bisgaard, J.; Muldbak, M.; Cornelissen, S.; Tajsleiman, T.; Huusom, J. K.; Rasmussen, T. & Gernaey, K. V.: Flow-following sensor devices: A tool for bridging data and model predictions in large-scale fermentations Elsevier BV, 2020, 18, 2908-2919
- [4] Heller, L.; Horsthemke, M.; Gebing; Götz Kappen, P. & Glösekötter: GNSS based Automatic Anchor Positioning in Real Time Localization Systems Proceedings ITISE, 2019, 1068-1073
- [5] Heller, A.; Horsthemke, L. & Glösekötter, P.: Design, Implementation, and Evaluation of a Real Time Localization System for the Optimization of Agitation Processes IESS, Friedrichshafen, 2020 [6] FREY, M.; BERNHARDT, M.; COLOMBO, G.; RIENER, R.: Kooperative Regelungsstrategien für die Gangrehabilitation. In: *Taungsband des Workshops Automed*. Saarbrücken, Oktober 2004
- [6] 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
- [7] L. Buntkiel; S. F. Reinecke & U. Hampel: 3.5 - Inertiale Lage- und Bewegungsverfolgung für instrumentierte Strömungsfolger zur Strömungscharakterisierung *AMA Service GmbH, Von-Münchhausen-Str. 49, 31515 Wunstorf, Germany*, **2019**
- [8] Ding, W. & Gao, Y.: A Quaternion Based Error State Kalman Filter for Attitude Estimation Using Low-cost MEMS MARG Sensors *IEEE*, **2020**
- [9] 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
- [10] 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
- [11] SOLA, Joan.: Quaternion kinematics for the error-state Kalman filter. *arXiv preprint arXiv:1711.02508*, 2017.
- [12] Rehbinder, H. & Hu, X.: Drift-free attitude estimation for accelerated rigid bodies *Automatica*, Elsevier BV, **2004**, 40, 653-659
- [13] Kok, M. & Schon, T. B.: Magnetometer Calibration Using Inertial Sensors *IEEE Sensors Journal*, *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, **2016**, 16, 5679-5689

## Danksagung

Gefördert durch: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft auf Grund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages (FKZ 22032618).

