

## Projekt „Smarticles“ – Entwicklung eines Messverfahrens für die strömungsmechanische Beschreibung trägheitsdominierter Partikel

### Project „Smarticles“ – Development of measurement techniques for inertia-dominated particles in flow fields

**B. Gattermig, A. Delgado**

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Cauerstrasse 4, D-91058 Erlangen

Partikelströmung, Strömungsmesstechnik, Modellierung, Validierung

#### Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag zeigt die Ergebnisse erster Vorarbeiten zur Entwicklung von autonomen Partikelsonden zur Bewegungsmessung. Das Ziel soll ein Messverfahren zur Darstellung der Bewegung trägheitsdominierter Partikel in Strömungen sein. Damit können erstmalig numerische Modelle für diese Bewegungen (z.B. Immersed boundary model, o.ä.) direkt validiert und ggf. optimiert werden. Der geplante Anwendungsbereich erstreckt sich von Geowissenschaften über die Energietechnik bis zur Chemie- und Lebensmittelindustrie.

Der hier vorgestellte erste Schritt in diesem Forschungsprojekt beschäftigt sich mit der Fragestellung, ob MEMS-Sensoren ein dafür geeignetes Messverfahren darstellen. Dazu wurde aus kommerziell verfügbaren Komponenten (32bit Mikrocontroller, MEMS-Bewegungssensor MPU9255, Datenspeicher und Stromversorgung) ein Prototyp eines sphärischen Partikelsensors mit  $D=30\text{mm}$  aufgebaut, programmiert und getestet. Anhand physikalisch gut beschreibbarer Bewegungen (Pendel und Kreisbahn) konnte die prinzipielle Eignung des Messverfahrens belegt werden. Ansätze zur Verbesserung der Genauigkeit und Langzeitstabilität wurden identifiziert und werden im weiteren Verlauf des Projekts umgesetzt.

#### Einleitung

Im Bereich der Zweiphasenströmungen lassen sich Partikel, welche der Strömung schlupffrei folgen, gut durch Modelle und numerische Berechnungen abbilden (Als Partikel seien hier gleichbedeutend feste Partikel, Flüssigkeitstropfen und Gasblasen definiert). Für Anwendungen, in denen diese Bedingung aufgrund größerer Durchmesser oder höherer Masse der Partikel nicht mehr gegeben ist, befinden sich die Berechnungsverfahren erst in der Entwicklungsphase. Dies liegt an der gesteigerten Komplexität durch die zusätzlichen Grenzflächen an diesen trägheitsdominierten Partikeln und deren von der Strömung unabhängigen Bewegungen. Erst durch gesteigerte Rechenleistung konnten in den letzten Jahren erste numerische Berechnungsverfahren für diese Anwendung entwickelt werden. Eine Übersicht der eingesetzten Methoden liefert (Gao, Li, and Wang 2013). Zum einen werden Methoden eingesetzt, bei denen die Partikel im Rechnernetz abgebildet werden (Lagrange-Euler-Methode) (Hu 1996; Hu, Patankar, and Zhu 2001). Dabei steigt jedoch durch die ständige Neugenerierung des Gitters der Rechenaufwand mit erhöhter Partikelanzahl enorm an. Dem entgegen neue Ansätze, die mit starrem Gitter arbeiten und das Verhalten trägheitsdominierter Partikel über eine Anpassung der Eigenschaften von zu einem gegebenen Zeitschritt durch das fiktive Partikel belegten Zellen realisieren. Die erfolgreichste Methode dabei ist die Immersed Boundary Method (IBM) (Uhlmann and Dušek 2014), die eine

Wandhaftbedingung an Partikel-Fluid-Grenzen realisiert. Vielversprechende Resultate wurden auch mit der Lattice-Boltzmann-Methode erzielt (Gao, Li, and Wang 2013).

Die Validierung dieser Modelle basiert bislang auf einfachen Experimenten, bei denen einzelne trägheitsdominierte Partikel beobachtet werden, deren Bewegungen in Bezug auf Raumdimensionen und Freiheitsgrade stark eingeschränkt bzw. nicht erfasst werden. Beispiele sind die Messung fallender / sinkender Partikel in ruhenden Flüssigkeiten (N. Mordant and Pinton 2000; Nicolas Mordant et al. 2005; Shahi and Kuru 2016; Vanroyen et al. 2005; Bagheri et al. 2013), Partikel in Couette- (Sapsis et al. 2011) oder Poiseuille-Strömungen (Matas, Morris, and Guazzelli 2004; Segré and Silberberg 1962; Segre and Silberberg 1962) und Partikelbewegungen in geneigten 2D-Kanälen mit rauhem Untergrund (Ancey et al. 2002). Die Messverfahren basieren zumeist auf bildgebenden Verfahren (Optical Particle Tracking) (Vanroyen et al. 2005; Sapsis et al. 2011), Particle Image Shadowmetry - PIS (Zhu et al. 2015; Shahi and Kuru 2016, 2015), Particle Tracking Velocimetry PTV ((Bagheri et al. 2013)) oder akustischen Methoden (N. Mordant and Pinton 2000; Nicolas Mordant et al. 2005)). Am Lehrstuhl für Strömungsmechanik fanden im Rahmen des AiF-Projekts „System zur Fremdkörpererkennung“ (AiF 264 ZBG) Untersuchungen zum Thema Partikeldetektion und deren Bewegungen in Fluiden statt, die als Basis für das aktuelle Forschungsvorhaben herangezogen werden sollen. (Osorio et al. 2009; Schmidt et al. 2009).

Messungen des Verhaltens und der Interaktion translatorisch und rotatorisch frei beweglicher trägheitsdominierter Partikel in dreidimensional strömenden turbulenten Fluiden liegen bis dato nicht vor. Dem gegenüber steht ein großer Bedarf an Informationen auf der Anwenderseite, um die beobachtbaren Effekte wie bevorzugte Konzentrationsbereiche, Lateralmigration oder die Turbulenzmodulation durch die Partikel naturwissenschaftlich quantifizieren und in industriellen Prozessen kontrollieren zu können. Als Beispiele seien genannt:

- naturwissenschaftliche Fragestellungen (Bewegung von Tropfen/Eis in Wolken, Modellierung von Aschewolken),
- Siedlungsbau (Sedimentbewegung in fließenden Gewässern, Entstehung und Verhalten von Muren und Erdrutschen),
- Lebensmittelindustrie (Waschprozesse, Verteilung von Fruchtstücken bei der Abfüllung von Milchprodukten),
- Chemietechnik (durchströmte Katalysatorschüttungen),
- Energietechnik (Entstehung von Ascheablagerungen, Spraycombustion, Staubfeuerung),
- Metallurgie (Durchmischung in Konvertern).

Die hier vorgestellte Arbeit, als Teil eines weiterführenden Forschungsprojekts, stellt sich zur Aufgabe, die Partikel selbst als Sensoren bzw. als intelligente Sonden zu gestalten, um dadurch deren Verhalten in unterschiedlichen Strömungsfeldern (ruhend, laminar, turbulent, etc.) zu messen. Die Anforderungen an das Diagnoseverfahren, welches weltweit erstmalig die Strömungsmechanik und die Partikeldynamik in der Informationsgewinnung bündelt, umfassen hinreichend gute Genauigkeit und Wiederholbarkeit, Möglichkeit zur Miniaturisierung (bis ca. 5mm Partikeldurchmesser), Flexibilität bei Größe, Dichte der Partikel und Medien (Gase, Flüssigkeiten) sowie keine Interferenz der Sonden untereinander (Einsetzbar in hochbeladenen Strömungen)

## **Material und Methoden**

Als erster Schritt soll in dem Forschungsprojekt ein geeignetes Messverfahren entwickelt werden. Der Fokus liegt hierbei auf neuen Möglichkeiten, die sich durch die Miniaturisierung im Bereich der Elektronik, beispielsweise beim Mobile Sensing ergeben. Es sollen dadurch

Sonden entwickelt werden, die nicht passiv von außen beobachtet werden, sondern aktiv ihre Bewegungen aufzeichnen und auswerten. Das betrachtete Messverfahren stützt sich auf Sensoren für Beschleunigung, Lage und Magnetismus, realisiert als MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) Bauteile (siehe Abb. 1). Diese können kostengünstig über Fertigungsverfahren der Halbleiterindustrie hergestellt werden und erreichen dabei eine gute Genauigkeit. Das Messprinzip beruht auf der Erfassung der Relativbewegung einer Referenzmasse gegenüber der Plattform (Dadafshar 2014). Für die Beschleunigungsmessung wird diese Referenzmasse durch Federn gestützt und eine Verschiebung proportional der anliegenden Beschleunigung durch Änderung einer Kapazität aufgezeichnet. Bei den Gyroskopen wird die Masse durch Piezoelemente in translatorische Schwingung versetzt. Kapazitive Elemente zeichnen dann die Auslenkung normal zur Ebene aus Schwingungsrichtung und Rotationsachse aufgrund der Corioliskraft auf. Daraus kann die Winkelgeschwindigkeit der Rotation abgeleitet werden. Bei den Magnetometern sind unterschiedliche Bauarten verfügbar, die zumeist auf der Erfassung der Lorentz-Kraft aufbauen (Todaro, Sileo, and De Vittorio 2012). Im vorliegenden Fall geschieht dies über Hall-Sensoren, die eine Auslenkung der Referenzmasse durch das Erdmagnetfeld aufzeichnen. Der Stand der Technik sind 9-DOF Sensoren, welche die Beschleunigung, Rotation und Änderung des Erdmagnetfelds in allen drei Raumachsen parallel aufzeichnen.

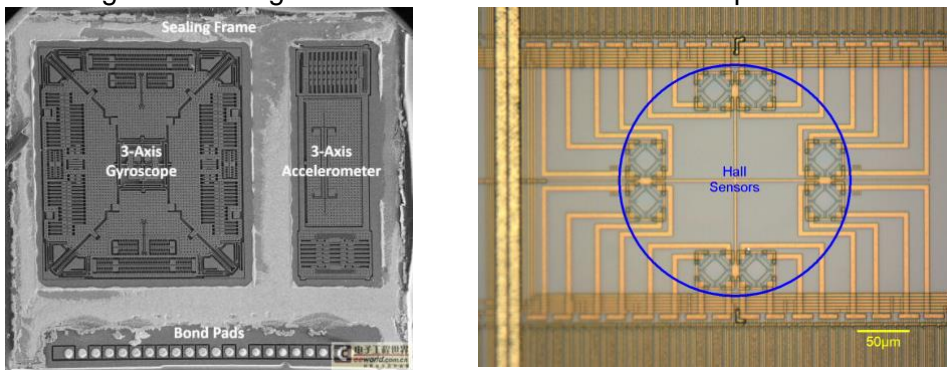


Abb. 1: Mikrostruktur von MEMS Bewegungssensoren; Bildquelle: (www.arfine2000.com 2013)

Um aus diesen Sensordaten die Bewegung und Positionen der Sonden zu erhalten, bedient man sich der Newton'schen Grundgleichungen (Haeri and Shrimpton 2012):

$$m_p a_i = F_{s,i} + (\rho_p - \rho_f) V_p g_i \quad (Gl.1)$$

$$\frac{dI_{p,ij} \omega_{pj}}{dt} = T_{s,i}$$

Da die Beschleunigungssensoren die Erdbeschleunigung mit erfassen, muss dieser Betrag rechnerisch aus den Messwerten entfernt werden, bevor über Integration die Geschwindigkeit und Position ausgewertet werden können. Dies bedingt eine genaue Kenntnis der Raumlage des Sensors, um den Vektor  $g_i$  isolieren zu können. Ein erster Ansatz bestand darin, die durch die Gyroskope gemessenen Rotationen beginnend mit der Ausgangslage aufzuintegrieren und damit zu jedem Zeitpunkt die Erdbeschleunigung in Betrag und Richtung von den Messwerten des Beschleunigungssensors abzuziehen. Leider sind allerdings die Gyroskope in Bezug auf Präzision das schwächste Glied der MEMS-Sensorenarrays und zeigen große Messfehler (bis  $10^\circ/s$ ) und ausgeprägte Langzeitdrift. An diesem Punkt kommen die zusätzlichen Informationen aus den Magnetometern zu tragen. Die Richtung des magnetischen Nordpols und die Inklination des Erdmagnetfelds erlauben zusammen mit der Definition, dass die Erdbeschleunigung in negativer z-Richtung wirkt eine eindeutige Aussage über die Lage des Sensors. Für die Auswertung wurde von Madgwick ein Algorithmus, basierend auf einem Gradientenabstiegsverfahren zur Erfassung der Orientierung und der Rotation der Koordinatensysteme über Quaternionen vorgestellt (Madgwick 2010). Als

Ergebnis liefert der Algorithmus die aus der Luftfahrt bekannten Tait-Bryan-Winkel (Roll-Winkel  $\varphi$ , Nick-Winkel  $\theta$ , Gier-Winkel  $\psi$ ), mit der x-Achse in Richtung Norden und der positiven z-Achse in Richtung der Erdbeschleunigung. Über eine Rotationsmatrix (Gl.2) können dann die Messwerte des Beschleunigungssensors in dieses Koordinatensystem gedreht und anschließend der Vektor  $g_z = 9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \cdot \vec{e}_z$  abgezogen werden.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta \cos\psi & -\cos\varphi \sin\psi + \sin\varphi \sin\theta \cos\psi & \sin\varphi \sin\psi + \cos\varphi \sin\theta \cos\psi \\ \cos\theta \sin\psi & -\cos\varphi \cos\psi + \sin\varphi \sin\theta \sin\psi & -\sin\varphi \cos\psi + \cos\varphi \sin\theta \sin\psi \\ -\sin\theta & \sin\varphi \sin\theta & \cos\varphi \sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (\text{Gl.2})$$

Aus den erhaltenen Beschleunigungen in x-, y- und z- Richtung kann abschließend über Integration auf die Geschwindigkeiten und die Position geschlossen werden:

$$\begin{aligned} \Delta v_i &= dT \cdot a_i \\ \Delta x_i &= dT \cdot \Delta v_i \end{aligned} \quad (\text{Gl.3})$$

Für die praktische Umsetzung wurde auf Komponenten der Open-Source-Entwicklungsumgebung Arduino zurückgegriffen. Diese zeichnet sich durch eine leichte Programmierbarkeit (basierend auf C/C++), eine große Anzahl an vorhandenen Softwarebibliotheken und guten Support durch die Open-Source Community aus. Als Mikrocontroller wurde anhand der Vorgaben für Baugröße und Leistungsfähigkeit das auf dem 32bit/48MHz Prozessor Amtel ATSAMD21 basierende Trinket M0 Board der Firma Adafruit

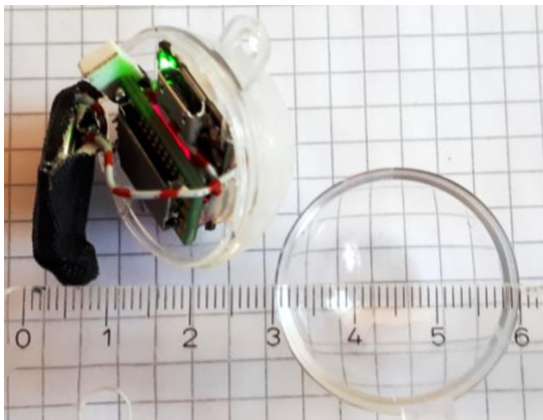


Abb. 2: Abbildung des einsatzbereiten Smarticle-Prototypen

(Maße: 27mm x 15 mm) eingesetzt. Für den 9-DOF Bewegungssensor wurde auf den Typ MPU9255 der Firma InvenSense, verbaut in einem Board der Firma Sparkfun (Maße: 18mm x 11 mm) zurückgegriffen. Die technischen Daten der beiden Komponenten sind in Tabelle 1 aufgelistet. Ergänzt wurden diese Komponenten durch einen  $\mu$ -SD-Card Reader der Firma PJRC (Maße: 19 mm x 14 mm) als Datenspeicher und einer CR2032 Knopfzelle als Energiequelle. Alle Komponenten konnten in einer teilbaren Kunststoffkugel mit 30mm Durchmesser untergebracht werden. Zum Ausbalancieren des Schwerpunkts wurden mittels Heißklebepistole Tariergewichte am inneren Umfang der Kugel angebracht. Ein einsatzbereiter Prototyp ist in **Abb. 2** gezeigt. Die Programmierung

erfolgte innerhalb der Arduino IDE Entwicklungsumgebung. Der Ablauf besteht aus Initialisierung der Sensoren, Einlesen der Sensordaten, Anwendung des Madgwick Algorithmus und schreiben der Daten in eine .CSV Datei. Es wurden Bibliotheken für den MPU-9255 über SPI (Chen 2015) und für den Madgwick-Algorithmus (Winer 2014) verwendet.

Tabelle 1: Technische Daten der Hardware Komponenten

Invensense MPU9255		Range	Resolution	Sample rate
Accelerometer		$\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g \pm 16g$	16bit	4 – 4000 Hz
Gyroskope		$\pm 250, \pm 500, \pm 1000, 2000 \text{ }^\circ/\text{sec}$	16bit	4 – 8000 Hz
Magnetometer		$\pm 4800\mu\text{T}$	16bit	8 – 100 Hz
Adafruit Trinket M0	Operating frequency	I/O Ports	Flash Storage	System RAM
	48MHz @ 32bit	5 General purpose: Digital, analog, serial, I2C, SPI	256 KB	32 KB

## Ergebnisse und Diskussion

Nach dem erfolgreichen Assembly der Hardware und der Programmierung der Prototypen konnten erste Inbetriebnahme-Versuche durchgeführt werden. Das Augenmerk wurde dabei auf die prinzipielle Funktionalität, und die erreichbare Genauigkeit gelegt. Als Versuchsanordnung wurden analytisch berechenbare Bewegungen ausgewählt, die einen Abgleich der gemessenen Daten mit der tatsächlichen Bewegung des Sensors erlauben. Beispielhaft seien hier die Ergebnisse aus einem Pendelversuch und einem Rotationsversuch dargestellt.

Für den Pendelversuch wurde die Sonde an einer Schnur aufgehängt wobei ein effektiver Pendelarm von Ankerpunkt zu Sensormittelpunkt von 1 m eingestellt wurde. Das Pendel wurde dann um 50° ausgelenkt und konnte frei ausschlagen.

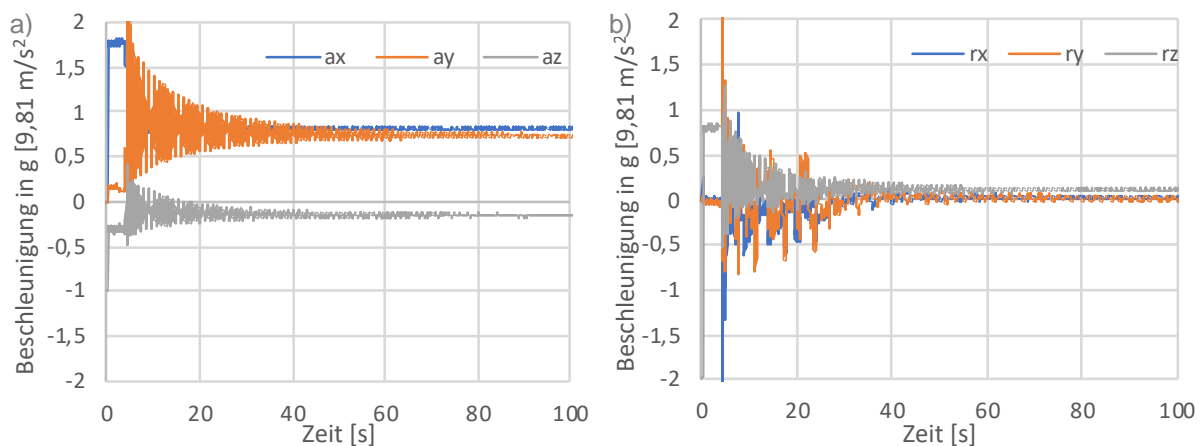


Abb. 3: Rohdaten (a) und ins Laborkoordinatensystem gedrehte, um die Erdbeschleunigung korrigierte Werte (b) des Beschleunigungssensors für den Pendelversuch

Die Aufzeichnung der Rohdaten zeigt Abb. 3. Die Sensoren zeichnen die Bewegung mit guter Auflösung auf (die Datenrate betrug bei diesem Versuch 40 Hz), man kann aus den Diagrammen die Periodendauer von 2,1 s und die Dämpfungskonstante  $\beta = 0,03$  ablesen. Nach Anwendung der Rotation und Abzug der Erdbeschleunigung (Abb. 3b) liegen die Werte für x und y symmetrisch zur Nulllinie, bei der z-Richtung blieb ein leichter Versatz bestehen. Dieser Versatz schlägt sich auch in der Integration der Geschwindigkeit nieder wie aus Abb. 4 hervorgeht. Daraus lässt sich auch der Drift in den Positionsdaten erklären, der aus der Punktwolke in Abb. 4b hervorgeht.

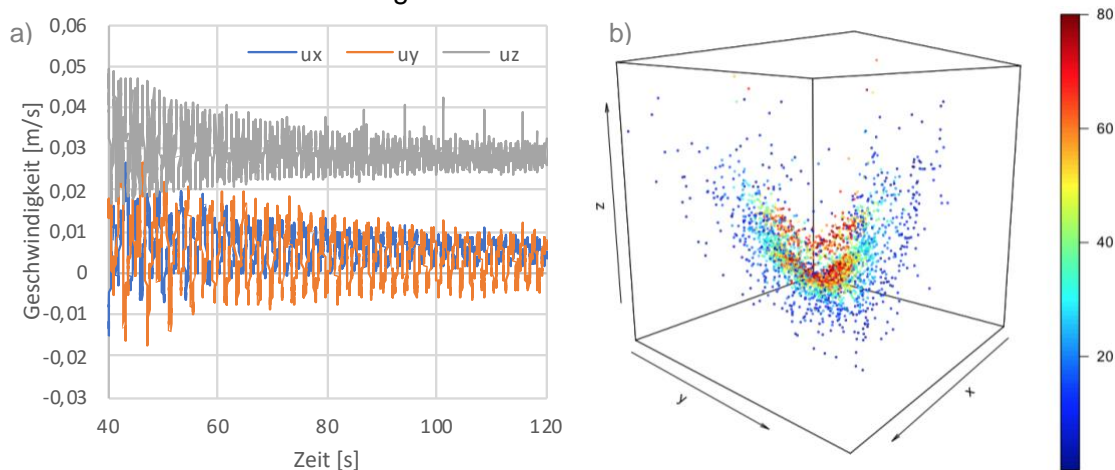


Abb. 4: Berechnete Geschwindigkeit (a) und Positionsdaten (b) des Sensors für den Pendelversuch

Ein zweiter Versuch bestand in der Anbringung des Sensors mittels eines Hebelarms  $r = 0,25 \text{ m}$  an einem Schrittmotor, sodass der Sensor Kreisbahnen mit konstanter Winkelgeschwindigkeit  $\Omega = 12,57 \text{ rad/s}$  beschrieb. Die Motorachse war gegenüber der Waagrechten um  $+30^\circ$  geneigt, sodass Geschwindigkeitskomponenten in allen Raumachsen auftreten. Die ausgewerteten Positionsdaten in Abb. 5b spiegeln diese windschief im Raum angeordnete Kreisbahn wieder. Aus der Geometrie des Aufbaus lässt sich eine Umfangsgeschwindigkeit der Sonde von  $v_{ges} = 3,14 \text{ m/s}$  errechnen. Ein Vergleich mit dem Betrag des gemessenen, ins Laborkoordinaten umgerechneten Geschwindigkeitsvektors (siehe Abb. 5a) zeigt, dass sich dieser Wert nach Passieren des Anfahrvorgangs auch in den Messungen einstellt. Der Mittelwert über den stationären Zeitraum beträgt  $2,79 \text{ m/s}$ , womit der reale Wert um 11% unterschätzt wird.

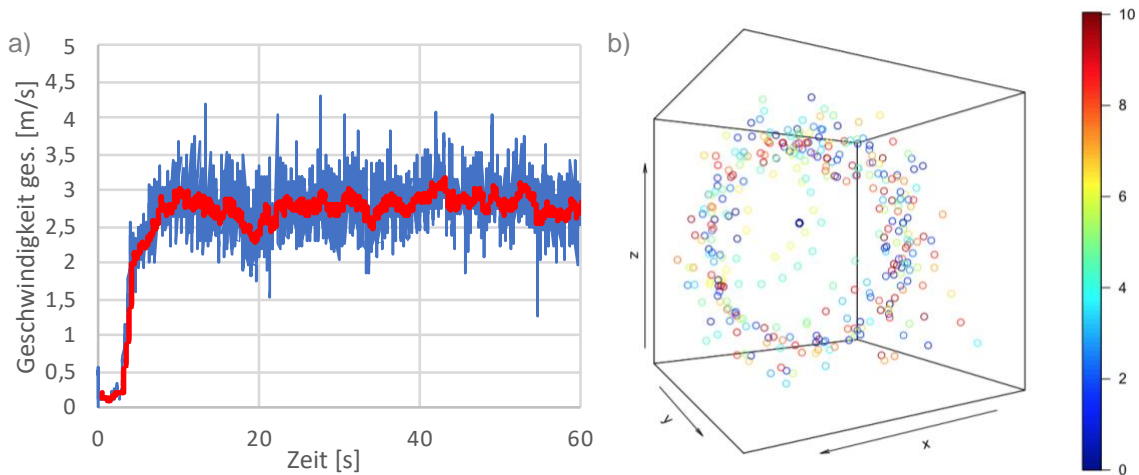


Abb. 5: Berechneter Betrag des Geschwindigkeitsvektors (rote Linie entspricht gleitendem Durchschnitt über 20 Samples) (a) und Positionsdaten (b) für den Kreisbahnversuch

Anhand dieses Versuchs kann auch der Unterschied zwischen der Euler- und Lagrange-Darstellung der Bewegung der Sonde dargestellt werden (Abb. 6). Während in der raumfesten Euler-Darstellung die Geschwindigkeitskomponenten sinusförmig verlaufen, sieht das mitbewegte Koordinatensystem einen konstanten Vektor der sich nur in zwei Raumachsen aufspannt (y und z). Erst über Zuhilfenahme der Informationen aus den Gyroskopen kann aus diesen Daten die Kreisbahn wiederhergestellt werden.

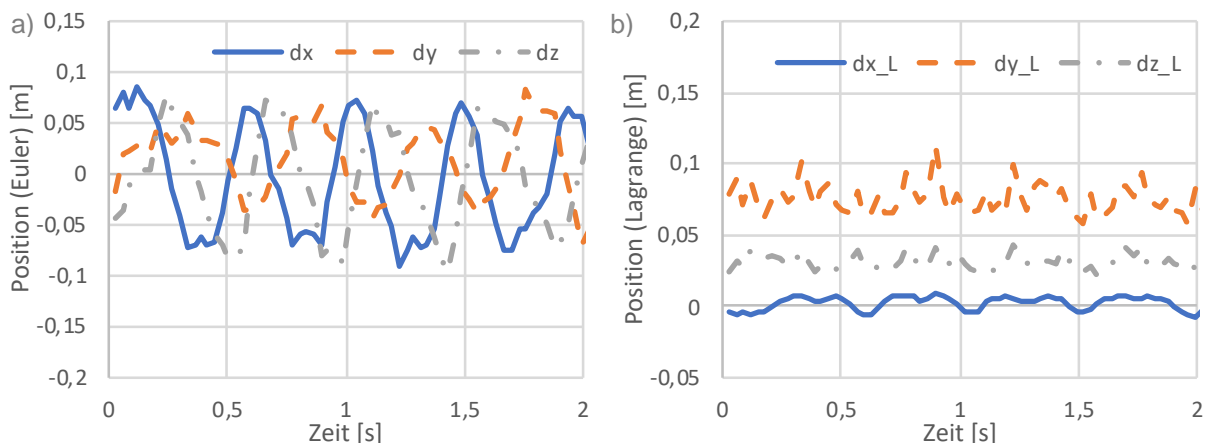


Abb. 6: Berechnete Geschwindigkeit in raumfester Euler- (a) und Partikelbasierter Lagrange-Darstellung (b) für den Kreisbahnversuch

Bezüglich der Genauigkeit haben die Vorversuche noch Verbesserungspotential aufgezeigt. Der im Pendelversuch aufgetretene Versatz der Beschleunigung in z-Richtung lässt sich durch Abweichungen innerhalb der Achsen des Magnetometers erklären. Veröffentlichte Messungen

dieses Sensortyps zeigten einen ausgeprägten Sprung in der Messempfindlichkeit in z Richtung (Winer 2015). Diese Inkongruenz kann mit einem software-basierten Kalibrierverfahren (Bewegen des Sensors in Achterschleifen) minimiert werden. Der positive Effekt auf den Achsversatz bei Drehungen wird von Winer demonstriert (Abweichungen <2%). Ein anderes Manko, das bei den Vorversuchen zutage trat ist eine hohe Fluktuation der Signale. Diesem Rauschen kann mit Hoch-/Tiefpass Filtern begegnet werden, die hardwareseitig in den Sensoren konfiguriert werden können. Die ideale Konfiguration soll in weiteren Versuchen ermittelt werden. Über den Einsatz solcher Filter und eine Verbesserung des Madgwick Algorithmus konnten auch in der Literatur beachtliche Steigerungen der Genauigkeit erzielt werden. Die Orientierungsfehler konnten dabei auf unter 1% gesenkt werden (Sarbishei 2016; Ricci, Taffoni, and Formica 2016). Auch diese Verbesserungen sollen im nächsten Schritt in die Programmierung der Sonden einfließen.

## Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag werden erste Ergebnisse zur Entwicklung von autonomen Partikelsonden zur Messung der Bewegung trägheitsdominierter Partikel in Strömungen vorgestellt. Ziel dieser Messungen ist die Validierung numerischer Modelle auch an komplexeren Bewegungsbahnen, sowie die Erlangung neuer Erkenntnisse zur Interaktion der Partikel mit der Strömung und stationären Umgrenzungen. Die Zielgruppe solcher Erkenntnisse umfasst weite Bereiche der Natur- und Ingenieurwissenschaften. So können die Informationen von Geowissenschaftlern beispielsweise zur Beschreibung der Eiskristalle in Wolken, oder Sedimentbewegung in Gewässern angewendet werden. Ingenieure können damit die Beschreibung von Vorgängen in Katalysatorschüttungen (Chemieindustrie), Rührbehältern (Lebensmittelindustrie) oder Wirbelschichtfeuerungen (Energietechnik) verbessern und daraus optimierte Anlagenkonzepte ableiten.

Der erste Schritt dieser Entwicklung beschäftigt sich mit der Fragestellung, ob MEMS-Sensoren ein geeignetes Messverfahren für diese Aufgabenstellung darstellen. Dazu wurden kommerziell verfügbaren Komponenten (32bit Mikrocontroller, MEMS-Bewegungssensor MPU9255, Datenspeicher und Stromversorgung) ausgewählt, um einen funktionsfähigen Prototyp eines Partikelsensors zu realisieren. Als Entwicklungsplattform wurde dazu die Arduino-Umgebung genutzt. In Hinblick auf Baugröße und Funktionalität wurde als Mikroprozessor ein 32bit/48MHz Cortex M0+, verbaut in einem Adafruit Trinket M0 Board, gepaart mit einem 9-Achsen IMU (Inertial Measurement Unit, je 3 Achsen Beschleunigung, Rotation und Magnetfeld) vom Typ MPU9255 ausgewählt. Diese Hardware konnte in transparente Kunststoffkugeln mit Außendurchmesser 30mm integriert und autonom betrieben werden. Die Programmierung über Arduino IDE umfasst die Datenerfassung, die Korrektur der Erdbeschleunigung über einen Sensor-fusion Algorithmus sowie die Datenaufzeichnung auf SD-Karte.

Als Proof of Concept wurden mit diesen Partikelsonden Messungen von geometrisch einfachen, analytisch berechenbaren Bewegungsbahnen (Pendel und Kreisbahn) durchgeführt. Daran konnte die prinzipielle Eignung des Messverfahrens belegt werden, wenn auch Schwächen in der programmtechnischen Umsetzung zu Tage traten (Messabweichung der Geschwindigkeit von 11%, Achsversatz durch Sensor-Fusion Algorithmus). Ansätze zur Verbesserung dieser Genauigkeit und Langzeitstabilität wurden identifiziert und werden im weiteren Verlauf des Projekts umgesetzt.

Als Ausblick sollen auch weitere Messverfahren, wie Triangulation über elektromagnetische Wellen oder Akustik, bzw. optische Verfahren den MEMS-Sensoren gegenübergestellt werden. Nach Festlegung des Messverfahrens sollen Partikelsonden für unterschiedliche Anwendungen (Dichteverhältnis  $\varphi \ll 1$ ,  $\varphi = 1$ ,  $\varphi \gg 1$ , unterschiedliche Durchmesser) konzipiert und gefertigt werden. An mit diesen Sonden durchgeführten Messungen soll anschließend die Gültigkeit bestehender analytischer Modelle zu Partikelbewegungen überprüft und diese gegebenenfalls adaptiert oder neu entwickelt werden. Abschließend sollen publizierte numerische Simulationen messtechnisch nachgestellt und damit validiert werden.

Als Ausblick auf mögliche Nachfolgeprojekte soll ein Konzept für eine weitere Miniaturisierung des Sondendesigns sowie deren Anpassung an den Einsatz außerhalb des Labors, in industriellen und angewandten wissenschaftlichen Aufgabenstellungen erstellt werden.

## Literatur

- Ancey, Christophe, Françoise Bigillon, Philippe Frey, Jack Lanier, and Rémi Ducret. 2002. "Saltating Motion of a Bead in a Rapid Water Stream." *Physical Review E* 66 (3): 36306. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.66.036306>.
- Bagheri, G. H., C. Bonadonna, I. Manzella, P. Pontelandolfo, and P. Haas. 2013. "Dedicated Vertical Wind Tunnel for the Study of Sedimentation of Non-Spherical Particles." *Review of Scientific Instruments* 84 (5): 54501. <https://doi.org/10.1063/1.4805019>.
- Chen, Brian. 2015. *MPU9250: MPU-9250 SPI Library for Arduino/Teensy. C++*. <https://github.com/brianc118/MPU9250>.
- Gao, Hui, Hui Li, and Lian-Ping Wang. 2013. "Lattice Boltzmann Simulation of Turbulent Flow Laden with Finite-Size Particles." *Computers & Mathematics with Applications*, Special Issue on Mesoscopic Methods in Engineering and Science (ICMMES-2010, Edmonton, Canada), 65 (2): 194–210. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2011.06.028>.
- Haeri, S., and J.S. Shrimpton. 2012. "On the Application of Immersed Boundary, Fictitious Domain and Body-Conformal Mesh Methods to Many Particle Multiphase Flows." *International Journal of Multiphase Flow* 40 (April): 38–55. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.12.002>.
- Hu, Howard H. 1996. "Direct Simulation of Flows of Solid-Liquid Mixtures." *International Journal of Multiphase Flow* 22 (2): 335–352.
- Hu, Howard H., Neelesh A. Patankar, and M. Y. Zhu. 2001. "Direct Numerical Simulations of Fluid–solid Systems Using the Arbitrary Lagrangian–Eulerian Technique." *Journal of Computational Physics* 169 (2): 427–462.
- Madgwick, Sebastian. 2010. "An Efficient Orientation Filter for Inertial and Inertial/Magnetic Sensor Arrays." *Report X-10 and University of Bristol (UK)* 25.
- Majid Dadafshar. 2014. "Accelerometer and Gyroscopes Sensors: Operation, Sensing, and Applications." EDN. 2014. <https://www.edn.com/design/analog/4429624/Accelerometer-and-Gyroscopes-Sensors--Operation--Sensing--and-Applications->.
- Matas, Jean-Philippe, Jeffrey F. Morris, and Élisabeth Guazzelli. 2004. "Inertial Migration of Rigid Spherical Particles in Poiseuille Flow." *Journal of Fluid Mechanics* 515: 171–195.
- Mordant, N., and J.-F. Pinton. 2000. "Velocity Measurement of a Settling Sphere." *The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems* 18 (2): 343–52. <https://doi.org/10.1007/PL00011074>.
- Mordant, Nicolas, Pascal Metz, Jean-François Pinton, and Olivier Michel. 2005. "Acoustical Technique for Lagrangian Velocity Measurement." *Review of Scientific Instruments* 76 (2): 25105. <https://doi.org/10.1063/1.1844452>.
- Osorio, Anuhar, Tobias Schmidt, Kamen Beronov, Judith Forstner, Rainer Benning, and Antonio Delgado. 2009. "Numerical Simulation of a Multi-Contact Detection Technique for Foreign Particles in Closed Food Containers." *PAMM* 9 (1): 723–724.
- Sapsis, Themistoklis P., Nicholas T. Ouellette, Jerry P. Gollub, and George Haller. 2011. "Neutrally Buoyant Particle Dynamics in Fluid Flows: Comparison of Experiments with Lagrangian Stochastic Models." *Physics of Fluids* 23 (9): 93304. <https://doi.org/10.1063/1.3632100>.
- Schmidt, Tobias RH, Anuhar O. Nesme, Judith K. Forstner, Kamen N. Beronov, Rainer M. Benning, and Antonio R. Delgado. 2009. "Detection of Foreign Bodies in Closed Food Containers Supported With Fluid-Solid-Interaction Analysis." In *ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference*, 725–733. American Society of Mechanical Engineers. <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1635237>.
- Segre, G., and A. Silberberg. 1962. "Behaviour of Macroscopic Rigid Spheres in Poiseuille Flow Part 1. Determination of Local Concentration by Statistical Analysis of Particle Passages through Crossed Light Beams." *Journal of Fluid Mechanics* 14 (1): 115–135.
- Segré, G., and A. Silberberg. 1962. "Behaviour of Macroscopic Rigid Spheres in Poiseuille Flow Part 2. Experimental Results and Interpretation." *Journal of Fluid Mechanics* 14 (1): 136–157.
- Shahi, Shivam, and Ergun Kuru. 2015. "An Experimental Investigation of Settling Velocity of Natural Sands in Water Using Particle Image Shadowgraph." *Powder Technology* 281 (September): 184–92. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.04.065>.
- Shahi, Shivam, and Ergun Kuru. 2016. "Experimental Investigation of the Settling Velocity of Spherical Particles in Power-Law Fluids Using Particle Image Shadowgraph Technique." *International*



- Journal of Mineral Processing* 153 (August): 60–65. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.06.002>.
- Todaro, Maria Teresa, Leonardo Sileo, and Massimo De Vittorio. 2012. "Magnetic Field Sensors Based on Microelectromechanical Systems (MEMS) Technology." In *Magnetic Sensors-Principles and Applications*. InTech.
- Uhlmann, Markus, and Jan Dušek. 2014. "The Motion of a Single Heavy Sphere in Ambient Fluid: A Benchmark for Interface-Resolved Particulate Flow Simulations with Significant Relative Velocities." *International Journal of Multiphase Flow* 59 (February): 221–43. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.10.010>.
- Vanroyen, Claude, Abdelaziz Omari, Jean Toutain, and David Reungoat. 2005. "Interactions between Hard Spheres Sedimenting at Low Reynolds Number." *European Journal of Mechanics - B/Fluids* 24 (5): 586–95. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2005.01.002>.
- Winer, Kris. 2014. *Arduino Sketches for MPU9250 9DoF with AHRS Sensor Fusion*. C++. <https://github.com/kriswiner/MPU9250>.
- www.arfine2000.com. n.d. "Apart: The Big Three Axis of IMU Explicates the Internal Structure." <http://en.connbuy.com/newsinfo/3.html>.
- Zhu, Chi, Genfan Liu, Jianxiong Ye, and Honglei Xu. 2015. "Experimental Investigation of Non-Stationary Motion of Single Small Spherical Particles in an Upward Flow with Different Velocities." *Powder Technology* 273 (March): 111–17. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.12.010>.

