

Effizienzsteigerung von Kläranlagen - Vorstellung von Mess- und Simulationstechnischen Methoden

Reinecke, S. F.; Höffmann, A. K.; Stachowske, M.; Hampel, U.; Ehrhard, P.;

Originally published:

January 2018

GIT Labor-Fachzeitschrift 62(2018)4, 53-56

Perma-Link to Publication Repository of HZDR:

<https://www.hzdr.de/publications/Publ-26574>

Release of the secondary publication
on the basis of the German Copyright Law § 38 Section 4.

Mess- und Simulationstechnische Methoden für die Effizienzsteigerung von Kläranlagen

Einführung und Zielsetzung

Für den Großteil der in Deutschland betriebenen Kläranlagen übersteigt die aufgewendete Energie zur Durchmischung und Belüftung des Abwassers oftmals den tatsächlich notwendigen Energiebedarf. Zwischen 50% und 80% des Gesamtenergiebedarfs einer Kläranlage fällt auf die Belüftung des Belebungsbeckens (Fricke, 2009; Haberkern et al., 2008). Unabhängig von der Ausbaugröße der Kläranlage ist dementsprechend dort das mit Abstand größte Energieeinsparpotenzial zu finden. Dies wird oft durch eine nicht-optimale Auslegung bzw. Anordnung der Begasungs- und Dispergierorgane im Belebtschlammbecken hervorgerufen.

Ziel dieses Vorhabens ist die Entwicklung einer Methodik, mit welcher basierend auf numerischen Simulationen die Optimierungspotenziale der jeweiligen Anlage aufgedeckt werden, optimierte Anlagenkonfigurationen und Betriebsweisen bestimmt bzw. bewertet werden. Dies entspricht einer virtuellen Anlagenoptimierung durch numerische Experimente. Weiterhin werden die Maßnahmen nach ihrer Umsetzung der an der konkreten Anlage mit Hilfe innovativer Sensorik messtechnisch validiert.

Damit soll eine grundlegende Verbesserung der Hydrodynamik und des Stofftransportes in Belebungsbecken in Verbindung mit der Effizienzsteigerung der Anlage basierend auf numerischen Simulationen und innovativen Sensortechnologien möglich werden.

Messtechnische Methoden

Ein Hauptbestandteil des Vorhabens ist die Qualifizierung und Anwendung innovativer Messverfahren im Rahmen gezielter Experimente. Dabei wird ein skalenübergreifender Ansatz mit Untersuchungen in der Labor-, Technikums- und Realskala verfolgt. Durch die messtechnische Erfassung hydrodynamischer Parameter, wie Strömungsgeschwindigkeit, Phasengehalt, Blasenauftiegschwindigkeiten und Blasengrößenverteilungen mit der Mehrphasenmesstechnik des HZDR werden für die Anwendung relevante Strömungs- und Prozessparameter erhoben und unmittelbar Erkenntnisse über Optimierungspotenziale realer Anlagen gewonnen. Weiterhin dienen die Daten für die Validierung und Optimierung der Simulationsmodelle.

In Laborstudien wird mit ultraschneller Elektronenstrahl-Röntgentomografie bei einer hohen raumzeitlichen Auflösung das Strömungsverhalten von Einzelglasblasen und Gasblasenschwärmen in Abhängigkeit vom Gasvolumenstrom, des Belüfertyps und der Beschaffenheit der Flüssigphase (Reinstwasser, Salzlösung, Belebtschlamm) untersucht (Sommer et al., 2017). Weiterhin werden videometrische Laborstudien der Gasblasengrößenverteilungen an neuartigen Belüfertypen und an strömungsführenden Einbauten in Reinstwasser durchgeführt. In einer Technikumsanlage werden Langzeitversuche zum Vergleich von Belüfterelementen, Betriebsregimen und strömungsführenden Einbauten durchgeführt. Dabei werden der Energiebedarf der Belüftung, der Sauerstofftransport und die Reinigungsleistung untersucht. Die Technikumsanlage umfasst zwei baugleiche Behälter mit einem Füllvolumen von ca. 14 m³, welche im Bypass an einer Kläranlage mit Belebtschlamm betrieben werden.

Zur Erfassung räumlich verteilter Prozessparameter in realen Belebungsbecken werden strömungsfolgende Sensorpartikel eingesetzt. Diese Sensortechnologie wurde am HZDR entwickelt und befindet sich in der Weiterentwicklung zu einem smarten, verteilten Sensorsystem für große Reaktionsbehälter (Reinecke und Hampel, 2016).

Numerische Methoden

Die im Vorhaben zu entwickelnde Optimierungsmethodik für Belebungsbecken basiert auf fortgeschrittenen numerischen Simulationen, bei denen die enge Kopplung der komplexen biochemischen Vorgänge an die hydrodynamischen Bedingungen im Prozess berücksichtigt wird.

Für die Simulationen wird ein rechenzeiteffizientes (3D,t) CFD-Mehrphasenmodell auf Basis finiter Volumen (FVM) genutzt. Der Belebtschlamm ist als zweiphasige Strömung (Euler-Euler) mit „gelöstem“ Schlamm abgebildet. Das Absetzverhalten des Belebtschlammes wird in einem Modell basierend auf eigenen Laborexperimenten als Funktion des TS-Gehalt berücksichtigt. Zudem wird die nicht-Newtonsche Rheologie als Funktion des TS-Gehalts einbezogen. Turbulenzen werden mit dem SST-Turbulenzmodell berechnet. Der Stoffübergang von den Luftblasen zum Wasser wird nach Higbie als Funktion der dynamischen Viskosität und dem Gasblasendurchmesser berechnet. Die Strömungssimulationen sind an ein biochemisches Reaktionsmodell in Form des Activated Sludge Modell No. 1 gekoppelt. Dieses beschreibt die acht wesentlichen biochemischen Prozesse, unter Berücksichtigung von 13 Größen. Zusätzlich werden die Transportgleichungen für die relevanten Größen im ASM 1 gelöst.

Zur Kalibrierung, Anpassung und Validierung von Prozessmodellen werden die messtechnisch erfassten Daten herangezogen.

Ausgewählte Ergebnisse

Ergebnisse der Laborstudien

Durch die hohe raum-zeitliche Auflösung der Elektronenstrahl-Röntgentomografie am ROFEX werden die Einzelblasen im Blasenschwarm und deren Bewegung in der Zweiphasenströmung in den rekonstruierten Datensätzen abgebildet. Aus diesen Datensätzen werden über eigens entwickelte Algorithmen Durchmesser und Aufstiegsgeschwindigkeiten der Gasblasen sowie Gasgehalte bestimmt. Dies erfolgte am Versuchsstand mit dem DN100-Messrohr für die Zweiphasenströmung in Reinstwasser, einer Salzlösung und der Dreiphasenströmung in Belebtschlamm für verschiedene Belüfertypen und Luftdurchsätze sowie über der Höhe des DN100-Messrohres von 3,5 m.

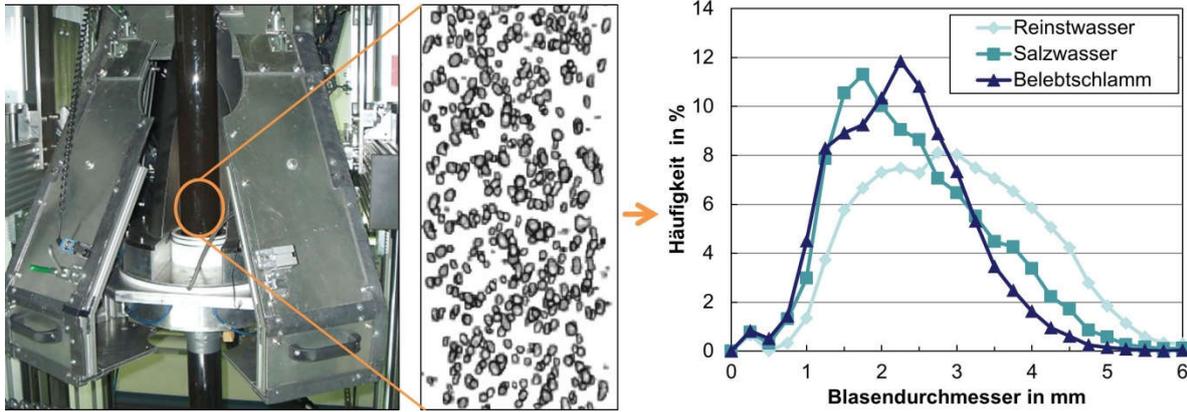


Abbildung 1: (links) DN100-Messrohr mit Belebtschlamm im Elektronenstrahl-Röntgenomografen ROFEX. (mitte) Rekonstruierter Blasenschwarm in Belebtschlamm mit visualisierten Phasengrenzflächen der Gasblasen. (rechts) Aus den Tomografiedaten extrahierte Gasblasengrößenverteilungen im DN100-Messrohr für einen Tellerbelüfter in Reinstwasser, Salzlösung und Belebtschlamm.

Ergebnisse der Technikumsanlage

Die Vergleichsstudie an der Technikumsanlage zeigte deutliche Unterschiede bei der Effizienz der Belüfter. Ein neuartiger Edelstahlmembranbelüfter (EB) zeigt hier ggü. einem Plattenmembranbelüfter (PB) einen deutlichen Vorteil im Sauerstoffeintrag. Für den typischen Regelbereich der Gelöstsauerstoffkonzentration von 1-2 mg/l ergibt sich bei dem Einsatz der EB ein um ca. 25% geringerer Luftverbrauch gegenüber PB bei einer vergleichbaren Abgasungsfläche der Belüfter und vergleichbarer Reinigungseffizienz. Die Robustheit des Belüfterkonzeptes ist jedoch noch für den Langzeitbetrieb zu optimieren. Anhand der Messdaten der Druckluftzufuhr, des pH-Wertes, des Gelöstsauerstoffgehaltes und der Zu- und Ablaufwerte werden die gekoppelten Simulationsmodelle in nachgeschalteten Simulationsrechnungen validiert.

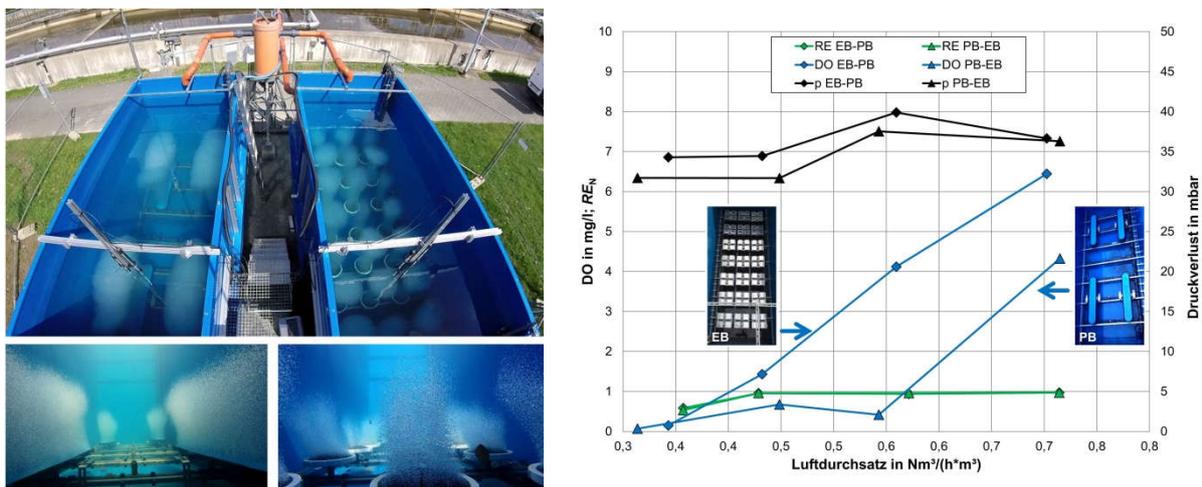


Abbildung 2: (links) Technikumsanlage während des Anfahrens mit Tellermembranbelüfter (TB) und Plattenmembranbelüfter (PB) in Wasser. (rechts) Gelöstsauerstoffkonzentration DO in Belebtschlamm, Reinigungseffizienz RE_N und Druckverlust p am Belüfter (ohne hydrostatischen Anteil) für neuartige Edelstahlmembranbelüfter (EB) und PB in der Technikumsanlage in Abhängigkeit vom normierten Luftdurchsatz.

Ergebnisse der Sensorpartikel im Belebungsreaktor

Es wurden erstmals instrumentierte Sensorpartikel in einem als Rundbecken ausgeführten Belebungsreaktor der (Großschweidnitz, SOWAG mbH) zur biologischen Abwasseraufbereitung eingesetzt. Der Belebungsreaktor hat die Füllhöhe $H_0 = 5$ m, den Durchmesser $D = 23,4$ m und das Volumen $V_B = 2077$ m³. Zur Einbringung des für die Nitrifikation benötigten Sauerstoffes sind 21 Plattenbelüfter mit einer Luftaustrittsfläche von 42 m² in einem Kreis Sektor von ca. 45° am Boden des Behälters installiert (Flächenbelegungsdichte 10%). Zwei gegenüberliegende Rührwerke mit horizontaler Förderrichtung sorgen für eine ausreichende Durchmischung im Behälter. Der Belebungsreaktor hat eine intermittierende Betriebsweise mit abwechselnder Denitrifikation und Nitrifikation.

Die Sensorpartikel haben ihre Auftriebseigenschaften in einer Belebtschlammprobe automatisch tariert und wurden anschließend über eine Einsatzdauer von ca. 2600 s in der Nitrifikationsphase im Belebungsreaktor eingesetzt. Am Ende der Messung sind sie eigenständig an die Oberfläche getrieben und wurden manuell zurückgewonnen.

Die probabilistische Analyse der gemessenen Zeitreihe der vertikalen Position der Sensorpartikel liefert bereits wesentliche Informationen über die ablaufenden Strömungsprozesse und die Homogenität der Vermischung im Becken. Anhand überhöhter Aufstiegs geschwindigkeiten der Sensorpartikel ist eine ungünstige Überlagerung der Rührerstrahlen mit den Gasblasenfahnen zu erkennen, welche potenziell zu einer verkürzten Verweilzeit der Luftblasen und damit zu einer suboptimalen Sauerstoffausnutzung beitragen.

Die gemessene Drehrate $\boldsymbol{\omega} = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]$ gibt die Rotation des Sensorpartikels um seine Drehachsen wieder. Bei $t = 1530$ s verbleibt der Sensorpartikel kurz in der Höhe $z/H_0 = 0,4$ ($v_z \approx 0$), jedoch rotiert er sehr schnell mit $\omega_z > 200^\circ \text{ s}^{-1}$ um seine Längsachse. Dies deutet auf eine lokale Verwirbelung hin.

Mit den Messgrößen \mathbf{a} und $\boldsymbol{\omega}$ werden prinzipiell alle Freiheitsgrade der Bewegung von Sensorpartikeln erfasst. Daher können diese Daten als Grundlage für eine weiterführende Bestimmung der Position von Sensorpartikeln genutzt werden. Hierzu werden geeignete Algorithmen basierend auf Kalman-Filtern entwickelt. Dabei sollen auch externe Positionsmarker zur Unterstützung der Positionserfassung eingebunden werden.

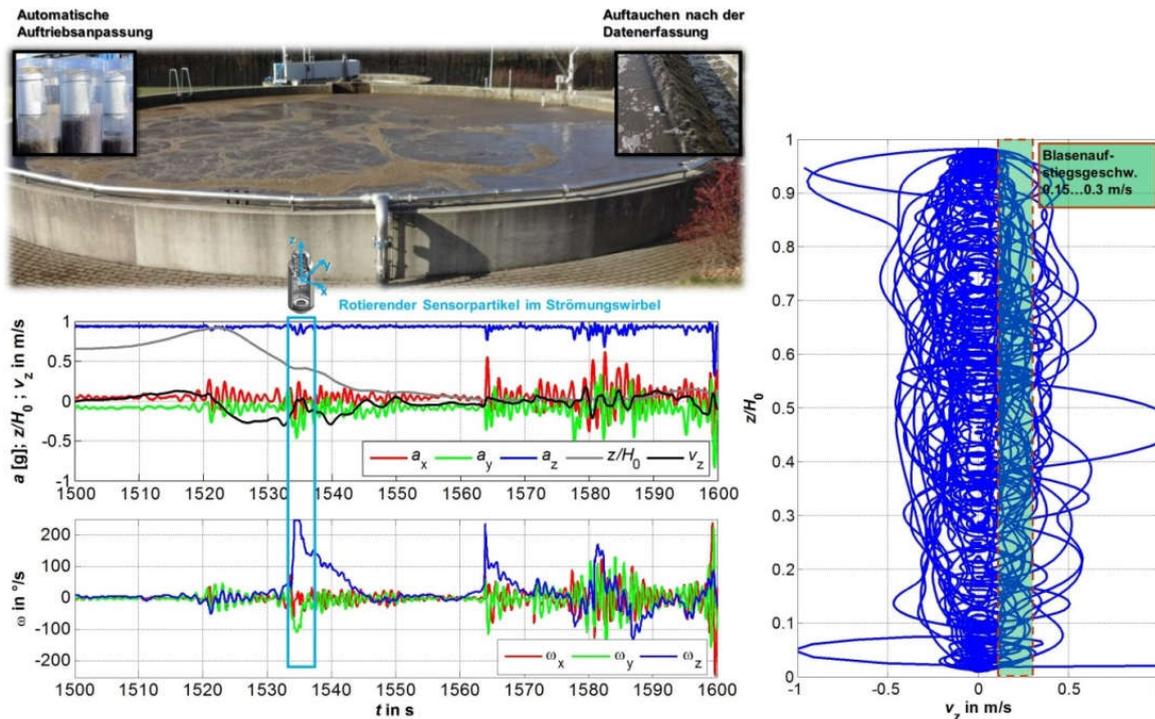


Abbildung 3: Einsatz von Sensorpartikeln in einem Belebungsbecken einer Abwasseraufbereitungsanlage mit einer Tiefe von 5 m und einem Durchmesser von 21 m (oben), Zeitreihe der Bewegungsdaten vertikale Position z , vertikale Geschwindigkeit v_z , Beschleunigung \mathbf{a} und Drehrate $\boldsymbol{\omega}$ eines Sensorpartikels mit einem detektierten lokalen Strömungswirbel im Belebungsbecken (unten) und Phasenportrait der vertikalen Bewegung eines Sensorpartikels $z(v_z)$.

Ergebnisse der Simulation

Die von der TU Dortmund entwickelten gekoppelten Simulationsmodelle für die Strömung im Belebungsbecken bilden die Hydrodynamik der Mehrphasenströmung, die biologischen Reaktionen und den Stofftransport und deren Wechselwirkung realitätsnah ab. Die darauf aufbauende Simulationsmethode zeigt ein hohes Potenzial, die Wirkung neuer Vermischungs- und Belüftungsstrategien zu analysieren. Im Hinblick auf das Verhalten der Gasblasen in Belebtschlamm dienen die Ergebnisse der Röntgentomografie-Untersuchungen zur Validierung der Modelle. Die Ergebnisse der Validierung zeigen deutlich das Potenzial der entwickelten Simulationsmethode auf (Höffmann und Ehrhard, 2017). Die Kombination von biologischen Reaktionen, Rheologie, Stofftransport und Hydrodynamik bietet die Möglichkeit, schnell und effektiv Vermischungsstrategien auszutesten. Basierend auf Referenzwerten der KA Schwerte (Ruhrverband KÖR) wurden Simulationen mit veränderten Betriebsweisen der Anlage durchgeführt und hinsichtlich des Energieaufkommens ausgewertet. Dabei wurden Energie- und CO_2 -Einsparungen von bis zu 23,3% gegenüber dem Referenzbetrieb der Kläranlage ermittelt (siehe Tabelle 1). Mit Hilfe der entwickelten Strömungsfolger und Konzentrationsprofilmessungen lassen sich die Simulationsergebnisse im Weiteren verifizieren. Damit ist ein handhabbares Simulationswerkzeug vorhanden, welches aussagekräftige Ergebnisse über Belüftungsstrategien oder Einbauten liefert.

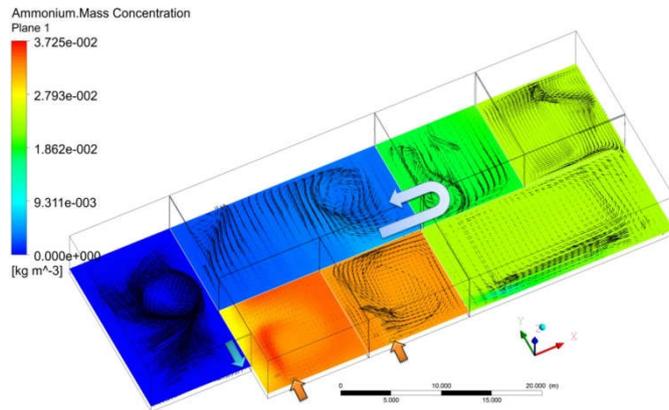


Abbildung 4: Simulation der Ammoniumverteilung mit Geschwindigkeitsfeld in einem Schnitt durch ein Belebungsbecken der KA Schwerte. Die Strömung wird durch Rührwerke und Belüfter beeinflusst. Die Pfeile geben die Hauptfließrichtung des Abwassers an.

Tabelle 1: Energieverbrauch in einem Belebungsbecken der KA Schwerte für die Referenzbetriebsweise aus dem Jahr 2005 und die beiden simulierten Optimierungsvarianten A und B sowie die daraus resultierenden Energie- und CO₂-Einsparungen der Gesamtanlage mit zwei Belebungsbecken ggü. der Referenzbetriebsweise.

Energieverbrauch im Teilbereich je Strasse	Referenzbetrieb 2005 [kWh/a]	Variante A [kWh/a]	Variante B [kWh/a]
Belüftung	442934	378709	325114
Rührwerke	43699	35040	35040
Rezirkulationspumpen	10114	10114	15114
Rücklaufschlammumpen	24316	24316	24316
Summe	521063	448179	399584
e_{Bel} [kWh/(E a)]	27,0	23,2	20,7
Einsparung KA-Schwerte mit zwei Strassen			
Energieeinsparung [kWh/a]		145768	242958
Energieeinsparung [%]		14,0	23,3
CO ₂ -Emission [t/a]	557,5	479,6	427,6
Einsparung CO₂-Emission [t/a]		78	130
Einsparung CO₂-Emission [%]		14,0	23,3

Zusammenfassung

Die gekoppelten experimentellen und numerischen Studien werden wesentliche Beiträge für die Effizienzsteigerung von Kläranlagen liefern. Die enge Kooperation zwischen den wissenschaftlichen Partnern und den Partnern aus der Anlagenpraxis hat dazu beigetragen, dass die im dreijährigen Projektzeitraum geplanten Versuchsreihen im Labor, Technikum und an den Referenzanlagen ein anwendungsnahes Konzept sowohl im Aufbau als auch im Ablauf verfolgen. Besonders die skalenübergreifende Betrachtung der gekoppelten messtechnischen und numerischen Untersuchungen in der Größenskala der Versuchsanordnung vom DN100-Messrohr über die Technikumsanlage bis hin zu den Referenzkläranlagen wird nachhaltig zur Verbesserung der Modelle beitragen und die Entwicklung wirksamer Auslegungsmethoden zur Optimierung der Anlagen vorantreiben. Eine Kombination des Einsatzes effizienter Luftertragssysteme wie die Edelstahlmembranbelüfter EB mit einer optimierten Vermischungs- und Belüftungsstrategie kann die Energieeffizienz bei der biologischen Abwasserreinigung auf bis zu 35% steigern.

Danksagung

Die Ergebnisse dieses Beitrages sind im Rahmen des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Vorhabens LEOBEL (AZ30799) entstanden.



Autor*innen

Sebastian Felix Reinecke¹, Ann Kathrin Höffmann², Martin Stachowske³, Uwe Hampel^{1,4}, Peter Ehrhard²

Zugehörigkeit

¹ Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V., Institut für Fluiddynamik

² Technische Universität Dortmund, Fakultät Bio- und Chemieingenieurwesen, Lehrstuhl für Strömungsmechanik

³ IWEB Institut für Wasser & Energie Bochum GmbH

⁴ Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik, AREVA-Stiftungsprofessur für Bildgebende Messverfahren für die Energie- und Verfahrenstechnik

Literatur

Fricke, K., Energieeffizienz kommunaler Kläranlagen, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2009.

Haberkern, B., et al., Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2008.

Sommer, A.-E., Wagner, M., Reinecke, S.F., Bieberle, B., Barthel, F., Hampel, U., Analysis of activated sludge aerated by membrane and monolithic spargers with ultrafast X-ray tomography, Flow Measurement and Instrumentation 53, 2017, 18–27.

Reinecke, S. F., Hampel, U., Instrumented flow following sensor particles with magnetic position detection and buoyancy control, J Sens Sens Syst 5 (2016), 213–220.

Höffmann, A. K., Ehrhard, P., Numerical investigations of bubbles rising in water, Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics 17, 2017.