

Institut für Fluidodynamik
Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V.

Leistungsoptimierung von Kläranlagen durch gezielte Strömungsführung in Belebtschlammbecken - LEOBEL -

Abschlussbericht über die Phase I eines Forschungsvorhabens,
gefördert unter dem Aktenzeichen 30799-23 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. S. Reinecke¹, Prof. Dr.-Ing. Uwe Hampel¹, Prof. Dr.-Ing. Peter Ehrhard²,
Prof. Dr.-Ing. Martin Stachowske³

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

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

³IWEB Institut für Wasser & Energie Bochum GmbH

Dresden, Juni 2015

• **Projektkennblatt**
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	30799	Referat	24/2	Fördersumme	129.824,00 EUR
----	--------------	---------	-------------	-------------	-----------------------

Antragstitel **Leistungsoptimierung von Kläranlagen durch gezielte Strömungsführung in Belebtschlammbecken**

Stichworte

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
1 Jahr	01.04.2014	31.03.2015	1

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V. Institut für Fluidodynamik Abteilung Experimentelle Thermofluidynamik 01328 Dresden	Tel 0351 260 - 2772 Fax 0351 260 - 2383
		Projektleitung Prof. Dr. Uwe Hampel
		Bearbeiter

Kooperationspartner IWEB GmbH
Universitätsstraße 142
44799 Bochum

Technische Universität Dortmund
August-Schmidt-Straße 4
44227 Dortmund

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Für den Großteil der in Deutschland betriebenen Kläranlagen übersteigt die aufgewendete Energie zur Durchmischung und Belüftung des Abwassers oftmals den tatsächlich notwendigen Energiebedarf. 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 wird, optimierte Anlagenkonfigurationen und Betriebsweisen bestimmt bzw. bewertet werden und nach ihrer Umsetzung an der konkreten Anlage mit Hilfe innovativer Sensorik messtechnisch validiert werden. Damit soll eine grundlegende Verbesserung der Hydrodynamik von Belebungsbecken in Verbindung mit der Effizienzsteigerung der Anlage basierend auf numerischen Simulationen und innovativen Sensortechnologien möglich werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten 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. Hier werden messtechnisch erfasste Daten zur Kalibrierung, Anpassung und Validierung von Prozessmodellen herangezogen. Mögliche Strategien zur Veränderungen am Aufbau und dem Betrieb der Begasungs- und Dispergierorgane werden durch numerische Simulationen basierend auf den Prozessmodellen untersucht (virtuelle Anlagenoptimierung durch numerische Experimente) und exemplarisch an den Anlagen getestet und bewertet. Ein Hauptbestandteil des Vorhabens ist die Qualifizierung und Anwendung innovativer Messverfahren im Rahmen gezielter Experimente an Laboranlagen sowie an Kläranlagen der Verbundpartner. Durch die messtechnische Erfassung hydrodynamischer Parameter, wie Vermischungsgrad, Strömungsgeschwindigkeit, Phasengehalt, Blasenauftiegs- und Blasengrößenverteilungen mit der Mehrphasenmesstechnik des HZDR werden für die Anwendung relevante Strömungs- und Prozessparameter erhoben und unmittelbar Erkenntnisse über Optimierungspotenziale realer Anlagen gewonnen.

Ergebnisse und Diskussion

Zur Erhebung von Referenzdaten über das Verhalten der Blasenströmung von Belebungsbecken wurden in AP1 am HZDR zwei hochwertige Experimentalaufbauten konzipiert und aufgebaut. Die damit erhobenen Referenzdaten sind die Grundlage für die Validierung und Verbesserung der für die Strömungssimulation von Kläranlagen relevanten CFD-Modelle in AP2.

Am ersten Versuchsstand wurde in einer Laborstudie die tomografische Erfassung von Luftblasen und deren Bewegung in der Zweiphasenströmung in Reinstwasser und einer Salzlösung und der Dreiphasenströmung in Belebtschlamm durchgeführt. Damit wurden der Durchmesser und die Aufstiegs geschwindigkeit der Blasen und der Gasgehalt bestimmt.

Der zweite Versuchsstand erlaubt die Untersuchung der freien Zweiphasenströmung in einem Tank (Volumen 3300 Liter) mit zeitlich hochauflösender Impedanzsensormesstechnik. Hierfür wurden ein spezieller, traversierbarer Tauchgittersensor und eine neuartigen Punktsondenanordnung konzipiert und aufgebaut. Mit dem Gittersensor wurde die Verteilung der Gasphase in der großräumigen Blasenströmung untersucht. Mit den Punktsonden wurde in Salztracerversuchen die Vermischung in Abhängigkeit des Begasertyps und der eingebrachten Luftmenge untersucht. In beiden Experimenten kamen zwei Standardbegasertypen der Referenzanlagen und ein neuartiger Kanülenbegaser der IWEB zum Einsatz. Die aufbereiteten Ergebnisse werden in Phase II für die Analysen in AP2 verwendet.

Im Rahmen einer Vorstudie, wurde ein prototypischer Begaser mit medizinischen Injektionskanülen, welcher auf dem neuartigen Konzept von Kanülenbegasern der IWEB basiert, videometrisch untersucht. Aus den Bilddaten wurde die initiale Blasengrößenverteilung des Kanülenbegasers bestimmt und mit Blasengrößenverteilungen von typischen Tellermembranbegasern aus der Literatur verglichen. Es hat sich gezeigt, dass bei vergleichbaren Gasdurchsätzen mit dem Kanülenbegaser bereits kleinere Sauterdurchmesser der Blasen und deutlich geringere Varianzen des Blasendurchmessers, d. h. engere Verteilungen, erzielt werden können. Bei der gleichen zugeführten Luftmenge war daher bei dem Einsatz dieses Begasertyps eine Erhöhung der effektiven Phasengrenzfläche und damit eine Effizienzsteigerung bei der Belüftung zu erwarten. In den vergleichenden Untersuchungen in den Experimenten von AP1.1-1.3 kam ein monolithischer Kanülenbegaser zum Einsatz. Mit diesem konnten die Vorteile aus den Voruntersuchungen nur teilweise bestätigt werden. Dennoch sind die Ergebnisse mit denen der Standardmembranbegaser vergleichbar. Wesentliche energetische Vorteile des Kanülenbegasers liegen in der von IWEB angeführten Reduzierung des Begaserdrucks ggü. Standardbegasern.

In AP1.4 erfolgte erstmals der Einsatz von freibeweglichen, instrumentierten Strömungsfolgern an zwei Kläranlagen. Dazu wurde das Konzept der Strömungsfolger durch eine Auftriebseinheit und einen Positionsdetektor erweitert. Die erhobenen Daten liefern Informationen über die Strömungsverhältnisse und die Vermischung im Becken und bilden veränderte Betriebsregime ab. Derzeit ist auf Grund der eindimensionalen Positionserfassung der Strömungsfolger erweitertes Apriori-Wissen über die Beckengeometrie, die Einbauten und den Betrieb einzubeziehen, um die Messdaten eindeutig interpretieren zu können. Durch spezifische Zugabestrategien der Strömungsfolger und die Erweiterung der Erfassungselektronik, wird dies im Projektfortgang verbessert. Zur Erhöhung der Zuverlässigkeit der Rückgewinnung wurde eine Anpassung der Energieversorgung der Strömungsfolger vorgenommen. Der erste Praxistest an der KA-Großschweidnitz verlief positiv.

In AP2 wurden gekoppelte Modelle für die Dreiphasenströmung entwickelt, mit welchen die hydrodynamischen Verhältnisse innerhalb des Belebungsbeckens darstellbar sind. Zum einen werden die biologischen Prozesse, zum anderen wird die Modellierung des Zusammenspiels von Gas, Flüssigkeit und Belebtschlamm in der Dreiphasenströmung abgebildet. Zudem wird das Sedimentationsverhalten des Belebtschlammes in der Flüssigphase über algebraische Gleichungen realitätsnah wiedergegeben. Die durchgeführten Simulationsergebnisse lassen den Schluss zu, dass die Sedimentation nur eine untergeordnete Rolle in belüfteten Bereichen spielt, in Randbereichen der Denitrifikationszonen aber sehr wohl einen Einfluss hat. Der TS-Gehalt kann somit innerhalb des Belebungsbeckens für den größten Bereich als homogen verteilt angesehen werden. Neben dem Sinkverhalten wird die Rheologie des Belebtschlammes als Funktion des TS-Gehaltes und der Scherrate mit Hilfe von experimentellen Literaturdaten modelliert. Auf Basis der Belebtschlammrheologie wird eine Funktion für den Stoffdurchgangskoeffizienten des Sauerstoffs erstellt und ein entsprechender Wertebereich angegeben.

Im Hinblick auf das Verhalten der Gasblasen in Belebtschlamm, werden die Ergebnisse der Röntgentomografie-Untersuchungen aus AP 1 zur weiteren Validierung bzw. Verbesserung der Modelle beitragen. Die ersten Ergebnisse zeigen deutlich das Potenzial der entwickelten Simulationsmethode auf. Die Kombination von biologischen Reaktionen, Rheologie, Stofftransport und Hydrodynamik bietet die Mög-

lichkeit, schnell und effektiv Vermischungsstrategien auszutesten. 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.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die in der Phase I erzielten experimentellen Ergebnisse werden in auf dem "7th International Symposium on Process Tomography" präsentiert. Dazu wurde ein Tagungsbeitrag mit dem Titel "Ultra-fast X-ray tomographic measurement of activated sludge aerated by membrane and monolithic spargers" eingereicht. Eine nachfolgende Veröffentlichung in einem Fachjournal ist ebenfalls vorgesehen. Zudem planen die Projektpartner IWEB und TUD die Veröffentlichung der Ergebnisse aus Simulation und Energiebilanzierung.

Fazit

Die von TUD in der ersten Projektphase 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 oder von strömungsführenden Einbauten zu analysieren. An den von HZDR realisierten zwei Versuchsaufbauten wurden hochwertige Experimente zur Erhebung von bisher nicht vorhandenen Referenzdaten zur Validierung und weiteren Verbesserung dieser Simulationsmodelle durchgeführt. Die aufbereiteten Ergebnisse stehen nun für die Validierung und Weiterentwicklung der Simulationsmodelle zu Verfügung.

Der Einsatz von instrumentierten Strömungsfolgern an der KA-Ebersbach hat erste Daten über die Strömungsverhältnisse und die Wirkung der Änderung im Rührerbetrieb gezeigt. Die konzeptionell überarbeiteten Sensorpartikel wurden an der KA-Großschweidnitz getestet. Die Rückgewinnung der Sensorpartikel verlief erfolgreich. Zudem wurden mit den Sensorpartikeln Daten während der Nitrifikationsphase aufgezeichnet. Über die gemessene Eintauchtiefe wurden die Durchmischung und die vertikale Strömungsdynamik im begasten Becken charakterisiert. Durch die weitergehende Analyse der gemessenen Inertialgrößen der Sensorpartikel in Phase II sind zusätzliche Erkenntnisse über die horizontale Strömung im Becken zu erwarten.

Ein hohes Potenzial zur Effizienzsteigerung der Belüftung konnte bereits in den Voruntersuchungen eines innovativen Begaserkonzeptes der IWEB nachgewiesen werden. Die Vergleichsmessungen mit Standardbegasern haben gezeigt, dass der neuartige Begasertyp unter realen Strömungsbedingungen mit Standardbegasern vergleichbar ist und bzgl. des Lufteintrages und der Vermischung teilweise bessere Ergebnisse liefert.

Die aufgebauten Experimente sind qualitativ besonders hochwertig, um die notwendige Güte und Relevanz der Referenzdaten zu gewährleisten. Damit waren eine umfangreiche Planung, die Erfüllung von Sicherheitsauflagen und eine aufwändige Fertigung verbunden. Dies hat bei der Umsetzung der komplexen Versuchsaufbauten in Bezug auf den ursprünglich geplanten Projektablauf zu Verzögerungen geführt. Die Projektpartner erachten das gemeinsame Vorgehen im Projekt und die aufwändigen Experimente uneingeschränkt als notwendig und zielführend zur Erreichung der vereinbarten Ziele.

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 Betrachtung der gekoppelten messtechnischen und numerischen Untersuchungen in vier Größenskalen der Versuchsanordnung vom DN100-Messrohr (Phase I) und dem Labortank (Phase I) über den geplanten Technikumstank (Phase II+III) bis hin zu den Referenzanlagen der SOWAG und des Ruhrverbandes (Phase I-III) wird nachhaltig zur Verbesserung der Modelle beitragen und die Entwicklung wirksamer Auslegungsmethoden zur Optimierung der Anlagen vorantreiben.

Inhalt

1	Verzeichnis von Bildern und Tabellen	1
2	Verzeichnis von Begriffen und Definitionen	5
3	Zusammenfassung	6
4	Einleitung	7
5	Hauptteil – Vorhabensdurchführung und -ergebnisse	10
5.1	Arbeitspaket 1: Untersuchung der Hydrodynamik mit innovativer Sensorik.....	10
5.1.1	Voruntersuchung zum Kanülenbegaser	11
5.1.2	Arbeitspaket 1.1: Laborstudien ultraschnelle Röntgentomografie – Blasenanstieg in Belebtschlamm.....	12
5.1.3	Arbeitspaket 1.2-1.3: Laborstudie im Labortank.....	25
5.1.4	Arbeitspaket 1.4: Einsatz von Strömungsfolgern zur Datenerhebung an realen Belebungsbecken	34
5.1.5	Arbeitspaket 1.5: Validierung der Rückgewinnungskonzepte der Sensorpartikel ..	43
5.1.6	Arbeitspaket 1.7: Datenanalyse und Aufbereitung der Ergebnisse	45
5.2	Arbeitspaket 2: Weiterentwicklung von gekoppelten CFD-ASMx-Modellen	45
5.2.1	Arbeitspaket 2.1: Validierung der Modelle anhand der in AP1 gewonnenen Messdaten	45
5.2.2	Arbeitspaket 2.2: Modellanpassung	57
5.2.3	Arbeitspaket 2.3: Modellerweiterung.....	59
5.2.4	Arbeitspaket 2.4: Abschließende Arbeiten, Zusammenfassung, Ergebnisbericht....	59
5.3	Arbeitspaket 3: Optimierung von Belebungsbecken	60
5.3.1	Arbeitspaket 3.1: Simulationsbasierte Bewertung neuer Belüftungs- & Vermischungsstrategien	60
5.3.2	Arbeitspaket 3.2: Datenanalyse und Aufbereitung der Ergebnisse	62
5.3.3	Arbeitspaket 3.3: Bewertung der umgesetzten Maßnahmen	62
5.3.4	Arbeitspaket 3.4: Abschließende Arbeiten, Zusammenfassung, Ergebnisbericht...	62
5.4	Arbeitspaket 4: Projektkoordination IWEB	63
5.4.1	Arbeitspaket 4.1: Mentoring, Beratung, Koordination	63
5.4.2	Arbeitspaket 4.2: Bilanzierung der vorauss. Energie- & Kostenersparnis.....	64
5.4.3	Arbeitspaket 4.3: Einsatz an Kläranlagen, begleitender Einbau Begasungs-/Dispergierelemente	66
5.4.4	Arbeitspaket 4.4: Bilanzierung der erzielten Energie- & Kostenersparnis	67
5.4.5	Arbeitspaket 4.5: Kostenanalyse, Abschlussbericht, Projektpräsentation	68
6	Fazit	70
7	Literaturverzeichnis	71
	Anhang A – Luftmengen.....	73

1 Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Abbildung 5.1: Kanülenbegaser der IWEB mit freistehenden Kanülen im Testbetrieb.....	11
Abbildung 5.2: Einzelbilder der Blasenentstehung an einer Kanüle des Kanülenbegasers. Zu sehen sind Bildausschnitte aus den Bilddaten der Hochgeschwindigkeitskamera.	12
Abbildung 5.3: Volumenspezifische Dichteverteilungen des Blasendurchmessers am Kanülenbegaser in Abhängigkeit vom spezifischen Luftdurchsatz pro Kanüle.	12
Abbildung 5.4: Aus den Dichteverteilungen des Blasendurchmessers ermittelte Mittelwerte, Sauterdurchmesser und Varianzen in Abhängigkeit vom spezifischen Gasdurchsatz für den Kanülenbegaser und die von Hasanen et al. untersuchten Membranbegaser als gemittelte Werte von 5 Membrantypen [Has06].	12
Abbildung 5.5: Verwendete Begaser beim Betriebstest am HZDR: (a) Plattenbelüfter wie an KA-Schwerte/Ruhrverband, (b) Tellerbelüfter KA-Ebersbach/SOWAG und (c) Kanülenbegaser der IWEB mit monolithischer Begaserplatte.	13
Abbildung 5.6: (a) Versuchsstand zur Laborstudie am DN100-Messrohr mit Begaserkasten (unten), DN400-Abluftkamin (links) und DN100-Messrohr (rechts) montiert am Röntgentomographen ROFEX. (b) R & I-Fließbild des Versuchsstandes für die Laborstudie am Röntgentomographen ROFEX-I.	15
Abbildung 5.7: Mikroskopische Bilder der Belebtschlammprobe aus der KA-Ebersbach.....	16
Abbildung 5.8: DN100-Messrohr während des Vorversuchs mit Belebtschlamm am Röntgentomograph ROFEX-I.....	17
Abbildung 5.9: Mittlere Grauwerte für Belebtschlamm und Wasser im Schnittbild der Röntgentomografie über der Messzeit. Die Grauwertscale liegt hier im normierten Bereich von 0,0 für die Flüssigkeit und 1,0 für Luft.	17
Abbildung 5.10: Wesentliche Schritte in der Bildverarbeitung am Beispiel mit Belebtschlamm: (a) rekonstruiertes Schnittbild, (b) Skalierung der Grauwerte anhand der gemessenen Vollreferenz und (c) Segmentierung der Gasblasen durch Schwellwertanalyse.	18
Abbildung 5.11: Ansicht der gemessenen Blasenströmung in Belebtschlamm im Längsschnitt des Messrohres für verschiedene Leerrohrgeschwindigkeiten: a) Tellerbegaser bei $u_L = 0.3$ mm/s, b) Kanülenbegaser bei $u_L = 1.3$ mm/s, c) Plattenbegaser $u_L = 4.4$ mm/s. Verschiedene rekonstruierte Blasenformen von sphärisch (oben) bis elliptisch (unten).	19
Abbildung 5.12: Gemessene Blasengrößenverteilungen basierend auf dem volumenäquivalenten Blasendurchmesser beim größten eingestellten Lufteintrag von $15 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ bezogen auf die Begaserfläche in Deionat, Salzlösung und Belebtschlamm an den vertikalen Messpositionen bei 0,4 m, 1,72 m und 2,9 m: a) Tellerbegaser, b) Plattenbegaser und c) Kanülenbegaser.	20
Abbildung 5.13: Extrahierte Sauterdurchmesser bei den eingestellten Lufteinträgen von $Q_{L,1} = 5 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$, $Q_{L,2} = 10 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ und $Q_{L,3} = 15 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ bezogen auf die Begaserfläche in Deionat (DI), Salzlösung (SL) und Belebtschlamm (BS) über der Höhe in der Flüssigkeit bei 0,4 m, 1,72 m und 2,9 m: a) Tellerbegaser, b) Plattenbegaser und c) Kanülenbegaser.	21
Abbildung 5.14: Mittlere Aufstiegsgeschwindigkeiten der Blasen bei den Höhen in der Flüssigkeit von 0,4 m, 1,72 m und 2,9 m über den eingestellten Lufteinträgen $Q_{L,1} = 5 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$, $Q_{L,2} = 10 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ und $Q_{L,3} = 15 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ bezogen auf die Begaserfläche in Deionat (DI), Salzlösung (SL) und Belebtschlamm (BS): a) Tellerbegaser, b) Plattenbegaser und c) Kanülenbegaser.	22

Abbildung 5.15: Mittlere Aufstiegs­geschwindigkeit der Blasen über dem extrahierten Sauterdurchmesser in Deionat (DI), Salzlösung (SL) und Belebtschlamm (BS): a) mittlere Messposition bei 1,72 m und b) obere Messposition bei 2,90 m. In jeder Datenreihe sind die Werte für alle drei Begaser enthalten.	22
Abbildung 5.16: Gemessene Gasgehalte α bei den Höhen in der Flüssigkeit von 0,4 m, 1,72 m und 2,9 m für die eingestellten Lufteinträge von $Q_{L,1} = 5 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$, $Q_{L,2} = 10 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ und $Q_{L,3} = 15 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ bezogen auf die Begaserfläche in Deionat (DI), Salzlösung (SL) und Belebtschlamm (BS): a) Tellerbegaser, b) Plattenbegaser und c) Kanülenbegaser.	23
Abbildung 5.17: Extrahierte Sauterdurchmesser über dem Gasdurchsatz im Messrohr in Deionat für die drei Begaser und die drei Messpositionen.	24
Abbildung 5.18: Vergleich der Begaser bei einem Gasdurchsatz im Messrohr von 0,9 NI/min für die mittlere Messposition (1,72 m) für alle Flüssigkeiten: (a) Sauterdurchmesser d_{32} , (b) mittlere Aufstiegs­geschwindigkeit der Blasen und (c) gemittelter Gasgehalt α	25
Abbildung 5.19: Labortank im Technikum des HZDR: (links) Seitenansicht und (mitte) Ansicht von oben. (Rechts) Messgestell mit Kanülenbegaser am Boden und dem installierten Gittersensor und den Punktsonden an den Lanzen für den Einsatz im Labortank.	26
Abbildung 5.20: (Links) Tauchgittersensor mit 16x16 Drahtkreuzungspunkten, einer sensitiven Querschnittsfläche von 80x80 mm bei einer Maschenweite von 5 mm. (Rechts) Eine von 48 montierten Punktsonden mit gegenüberliegenden Kreiselektroden (Durchmesser 3 mm; Abstand 12 mm) auf den im Messgestell montierten Lanzen.	27
Abbildung 5.21: Anordnung der Teller-, Platten- und Kanülenbegaser (v.l.n.r) sowie der Messpunkte des Tauchgittersensors und der Punktsonden im Messgestell in der Draufsicht und Zugabepunkt des Salztracers an der Oberfläche (* Punktsondenlanzen, \boxtimes Gittersensor, \odot Begaser, \times Tracerzugabe).	27
Abbildung 5.22: Installierte Teller-, Platten- und Kanülenbegaser (v.l.n.r) im Messgestell.	28
Abbildung 5.23: Teller-, Platten- und Kanülenbegaser (v.l.n.r) im Betrieb bei dem Lufteintrag $Q_{L,3} = 15 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$	28
Abbildung 5.24: R & I-Fließbild des Versuchsstandes für die Studie am Labortank.	29
Abbildung 5.25: Zeitverläufe des digitalen Messsignals einer Punktsonde und der digital gefilterten Signale nach Zugabe eines Salztracerpulses in den Tank (links) ohne Begasung und (rechts) mit Begasung.	31
Abbildung 5.26: Leitfähigkeitskalibrierung für einen exemplarischen Punkt­sensor bei der Konfiguration mit den Tellerbegasern.	31
Abbildung 5.27: Zeitreihe der logarithmischen Varianz einer repräsentativen Tracermessung an einer Punktsonde im begasten Zustand mit Schwellwert bei $\log\sigma^2 = -1,2$	31
Abbildung 5.28: Gemessene Gasgehalte α bei den Messpositionen des Gittersensors (M: Mitte; A: Außen) für die normierten Höhen z/H^* über dem Begaser ($H^* = H_0 - H_B$) bei den eingestellten Lufteinträgen (G1: $Q_{L,1} = 5 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$; G2: $Q_{L,2} = 10 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$; G3: $Q_{L,3} = 15 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$): a) Deionat und b) Salzlösung.	32
Abbildung 5.29: Ermittelte Werte der Mischzeit $t_{0,75}$ bei den Messpositionen der Punktsonden (PS) und Medianwerte bei einer Höhe (Med) für die normierten Höhen z/H^* über dem Begaser ($H^* = H_0 - H_B$) bei den eingestellten Lufteinträgen (G1: $Q_{L,1} = 5 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$; G2: $Q_{L,2} = 10 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$; G3: $Q_{L,3} = 15 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$) für die Begaser (TB: Tellerbegaser; PB: Plattenbegaser; KB: Kanülenbegaser): a) Messebene in der Mitte über dem Begasern und b) Messebene außen in Wandnähe.	33

Abbildung 5.30: Globale Mischzeiten $t_{0,75}$ bei den eingestellten Lufteinträgen $Q_{L,1} = 5 \text{ Nm}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$, $Q_{L,2} = 10 \text{ Nm}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ und $Q_{L,3} = 15 \text{ Nm}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ für die Tellerbegaser (TB), den Plattenbegaser (PB) und die Kanülenbegaser (KB).....	34
Abbildung 5.31: Blockschaltbild der konzeptionierten Strömungsfolger bzw. Sensorpartikel mit Basisstation zur Erfassung räumlich verteilter Parameter in Kläranlagen.	35
Abbildung 5.32: Gehäuseaufbau der Strömungsfolger: (a) Gerenderte CAD-Ansicht mit dem Hubkolben in ausgefahrener Position und dem elektrischem Linearaktor und (b) Montierte Strömungsfolger mit ein- und ausgefahrenem Hubkolben.....	36
Abbildung 5.33: Bodendeckel mit der montierten Erfassungselektronik für die Strömungsfolger: (a) Variante mit Primärbatterie und gepulster Ansteuerung für die Auftriebseinheit und (b) überarbeitete Variante mit Lithium-Polymer-Akku für den direkten Betrieb der Auftriebseinheit bei gesteigerter Antriebsleistung.	36
Abbildung 5.34: Automatische Tarierung der Strömungsfolger an der KA-Ebersbach vor der Zugabe in die Kläranlage: (Links) Abgesunkene Strömungsfolger mit eingefahrenem Hubkolben zu Beginn der Tarierung in den Probensäulen. (Rechts) Strömungsfolger nach dem langsamen Aufsteigen im quasi-auftriebsneutralen Zustand mit minimal ausgefahrenem Hubkolben.....	36
Abbildung 5.35: (Links) Ansicht der rechten Strasse der KA-Ebersbach in Fließrichtung. (Rechts) Kaskade zur Nitrifikation mit den Tellerbegasern.....	37
Abbildung 5.36: (Links) Vertikale Aufenthaltsprofile der Strömungsfolger mit der relativen Eintauchtiefe zwischen 0 (Boden) und 1 (Flüssigkeitsspiegel) und (rechts) Häufigkeitsverteilung der vertikalen Strömungsgeschwindigkeit für den Regelbetrieb des Rührwerks in der 2. Kaskade bei 60% der Drehzahl und im Testbetrieb bei maximaler Drehzahl.....	38
Abbildung 5.37: Zustandsraumdiagramm der vertikalen Bewegung der Strömungsfolger in der 2. Kaskade an der KA-Ebersbach (links) für den Regelbetrieb des Rührwerks in der 2. Kaskade bei 60% der Drehzahl und (rechts) bei maximaler Rührerdrehzahl.	38
Abbildung 5.38: Rundbecken an der KA-Großschweidnitz (SOWAG) für die Messung mit Strömungsfolgern.	39
Abbildung 5.39: Zeitreihen (a) der gemessenen normierten Eintauchtiefe und (b) der ermittelten vertikalen Geschwindigkeit eines Sensorpartikels in der Nitrifikationsphase der KA- Großschweidnitz.....	40
Abbildung 5.40: (a) Vertikales Aufenthaltsprofil und (b) Häufigkeitsverteilung der vertikalen Strömungsgeschwindigkeit eines Sensorpartikels in der Nitrifikationsphase der KA- Großschweidnitz.....	40
Abbildung 5.41: Zustandsraumdiagramm der vertikalen Bewegung eines Sensorpartikels in der Nitrifikationsphase der KA-Großschweidnitz.....	41
Abbildung 5.42: Zeitreihen der Messgrößen des Inertialsensors eines Sensorpartikels aus der Messung in der Nitrifikationsphase der KA-Großschweidnitz: (a) Beschleunigung a in Einheiten der Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, (b) Drehrate und (c) magnetische Flussdichte B	42
Abbildung 5.43: Fangnetz mit gelben Schwimmern und Sendespule am Überlauf zwischen 4. und 5. Kaskade an der KA-Ebersbach (SOWAG).	43
Abbildung 5.44: Empfangenes und konditioniertes Signal bei der Passage eines Strömungsfolgers durch die Sendespule.....	44
Abbildung 5.45: Auftriebene Strömungsfolger an der KA-Ebersbach.....	44
Abbildung 5.46: Barriere am Überlauf des Belebungsbeckens der KA-Großschweidnitz.....	45

Abbildung 5.47: Links: Implementierung mittels drei separater Euler-Phasen. Rechts: Darstellung einer Pseudo- Dreiphasenströmung mit Hilfe der „Algebraic-Slip“ Funktion.	46
Abbildung 5.48: Der bilineare Viskositätsansatz nach [Sch06].	47
Abbildung 5.49: Viskositätsmessung bei einem TS von 6,4 g/l, entnommen aus [Sch06]. Die durchgezogene Linie stellt den bilinearen Modellansatz dar. Rechts: Mit Hilfe des Excel-Solvers ermittelte Konstanten bei unterschiedlichen TS-Gehalten.	48
Abbildung 5.50: Wertebereich des implementierten Viskositätsmodells aus Gleichung 2.4.	49
Abbildung 5.51: Simulation der Viskosität im exzentrisch angeordneten Rotationsviskosimeter.	49
Abbildung 5.52: Implementierung des Modells in den CFD-Code. Vergleich der Ergebnisse des Rotationsviskosimeters bei unterschiedlichen Scherraten.	50
Abbildung 5.53: Sinkgeschwindigkeitsmessungen in Abhängigkeit des TS-Gehaltes entnommen aus [Sch06].	50
Abbildung 5.54: Schlamm Spiegelhöhe aus der Simulation der Absetzversuche bei 3 g/l TS-Gehalt, simuliert mit dem SST-Turbulenzmodell.	51
Abbildung 5.55: Vergleich der Daten von Modell und Experiment zur Sinkgeschwindigkeit.	52
Abbildung 5.56: Modellierter Stoffdurchgangskoeffizient in Abhängigkeit der Viskosität und der Blasenaufstiegsgeschwindigkeit.	53
Abbildung 5.57: Testgeometrie 1.	53
Abbildung 5.58: Links: O ₂ -Konzentrationsverteilung in reinem Wasser. Rechts: O ₂ -Konzentration in Belebtschlamm (Viskosität = 0,007 Pa s), entsprechend einem α -Wert von 0,53.	54
Abbildung 5.59: Simulierter α -Wert im Vergleich zu experimentellen Messungen.	54
Abbildung 5.60: Testgeometrie 2.	55
Abbildung 5.61: (a) Darstellung des TS-Gehalts in einer Gerinneströmung zur Klärung von Sedimentation. Transparente Bereiche kennzeichnen TS Gehalte von < 4,5 g/l. (b) Schnitt in der X-Y-Ebene: Turbulente Belüftung im vorderen Bereich, Beruhigung der Strömung im hinteren Bereich.	56
Abbildung 5.62: Stationäre Simulation der KA Schwerte. Die intransparenten Bereiche kennzeichnen Trockensubstanzkonzentrationen von >7 g/l.	56
Abbildung 5.63: a) Referenzfall: Mittlere Ammoniumbelastung, original Einstellung der Belüftung und Rezirkulation.	61
Abbildung 5.64: Vergleich der von IWEB erstellten Druckmessungen mit Kanülenbegasern mit Kanüledurchmessern von 0,20 mm, 0,12 mm und 0,09 mm und je 665 Kanülen (Luftmenge für 5 Platten) mit den Angaben zum Plattenbelüfter Typ Oxyflex MF1100 der Fa. Supratec.	65
Tabelle 5.1: Verwendete Begaser und deren Luftmengen zum vergleichbaren Lufteintrag in das DN100-Messrohr mit Bezug zum Plattenbelüfter PB.	14
Tabelle 5.2: Dichte, Oberflächenspannungen und Viskositäten der Flüssigkeiten im Vergleich.	16
Tabelle 5.3: Analytische Laborwerte des Belebtschlammes aus der KA-Ebersbach.	16
Tabelle 5.4: Mathematische Modellierung des Absetzverhaltens.	51
Tabelle 5.5: Signifikanzniveaus der Sensitivitätsanalyse.	58
Tabelle 5.6: Sensitivitätsanalyse Einflussreicher Parameter bei der Simulation der KA Schwerte.	59
Tabelle 5.7: Schema der Wirtschaftlichkeitsanalyse.	69

2 Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

ADU	Analog-Digital-Umsetzer
CFD	engl. computational fluid dynamics
CSB	chemischer Sauerstoffbedarf
OTR	Sauerstofftransportrate (engl. oxygen transfer rate)
SSOTE	spezifischer Sauerstoffausnutzungsgrad (engl. standard oxygen transfer efficiency)
SSOTR	spezifische Sauerstoffaufnahme (engl. standard oxygen transfer rate)
TS	Trockensubstanzgehalt

3 Zusammenfassung

Dies ist der Abschlussbericht der Phase I des von der *Deutsche Bundesstiftung Umwelt* geförderten Projektes mit dem **Aktenzeichen AZ30799**. Die beteiligten wissenschaftlichen Partner sind das Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), die TU Dortmund (TUD) und das Institut für Wasser & Energie Bochum GmbH (IWEB). Assoziierte Partner sind zudem die Süd-Oberlausitzer Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungsgesellschaft mbH (SOWAG) und der Ruhrverband.

In der ersten Projektphase wurden gekoppelte Simulationsmodelle für die Strömung im Belebungsbecken entwickelt, welche die Hydrodynamik der Mehrphasenströmung, die biologischen Reaktionen und den Stofftransport und deren Wechselwirkung realitätsnah abbilden. Die darauf aufbauende Simulationsmethode zeigt ein hohes Potenzial, die Wirkung neuer Vermischungs- und Belüftungsstrategien oder von strömungsführenden Einbauten zu analysieren.

Zur Validierung und Verbesserung der für die Strömungssimulation entwickelten Modelle, wurden zwei qualitativ hochwertige Experimente konzipiert und aufgebaut. Die damit erhobenen Referenzdaten werden die Grundlage für die Validierung sein. Die aufgebauten Experimente sind qualitativ besonders hochwertig, um die notwendige Güte und Relevanz der Referenzdaten zu gewährleisten.

Ein hohes Potenzial zur Effizienzsteigerung der Belüftung konnte bereits in ersten Voruntersuchungen eines innovativen Kanülenbegaserkonzeptes der IWEB nachgewiesen werden. Die Laborexperimente zeigen, dass der neuartige Begasertyp unter realen Strömungsbedingungen mit Standardbegasern vergleichbar ist und bzgl. des Lufteintrages und der Vermischung teilweise bessere Ergebnisse liefert.

Der Einsatz von instrumentierten Strömungsfolgern an der KA-Ebersbach hat erste Daten über die Strömungsverhältnisse und die Wirkung der Änderung im Rührerbetrieb gezeigt. Das Auftriebskonzept wurde weiter verbessert, um die Zuverlässigkeit der Rückgewinnung der Sensorpartikel zu erhöhen. In diesem Zuge sind eine Überarbeitung des Energiekonzeptes der Sensorpartikel und eine Erweiterung der Sensorik für die Positionserfassung erfolgt. Die erweiterten Sensorpartikel kamen an der KA-Großschweidnitz (SOWAG) erfolgreich zum Einsatz.

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 Betrachtung der gekoppelten messtechnischen und numerischen Untersuchungen in vier Größenskalen der Versuchsanordnung vom DN100-Messrohr (Phase I) und dem Labortank (Phase I) über den geplanten Technikumstank (Phase II+III) bis hin zu den Referenzanlagen der SOWAG und des Ruhrverbandes (Phase I-III) wird nachhaltig zur Verbesserung der Modelle beitragen und die Entwicklung wirksamer Auslegungsmethoden zur Optimierung der Anlagen vorantreiben.

4 Einleitung

Ausgangssituation

Belebungsbecken dienen zum Abbau von Nähr- und Fremdstoffen im Abwasser von Kläranlagen. Unter der Nutzung von Sauerstoff werden in belüfteten Zonen durch heterotrophe Bakterien Kohlenstoff- und Ammoniumverbindungen oxidiert und damit abgebaut. Diese aeroben Prozessstufen sind durch die nötige Sauerstoffzufuhr besonders energieintensiv. Die Sauerstoffzufuhr erfolgt durch spezielle Begaserelemente am Boden des Belebungsbeckens. Zur Vermischung des Belebtschlammes und zur Dispersion der Gasphase erfolgt der Einsatz von Rührwerken, der einen zusätzlichen Energieaufwand mit sich bringt. Dadurch bestimmen die in Belebungsbecken ablaufenden Prozesse maßgeblich die Leistungsfähigkeit und die Energiebilanz von Kläranlagen. Für den Großteil der in Deutschland betriebenen Kläranlagen übersteigt jedoch die aufgewendete Energie zur Durchmischung und Belüftung des Abwassers oftmals den tatsächlich notwendigen Energiebedarf. Dies wird oft durch eine nicht-optimale Auslegung bzw. Anordnung der Begasungs- und Dispergierorgane im Belebtschlammbecken hervorgerufen.

Kläranlagen sind mit durchschnittlich 20% des Stromverbrauchs Hauptstromverbraucher kommunaler Einrichtungen (Presseinformation des Umweltbundesamtes November 2008). Zwischen 60% und 80% des Gesamtenergiebedarfs einer Kläranlage fällt auf die Belüftung des Belebungsbeckens. Unabhängig von der Ausbaugröße der Kläranlage ist dementsprechend dort das mit Abstand größte Energieeinsparpotenzial zu finden [Hab08, Kol10]. Eine Senkung des Energiebedarfs dieser Verfahrensstufe ist durch technische Maßnahmen möglich und würde neben einer Verbesserung der ökonomischen Bilanz der Anlagen zu einer signifikanten Reduktion von CO₂-Emissionen und damit zur Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele Deutschlands und der EU (u. a. Senkung des Primärenergieverbrauchs um 50% bis 2050) beitragen.

Das Belebungsbecken ist das Herzstück einer Kläranlage und sorgt dafür, dass die im Abwasser befindlichen Nähr- und Fremdstoffe abgebaut werden. In den aeroben Zonen eines Belebungsbeckens wird das Abwasser belüftet. Dort werden kohlenstoff- und ammoniumhaltige Abwasserbestandteile durch heterotrophe Bakterien und dem in der Luft enthaltenen Sauerstoff oxidiert. Der Lufteintrag und die damit verbundene Hydrodynamik gewährleisten zum einen die Versorgung der Bakterien mit Sauerstoff, zum anderen den Eintrag kinetischer Energie zur Durchmischung des Abwassers. Neben der Belüftung ist es üblich, den Energieeintrag über Rührwerke zu realisieren. Diese bewirken bei einem deutlich geringeren Energieverbrauch den gleichen Impulseintrag. Dies liegt daran, dass die für den Impulseintrag erforderliche Strömungsgeschwindigkeit beim Rührwerk viel geringer ist, als beim Anheben der Wassersäule mittels Druckluft. Der verbreitete Einsatz von Rührwerksaggregaten ist jedoch oftmals ineffizient, da das Zusammenspiel zwischen Begasung und Dispersion der Gasphase nicht ausreichend in der Auslegung der Anlagen berücksichtigt wird. Oftmals bremsen die vertikal aufsteigenden Blasenvorhänge die durch die Rührwerke induzierten Strömungen zu stark und behindern den Stofftransport. Mitunter sind zusätzliche Rührwerksaggregate wegen des ohnehin hohen Energieeintrags durch die sauerstoffhaltige Druckluft sogar überflüssig, d.h. sie könnten durch eine gezielte Beeinflussung der Bewegung der aufsteigenden Luftblasen kompensiert werden [Fre10].

Die spezifische Sauerstoffaufnahme SSOTR [$\text{g O}_2/\text{m}^3 \cdot \text{m}$] und der spezifische Sauerstoffausnutzungsgrad SSOTE [$\%/ \text{m}$] sind Kennwerte in der Belüftungstechnik, die standardmäßig für die Bemessung von Belüftungssystemen angeführt werden. Beide nehmen mit steigendem Luftvolumenstrom deutlich ab. Im theoretischen Fall könnte der durch Luftbegasung zugeführte Sauerstoff vollständig durch Bakterien verstoffwechselt werden. Da sich in einem Normkubikmeter Luft knapp 300 g Sauerstoff befinden, ist dieser Wert auch als theoretisch zu verstoffwechselnder Maximalwert anzusetzen.

In der Praxis ist die Verweilzeit einer aufsteigenden Luftblase in dem umgebenden Fluid viel zu gering, um den vollständigen Stofftransport des Sauerstoffs in die Flüssigphase zu gewährleisten, sodass beim jetzigen Stand der Technik auch moderne Belüfter nur einen maximalen Sauerstoffausnutzungsgrad von ca. 10% pro Meter Einblastiefe erreichen [Wag02]. Der Ausnutzungsgrad ist dabei maßgeblich von der erzeugten Blasengröße und den Strömungsphänomenen beim Aufstieg des Blasenschwarms abhängig.

Die an den Anlagen eingesetzten Begasungselemente sind Standardkomponenten, die für einen breiten Einsatz an unterschiedlichen Kläranlagen entwickelt wurden. Die tatsächliche Wirkungs- und Funktionsweise der Begasungs- und Dispergierorgane in der jeweiligen Anlage wird nur selten eingehend untersucht. In wenigen Fällen wird ein Funktionstest in Reinwasser durchgeführt. Neben den erhöhten Kosten für diese Untersuchung ist der Mangel an geeigneten Messverfahren ein Grund für diesen Umstand.

Da die hydrodynamischen und reaktionstechnischen Prozesse im Belebtschlammbecken sehr komplex sind, wird bei der Auslegung und Bemessung eines Belebungsbeckens bislang auf Merkblätter der DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.) zurückgegriffen, deren Grundlage Erfahrungs- und Versuchswerte sind. Dennoch wird die geplante Sauerstoffzufuhr an den meisten Anlagen nicht erreicht und auch die Durchmischung bleibt oft unzureichend. Scheinbar vernachlässigbare Effekte, wie die Strömungswalzenbildung vor bzw. hinter Belüfterfeldern durch die Eingassung und die damit verbundene Verkürzung der Aufenthaltszeit der Gasblasen, werden bei der Auslegung erfahrungsgemäß nicht mit einbezogen [Fre10]. Auch Strömungswiderstände durch Einbauten, wie quer zur Strömungsrichtung installierte Verteilerrohre, werden bei der Planung und dem Betrieb oft vernachlässigt.

Im alltäglichen Betrieb wird durch Austesten von verschiedenen Belüfterbelegungen und Lastfällen versucht, eine möglichst geringe Verdichterleistung bei gleichzeitigem Einhalten einer Mindestsauerstoffkonzentration zu erreichen. Die Sauerstoffkonzentration wird dabei lokal, meist an ein oder zwei Stellen, in einem Beckenkompartiment erfasst. Dieser arbeitsintensive Ansatz wird für jede neu entwickelte und bereits bestehende Anlage verfolgt.

Trotz dieser Bemühungen können lokale Totzonen und Kurzschlussströmungen unterhalb der sichtbaren Oberfläche eines großvolumigen Beckens bisher nicht erkannt werden. Strömungsstrukturen im Becken global ausfindig zu machen, ist mit herkömmlichen messtechnischen Methoden nicht möglich. Da Bereiche unzureichender Durchmischung Stofftransportlimitierungen zur Folge haben und damit Hauptfaktor eines erhöhten Energieverbrauchs sind, führt deren Erkennen und Beseitigen durch gezielte Strömungsbeeinflussung zu einer effektiven Energieeinsparung.

Zielsetzung

Ziel des Vorhabens ist es, eine Methodik zu entwickeln, mit der die Strömungsverhältnisse im Belebungsbecken analysiert und grundlegend verbessert werden können. Erste Studien zeigen,

dass durch die Strömungsbeeinflussung der eingespeisten Luftblasen die Einsatzdauer von Rührwerksaggregaten deutlich reduziert bzw. gänzlich kompensiert werden kann [Fre10]. Das Vorhaben verfolgt einen ähnlichen Ansatz. Ein weitreichender Fortschritt bei der Optimierung der im Belebtschlammbecken ablaufenden hydrodynamischen und biochemischen Prozesse ist jedoch nur durch die Qualifikation numerischer Simulationswerkzeuge möglich. Daher ist es das Ziel, eine umfassendere Methodik zu entwickeln, mit welcher

- basierend auf numerischen Simulationen die Optimierungspotenziale der jeweiligen Anlage aufgedeckt wird,
- optimierte Anlagenkonfigurationen und Betriebsweisen bestimmt bzw. bewertet werden und
- nach ihrer Umsetzung an der konkreten Anlage mit Hilfe innovativer Sensorik messtechnisch validiert werden.

Die dafür zu entwickelnden Strategien sollen es ermöglichen, die Strömungsverhältnisse im Belebungsbecken so zu optimieren, dass eine signifikante Effizienzsteigerung des Abwasserbehandlungsprozesses erreicht wird. Der Sauerstoffausnutzungsgrad, also der Anteil an Sauerstoff der sich pro Meter Einblastiefe im Wasser löst, soll von den heutzutage maximal erreichbaren 10 % auf deutlich über 20% angehoben werden, ohne dabei einen erhöhten Energieverbrauch zu erzeugen. Dies gelingt durch eine gezielte Strömungsführung über die Variation vorhandener Rühr- und Belüfter-Anordnungen oder durch gezieltes Einbringen strömungsbeeinflussender Einbauten, wie z.B. Leitblechen, sowie einer optimierten Betriebsweise (intermittierend, kontinuierlich) der Belüfter.

Aufgabenstellung

Ein Hauptbestandteil des Vorhabens ist die Qualifizierung und Anwendung innovativer Messverfahren im Rahmen gezielter Experimente an Laboranlagen sowie an Kläranlagen der Verbundpartner. Durch die messtechnische Erfassung hydrodynamischer Parameter, wie Vermischungsgrad, Strömungsgeschwindigkeit, Phasengehalt, Blasenauftiegs- und Blasenabwärtsgeschwindigkeiten und Blasenverteilungen mit der Mehrphasenmesstechnik des HZDR werden für die Anwendung relevante Strömungs- und Prozessparameter erhoben und unmittelbar Erkenntnisse über Optimierungspotenziale realer Anlagen gewonnen.

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 werden. Hier werden messtechnisch erfasste Daten zur Kalibrierung, Anpassung und Validierung von Prozessmodellen herangezogen. Mögliche Strategien zur Veränderung am Aufbau und dem Betrieb der Begasungs- und Dispergierelemente werden durch numerische Simulationen basierend auf den Prozessmodellen untersucht (virtuelle Anlagenoptimierung durch numerische Experimente) und exemplarisch an den Anlagen, die über das IWEB zugänglich sind, getestet und bewertet.

Neben der Entwicklung und exemplarischen Anwendung der oben beschriebenen Methodik an einzelnen Kläranlagen im Rahmen des Projektes besteht ein langfristiges Ziel darin, die Anwendbarkeit der Methodik auf weitere Anlagen sicher zu stellen, um einen großen Hebeleffekt hinsichtlich der flächendeckenden Optimierung bestehender und optimalen Auslegung neuer Kläranlagen zu erreichen. Auf diese Weise wird eine umfassende und langfristige Effizienzsteigerung von Belebungsbecken möglich.

5 Hauptteil – Vorhabensdurchführung und -ergebnisse

5.1 Arbeitspaket 1: Untersuchung der Hydrodynamik mit innovativer Sensorik

Die Untersuchungen in AP1.1-1.3 erfolgten mit einer zeitlichen Verzögerung. Die hohe Auslastung des Röntgentomografen ROFEX-I und Verzögerungen bei der Fertigung des Versuchsstandes haben den Beginn der Laborstudie in AP1.1 verzögert. Hier sei angemerkt, dass unvorhergesehene arbeitsmedizinische und sicherheitstechnische Auflagen für den Laborbetrieb des Versuchsstandes mit Belebtschlamm erhöhten Aufwand bei der Planung und Ausführung hervorgerufen haben.

In Absprache mit den Projektpartnern wurde bei dem Auftakttreffen am 16.04.2014 entschieden, dass es zielführend ist, die gekoppelten messtechnischen und numerischen Untersuchungen in vier Größenskalen der Versuchsanordnung durchzuführen:

- DN100-Messrohr aus AP1.1 (Phase I)
- Labortank anstatt DN400-Säule (Phase I)
- Technikumstank (Phase II)
- Referenzanlagen der SOWAG und des Ruhrverbandes (Phase I-III)

Auf dieser Grundlage wurde weiterhin entschieden eine Änderung in AP1.2 und AP1.3 vorzunehmen. Anstatt der Untersuchung der Begaser in einer DN400-Blasensäule werden Untersuchungen in einem größeren Labortank in das Arbeitspaket aufgenommen, um den Abmessungen der Begaser der Referenzanlagen Rechnung zu tragen und freie Blasenströmungen zu erzeugen. Damit wird die hydrodynamische Untersuchung der ungezwungenen Blasenströmung in Abhängigkeit vom Begasertyp möglich, was ergänzend zu AP1.1 weiterführende Referenzdaten für AP4 liefert. Damit erfolgen erste Messungen in AP1.3 bereits im ersten Projektjahr. Hierbei liegt der Fokus auf der Untersuchung der Dispersion bzw. Vermischung und des Gasgehaltes im Wasserkörper über den Begasern. Bei der Behältergröße des Labortanks ist entgegen der geplanten Studie in der DN400-Blasensäule die Mehrphasenmesstechnik des HZDR nicht in vorhandener Form anwendbar und war anzupassen. Zur Untersuchung der Vermischung und des Gasgehaltes im gesamten Volumen des Labortanks wurden ein Tauchgittersensor und eine räumlich verteilte Punktsondenanordnung entwickelt. Beide Sensoranordnungen werden mit einer Gittersensorelektronik betrieben. Parallel wird eine Unterwasserkamera zur optischen Bewertung der Strömungsvorgänge eingesetzt. Der im Projektantrag nicht berücksichtigte Zeitaufwand für die Umrüstung eines vorhandenen Tanks und den Aufbau der Messtechnik haben zu dem verzögerten Start der Messungen in AP1.2-1.3 geführt.

Der in AP1.4-1.5 vorgesehene Einsatz von Strömungsfolgern und die Validierung von Rückgewinnungskonzepten an Belebtschlammbecken konnte im Projektverlauf vorgezogen werden. Somit liegen aus ersten Messreihen an der KA-Ebersbach und der KA-Großschweidnitz Messdaten von frei beweglichen Strömungsfolgern und Erfahrungen mit den Rückgewinnungskonzepten vor.

Die Projektpartner möchten an dieser Stelle betonen, dass die Änderungen im Ablauf keine technologischen Hürden oder eine Neuausrichtung der Projektziele bedeuten, sondern ausschließlich der verbesserten Versuchsplanung und letztlich dem Erkenntnisgewinn dienen.

5.1.1 Voruntersuchung zum Kanülenbegaser

Neben den Standardbegasern, die an den Referenzanlagen der SOWAG und des Ruhrverbandes genutzt werden, ist der vergleichende Einsatz eines neuartigen Kanülenbegasern der IWEB vorgesehen. Für einen ersten Vergleich dieses Begaserkonzeptes mit typischen Membranbegasern wurde zu Beginn des Projektes ein prototypischer Kanülenbegaser im Labor des HZDR videometrisch untersucht. Der Begaser hat eine Fläche von 0,25 m x 0,25 m mit 25 x 25 freistehenden Kanülen mit einem Kanülenaußendurchmesser von 0,4 mm bei einer Kanülenlänge von 12 mm (siehe Abbildung 5.1). Untersucht wurde die initiale Blasengrößenverteilung im Bereich des Blasendurchmessers in Abhängigkeit vom Gasdurchsatz in einer rechteckigen Blasensäule mit einer Füllhöhe von 1,5 m. Die Verteilung wurde aus Bilddaten einer Hochgeschwindigkeitskamera bei 1000 Bildern pro Sekunde bestimmt (siehe Abbildung 5.2). In den Einzelbildern wurden gleichzeitig 7 Kanülen erfasst und bei jedem eingestellten Gasdurchsatz je Kanüle 20 Einzelblasen ausgewertet.



Abbildung 5.1: Kanülenbegaser der IWEB mit freistehenden Kanülen im Testbetrieb.

Die Blasengrößenverteilungen sind in Abbildung 5.3 und die daraus ermittelten Mittelwerte, Sauterdurchmesser und Varianzen sind in Abbildung 5.4 dargestellt. Der Vergleich zu den von Hasanen et al. bestimmten Blasengrößenverteilungen von fünf verschiedenen Membranbegasern in Abbildung 5.4 zeigt, dass bei vergleichbaren Gasdurchsätzen mit diesen relativ großen Kanülen bereits kleinere Sauterdurchmesser und deutlich geringere Varianzen des Blasendurchmessers, d. h. engere Verteilungen, erzielt werden können [Has06].

Bei der gleichen zugeführten Luftmenge ist daher bei dem Einsatz dieses Begasertyps eine Erhöhung der effektiven Phasengrenzfläche und damit eine Effizienzsteigerung bei der Belüftung zu erwarten. Weitere energetische Vorteile liegen in der von IWEB angeführten Reduzierung des Begaserdrucks ggü. Standardbegasern.

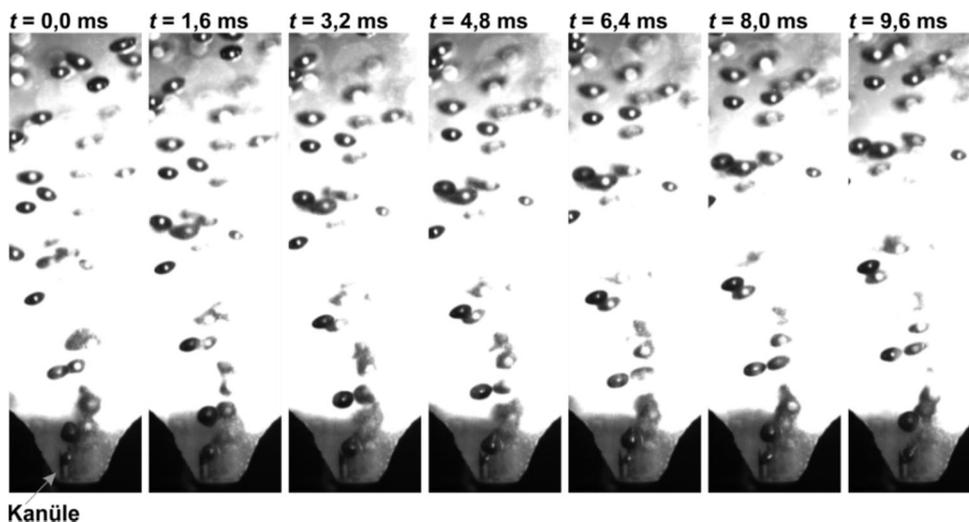


Abbildung 5.2: Einzelbilder der Blasenentstehung an einer Kanüle des Kanülenbegasers. Zu sehen sind Bildausschnitte aus den Bilddaten der Hochgeschwindigkeitskamera.

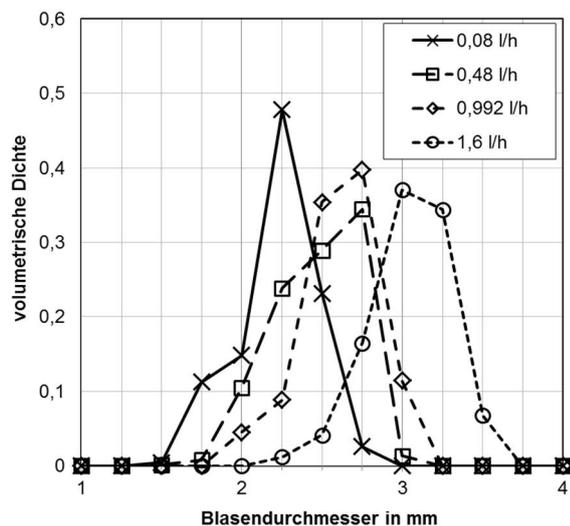


Abbildung 5.3: Volumenspezifische Dichteverteilungen des Blasendurchmessers am Kanülenbegaser in Abhängigkeit vom spezifischen Luftdurchsatz pro Kanüle.

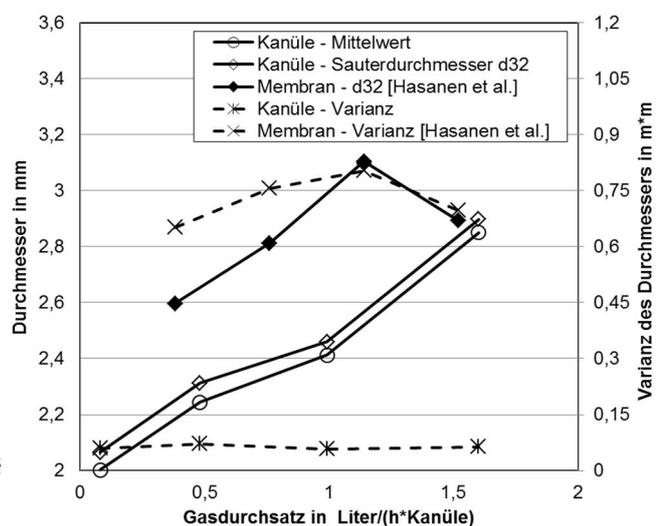


Abbildung 5.4: Aus den Dichteverteilungen des Blasendurchmessers ermittelte Mittelwerte, Sauterdurchmesser und Varianzen in Abhängigkeit vom spezifischen Gasdurchsatz für den Kanülenbegaser und die von Hasanen et al. untersuchten Membranbegaser als gemittelte Werte von 5 Membrantypen [Has06].

5.1.2 Arbeitspaket 1.1: Laborstudien ultraschnelle Röntgentomografie – Blasenanstieg in Belebtschlamm

Versuchsaufbau und Messbedingungen

Die erste Laborstudie umfasste die Untersuchung des hydrodynamischen Verhaltens von Blasenschwärmen mit unterschiedlichen Blasendurchmessern mit Hilfe der ultraschnellen Röntgentomografie in einer Blasensäule entlang der Aufstiegshöhe der Blasen.

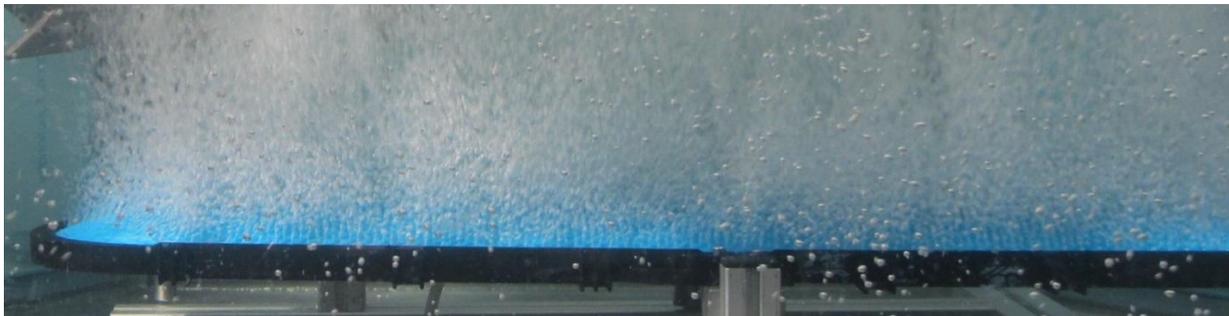
Die Zielparameter der Untersuchung sind:

- Blasenauftiegsgeschwindigkeiten
- Blasengrößenverteilungen
- Blasenkoaleszenz
- Gasbeladung über Höhe in der Flüssigkeitsäule
- Interaktion mit Flocken

Die Messungen wurden für das Referenzsystem Reinstwasser, Salzlösung und Belebtschlamm durchgeführt. Die Begasung erfolgte mit zwei Standardbegasern der Referenzanlagen KA-Schwerte und KA-Ebersbach und einem neuartigen Kanülenbegaser der IWEB (Abbildung 5.5 und Tabelle 5.1). Zur Einspeisung von Einzelblasen wird ein Blasengenerator des HZDR eingesetzt. Ausgewählte Ergebnisse der Laborstudie wurden in Form eines Tagungsbeitrages veröffentlicht [Som15]. Eine umfassende Journalpublikation folgt in 2015.

Der für die Laborstudie entwickelte Versuchsstand ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Die Begaser werden einzeln im unteren Begaserkasten betrieben. Das DN100-Messrohr, welches tomografiert wird, ragt bis über die Membran bzw. die Platte des Begasern in den Belüfterkasten hinein. Damit wird eine nahezu nicht-invasive Einleitung der Blasen in das Messrohr erreicht. Die überschüssigen Blasen werden über das Leitblech ohne zusätzlichen Druckverlust in den DN400-Abluftkamin abgeleitet.

(a)



(b)



(c)

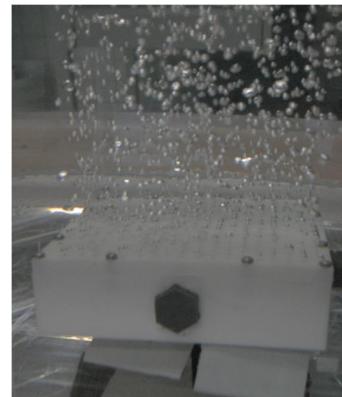


Abbildung 5.5: Verwendete Begaser beim Betriebstest am HZDR: (a) Plattenbelüfter wie an KA-Schwerte/Ruhrverband, (b) Tellerbelüfter KA-Ebersbach/SOWAG und (c) Kanülenbegaser der IWEB mit monolithischer Begaserplatte.

Die Instrumentierung des Versuchsstandes ist Abbildung 5.6 zu entnehmen. Der Röntgentomograph ROFEX-I kann entlang des Messrohres vertikal verfahren werden, um verschiedene Messebenen anzufahren. Zur Überwachung der Versuchsbedingungen werden Messfühler für den eingespeisten Luftdurchsatz, den Relativdruck, den Differenzdruck am Begaser, die Temperatur und die Abluftmenge im DN100-Messrohr verwendet. Der Blasengenerator wird über eine separate Druckluftzufuhr gespeist und verfügt über eine Drucküberwachung, um konstante Blasengrößen zu gewährleisten.

Die Luftmenge für die Begaser wurde anhand der Betriebsparameter der Referenzanlagen festgelegt. Der Plattenbegaser wird an der KA Schwerte verwendet und hat die im Vergleich größte Begaserfläche von 0,2 m². Daher dient er als Referenzbegaser. Der Plattenbelüfter wird real im Bereich der Luftmenge von 1000...3000 l/h betrieben. Um bei dem dem Teller- und dem Kanülenbegaser vergleichbare Luftmengen in das Messrohr einzuspeisen, sind die Luftmengen basierend auf der Luftmenge vom Plattenbelüfter mit dem Flächenverhältnis von Querschnitt des Messrohres zu Begaserfläche skaliert (Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1: Verwendete Begaser und deren Luftmengen zum vergleichbaren Luftertrag in das DN100-Messrohr mit Bezug zum Plattenbelüfter PB.

Begaser						DN100-Messrohr an ROFEX-I mit Referenzfläche 0,0064 m ²		
	Typ	Hersteller	Fläche	Q _{min}	Q _{max}	Flächenverhältnis zum Begaser	Q _{min;DN100}	Q _{max;DN100}
			m ²	L/h	L/h		L/h	L/h
EK	Einzelblase	HZDR	-	-	-	-	-	-
PB	OXYFLEX MF1100	Supratec®	0,20	1000,0	3000,0	31,4	31,8	95,4
TB	Silver Series II 2300B	Sanitaire®	0,04	190,1	570,2	6,0		
KB	Kanülenbegaser	IWEB	0,01	45,0	135,0	1,4		

Die Messungen mit deionisiertem Wasser dienen als Referenz für das Verhalten der Gasphase in einer partikel- und tensidfreien Flüssigphase. Die Na₂SO₄-Lösung ermöglicht weitestgehend die Trennung der Einflüsse der Oberflächenspannung auf die Koaleszens und der Feststoffpartikel/Schlammflocken auf die Gasblasen. Es wurde kommunaler Belebtschlamm mit Stickstoffeliminierung von der KA-Ebersbach (SOWAG) untersucht. Die am HZDR gemessenen Oberflächenspannungen von Schlammproben dieser Anlagen sind in Tabelle 5.2 dokumentiert. Die Konzentration der Salzlösung wird so eingestellt, dass eine auf diesen Belebtschlamm angepasste Oberflächenspannung erreicht wird. Mit einer Konzentration der Na₂SO₄-Lösung von 0,5 g/l wird die Oberflächenspannung auf 70 mN/m eingestellt. Trotz der geringen Abweichungen der Oberflächenspannung ist bei der Na₂SO₄-Lösung ggü. Deionat ein deutlich reduziertes Koaleszenzverhalten zu erwarten [Zlo82].

Die für die Messreihe verwendete Belebtschlammprobe aus der Kläranlage Ebersbach wurde in zertifizierten Laboren bzgl. der Struktur, der Tensidbelastung und des Fließverhaltens analysiert. Die mikroskopische Analyse ergab das Ergebnis, dass lockere Flocken, Pflanzenfaserreste, kaum Fadenbakterien, Opercularien (gestielte Wimperntiere) in Anzahl, daneben frei-

schwimmende Ciliaten (Paramecium, Glaucoma, Lionotus, Euglypha) im Belebtschlamm vorhanden waren (siehe Abbildung 5.7). Weitere Laborwerte sind in Tabelle 5.3 enthalten. Das Fließverhalten ist scherviskos und die Fließkurve hat nach Ostwald-de-Waele einen Fließindex von $m = 0,631$ und einen Konsistenzfaktor $K = 13,982$ (siehe Tabelle 5.2).

Das gesamte Messprogramm am Röntgentomografen umfasste

- drei Begasertypen und die Einzelblaseneinspeisung
- bei je drei Gasdurchsätzen
- in drei Flüssigkeiten und
- an drei vertikalen Messpositionen am DN100-Messrohr.

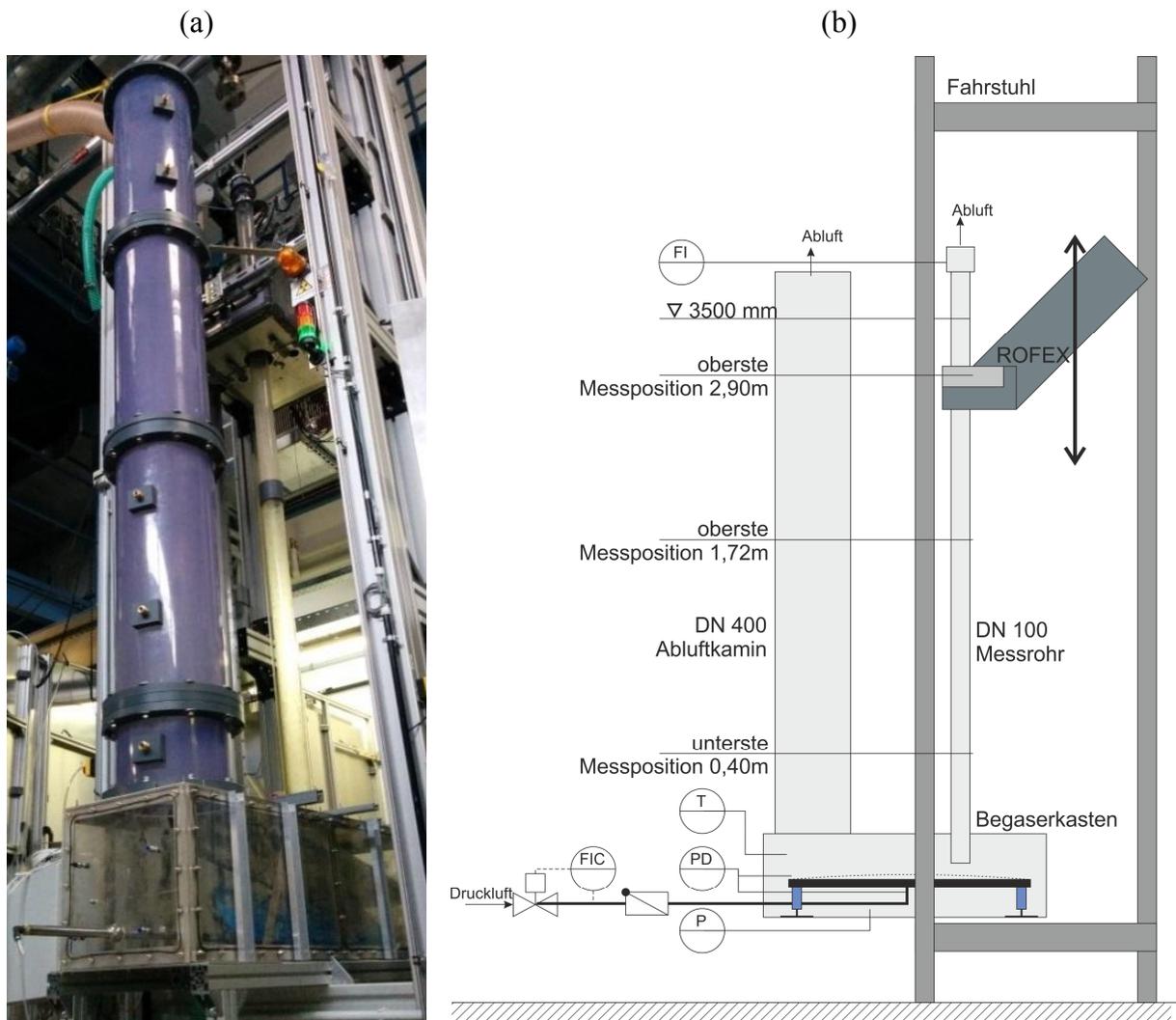


Abbildung 5.6: (a) Versuchsaufbau zur Laborstudie am DN100-Messrohr mit Begaserkasten (unten), DN400-Abluftkamin (links) und DN100-Messrohr (rechts) montiert am Röntgentomografen ROFEX. (b) R & I-Fließbild des Versuchsaufbaus für die Laborstudie am Röntgentomografen ROFEX-I.

Tabelle 5.2: Dichte, Oberflächenspannungen und Viskositäten der Flüssigkeiten im Vergleich.

Flüssigphase	Dichte in g/cm ³	Oberflächenspannung in mN/m	dyn. Viskosität in mPas
Deionat	0,998	73,1	1,002
Na ₂ SO ₄ -Lösung (c = 0,5 g/l)	1,001	69,9	1,010
Belebtschlamm KA-Ebersbach	0,999	71,2	13,982 $\gamma^{-0,369}$

Tabelle 5.3: Analytische Laborwerte des Belebtschlammes aus der KA-Ebersbach.

Parameter	Vorschrift	Ergebnis
Schlammindex ml/g	DIN EN 1472-1 S10	277
Schlamm-trockenmasse in g/l	DIN 38414 S2	3,0
Schlammvolumenanteil in ml/l	DIN EN 1472-1 S10	840
MBAS in mg/l	DIN EN 903 (H24)	1,0
Kationische Tenside in mg/l	Küvettest	0,78
BiAS in mg/l	Küvettest	1,0

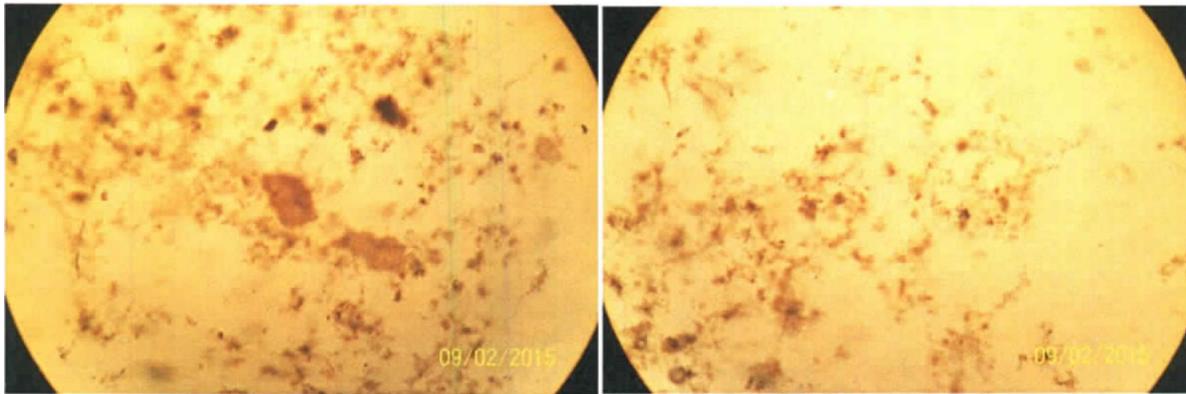


Abbildung 5.7: Mikroskopische Bilder der Belebtschlammprobe aus der KA-Ebersbach.

Einfluss der Schlammflocken auf die Bildgebung mit Röntgentomografie

Eine eindeutige Messung der Blasen im Belebtschlamm ist nur möglich, wenn die Schwächung der Röntgenstrahlung durch die Schlammflocken ggü. der Wasserphase vernachlässigbar gering ist. Nur so können die Blasen korrekt erkannt werden. Dazu wurde am Röntgentomografen eine Voruntersuchung mit realem Belebtschlamm in einer begasten DN100-Säule durchgeführt (Abbildung 5.8). Der Lufteintrag erfolgte mit einem feinperligen Begaserstein. Als Maß für die Schwächung wird der mittlere Grauwert im aufgezeichneten Schnittbild genutzt. In Abbildung 5.9 sind die Grauwerte für Belebtschlamm und Wasser über der Messzeit dargestellt. Zwischen dem unbegasten, suspendierten Belebtschlamm und reinem Wasser ist kein Unterschied im Grauwert vorhanden. Erst die Präsenz von Luftblasen führt zu erkennbaren Veränderungen des mittleren Grauwertes für den Belebtschlamm. Weiterhin sind die Grauwerte über der Messzeit stabil. Demnach ist kein störender Einfluss der Schlammflocken auf die Erfassung der Schwächungswerte zu erwarten.



Abbildung 5.8: DN100-Messrohr während des Vorversuchs mit Belebtschlamm am Röntgentomograph ROFEX-I.

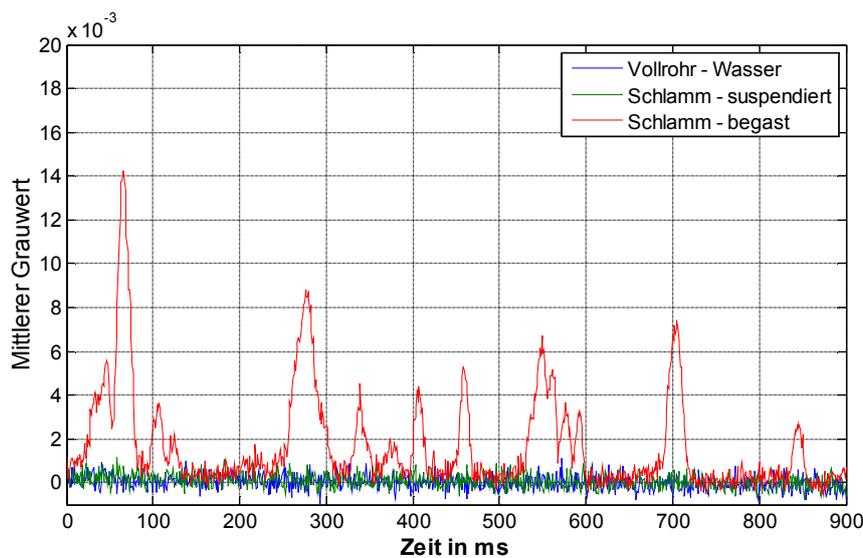


Abbildung 5.9: Mittlere Grauwerte für Belebtschlamm und Wasser im Schnittbild der Röntgentomografie über der Messzeit. Die Grauwertscale liegt hier im normierten Bereich von 0,0 für die Flüssigkeit und 1,0 für Luft.

Verarbeitung der Tomografiedaten

Die Messwerte der Projektionen der tomografischen Messung repräsentieren integrale Intensitäten der Röntgenstrahlung. Zur Berechnung jedes Querschnittsbildes aus den Projektionen wird zunächst die gefilterte Rückprojektion angewendet [Kak87]. Die so rekonstruierten Querschnittsbilder haben jedoch keine vergleichbaren Absolutwerte (Abbildung 5.10a). Daher werden diese mit Hilfe der gemessenen Vollreferenz zwischen Luft und Flüssigkeit auf den Wertebereich 0...100 skaliert (Abbildung 5.10b). Die Segmentierung der Gasblasen erfolgt durch eine Schwellwertanalyse nach Banowski et al. (Abbildung 5.10c), wobei die zusammenhängenden Pixel jeder Blase bzw. der Flüssigphase die Grauwerte 100 und 0 erhalten [Ban13].

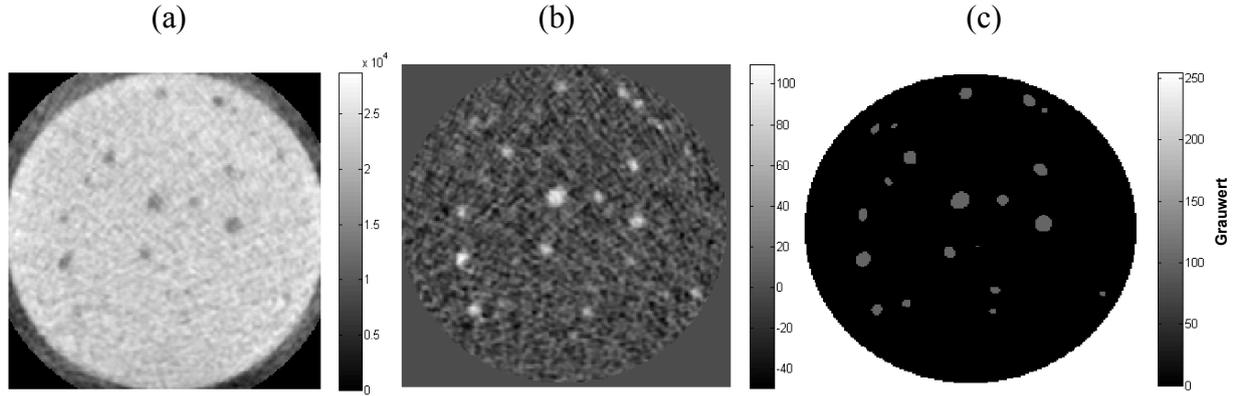


Abbildung 5.10: Wesentliche Schritte in der Bildverarbeitung am Beispiel mit Belebtschlamm: (a) rekonstruiertes Schnittbild, (b) Skalierung der Grauwerte anhand der gemessenen Vollreferenz und (c) Segmentierung der Gasblasen durch Schwellwertanalyse.

Basierend auf den segmentierten Schnittbildern erfolgt die Extraktion der Zielparame-
ter, nämlich der Aufstiegsgeschwindigkeit, der Blasengrößenverteilung und des Gasgehalts, nach Lucas
et al. [Luc10]. Die Bestimmung der mittleren Aufstiegsgeschwindigkeit der Blasen basiert auf
der Tomografie an den zwei axial versetzten Messebenen. Zunächst werden mit der Kreuzkor-
relation die Ähnlichkeiten in den zeitlich aufeinander folgenden Schnittbildern der beiden To-
mografieebenen und die zugehörigen Zeitdifferenzen bestimmt. Die mittlere Aufstiegsges-
chwindigkeit v der Blasen wird dann mit dem bekannten Ebenenabstand berechnet. So kann
den agglomerierten Pixeln jeder Blase ein Volumen zugeordnet werden. Der äquivalente Bla-
sendurchmesser $d_{V,i}$ wird für jede segmentierte Blase i aus dem äquivalenten Volumen V_i einer
Kugel gemäß

$$d_{V,i} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_i}{\pi}} \quad (5.1)$$

berechnet. Der Sauterdurchmesser d_{32} wird aus der Anzahl N_k der Blasen in der Klasse k mit
dem äquivalenten Blasendurchmesser $d_{V,k}$ gemäß

$$d_{32} = \frac{\sum_{k=1}^n N_k d_{V,k}^3}{\sum_{k=1}^n N_k d_{V,k}^2} \quad (5.2)$$

berechnet. Der gemittelte Gasgehalt α wird aus dem gesamten Volumen V_1 der Luft und dem
Volumen V_f berechnet:

$$\alpha = \frac{V_1}{V_1 + V_f} \quad (5.3)$$

Strömungsregime

Das Strömungsregime ist entsprechend der Definition von Shah et al. eine homogene Blasen-
strömung mit einer gleichmäßigen Verteilung von annähernd gleichgroßen Blasen über dem
Querschnitt [Sha82]. Dieses Regime bildet sich bei einer Leerrohrgeschwindigkeit von weniger
als 0,05 m/s aus. Die maximale Leerrohrgeschwindigkeit in den Versuchen war $u_L = 0,005$ m/s.
Drei Längsschnitte der gemessenen Blasenströmung in Belebtschlamm sind in Abbildung 5.11
zu sehen. Der äquivalente Durchmesser der Blasen liegt im Bereich 1...6 mm. Weiterhin sind

in Abbildung 5.11d einzelne aus den Querschnittsbildern extrahierte Blasen mit unterschiedlichen Formen abgebildet, die von sphärisch bis elliptisch variieren.

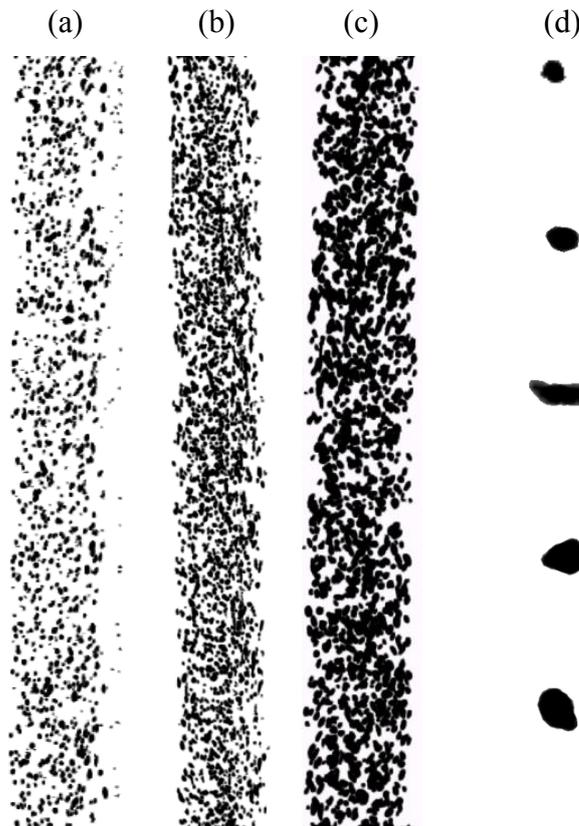


Abbildung 5.11: Ansicht der gemessenen Blasenströmung in Belebtschlamm im Längsschnitt des Messrohres für verschiedene Leerrohrgeschwindigkeiten: a) Tellerbegaser bei $u_L = 0.3$ mm/s, b) Kanülenbegaser bei $u_L = 1.3$ mm/s, c) Plattenbegaser $u_L = 4.4$ mm/s. Verschiedene rekonstruierte Blasenformen von sphärisch (oben) bis elliptisch (unten).

Blasengrößenverteilung und Sauterdurchmesser

Die extrahierten Blasengrößenverteilungen zeigen Abhängigkeiten von der Flüssigkeit und der Höhe in der Flüssigkeitssäule auf, welche auf das Koaleszenzverhalten der Blasen zurückzuführen sind (siehe Abbildung 5.12). Dabei ist zu beachten, dass die Blasengrößen auf die hydrostatischen Druckverhältnisse an der mittleren Messposition bei 1,72 m umgerechnet wurden. Der Einfluss der Expansion aufsteigender Blasen ist somit bereits kompensiert. In Deionat weisen die Verteilungen an den oberen Positionen (1,72 m und 2,9 m) eine deutliche Verschiebung zu größeren Blasendurchmessern und eine Verbreiterung ggü. der unteren Position auf. Dies deutet auf eine zunehmende Koaleszenz der Blasen mit zunehmender Steighöhe hin. In Salzlösung ist das Koaleszenzverhalten bereits deutlich reduziert. Die Verbreiterung der Verteilung mit zunehmender Höhe ist geringer als in Deionat, jedoch ist eine Verschiebung zu größeren Durchmessern zu erkennen. In Belebtschlamm ist insbesondere von der mittleren zur oberen Position nur eine geringe Veränderung der Verteilung vorhanden. Das Koaleszenzverhalten ist hier also noch geringer als in der Salzlösung.

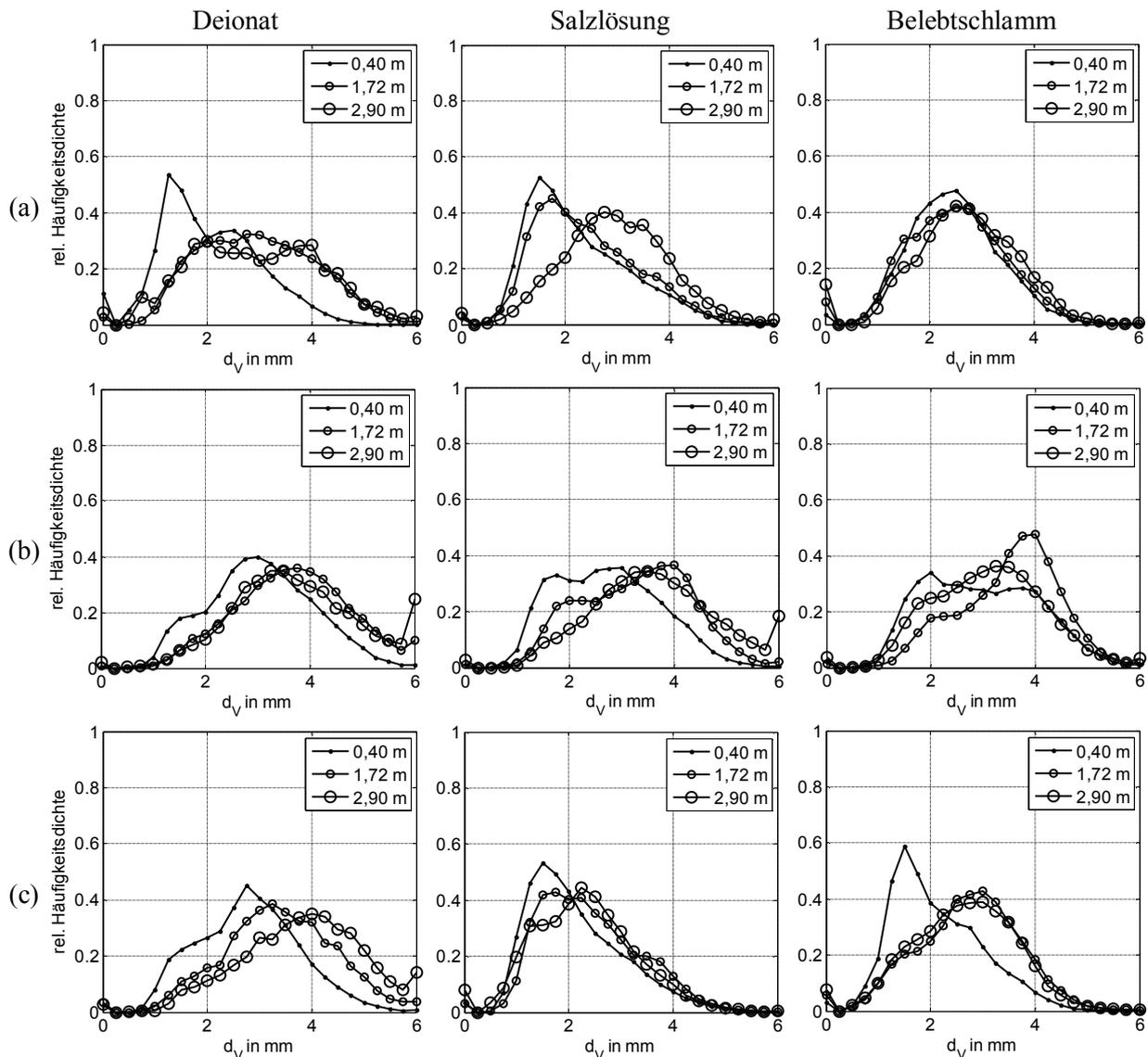


Abbildung 5.12: Gemessene Blasengrößenverteilungen basierend auf dem volumenäquivalenten Blasendurchmesser beim größten eingestellten Lufteintrag von $15 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ bezogen auf die Begaserfläche in Deionat, Salzlösung und Belebtschlamm an den vertikalen Messpositionen bei 0,4 m, 1,72 m und 2,9 m: a) Tellerbegaser, b) Plattenbegaser und c) Kanülenbegaser.

Dies spiegelt sich auch in den Werten des extrahierten Sauterdurchmessers wieder. Diese sind in Abbildung 5.13 dargestellt. Die durch Koaleszenz bedingte Zunahme der Blasengröße über der Höhe ist deutlich erkennbar. Die Kurven für die Salzlösung sowie den Belebtschlamm liegen im Vergleich über denen vom Deionat und weisen auch einen geringeren Anstieg auf. Dies deutet auf ein gehemmtes Koaleszenzverhalten der Blasen in der Salzlösung und dem Belebtschlamm hin. Weiterhin ist eine Zunahme der Blasengröße mit steigendem Gasdurchsatz durch den Begaser ersichtlicher.

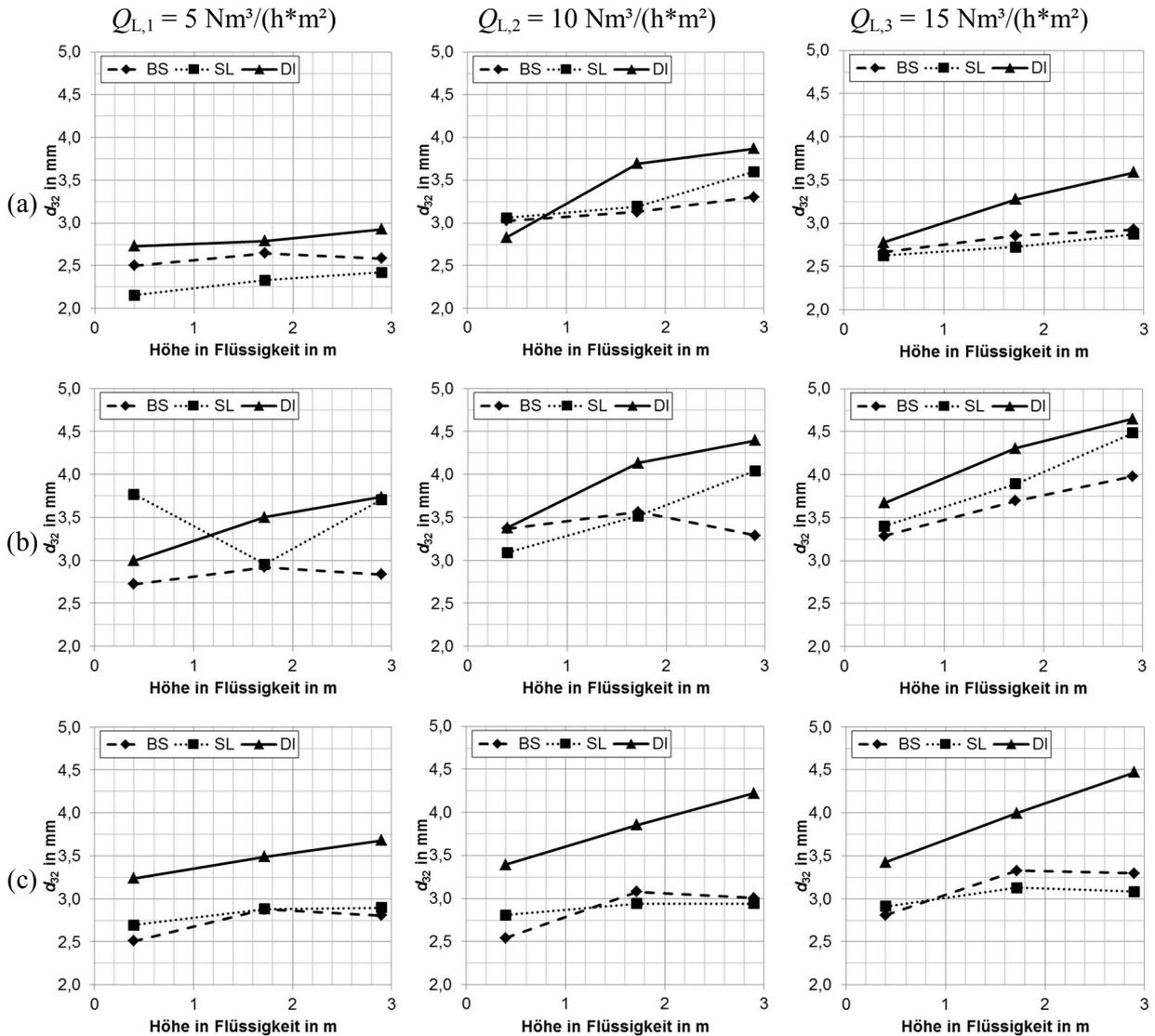


Abbildung 5.13: Extrahierte Sauterdurchmesser bei den eingestellten Luftenträgen von $Q_{L,1} = 5 \text{ Nm}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$, $Q_{L,2} = 10 \text{ Nm}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ und $Q_{L,3} = 15 \text{ Nm}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ bezogen auf die Begaserfläche in Deionat (DI), Salzlösung (SL) und Belebtschlamm (BS) über der Höhe in der Flüssigkeit bei 0,4 m, 1,72 m und 2,9 m: a) Tellerbegaser, b) Plattenbegaser und c) Kanülenbegaser.

Aufstiegsgeschwindigkeit

Die mittlere Aufstiegsgeschwindigkeit der Blasen ist in Abbildung 5.14 für alle Begaser und die gemessenen Höhen in der Flüssigkeit über dem eingestellten Luftentrag dargestellt. Die Werte liegen bei allen Messungen im Bereich $0,15 < v < 0,3 \text{ m/s}$. In Deionat liegen höhere Werte als in Salzlösung und Belebtschlamm vor, was an den tendenziell größeren Blasen liegt. Die höheren Werte an der unteren Messposition deuten auf eine noch nicht vollständig eingelaufene Strömung im Messrohr in dieser Höhe hin. Von der mittleren zu oberen Messposition ist eine Zunahme der Aufstiegsgeschwindigkeit erkennbar, welche mit der Zunahme des Sauterdurchmessers zusammenhängt. Die Abhängigkeit der Aufstiegsgeschwindigkeit vom Sauterdurchmesser wird in Abbildung 5.15 noch deutlicher. Hier ist der Anstieg der Aufstiegsgeschwindigkeit von der mittleren zur oberen Position auch erkennbar. Weiterhin zeigt sich insbesondere an der oberen Messposition die Korrelation der Aufstiegsgeschwindigkeit mit dem Sauterdurchmesser.

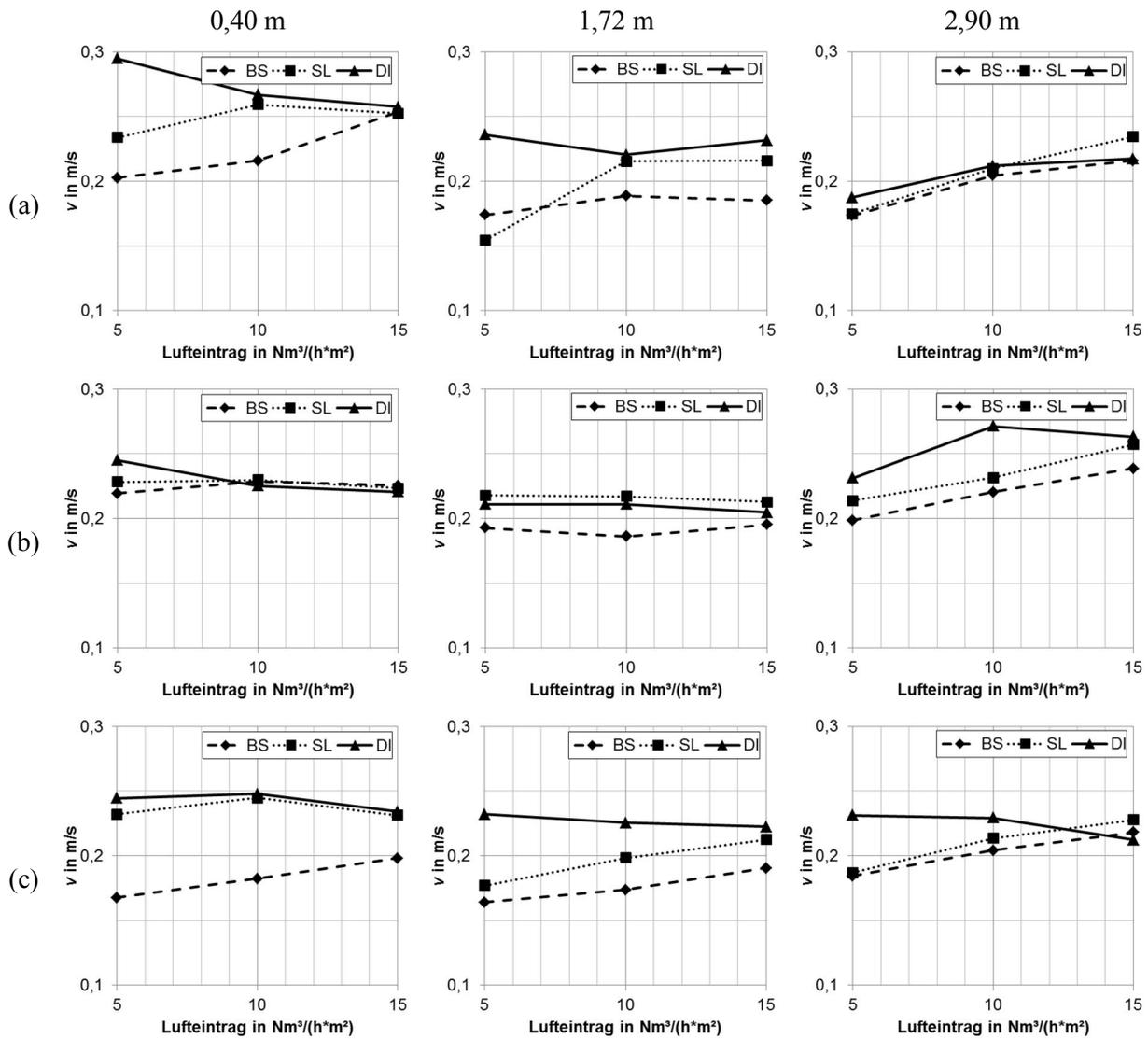


Abbildung 5.14: Mittlere Aufstiegsgeschwindigkeiten der Blasen bei den Höhen in der Flüssigkeit von 0,4 m, 1,72 m und 2,9 m über den eingestellten Luftbeiträgen $Q_{L,1} = 5 \text{ Nm}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$, $Q_{L,2} = 10 \text{ Nm}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ und $Q_{L,3} = 15 \text{ Nm}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ bezogen auf die Begaserfläche in Deionat (DI), Salzlösung (SL) und Belebtschlamm (BS): a) Tellerbegaser, b) Plattenbegaser und c) Kanülenbegaser.

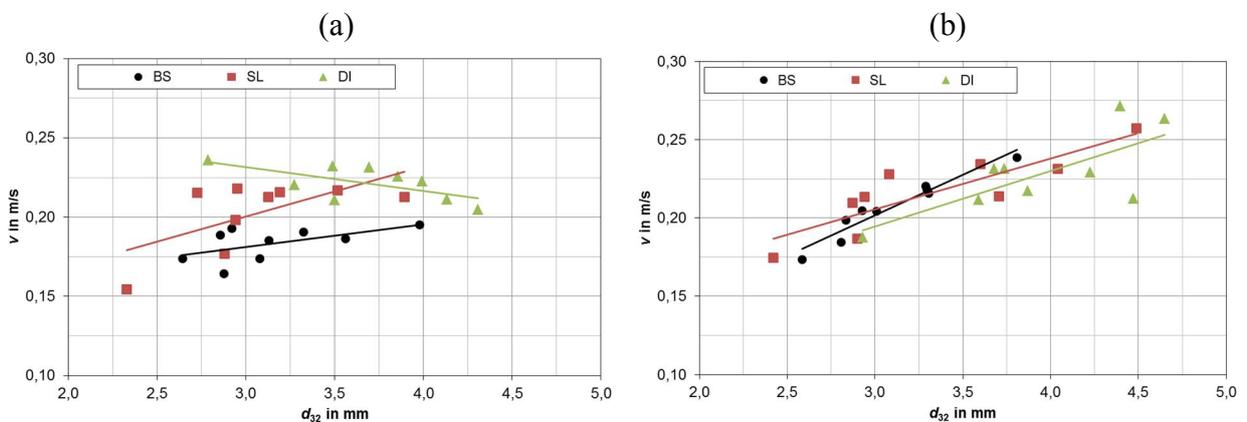


Abbildung 5.15: Mittlere Aufstiegsgeschwindigkeit der Blasen über dem extrahierten Sauterdurchmesser in Deionat (DI), Salzlösung (SL) und Belebtschlamm (BS): a) mittlere Messposition bei 1,72 m und b) obere Messposition bei 2,90 m. In jeder Datenreihe sind die Werte für alle drei Begaser enthalten.

Gasgehalt

Die gemessenen Werte des Gasgehaltes sind Abbildung 5.16 für alle Begaser und die eingestellten Lufterträge über der Höhe in der Flüssigkeit dargestellt. Der Gasgehalt nimmt über der Höhe in der Flüssigkeit und mit dem Luftertrag zu. Weiterhin besteht eine Tendenz zu geringeren Gasgehalten in Deionat, was durch die größeren Blasen und die höhere Aufstiegs geschwindigkeit bedingt ist.

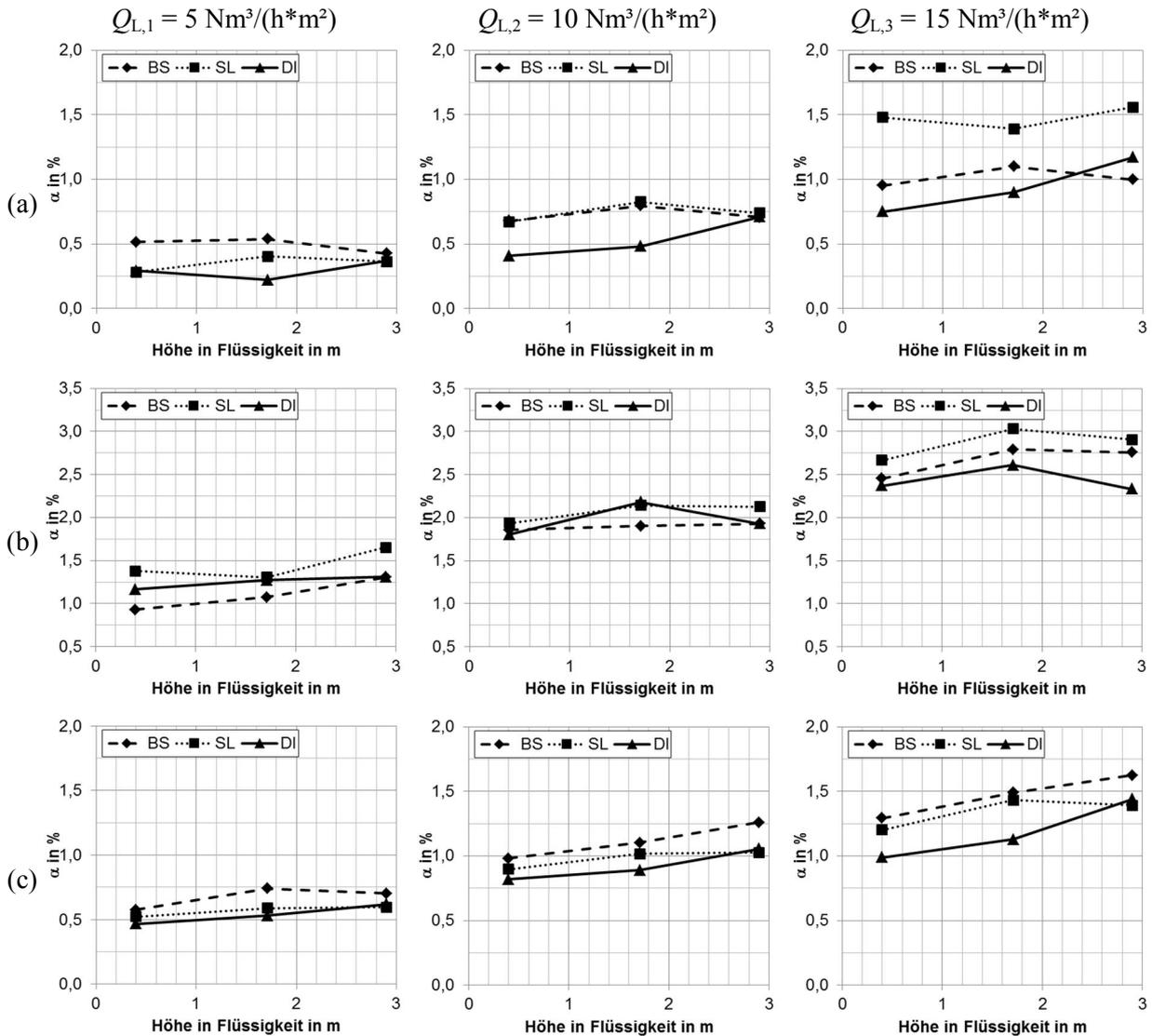


Abbildung 5.16: Gemessene Gasgehalte α bei den Höhen in der Flüssigkeit von 0,4 m, 1,72 m und 2,9 m für die eingestellten Lufterträge von $Q_{L,1} = 5 \text{ Nm}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$, $Q_{L,2} = 10 \text{ Nm}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ und $Q_{L,3} = 15 \text{ Nm}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ bezogen auf die Begaserfläche in Deionat (DI), Salzlösung (SL) und Belebtschlamm (BS): a) Tellerbegaser, b) Plattenbegaser und c) Kanülenbegaser.

Vergleich der Begaser

Mit den eingestellten Lufterträgen $Q_{L,1-3}$ der Begaser sollten für das Messrohr vergleichbare Lufterträge, nämlich nominell 0,5 NI/min, 1,0 NI/min und 1,5 NI/min, erzielt werden. Die Analyse der Messdaten hat gezeigt, dass dies nur bei dem Kanülenbegaser annähernd erreich-

bar war. Bei dem Teller- und dem Plattenbegaser gibt es deutliche Abweichungen zwischen den tatsächlichen Gasdurchsätzen im Messrohr. Abbildung 5.17 verdeutlicht dies. Bei dem Tellerbegaser wurde in das Messrohr weniger und bei dem Plattenbegaser deutlich mehr Luft in das Messrohr eingetragen. Um dennoch einen Vergleich zwischen den Begasern zu führen, wurden die extrahierten Parameter Sauterdurchmesser, Aufstiegsgeschwindigkeit der Blasen und Gasgehalt bei der mittleren Messposition (1,72 m) für den Gasdurchsatz von 0,9 NI/min berechnet (siehe Abbildung 5.18). Die mit den Begasern erzielten Sauterdurchmesser weisen in Deionat größere Abweichungen auf. Der Plattenbelüfter hat hier einen deutlich geringeren Sauterdurchmesser von 3,49 mm und der Kanülenbegaser den größten Sauterdurchmesser von 3,83 mm. In Salzlösung und Belebtschlamm sind die Unterschiede wesentlich geringer. Der Plattenbelüfter zeigt die kleinsten Werte von 3,05 mm bzw. 2,96 mm und der Tellerbelüfter die größten Werte von 3,19 mm bzw. 3,13 mm. Der Kanülenbegaser liegt mit den Werten von 3,07 mm bzw. 3,09 mm zwischen den beiden anderen Begasern.

Die Aufstiegsgeschwindigkeit der Blasen ist für die Begaser in Deionat am größten und in Belebtschlamm am kleinsten. Für Deionat, Salzlösung und Belebtschlamm sind die Unterschiede zwischen den Begasern sehr gering und die Werte liegen in den engen Bereichen 0,22...0,24 m/s, 0,20...0,21 m/s bzw. 0,17...0,19 m/s.

Die Werte des gemittelten Gasgehaltes sind in Deionat für den Plattenbelüfter mit 0,125% am größten und für den Kanülenbegaser mit 0,087% am geringsten. Mit der Verringerung der Blasengröße in Salzlösung treten bei allen Begasern größere Gasgehalte von ca. 0,14% auf, wobei die Unterschiede zwischen den Begasern sehr gering sind. In Belebtschlamm sind nahezu keine Unterschiede erkennbar und die Werte liegen bei ca. 0,11%.

Hinsichtlich des Lufteintrages und der Hydrodynamik der Blasen sind die untersuchten Begaserelemente demnach als gleichwertig zu betrachten.

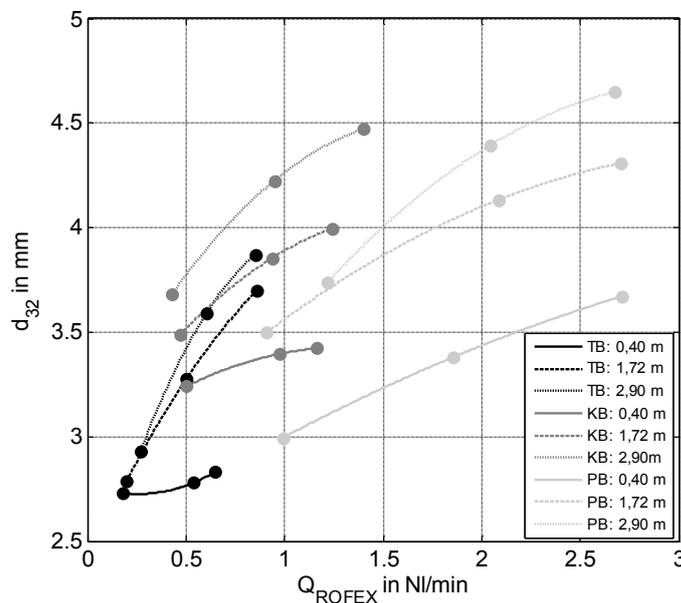


Abbildung 5.17: Extrahierte Sauterdurchmesser über dem Gasdurchsatz im Messrohr in Deionat für die drei Begaser und die drei Messpositionen.

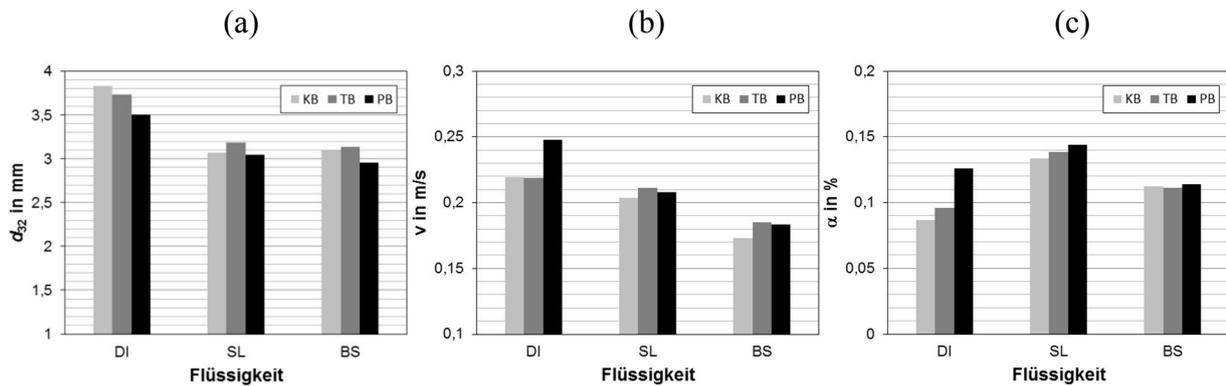


Abbildung 5.18: Vergleich der Begaser bei einem Gasdurchsatz im Messrohr von 0,9 NI/min für die mittlere Messposition (1,72 m) für alle Flüssigkeiten: (a) Sauterdurchmesser d_{32} , (b) mittlere Aufstiegsgeschwindigkeit der Blasen und (c) gemittelter Gasgehalt α .

Einzelblasenversuche

Die Experimente mit Einzelblaseneinspeisung in Belebtschlamm haben gezeigt, dass der von den injizierten Einzelblasen eingebrachte Impuls zu gering ist, um die erhöhten Widerstandskräfte im Belebtschlamm zu überwinden. Die Einzelblasen werden bis zum Stillstand abgebremst. Teilweise koaleszieren die Blasen zu Großblasen, welche dann weiter aufsteigen. Daher waren in Belebtschlamm keine Messungen mit Einzelblasen definierter Größe möglich. Für detaillierte Analysen von Einzelblasen in AP2-3 sind jedoch Messdaten aus Einzelblasenversuchen in Deionat und Salzlösung vorhanden, die bei Bedarf in Phase II hinzugezogen werden können. Weiterhin ist die Einbindung dieser Messdaten in die geplante Journalpublikation vorgesehen.

5.1.3 Arbeitspaket 1.2-1.3: Laborstudie im Labortank

Versuchsaufbau und Messbedingungen

Die Studie im Labortank umfasst die Untersuchung des hydrodynamischen Verhaltens in den ungezwungenen Auftriebsstrahlen der Blasen im Wasserkörper über den Begasern mit räumlich verteilten Mehrphasensensoren des HZDR. Die Zielparameter der Untersuchung sind:

- Verteilung des Gasgehaltes
- Mischzeit zur Charakterisierung der Vermischung durch die Begasung

Die Messungen des Gasgehaltes wurden vergleichend für das Referenzsystem Reinstwasser und einer Salzlösung (wie in AP1.1; Na_2SO_4 ; $c = 0,5 \text{ g/l}$) durchgeführt. Die Mischzeituntersuchungen wurden in Deionat durchgeführt. Salztracerversuche waren auf Grund der hohen Grundleitfähigkeit in der Salzlösung messtechnisch nicht realisierbar. Die Begasung erfolgte mit den in AP1.1 verwendeten Begasertypen.

Der vorhandene Labortank hat ein Behältervolumen von $3,3 \text{ m}^3$ und wird bei einer Füllhöhe H_0 von 2,6 m betrieben (siehe Abbildung 5.19). Zur Messung der Zielparameter werden eigens für das Projekt entwickelte Punktsonden und ein Tauchgittersensor eingesetzt (Abbildung 5.20). Beide Sensoren basieren auf dem Prinzip einer räumlich verteilten Leitfähigkeitsmessung und sind somit sensitiv ggü. Gasblasen und Konzentrationsgradienten von Salztracern. Die Anord-

nung der 16 x 16 Drahtelektroden des Tauchgittersensors ermöglicht die Erfassung der aufsteigenden Gasblasen, worüber der lokale Gasgehalt bestimmt wird. Die Punktsonden bestehen aus gegenüberliegenden Kreiselektroden. Das lokale Messvolumen dieser Elektrodenanordnung ist größer als das eines einzelnen Kreuzungspunktes im Gittersensor. Somit ist jeder Messwert einer Punktsonde für einen größeren Bereich der Blasenströmung repräsentativ. Die Sensoren sind zusammen mit dem Begaser an einem Messgestell fixiert, welches in den Labortank getaucht wird (Abbildung 5.19). Insgesamt werden 48 Punktsonden an 8 Lanzen in 6 festen Höhenpositionen verwendet. Diese Konfiguration realisiert eine ortsfeste, aber räumlich verteilte Erfassung von Leitfähigkeitssignalen im Behältervolumen. Der Tauchgittersensor wird an 6 Messpositionen zwischen den Punktsonden traversiert.



Abbildung 5.19: Labortank im Technikum des HZDR: (links) Seitenansicht und (mitte) Ansicht von oben. (Rechts) Messgestell mit Kanülenbegaser am Boden und dem installierten Gittersensor und den Punktsonden an den Lanzen für den Einsatz im Labortank.

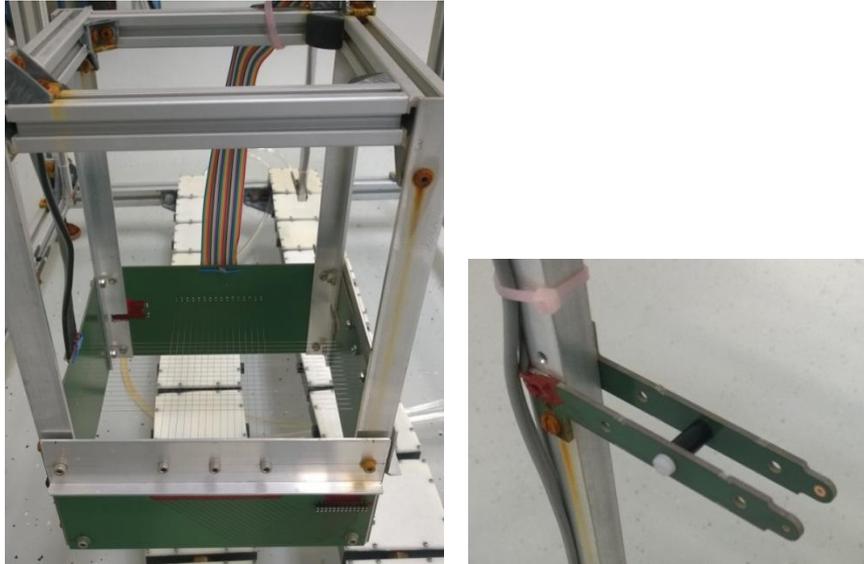


Abbildung 5.20: (Links) Tauchgittersensor mit 16x16 Drahtkreuzungspunkten, einer sensitiven Querschnittsfläche von 80x80 mm bei einer Maschenweite von 5 mm. (Rechts) Eine von 48 montierten Punktsonden mit gegenüberliegenden Kreiselektroden (Durchmesser 3 mm; Abstand 12 mm) auf den im Messgestell montierten Lanzen.

Die Anordnung der Begaser und der Sensoren ist Abbildung 5.21 zu entnehmen. Wie in AP1.1 dient der Plattenbegaser (Oxyflex MF1100) aufgrund der Begaserfläche von 0,2 m² als Referenzbegaser. Die für die Messungen relevante Luftmenge liegt also im Bereich 1...3 Nm³/h bzw. 5...15 Nm³/(h*m²) bezogen auf die Begaserfläche. Zur Vergleichbarkeit der Messergebnisse wird im Labortank die Anzahl der Teller- und Kanülenbegaser auf die Begaserfläche des Plattenbegasers angepasst. Mit den Angaben der Begaserflächen aus Tabelle 5.1 kommen ein Plattenbegaser, 5 Tellerbegaser und 22 Kanülenbegaser zum Einsatz. Abbildung 5.22 zeigt die installierten Begaser im Messgestell. Abbildung 5.23 zeigt die Begaser beim höchsten Luftertrag im Tank. Der Gittersensor wird an zwei Positionen in x-Richtung und je drei Positionen in z-Richtung betrieben. Von den Punktsondenlanzen werden 4 über den Begasern und 4 im unbegasten Bereich der Rückströmung in wandnähe genutzt. Die Membranoberfläche der Begaser befindet sich im Betrieb auf eine Höhe $H_B = 0,17$ m. Der Salztracerbolus wurde an der Flüssigkeitsoberfläche im Zentrum zugegeben. Als Bolus wurde ein Volumen von 1000 mL Na₂SO₄-Lösung mit einer Konzentration von 1,4 g/L verwendet.

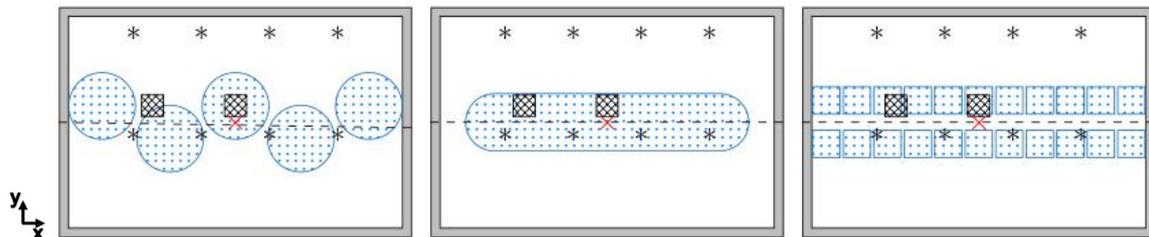


Abbildung 5.21: Anordnung der Teller-, Platten- und Kanülenbegaser (v.l.n.r) sowie der Messpunkte des Tauchgittersensors und der Punktsonden im Messgestell in der Draufsicht und Zugabepunkt des Salztracers an der Oberfläche (* Punktsondenlanzen, ☒ Gittersensor, ⊙ Begaser, × Tracerzugabe).



Abbildung 5.22: Installierte Teller-, Platten- und Kanülenbegaser (v.l.n.r) im Messgestell.



Abbildung 5.23: Teller-, Platten- und Kanülenbegaser (v.l.n.r) im Betrieb bei dem Lufteintrag $Q_{L,3} = 15 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$.

Die Instrumentierung des Versuchszustandes ist Abbildung 5.24 zu entnehmen. Die Punktsonden und der Tauchgittersensor werden an einer zeitlich hochauflösenden Gittersensorelektronik bei einer Abtastrate $f_{\text{mess}} = 250 \text{ Hz}$ betrieben. Dies ist notwendig, um den dynamischen Zweiphasenprozess hinreichend genau auflösen zu können. Der Lufteintrag wird mit einem Gasdurchsatzregler und einem Relativdruckaufnehmer überwacht.

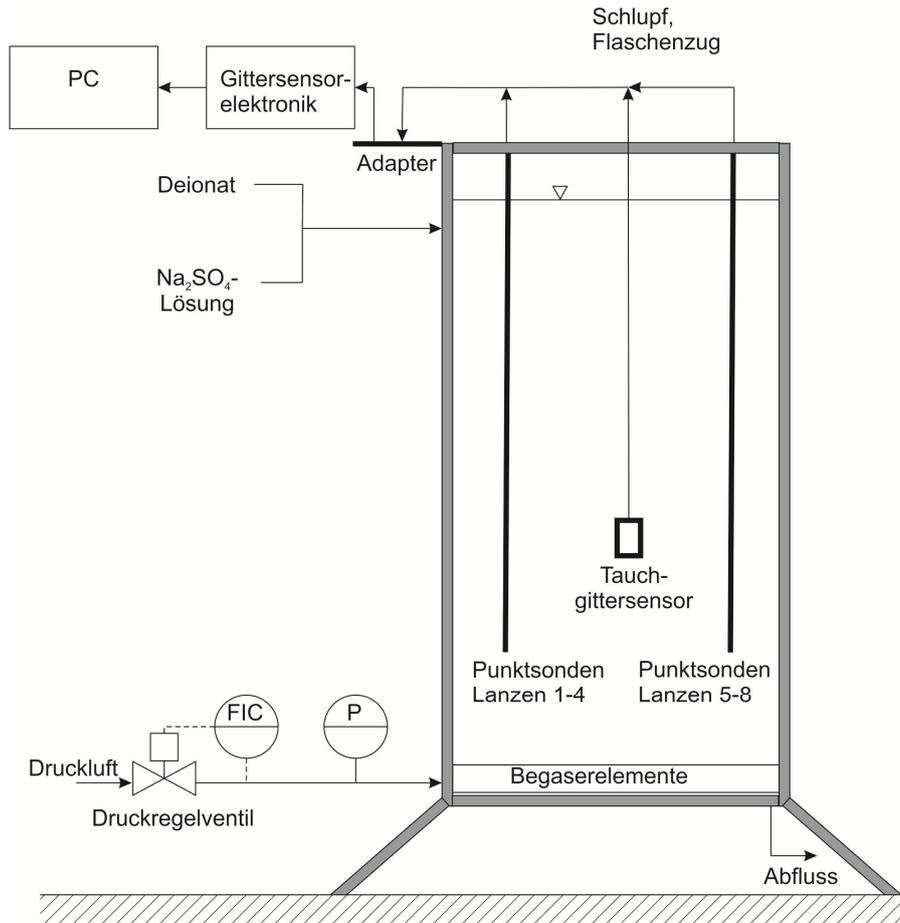


Abbildung 5.24: R & I-Fließbild des Versuchsstandes für die Studie am Labortank.

Signalverarbeitung für Gasgehalt und Mischzeit

Zur Berechnung des Gasgehaltes $\alpha(i,j,k)$ an den Kreuzungspunkten des Gittersensors ($i = 1 \dots N; j = 1 \dots N; N = 16$) für den Zeitschritt k ist eine Kalibriermessung der Spannungswerte $U_f(i,j)$ der jeweiligen Flüssigphase im unbegasteten Zustand nötig. Die Werte $U_f(i,j)$ sind zeitliche Mittelwerte und repräsentieren einen Gasgehalt von 0%. Aus den Messwerten des Gittersensors $U(i,j,k)$ aus der Strömung ergibt sich der momentane Gasgehalt im Querschnitt des Gittersensors zu

$$\alpha(i,j,k) = 1 - \frac{U(i,j,k)}{U_f(i,j)}. \quad (5.4)$$

Für die Berechnung des querschnittsgemittelten Gasgehaltes ist eine Wichtung der Werte an den Kreuzungspunkten mit den Wichtungsfaktoren $w_{i,j}$, welche die Anteile der sensitiven Fläche jedes Kreuzpunktes am Gesamtquerschnitt des Gittersensor darstellen, gemäß

$$\bar{\alpha}(k) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha(i,j,k) \cdot w_{i,j}. \quad (5.5)$$

nötig. Der gemittelte Gasgehalt ist der zeitliche Mittelwert aus dem querschnittsgemittelten Gasgehalt.

Zur Berechnung der Mischzeit sind eine Filterung der Messsignale der Punktsonden und eine Leitfähigkeitskalibrierung notwendig. Die Signale der Punktsonden sind sensitiv ggü. der Salztracerkonzentration und den aufsteigenden Luftblasen. Dabei ist erscheinend das Signal der Luftblasen im Messsignal als Fluktuation mit einer höheren Frequenz als das Tracersignal. Dies zeigt sich in den gemessenen Tracerkurven in Abbildung 5.25. Zur Extraktion des Tracersignals aus dem Messsignal wird ein gleitender Quartilsfilter angewendet. Dieser digitale Filter ermittelt aus einem Fenster von 5000 Messwerten den oberen Quartilswert der zugrundeliegenden Verteilung der digitalen Messwerte und wird gleitend auf das Messsignal jeder Punktsonde angewendet. Die gefilterten Signale einer Punktsonde sind in Abbildung 5.25 dargestellt.

Die Leitfähigkeitskalibrierung erfolgte im unbegasteten Zustand für den zu erwartenden Bereich der Leitfähigkeit $0 \dots 30 \mu\text{S}/\text{cm}$ während der Tracerversuche. Mit den individuellen Leitfähigkeitskennlinien der Punktsonden wurden die digitalen Messsignale der Tracerversuche in Leitfähigkeitssignale umgerechnet, welche proportional zur Salzkonzentration sind.

Das normierte Konzentrationssignal C' ergibt sich aus dem kalibrierten Leitfähigkeitssignal σ_i mit dem Startwert σ_0 vor der Tracerzugabe und dem Wert σ_∞ der vollständigen Vermischung des Tracers zu:

$$C' = \frac{\sigma_i - \sigma_0}{\sigma_\infty - \sigma_0}. \quad (5.6)$$

Die Mischzeit an jeder Punktsonde wird anhand der logarithmischen Varianz des Konzentrationssignals

$$\log \sigma^2 = \log(C' - 1)^2. \quad (5.7)$$

bestimmt. Dies ermöglicht die Untersuchung der räumlichen Mischwirkung der Begaser. Für diese Versuche wurde die Mischzeit $t_{0,75}$ für das Erreichen der Vermischung zu 75% gewählt. Dies war erforderlich, um eine robuste Mischzeitbestimmung bei den verbleibenden Einflüssen der aufsteigenden Blasenschwärme im eingeschwungenen Zeitbereich des gefilterten Tracersignals zu ermöglichen. Die Bedingung für die 75%-Mischzeit ist $\log \sigma^2 \leq -1,2$ für $t > t_{0,75}$. Ein beispielhafter Signalverlauf ist in Abbildung 5.27 dargestellt. Für eine eindimensionale Darstellung wurden die Daten weiterhin reduziert. Bei den Messebenen der Punktsonden im begasteten Bereich (mitte) und im unbegasteten Bereich (außen) wurde aus den Mischzeiten an 4 Punktsonden in einer Höhe und je 2 Wiederholungsversuchen der Medianwert bestimmt.

Weiterhin wurde aus den Konzentrationssignalen C'_i der $n = 48$ Punktsonden mit $i = 1 \dots n$ die kombinierte logarithmische Varianz

$$\log \sigma_g^2 = \log \frac{1}{n} \sum_i (C'_i - 1)^2 \quad (5.8)$$

und daraus die globale Mischzeit berechnet.

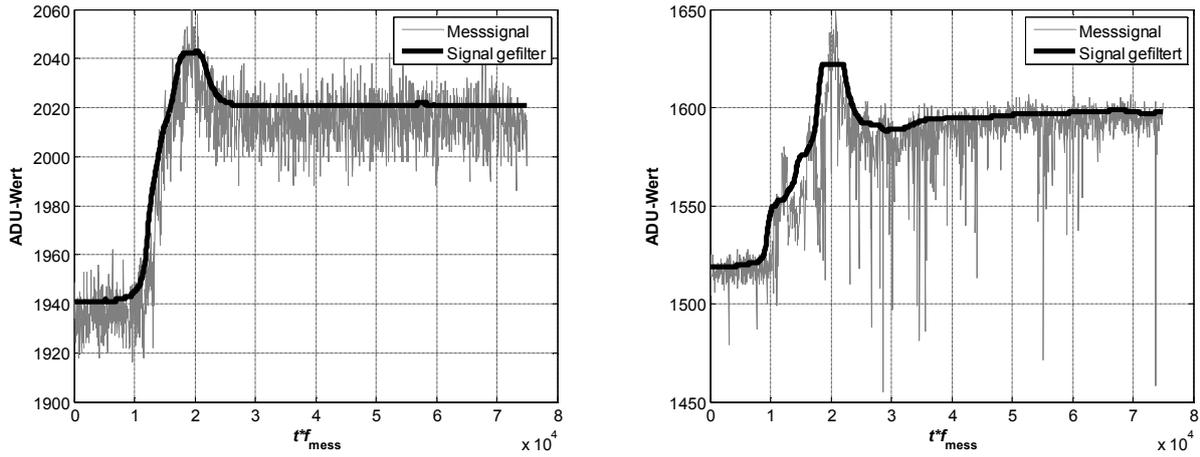


Abbildung 5.25: Zeitverläufe des digitalen Messsignals einer Punktsonde und der digital gefilterten Signale nach Zugabe eines Salztracerpulses in den Tank (links) ohne Begasung und (rechts) mit Begasung.

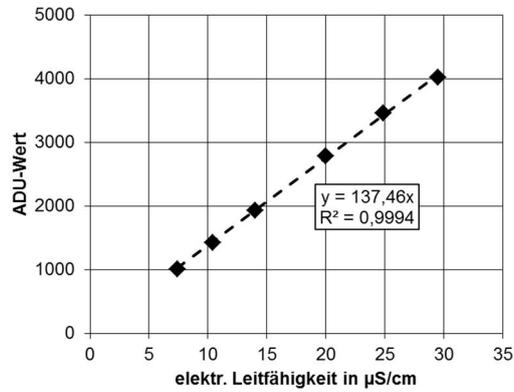


Abbildung 5.26: Leitfähigkeitskalibrierung für einen exemplarischen Punktsensor bei der Konfiguration mit den Tellerbegasern.

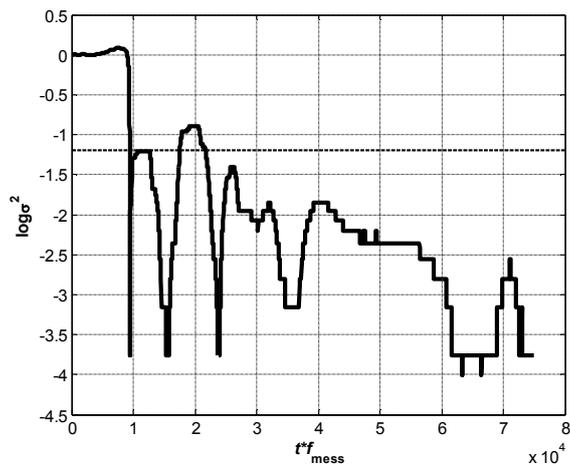


Abbildung 5.27: Zeitreihe der logarithmischen Varianz einer repräsentativen Tracermessung an einer Punktsonde im begasten Zustand mit Schwellwert bei $\log \sigma^2 = -1,2$.

Gasgehaltsverteilung

Die gemessenen vertikalen Gasgehaltsverteilungen über der normierten Höhe bei $z/H^* = 0,07$, $z/H^* = 0,37$ und $z/H^* = 0,68$ sind in Abbildung 5.28 dargestellt. Die Werte nehmen erwartungsgemäß mit dem Lufteintrag durch die Begaser in den Wasserkörper zu. An den Messpositionen des Gittersensors in der Mitte zeigt sich über der Höhe eine weitere Tendenz abnehmender Gasgehalte. Dies deutet auf eine Expansion der Auftriebsstrahlen der Begaser mit zunehmender Aufstiegshöhe der Blasen hin. Bei den Tellerbegasern ist in Salzlösung ggü. Deionat anhand der erhöhten Werte an der Position Außen bei $z/H^* = 0,37$ eine Verengung des Auftriebsstrahles der Blasen erkennbar. Dieser Unterschied ist mit der höheren Koaleszenzrate und damit tendenziell größeren Blasen in Deionat erklärbar. Die Werte für den Plattenbegaser zeigen diese Tendenzen nicht eindeutig, was auf größere Instabilitäten in der durch den Auftriebsstrahl erzeugten Strömung hindeutet. Wie bei den Tellerbegasern zeigt sich bei den Kanülenbegasern in Deionat ggü. Salzlösung Außen bei $z/H^* = 0,37$ durch die geringeren Gasgehalte eine Verbreiterung des Auftriebsstrahles der Blasen. In Salzlösung erscheint der Auftriebsstrahl etwas enger als in Deionat. Bei den Kanülenbegasern sind die Werte im Vergleich mit den anderen Begasern geringer, da der Auftriebsstrahl eine größere Querschnittsfläche einnimmt.

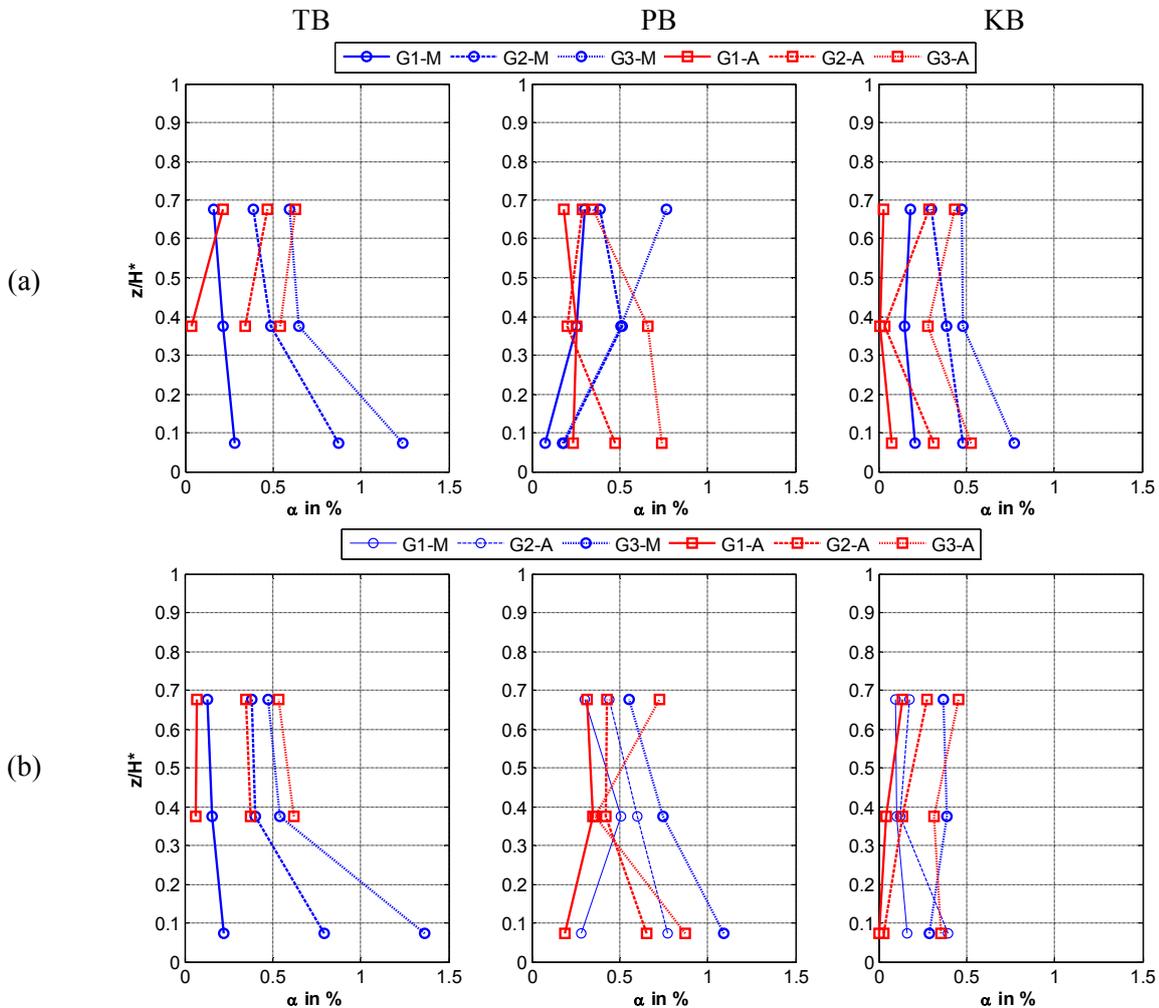


Abbildung 5.28: Gemessene Gasgehalte α bei den Messpositionen des Gittersensors (M: Mitte; A: Außen) für die normierten Höhen z/H^* über dem Begaser ($H^* = H_0 - H_B$) bei den eingestellten Lufteinträgen (G1: $Q_{L,1} = 5 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$; G2: $Q_{L,2} = 10 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$; G3: $Q_{L,3} = 15 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$): a) Deionat und b) Salzlösung.

Vertikale Mischzeitprofile

In Abbildung 5.29 sind die aus den Messsignalen der Punktsonden ermittelten Mischzeiten und die Medianwerte der Mischzeit in einer Höhe über der Höhe als vertikale Mischzeitprofile in der Mitte über den Begasern und außen in Wandnähe dargestellt. Die Profile zeigen, dass mit einem steigenden Luftertrag in den Labortank auch geringere Mischzeiten erreicht werden. Mit den beiden höheren Lufterträgen ist eine deutlich bessere Vermischung erreichbar. Dies zeigt sich durch den Abstand zu den höheren Werten der Mischzeit für den geringsten Luftertrag. Die Unterschiede zwischen dem mittleren und dem höchsten Luftertrag sind hingegen gering. Bei den Tellerbegasern ist bei dem geringsten Luftertrag in Wandnähe für $z/H^* < 0,4$ eine lokale Erhöhung der Werte zu sehen. Die Anordnung der Tellerbegaser führt unter diesen Bedingungen zu einer verminderten Vermischung. Bei den Kanülenbegasern werden hingegen bereits für den geringsten Luftertrag Werte erreicht, die nahe an den mit den höheren Lufterträgen erreichten Werten liegen.

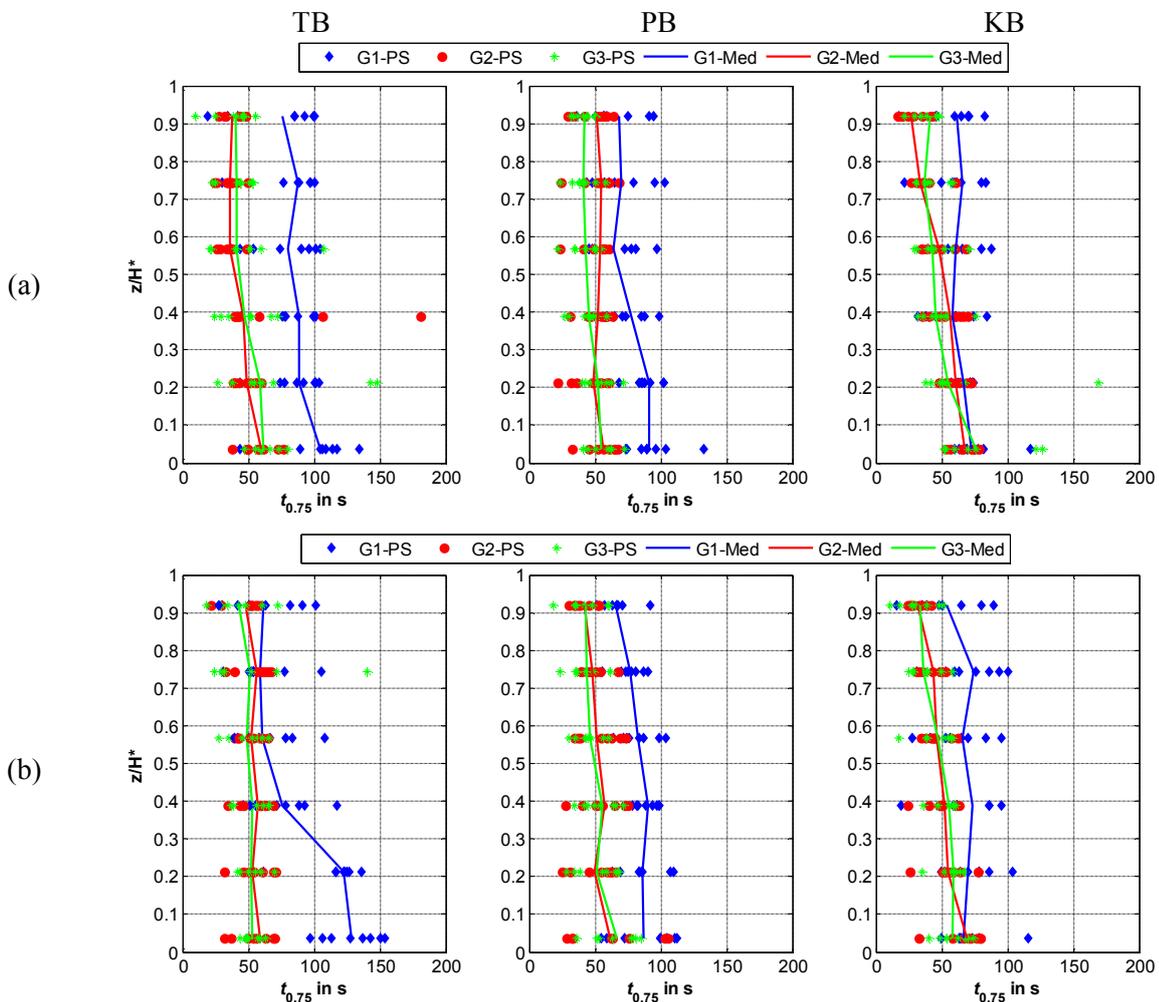


Abbildung 5.29: Ermittelte Werte der Mischzeit $t_{0,75}$ bei den Messpositionen der Punktsonden (PS) und Medianwerte bei einer Höhe (Med) für die normierten Höhen z/H^* über dem Begaser ($H^* = H_0 - H_B$) bei den eingestellten Lufterträgen (G1: $Q_{L,1} = 5 \text{ Nm}^3/(\text{h}^*\text{m}^2)$; G2: $Q_{L,2} = 10 \text{ Nm}^3/(\text{h}^*\text{m}^2)$; G3: $Q_{L,3} = 15 \text{ Nm}^3/(\text{h}^*\text{m}^2)$) für die Begaser (TB: Tellerbegaser; PB: Plattenbegaser; KB: Kanülenbegaser): a) Messebene in der Mitte über den Begasern und b) Messebene außen in Wandnähe.

Globale Mischzeit

Die Werte der globalen Mischzeit sind in Abbildung 5.30 dargestellt. Die größten Unterschiede in den Werten sind zwischen den Begasern bei dem geringsten Lufteintrag aufgetreten. Mit den Kanülenbegasern wurden die geringste Mischzeit und damit die beste Vermischung erreicht. Hingegen ist bei den Tellerbegasern die größte Mischzeit gemessen worden, was sich bereits in den vertikalen Mischzeitprofilen gezeigt hat. Bei den höheren Lufteinträgen sind die Werte aller Begasertypen deutlich geringer und weisen nur sehr geringe Unterschiede auf. Mit der Steigerung vom mittleren zum höchsten Lufteintrag ist keine signifikante Verbesserung der Vermischung zu verzeichnen.

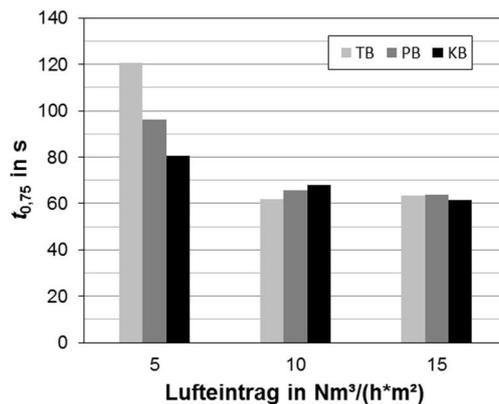


Abbildung 5.30: Globale Mischzeiten $t_{0,75}$ bei den eingestellten Lufteinträgen $Q_{L,1} = 5 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$, $Q_{L,2} = 10 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ und $Q_{L,3} = 15 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ für die Tellerbegaser (TB), den Plattenbegaser (PB) und die Kanülenbegaser (KB).

5.1.4 Arbeitspaket 1.4: Einsatz von Strömungsfolgern zur Datenerhebung an realen Belebungsbecken

Konzept der instrumentierten Strömungsfolger:

Für die Anwendung in Kläranlagen wurde das von Reinecke et al. entwickelte und bestehende Konzept der Strömungsfolger erweitert [Rei10,14]. In Abbildung 5.31 ist das Konzept dargestellt. Die Strömungsfolger wurden zusätzlich mit einer Auftriebseinheit ausgestattet. Das Gehäuse hat einen Hubkolben, welcher durch einen elektrischen Linearaktor ausgefahren werden kann (Abbildung 5.32). Das ermöglicht die automatische Tarierung der Strömungsfolger zur Anpassung an die Dichte des Fluids mit einer minimalen Dichtetoleranz (Abbildung 5.34). Zudem kann ein kontrolliertes Auftreiben der Strömungsfolger zum Ende der Messung erfolgen. Die Kraft zum Ausfahren des Hubkolbens wurde auf ein Minimum reduziert, um einen Kompromiss zwischen der Dichtigkeit des beweglichen Kolbens bis zu einem Druck von 2 bar und dem Leistungsbedarf für den Aktor herzustellen. Der Leistungsbedarf des Linearaktors ist deshalb kritisch, weil das bisherige Energiekonzept der Strömungsfolger auf einer Primärbatterie (Typ CR2477; Li/MnO₂) als Energiespeicher basiert. Die Variante der Erfassungselektronik mit Primärbatterie ist in Abbildung 5.33a abgebildet. Dieser Energiespeicher erlaubt den eigen-sicheren Betrieb der Strömungsfolger in explosionsgefährdeten Bereichen, was bei der bisherigen Anwendung in Biogasfermentern notwendig war aber auch z. B. in der Klärschlammvergä-rung relevant ist. Der Linearaktor kann jedoch trotz der reduzierten Betätigungskraft am Kol-

ben nicht direkt von der Batterie betrieben werden. Deshalb wird der Linearaktor über ein spezielles Laderegime von einem Superkondensator pulsweise betätigt.

Die Primärbatterie und die Versorgung des Linearaktors über den Superkondensator wurden in einer Überarbeitung der Sensorpartikel durch einen Lithium-Polymer-Akku ersetzt (Abbildung 5.33b). Hintergrund waren die Ergebnisse der fehlgeschlagenen Rückgewinnungsversuche an der KA-Ebersbach. Der Linearaktor wird mit dem Lithium-Polymer-Akku direkt und mit einer höheren Leistung als zuvor betrieben. In Laborversuchen sind keine Fehlfunktionen der Auftriebseinheiten aufgetreten. Die Überarbeitung umfasste weiterhin die Erweiterung die Integration eines Drehraten- und eines Magnetfeldsensors. Zusammen mit dem Beschleunigungssensor ist damit eine Inertialmesseinheit vorhanden. Damit werden die für die Rekonstruktion der Bewegungstrajektorie erforderlichen Inertialgrößen erfasst. Der Algorithmus zur Bahnrekonstruktion basierend auf Kalman-Filtern wird derzeit erarbeitet. Die vorhandene eindimensionale vertikale Positionsmessung und die Erfassung der Positionsmarker werden in diesen Algorithmus eingebunden.

Weiterhin wurde eine Sensorspule zu Erfassung der Signale elektromagnetischer Positionsmarker eingebunden. Damit ist die Detektion der Strömungsfolger bei der Passage eines fest an der Anlage installierten Positionsmarkers, wie einer großflächigen Sendespule, möglich. Weiterhin kann so das Auftreiben der Strömungsfolger an die Oberfläche in definierten Zonen in einer Kläranlage initiiert werden, was deren Rückgewinnung vereinfacht (siehe AP1.5).

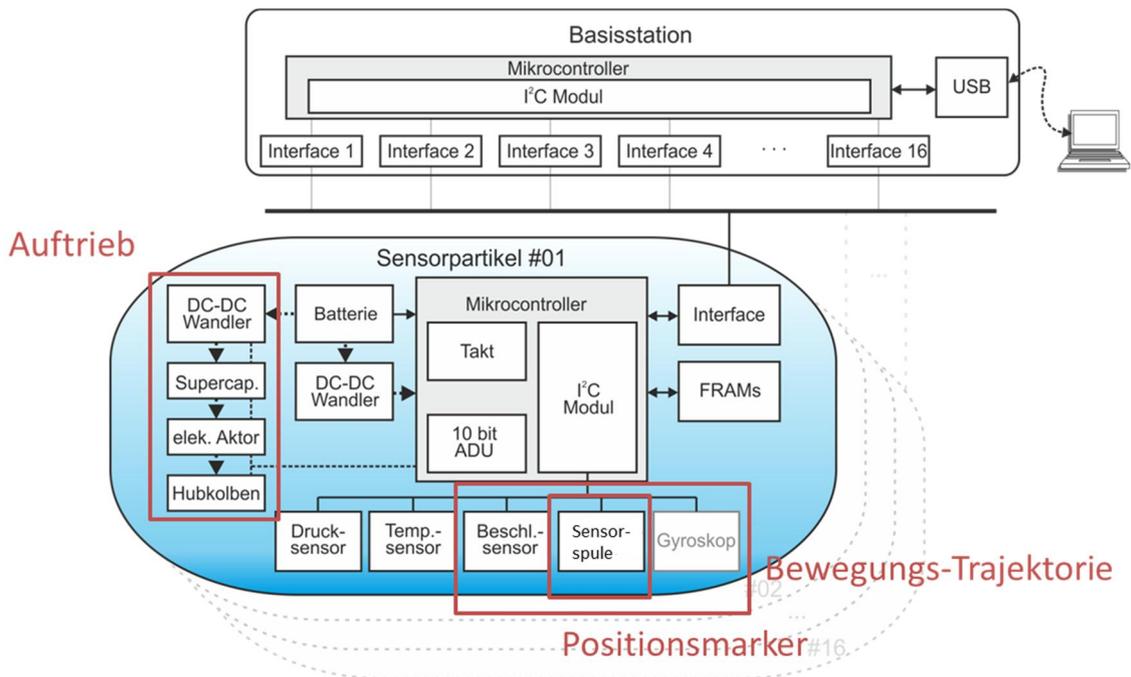


Abbildung 5.31: Blockschaftbild der konzeptionierten Strömungsfolger bzw. Sensorpartikel mit Basisstation zur Erfassung räumlich verteilter Parameter in Kläranlagen.

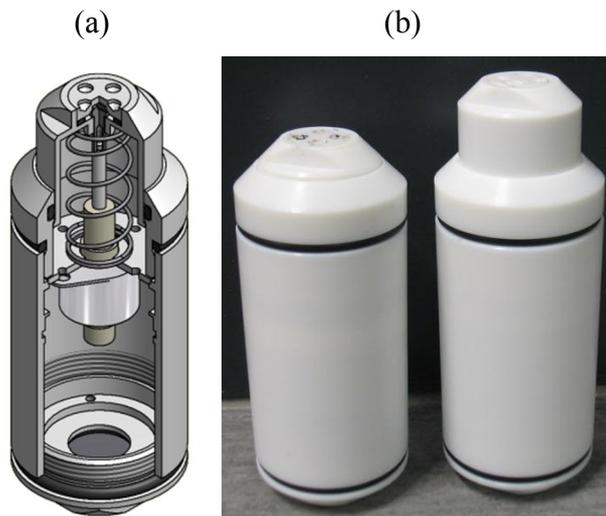


Abbildung 5.32: Gehäuseaufbau der Strömungsfolger: (a) Gerenderte CAD-Ansicht mit dem Hubkolben in ausgefahrener Position und dem elektrischem Linearaktor und (b) Montierte Strömungsfolger mit ein- und ausgefahrenem Hubkolben.

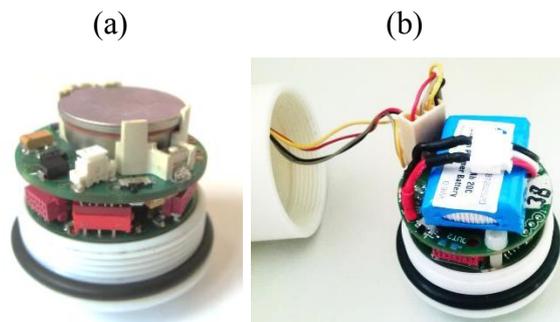


Abbildung 5.33: Bodendeckel mit der montierten Erfassungselektronik für die Strömungsfolger: (a) Variante mit Primärbatterie und gepulster Ansteuerung für die Auftriebseinheit und (b) überarbeitete Variante mit Lithium-Polymer-Akku für den direkten Betrieb der Auftriebseinheit bei gesteigerter Antriebsleistung.



Abbildung 5.34: Automatische Tarierung der Strömungsfolger an der KA-Ebersbach vor der Zugabe in die Kläranlage: (Links) Abgesunkene Strömungsfolger mit eingefahrenem Hubkolben zu Beginn der Tarierung in den Probensäulen. (Rechts) Strömungsfolger nach dem langsamen Aufsteigen im quasi-auftriebsneutralen Zustand mit minimal ausgefahrenem Hubkolben

Einsatz an der KA-Ebersbach:

Die erste Messreihe an einer Kläranlage mit den frei beweglichen Strömungsfolger wurde an der KA-Ebersbach (SOWAG) durchgeführt. Die Anlage zur biologischen Reinigung besteht aus zwei parallel betriebenen Strassen mit je drei Kaskaden zur Denitrifikation und je drei Kaskaden zur Nitrifikation (siehe Abbildung 5.35). Die Kaskaden zur Denitrifikation werden nicht begast und sind mit je einem Rührwerk ausgestattet. Die Kaskaden zur Nitrifikation werden nur begast. Die Kaskaden haben eine Breite von 10 m, eine Länge von 12 m und einen Füllstand von ca. 6 m. Die drei begasteten Kaskaden sind mit je 200 Tellerbegasern vom Typ Silver Series II 2300 B Fa. Sanitaire ausgestattet (siehe Abbildung 5.35). Es kamen insgesamt 5 Strömungsfolger mit Auftriebseinheit zum Einsatz. Diese wurden zu Beginn und nach der Rückgewinnung (siehe AP1.5) seitlich in die 2. Kaskade zugegeben.

Wesentliche Informationen über die Bewegung der Strömungsfolger liefert deren gemessene Eintauchtiefe. Aus dem Zeitverlauf der Eintauchtiefe wird das vertikale Aufenthaltsprofil der Strömungsfolger extrahiert (Abbildung 5.36). In der 2. Kaskade zeigt sich anhand der bei Regelbetrieb erfassten Aufenthaltsmaxima in Bodennähe und am Flüssigkeitsspiegel eine relativ geringe vertikale Durchmischung. Hier bildet sich die durch den horizontal ausgerichteten Rührerstrahl dominierte horizontale Zirkulationsströmung ab. Im Testbetrieb bei maximaler Rührerdrehzahl ist das Aufenthaltsprofil deutlich homogener, was von einer verbesserten Homogenität zeugt.



Abbildung 5.35: (Links) Ansicht der rechten Strasse der KA-Ebersbach in Fließrichtung. (Rechts) Kaskade zur Nitrifikation mit den Tellerbegasern.

Die aus der Eintauchtiefe extrahierten vertikalen Strömungsgeschwindigkeiten geben Aufschluss über die auftretenden Geschwindigkeitsamplituden und damit über die Strömungsdynamik im Becken. Die Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeit (Abbildung 5.36) zeigt, dass bei maximaler Rührerdrehzahl ggü. dem Regelbetrieb in der 2. Kaskade größere Amplituden der vertikalen Strömungsgeschwindigkeit von bis zu 0,2 m/s deutlich häufiger auftreten. Die höhere Rührerdrehzahl zeigt sich also in der größeren Strömungsdynamik der Strömungsfolger.

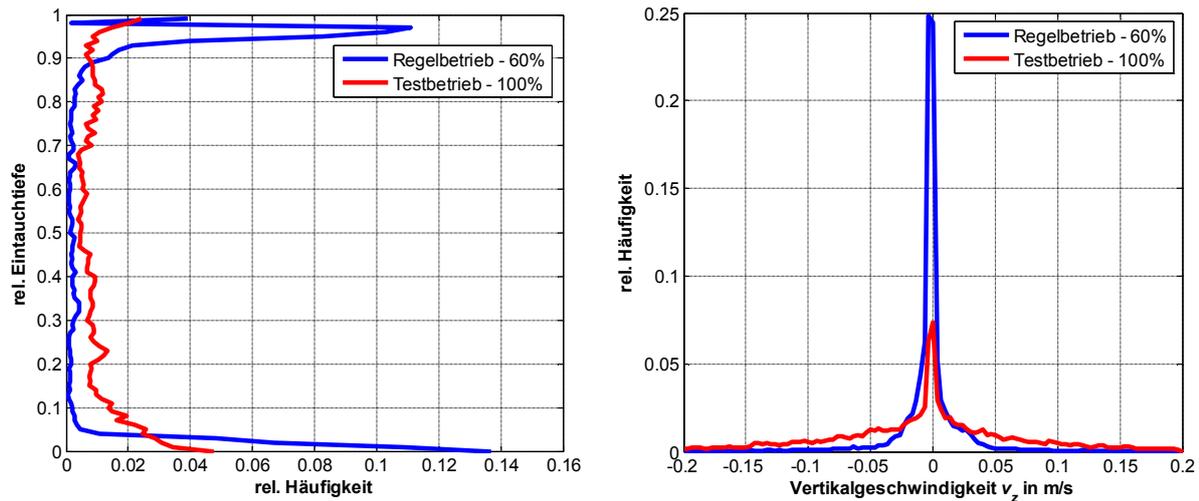


Abbildung 5.36: (Links) Vertikale Aufenthaltsprofile der Strömungsfolger mit der relativen Eintauchtiefe zwischen 0 (Boden) und 1 (Flüssigkeitsspiegel) und (rechts) Häufigkeitsverteilung der vertikalen Strömungsgeschwindigkeit für den Regelbetrieb des Rührwerks in der 2. Kaskade bei 60% der Drehzahl und im Testbetrieb bei maximaler Drehzahl.

Das Zustandsraumdiagramm der vertikalen Bewegung stellt die vertikale Verteilung der Geschwindigkeit dar (Abbildung 5.37). Bei der Messung im Regelbetrieb sind die Strömungsfolger kaum in den Bereich der halben Füllhöhe gelangt, was sich im Zustandsraumdiagramm besonders deutlich zeigt. Erst bei der höheren Rührerdrehzahl im Testbetrieb zeigen sich im Zustandsraumdiagramm Bewegungen der Strömungsfolger über die gesamte Füllhöhe. Dies unterstreicht die zuvor getroffenen Aussagen.

Die bisherigen Ergebnisse dieser Messreihe zeigen, dass die Strömungsfolger wertvolle Informationen über den Strömungsprozess liefern. Dennoch ist auf Grund der eindimensionalen Positionserfassung der Strömungsfolger Apriori-Wissen über die Beckengeometrie, die Einbauten und den Betrieb notwendig, um die Messdaten eindeutig interpretieren zu können.

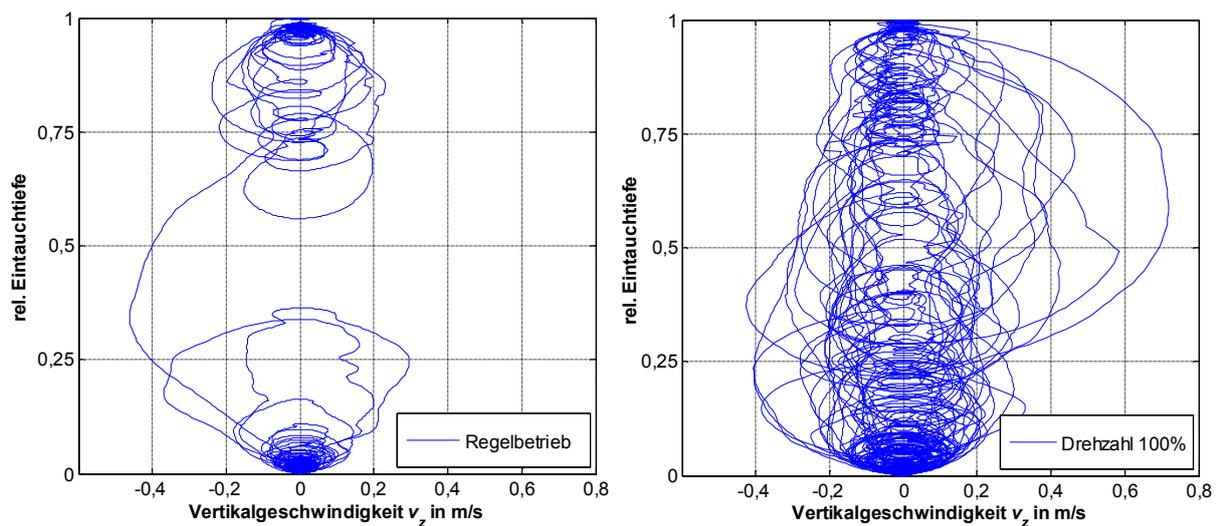


Abbildung 5.37: Zustandsraumdiagramm der vertikalen Bewegung der Strömungsfolger in der 2. Kaskade an der KA-Ebersbach (links) für den Regelbetrieb des Rührwerks in der 2. Kaskade bei 60% der Drehzahl und (rechts) bei maximaler Rührerdrehzahl.

Einsatz an der KA-Großschweidnitz:

Eine weitere Testmessung mit drei überarbeiteten Sensorpartikeln erfolgte an der KA-Großschweidnitz (SOWAG) in einem Rundbecken mit intermittierendem Betriebsregime (Abbildung 5.38). Das Belebungsbecken hat eine Tiefe von $H_0 = 5$ m, einen Durchmesser von 23 m, und ein Füllvolumen von 2077 m³. Es sind zwei gegenüberliegende Rührwerke Typ 461 Banana der Firma Flygt mit horizontal ausgerichteten Rührerstielen und 21 Plattenbegaser Messner V20F50 mit einer Begasungsfläche von 2 m² (TPU-Membran) und einem Lufteintrag von 60 Nm³/h pro Element installiert. Die Begaser sind flächig auf einem Halbkreis angeordnet (siehe Zuluftleitung in Abbildung 5.38). Der Betrieb des Belebungsbeckens ist intermittierend mit einem Wechsel zw. Denitrifikation und Nitrifikation. Die Wechsel finden über eine Regelung basierend auf dem Gelöstsauerstoff und dem Redoxpotenzial im Becken statt. Es kamen insgesamt drei Sensorpartikel mit Auftriebseinheit während einer Nitrifikationsphase zum Einsatz. Zur Rückhaltung der Sensorpartikel war eine Fangeinrichtung am Überlauf installiert (siehe AP1.5).

Die Zeitreihen der gemessenen Eintauchtiefe und der daraus ermittelten vertikalen Strömungsgeschwindigkeit der Sensorpartikel sind in Abbildung 5.39 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Sensorpartikel mit der Strömung bis zum Beckenboden bei $z/H_0 = 0$ gelangen. Weiterhin gibt es Zeitabschnitte, in denen die Sensorpartikel sich nahe der Oberfläche befinden. Dies deutet auf eine fehlende vertikale Durchmischung im nicht begasten Bereich des Beckens hin.

Das vertikale Aufenthaltsprofil des exemplarischen Sensorpartikels in Abbildung 5.40a zeigt einen gleichmäßigen Verlauf über der Beckenhöhe, was auf eine weitestgehend homogene vertikale Durchmischung hindeutet. Jedoch ist aufgrund der Flotationsphasen der Sensorpartikel bei fehlender Vertikalströmung im unbegasten Bereich eine Häufung in Oberflächennähe vorhanden. Die Häufigkeitsverteilung der vertikalen Geschwindigkeit in Abbildung 5.40a weist eine nahezu symmetrische Verteilung um den Mittelwert $v_z = 0$ m/s. Die Geschwindigkeitsamplituden liegen überwiegend im Bereich $v_z = -0,5 \dots 0,5$ m/s bei einer Standardabweichung von 0,153 m/s. Diese Werte liegen in der Größenordnung der Werte von natürlich aufsteigenden Blasen im Schwarm von unter 0,3 m/s (siehe AP1.1). Jedoch erscheinen die Werte teilweise durch die überlagerten Strömungen der Rührwerke und der Auftriebsstrahlen der Begaser erhöht. Damit tritt teilweise eine Verkürzung der Aufstiegszeit der eingebrachten Blasen in der Flüssigkeit auf.

Im Zustandsraumdiagramm der vertikalen Strömungsbewegung in Abbildung 5.41 ist die überwiegende Homogenität über der Höhe des Beckens ebenfalls erkennbar. In dem verdichteten Bereich bei $z/H_0 > 0,9$ zeigen sich die Flotationsphasen der Sensorpartikel bei fehlender Vertikalströmung im unbegasten Bereich.



Abbildung 5.38: Rundbecken an der KA-Großschweidnitz (SOWAG) für die Messung mit Strömungsfolgern.

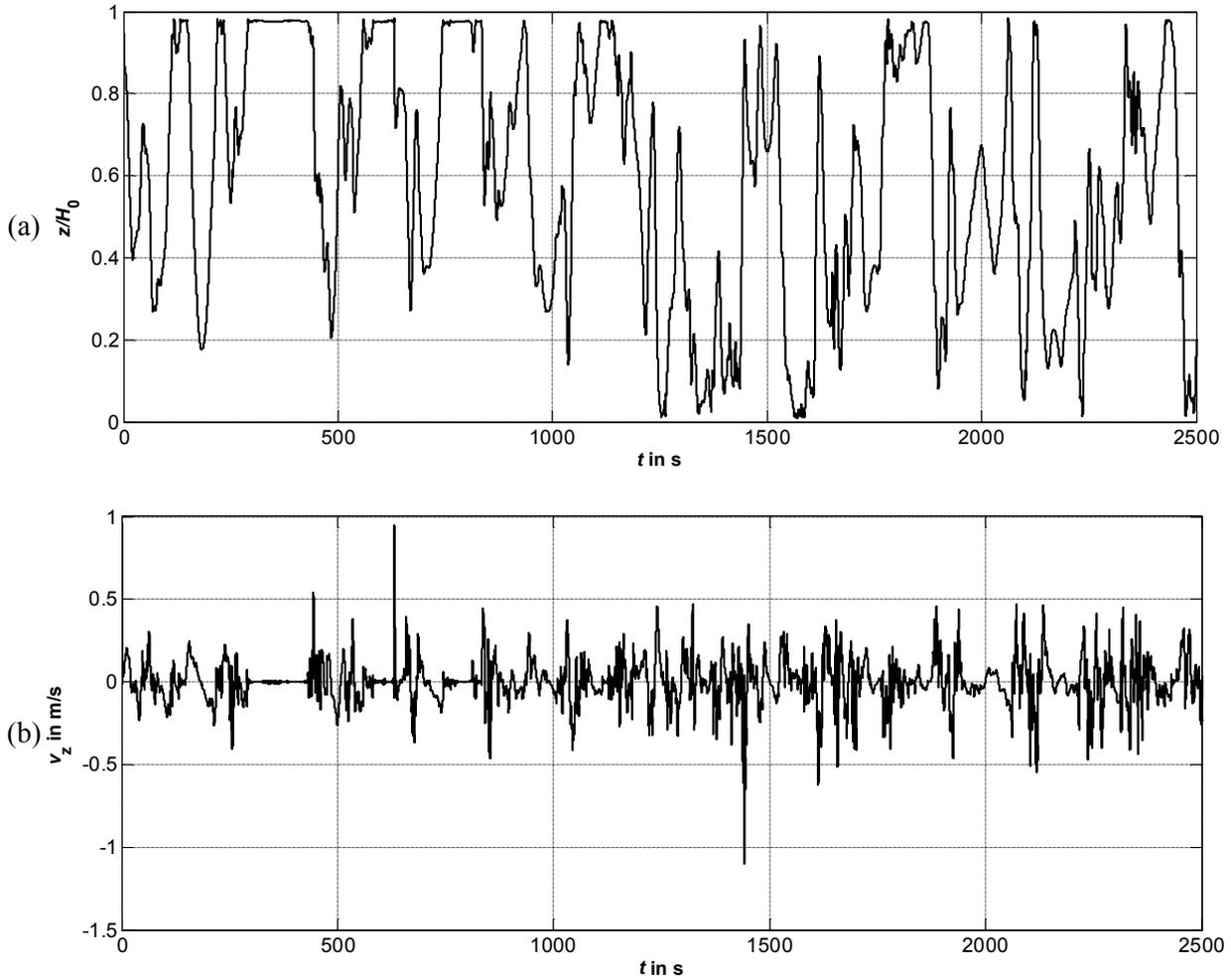


Abbildung 5.39: Zeitreihen (a) der gemessenen normierten Eintauchtiefe und (b) der ermittelten vertikalen Geschwindigkeit eines Sensorpartikels in der Nitrifikationsphase der KA-Großschweidnitz.

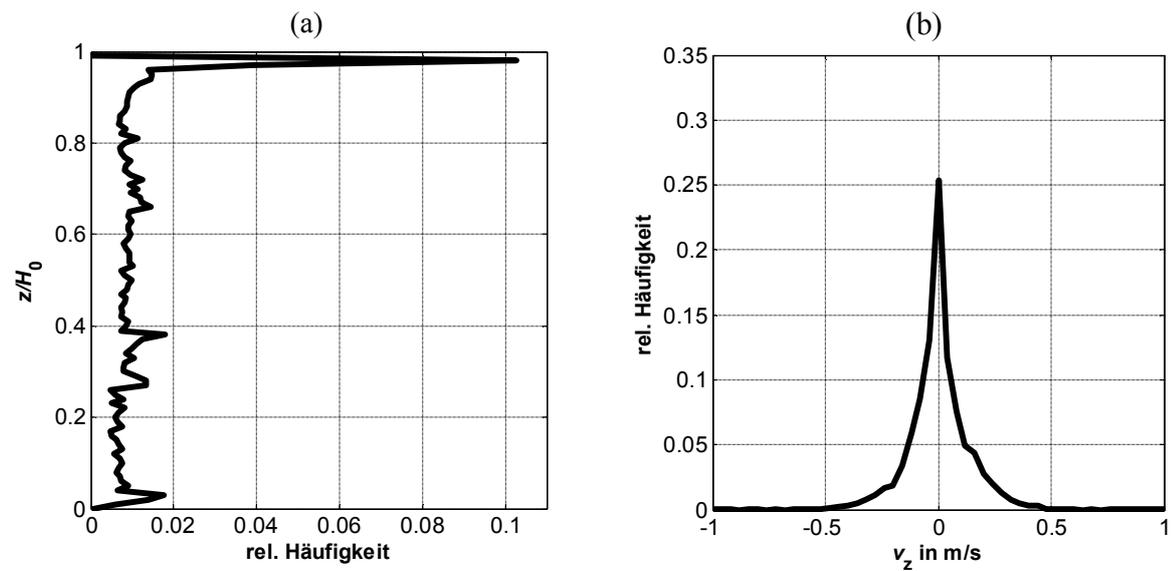


Abbildung 5.40: (a) Vertikales Aufenthaltsprofil und (b) Häufigkeitsverteilung der vertikalen Strömungsgeschwindigkeit eines Sensorpartikels in der Nitrifikationsphase der KA-Großschweidnitz.

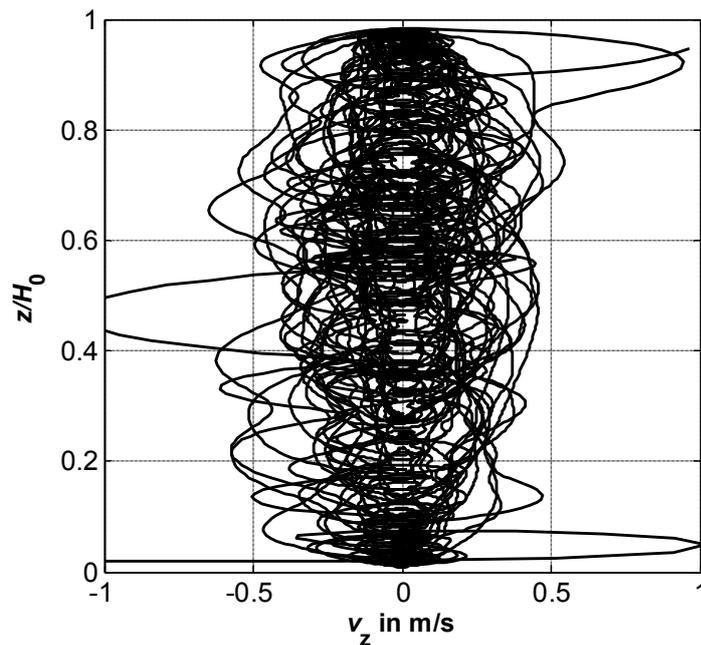


Abbildung 5.41: Zustandsraumdiagramm der vertikalen Bewegung eines Sensorpartikels in der Nitrifikationsphase der KA-Großschweidnitz.

Mit der integrierten Inertialmesseinheit auf dem Sensorpartikel wurden weiterhin die Inertialgrößen der Partikelbewegung erfasst. Die gemessenen Zeitreihen der Beschleunigung, der Drehrate und der magnetischen Flussdichte sind in Abbildung 5.42 dargestellt. Mit diesen Messdaten ist die Erweiterung der bisher eindimensionalen, vertikalen Positionserfassung um die Bewegung in der horizontalen Ebene möglich. Damit kann die Rekonstruktion der dreidimensionalen Strömungsbewegung der Sensorpartikel erfolgen. Die Analyse der Messdaten mit dem in der Entwicklung befindlichen Algorithmus ist in Phase II vorgesehen. Damit sollen weitere Informationen über die Strömung im Becken extrahiert werden.

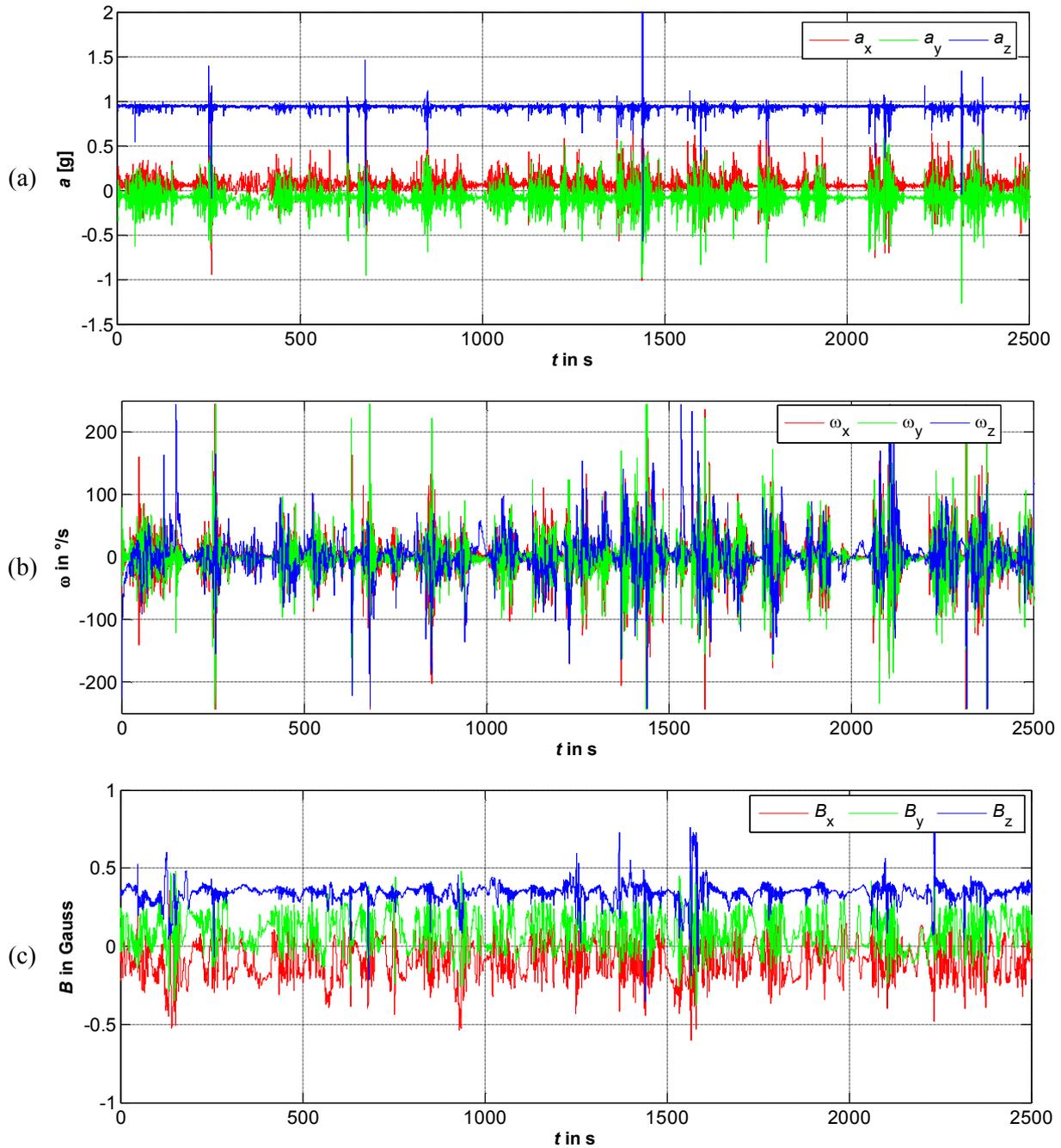


Abbildung 5.42: Zeitreihen der Messgrößen des Inertialsensors eines Sensorpartikels aus der Messung in der Nitrifikationsphase der KA-Großschweidnitz: (a) Beschleunigung a in Einheiten der Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, (b) Drehrate und (c) magnetische Flussdichte B .

5.1.5 Arbeitspaket 1.5: Validierung der Rückgewinnungskonzepte der Sensorpartikel

Zur Rückgewinnung der Strömungsfolger aus dem Prozess werden derzeit zwei Varianten verfolgt. Die erste Variante basiert auf einem Fangnetz, welches quer zur Durchflussrichtung in den Querschnitt einer Überlaufzone zwischen den Kaskaden aufgespannt wird (Abbildung 5.43). So können die Strömungsfolger sicher zurückgehalten, um das Eindringen in Ansaugbereiche von Rezirkulationspumpen o.ä. zu vermeiden.

Die zweite Variante basiert auf dem Auftriebskonzept der Strömungsfolger in Kombination mit einem Positionsmarker in Form einer fest montierte großräumigen Sendespule (Abbildung 5.43). Diese Variante erlaubt das kontrollierte Auftreiben der Strömungsfolger. Dabei werden die Ereignisse *'Datenspeicher ist voll'*, *'Entladezustand der Batterie kritisch'* und *'Signal der Sendespule empfangen'* zur Initiierung des Auftreibens von der Elektronik der Strömungsfolger überwacht. Die Sendespule besteht aus einem wasserdichten Kabel dessen 30 Adern als Spulenwicklungen verbunden sind. Das Kabel wird so aufgehängt, dass die entstehende Schleife die Querschnittsfläche des Überlaufs abdeckt. Während der Messreihe an der KA-Ebersbach wurde die Sendespule testweise zusammen mit dem Fangnetz aufgehängt (Abbildung 5.43). Die Sendespule wird an einem Signalleistungsverstärker bei einer Signalfrequenz von 1 kHz betrieben. Die Sensorspule auf der Erfassungselektronik der Strömungsfolger detektiert dieses Sendesignal nur im unmittelbaren Bereich des Überlaufs. In Abbildung 5.44 ist der am Überlauf von einem Strömungsfolger aufgezeichnete Verlauf des Signals der Sendespule dargestellt. Mit einer Schwellwertanalyse kann so das Auftreiben des Strömungsfolgers gestartet werden.



Abbildung 5.43: Fangnetz mit gelben Schwimmern und Sendespule am Überlauf zwischen 4. und 5. Kaskade an der KA-Ebersbach (SOWAG).

Die beiden Varianten der Rückgewinnung wurden während der Messreihe an der KA-Ebersbach angewendet. Bei 11 von 16 Zugaben konnten die Strömungsfolger von der Flüssigkeitsoberfläche zurückgewonnen werden. Dabei hat sich die mechanische Rückhaltung mit dem Fangnetz als zuverlässige Variante erwiesen. Bei einem Langzeiteinsatz ist jedoch auf die wachsende Verzopfung der Maschen zu achten. Nach der wiederholten Zugabe in die 2. Kaskade sind dennoch alle 5 der eingesetzten Strömungsfolger nicht wieder aufgetrieben. Als Ursachen werden zum einen mögliche Totzonen unterhalb der Begaserebene und an den Rohrleitungen der Rezirkulation gesehen. Zum anderen könnten Verschmutzungen der Dichtung des Hubkolbens nach der ersten Rückgewinnung zu einem erhöhten Reibungswiderstand und damit zur Behinderung des Linearaktors geführt haben.

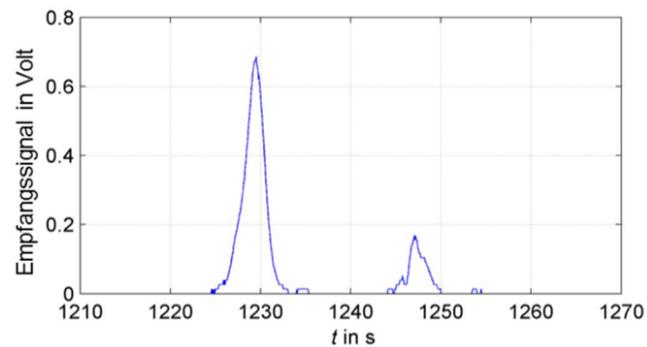


Abbildung 5.44: Empfangenes und konditioniertes Signal bei der Passage eines Strömungsfolgers durch die Sensospule.

Wenn die Strömungsfolger in Totzonen festgehalten werden, ist zu erwarten, dass sie bei wechselnden Betriebsregimen bzw. Durchsätzen aus den Totzonen ausgespült werden. Wenn die Hubkolben ausgefahren sind, werden die Strömungsfolger zum gegebenen Zeitpunkt auftreiben und können ggf. von der Oberfläche zurückgewonnen werden. Die SOWAG unterstützt dieses Szenario durch regelmäßige Sichtprüfung des Wasserspiegels. Ein Übergang in das Nachklärbecken ist ausgeschlossen.



Abbildung 5.45: Aufgetriebene Strömungsfolger an der KA-Ebersbach.

Die überarbeiteten Sensorpartikel mit dem Lithium-Polymer-Akku wurden bei dem Einsatz an der KA-Großschweidnitz erfolgreich getestet. Insgesamt wurden drei Sensorpartikel in zwei Wiederholungsversuchen im Belebungsbecken eingesetzt. Zur Rückhaltung der Sensorpartikel im Becken kam eine Barriere am Überlauf mit einem Spaltmaß von ca. 30 mm zur Anwendung (siehe Abbildung 5.46). Eine Verstopfung dieser Konstruktion wurde nicht festgestellt, so dass die Anwendung auch während längerer Versuchszeiten praxistauglich erscheint. Während der Versuche ist jedoch kein Sensorpartikel in diesen Bereich gekommen.

Bei allen Versuchen haben die Sensorpartikel am Ende der Messung den Auftriebskolben ausgefahren und sind eigenständig aufgetrieben. Die Rückgewinnung der Sensorpartikel vom Flüssigkeitsspiegel ist mit einem Kescher (Länge 2 m) erfolgt. Die Sichtung der aufgetriebenen Sensorpartikel war durch eine Schaumschicht auf der Flüssigkeit erschwert. Zudem verlängerte die kurze Reichweite des Keschers die Dauer der Rückgewinnung. Hier war ein Zeitaufwand von bis zu einer Stunde nach dem Auftreiben nötig, um alle Sensorpartikel zu bergen. Bei dem Langzeiteinsatz ist eine Ansammlung der Sensorpartikel am Überlauf zu erwarten, sodass eine einfache Entnahme an der Barriere möglich wäre. Zur Erleichterung der Rückgewinnung bei weiteren Testmessungen werden eine Farbmarkierung der Sensorpartikel und eine Teleskopverlängerung in Betracht gezogen.



Abbildung 5.46: Barriere am Überlauf des Belebungsbeckens der KA-Großschweidnitz.

5.1.6 Arbeitspaket 1.7: Datenanalyse und Aufbereitung der Ergebnisse

Die wesentlichen Ergebnisse aus AP1.1-1.3 sind in den Kapiteln 5.1.3 und 5.1.4 dokumentiert. Die bisherigen Ergebnisse aus AP1.4-1.5 sind in Kapitel 5.1.5 und 5.1.6 enthalten. Die Analyse und Aufbereitung wird kontinuierlich für die in Phase II und III in AP1.3 (Technikumsversuche) und AP1.4-1.5 folgenden Versuche und Messreihen fortgesetzt.

5.2 Arbeitspaket 2: Weiterentwicklung von gekoppelten CFD-ASMx-Modellen

5.2.1 Arbeitspaket 2.1: Validierung der Modelle anhand der in AP1 gewonnenen Messdaten

Die Experimente zu AP1 haben sich fertigungsbedingt verzögert. Aus diesem Grund lagen die Messdaten für die Validierung der Modelle erst zu Beginn der Phase II vor. Die aufbereiteten Messdaten sind bereits übergeben worden. Somit erfolgt auch die entsprechende Validierung anhand der in AP1 gewonnenen Messdaten in Phase II. Es folgt an dieser Stelle gleichwohl eine Darstellung des derzeitigen Standes der Modellierung, verbunden mit einer Darstellung der bisher erfolgten Validierungsschritte.

Vorstellung des Modellaufbaus der Mehrphasenströmung

Die belüftete Abwasser-Belebtschlamm-Suspension besteht aus einer gasförmigen Phase aus Luft, einer wässrigen Phase aus Abwasser und einer festen Phase aus Mikroorganismen und

Partikeln, die durch eine Dreiphasenströmung nach dem Euler-Euler-Ansatz beschrieben wird. Die Darstellung einer vierten Phase, die z.B. extrazelluläre Polymere berücksichtigt, wird aus Gründen des Rechenaufwandes zunächst nicht weiter verfolgt.

Als zweckmäßig hat sich die Betrachtung einer Dreiphasenströmung erwiesen, um das Gas, die Flüssigkeit und die Bakterienflocken in ihrer Relativbewegung zueinander und den Transportprozessen untereinander beschreiben zu können. Im Vergleich zu einer Zweiphasenströmung ist eine Verdoppelung der Rechenzeit zu erwarten. Des Weiteren sind Reaktionen zwischen Komponenten unterschiedlicher Aggregatzustände und den Euler-Phasen mit einem erheblichem Programmieraufwand verbunden. Da innerhalb einer Euler-Phase nur eine monodisperse Partikelgröße definiert wird, gibt es nur eine Sinkgeschwindigkeit für alle Partikeln, die durch die Dichtedifferenz und den Partikeldurchmesser bestimmt wird. Eine Modellierung des Sedimentationsverhaltens in Abhängigkeit zum Trockensubstanz-Gehalt (TS-Gehalt) erscheint damit schwierig. Partikelinteraktionen, wie bei der Ausbildung eines komprimierbaren Flockengerüsts am Beckenboden, wären nicht modellierbar. Da gewöhnlich Bakterien und Bakterienflocken in etwa die Dichte von Wasser aufweisen, liegt die Überlegung nahe, diese nicht als separate Feststoffphase sondern innerhalb der Flüssigphase zu betrachten. Um dennoch die Viskosität der Flüssigkeit und das Sinkverhalten von kompakten Flocken beschreiben zu können, werden algebraische Gleichungen implementiert, die es erlauben, einer Komponente innerhalb der Euler-Phase eine definierbare Relativgeschwindigkeit in Abhängigkeit von einer Stoffkonzentration zuzuordnen. Dies ist vergleichbar mit einem gelösten Ion, das sich in einem elektrischen Feld befindet und sich relativ zur Hauptströmung in Richtung einer Elektrode bewegt. In ANSYS CFX ist dies grundlegend mit der Algebraic-Slip-Funktion möglich. Dabei kann durch die Vorgabe von Geschwindigkeitsvektoren in den drei Raumrichtungen die Relativbewegung zum umgebenden Fluid festgelegt werden (Abbildung 5.47).

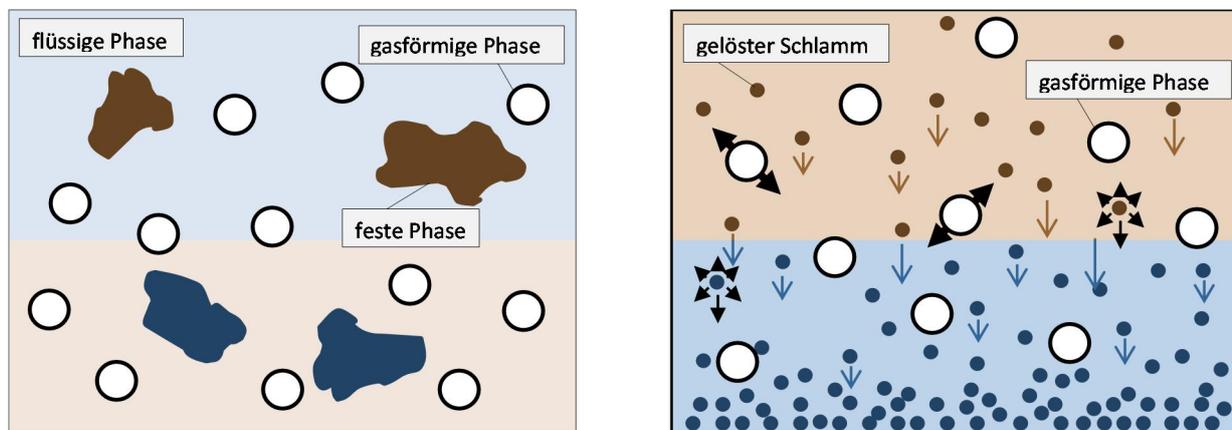


Abbildung 5.47: Links: Implementierung mittels drei separater Euler-Phasen. Rechts: Darstellung einer Pseudo-Dreiphasenströmung mit Hilfe der „Algebraic-Slip“ Funktion.

Es wird somit eine kontinuierliche Flüssigphase mit gelösten Feststoffpartikeln und eine disperse Gasphase beschrieben. Da die Modellierung dieser zwei Eulerphasen durch den Algebraic-Slip-Ansatz um die Suspensionsviskosität und um Modelle der Belebtschlammssedimentation erweitert wird, kann man von einer Pseudo-Dreiphasenströmung sprechen. Allerdings müssen im Vergleich zur dreiphasigen Modellierung mit dem Euler-Verfahren Einschränkungen in Kauf genommen werden: Da die Feststoffpartikeln streng genommen keinen

eigenen Raum einnehmen, wird mit steigendem Feststoffgehalt die Berechnung der Hydrodynamik ungenauer. Der Beitrag zu den Phasenwechselwirkungskräften, wie z.B. der virtuellen Trägheitskraft, wird vernachlässigt, was einen Einfluss auf die Berechnung der Gas-Flüssigverteilung hat. Die Simulation einer dispersen Phase läuft beim Standard-Euler-Euler-Verfahren in jeweils einer Größenklasse ab. Da für eine realistische Darstellung der Gasblasen und der spezifischen Oberfläche allerdings bis zu 100 Größenklassen nötig sind und der Berechnungsaufwand dementsprechend groß ist, kommt das Multiple-Size-Group-Model (MUSIG) zur Anwendung [Kre08]. Bei diesem Modell können durch Verknüpfung von algebraischen Beziehungen polydisperse Berechnungen durchgeführt werden. Die Größenklassen werden auf bis zu einem Zehntel der ursprünglichen Anzahl reduziert, wodurch erhebliche Rechenzeit eingespart wird. Als zusätzliches Element kann die Koaleszenz und der Zerfall von Blasen berücksichtigt werden.

Modellierung der Rheologie des Belebtschlamm

Die Modellierung der Belebtschlamm/Rheologie nimmt einen entscheidenden Stellenwert ein, da darauf aufbauend der Sauerstoffeintrag modelliert wird. Für die Modellierung des betrachteten Systems stellt sich der bilineare Ansatz nach [Sch06] als besonders geeignet heraus. Die in seiner Arbeit durchgeführte intensive Vermessung von Belebtschlämmen mit TS-Gehalten zwischen 0,1 und 12 g/l sowie Scherraten zwischen 0 und 15 s⁻¹ bietet für die Modellierung eine gute Grundlage. Die experimentellen Ergebnisse in dem relevanten Konzentrationsbereich von 2–5 g/l zeigen, dass sich Belebtschlamm bei niedrigen Scherraten durch ein Newton'sches Fluid (Index N) und bei höheren durch ein Bingham-Medium (Index B) nach Abbildung 5.48 modellieren lässt.

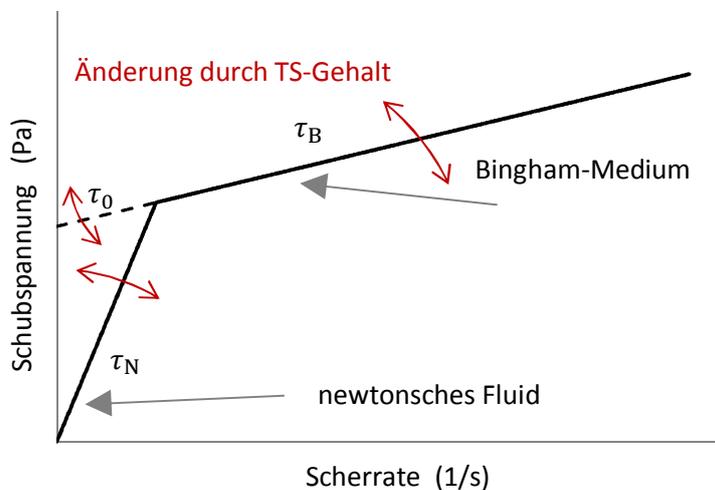


Abbildung 5.48: Der bilineare Viskositätsansatz nach [Sch06].

Die Schubspannung τ wird nach Gleichung 2.1 und Gleichung 2.3 für beide Medien berechnet. Die jeweilige Viskosität und die Fließgrenze τ_0 werden in Abhängigkeit vom TS-Gehalt, der Viskosität η_W von Wasser und vier empirisch ermittelten Konstanten K_1 bis K_4 bestimmt

$$\eta_N = K_1 \cdot TS^2 + \eta_W, \quad (5.9)$$

$$\eta_B = K_2 \cdot TS^2 + \eta_W, \quad (5.10)$$

$$\tau_0 = K_3 \cdot TS^3 + K_4 \cdot TS . \quad (5.11)$$

In ANSYS CFX wird zur Berechnung der Viskosität die Minimumfunktion aus Gleichung 2.4 implementiert

$$\eta = \frac{\text{Min}(\tau_N, \tau_B)}{\tilde{\gamma}} = \frac{\text{Min}(\{(K_1 \cdot TS^2 + \eta_w) \cdot \tilde{\gamma}\}, \{(K_2 \cdot TS^2 + \eta_w) \cdot \tilde{\gamma} + (K_3 \cdot TS^3 + K_4 \cdot TS)\})}{\tilde{\gamma}} . \quad (2.12)$$

Mit der Funktion wird sichergestellt, dass in Abhängigkeit vom TS-Gehalt und der Scherrate der jeweils passende Schubspannungsansatz verwendet wird. Die Berechnung der Suspensionsviskosität wird in der Simulation zu jedem Zeitschritt für jede Berechnungszelle durchgeführt. Die Konstanten K_1 bis K_4 werden aus den in [Sch06] und [Rat13] veröffentlichten Fließkurven mit unterschiedlichen TS-Gehalten durch eine Anpassung mit Hilfe des Excel-Solvers bestimmt. Durch die rigorose Studie von Literaturmessdaten und einer zusätzlichen experimentellen Versuchsdurchführung am Rotationsviskosimeter konnte vor allem auch bei niedrigen Scherraten von unter 4 s⁻¹ eine genügend große Versuchsanzahl zur Anpassung der Konstanten verwendet werden.

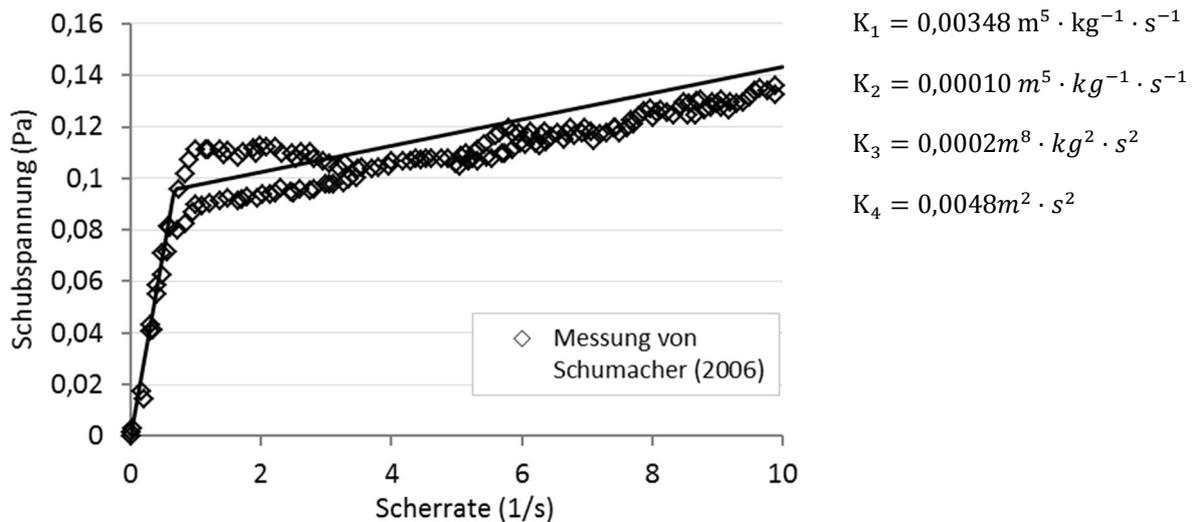


Abbildung 5.49: Viskositätsmessung bei einem TS von 6,4 g/l, entnommen aus [Sch06]. Die durchgezogene Linie stellt den bilinearen Modellansatz dar. Rechts: Mit Hilfe des Excel-Solvers ermittelte Konstanten bei unterschiedlichen TS-Gehalten.

Trotz der schlechteren Datenlage bei niedrigen Scherraten ist es gelungen, ein gut funktionierendes Viskositätsmodell aufzustellen. Abbildung 5.50 zeigt den Verlauf der Belebtschlammviskosität in Abhängigkeit des TS-Gehalts und der Scherrate.

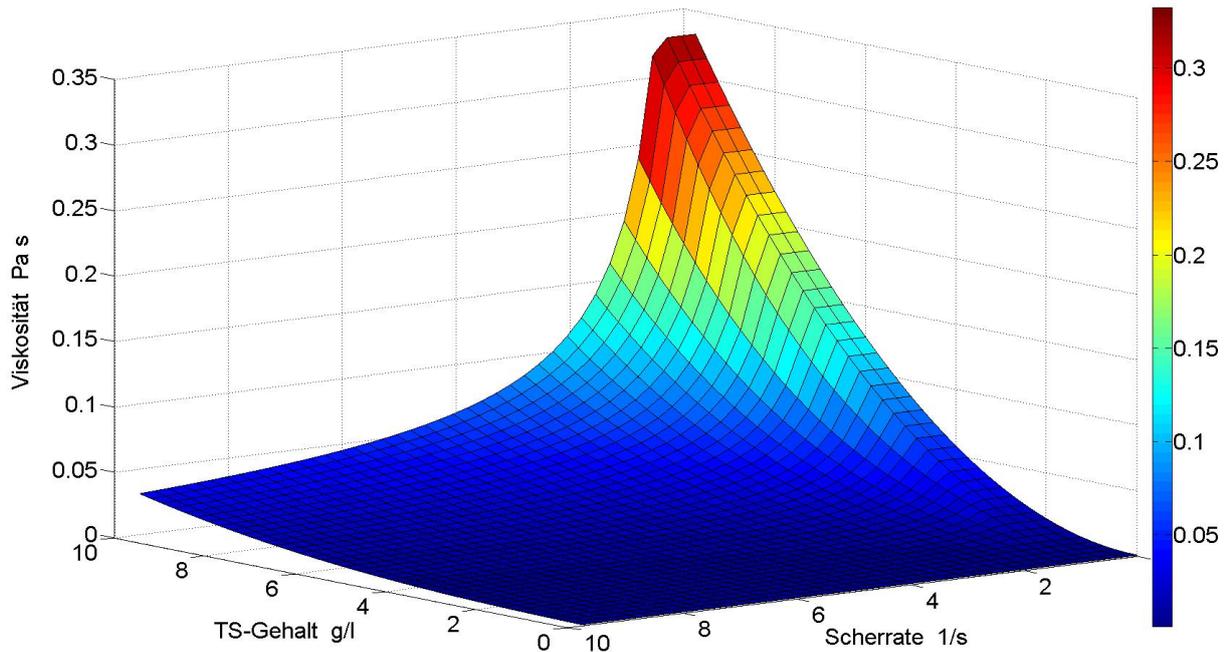


Abbildung 5.50: Wertebereich des implementierten Viskositätsmodells aus Gleichung 2.4.

Zur Überprüfung der Implementierung wird ein Versuch in einem exzentrisch angeordneten Rotationsviskosimeter stationär simuliert (vgl. Abbildung 5.51). Der innere Zylinder dreht sich dabei mit einer Geschwindigkeit von 30 Umdrehungen/Minute, der äußere Zylinder bleibt in Ruhe. Der TS-Gehalt in der simulierten Flüssigkeit entspricht den im Belebungsbecken vorherrschenden 4 g/l. Die simulierten Werte zeigen bei unterschiedlichen Scherraten den in Abbildung 5.52 dargestellten Verlauf. Es ist dabei ersichtlich, dass die Simulationsergebnisse den experimentell ermittelten Modellwerten entsprechen. Die erfolgreiche Implementierung der Suspensionsviskosität konnte damit gezeigt werden.

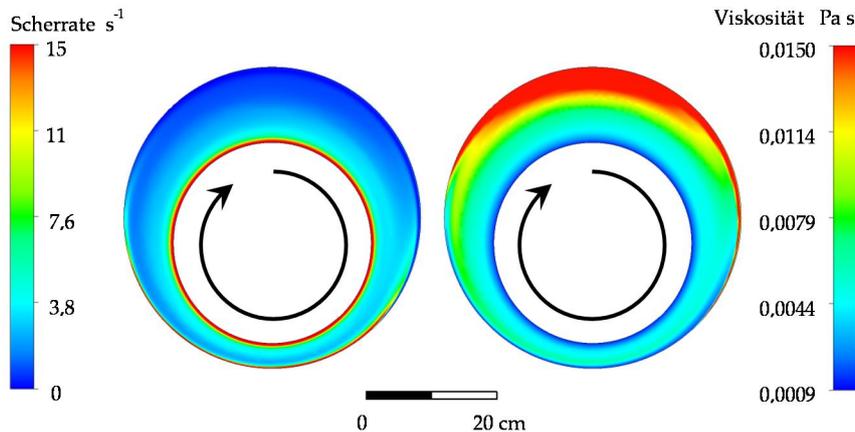


Abbildung 5.51: Simulation der Viskosität im exzentrisch angeordneten Rotationsviskosimeter

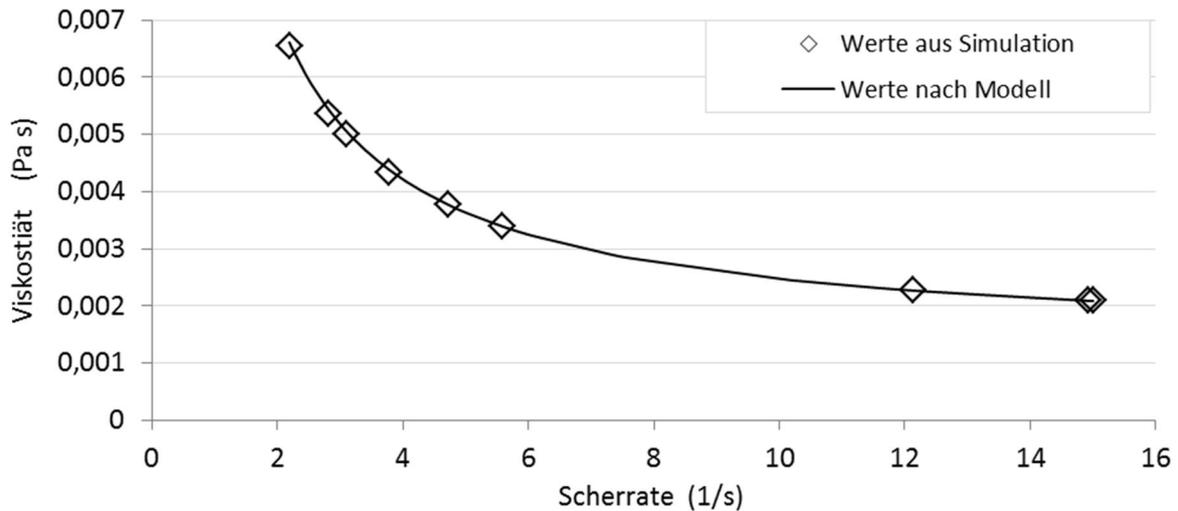


Abbildung 5.52: Implementierung des Modells in den CFD-Code. Vergleich der Ergebnisse des Rotationsviskosimeters bei unterschiedlichen Scherraten.

Modellierung der Sedimentation des Belebtschlamm

Zur primären Modellierung der Sedimentation ohne Belüftung wird auf die in der Literatur veröffentlichten Daten der Messkampagnen von [Jan05] zurückgegriffen. Die Absetzcharakteristik des Belebtschlamm wird mit Hilfe der Algebraic-Slip-Funktion durch eine berechnete Relativgeschwindigkeit zur Hauptströmung berücksichtigt. So kann die in Abbildung 5.53 wiedergegebene Anpassung der Sinkgeschwindigkeit als Funktion des Trockensubstanz-Gehalts mit den in Tabelle 5.4 aufgelisteten Funktionen direkt in die Simulationssoftware implementiert werden.

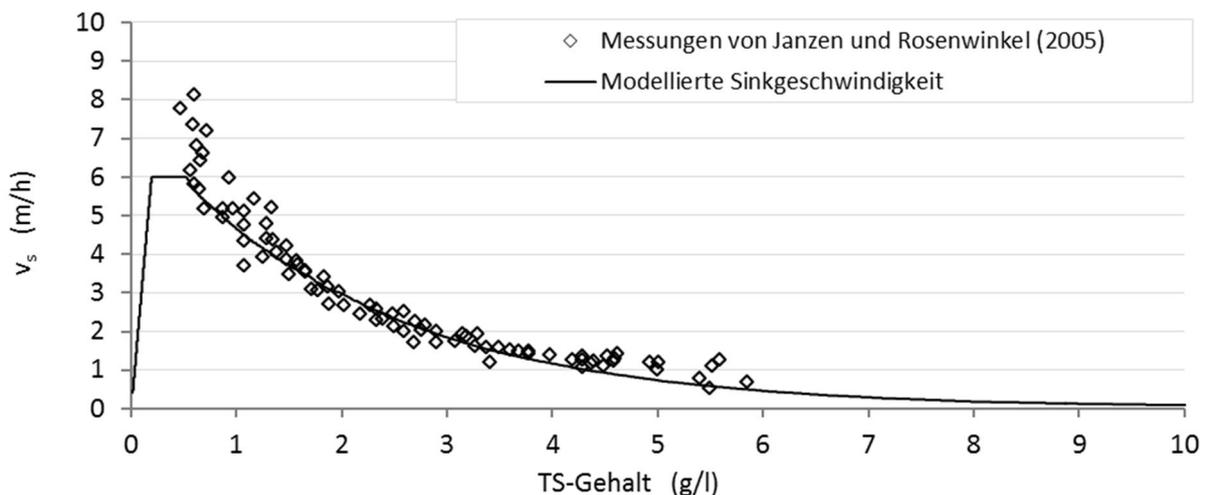


Abbildung 5.53: Sinkgeschwindigkeitsmessungen in Abhängigkeit des TS-Gehaltes entnommen aus [Sch06].

Die bereits eingebundene Viskosität wird ebenfalls berücksichtigt. Um das Verhalten in der Simulation bewerten zu können, werden Absetzversuche dynamisch simuliert. Diese werden analog zu Absetzversuchen durchgeführt, die experimentell auf einer Kläranlage zur Bestimmung der Absetzgeschwindigkeit und des Vergleichsschlammvolumens im Standzylinder durchgeführt werden. Dabei wird die Belebtschlammprobe in einem 1-Liter-Standzylinder voll-

ständig homogenisiert und anschließend wird der Schlamm Spiegel nach 30 Minuten abgemessen.

Tabelle 5.4: Mathematische Modellierung des Absetzverhaltens

TS-Gehalt (g/l)	Sinkgeschwindigkeit (m/h)
0 – 0,2	$v_s = 31,283 \frac{m^4}{kg \cdot h} \cdot TS$ (5.13)
0,2 – 0,476	$v_s = 6 \frac{m}{h}$ (5.14)
ab 0,476	$v_s = 7,443 \frac{m}{h} \cdot \left(e^{\left(-0,4628 \frac{m^3}{kg} \cdot TS\right)} - e^{\left(-25,005 \frac{m^3}{kg} \cdot TS\right)} \right)$ (5.15)

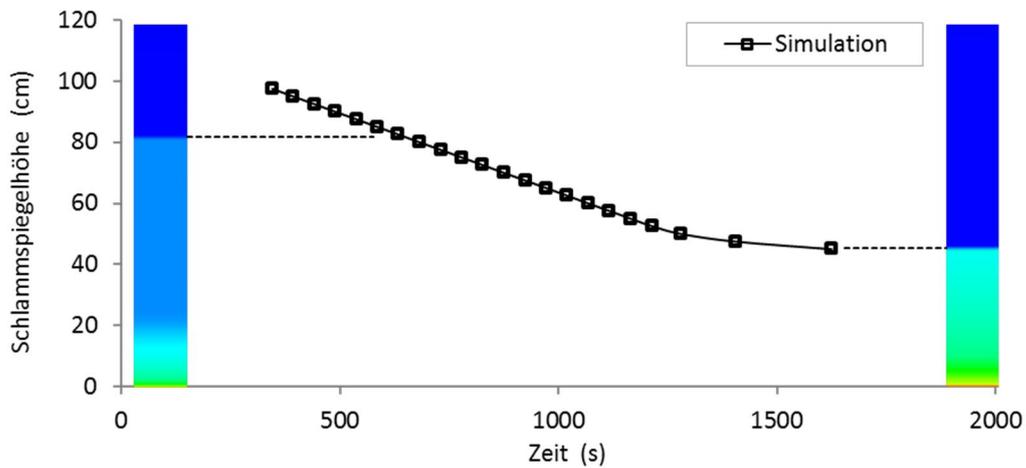


Abbildung 5.54: Schlamm Spiegelhöhe aus der Simulation der Absetzversuche bei 3 g/l TS-Gehalt, simuliert mit dem SST-Turbulenzmodell.

Abbildung 5.54 zeigt den Verlauf einer Simulation bei 3 g/l TS-Gehalt. Die homogene Verteilung des Schlammes zum Zeitpunkt $t=0$ ist an der blauen Säule deutlich zu erkennen. Bereits nach 600 Sekunden bildet sich im oberen Bereich eine große Klarwasserzone aus, während in Bodennähe eine Aufkonzentration des Schlammes stattfindet. Etwa nach 20 Minuten treffen der Schlamm Spiegel und die Front der aufkonzentrierten Schicht aufeinander. Trägt man die Schlamm Spiegelhöhe gegen die Absetzzeit auf, ergibt sich der in Abbildung 5.54 dargestellte Verlauf. Zu erkennen ist das lineare Absinken des Schlamm Spiegels, der nach einer Übergangsphase weiter eindickt.

Um die Modellierung der Absetzgeschwindigkeit näher zu untersuchen, werden Absetzversuche bei verschiedenen Konzentrationen simuliert. Dabei wird die Absinkgeschwindigkeit der linearen Absetzphase bestimmt und gegen den untersuchten TS-Gehalt aufgetragen. In Abbildung 5.55 ist die so bestimmte Absetzgeschwindigkeit zu erkennen. Bei einem TS-Gehalt von 1 g/l ergibt sich eine Abweichung zwischen experimentellen und simulierten Werten von 5 %.

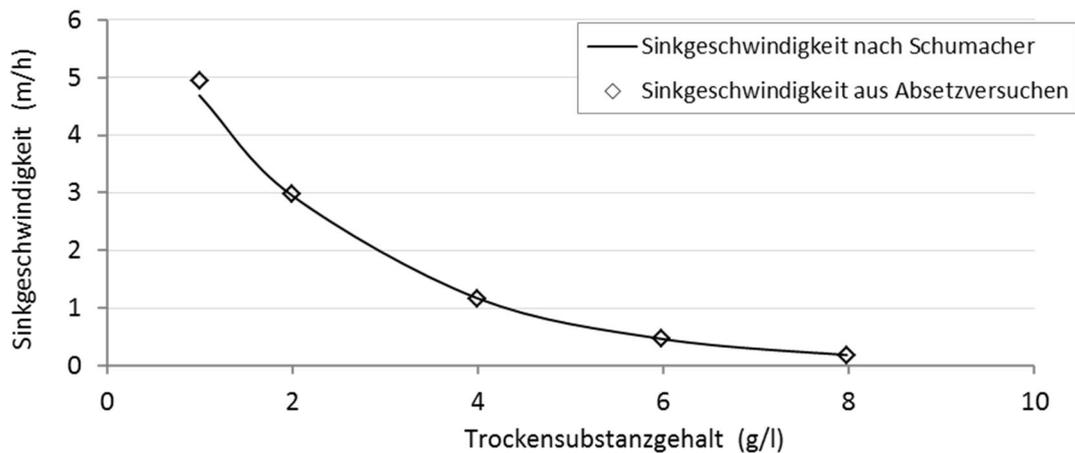


Abbildung 5.55: Vergleich der Daten von Modell und Experiment zur Sinkgeschwindigkeit.

Modellierung des Stofftransports

Die Modellierung des Sauerstoffeintrages basiert auf den Grundlagen der Penetrationstheorie. Der Stofftransport wird entsprechend der nachfolgend vorgestellten Gleichungen funktional in das Modell implementiert. Da laut den Untersuchungen von [Ste96] keine signifikanten Änderungen der Henry-Koeffizienten mit einer Änderung des TS-Gehalts zu erwarten sind, kann der Wert von Sauerstoff und reinem Wasser für die Grenzflächenkonzentration verwendet werden. Für die Modellierung des Stoffdurchgangskoeffizienten k_L wird der Ansatz der Penetrationstheorie nach [Hig35] verwendet,

$$k_L = 2 \cdot \sqrt{\frac{D_L \cdot v_B}{\pi \cdot d_B}} \quad (5.16)$$

Der Diffusionskoeffizient kann nun nach [Ein05] über die dynamische Viskosität der Flüssigkeit definiert werden

$$D_L = \frac{1}{3 \cdot \pi \cdot d_{O_2} \cdot \eta_L} \cdot \frac{R \cdot T}{N_A} \quad (5.17)$$

Mit der idealen Gaskonstante R , der Temperatur T , dem Durchmesser eines Sauerstoff-Moleküls d_{O_2} und der Avogadro-Konstante N_A wird der Diffusionskoeffizient berechnet und in Abhängigkeit des TS-Gehalts darstellbar. Der Stoffdurchgangskoeffizient ergibt sich damit zu

$$k_L = \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{R \cdot T \cdot v_B}{3 \cdot d_{O_2} \cdot \eta_L \cdot N_A \cdot d_B}} \quad (5.18)$$

Abbildung 5.56 zeigt den für ein Belebungsbecken relevanten Wertebereich von k_L , in Abhängigkeit von v_s und η_L .

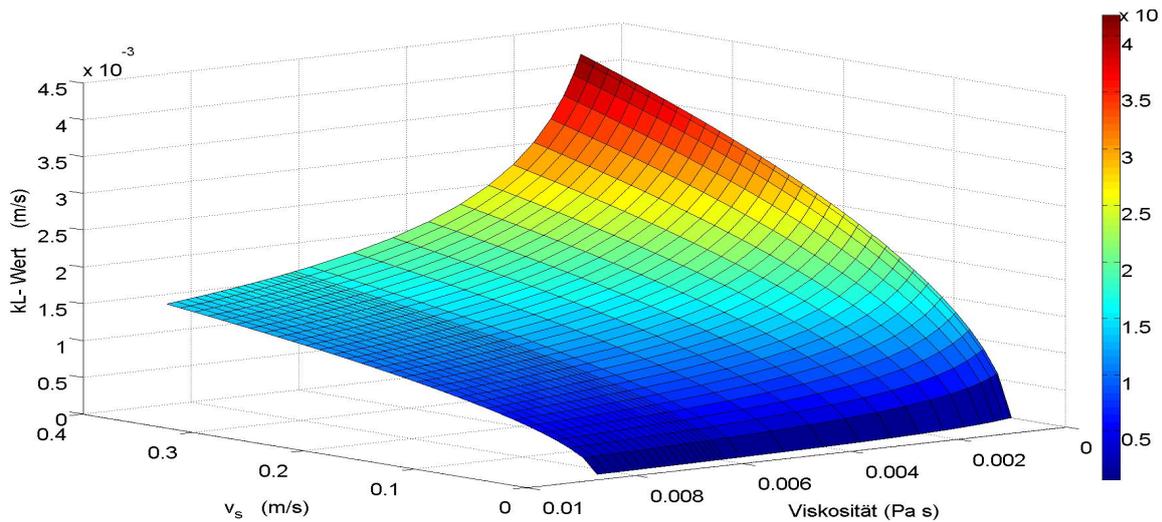
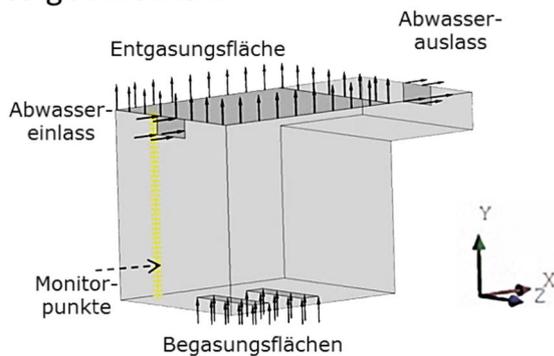


Abbildung 5.56 Modellierter Stoffdurchgangskoeffizient in Abhängigkeit der Viskosität und der Blasenauftiegs-
geschwindigkeit

Einfluss der Viskosität auf den Sauerstoffeintrag

Zur Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse mit Literaturdaten wird zunächst die Testgeometrie 1 (vgl. Abbildung 5.57) verwendet; als Referenz zur Berechnung des α -Werts dienen Sauerstoffeintragungssimulationen in reinem Wasser.

Testgeometrie 1



Maße (HxBxT): 1 x 1 x 0,8 m
 Volumen: 0,8 m³ + 0,08 m³
 Flüssigkeitsstrom: 1 kg/s
 TS: 4g/L
 Gasstrom: 0,4 g/s

Abbildung 5.57: Testgeometrie 1.

Es wird eine gleichmäßige feinblasige Bodenbegasung mit ausgebildeter Turbulenz für alle Versuche angenommen, mit einer Blasengröße von 3 mm für die disperse Euler-Phase, da keine näheren experimentellen Informationen verfügbar sind. Das Ergebnis der Simulation ist in Abbildung 5.58 zu sehen. Die Verweilzeit des Abwassers wird mit dem Wasserzulauf von 1 kg/s so eingestellt, dass die vorher bestimmte Sauerstoffsättigungskonzentration von 7,7 mg/l nicht erreicht wird. Stattdessen stellt sich am Ausgang des Beckens eine Konzentration von 4,79 mg/l ein, sodass der Einfluss der Hydrodynamik bedeutsam ist. Die Turbulenz sorgt für eine homogene Sauerstoffkonzentration im Becken. Durch die Modellierung hängt der $k_L a$ direkt von der Viskosität der Flüssigkeit ab, die vor allem bei niedrigen Scherraten hoch ist.

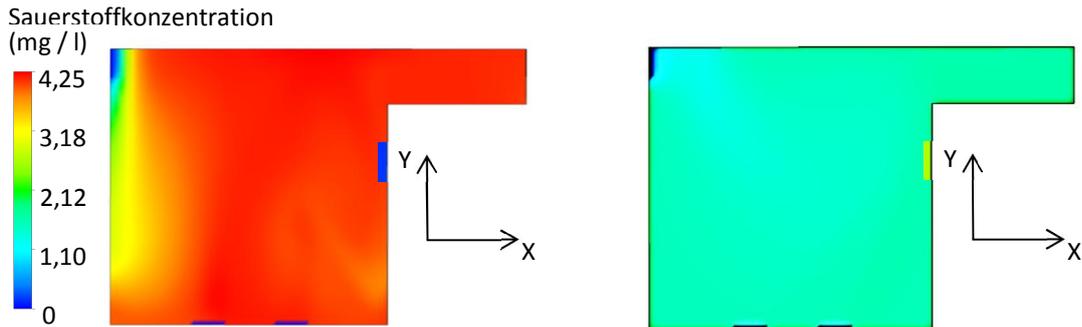


Abbildung 5.58: Links: O₂-Konzentrationsverteilung in reinem Wasser. Rechts: O₂-Konzentration in Belebtschlamm (Viskosität = 0,007 Pa s), entsprechend einem α -Wert von 0,53.

Abbildung 5.59 zeigt den Verlauf des α -Werts für die Simulationsergebnisse der Testgeometrie 1 bei einer stetig ansteigenden Viskosität, im Vergleich zu experimentellen Literaturdaten. Erkennbar ist, dass eine Erhöhung der Viskosität zur Abnahme des α -Werts führt und dem Verlauf der experimentellen Messungen folgt.

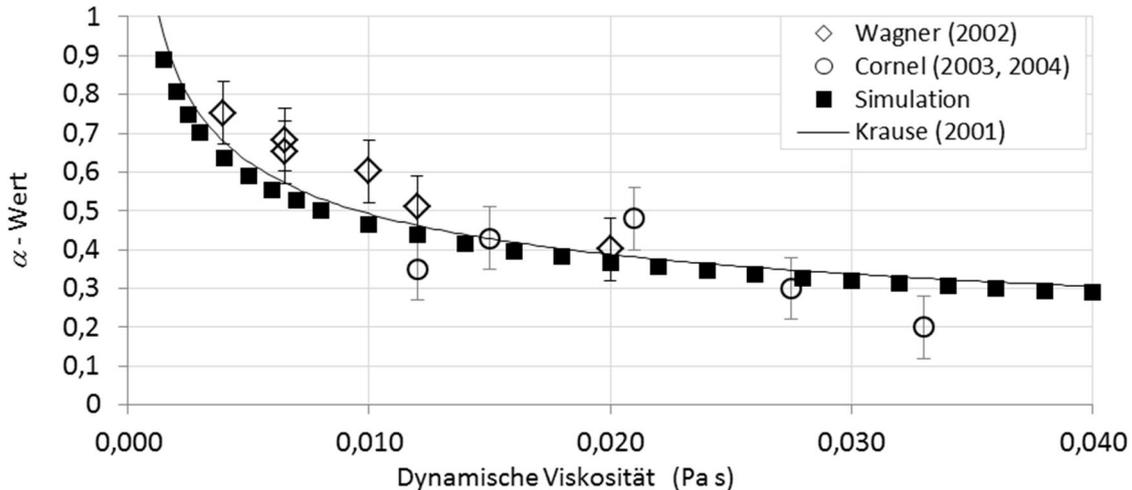


Abbildung 5.59: Simulierter α -Wert im Vergleich zu experimentellen Messungen.

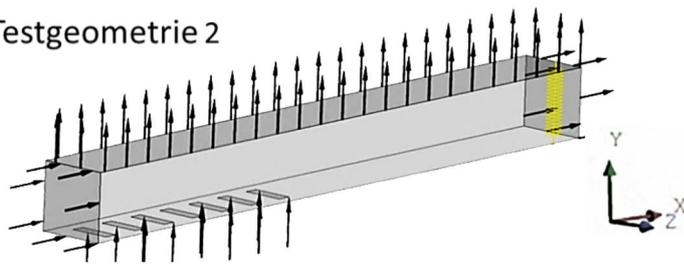
Für die Literaturdaten liegen keine näheren Informationen über die Blasengrößenverteilung vor, die maßgeblichen Einfluss auf die sich einstellende Scherrate hat. Der Verlauf des Simulationsergebnisses lässt sich mit folgendem Potenzansatz gut beschreiben

$$\alpha = 1,16 \cdot \frac{\eta^{-0,269}}{\eta_0} \quad (5.19)$$

Bewertung der Sedimentationsmodellierung

Um den Einfluss des Sedimentationsverhaltens in einem Becken mit Teilbelüftung beurteilen zu können, wird das Sedimentationsmodell in Testgeometrie 2 mit einem TS-Gehalt von 4 g/l und einem Flüssigkeitsstrom von 1,25 kg/s simuliert.

Testgeometrie 2



Maße (HxBxT): 0,5 x 0,5 x 5 m

Volumen: 1,25m³

Flüssigkeitsstrom: 1,25 kg/s

TS: 4g/L

Gasstrom: 10 g/s

Abbildung 5.60: Testgeometrie 2.

Die Belebtschlamm suspension wird direkt nach dem Einlass durch die Belüfter stark verwirbelt, während in der darauf folgenden Denitrifikationszone eine Beruhigung der Strömung stattfindet. In Abbildung 5.61 ist das Ergebnis der Simulation dargestellt. Im *Teil a* der Abbildung stellen die intransparenten Bereiche über dem Durchschnitt liegende TS-Konzentrationen dar. Deutlich zu erkennen ist, dass sich im belüfteten Teilbereich durch Mischungseffekte des aufsteigenden Gases kein erhöhter TS-Gehalt einstellt und Sedimentation damit nicht stattfindet. Im Gegensatz dazu ist im unbelüfteten Bereich eine deutlich erhöhte Schlammkonzentration am Beckenboden zu verzeichnen. Der *Teil b* der Abbildung zeigt, ab welcher Fließgeschwindigkeit sich die Sedimentation verstärkt einstellt: Unterhalb einer Fließgeschwindigkeit von ca. 5 cm/s wird für den gegebenen TS-Gehalt von 4 g/l und einem ISV von 90 ml/g nicht genügend Turbulenz erzeugt, um die Biomasse in Schwebelage zu halten. Dieser Bereich ist damit für das Sedimentieren von Belebtschlamm prädestiniert. Die Erkenntnis deckt sich mit den Ausführungen von [Hol10], der aus Erfahrungen im Kläranlagenneubau bei ähnlichen TS-Gehalten eine minimale Bodengeschwindigkeit von ca. 6 cm/s angibt, um ein Absetzen des Schlammes zu vermeiden. In der heute üblichen Auslegung von Rührwerken werden jedoch Fließgeschwindigkeiten von mindestens 30 cm/s angestrebt. Eine Reduktion der Rührwerksleistung kann vor diesem Hintergrund somit ein hohes Energieeinsparungspotenzial darstellen.

Das Simulationsergebnis zur Sedimentation an der KA Schwerte ist in Abbildung 5.62 dargestellt und zeigt anhand der transparenten Bereiche deutlich, dass innerhalb belüfteter Zonen keine erhöhter TS-Gehalt zu verzeichnen ist. Somit scheint die Sedimentation nur einem kleinen Bereich in den unbelüfteten Denitrifikationsbecken vorbehalten zu sein. Untersuchungen zum Geschwindigkeitsfeld in Bodennähe zeigen, dass die Fluidgeschwindigkeit in diesen Zonen die kritische Tangentialgeschwindigkeit von 5 cm/s unterschreiten würde. [Bra10] untermauert dieses Ergebnis durch seine experimentellen Untersuchungen in einem Membranbelebungsreaktor, welche zeigen, dass die Turbulenz in belüfteten Bereichen das Absetzen von Belebtschlamm vollständig kompensiert. Damit ist anzuzweifeln, ob der Einbau von Rührwerken zwecks Vermeidung von Sedimentation bei ausreichender Belüftung sinnvoll ist.

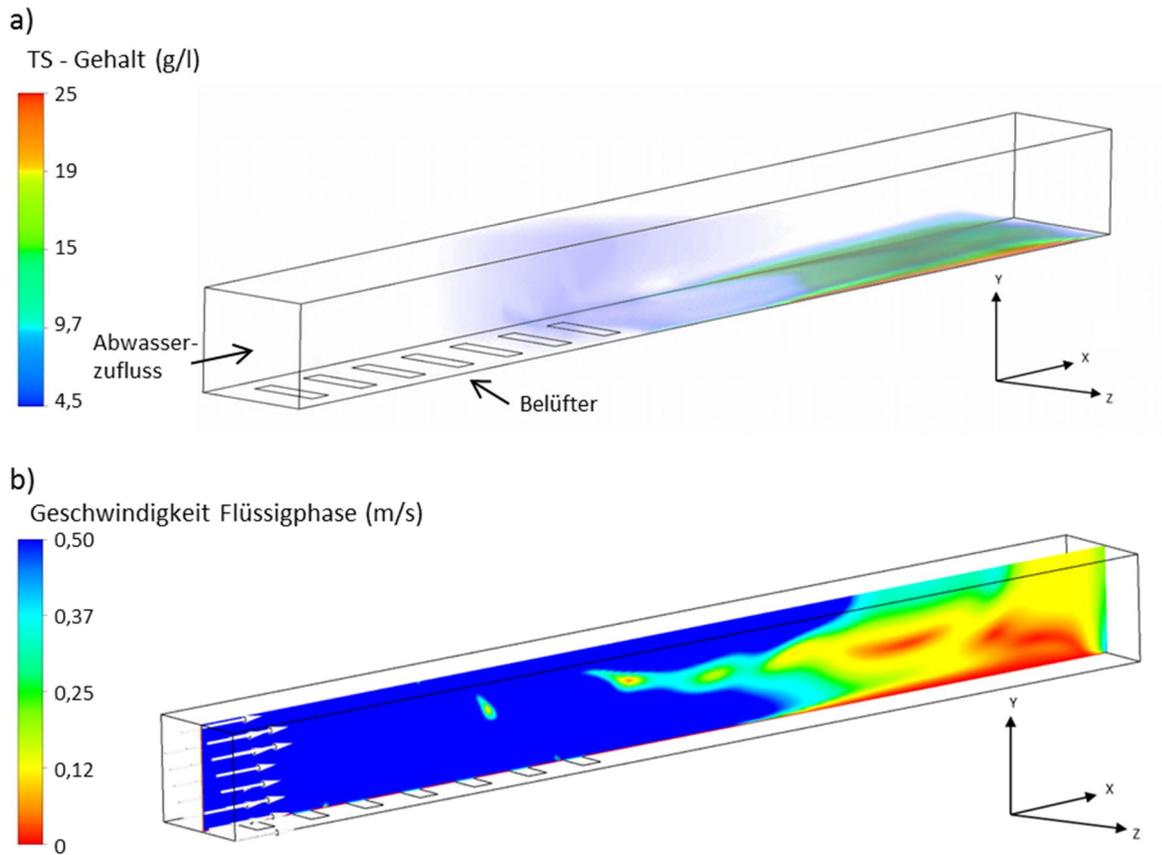


Abbildung 5.61: (a) Darstellung des TS-Gehalts in einer Gerinnestromung zur Klärung von Sedimentation. Transparente Bereiche kennzeichnen TS Gehalte von $< 4,5$ g/l. (b) Schnitt in der X-Y-Ebene: Turbulente Belüftung im vorderen Bereich, Beruhigung der Strömung im hinteren Bereich.

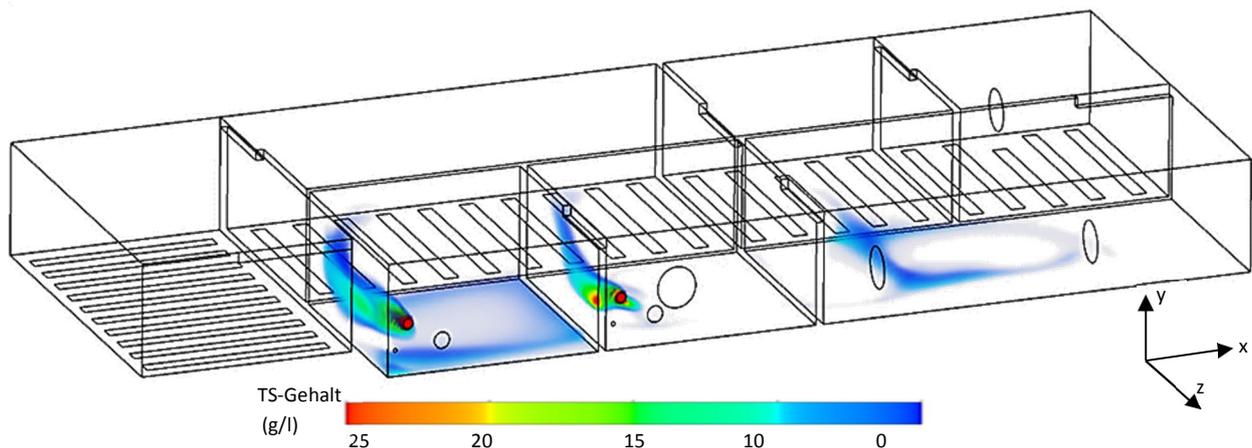


Abbildung 5.62: Stationäre Simulation der KA Schwerte. Die intransparenten Bereiche kennzeichnen Trockensubstanzkonzentrationen von > 7 g/l.

Die Entwicklung der Dreiphasenströmung mit den vorgestellten Modellen ermöglicht die Darstellung der hydrodynamischen Verhältnisse innerhalb des Belebungsbeckens. Es konnte gezeigt werden, dass die Kopplung der einzelnen Modelle in der CFD Umgebung gut funktio-

niert. Zum einen werden die biologischen Prozesse, zum anderen wird die Modellierung des Zusammenspiels von Gas, Flüssigkeit und Belebtschlamm in der Dreiphasenströmung abgebildet. Um Rechenzeit zu reduzieren, kommen algebraische Gleichungen zum Einsatz, die das Sedimentationsverhalten des Belebtschlammes in der Flüssigphase realitätsnah wiedergeben. Die durchgeführten Simulationsergebnisse lassen den Schluss zu, dass die Sedimentation nur eine untergeordnete Rolle in belüfteten Bereichen spielt, in Randbereichen der Denitrifikationszonen aber sehr wohl einen Einfluss hat. Der TS-Gehalt kann somit innerhalb des Belebungsbeckens für den größten Bereich als homogen verteilt angesehen werden. Neben dem Sinkverhalten wird die Rheologie des Belebtschlammes als Funktion des TS-Gehaltes und der Scherrate mit Hilfe von experimentellen Literaturdaten modelliert. Auf Basis der Belebtschlammrheologie wird eine Funktion für den Stoffdurchgangskoeffizienten des Sauerstoffs erstellt und ein entsprechender Wertebereich angegeben.

Im Hinblick auf die Interaktion zwischen Gasblasen und Flocken, werden die Ergebnisse der Röntgentomografie-Untersuchungen aus AP 1 zur weiteren Validierung bzw. Verbesserung der Modelle beitragen.

5.2.2 Arbeitspaket 2.2: Modellanpassung

Für die Modellanpassung ist eine Sensitivitätsanalyse, zum Auffinden kritischer Parameter, ein wichtiges Werkzeug. Das Ergebnis dieser Analyse ist im folgenden dargestellt. Aufgrund der Verzögerungen bei den Experimenten zum AP 1 waren zum Berichtszeitpunkt keine weitergehenden Modellanpassungen möglich. Dies wird in Phase II durchgeführt.

Während die Wirkung bestimmter Faktoren aufgrund ihrer mathematischen Funktion direkt erkennbar ist, kommen andere erst indirekt, in Verbindung mit der Berechnung des Strömungsfelds, zum Tragen. Als Beispiel sei hier die Variation der Blasengröße genannt. Für die Berechnung ihrer Aufstiegsgeschwindigkeit geht der Blasendurchmesser mit der fünften Potenz in die Funktion ein. So wirkt sich eine Erhöhung des Durchmessers um 25 % auf die Geschwindigkeit stärker aus, als die gleiche Erhöhung der dynamischen Viskosität, die nur mit einer Potenz von zwei in die Berechnung eingeht. Im Vergleich dazu, ist die Auswirkung von kinetischen Parametern aufgrund des Wechselspiels zwischen den biologischen Prozessen und dem Stofftransport erst bei der Bestimmung der Ablaufkonzentration zu erkennen. Neben dem Einblick in die Robustheit des Simulationsprozesses, können auch die Auswirkungen von möglichen Messfehlern der Eingangsparameter abgeschätzt werden. Eine weitere zu klärende Fragestellung ist, ob die der Literatur entnommenen Standardwerte einen entscheidenden Einfluss auf das Endergebnis der Simulation haben und durch aufwändige Experimente an einer Kläranlage verifiziert werden müssen. Im Gegensatz zur oft verwendeten Methode der faktoriellen Versuchsplanung wird bei der hier durchgeführten Sensitivitätsanalyse ein Parameter um 25 % vom Ursprungswert erhöht. Als Antwortgrößen werden die quantitativen Abweichungen am Beckenausgang auf drei Signifikanzstufen betrachtet. Beispielsweise wird der Eingangsvolumenstrom erhöht und die Wirkung auf alle Ablaufparameter gleichermaßen getestet. Die Versuche werden im stationären Zustand über ein Skript in Excel importiert und dort ausgewertet. Die entsprechenden Signifikanzstufen werden gemäß Tabelle 5.5 ausgewertet. Das Ergeb-

nis der Analyse ist in Tabelle 5.6 zusammengefasst. Aus den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse lassen sich folgende Feststellungen ableiten:

- Die geringen Schwankungen des Zulaufstroms im Messzeitraum werden vom System vollständig gepuffert. Der Zulaufstrom kann als konstant betrachtet werden.
- Die Rezirkulation ist aufgrund des hohen Volumenstroms ein bestimmender Faktor. Der Rezirkulationsvolumenstrom beträgt im Mittel das Vierfache des Zulaufstroms (200 l/s).
- Schwankungen der Zulaufkonzentrationen, vor allem des Kohlenstoffs, werden durch den schnellen Abbau und die starke Verdünnung zügig ausgeglichen. Sie haben somit nur einen geringen Einfluss auf die Ablaufwerte.
- Das Verhältnis von heterotropher zu autotropher Biomasse im Rücklaufschlamm ist für die Modellierung bedeutsam, da die Biomassekonzentration durch Schlammeindickung auf das Vierfache aufkonzentriert wird. Der Rücklaufschlamm entscheidet damit die Zusammensetzung beider Organismenarten innerhalb des Belebungsbeckens. Zu dem gleichen Schluss gelangen [Mou10] in ihren Arbeiten an einem Laborreaktor.
- Im Hinblick auf die Ablaufwerte sind die Wachstumskinetik der autotrophen Biomasse und die Sterberate von entscheidender Bedeutung. Die Gesamtkonzentration an autotropher Biomasse beträgt im Mittel nur ein Zehntel der heterotrophen Biomasse.
- Die Halbsättigungskonstanten des ASM1-Modells haben einen schwachen Einfluss auf die Simulation. Die Nitrathalbsättigungskonstante zeigt keinen merklichen Einfluss auf die Ablaufparameter. Eine experimentelle Kalibrierung dieser Konstanten scheint im Kläranlagenbetrieb nicht notwendig zu sein.

Physikalische Faktoren haben den größten Einfluss auf die Ablaufwerte, da Wechselbeziehungen zum einen zu den kinetischen Parametern und zum anderen auch untereinander bestehen. Die Blasengröße sticht mit einem wesentlichen Einfluss heraus, da von ihr der Stoffübergang maßgeblich abhängt. Da eine Erhöhung der Blasengröße gleichzeitig die Erhöhung der Scherrate bedingt, korreliert die Viskosität wiederum stark mit dieser.

Tabelle 5.5: Signifikanzniveaus der Sensitivitätsanalyse.

Wirkung	Wirkung auf Ausgangswert	Signifikanzstufe
Niedriges Niveau	0 – 10 %	0
Hohes Niveau	10 % – 25 %	1
Signifikant	> 25 %	2

Tabelle 5.6: Sensitivitätsanalyse Einflussreicher Parameter bei der Simulation der KA Schwerte.

		Wirkung	Konzentration Ablaufwerte					Σ Signifikanz	
			NH ₄	NO ₃	CSB	X_{BH}	X_{BA}		O _{2, aq}
Variierter Faktor									
Volumenstrom	Zulauf		0	0	0	0	0	0	0
	Luft		2	2	1	1	1	2	9
	Rezirkulation		2	2	1	1	1	0	7
	Rücklaufschlamm		1	1	0	1	0	1	4
Zulauf	Konzentration NH ₄		1	1	0	0	0	1	3
	Konzentration NO ₃		0	0	0	0	0	1	1
	Konzentration CSB		0	0	0	0	0	1	1
Rücklauf	Konzentration X_{BH}		2	2	2	1	1	2	10
	Konzentration X_{BA}		2	2	2	1	1	2	10
Kinetik ASM1	μ_H		0	0	0	1	0	0	1
	μ_A		2	2	0	0	1	0	5
	$b_{H,A}$		2	2	1	1	1	1	8
	Y_H		0	1	1	0	0	1	3
	Y_A		1	1	0	0	0	0	2
	K_{NH}		1	1	0	0	0	0	2
	K_{OH}		1	1	0	0	0	0	2
	K_{NO}		0	0	0	0	0	0	0
	$K_{O,A}$		1	1	0	1	0	0	3
Physikalisch	Temperatur		1	1	1	1	1	1	6
	Blasengröße		2	2	1	1	1	2	9
	Scherrate		2	2	0	1	1	2	8
	Viskosität		2	2	1	2	2	2	11
	Widerstandsbeiwert		1	1	0	1	0	1	4

Die Sensitivitätsanalyse zeigt deutlich auf, welchen Stellenwert die im Forschungsvorhaben durchgeführten physikalischen Untersuchungen zur Blasengröße und Rheologie haben.

5.2.3 Arbeitspaket 2.3: Modellerweiterung

Aufgrund der Verzögerungen bei den Experimenten zum AP 1 sind zum Berichtszeitpunkt keine Modellerweiterungen möglich.

5.2.4 Arbeitspaket 2.4: Abschließende Arbeiten, Zusammenfassung, Ergebnisbericht

Wird später bearbeitet.

5.3 Arbeitspaket 3: Optimierung von Belebungsbecken

5.3.1 Arbeitspaket 3.1: Simulationsbasierte Bewertung neuer Belüftungs- & Vermischungsstrategien

Mit Hilfe des vorgestellten CFD-Modells lassen sich Belüftungs- und Vermischungsstrategien durch Simulationen austesten, die eine Prozessintensivierung oder direkte Energieeinsparung ermöglichen. Dazu wird als Referenzanlage die KA Schwerte verwendet.

Die Modellierung der Sinkgeschwindigkeit innerhalb der CFD Umgebung hat gezeigt, dass die Turbulenz in den belüfteten Beckenbereichen vollständig ausreicht, um Sedimentation zu verhindern. Für einen durchschnittlichen Belebtschlamm mit einem TS-Gehalt von 4 g/l und einem ISV von 90 ml/g kann damit die Rührwerksleistung innerhalb der belebten Beckenkompartimente der KA Schwerte vollständig eingespart und in den unbelüfteten Zonen auf ein Minimum reduziert werden, sodass Bodengeschwindigkeiten von etwa 7–9 cm/s, anstatt den momentan angestrebten 30 cm/s, erzielt werden. Nach [Hol10] geht eine Reduktion der erzeugten Geschwindigkeit etwa quadratisch mit der benötigten Rührwerksleistung einher. Dies bedeutet bei den gegebenen Geschwindigkeiten eine Reduktion um den Faktor 11 ($\sim 30^2/9^2$). Mit vier verbauten Rührwerken und einem Gesamtverbrauch von ca. 60 000 kWh/a führt dies zu theoretischen Einsparungen von ca. 54 000 kWh/a.

Ein weiterer Optimierungsansatz betrifft die Kombination von Luftzufuhr und Rezirkulationsmenge. Da hier nahezu unbegrenzt viele Variationsmöglichkeiten denkbar sind, wird der Fokus zunächst auf die augenscheinlichsten Optimierungspotenziale gerichtet. So ist die Konzentration an Sauerstoff durch den hohen Gehalt an leicht abbaubaren Substraten zu Beginn der Nitrifikation in Becken S4 äußerst gering, da dort eine schnelle Umsetzung des Ammoniums zu Nitrat stattfindet. Sauerstoffsonden der KA Schwerte geben einen Wert von ca. 0,1–0,3 mg/l an, ebenso wie die CFD-Simulationen. Der verfolgte Ansatz bezieht sich darauf, die Luftmenge in diesem Beckenkompartiment so weit zu steigern, dass dort eine verstärkte Nitrifikationsleistung erzielt wird und damit die Elimination des Ammoniums örtlich vorgezogen werden kann. Damit würde sich zwar eine erhöhte Nitratkonzentration in den darauffolgenden Becken (S5 und S6) einstellen, diese würde aber in ihrem Maximum nur der Konzentration des ursprünglichen Referenzfalls entsprechen, da der entstehende Kohlenstoff- und Ammoniummangel einen darüber hinaus gehenden Anstieg unterbindet. Durch das vorzeitige Erreichen der maximalen Nitratkonzentration, könnte die Luftmenge im letzten Kompartiment deutlich reduziert, oder sogar abgeschaltet werden. Die eingesparte Verdichterleistung kann zur Steigerung des Rezirkulationsvolumenstroms genutzt werden, was wiederum eine Reduktion der Nitratkonzentration im Ablauf zur Folge hätte.

In Abbildung 5.63 werden diese Möglichkeiten ausgetestet. Grundsätzlich wird in den drei Varianten jeweils ein ähnlicher Gesamtleistungsverbrauch angestrebt. Ziel ist die Verbesserung der Ablaufwerte. Der Referenzfall wird mit **a)** bezeichnet und kennzeichnet einen Zustand hoher Konzentration von Abwasserinhaltsstoffen. In Variation **b)** wird in den ersten beiden belüfteten Beckenkompartimenten der Luftvolumenstrom verdoppelt, in den letzteren halbiert. Der Rezirkulationsstrom bleibt konstant. Vergleicht man das letzte Beckenkompartiment S7 (Ablauf) so erkennt man, dass die geringere Ablaufkonzentration des Nitrats auf Kosten höherer Ammoniumkonzentrationen im Ablauf geht. In Variante **c)** wird im Becken S4 die Luftmenge auf das Dreifache gesteigert und in den letzten vier Beckenkompartimenten um ein Drittel reduziert. Die im Vergleich zu Variante **b)** erzielte Leistungseinsparung wird für die Leistungserhöhung der Rezirkulationspumpen verwendet. Ihr Volumenstrom wird verdoppelt. Das Resultat ist eine Halbierung der Nitratkonzentration im Ablauf im Vergleich zum Referenzfall **a)**. Lediglich die Ammoniumkonzentration erhöht sich leicht. Weiterhin

wäre als weitere Verfahrensvariante denkbar, den Abwasserzulauf zu einem Teil in das erste Nitrifikationsbecken einzuleiten, um im Fließverlauf die Kohlenstoffkonzentration zu erhöhen.

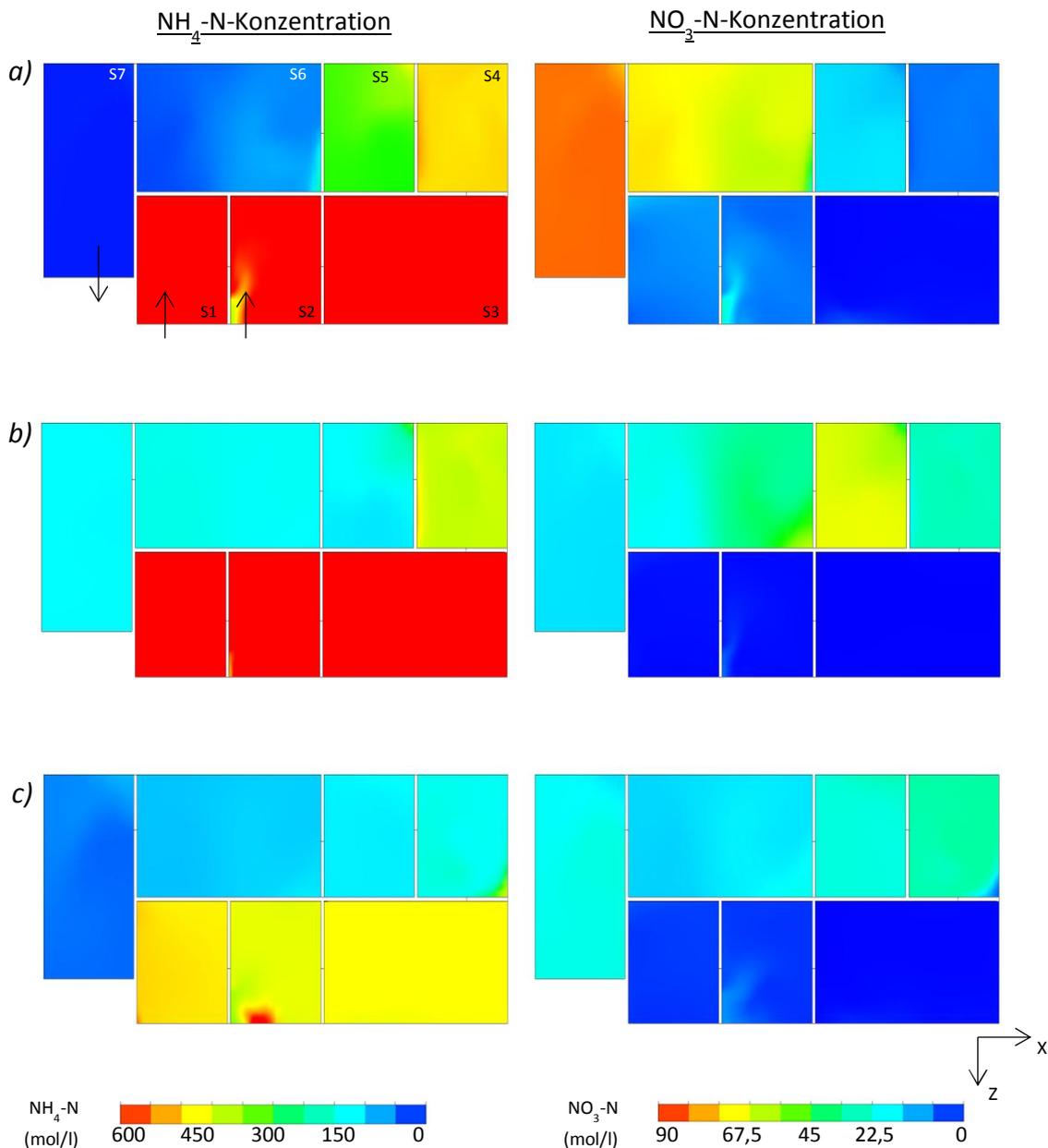


Abbildung 5.63: a) Referenzfall: Mittlere Ammoniumbelastung, original Einstellung der Belüftung und Rezirkulation.

b) Verdoppelung der Luftmenge in den Kompartimenten S4 und S5.

c) Verdreifachung der Luftmenge im Beckenkompartiment S4, Reduktion der Belüftung auf ein Drittel in den Kompartimenten S5 bis S7, Verdoppelung des Rezirkulationsstroms.

Die Kombination von biologischen Reaktionen, Rheologie, Stofftransport und Hydrodynamik bietet die Möglichkeit, schnell und effektiv Vermischungsstrategien auszutesten. Die ersten Ergebnisse zeigen deutlich das Potenzial der Simulationsmethode auf. Mit Hilfe der entwickelten Strömungsfolger und Konzentrationsprofilmessungen lassen sich die Simulationser-

gebnisse im weiteren verifizieren. Ein weiteres Austesten von Belüftungsstrategien oder Einbauten ist damit gegeben und in einer einfach handhabbaren Art möglich.

5.3.2 Arbeitspaket 3.2: Datenanalyse und Aufbereitung der Ergebnisse

Siehe oben.

5.3.3 Arbeitspaket 3.3: Bewertung der umgesetzten Maßnahmen

Bis zum Berichtzeitpunkt wurden noch keine Maßnahmen an der KA Schwerte umgesetzt.

5.3.4 Arbeitspaket 3.4: Abschließende Arbeiten, Zusammenfassung, Ergebnisbericht

Wird später bearbeitet.

5.4 Arbeitspaket 4: Projektkoordination IWEB

Prof. Dr. Martin Stachowske vom IWEB wird das Projekt in der Funktion eines Mentors kontinuierlich begleiten. In der ersten Projektphase übernimmt er die Koordination und die Beratung der Projektpartner insbesondere in technischer Hinsicht. Mit ihm werden die technische Auslegung des Versuchsstandes am HZDR und die Versuchsplanung erfolgen. Die notwendigen Optimierungsmaßnahmen der Bauweise, Anordnung und Betriebsweise der Begasungs- und Dispergierorgane werden zusammen mit ihm und den Partnern erarbeitet und abgestimmt. Er wird auch die voraussichtliche und erzielte Energie- & Kostenersparnis bilanzieren. Weiterhin wird er das Thema und die Ergebnisse in seinem weitreichenden Netzwerk vertreten und präsentieren.

5.4.1 Arbeitspaket 4.1: Mentoring, Beratung, Koordination

Mentoring

Im Rahmen des Mentoring hat IWEB mit dem HZDR umfangreiche Gespräche geführt, um herauszuarbeiten, wie die Versuchsmethodik des HZDR so eingesetzt werden kann, dass auf die in der Siedlungswasserwirtschaft üblichen Mess- und Analyseverfahren zurückgegriffen bzw. diese bei den Messeprogrammen so berücksichtigt werden, damit die Ergebnisse auf die Steuerung von Belebungsanlagen übertragen werden können.

Beratung

HZDR und IWEB haben sich während der gesamten bisherigen Projektdauer regelmäßig über den Versuchsaufbau für die Hochgeschwindigkeitsmessungen sowie die Erfassung der Blasenbilder abgestimmt. Des Weiteren wurden Fragen zur Versuchsorganisation und zum Mess- und Analysenprogramm abgestimmt.

Koordination

Im Projekttreffen zu Phase I am 14. November 2014 im HZDR wurden die bisherigen Arbeitsergebnisse sowie der Fertigungsstand der Versuchseinrichtungen vorgestellt.

Simulationsrechnungen können bis zu einem Blasendurchmesser von 0,5 mm ausgeführt werden.

Die Versuchseinrichtungen für die Erfassung der Blasenbilder sind teilweise in Betrieb bzw. für die Aufzeichnungen mit der Hochgeschwindigkeitskamera betriebsbereit. Ein Reaktor für die Röntgenmessungen mit Rohren mit 100 mm und 400 mm Durchmesser ist in der Endmontage. Erste Testreihen zur Erfassung des Blasenbildes eines Tellerbelüfters mit einer Membran sind abgeschlossen.

IWEB hat 5 Begaser mit unterschiedlichem Profil – Flanke bzw. Ebene – sowie Kanülen durchmessern zwischen 0,05 mm und 0,20 mm für Voruntersuchungen zur Auswahl der für die weiteren Untersuchungen geeigneten geliefert.

Projektfortsetzung

Mit dem Stand der Versuchseinrichtungen und der Verfügbarkeit des Simulationsmodells sowie den Kanülenbegasern können die Arbeiten wie beantragt weitergeführt werden.

5.4.2 Arbeitspaket 4.2: Bilanzierung der vorauss. Energie- & Kostenersparnis

Vorbereitung von AP 4.2 - Bilanzierung der vorauss. Energie- & Kostenersparnis

Grundlage für die Bilanzierung der Energie- und Kostenersparnis sind die eingetragene Luftmenge, der hierzu erforderliche Systemdruck als Summe aus dem spezifischen Druck zum Durchströmen eines Begasers und dem Druck in den Leitungen zwischen einem Kompressor und dem Begaser bzw. Belüfter sowie die Verteilung der Luftmenge in der Wassersäule über dem Begaser bzw. Belüfter und letztlich die Effizienz des Sauerstoffeintrags in das Wasser.

Bei Membranbelüftern steigt der Druckabfall beim Durchströmen des Belüfters mit zunehmender Fördermenge parabolisch an während beim Kanülenbegaser bis zu einer bestimmten Fördermenge der Druckabfall beim Durchströmen näherungsweise konstant bleibt und bei Erreichen eines Widerstandspunktes näherungsweise tangential ansteigt.

Der Druckabfall beim Durchströmen der Begaser bzw. Belüfter kann dadurch gering gehalten werden, dass zum Eintrag der erforderlichen Luftmenge so viele Begaser bzw. Belüfter eingesetzt werden, dass der Druckabfall minimiert wird. Dies würde jedoch zu einer unverhältnismäßig hohen Anzahl von Begasern bzw. Belüftern mit so hohen Investitionen führen, dass der Betrieb mit dieser hohen Anzahl von Begasern bzw. Belüftern unwirtschaftlich ist.

Die Wirtschaftlichkeit durch Energie- und Kostenersparnis ergibt sich durch eine möglichst geringe Anzahl von Begasern bzw. Belüftern, mit denen die Luft möglichst fein verteilt wird, um durch einen technisch maximal möglichen Sauerstoffübergang und einen geringen Druckabfall beim Austritt der Luft aus den Begasern bzw. Belüftern den Energieverbrauch zu minimieren.

Am HZDR sind hierzu alle erforderlichen Messgeräte betriebsbereit, um den Durchfluss und die begaser- bzw. belüfterspezifischen Durchflussmengen und Drücke zu erfassen. Weiter sind die Messvorrichtungen betriebsbereit, um die Änderung der Sauerstoffkonzentration in einer Gasblase während des Aufstiegs auf einer Strecke von 3000 mm zu messen.

Messungen der Durchflussmenge und des Begaserdrucks von IWEB mit Kanülenbegasern mit Kanüledurchmessern von 0,12 mm, 0,09 mm und 0,07 mm, die den Angaben für den Oxyflex MF 1100 gegenübergestellt wurden und in Abbildung 5.64 wiedergegeben sind, haben ergeben, dass mit den Kanülenbegasern größere Luftmengen gegenüber dem Oxyflex MF 1100 gefördert werden können, ehe ein Druckabfall eintritt. Im Unterschied hierzu muss beim Oxyflex MF 1100 ein Druck von mindestens 16 bis 17 mbar aufgebaut sein, ehe der Luftdurchsatz beginnt.

Die videometrischen Voruntersuchungen mit den Kanülenbegasern der ersten Generation aus Edelstahl mit einzelnen freistehenden Kanülen mit einem ungefähren Durchmesser von 0,20 mm (vgl. Kap. 5.1.1 und Abbildung 5.2) haben bereits ergeben, dass die Blasendurchmesser nach Austritt aus den Kanülen kleiner sind als die Durchmesser von Blasen aus handelsüblichen Membranbelüftern. Mittlerweile können Kanülen mit Durchmessern von 0,20 mm, 0,12 mm und 0,09 mm gefertigt werden, so dass realistisch davon ausgegangen werden kann, dass mit Kanülenbegasern Blasen mit noch kleineren als den Durchmessern erreicht werden, als die in den zuvor genannten Messungen (vgl. Kap. 5.1.1) beschriebenen Durchmesser.

Im direkten Vergleich mit dem Kanülenbegaser mit Kanüledurchmessern von 0,12 mm ist theoretisch etwa die Hälfte der Begaser gegenüber dem Oxyflex MF 1100 erforderlich.

Das Verhältnis der Oberflächen von einer Kugel mit einem Durchmesser von 0,20 mm zu einer Kugel mit einem Durchmesser von 0,12 mm beträgt $0,126 \text{ mm}^3$ zu $0,045 \text{ mm}^3 = 2,8$. Damit kann theoretisch mit einem Kanülenbegaser mit einem Kanüledurchmesser von 0,20 mm gegenüber einem Kanülenbegaser mit 0,12 mm Durchmesser die 2,8-fache Oberfläche = 2,8-fache Kontaktfläche = 2,8-fache Diffusionsfläche geschaffen werden. Wie sich diese unterschiedlichen Oberflächen auf den Sauerstofftrag und damit auf den Energiebedarf bzw. die erforderlichen Investitionen auswirken, ist ein Teil des Programms der nächsten Projektphasen.

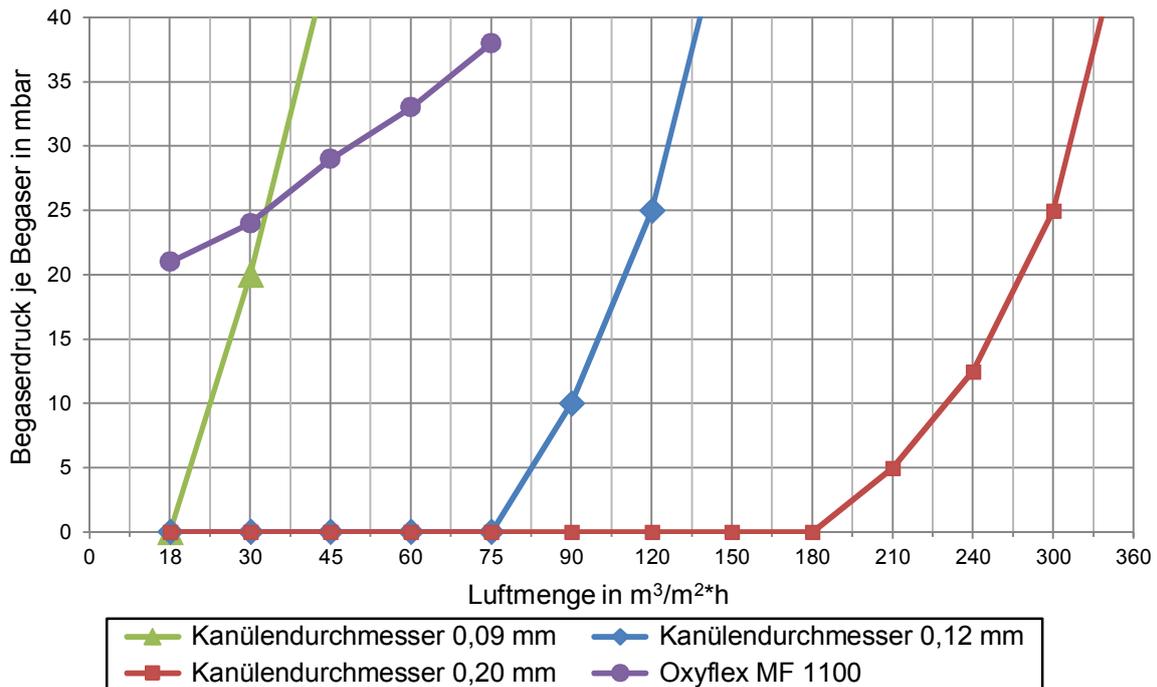


Abbildung 5.64: Vergleich der von IWEB erstellten Druckmessungen mit Kanülenbegasern mit Kanüledurchmessern von 0,20 mm, 0,12 mm und 0,09 mm und je 665 Kanülen (Luftmenge für 5 Platten) mit den Angaben zum Plattenbelüfter Typ Oxyflex MF1100 der Fa. Supratec.

Bei der Förderung von $30 \text{ Nm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ Luft und einem Druckabfall von 23 mbar werden 19,17 W elektrischer Leistung benötigt. Bei einem Preis von 0,30 €/kWh ergeben sich für das Durchströmen von 5 Oxyflex MF 1100 entsprechend einer Fläche von ca. 1 m² bei einem Wirkungsgrad des Kompressors von 90% je 1000 Betriebsstunden Ausgaben von € 5,75 für Energie gegenüber Kanülenbegasern mit Kanüledurchmessern von 0,20 mm bzw. 0,12 mm. Bei in der Praxis durchaus üblichen eingetragenen Luftmengen von $2.500 \text{ Nm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ und einem Druckabfall von dann 33 mbar ergeben sich für 5 Oxyflex MF 110 bei 90% Wirkungsgrad rechnerisch Ausgaben von € 6.390 p.a. gegenüber den Kanülenbegasern mit Kanüledurchmessern von 0,20 mm bzw. 0,12 mm.

Blasendurchmesser

In den nächsten Projektphasen können am HZDR Blasendurchmesser bis 0,5 mm gemessen werden. Von der TU Dortmund können Simulationsrechnungen bis zu 0,5 mm durchgeführt werden.

Berechnungen des Luftbedarfs

Für die Berechnungen zur Reduktion des Luftbedarfs in Abhängigkeit von der Blasengröße werden die Berechnungsansätze des HZDR für alle Berechnungen angewendet.

Reduktion des Förderdrucks durch Vergrößerung der Eintragsfläche für Luft

Neben der Reduktion der Luftmenge soll beim Lufteintrag auch ein minimaler Druck im gesamten System durch eine Reduktion der Fördermenge bei gleichzeitiger Verteilung der Luftmenge auf eine größere Belüfter- bzw. Begaserfläche untersucht werden. Hierbei werden die Investitionen in eine größere Belüfter- bzw. Begaserfläche dem reduzierten Lufteintrag in einer Investitionsrechnung gegenübergestellt.

5.4.3 Arbeitspaket 4.3: Einsatz an Kläranlagen, begleitender Einbau Begasungs-/Dispergiererelemente

Für den Einsatz verschiedener Belüfter bzw. der Begaser ist folgendes Konzept für die Phase II vorgesehen. Es werden zwei Behälter mit gleicher Geometrie und gleichem Volumen betrieben. Diese Behälter können vorzugsweise gebrauchte See-Container sein.

Standort

Die Versuche werden auf der Kläranlage Ebersbach der SOWAG durchgeführt.

Versuchsdurchführung und Versuchsdauer

Es werden die Belüfter Oxyflex MF 1100 der Fa. Supratec, wie sie vom Ruhrverband derzeit auf der Kläranlage in Schwerte eingesetzt werden sowie Belüfter, die die SOWAG einsetzt und Kanülenbegaser in vergleichenden Untersuchungen eingesetzt.

Ein Versuchszyklus ist mit insgesamt vier Wochen konzipiert. Hierbei sind die ersten beiden Wochen als Adaptionszeit für die Biologie vorgesehen. Für beiden folgenden Wochen wird von einem stabilen Zustand der Biologie ausgegangen. In dieser Zeit wird untersucht, wie sich die beiden parallel betriebenen Belüfter bzw. Begaser beim Sauerstoffeintrag und im Hinblick auf die einzutragende Luftmenge unterscheiden.

Folgende Versuchseinstellungen im Parallelbetrieb sind vorgesehen:

1. Belüfter Oxyflex MF 1100 mit Kanülenbeaser
2. Belüfter Oxyflex MF 1100 mit von der SOWAG eingesetzten Belüftern
3. Von der SOWAG eingesetzten Belüfter mit Kanülenbegasern
4. Verifizierung der besten Ergebnis in einem nachmaligen Versuchszyklus

Mess- und Analysenprogramm

Messungen: Umgebungstemperatur, Luftfeuchte in der Umgebung, pH-Wert, O₂-Konzentration in den Reaktoren, atmosphärischer Luftdruck, Systemdruck, Temperatur hinter dem Kompressor und im Begaser

Analysen: CSB, Ammonium, TS, oTS, ISV, Überschussschlammmenge

Hydrodynamik: Strömungsfolger, Tauchgittersensor, Punktsonden (Verweilzeit, Dispersion)

Die Messungen werden teilweise stichprobenartig und teilweise kontinuierlich durchgeführt.

Betrieb

Die SOWAG stellt den Zu- und Ablauf sowie die Energie bereit. Sie unterstützt im noch zu vereinbarenden Umfang bei den Messungen und Probenahmen sowie bei einzelnen Analysen.

Für das Mess- und Analysenprogramm sowie die Mess- und Probenahmestellen sowie Mess und Probenahmezeiten ist HZDR zuständig.

5.4.4 Arbeitspaket 4.4: Bilanzierung der erzielten Energie- & Kostenersparnis

Die Energiebilanz wird für die zu fördernde Luftmenge erstellt. Hierbei wird die Luftmenge ermittelt, die bei der jeweiligen Umgebungstemperatur, dem jeweiligen atmosphärischen Druck und der Luftfeuchte erforderlich ist, um bei den Umgebungsbedingungen 1 kg Sauerstoff O_2 in das Wasser einzutragen.

Die Dichte der zu fördernden Luft ist in Tabelle A1 (siehe Anhang A) bei den ausgewählten Parametern

- atmosphärischen Drücken von 101325 Pa, 95525 Pa und 106025 Pa
- Feuchten von 0%, 50% und 100%
- Temperaturen von -20 ° C bis 40 ° C in Schrittweiten von 10 ° C sowie der Temperatur von 15 ° C

errechnet worden.

Damit können die Dichten der Luft in den genannten Bandbreiten der Parameter berechnet werden. Für die endgültige Auswertung sind noch die Verknüpfungen mit den jeweiligen Zustandsbedingungen zu erstellen.

Die Energiebilanz setzt sich zusammen aus dem Förderdruck F in mbar, dem Begaserdruck B in mbar und dem hydrostatischen Druck H in mbar. Die Summe dieser Drücke ergibt den Systemdruck S in mbar. Die Energiebilanzierung ist in Tabellenform in Anhang A Tabelle A2 enthalten.

Die Werte in Tabelle A2 sind als Platzhalter zur Prüfung der Verknüpfungen eingetragen. Die Berechnungsergebnisse ergeben sich aus den teilweise eingegebenen Werten. Insbesondere ist zu berücksichtigen, dass in der Tabelle der Luftbedarf bei Temperaturen von 0 ° C , 15 ° C und 30 ° C nebeneinanderstehen, die Temperaturen von 0 ° C und 30 ° C jedoch insgesamt zwischen 20 und 40 Tagen im Jahr liegen. Diese Zustandsbedingungen wurden dadurch simuliert, dass für Temperaturen von 0 ° C und 30 ° C 250 Betriebsstunden bei den jeweiligen Feuchtegraden und für die Temperatur von 15 ° C 1500 Betriebsstunden angesetzt wurden.

Dieses Schema bildet die Berechnungsgrundlage, um den Energiebedarf zur Förderung der jeweiligen Luftmengen in Abhängigkeit von den jeweiligen Zustandsbedingungen wie die Feuchte, die Temperatur und den atmosphärischen Luftdruck zu ermitteln.

Dieses Schema wird mit den Dichten in Tabelle A1 verknüpft.

Für jeden eingesetzten Begaser wird dieses Schema eingesetzt und die Ergebnisse werden einzeln ermittelt.

Im Schema für die Energiebilanz wurden die Werte für die Luftfeuchte, den Luftdruck und die Lufttemperatur als Randbedingungen eingetragen. Eine Luftfeuchte von 0 % oder 100 % sind ebenso wie die im Schema eingetragenen oberen und unteren Werte für den Druck und die Temperatur Extremwerte oder eher extreme Ausnahmen. Die realen Randbedingungen für

die oberen und unteren Werte der Umgebungsbedingungen sollen nach Auswertung der Messergebnisse im Rahmen dieses Projektes festgelegt und für weitere Anwendungen empfohlen werden.

Darüber hinaus ist es vorgesehen, die experimentell ermittelten Abbauraten in die Energiebilanzierung einzubeziehen. Aus der Korrelation von eingetragener Sauerstoffmenge und dem damit im direkten Zusammenhang stehenden Energieverbrauch sowie den Abbauraten der Abwasserparameter wird ein jeweils begaserspezifischer Leistungsparameter für die eingetragene Energie und die hierbei erzielte Abbaurate für die einzelnen Abwasserparameter in einem noch festzulegenden Zeitraum beispielsweise in kg CSB eliminiert/(kWh *d) ermittelt.

5.4.5 Arbeitspaket 4.5:Kostenanalyse, Abschlussbericht, Projektpräsentation

Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse stellt die Kosten für die konventionellen Membranbelüfter mit den Kosten für die Kanülenbegaser gegenüber. In die Analyse gehen gleichermaßen die Kosten aus Investitionen und Kapitaldienst als auch die Salden aus dem begaserspezifischen Energieverbrauch ein.

Der Energieverbrauch bezieht sich auf die Belebung. Dieser Ansatz unterscheidet sich von Energiebilanzen für die biologische Abwasserreinigung, bei denen der Energieverbrauch für die Belebung und die Nachklärung/den Rücklauf als Gesamtverbrauch für die biologische Abwasserreinigung in die Energiebilanzen eingeht.

Tabelle 5.7: Schema der Wirtschaftlichkeitsanalyse.

Zeile		MF 1100	Kanülen- begaser
	Begasermodell		
1	spez. Investition netto	€/m ²	750
2	belegte Fläche je KA	m ²	20
2	Investition netto	€	15.000
3	Betriebsdauer	a	3,0
4	Zinsen p.a.	%	5,00
5	Ø Zins p.a.	%	2,50
6	Ø Zins	€/a	375,0
7	AfA	€/a	5.000,0
8	Ø Kapitalkosten	€/a	5.375,0
9	Kosten je KA	€	16.125

Zeile		MF 1100	Kanülen- begaser
10	Energieverbrauch biol. Reinigung BB * NK	kWh/a	1.500.000
11	angeschlossene EW	EW	40.000
12	spez. Energieverbrauch	kWh/(EW*a)	37,500
13	Anteil Energieverbrauch Belegung	%	40,0
14	Energieverbrauch Belegung	kWh/a	600.000

Zeile		MF 1100	Kanülen- begaser
15	Energiepreis	€/kWh	0,250
16	Energiekosten	€/a	150.000
17	Jahreskosten Lufteintrag BB [Zeile 8 + Zeile 16]	€/a	155.375
18	Saldo Jahreskosten Lufteintrag BB	€/a	7.500

Zeile		MF 1100	Kanülen- begaser
19	Ø spez. CO ₂ -Emission - Mg CO₂/MWh	1	
20	CO ₂ -Emission MF 1100	Mg CO ₂ /a	600
21	CO ₂ -Emission Kanülenbegaser	Mg CO ₂ /a	570
22	Saldo CO ₂ -Emission MF 1100 ./. Kanülenbegaser	Mg CO ₂ /a	30

6 Fazit

Die von TUD in der ersten Projektphase 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 oder von strömungsführenden Einbauten zu analysieren. An den von HZDR realisierten zwei Versuchsaufbauten wurden hochwertige Experimente zur Erhebung von bisher nicht vorhandenen Referenzdaten zur Validierung und weiteren Verbesserung dieser Simulationsmodelle durchgeführt. Die aufbereiteten Ergebnisse stehen nun für die Validierung und Weiterentwicklung der Simulationsmodelle zu Verfügung.

Der Einsatz von instrumentierten Strömungsfolgern an der KA-Ebersbach hat erste Daten über die Strömungsverhältnisse und die Wirkung der Änderung im Rührerbetrieb gezeigt. Die im Praxistest auftretenden Probleme bei der Anwendung und der Rückgewinnung der Strömungsfolger wurden erkannt. Die daraufhin überarbeiteten Sensorpartikel wurden an der KA-Großschweidnitz getestet. Die Rückgewinnung der Sensorpartikel verlief erfolgreich. Zudem wurden mit den Sensorpartikeln Daten während der Nitrifikationsphase aufgezeichnet. Über die gemessene Eintauchtiefe wurden die Durchmischung und die vertikale Strömungsdynamik im begasteten Becken charakterisiert. Durch die weitergehende Analyse der gemessenen Inertialgrößen der Sensorpartikel in Phase II sind zusätzliche Erkenntnisse über die horizontale Strömung im Becken zu erwarten.

Ein hohes Potenzial zur Effizienzsteigerung der Belüftung konnte bereits in den Voruntersuchungen eines innovativen Begaserkonzeptes der IWEB nachgewiesen werden. Die Vergleichsmessungen mit Standardbegasern haben gezeigt, dass der neuartige Begasertyp unter realen Strömungsbedingungen mit Standardbegasern vergleichbar ist und bzgl. des Lufteintrages und der Vermischung teilweise bessere Ergebnisse liefert.

Die aufgebauten Experimente sind qualitativ besonders hochwertig, um die notwendige Güte und Relevanz der Referenzdaten zu gewährleisten. Damit waren eine umfangreiche Planung, die Erfüllung von Sicherheitsauflagen und eine aufwändige Fertigung verbunden. Dies hat bei der Umsetzung der komplexen Versuchsaufbauten in Bezug auf den ursprünglich geplanten Projektablauf zu Verzögerungen geführt. Die Projektpartner erachten das gemeinsame Vorgehen im Projekt und die aufwändigen Experimente uneingeschränkt als notwendig und zielführend zur Erreichung der vereinbarten Ziele.

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 anwendungsnahe Konzept sowohl im Aufbau als auch im Ablauf verfolgen. Besonders die Betrachtung der gekoppelten messtechnischen und numerischen Untersuchungen in vier Größenskalen der Versuchsanordnung vom DN100-Messrohr (Phase I) und dem Labortank (Phase I) über den geplanten Technikumstank (Phase II+III) bis hin zu den Referenzanlagen der SOWAG und des Ruhrverbandes (Phase I-III) wird nachhaltig zur Verbesserung der Modelle beitragen und die Entwicklung wirksamer Auslegungsmethoden zur Optimierung der Anlagen vorantreiben.

7 Literaturverzeichnis

- [Ban13] BANOWSKI, M.; LUCAS, D.; HOPPE, D.; BEYER, M.; SZALINSKI, L.; HAMPEL, U.: Segmentation of ultrafast X-ray tomographed gas-liquid flows in a vertical pipe at different flow regimes, WCIPT7 (2013), 485-494.
- [Bra10] BRANNOCK, M.; WANG, Y.-H.; LESLEY, G.: Mixing characterization of full-scale membrane bioreactors: CFD modelling with experimental validation, Water Research 44 (2010), 3181-3191.
- [Cor03] CORNEL, P.; WAGNER, M.; KRAUSE, S.: Investigation of oxygen transfer rates in full scale membrane bioreactors, Water Science and Technology 47(11) (2003), 313-319.
- [Cor04] CORNEL, P.; WAGNER, M.; KRAUSE, S.: Optimierung einer Belebungsanlage mit Membranfiltration, Abschlussbericht Forschungsvorhaben MUNLV, NRW (2004).
- [Ein05] EINSTEIN, A.: Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen, Annalen der Physik 17 (1905), 549.
- [Fre10] FREY, W.; LEOBENDORF, Ö.: Durchmischung von Belebungsbecken mittels Belüftungssystemen, 6. Frankfurter Abwassersymposium, 2010, 17.
- [Hab08] HABERKERN, B., et al.: Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2008.
- [Has06] HASANEN, A.; ORIVUORI, P.; AITTAMAA, J.: Measurements of local bubble size distributions from various flexible membrane diffusers, Chemical Engineering and Processing 45(2006), 291-302.
- [Hig35] HIGBIE, R.: The rate of absorption of a pure gas into a still liquid during short periods of exposure, American Institute of Chemical Engineers 31(65) (1935), 365-389.
- [Hol10] HOLTHAUSEN, E.: Reduzierung der Rührerleistung in Becken auf Kläranlagen, Patent DE102009016634A1 (2010), Deutschland.
- [Jan05] JANZEN, M.; ROSENWINKEL, K.-H.: Verbesserung der Gestaltung von Zu- und Abläufen bei horizontal durchströmten runden Nachklärbecken, Abschlussbericht, Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen, Universität Hannover (2005).
- [Kak87] KAK, A.C.; SLANEY, M.: Principle of computerized tomographic imaging, IEEE Press (1987).
- [Kol10] KOLISCH, G., et al.: Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen Eine Ergebnisbetrachtung zu durchgeführten Energieanalysen. KA Abwasser Abfall, 57(2010)10, 1028.
- [Kre08] KREPPER, E.; LUCAS, D.; FRANK, T.; PRASSER, H.-M.; ZWART, P. J.: The inhomogeneous MUSIG model for the simulation of polydispersed flows, Nuclear Engineering and Design 238 (2008), 1690-1702.

- [Mou10] LE MOULLEC, Y.; GENTRIC, C.; POTIER, O.; LECLERC, J. P.: CFD simulation of the hydrodynamics and reactions in an activated sludge channel reactor of wastewater treatment, *Chemical Engineering Science* 65 (2010), 492-498.
- [Luc10] LUCAS, D.; BEYER, M.; SZALINSKI, L.; SCHÜTZ, P.: A new database on the evolution of air-water flows along a large vertical pipe, *International Journal of Thermal Sciences* 49(2010), 664-674.
- [Rat13] RATKOVICH, N.; HORN, W.; HELMUS, F. P.; ROSENBERGER, S.; NAESSENS, W.; NOPENS, I.; BENTZEN, T. R.: Activated sludge rheology: A critical review on data collection and modelling, *Water Research* 47(2) (2013), 463-482.
- [Rei10] REINECKE, S., et al.: Autonomous sensor particle for parameter tracking in large vessels, *Meas. Sci. Technol.*, 21(2010)8.
- [Rei14] REINECKE, S.: Instrumentierte Strömungsfolger zur Prozessdiagnose in gerührten Fermentern, Dissertation, *Dresdner Beiträge zur Sensorik, Band 52*, TUDpress, 2014, ISBN: 978-3-944331-50-8.
- [Sch06] SCHUMACHER, S.: Leistungsbestimmende Prozesse in Nachklärbecken - Einflussgrößen, Modellbildung und Optimierung, Dissertation, Universität Hannover (2006).
- [Sha82] SHAH, Y., et al.: Design parameters estimations for bubble column reactors, *Chemical Engineering Journal*, 28(1982), 353-379.
- [Som15] SOMMER, A.-E., et al.: Ultra-fast X-ray tomographic measurement of activated sludge aerated by membrane and monolithic spargers, 7th International Symposium on Process Tomography, 1.-3. Sept. 2015, Dresden (Beitrag angenommen).
- [Ste96] STEINMETZ, H.: Einfluss von Abwasserinhaltsstoffen, Stoffwechselprozessen und Betriebsparametern von Belebungsanlagen auf den Sauerstoffeintrag in Abwasser-Belebtschlamm-Gemischen, Dissertation, Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Universität Kaiserslautern, Band 9 (1996).
- [Wag02] WAGNER, J.: Optimierung von Druckbelüftungssystemen in der Abwasserbehandlung, Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik Hannover, Verlag ISAH, 2002, ISBN 3921421527, 9783921421529.
- [Zlo82] ZLOKARNIK, M.: Koaleszenzphänomene im System gasförmig/flüssig und deren Einfluß auf den O₂-Eintrag bei der biologischen Abwasserreinigung, *Korrespondenz Abwasser* 27(1980), 728-734.

Anhang A – Luftmengen

Tabelle A1: Herleitung der zu fördernden Luftmengen in Abhängigkeit der Zustandsbedingungen.

$p_0 \cdot V_0 / T_0 =$	0,0037095003				101325 Pa				φ in %	O ₂			φ in %	O ₂			
$p_0 =$	1,01325	bar							0				50				
$p_0 =$	101325	Pa							Dichte Luft	Dichte O ₂	Luftbedarf	Dichte Luft	Dichte O ₂	Luftbedarf	Dichte Luft	Dichte O ₂	Luftbedarf
$V_0 =$	1	m ³	°C	ρ_{WD} in g/m ³	kgWD in kg/m ³	Ew in mbar	kg Luft/m ³ Luft	kg O ₂ /m ³ Luft	m ³ Luft/kg O ₂	kg Luft/m ³ Luft	kg O ₂ /m ³ Luft	m ³ Luft/kg O ₂	kg Luft/m ³ Luft	kg O ₂ /m ³ Luft	m ³ Luft/kg O ₂		
$T_0 =$	273,15	K	-20	1,08	0,00108	1,260	1,394	0,293	3,415	1,394	0,293	3,417	1,394	0,292	3,419		
			-10	2,36	0,00236	2,870	1,341	0,282	3,550	1,341	0,281	3,555	1,340	0,281	3,560		
			0	4,85	0,00485	6,112	1,292	0,271	3,685	1,291	0,271	3,696	1,289	0,270	3,707		
			10	9,38	0,00938	12,260	1,247	0,262	3,820	1,244	0,260	3,843	1,241	0,259	3,867		
Druckbereich			15	12,80	0,01280	17,017	1,225	0,257	3,887	1,221	0,255	3,920	1,217	0,253	3,954		
Druck _{min}	0,95525	bar	20	17,24	0,01724	23,326	1,204	0,253	3,955	1,199	0,250	4,001	1,194	0,247	4,048		
Druck _{min}	95525	Pa	30	30,26	0,03026	42,337	1,164	0,245	4,090	1,155	0,239	4,177	1,146	0,234	4,268		
Druck _{max}	1,06025	bar	40	50,98	0,05098	73,675	1,127	0,237	4,225	1,112	0,228	4,384	1,096	0,219	4,556		
Druck _{max}	106025	Pa															
Temperaturbereich																	
T_{min}	263,15	K							φ in %	O ₂			φ in %	O ₂			
T_{min}	-20	°C							0				50				

T _{min}	313,15	K					Dichte Luft	Dichte O ₂	Luftbedarf		Dichte Luft	Dichte O ₂	Luftbedarf	Dichte Luft	Dichte O ₂	Luftbedarf	
T _{max}	50	° C	° C	qWD in g/m ³	kgWD in kg/m ³	Ew in mbar	kg Luft/m ³ Luft	kg O ₂ /m ³ Luft	m ³ Luft/kg O ₂		kg Luft/m ³ Luft	kg O ₂ /m ³ Luft	m ³ Luft/kg O ₂	kg Luft/m ³ Luft	kg O ₂ /m ³ Luft	m ³ Luft/kg O ₂	
Volumen-Anteil			-20	1,08	0,00108	1,260	1,315	0,276	3,623		1,314	0,276	3,625	1,314	0,276	3,627	
N	78,08	Vol.-%	-10	2,36	0,00236	2,870	1,265	0,266	3,766		1,264	0,265	3,771	1,263	0,265	3,777	
O ₂	20,95	Vol.-%	0	4,85	0,00485	6,112	1,218	0,256	3,909		1,217	0,255	3,921	1,215	0,254	3,934	
Ar	0,93	Vol.-%	10	9,38	0,00938	12,260	1,175	0,247	4,052		1,172	0,245	4,078	1,170	0,244	4,104	
Σ	1,292	kg	15	12,80	0,01280	17,017	1,155	0,243	4,123		1,151	0,240	4,160	1,147	0,238	4,198	
			20	17,24	0,01724	23,326	1,135	0,238	4,195		1,130	0,235	4,247	1,125	0,233	4,300	
Dichte			30	30,26	0,03026	42,337	1,098	0,231	4,338		1,089	0,225	4,436	1,079	0,220	4,539	
spezifische Gaskonstante R _i	287,058	J/kg * K	40	50,98	0,05098	73,675	1,063	0,223	4,481		1,047	0,215	4,661	1,032	0,206	4,856	
spezifische Gaskonstante R _D	461,523	J/kg * K															
ρ _{Luft} = p / (R _L * T)	1,292	kg/m ³		106025 Pa			φ in 0%	O ₂			φ in %	O ₂			φ in %	O ₂	
N	1,251	kg/m ³					0				50			100			
O ₂	1,429	kg/m ³					Dichte Luft	Dichte O ₂	Luftbedarf		Dichte Luft	Dichte O ₂	Luftbedarf	Dichte Luft	Dichte O ₂	Luftbedarf	
Ar	1,784	kg/m ³	° C	qWD in g/m ³	kgWD in kg/m ³	Ew in mbar	kg Luft/m ³ Luft	kg O ₂ /m ³ Luft	m ³ Luft/kg O ₂		kg Luft/m ³ Luft	kg O ₂ /m ³ Luft	m ³ Luft/kg O ₂	kg Luft/m ³ Luft	kg O ₂ /m ³ Luft	m ³ Luft/kg O ₂	
Gewicht-Anteil Luft			-20	1,08	0,00108	1,260	1,459	0,306	3,264		1,459	0,306	3,266	1,458	0,306	3,268	
N	0,977	kg/m ³	-10	2,36	0,00236	2,870	1,404	0,295	3,393		1,403	0,294	3,397	1,402	0,294	3,402	
O ₂	0,299	kg/m ³	0	4,85	0,00485	6,112	1,352	0,284	3,522		1,351	0,283	3,532	1,349	0,282	3,542	
Ar	0,017	kg/m ³	10	9,38	0,00938	12,260	1,304	0,274	3,651		1,302	0,272	3,672	1,299	0,271	3,693	
Σ	1,293	kg/m ³	15	12,80	0,01280	17,017	1,282	0,269	3,715		1,278	0,267	3,745	1,274	0,265	3,776	
φ	1,000		20	17,24	0,01724	23,326	1,260	0,265	3,779		1,255	0,262	3,822	1,249	0,259	3,865	
			30	30,26	0,03026	42,337	1,218	0,256	3,908		1,209	0,251	3,988	1,200	0,246	4,071	
			40	50,98	0,05098	73,675	1,179	0,248	4,037		1,164	0,239	4,183	1,148	0,230	4,339	

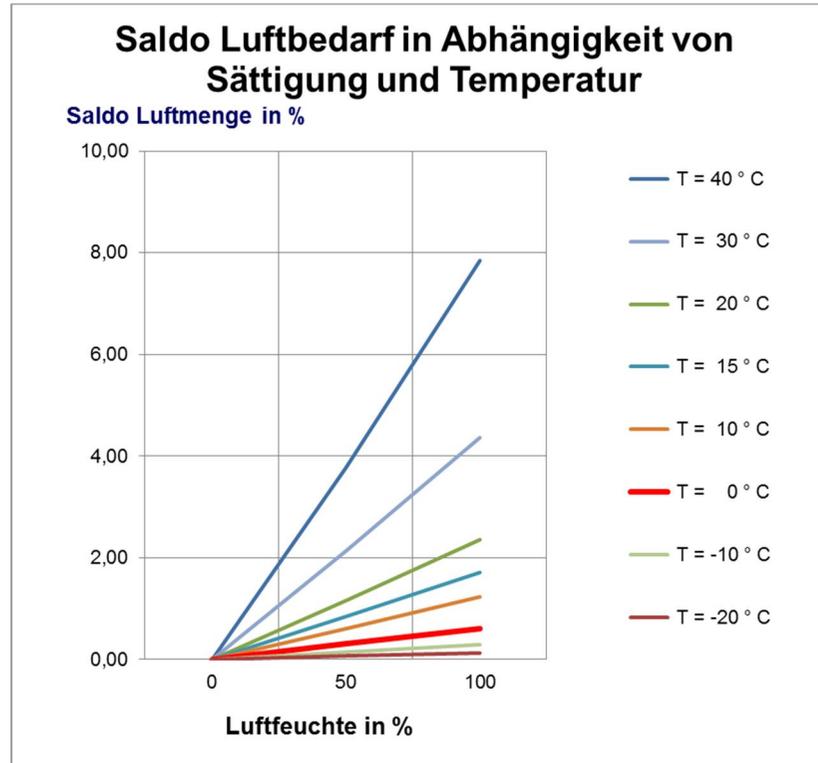
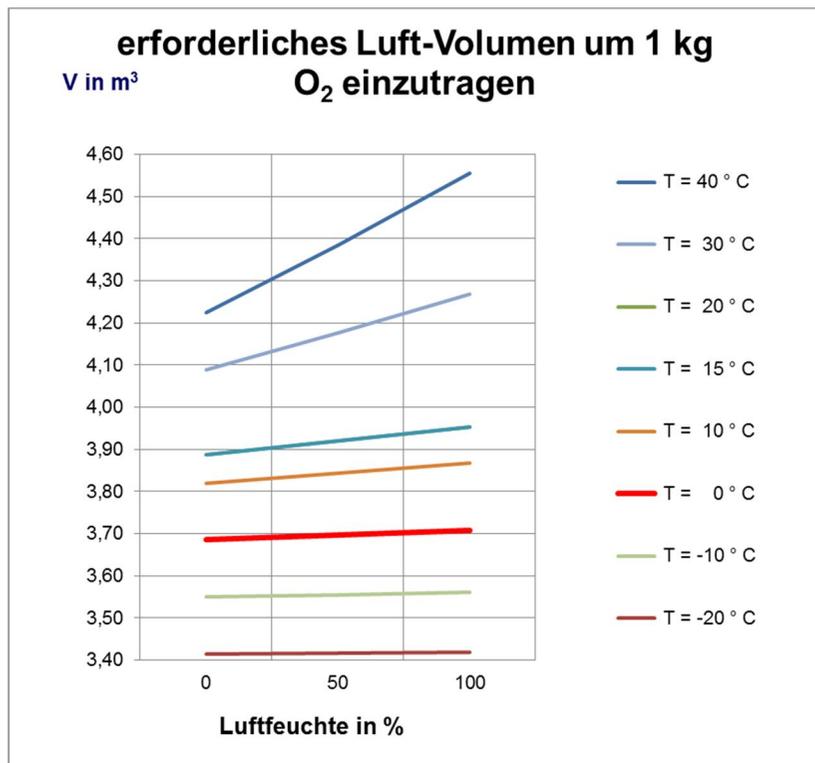


Abb. A1; (Links)Erforderliches Luft-Volumen zum Eintrag von 1 kg O₂ in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen bei 1,01325 hPa. (Rechts) Saldo der zu fördernden Luftmengen in Abhängigkeit von gesättigter Luft und Temperatur bei 1,10325 hPa

Tabelle A2: Schema der Energiebilanz für ein Jahr.

			Fördermenge								
			φ in %								
			0	0	0	50	50	50	100	100	100
			T = 0	T = 15	T = 30	T = 0	T = 15	T = 30	T = 0	T = 15	T = 30
			p = 101325								
Luftmenge aus Tabelle	m ³ Luft/ kg O ₂		3,685	3,887	4,090	3,696	3,920	4,177	3,707	3,954	4,268
Enrgieverbrauch Verdichter	kW	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
Wirkungsgrad Verdichter	η	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
Betriebsstunden Verdichter	h	6000	250	1500	250	250	1500	250	250	1500	250
O ₂	kg/h	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Fördermenge Luft	m ³ /h		1.842	1.944	2.045	1.848	1.960	2.088	1.854	1.977	2.134
Begaserfläche	m ²	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125
Flächenbelastung Begaser	m ³ /(m ² *h)	16	14,7	15,5	16,4	14,8	15,7	16,7	14,8	15,8	17,1
Förderdruck = Druck zwischen Austritt Verdichter und Austritt aus der Luftleitung vor dem Begaser	F in mbar	500 Referenz-wert für Prüfung	461	486	511	462	490	522	463	494	534
Begaserdruck = spezifischer Druck bei Austritt aus dem Begaser in Abhängigkeit von der austretenden Luftmenge	B in mbar	35	32,2	34,0	35,8	32,3	34,3	36,5	32,4	34,6	37,3
Hydrostatischer Druck	H in mbar	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
Systemdruck = Σ Förderdruck und Begaserdruck	S in mbar	935	893	920	947	894	924	959	896	929	971
Energiebedarf Luftförderung	kW	9,35	8,93	9,20	9,47	8,94	9,24	9,59	8,96	9,29	9,71
Verdichter	kW	25,56	25,56	25,56	25,56	25,56	25,56	25,56	25,56	25,56	25,56
Energiebedarf	kWh	34,91	34,48	34,75	35,03	34,50	34,80	35,14	34,51	34,84	35,26
Energieverbrauch	kWh		17.242	17.377	17.513	17.250	17.399	17.571	17.257	17.422	17.632
Energieverbrauch	kWh p.a.		156.663								