

# Abschlussbericht

## Kurzfassung

„**Steigerung der Energieausbeute kommunaler Kläranlagen durch intensivierete mehrstufige Schlammfäulung - Untersuchung am GWK Köln-Stammheim - SEKIS**“

Förderung:

Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft,  
Natur- und Verbraucherschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen



Fachliche Begleitung:

Landesamt für Natur,  
Umwelt und Verbraucherschutz  
Nordrhein-Westfalen



Kooperationspartner:

Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und  
Umwelttechnik, Ruhr-Universität Bochum

Stadtentwässerungsbetriebe Köln AöR

Wupperverbandsgesellschaft für integrale  
Wasserwirtschaft mbH



WiW  
Wupperverbandsgesellschaft für  
integrale Wasserwirtschaft mbH



## Kooperationspartner

Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und  
Umwelttechnik der Ruhr-Universität Bochum  
Universitätsstraße 150  
44801 Bochum



Prof. Dr.-Ing. Marc Wichern (Projektleitung)  
Lothar Klauke, M. Sc.  
Dr.-Ing. Manfred Lübken  
Dr. rer. nat. Edith Nettmann

Stadtentwässerungsbetriebe Köln, AöR  
Ostmerheimer Straße 555  
51109 Köln



Thomas Klein, Dipl.-Ing.

Wupperverbandsgesellschaft für  
integrale Wasserwirtschaft mbH  
Untere Lichtenplatzer Straße 100  
42289 Wuppertal



Dr.-Ing. Inka Hobus  
Dr.-Ing. Gerd Kolisch

## Inhaltsverzeichnis

I	Abkürzungen .....	IV
1	Einleitung .....	1
2	Untersuchung des technischen Verfahrensansatzes .....	2
2.1	Methodische Vorgehensweise .....	2
2.2	Technische Erprobung auf dem GWK Köln-Stammheim .....	3
2.3	Mikrobiologische Untersuchungen .....	5
2.4	Strömungstechnische Simulation .....	8
2.5	Reaktionskinetische Simulation des Faulprozesses .....	10
3	Übertragbarkeit auf die Abwasserreinigung in NRW .....	11
3.1	Potenzialanalyse Nordrhein-Westfalen .....	11
3.2	Voraussetzung für die technische Umsetzbarkeit .....	12
3.3	Auswirkungen auf die biologische Abwasserreinigung .....	13
3.4	Wirtschaftlichkeit des Verfahrensansatzes .....	14
4	Zusammenfassung .....	15
5	Literatur .....	17

## I Abkürzungen

AB-Verfahren	Adsorptions-Belebungsverfahren	
Co	Co-Substrat	
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf	[mg O <sub>2</sub> /L]
EW	Einwohner	
FB	Faulbehälter	
FISH	Fluoreszenz in Situ Hybridisierung	
GKW	Großklärwerk	
NH <sub>3</sub> -N	Ammoniakstickstoff	[mg N/L]
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	Ammoniumstickstoff	[mg N/L]
NRW	Nordrhein-Westfalen	
oTR	Organischer Trockenrückstand	[%]
pH	pH-Wert	
TR	Trockenrückstand	[%]
16S rDNA	ribosomale DNA in der kleinen Untereinheit prokaryotischer Ribosomen	

# 1 Einleitung

Kläranlagen haben aus energetischer Sicht innerhalb einer Kommune einen besonderen Stellenwert. Einerseits sind sie vielfach der größte Einzelverbraucher an Energie, andererseits aber auch ein Energieerzeuger, da bei Anlagen mit separater anaerober Schlammstabilisierung Klär- bzw. Faulgas als Nebenprodukt anfällt. Dieses kann für die Eigenproduktion von Strom und Wärme in Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt werden. Die weitestgehende Deckung des Energiebedarfs der Abwasserreinigung und Schlammbehandlung durch die Eigenproduktion ist ein maßgeblicher Ansatzpunkt zur Steigerung der Energieeffizienz kommunaler Kläranlagen. Sie ist aus Gründen der Nachhaltigkeit mit einer Reduktion des standortbezogenen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes wie auch aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten aufgrund der weiter steigenden Kosten für fremdbezogene Energie von großer Bedeutung.

Hinsichtlich der verfahrenstechnischen Möglichkeiten der Energiebereitstellung für Kläranlagen mit zwei oder mehreren Faulbehälter liegen bisher nur unzureichende Erfahrungswerte vor. Die Mehrheit der Großklärwerke in Deutschland betreibt einstufige Faulungsanlagen. Dabei bietet die mehrstufige Faulung reaktionskinetische Vorteile durch die Kaskadenverschaltung mit einer erhöhten Substratkonzentration in der vorderen Stufe (Bischofsberger et al., 2005). Zudem ergeben sich keine oder geringere Kurzschlussströmungen, der gesteigerte Abbau der organischen Substanz verbessert die Entwässerungseigenschaften des Faulschlammes und kann den Polymerverbrauch der Schlammfällflockung reduzieren. Weiterhin reduzieren sich die zu entsorgenden Schlammengen. Die reaktionskinetischen Zusammenhänge werden auch von dem DWA-Merkblatt M 368 *Biologische Stabilisierung von Klärschlamm* (DWA, 2014) aufgegriffen und sind in Loll et al. (2013) weitergehend beschrieben.

Die Vorteile einer mehrstufigen Faulung sollen für möglichst viele Kläranlagen nutzbar gemacht werden. Dazu soll ein kombinierter Ansatz aus reaktionskinetischer und strömungstechnischer Simulation (ADM bzw. CFD), mikrobiologischen und umsatzspezifischen labortechnischen Untersuchungen sowie einer großtechnischen Erprobung der erzielten Ergebnisse auf dem Großklärwerk (GKW) Köln-Stammheim untersucht und verifiziert werden. Hierzu werden verschiedene Varianten zum Betrieb einer mehrstufigen Faulung analysiert und energetisch wie auch wirtschaftlich betrachtet. Die Ergebnisse des Anlagenbetriebes des GKW Köln-Stammheim werden auf andere Abwasserreinigungsanlagen in Nordrhein-Westfalen übertragen. Hierzu wird eine Potentialanalyse zur Optimierung vorhandener kommunaler Kläranlagen in NRW durchgeführt. Die Voraussetzungen für eine technische Umsetzbarkeit werden beschrieben und kostenmäßig bewertet.

## 2 Untersuchung des technischen Verfahrensansatzes

### 2.1 Methodische Vorgehensweise

Das Großklärwerk Köln-Stammheim wurde Anfang der 90er Jahre für eine Anschlusskapazität von 1,57 Mio. EW ausgebaut. Es wurde eine zweistufige Biologie nach dem AB-Verfahren realisiert. Die anaerobe Schlammfäulung besteht aus 5 Faulbehältern (FB) mit einem Volumen von je 11.000 m<sup>3</sup>. Im Rahmen der Versuche sollte der Vorteil eines mehrstufigen Betriebs gegenüber dem Parallelbetrieb der Schlammfäulung aufgezeigt werden. Für die technische Erprobung wurde die Schlammfäulung des Großklärwerkes Köln-Stammheim verfahrenstechnisch und rohleitungstechnisch umgebaut. Dabei wurde die Schlammfäulung so konzipiert, dass sowohl ein Parallelbetrieb als auch ein mehrstufiger Reihenbetrieb der fünf Faulbehälter möglich ist. Basierend auf Variantenuntersuchungen zur reaktionskinetischen Simulation wurden folgende drei favorisierte Verschaltungszustände der Faulbehälter festgelegt (Alex und Ogurek, 2010; Klein et al., 2019):

- V1: Parallel Betrieb
- V2: Kombiniertes Reihenbetrieb (2 FB-Parallel und 1 FB in Reihe)
- V3: 3-stufige Reihe
- V4: 2/4-stufige Reihe

In Abbildung 1 ist die Zulaufmengen zur Schlammbehandlung während der Versuchsphasen dargestellt.

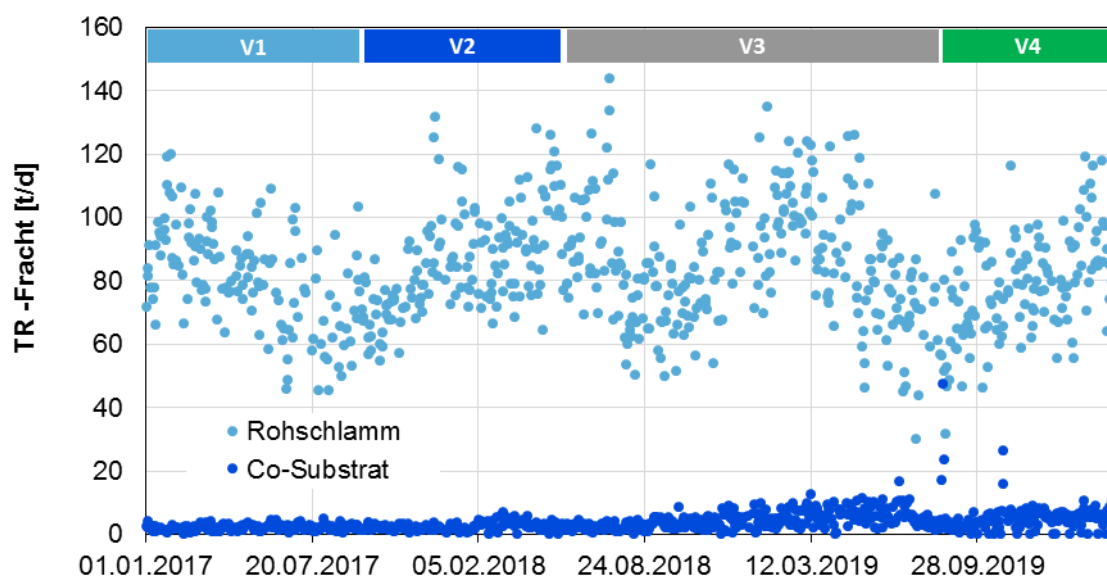
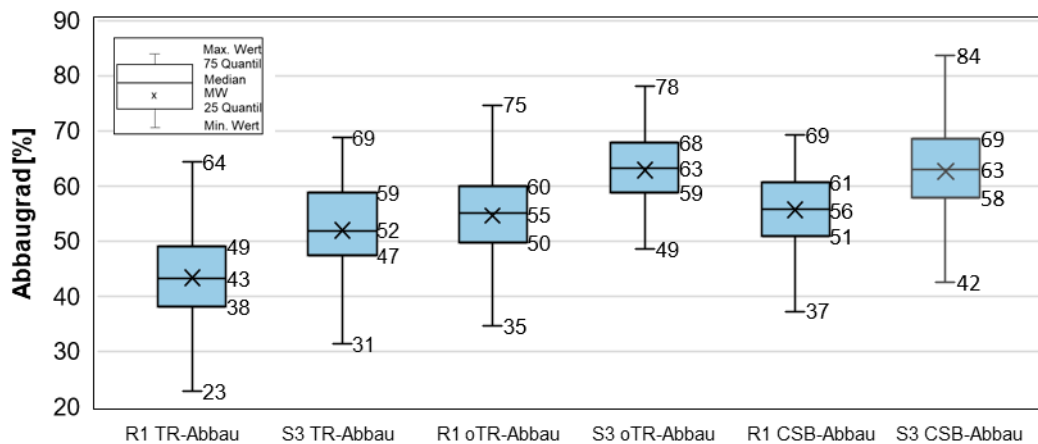


Abbildung 1: TR-Zulaufmengen der Faulstufe und Versuchszeiträume

## 2.2 Technische Erprobung auf dem GWK Köln-Stammheim

Für alle Versuchsphasen kann eine Verbesserung des TR-, oTR- und CSB-Abbaugrades durch die Umstellung auf einen dreistufigen Reihenbetrieb festgestellt werden (siehe Abbildung 2). Der oTR-Abbaugrad verbesserte sich im Mittel um 15 % für den dreistufigen Betrieb bei einer hydraulischen Aufenthaltszeit von 30 d für die gesamte Reihe. Die Untersuchungen von (Guo et al. 2019) für eine vierstufige Reihenverschaltung im Labormaßstab bestätigen mit einer Verbesserung des CSB-Abbaus von 13% dieses Ergebnis. Auch mit einer Reduzierung der hydraulischen Aufenthaltszeit auf 8 d je Reaktor bzw. 23 d für die gesamte dreistufige Reihe konnte weiterhin ein stabiler Betrieb mit hohen oTR-Abbaugraden erreicht werden.

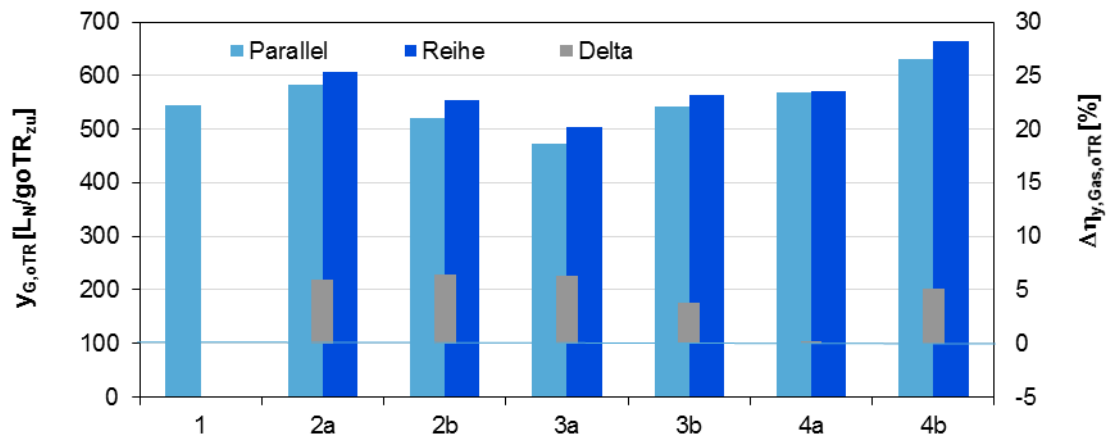
Die Untersuchung eines zweistufigen Betriebs mit einer üblichen Aufenthaltszeit von 20 d für die gesamte Reihe bzw. 10 d je Reaktor wies nur eine geringe Verbesserung des oTR-Abbaus im Vergleich zum Parallelbetrieb auf. Abweichend von den anderen Versuchsphasen wies lediglich diese Phase im Vergleich eine geringere Steigerung des oTR-Abbaus in der zweiten Stufe auf. Es ist daher insgesamt auch für die zweistufige Reihe von einem höheren Abbaupotential auszugehen.



**Abbildung 2: TR, oTR und CSB-Abbaugrad für den Parallel (R1)- und 3-stufigen Reihenbetrieb (S3) als Mittelwert für die gesamten Versuchsphasen (ohne Versuchsphase 4a mit höherer hydraulischer Aufenthaltszeit im Vergleich zum Referenzreaktor)**

Die Gegenüberstellung des spezifischen Gasertrags weist bei allen Versuchsphasen eine Verbesserung von 4 bis 6 % auf (siehe Abbildung 3). Bei den Versuchsphasen 2a, 2b und 4b ist ein Teil des Anstiegs auf die Zugabe der Co-Substrate zurückzuführen. Diese Ergebnisse korrespondieren nicht mit den hohen oTR-Abbaugraden. Ursache könnten hier Abweichungen in der Gasmessung aufgrund der stark unterschiedlichen Gasmengen - hohe Gasmengen im ersten Reaktor und sehr niedrige Gasmengen in den folgenden Reaktoren - bei der Reihen-

schaltung sein. Untersuchungen von Schäfer et al. (2015) zum mehrstufigen Betrieb der Faulung der Kläranlage Köhlbrandhöft weisen ähnliche Ergebnisse auf, nämlich eine Verbesserung der oTR-Abbaugrade bei nur leichtem Anstieg der Gasproduktion. Die vergleichsweise geringe Gasertragssteigerung ist somit eventuell auf eine Verschiebung der Abbauewege mit einer geringeren Methanproduktion zurückzuführen.



**Abbildung 3: Gegenüberstellung des mittleren spezifischen Gasertrags für den Parallel- und Reihenbetrieb für die Versuchsphasen (2a, 2b, 4b inklusive Co-Substrate beim Reihenbetrieb)**

Ein höherer Stoffabbau durch die Umstellung von Parallel- auf Reihenbetrieb ist mit einer höheren Rücklösung des inkorporierten Stickstoffs und Phosphors aus der Biomasse verbunden und führt zu einer erhöhten Rückbelastung des Schlammwassers. Für die Beurteilung der veränderten Rückbelastung wurde als Leitparameter regelmäßig die  $NH_4$ -N-Konzentration im Ablauf der einzelnen Stufen untersucht. Im Mittel führt die Erhöhung des oTR-Abbaugrades um 10 % zu einem Anstieg der  $NH_4$ -N-Konzentration im Schlammwasser um 80 mg/L bzw. zu einer um 10% erhöhten Rückbelastung der biologischen Stufe.

Um den Einfluß der Reihenschaltung auf die Entwässerungsleistung zu beurteilen, wurden Entwässerungsversuche für den Referenzreaktor im Parallelbetrieb im Vergleich zum mehrstufigen Betrieb durchgeführt. Die Entwässerungsversuche ergaben für den Reihenbetrieb um 1 bis 2 Prozentpunkte höhere Entwässerungsleistungen bei gleichzeitig besserer Trennschärfe.



## 2.3 Mikrobiologische Untersuchungen

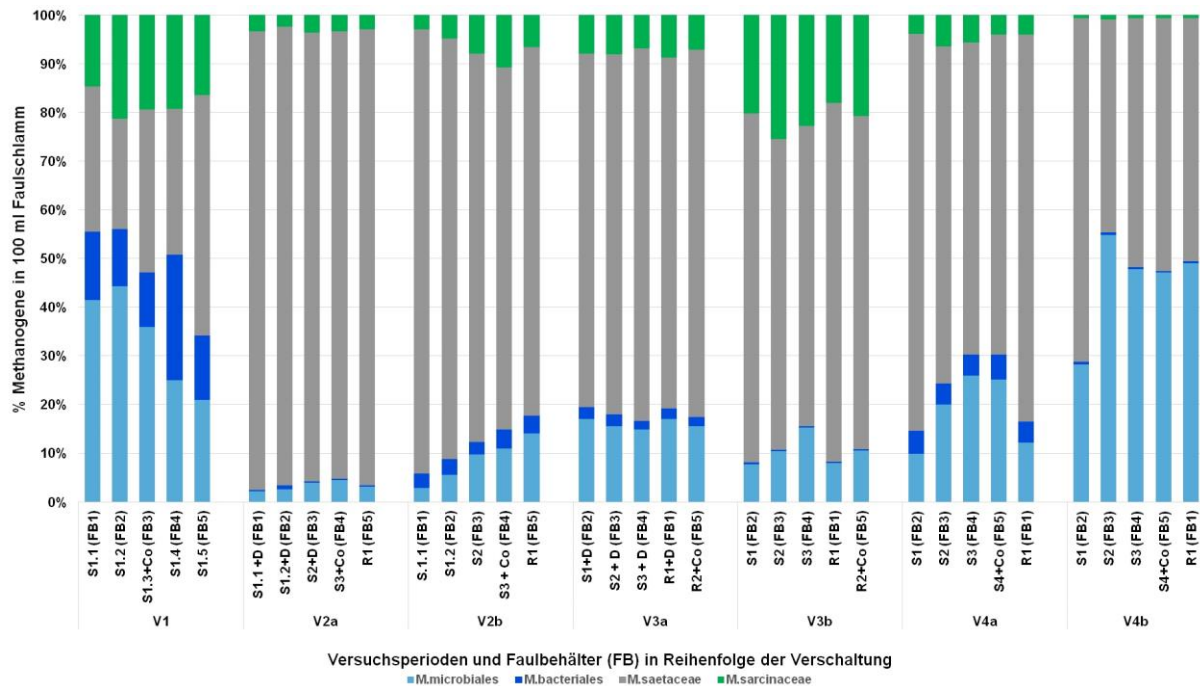
Die mikrobiologischen Analysen zeigten, dass alle Faulbehälter innerhalb der verschiedenen Versuchsphasen eine hohe mikrobielle Diversität, insbesondere in der Domäne Bacteria, aufwiesen. Die hohe Diversität trug im Falle des GWK Köln Stammheim zu einer stabilen Prozessführung bei, da kleinere Störungen abgepuffert werden können. Es kann davon ausgegangen werden, dass wenn vorhandene Arten unterschiedlich auf Störfaktoren reagieren, die Funktion des Prozesses bei Störeinflüssen besser erhalten bleibt. Zudem können mehrere Arten eine ähnliche Funktion innerhalb eines Prozesses erfüllen (Redundanz), so dass Bakteriengruppe A Bakteriengruppe B ersetzen kann, wenn letztere empfindlicher auf einen Störfaktor reagiert als die erstere.

Größere Störungen bzw. Schwankungen in der Prozessführung können sich aber auch weiterhin negativ auf die Mikrobiologie und somit auch auf die Biogasausbeute auswirken. So zeigte sich, dass gerade die Übergangsphasen zwischen den verschiedenen Versuchen, also während der Umstellung der Verschaltungen, sowie eine instabile Prozessführung, wie sie während der Versuchsphase 1 mit der Parallelverschaltung der Faulbehälter immer wieder auftrat, sich auf die Biozönose auswirkte.

In stationären Phasen wurde bei den Bacteria eine durchschnittliche Zelldichte zwischen  $10^{11}$  und  $10^{12}/100$  ml und bei den Archaea zwischen  $10^{10}$  und  $10^{11}/100$  ml ermittelt.

Während der Versuchsphasen 2a-3b wurden die acetoclastischen Methanogenen als die dominierende Gruppe von methanbildenden Archaea mit prozentualen Anteilen zwischen 70% und 95% identifiziert. In der Phase 4b nahm deren Anteil ab, so dass nur noch 45% und 70% acetoclastische Methanogene nachgewiesen werden konnten. Die starke Abnahme der Abundanz der acetoklastischen Methanosaetaceae (*Methanosaeta* spp.) ging mit einer Erhöhung der Abundanz hydrogenotropher Methanbildner (u.a. *Methanospirillum* spp., *Methanolinea* spp.) von 5% (Phase 2a-3b) auf 55% (Phase 4b) einher (Abbildung 4). Die Ursache für diese Änderung innerhalb der methanogenen Biozönose konnte nicht ermittelt werden.

Ein ähnliches Bild zeigte sich während Versuchsphase 1 (Parallelverschaltung), die durch Störungen in der Prozessführung gekennzeichnet war. Auch hier konnte beobachtet werden, dass sowohl hydrogenotrophe wie auch acetoklastische/mixotrophe Methanogene eine ähnlich hohe Abundanz mit durchschnittlich 50% aufwiesen (Abbildung 4). Zudem konnte mittels FISH Analyse eine Abnahme von stoffwechselaktiven Bacteria und Archaea bei Verweilzeiten < 8 Tagen beobachtet werden.



**Abbildung 4: Prozentuale Zusammensetzung der methanogenen Archaea-Gruppen basierend auf deren 16S rRNA Genkopien**

In der Phase mit einer Verweilzeit < 8 Tagen konnte eine Reduzierung des Methangehaltes um 2,4 % und eine Erhöhung der Konzentration organischer Säuren von durchschnittlich 281 mg/L auf 450mg/L ermittelt werden. Die Reduzierung des Methangehaltes kann auf die starke Verringerung der Abundanz der acetoklastischen Methanogenen (s.o.), insbesondere in den Reaktorstufen 2-3 und im Referenzreaktor, zurückgeführt werden. Das gebildete Acetat akkumulierte und/oder wurde durch die syntrophe Acetatoxidation in CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> umgesetzt, so dass mehr Substrat für die hydrogenotrophen Methanogenen zur Verfügung stand. Syntrophe Acetatoxidierer finden sich in vielen Bakterienklassen wie u.a. Deltaprotobacteria und Clostrida, welche auch mittels 16S rDNA Amplikonanalyse nachgewiesen wurden. Die Acetat-Oxidation ist eine endotherme Reaktion ( $\Delta G^{0'} = +104,5 \text{ kJ/mol}$ ), also thermodynamisch extrem ungünstig. Dieser Prozess kann daher nur ablaufen, wenn der Wasserstoffpartialdruck durch Wasserstoff verbrauchende Partner-Organismen, zum Beispiel die hydrogenotrophen Archaea, ständig niedrig gehalten wird. Die Gesamtreaktion aus syntropher Acetatoxidation und hydrogenotropher Methanogenese wird somit exergon mit derselben Stöchiometrie und Energiebilanz ( $\Delta G^{0'} = -31,0 \text{ kJ/mol}$ ) wie die acetoklastische Methanogenese (Nettmann et al., 2010; Batstone et al., 2002). Das aus der syntrophen Acetatoxidation gebildete CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> steht somit den hydrogenotrophen Methanogenen als Substrat zur Verfügung und fördert daher ihr Wachstum, wie die Ergebnisse der qPCR für diese Versuchsphase mit < 8 Tagen Verweilzeit (V4b) zeigen. Da nur eine geringe Reduzierung des Methangehaltes nach der Verringerung der Verweilzeit auf 8 Tage zu beobachten war, liegt die Vermutung nahe, dass durch eine

vermehrte hydrogenotrophe Methanogenese eine stärkere Verringerung des Methangehaltes verhindert wurde.

Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass die Faulbehälterverschaltung selbst keinen Einfluss auf die mikrobielle Biozönose hatte. Dagegen fand eine Änderung in der Diversität und Abundanz insbesondere der methanogenen Archaea in der V4b statt, die mit einer Reduzierung des Methangehaltes von 2,4% einherging. Eine konkrete Ursache für die Veränderung in der Diversität und Abundanz der methanogenen Archaea konnte nicht ermittelt werden.

## 2.4 Strömungstechnische Simulation

Die Strömungsverhältnisse in den Reaktoren werden oft nur grob abgeschätzt. Dabei ist neben einer ausreichenden Durchmischung auch die möglichst weitgehende Ausnutzung des Behältervolumens durch das Vermeiden von Totzonen wichtig, und hydraulische Kurzschlussströmungen sollten vermieden werden. Daher erfolgte im Projekt eine detaillierte Betrachtung der Strömungsverhältnisse in den Faulbehältern mit Hilfe der numerischen Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics, CFD).

Kenntnisse über die rheologischen Eigenschaften der Substrate im Prozess sind bisher nur lückenhaft vorhanden, deshalb wurden zunächst detaillierte Viskositäts- und Dichtemessungen der Faulschlämme durchgeführt. Sie dienten als Grundlage für die Strömungsberechnungen und sollten Zusammenhänge mit Betriebsparametern aufzeigen.

Die Ergebnisse der Viskositätsmessungen zeigten einheitlich ein strukturviskoses (scherverdünnendes) Fließverhalten mit schwacher Thixotropie. Die große Anzahl durchgeführter Messungen zeigte auch eine Abnahme der Viskosität im Verlauf der Reihenschaltung. Diese Beobachtung ist vor dem Hintergrund der mechanischen Zerkleinerung und des biologischen Abbaus nachvollziehbar. Es stellte sich des Weiteren heraus, dass die Viskosität innerhalb eines Faulbehälters nicht konstant ist, sondern eine Schichtung in der Vertikalen existiert, diese Erkenntnis dokumentiert wissenschaftliches Neuland. Die umfassende Datengrundlage bildete auch die Basis für die mehrphasigen und damit möglichst realitätsnahen Strömungsberechnungen.

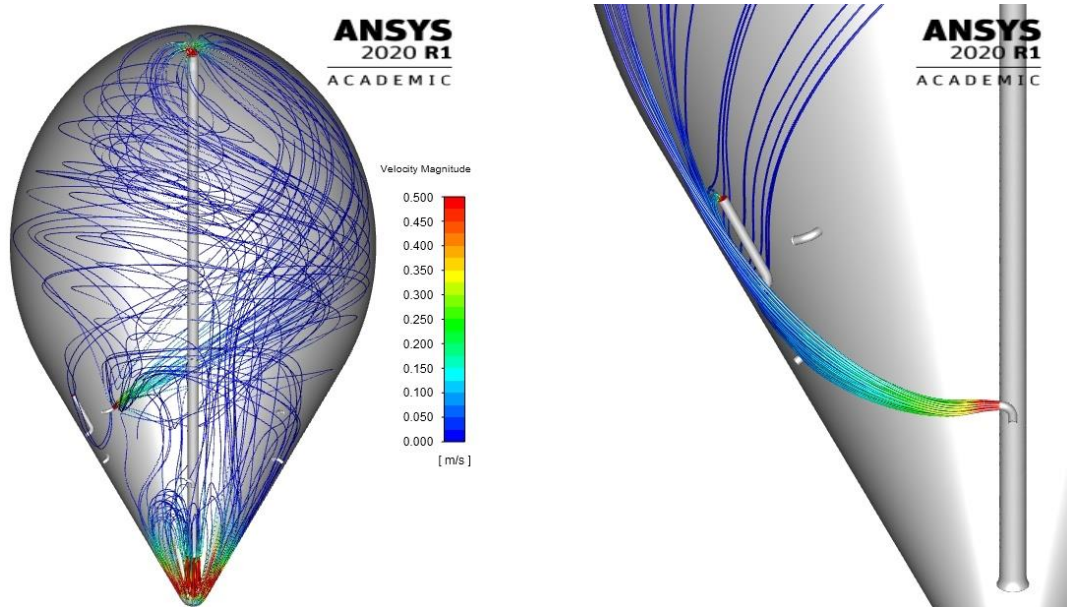
Es konnten deutliche Abhängigkeiten zwischen Parametern, wie beispielsweise dem organischen Trockenrückstand oder der Raumbelastung mit der gemessenen Viskosität über einen weiten Scherratenbereichen innerhalb der jeweiligen Versuchsphase festgestellt werden. Die Korrelation über alle gemessenen Versuchsphasen zeigte jedoch auch, dass weitere Parameter einen Einfluss auf die Viskosität haben.

Von besonderem Interesse ist der Einfluss der Rheologie auf die Entwässerungsergebnisse. Es stellte sich heraus, dass das Entwässerungsergebnis bei geringerer Viskosität besser wird. Die Dichtemessungen ergaben, dass die Dichte tendenziell im Verlauf der Reihenschaltung zunimmt, was vermutlich an der abnehmenden Gasproduktion liegt. Es wurden Werte von unter  $920 \text{ kg/m}^3$  bis zu etwa  $1.010 \text{ kg/m}^3$  gemessen.

Die Strömungsberechnungen haben gezeigt, dass sich aufgrund der unterschiedlichen Viskosität nicht nur die Geschwindigkeiten ändern, sondern die Strömung in Teilbereichen des Faulbehälters auch die Richtung umkehrte. Auch bei den numerischen Tracerversuchen wurden Unterschiede in Abhängigkeit von der Viskosität festgestellt.

Grundsätzlich zeigten die Berechnungen eine gute Durchmischung der Faulbehälter und überwiegend einen geringen Anteil schlecht durchmischter Bereiche, sodass das Behältervolumen

gut genutzt wird. Der Betrieb einiger Zuläufe bewirkte ein Strömungsregime, dass dem eines ideal durchmischten Rührkessel nahekam (Abbildung 5, links). Der Betrieb anderer Zulaufdüsen zeigte dagegen hydraulische Kurzschlüsse (Abbildung 5, rechts). Es sollte daher darauf geachtet werden, dass der Ablauf in Fließrichtung möglichst weit vom Zulauf entfernt ist.



**Abbildung 5: Berechnete Pfadlinien von Zulaufdüse 1 und Mischer (links) sowie von Zulaufdüse 5 im Detail (rechts), der Mischer fördert abwärts**

Als eine der weltweit ersten Untersuchungen, wurden im Projekt instationäre mehrphasige Strömungsberechnungen einschließlich Gasproduktion für Faulbehälter der Großtechnik durchgeführt. Die instationären Mehrphasenberechnungen sollten das reale Strömungsregime noch genauer abbilden und zeigten ein nochmals verändertes Bild der Strömung durch den Einfluss der Gasphase. Je nach Gasblasengröße und -konzentration, zeigten sowohl die Fließgeschwindigkeiten, als auch die -richtungen, in Teilbereichen des Faulbehälters signifikante Änderungen. Die berechneten Phasenanteile zeigten eine deutliche Variation in der Vertikalen, bei der die Schlammphase einheitlich nach oben ab- und die Gasphase entsprechend zunimmt. Die durchgeführten Messungen haben nur teilweise dieselbe Tendenz in der Vertikalen erkennen lassen.

Insgesamt konnten aus der numerischen Modellierung, wie auch in früheren Untersuchungen (Lübken et al., 2013), wichtige Erkenntnisse über den Betrieb und die Optimierung der Faulbehälter gewonnen werden.

## 2.5 Reaktionskinetische Simulation des Faulprozesses

Der Abbaugrad in der Faulstufe wurde für die untersuchten Versuchsphasen (V1-V4) mit Hilfe der dynamischen Simulation überprüft. Mit dem Simulationsmodell konnte sowohl das mittlere Abbauverhalten des Parallelbetriebs als auch des Reihenbetriebs der Kläranlage Köln Stammheim gut dargestellt werden (siehe Abbildung 6). Für alle im Modell überprüften Versuchseinstellungen wurde der deutlich verbesserte oTR-Abbaugrad bei gleichbleibender bzw. etwas geringerer Gasproduktion bestätigt. Die mit dem Modell durchgeführten Variantenuntersuchungen für eine 500.000 EW-Anlage mit einer konventionellen Belebungsstufe und anaerober Schlammstabilisierung ergab bei einer hydraulischen Aufenthaltszeit von 20 d und konstanter Zulauffracht eine Verbesserung von 10% oTR-Abbau und 11 % Gasertrag im Vergleich zum Parallelbetrieb der Faulstufe. Mit der Umsetzung einer dreistufigen Reihe zeigte sich in der Simulation eine weitere Erhöhung des Gasertrags und des Abbaugrades auf 14 %. Im Vergleich zu den Ergebnissen aus den großtechnischen Versuchen ergeben sich in der Simulation damit deutlich bessere spezifische Gaserträge und oTR-Abbauraten auch für den zweistufigen Betrieb. Untersuchungen zur Belastungsgrenze des mehrstufigen Betriebs weisen in der Simulation einen stabilen Betrieb bei Faulzeiten von über 5 Tagen auf. Auf Grundlage der Erfahrungen aus den großtechnischen Versuchen wird eine Aufenthaltszeit von mindestens 8 Tagen empfohlen.

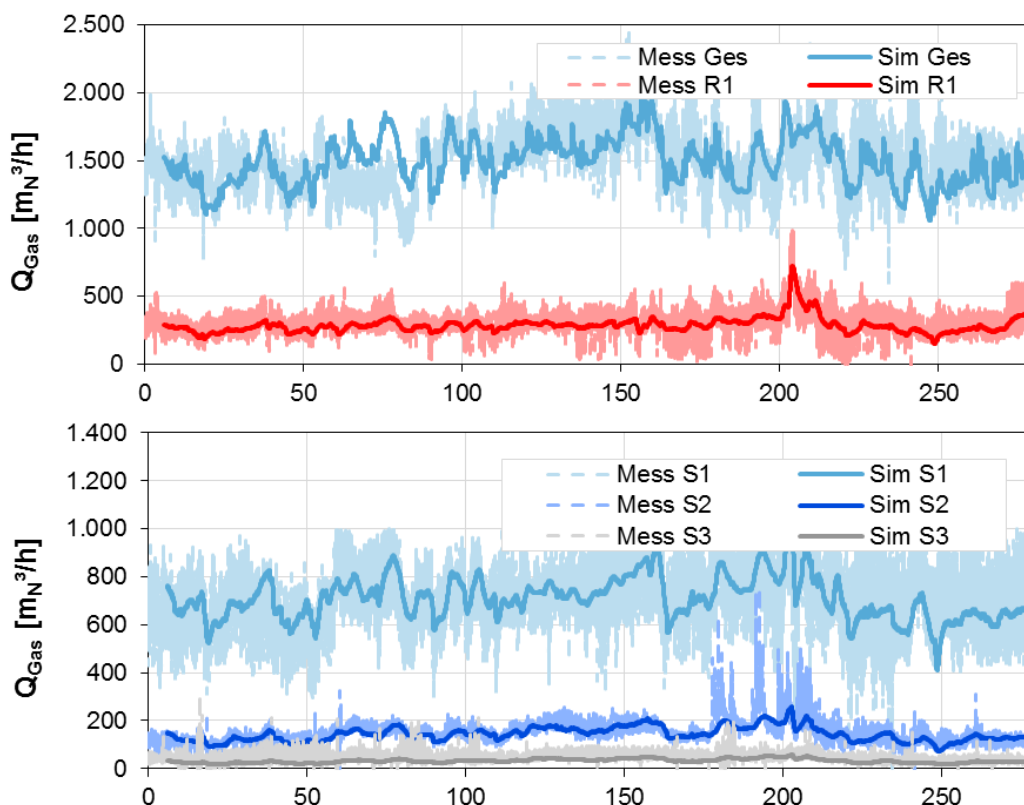


Abbildung 6: Gemessene und simulierte Gasmenge für die Versuchsphase mit der dreistufigen Reihe (V3) aufgetragen über die Versuchszeit [d]

## 3 Übertragbarkeit auf die Abwasserreinigung in NRW

### 3.1 Potenzialanalyse Nordrhein-Westfalen

Zur Übertragbarkeit auf andere Abwasserreinigungsanlagen in Nordrhein-Westfalen erfolgte eine Potentialanalyse. In NRW haben ca. 285 Kläranlagen eine Faulungsanlage. Da es sich hierbei überwiegend um Anlagen der Größenklassen 4 und 5 handelt, entsprechen diese Anlagen zusammen 31,5 Mio. EW und damit 90 % der gesamten Reinigungskapazität in NRW (LANUV-NRW, 2013). Um das Potential abzuschätzen, das sich durch eine Umstellung von Faulungsanlagen von einstufigem auf einen mehrstufigen Betrieb für die Kläranlagen in NRW ergibt, wurden Daten von rund 175 Kläranlagen mit beheizter Faulstufe in Nordrhein-Westfalen ausgewertet (siehe Abbildung 7). Dies entspricht bezogen auf die Ausbaugröße aller Kläranlagen mit Schlammfäulung ca. 58 % (=18 Mio. E / 31 Mio. E). 40 % der Faulungsanlagen besitzen zwei Faulbehälter. Weiterhin weist ein Großteil der Faulungsanlagen hydraulische Aufenthaltszeiten von größer 20 Tagen auf, so dass ein stabiler Betrieb der Fäulung auch bei Umstellung auf einen zweistufigen Betrieb der Anlage gewährleistet ist.

Mit der Umstellung ergeben sich folgende Verbesserungen:

- Leichte Erhöhung der Faulgasproduktion
- Erhöhung des oTR-Abbaugrades
- Erhöhung der Energieproduktion
- Verbesserung der Entwässerungsleistung und der Zentratqualität
- Reduzierung der zu entsorgenden Schlammmenge

Anhand der Stichprobe von 175 Kläranlagen wurde abgeleitet, dass ca. 28% der Faulungsanlagen in NRW umgestellt werden können. Hiermit ergibt sich eine jährliche Einsparung in den Betriebskosten von 8,3 Mio. Euro. Dieser stehen überwiegend nur geringe Investitionskosten für die verfahrenstechnische Umstellung gegenüber. Weiterhin führt die verbesserte Umsatzleistung zu einer etwas erhöhten Rückbelastung, hier ist die vorhandene Auslastung der biologischen Stufe zu berücksichtigen. Diese würde bei der theoretischen Betrachtung eine geringe Erhöhung des Beckenvolumens von ca. 3 % erfordern, die bei einem Großteil der Anlagen vermutlich auch ohne einen Ausbau der Biologie abgedeckt werden kann.

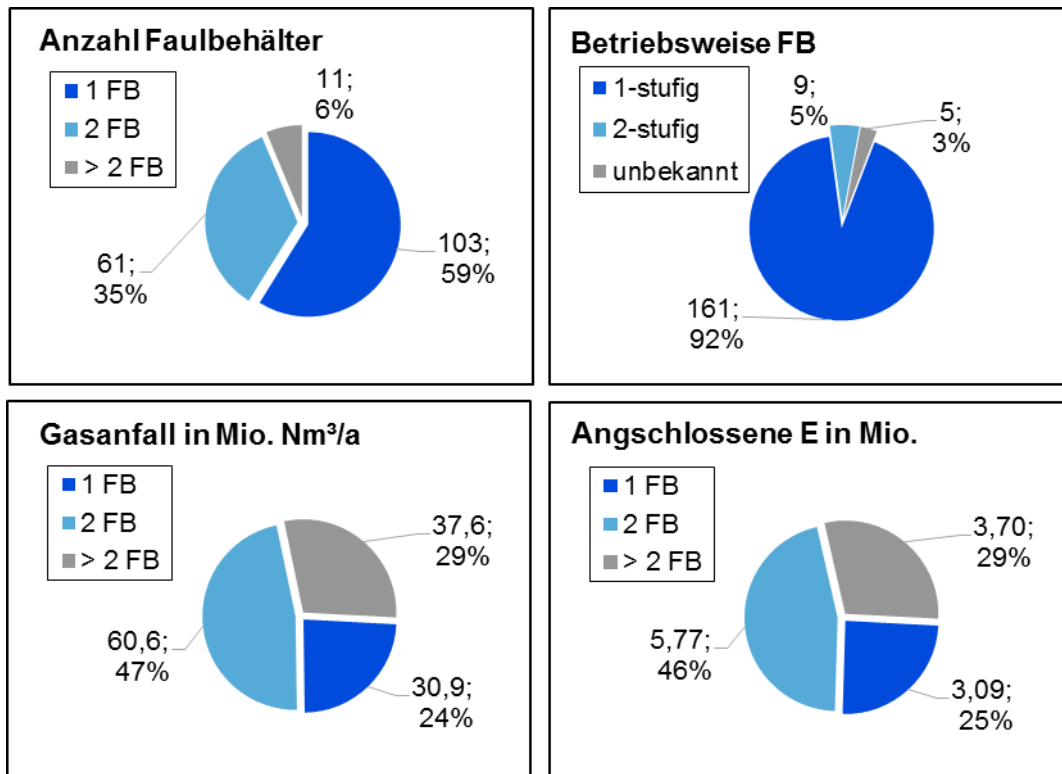


Abbildung 7: Datenauswertung von 175 Faulungsanlagen in NRW: Faulbehälteranzahl, Betriebsweise Faulbehälter, Gasanfall, angeschlossenen Einwohnerwerte (MKULNV, 2014)

### 3.2 Voraussetzung für die technische Umsetzbarkeit

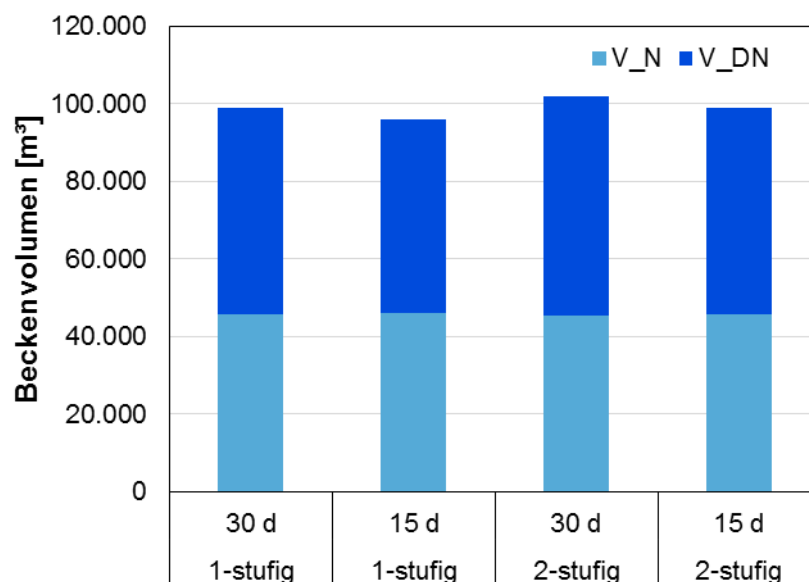
Für die Umstellung von einstufigem Betrieb auf mehrstufigen Betrieb der Faulbehälter sind nur geringe technische Maßnahmen erforderlich. Da die Faulbehälter in der Regel mit gleicher Füllhöhe errichtet sind, werden für die Überleitung bei einer Reihenschaltung Transferpumpen und rohrleitungstechnische Anbindungen erforderlich. Bei der Beschickung des Faulbehälters muss gleichzeitig ein Abzug über die Transferpumpe erfolgen. Hier muss über eine Höhenstandsmessung des Faulbehälters mit frequenzgeregelten Transferpumpe ein konstanter Füllstand im Faulbehälter eingestellt werden. Die Höhenstandmessung kann als Drucksonde, Ultraschall- oder Radarmessung ausgeführt werden. Die Einbindung von zusätzlichen Wärmepumpen für die nachgeschalteten Stufen einer mehrstufigen Reihe ist in von den Transmissionsverlusten der Faulbehälter abhängig. Bei den großtechnischen Versuchen war die Aufheizung des Faulschlammes im ersten Reaktor ausreichend, dies ist aber im Einzelfall zu prüfen. Als verfahrenstechnische Randbedingung wird eine hydraulische Aufenthaltszeit in der ersten Stufe von ca. 10 Tagen empfohlen.



### 3.3 Auswirkungen auf die biologische Abwasserreinigung

Ein höherer Stoffabbau durch die Umstellung von Parallel- auf Reihenbetrieb ist mit einer höheren Rücklösung des inkorporierten Stickstoffs und Phosphors aus der Biomasse verbunden. Die Rückbelastung aus Phosphor ist im Vergleich zum Stickstoff bei chemisch-physikalischer Fällung relativ gering. Weiterhin erhöht sich die Produktion von gelöstem biologisch inerten CSB. Die erhöhte Freisetzung von Ammonium, CSB und Phosphor im Schlammwasser führt zu einer erhöhten Rückbelastung der biologischen Stufe. Um den Einfluss der veränderten Rückbelastung auf das erforderliche Belebungsbeckenvolumen zu beurteilen, wurde beispielhaft für eine Kläranlage mit einer Ausbaugröße von 500.000 E und einer Vorklärzeit von 1 h das erforderliche Beckenvolumen ermittelt (Abbildung 8).

Die Umstellung der Faulung von Parallelbetrieb auf Reihenbetrieb führt bei einer hydraulischen Aufenthaltszeit von 30 d zu einer geringen Erhöhung der erforderlichen Belebungsbeckenkapa- zität um ca. 3,3 %. Die erhöhte Rückbelastung hat keinen Einfluss auf das erforderliche Nitrifikationsvolumen, sondern führt nur zu einer Erhöhung des erforderlichen Denitrifikations- volumens. Insgesamt ist der Einfluss als gering einzustufen, nur bei stark ausgelasteten / über- lasteten Anlagen sind bauliche oder verfahrenstechnische Maßnahmen erforderlich, um die zusätzliche Belastung aufzunehmen. Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung wurden die sich hieraus ergebenden zusätzlichen Kosten daher nicht berücksichtigt.



**Abbildung 8: Erforderliches Beckenvolumen in Abhängigkeit von der hydraulischen Aufenthaltszeit bei Parallel- oder Reihenbetrieb**

Neben Stickstoff und Phosphor erhöht sich bei einem verbesserten oTR-Abbaugrad auch der inerte CSB. (Toutian et al. 2019) hat für Rohschlamm eine Rücklöserate an inerten CSB von

2 % bezogen auf den abgebauten oTR im Faulbehälter ermittelt. Mit diesem Ansatz kann die Rückbelastung an inerten CSB aus der Schlammentwässerung bei einer Erhöhung des oTR-Abbaugrades in der Faulung berechnet werden. Unter Berücksichtigung einer spezifischen Zulaufmenge zur Kläranlage von 210 L/(E\*d) wird die CSB-Konzentration im Ablauf der Nachklärung um ca. 3-4 mg/L durch den inerten Anteil des gesamten Prozesswassers erhöht. Der Einfluss auf dem CSB im Ablauf der Kläranlage ist somit vernachlässigbar.

### 3.4 Wirtschaftlichkeit des Verfahrensansatzes

Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrensansatzes wurde beispielhaft für das GWK Köln Stammheim untersucht. In Abbildung 9 ist eine mögliche dreistufige Reihenverschaltung für die 5 Faulbehälter des Klärwerks dargestellt. Für die Umsetzung der Reihenschaltung fallen Kosten für die Transferpumpen inkl. rohleitungstechnischer Einbindung und Elektrotechnik an. Als Kosteneinsparung durch die Reihenverschaltung wurden eine Reduzierung der Trockenmasse um 15 %, eine Erhöhung der Gasproduktion um 3 % sowie eine Verbesserung des Entwässerungsgrades von 2-Prozentpunkte TR angesetzt.

Insbesondere durch den besseren oTR-Abbau und die gesteigerte Entwässerungsleistung werden die Klärschlammentsorgungskosten um 18 % gesenkt. Vor dem Hintergrund weiter steigender Entsorgungskosten und zusätzlicher Kosten für das Phosphorrecycling gewinnt die Klärschlammreduzierung durch die Reihenverschaltung damit an Bedeutung.

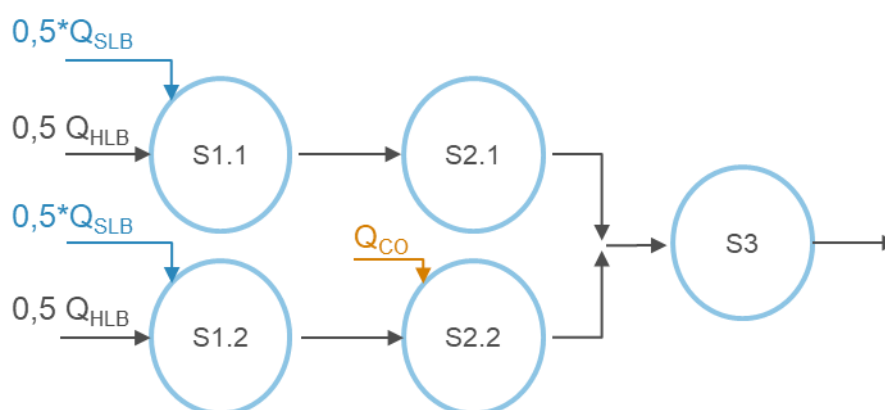


Abbildung 9: Dreistufige Reihenverschaltung mit zwei parallelen Stufen

## 4 Zusammenfassung

Die biologische Schlammstabilisierung rückt neben der Abwasserreinigung zunehmend in den Fokus. Durch die Steigerung der Gasproduktion mit anschließender Verstromung stellt sie einen weiteren Baustein auf dem Weg zu einer energieneutralen Kläranlage dar. Bei den Betriebskosten einer Kläranlage spielen die Schlammstabilisierung und die Schlamm Entsorgung eine große Rolle. Nach den Personalkosten sind die Kosten für die Klärschlamm Entsorgung der zweitgrößte Kostenfaktor. Ziel ist es somit, die zu entsorgende Schlammmenge durch einen erhöhten Abbaugrad und eine verbesserte Entwässerungsleistung zu verringern. In diesem Forschungsprojekt wurde untersucht, inwieweit eine Reihenverschaltung der Faulbehälter dazu beitragen kann, die zuvor genannten Ziele zu erreichen.

Mit den **großtechnischen Untersuchungen** auf dem GWK Köln-Stammheim konnte gezeigt werden, daß mit der Umstellung vom Parallelbetrieb zu einer dreistufigen Reihe mit 30 Tagen Aufenthaltszeit ein um bis zu 15 % deutlich verbesserter oTR-Abbau erreicht werden kann. Der spezifische Gasertrag konnte in Höhe von 3 % - 6 % gesteigert werden. Der Faulschlamm der mehrstufigen Reihe wies weiterhin im Vergleich zum Parallelbetrieb ein besseres Entwässerungsverhalten auf.

Während der verschiedenen Versuchsphasen wurden umfangreiche **mikrobiologische Analysen** der Faulschlämme durchgeführt. Während die Faulbehälterverschaltung keinen Einfluss auf die mikrobielle Lebensgemeinschaft zeigte, so führte die Reduzierung der Verweilzeit auf 8 Tage zu einer Auswaschung der Bakterien und somit zu einer Verringerung der Zelldichte, die sich jedoch nach einiger Zeit wieder erholte. Ferner führte die Verringerung der Verweilzeit auf 8 Tage ebenfalls zu einer Abnahme der Abundanz der acetoklastischen Methanosaetaceae von ca. 90 % (HRT > 8d) bis ca. 45 % (HRT = 8d) und zu einer Erhöhung der Abundanz hydrogenotropher Methanbildner von ca. 5 % (HRT > 8d) bis ca. 55 % (HRT = 8d). Auch konnte bei der Reihenverschaltung mit einer Verweilzeit von 8 Tagen eine Reduzierung des Methangehaltes um 2,4 % und eine Erhöhung der Konzentration organischer Säuren auf 450mg/L ermittelt werden. Die Vermutung liegt nahe, dass durch eine vermehrte hydrogenotrophe Methanogenese (s.o.) eine stärkere Verringerung des Methangehaltes verhindert wurde.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass für den Reihenbetrieb eine Verweilzeit unterhalb von 8 Tagen pro Reaktor, insbesondere für die 1. Stufe, nicht unterschritten werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse in Bezug der Mikrobiologie in diesem Projekt eröffnen weitere zukünftige Forschungsfragen. So ist noch unklar, ob eine Verweilzeit unterhalb von 8 Tagen zu einer irreversiblen Verschiebung von acetoklastischer zu hydrogenotropher Methanogenese führt, und ob langfristig auch mit sehr geringen Schlammaltern ein stabiler Betrieb gewährleistet werden kann.

**Rheologische Untersuchungen** zeigten eine Abnahme der Viskosität im Verlauf der Reihenschaltung, sowie eine Korrelation zwischen geringerer Viskosität und einem verbesserten Entwässerungsverhalten. Die Untersuchungen dienten auch als Grundlage für numerische Strömungsberechnungen, anhand derer wichtige Erkenntnisse zur Betriebsoptimierung bezüglich der Durchmischung und Ausnutzung des Faulbehältervolumens sowie zur Vermeidung hydraulischer Kurzschlussströmungen gewonnen werden konnten. Als eine der ersten Strömungsuntersuchungen weltweit gelang es, ein realitätsnahes instationäres Mehrphasenmodell mit Gasproduktion für großtechnische Faulbehälter aufzustellen.

Die durchgeführten **reaktionskinetischen Variantensimulationen** für eine 500.000 EW Anlage mit einer konventionellen Belebungsstufe und anaerober Schlammstabilisierung wiesen im zweistufigen Reihetrieb bei einer hydraulischen Aufenthaltszeit von 20 d für die gesamte Reihe eine Verbesserung von 10 % oTR-Abbau im Vergleich zum Parallelbetrieb auf. Mit der Umsetzung einer dreistufigen Reihe kann eine Erhöhung Abbaugrades um 14 % erreicht werden. Die Ergebnisse bestätigen die gute Abbauleistung der großtechnischen Untersuchungen.

Das Potential, das sich durch eine Umstellung von Faulungsanlagen vom einstufigem auf einen mehrstufigen Betrieb für die Kläranlagen in NRW ergibt, wurde abgeschätzt. Rund 40 % der Faulungsanlagen in NRW besitzen zwei Faulbehälter. Weiterhin weisen ein Großteil der Faulungsanlagen hydraulische Aufenthaltszeiten von größer 20 Tagen auf, so dass ein stabiler Betrieb der Faulung bei einem zweistufigen Betrieb der Anlage gewährleistet werden kann. Durch die Umstellung von ca. 28 % der Faulungsanlagen in NRW könnte eine jährliche Einsparung von bis zu 8,3 Mio. Euro erreicht werden. Dem stehen überwiegend nur geringe Investitionskosten für die Umstellung gegenüber.

## 5 Literatur

- Alex, J. und Ogurek, M. (2010): Bericht zur Simulationsstudie „Dynamische Simulation der Schlammfäulung der KA Köln-Stammheim“. Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg, ifak. Auftraggeber StEB Köln.
- Batstone, D.J.; Keller, J.; Angelidaki, I.; Kayuzhnyi, S.V.; Paviostathis, S.G.; Rozzi, A.; Sanders, W.T.M.; Siegriste, H.; Vavilin, V.A. (2002): The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). *Water Science and Technology*, Vol. 45 (10), pp. 65-73.
- DWA (2014): Merkblatt DWA-M 368 Biologische Stabilisierung von Klärschlamm. DWA, Hennef, 2014.
- Gehring, T., Klang, J., Niedermayr, A., Berzio, S., Immenhauser, A., Klocke, M., Wichern, M., Lübken, M. (2015): Determination of methanogenic pathways through carbon isotope ( $\delta^{13}\text{C}$ ) analysis for the two-stage anaerobic digestion of high-solids substrates. *Environ Sci & Technol*, 03/2015.
- Guo, H., Nair, R., Tonin, F., Hendriks, A., van Lier, J., de Kreuk, M. (2019): Continuous stirred tank reactors in series: an approach to enhance the enzymatic hydrolysis and sludge reduction in anaerobic waste activated sludge digestion. 16<sup>th</sup> World Congress on Anaerobic Digestion: Accelerating natural cycles with anaerobic digestion, 23.-27. Juni 2019, Delft
- Klein, T., Klauke, L.; Nettmann, E.; Lübken, M.; Wichern, M.; Hobus, I.; Kolisch, G. (2019) Verbesserung der Abbauleistung in der Schlammfäulung durch mehrfache Reihenverschaltung der Faulbehälter - erste Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt SEKIS. *Kompetenz Wasser, Kölner Fachjournal für Abwasser, Hochwasserschutz und Gewässer*, 28/2019, S. 38-40.
- LANUV-NRW (2013): Daten des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV). Datenquellen: NIKLAS-KOM (kommunales Kläranlagenkataster) und ELWAS (elektronisches wasserwirtschaftliches Verbundsystem). Datenstand 2012
- Loll, U., Roediger, M., Urban, I., Niehoff, H.-H. (2013): Neue Bemessungsansätze zur biologischen Stabilisierung von Klärschlamm. In: 8. DWA Klärschlammstage, DWA, Hennef.
- Lübken, M; Koch, K.; Klauke, L.; Gehring, T.; Wichern, M. (2013): CFD investigation of the flow characteristics of a plug flow anaerobic digester for lignocellulosic biomass methanisation. 13<sup>th</sup> World Congress on Anaerobic Digestion: Recovering (bio)Resources for the World, 25.-28. Juni 2013, Santiago de Compostela, Spanien.
- Schäfer, A.; Bieniek, B.; Schreiber, J. (2015): Faulbehälterreihenschaltung auf dem Klärwerk Köhlbrandthöft, DWA-Energietage – Abwasser und Biogas 2015 in Wuppertal, DWA.
- Toutian, Vahid; Barjenbruch, Matthias; Unger, Tina; Loderer, Christian; Remy, Christian. (2019): Effect of temperature on biogas yield increase and formation of refractory COD during thermal hydrolysis of waste activated sludge. *Water Research*. 171, 115383.