

# Anaerobbehandlung von Schwarz- wasser mit Primär- und Überschuss- schlamm in CSTR-Reaktoren

C. G. Morandi, K. Mouarkech, S. Wasielewski, R. Minke, H. Steinmetz  
ISWA Universität Stuttgart

Stand: 18.08.2016

GEFÖRDEBT VOM



## 1 Hintergrund

Die separate Erfassung von Schwarzwasser auf Haushaltsebene ermöglicht die energetische und stoffliche Verwertung konzentrierter Abwasserteilströme, denn Schwarzwasser verfügt über einen erheblichen Anteil an organischem Substrat und Nährstoffen; im Vergleich zum Schmutzwasser weist Schwarzwasser deutlich höhere Konzentrationen auf. Zur energetischen Nutzung der organischen Inhaltsstoffe bietet sich die Möglichkeit, Schwarzwasser in kommunalen Faultürmen mit zu vergären. Die Kombination aus Energieeinsparung beim konventionellen Belebtschlammverfahren (geringerer Sauerstoffverbrauch durch Verringerung der C- und N-Frachten) und gesteigerter energetischer Nutzung des Kohlenstoffs (Biogasgewinn durch Schwarzwasservergärung) trägt zur Verbesserung der Energiebilanz der Kläranlage bei.

Kommunale Faultürme, über die viele Kläranlagen der Größenklassen 4 und 5 verfügen, werden als CSTR-Reaktoren (Engl.: Continuously Stirred Tank Reactor) betrieben, in denen kein gezielter Rückhalt von Biomasse erfolgt, sodass die hydraulische Aufenthaltszeit (HRT) identisch mit dem Schlammalter ist. Zur Bemessung der Faultürme im mesophilen Temperaturbereich werden Aufenthaltszeiten von 15 bis 25 d zugrunde gelegt. Ausschwemmreaktoren sind i. A. Schwachlastreaktoren mit dem wesentlichen Nachteil eines relativ großen Volumenbedarfs. Als entsprechender Vorteil ist der geringe maschinen- und steuerungstechnische Aufwand, aber auch die Möglichkeit der Nutzung von hydraulischen Reserven in bestehenden Faulbehältern zu nennen, z. B. durch verbesserte Eindickung des Klärschlammes. Diese Reserven können zur Co-Vergärung von Schwarzwasser genutzt werden. Das Biogas wird gesammelt und i. d. R. in einem Blockheizkraftwerk zur Strom- und Wärmegewinnung genutzt.

## 2 Zielsetzung innerhalb des Forschungsvorhabens TWIST++

Um mögliche Transitionswege bestehender Abwasserinfrastrukturen hin zu Neuartigen Sanitärsystemen (NASS) aufzuzeigen, wurden Schlämme kommunaler Kläranlagen mit steigenden Anteilen an Schwarzwasser aus Unterdrucktoiletten anaerob in einem CSTR behandelt. Zur Entwicklung von integrierten Gesamtlösungen im Projekt TWIST++ sollten bezüglich der Mitvergärung von Schwarzwasser folgende Fragen geklärt werden:

- Ist ein stabiler Betrieb bei der Vergärung von Schwarzwasser und kommunalem Klärschlamm bei sich ändernden Substratzusammensetzungen gewährleistet?
- Wie wirkt sich die Co-Vergärung von Schwarzwasser bei zunehmenden Volumenströmen auf die Stoffumsetzungsprozesse, die Elimination von Kohlenstoffverbindungen und die Biogasausbeute aus?



- Welche Aspekte sind bei schrittweiser Erhöhung des Schwarzwasseranteils im Reaktorzulauf für den Faulprozess und für die gesamte Verfahrenskette zu beachten?
- Gibt es Anwendungsgrenzen der Co-Vergärung von Schwarzwasser?
- Welche Energiepotenziale sind nutzbar?

### 3 Untersuchungen

Ein vom Projektpartner HST konstruierter CSTR-Reaktor (630 L; mit ausgefaultem Schlamm geimpft; Einfahrphase: 75 d) wurde in Anlehnung an Razaviarani et al. (2013)<sup>1</sup> und Silvestre et al. (2011)<sup>2</sup> mit einer Mischung aus Primär- (PS) und Überschussschlamm (ÜS) bei einem Verhältnis von 3 PS:1 ÜS v/v ( $TR_{PS}=1,8-5,1$  %;  $TR_{ÜS, eingedickt}=0,7-3,4$  %;  $TR_{Mischung}=1,8-3,2$  %) sowie steigenden Anteilen an Schwarzwasser ( $TR_{SW}=0,4-2,0$  %) im mesophilen Temperaturbereich (34 °C) bei einer mittleren Aufenthaltszeit von 21 d betrieben. Primär-, Überschuss- und Faulschlamm (CSTR-Inokulum) wurden vom Lehr- und Forschungsklärwerk (LFKW); Schwarzwasser aus Unterdrucktoiletten des Betriebsgebäudes der Universität Stuttgart bezogen. Übergangszustände von 1,8 bis 33,8 % Schwarzwasseranteil (% CSB-Fracht im Reaktorzulauf; Dauer jeder Versuchsphase: ca. 2-fache HRT) wurden auf Prozessstabilität, Biogasproduktion und Abbau organischer Inhaltsstoffe untersucht.

### 4 Ergebnisse

Die wesentlichen Ergebnisse der Versuche sind in Abhängigkeit der Betriebseinstellungen in Tabelle 4–1 sowie Abbildung 4–1 und Abbildung 4–2 dargestellt.

Tabelle 4-1 verdeutlicht, dass die CSB-Raubelastung im Regelfall mit zunehmendem Schwarzwasseranteil sinkt (Phasen 2–5). Dies ist auf geringere Konzentrationen an organischen Stoffen im Schwarzwasser als im Klärschlamm zurückzuführen. Eine Ausnahme bilden die Phasen 1 und 2 mit nur geringen Schwarzwasseranteilen sowie die eigene Referenz, was mit schwankender Zusammensetzung der Stoffströme begründet werden kann.

Die Methanausbeute erhöhte sich bezogen auf  $\sigma TR_{zu}$  und  $CSB_{elim}$  von Phase 1 bis Phase 5 mit steigendem Schwarzwasseranteil und erreichte in Phase 5 (33,8 %  $B_{d,CSB,SW}/B_{d,CSB,tot}$ ) den Wert von ca. 330 L  $CH_4/kg$   $CSB_{elim}$  (siehe Tabelle 4–1), was dem theoretisch erzielbarem Wert von 350 L  $CH_4/kg$  CSB bei vollständigem CSB-

<sup>1</sup> Razaviarani, V.; Buchanan, I. D.; Malik, S.; Katalambula, H. (2013): Pilot-scale anaerobic co-digestion of municipal wastewater sludge with restaurant grease trap waste. In Journal of environmental management 123, pp. 26–33.

<sup>2</sup> Silvestre, G.; Rodriguez-Abalde, A.; Fernandez, B.; Flotats, X.; Bonmati, A. (2011): Biomass adaptation over anaerobic co-digestion of sewage sludge and trapped grease waste. In Bioresource technology 102 (13), pp. 6830–6836.



Abbau sehr nahe kommt. Dies zeigt, dass sich die Schwarzwasserzugabe positiv auf die Biogasausbeute auswirkt.

In Abbildung 4–1 ist die spezifische Methanausbeute bezogen auf den zugeführten CSB angegeben. Auch hier steigen die Werte mit zunehmendem Schwarzwasseranteil von 185 L CH<sub>4</sub>/kg CSB<sub>zu</sub> in Phase 1 auf 229 L CH<sub>4</sub>/kg CSB<sub>zu</sub> in Phase 5. Dies hängt mit den abnehmenden Raumbelastungen und der guten biologischen Abbaubarkeit von Schwarzwasser zusammen. Der Vergleich der Werte mit Bezug auf den zugeführten CSB bzw. den eliminierten CSB (vgl. Tabelle 4–1) verdeutlicht, dass nur ein Teil des CSB im anaeroben Prozess abgebaut wird. Die Elimination bezogen auf oTR sowie CSB lag bis auf wenige Ausnahmen über 70 % und damit deutlich über den in der Literatur angegebenen Werten. Dies ist neben dem Schwarzwassereinfluss vermutlich auch auf die geringeren Raumbelastungen und das günstige PS:ÜS-Verhältnis zurückzuführen

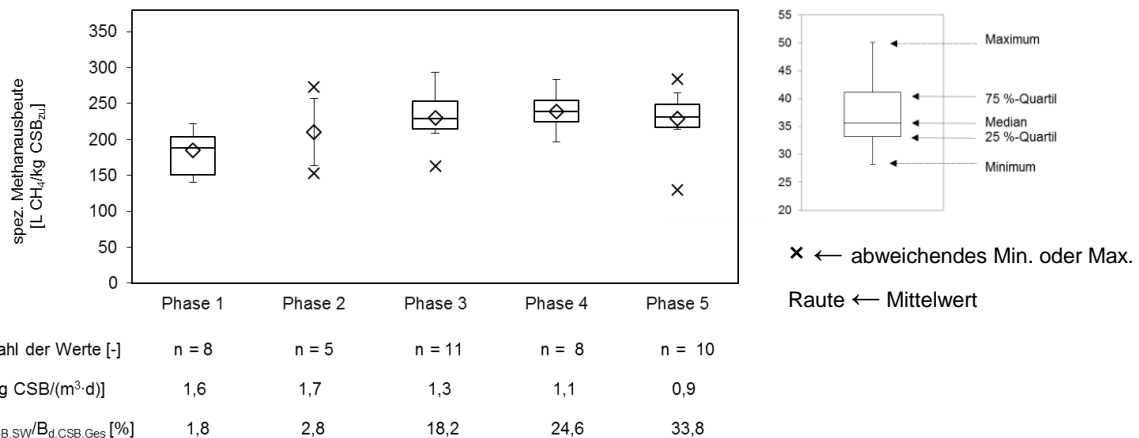


Abbildung 4–1: Methanausbeute des halbtechnischen CSTR-Reaktors bei zunehmendem Anteil von Schwarzwasser im Reaktorzulauf.

Die in Abbildung 4–2 dargestellte, auf das Reaktorvolumen bezogene Methanbildungsrate ist vor allem von der Raumbelastung beeinflusst. Mit steigendem Schwarzwasseranteil wurde das Substrat verdünnt, sodass volumenbezogen weniger Methan gebildet wurde.

Über alle Versuchsphasen wurde ein stabiler Betrieb des CSTR-Reaktors beobachtet. Der Methangehalt blieb relativ konstant über die verschiedenen Versuchsphasen und lag im Mittel bei ca. 60 % (siehe Tabelle 4–1).

Tabelle 4–1: *Erzielte Ergebnisse mit ansteigender Schwarzwasserfracht im Zulauf des CSTR-Reaktors gegenüber den Referenzphasen für die reine Schlamm- bzw. Schwarzwasserfaulung [Mittelwert ± Standardabweichung (Anzahl der Werte)].*

Parameter	Einheit	Literatur Schlamm- faulung*	Eigene Referenz Schlammfaulung <sup>‡</sup>	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5	Literatur SW— Vergärung <sup>6</sup>
Anteil SW ( $B_{d,CSB,SW}/B_{d,CSB,ZU}$ )	[%]	0	0 -	1,8 ± 0,6 (12)	2,8 ± 0,6 (3)	18,2 ± 7,0 (10)	24,6 ± 6,7 (10)	33,8 ± 4,0 (9)	100
	[kg CSB/(m <sup>3</sup> d)]	2,8–5 <sup>1</sup>	1,5 ± 0,5 (6)	1,6 ± 0,4 (16)	1,7 ± 0,3 (6)	1,3 ± 0,3 (11)	1,1 ± 0,2 (10)	0,9 ± 0,2 (11)	0,45
Raumbelastung	[kg oTR/(m <sup>3</sup> d)]	1,7–3 <sup>1</sup>	0,93 ± 0,35 (6)	1,0 ± 0,23 (15)	1,0 ± 0,12 (6)	0,82 ± 0,2 (11)	0,6 ± 0,16 (11)	0,5 ± 0,12 (12)	k. A.
	[% CSB]	k. A.	72 ± 10 (4)	72 ± 6 (13)	75 ± 7 (5)	78 ± 6 (12)	73 ± 8 (10)	61 ± 9 (10)	62
Elimination	[% oTR]	48 <sup>1</sup>	70 ± 10 (5)	71 ± 9 (13)	74 ± 7 (7)	76 ± 5 (11)	72 ± 6 (9)	53 ± 12 (7)	57
	[L CH <sub>4</sub> /kg oTR <sub>zu</sub> ]	180–310 <sup>2</sup>	329 <sup>¥</sup> k. A.	317 ± 56 (8)	322 ± 79 (5)	383 ± 62 (11)	394 ± 57 (7)	417 ± 43 (9)	k. A.
Methanausbeute	[L CH <sub>4</sub> /kg CSB <sub>el</sub> ]	190–330 <sup>2,4</sup>	283 <sup>¥</sup> k. A.	234 ± 67 (4)	241 ± 30 (2)	261 ± 55 (11)	289 ± 38 (6)	332 ± 53 (6)	342
	[L CH <sub>4</sub> /(m <sup>3</sup> d)]	k. A.	306 ± 64 (2)	379 ± 68 (7)	349 ± 67 (9)	297 ± 64 (13)	268 ± 58 (11)	207 ± 52 (11)	k. A.
Methan- bildungsrate	[L CH <sub>4</sub> /(m <sup>3</sup> d)]	k. A.	306 ± 64 (2)	379 ± 68 (7)	349 ± 67 (9)	297 ± 64 (13)	268 ± 58 (11)	207 ± 52 (11)	k. A.
Methangehalt	[% CH <sub>4</sub> ]	55– 75 <sup>5</sup>	61 ± 3 (6)	60 ± 4 (11)	58 ± 9 (6)	61 ± 4 (8)	60 ± 2 (11)	62 ± 4 (11)	60

Ein direkter Vergleich zwischen den einzelnen Parametern ist aufgrund der unterschiedlichen Anzahl der Werte und der hohen Std.-Abweichungen nicht möglich.

\*) Kleine bis große Kläranlagen; Faulzeit abhängig von der Anschlussgröße (HRT = 16 -28 d), T = mesophil.

‡) Die Dauer der Referenzphase betrug nach ca. zweimonatiger Einfahrphase 1 HRT. Aufgrund von Problemen mit der Messeinrichtung liegen nur wenige Werte vor.

¥) Berechnet aus Mittelwerten der Methanbildungsrate, Raumbelastung und/oder CSB-Elimination und daher unter erheblichem Vorbehalt zu betrachten.

1) DWA-M 368 (2014) mit  $\text{oTM}_{\text{abb}} = 57\%$   $\text{oTM}_{\text{zu}}$ ;  $\eta_{\text{abb}} = 85\%$ ;  $\text{CSB}/\text{oTM} = 1,7$ .

2) DWA-M 264 (2015) mit 65 % Methangehalt im Biogas.

3) Mit einer oTR-Elimination von 48 % nach DWA-M 368 (2014).

4) Mit  $\text{CSB}/\text{oTM} = 1,7$  (DWA-M 368, 2014) und 55 % CSB-Elimination.

5) DWA-M 264 (2015).

6) Wendland (2008). Laborversuche für Schwarzwasservergärung in einem CSTR. T = 37°C, HRT = 20 d.

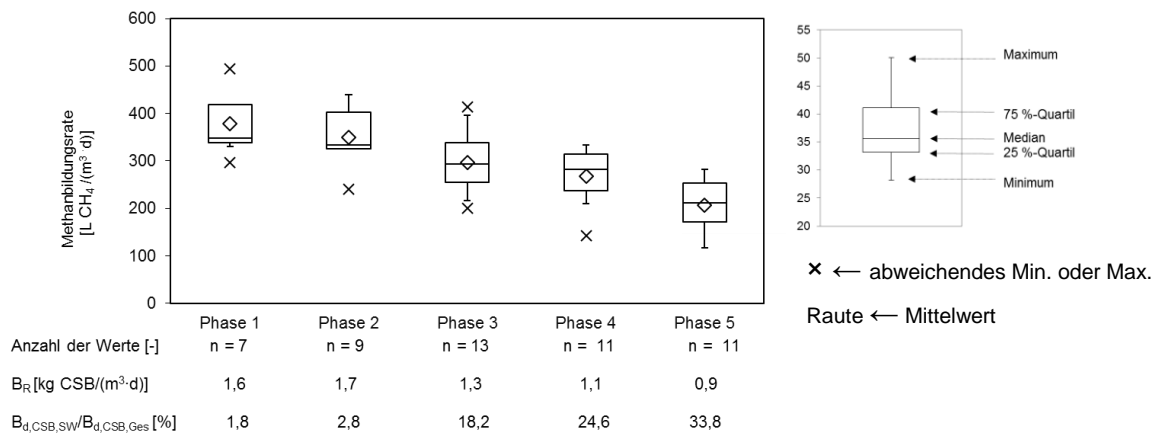


Abbildung 4–2: Methanbildungsrate des halbtechnischen CSTR-Reaktors bei zunehmendem Anteil von Schwarzwasser im Reaktorzulauf.

Eine stufenweise Erhöhung des Schwarzwasseranteils in bestehenden Faultürmen kann auf Basis der im Projekt erzielten Ergebnisse als einfach durchführbar beurteilt werden und ist bei der Transition zu NASS eine interessante Behandlungsalternative zu konventionellen Verfahren.

## 5 Fazit und Ausblick

- Der Betrieb des anaeroben CSTR-Reaktors bleibt bei Schwarzwasserzugabe im untersuchten Bereich bis zu ca. 34 % Schwarzwasseranteil im Zulauf stabil. Durch Schwarzwasserzugabe verändern sich die CSB-Elimination und der Methangehalt im Biogas kaum; die auf den  $CSB_{elim}$  bezogene spezifische Biogausbeute nimmt zu.
- Die Co-Vergärung von Schwarzwasser im Faulturm ermöglicht bei bestehenden Reserven im kommunalen Faulturm die sukzessive Trennung von Grauwasser und Schwarzwasser im Einzugsgebiet und die Einbindung bestehender Kläranlagen in Transitionskonzepte.
- Durch Co-Vergärung von Schwarzwasser im Faulturm können energetische Vorteile erzielt werden.
- Der erhöhte Nährstoffeintrag in den Faulturm und somit auch der Austrag aus dem Faulturm ist bei der Transition zu NASS zu berücksichtigen, weil es durch Verringerung des  $BSB_5$  zu Problemen in der Denitrifikation kommen kann (vgl. Morandi et al. 2016)<sup>3</sup>. Daher bedarf es ab einem kritischen Übergangszustand einer separaten Stickstoffelimination aus dem Prozesswasser oder einer gezielten Nährstoffrückgewinnung (vgl. Steckbriefe MAP, Zeolithe, Magnetseparation).

<sup>3</sup> Morandi, Carlo G.; Wasielewski, Stephan; Mouarkech, Karen; Minke, Ralf; Steinmetz, Heidrun. (2016): Impact of new sanitation technologies upon conventional wastewater infrastructures. Manuskript. Urban Water Journal.

