

Die Faulung als Wärmespeicher

Ganzheitliche Wärmenutzung durch saisonale Anpassung der Faulraumtemperatur

Bettina Steiniger, Christian Hubert (Neubiberg), Markus Spallek (Holzkirchen), Martin Michel (Winterhausen), Jörg Stanzel (Bickenbach) und Christian Schaum (Neubiberg)

Zusammenfassung

Die Flexibilisierung der Faulraumtemperatur ermöglicht den Betrieb der Faulung als Wärmespeicher, um die sonst bei konstanten Faulraumtemperaturen saisonal auftretenden Wärmeüberschüsse zwischen zu speichern und Wärmedefizite zu kompensieren. Damit kann die Faulung zu einem ganzheitlichen Energiemanagement auf Kläranlagen beitragen. Die energetische Beurteilung dieses angepassten Betriebs wird auf Basis einer theoretischen Betrachtung für eine Modellkläranlage mit 500 000 EW aufgezeigt. Zusätzliche Auswertungen von drei großtechnischen Kläranlagen in Deutschland sowie ergänzende halbtechnische Versuche zeigen das Potenzial des Betriebs der Faulung als saisonaler Wärmespeicher im Bereich zwischen 33 und 53 °C unter Beibehaltung der Prozessstabilität.

Schlagwörter: Klärschlamm, Behandlung, Flexibilisierung, Wärme-
management, Faulraum, Temperatur

DOI: 10.3242/kae2022.12.004

Abstract

Digestion as a heat store

Integrated heat utilisation through seasonal adjustments to the digester temperature

Making digester temperature more flexible allows a digester to be operated as a heat store, meaning that it can temporarily store surplus heat that would otherwise occur seasonally at constant digester temperatures and compensate for heat shortfalls. Digestion can thus contribute to an integrated energy management approach at wastewater treatment plants. This article analyses the energy impacts of altering operations in this manner using the theoretical exploration of a model wastewater treatment plant with a capacity of 500,000 PE. Additional evaluations of three large-scale wastewater treatment plants in Germany and supplementary semi-technical tests showcase the potential of operating the digestion system as a seasonal heat storage system in the range between 33 and 53 °C while maintaining process stability.

Key Words: sewage sludge, treatment, flexibilisation, heat management, digester, temperature

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Faulbehälter sind ein wesentlicher Bestandteil eines ganzheitlichen Wärmemanagements auf kommunalen Kläranlagen, da diese sowohl als Wärmeverbraucher als auch indirekt als Wärmeerzeuger durch die Verbrennung des methanhaltigen Faulgases in Blockheizkraftwerken (BHKW) agieren. In der Regel liegt der Fokus der energetischen Optimierung von Kläranlagen auf Seiten der elektrischen Energie, und die Betrachtung der Effizienz der Wärmenutzung spielt oftmals immer noch eine untergeordnete Rolle. Um den Erfordernissen der Einbindung beider Energieformen gerecht zu werden, sind Konzepte mit einer ganzheitlichen Wärmenutzung zu priorisieren.

Die Faulraumtemperatur bei der anaeroben Klärschlammstabilisierung orientiert sich an den optimalen Milieubedingungen der Biozönose, insbesondere den temperatursensiblen Methanogenen. Entsprechend werden Faulbehälter in der Regel bei konstanten Faulraumtemperaturen, meistens bei rd. 37 °C

und eher selten bei rd. 55 °C, betrieben. Für die Wärmebilanz einer kommunalen Kläranlage, im einfachsten Fall unter Berücksichtigung von Faulung, Betriebs- und Werkgebäuden sowie dem Warmwasser als Wärmeverbraucher und dem BHKW als Wärmeerzeuger auf der Gegenseite, ergeben sich bei gleichbleibender Gasproduktion mit Änderung der Außentemperaturen im Jahresverlauf Phasen von Wärmedefiziten und -überschüssen [1], vgl. Abbildung 1. Dadurch bietet sich der Einsatz von saisonalen Wärmespeichern auf Kläranlagen an, wobei mit der Faulung bereits ein potenzielles Speichervolumen zur Verfügung steht.

Die Nutzung dieses Potenzials erfordert jedoch die Abwendung von der Betriebsweise einer konstanten hin zu einer jahreszeitlich angepassten Faulraumtemperatur. Geringere Faulraumtemperaturen in den Wintermonaten senken entsprechend den Wärmebedarf, und höhere Faulraumtemperaturen

in den Sommermonaten speichern überschüssige Wärme zwischen, um die bevorstehenden Wärmedefizite anteilig auszugleichen.

Neben dem saisonalen Ausgleich von Wärmedefiziten und -überschüssen durch die Nutzung der Wärmekapazität des Klärschlammes finden sich weitere Aspekte, die eine Betriebsweise mit flexibler Faulraumtemperatur interessant machen:

- Steigerung des Gasertrags und der Abbauleistung durch Erhöhung der Umsatzgeschwindigkeit bei höheren Temperaturen
- Optimierung der Betriebsbedingungen (Aufenthaltszeit, Raumbelastung etc.)
- ökonomische und ökologische Vorteile (Reduzierung des externen Energiebezugs bzw. fossiler Energieträger, Einfluss auf die Konzentration des gelösten Methans, Erlöse aus Kraft-Wärme-Kopplung).

1.2 Flexibilität der Faulraumtemperatur

Optimale Betriebseinstellungen der Faulraumtemperatur liegen im mesophilen, zwischen 30 bis 40 °C, oder im thermophilen Temperaturbereich, zwischen 50 und 55 °C. Diese beiden Temperaturbereiche stellen das jeweilige Optimum für die an den anaeroben Abbau beteiligten Mikroorganismen dar [3, 4]. Jedoch können bereits kurzzeitige Schwankungen der Faulraumtemperatur auch innerhalb dieser Temperaturoptima zu Prozessstörungen führen [5, 6]. Ein stabiler Betrieb der Faulung zwischen 40 und 50 °C ist ebenfalls möglich, sofern Temperaturänderungen klein gehalten werden [7–9]. Empfehlung

gen zu maximalen Temperaturänderungen belaufen sich auf 0,5 bis 2,5 K pro Tag [6, 10, 11].

Auf die Möglichkeit der saisonalen Anpassung der Faulraumtemperatur, insbesondere der Erhöhung der Faulraumtemperatur in den Sommermonaten zur Zwischenspeicherung der überschüssigen Wärme, wird bereits in der gängigen Literatur hingewiesen [1, 3, 5]. Die großtechnische Umsetzung wird von [12] für zwei Kläranlagen in Deutschland zwischen 33 und 55 °C sowie von [3] für eine Kläranlage in Österreich zwischen 38 und 53 °C beschrieben. Beide berichten, dass der anaerobe Abbau auch zwischen meso- und thermophilen Temperaturen durchgängig ohne Einbußen der Faulgasproduktion und somit eine saisonale Anpassung der Faulraumtemperatur praktisch möglich ist.

Dennoch gibt es auch Berichte von Kläranlagenbetreibern, die die Variation der Faulraumtemperatur aufgrund von Betriebsproblemen eingestellt haben. An dieser Stelle sei anzumerken, dass derzeit die Grenzen hinsichtlich der hydraulischen Verweilzeit und der Raumbelastung bei unterschiedlichen Faulraumtemperaturen nicht eindeutig bekannt sind. Zudem kann die statische Auslegung der Faulbehälter die Möglichkeiten der Variation der Faulraumtemperatur limitieren. Neben den betrieblichen Randbedingungen des Faulbehälters ist entsprechend auch der statische Nachweis zwingend zu führen.

1.3 Zielsetzung

Ziel ist es, einen ersten Überblick über die energetischen und betrieblichen Auswirkungen der Variation der Faulraumtempe-

HUBER – Seit Jahrzehnten bewährte, energieeffiziente Maschinen und Lösungen

Mechanische Vorreinigung: ROTAMAT®-Maschinen

Kombination von Rechengutentfernung und -entwässerung in einem Aggregat

Mechanische Schlammbehandlung: S-DISC / Q-PRESS®

Optimale Eindickungs- bzw. Entwässerungsleistung bei minimalem Energieverbrauch

Thermische Schlammbehandlung: SOLSTICE®

Solare und regenerative Klärschlamm-trocknung

Auch für Ihren Anwendungsfall bieten wir die energieeffizienteste Lösung bei optimierten Life Cycle Kosten.



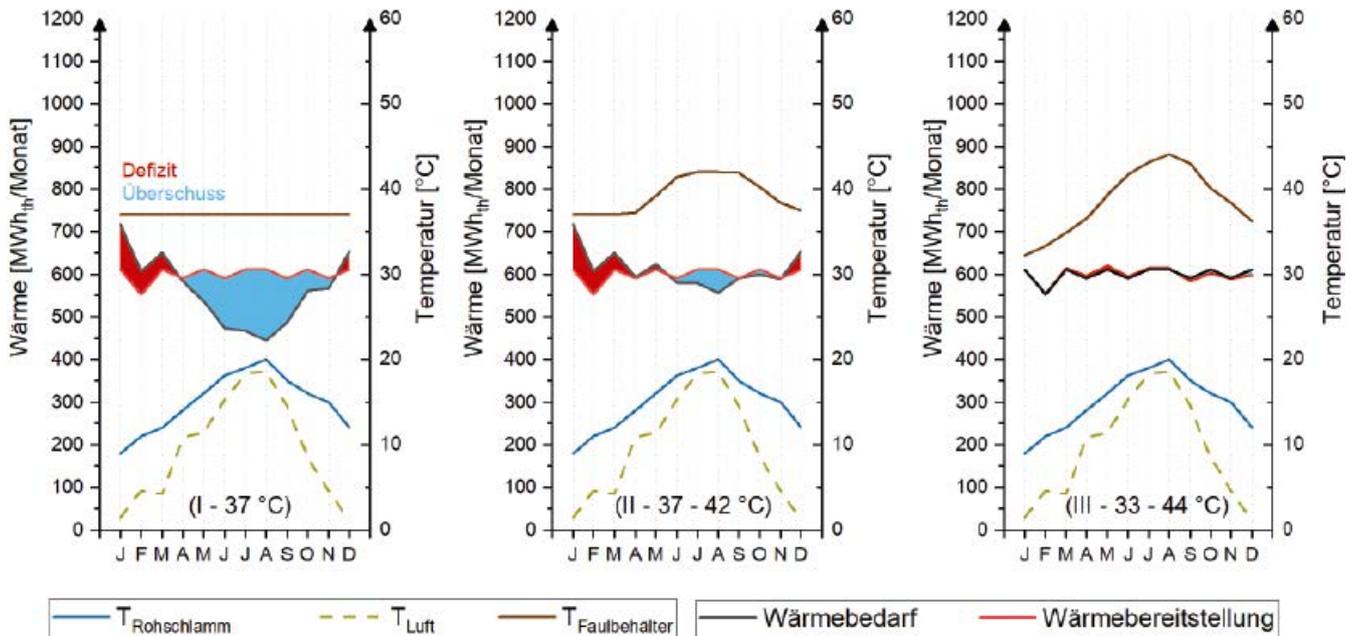


Abb. 1: Monatliche Wärmebilanzen als gesamter Wärmebedarf und -bereitstellung im Jahresverlauf sowie Temperaturen des Rohschlammes, der Umgebungsluft und im Faulbehälter für die drei Szenarien (verändert nach [2])

ratur im Kontext eines ganzheitlichen Wärmemanagements zu geben. Die Arbeiten erfolgten im Rahmen des Forschungsvorhabens *FLXsynErgy*, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms im Themenfeld „Energetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe“ gefördert wird.

2 Energetische Beurteilung der flexiblen Faulraumtemperatur

Der Betrieb einer konstanten Faulraumtemperatur von 37 °C in Mitteleuropa bedingt die Ausprägung von zeitlich getrennten Phasen von Wärmedefiziten und -überschüssen. Diese können durch Wärme aus der Verbrennung von Faulgas, oder auch fossilen Energieträgern, in Heizkesseln sowie mit dem Betrieb von Notkühlern kompensiert werden. Zudem können Wärmedefizite auch mit Wärmepumpen, Schlammrekuperatoren, Abwärme aus der Druckluftherzeugung und aus Adsorptionskühlanlagen zur Kühlung von Schalträumen, Büros und Warten kompensiert werden [1]. In den seltensten Fällen ist darüber hinaus ein Anschluss an ein externes Wärmenetz vorhanden.

Eine saisonale Anpassung der Faulraumtemperatur hingegen ermöglicht die Zwischenspeicherung überschüssiger Wärme durch Erhöhung der Faulraumtemperatur sowie Kompensation des Wärmedefizits durch Absenkung der Faulraumtemperatur. Die energetische Beurteilung des Konzepts der Faulung als saisonaler Wärmespeicher erfolgte anhand vier praxisrelevanter Betriebsweisen der Faulraumtemperatur. Für eine bereits energetisch optimierte Modellkläranlage mit 500 000 EW und einem Faulbehältervolumen von 16 000 m³ wurden Wärmebilanzen in Analogie zu den Ausführungen in [1] aufgestellt [2]:

- Szenario I: konstante Faulraumtemperatur von 37 °C über das ganze Jahr
- Szenario II: flexible Faulraumtemperatur zwischen 37 und 42 °C

- Szenario III: flexible Faulraumtemperatur mit minimalen, jährlichen Wärmedefiziten und -überschüssen.

Für die Wärmebilanzen setzt sich der Wärmebedarf auf Kläranlagen aus der Schlammaufheizung, Aufrechterhaltung der Faulraumtemperatur aufgrund von Transmissionsverlusten, allgemeinen Speicher-, Verteilungs- und Umwandlungsverlusten, Beheizung von Betriebs- und Werkgebäuden sowie dem Warmwasserbedarf zusammen [1, 14]. Die Wärmebereitstellung erfolgt über die Verbrennung des methanhaltigen Faulgases in BHKWs. Hierbei wird auf Basis von eigenen Untersuchungen und Literaturwerten von einer konstanten Gasproduktion bei Temperaturen zwischen 33 und 53 °C für kommunalen Rohschlamm ausgegangen, vgl. [15]. Zudem wird vereinfacht angenommen, dass die Menge und Qualität des Rohschlammes über das Jahr konstant ist. Die monatlichen Wärmebilanzen für die drei Szenarien sind in Abbildung 1 dargestellt.

Während die Wärmebereitstellung bei allen drei Szenarien identisch ist und nur geringen Schwankungen im Jahresverlauf unterliegt, variiert der Wärmebedarf in Abhängigkeit von der Jahreszeit aufgrund saisonaler Änderungen der Umgebungs- und Rohschlammtemperatur sowie der Faulraumtemperatur. Bei einer konstanten Faulraumtemperatur von 37 °C über das Jahr ergeben sich mit steigenden Umgebungs- und Rohschlammtemperaturen in den Frühjahr-, Sommer- bis in die Herbstmonate hinein Wärmeüberschüsse. Mit geringeren Umgebungs- und Rohschlammtemperaturen in den Herbst- und Wintermonaten kann der Wärmebedarf die Wärmebereitstellung übersteigen, sodass eine allmähliche Abkühlung des Faulraums eintritt. In den Wintermonaten treten entsprechend Wärmedefizite auf.

Bei einer flexibilisierten Fahrweise der Faulraumtemperatur, wie in Szenario II dargestellt, wird die überschüssige Wärme dem Faulbehälter zur Zwischenspeicherung bis maximal 42 °C zugeführt. Daraus resultieren zwangsweise Faulraumtemperaturen über den empfohlenen mesophilen Temperaturbereich. Letztlich reduziert sich dadurch die überschüssige Wärme als

Jahressumme im Vergleich zum Szenario I deutlich. Mit der höheren Faulraumtemperatur wiederum erhöht sich zudem der Wärmebedarf für die Faulung (insbesondere aufgrund der Schlammaufheizung), sodass das jährliche Wärmedefizit sogar leicht ansteigt.

In Szenario III wird daher in den Wintermonaten eine Absenkung der Faulraumtemperatur betrachtet, wodurch sich die Wärmedefizite minimieren. Insgesamt zeigt die Wärmebilanz des Szenarios III, dass eine saisonale Anpassung der Faulraumtemperatur zwischen 33 und 44 °C rein rechnerisch zu einer minimalen Jahressumme an Wärmedefizit und -überschuss für die betrachtete Modellkläranlage führt.

Zur Einhaltung der Prozessstabilität ist die Berücksichtigung von den in der Literatur empfohlenen Temperaturänderungen zu berücksichtigen. Der maximale Temperaturgradient beträgt 2,5 bzw. 3,6 K pro Monat in den Szenarien II bzw. III, sodass die Prozessstabilität des anaeroben Abbaus aufrechtgehalten wird. Entsprechend kann die Faulung als Wärmespeicher mit saisonaler Anpassung der Faulraumtemperatur betrieben werden. Die Kompensation der Wärmedefizite und -überschüsse kann damit einen essentiellen Beitrag zu einem ganzheitlichen Wärmemanagement auf Kläranlagen leisten.

3 Großtechnische und halbtechnische Auswertungen

Zur Identifikation der Einflüsse der Faulraumtemperatur auf den anaeroben Abbau und den nachfolgenden Verfahrensschritten wurden Betriebsdaten von drei kommunalen Kläran-

lagen in Mittel- und Süddeutschland ausgewertet und ergänzende Untersuchungen an Faulbehältern im halbtechnischen Maßstab durchgeführt. Die Kläranlagen weisen dabei folgende standortspezifischen Randbedingungen auf:

- #KA_A: 95 000 EW; zwei nacheinander geschaltete Faulbehälter (zweiter Faulbehälter ist unbeheizt und nicht durchmischt), Variation der Faulraumtemperatur im ersten Faulbehälter zwischen 30 und 56 °C (rd. 28 Tage Verweilzeit im ersten Faulbehälter); Co-Vergärung; Klärschlamm-trocknung
- #KA_B: 50 000 EW; zwei nacheinander geschaltete Faulbehälter (zweiter Faulbehälter ist unbeheizt und nicht durchmischt), Variation der Faulraumtemperatur im ersten Faulbehälter zwischen 33 und 50 °C (rd. 35 Tage Verweilzeit im ersten Faulbehälter)
- #KA_C: 35 000 EW; zwei parallel betriebene Faulbehälter (rd. 38 Tage Verweilzeit jeweils in beiden Faulbehältern); Variation der Faulraumtemperatur in beiden Faulbehältern zwischen 33 und 44 °C; Mikrogastrurbine; Prozesswasserbehandlung mittels Deammonifikation

Basierend auf den großtechnischen Betriebsdaten wurden die auftretenden Temperaturbereiche zwischen 34 und 52 °C in sieben Temperaturniveaus eingeteilt. Der Einfluss der Faulraumtemperatur auf den anaeroben Abbau wurde für Zeiträume von mindestens einem Monat und Temperaturgradienten kleiner als ± 1 K bei 34, 37, 40, 43, 46, 49 und 52 °C ausgewertet. In Abhängigkeit von den Temperaturprofilen der einzelnen Kläranlagen liegt zwangsläufig eine unterschiedliche

EISENHYDROXID

... der **Alleskönner** in der Abwasserwirtschaft

- ▶ Schlammfäulung und Faulgasbehandlung
- ▶ Phosphateliminierung
- ▶ Behandlung von Niederschlagswässern
- ▶ Verhinderung von Geruch und Korrosion im Abwasserkanalnetz

Nutzen Sie unsere **FerroSorp®-Produkte** - wir beraten Sie gern!

HeGo Biotec GmbH
 Wirkstoffe für den Umweltschutz
 Tel. (030) 847 18 550 • www.hego-biotec.de

ISO 9001

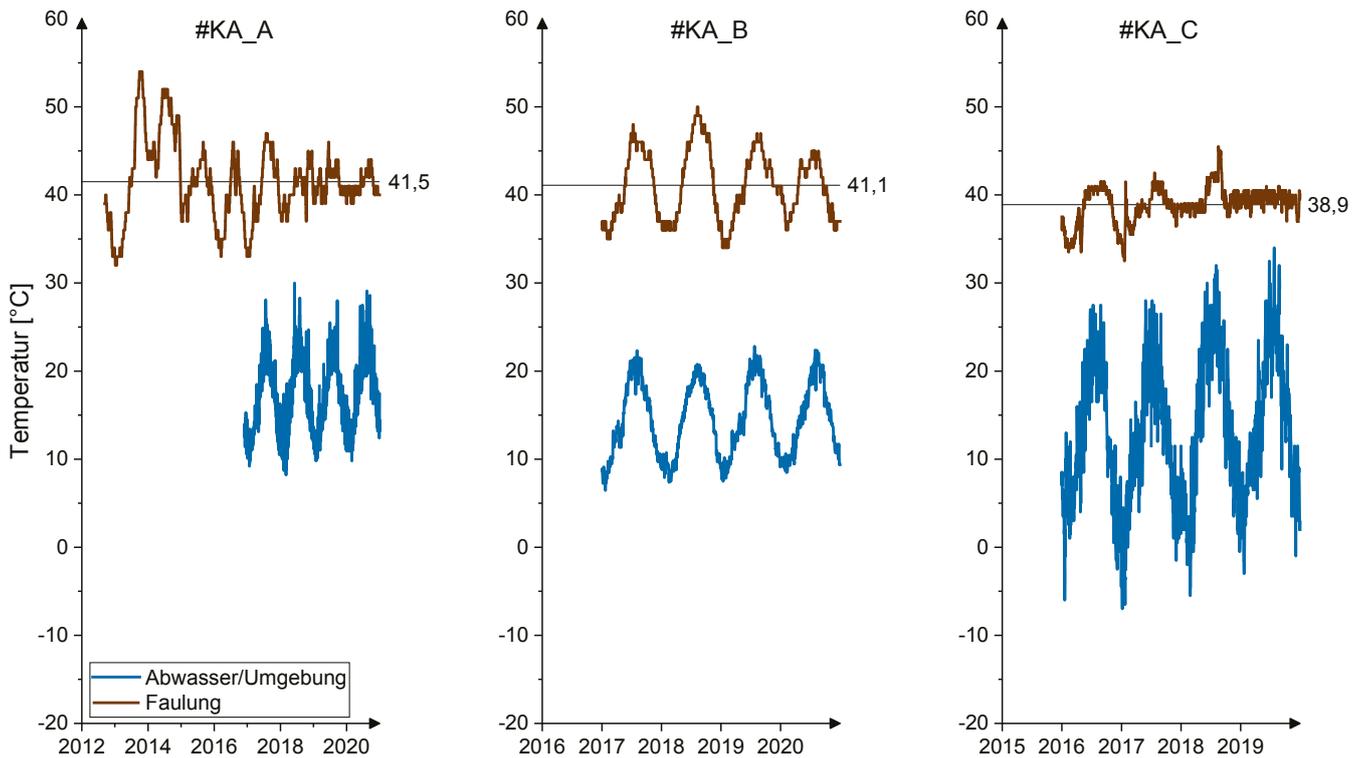


Abb. 2: Jahresverläufe der Faulraumtemperatur und Abwasser- bzw. Umgebungstemperatur der drei Kläranlagen sowie der Abwasser- bzw. Faulraumtemperatur des Betrachtungszeitraums

Anzahl an auswertbaren Zeiträumen vor. Bei den Kläranlagen mit ausgeprägten Temperaturprofilen konnten entsprechend nur wenige Zeiträume für die minimalen und maximalen Temperaturniveaus ausgewertet werden. Die Auswertungen ermöglichen Aussagen hinsichtlich der spezifischen Methanausbeuten, der Methankonzentration sowie der organischen Raumbelastung. Die dargestellten Werte sind jeweils Mittelwerte der ausgewerteten Zeiträume.

Die Bewertung der Prozessstabilität erfolgte über die gemessene Konzentration an organischen Säuren. Aussagen über den Einfluss der Faulraumtemperatur auf das Entwässerungsverhalten sowie die Qualität des Prozesswassers aus der Schlammmentwässerung sind aufgrund der verfahrenstechnischen Anordnung der Faulbehälter bzw. mangelnder Datendichte nicht eindeutig möglich.

Dafür wurden ergänzende Untersuchungen mit fünf quasi-kontinuierlich betriebenen Laborfaulungen im Maßstab von 15 und 20 L Arbeitsvolumen bei einer hydraulischen Verweilzeit von 20 Tagen durchgeführt. Die Faulbehälter wurden bei 33, 37, 43, 47 und 53 °C betrieben. Als Substrat wurden Mischungen aus Primär- und Überschussschlamm (PS:ÜSS) der #KA_B eingesetzt. Die Auswertungen erfolgten nach ausreichender Adaption an das jeweilige Temperaturniveau über CSB-Bilanzen. Umfangreiche Analysen ergänzen somit die Auswertungen der Großtechnik hinsichtlich spezifischer Methanausbeuten, Methankonzentrationen, dem Entwässerungsverhalten sowie der Qualität des Prozesswassers. Zur Beurteilung des Einflusses der Faulraumtemperatur auf das Entwässerungsverhalten wurden die kapillare Fließzeit (CST-Test) bestimmt und Zentrifugentests durchgeführt. Zudem wurde konditionierter Faulschlamm in einer Laborpresse entwässert. Die Entwässerungsversuche erfolgten nach Abkühlung der Faulschlämme auf Raumtemperatur. Die Qualität des Prozesswassers wurde an-

hand der Konzentrationen an Ammonium und gelöstem CSB im Schlammwasser beurteilt.

3.1 Temperaturprofile in den Faulbehältern auf den Kläranlagen

Die saisonale Variation der Faulraumtemperatur auf den drei Kläranlagen ist in Abhängigkeit von der verfügbaren Wärme nach Deckung des Wärmebedarfs der standortspezifischen Wärmeverbraucher unterschiedlich ausgeprägt. Die primäre Motivation der Flexibilisierung der Faulraumtemperatur unterscheidet sich zwischen den Betreibern der einzelnen Standorte. Insgesamt lassen sich diese in der Umsetzung eines ganzheitlichen Wärmemanagements, der Außerbetriebnahme von Notkühlern (ursprünglich aufgrund eines Defekts) oder auch der Minimierung der eingesetzten Menge an Faulgas bzw. fossilen Energieträgern, die zur Kompensation von Wärmedefiziten eingesetzt werden, zusammenfassen.

Einfluss auf das jeweilige Temperaturprofil nimmt dabei das Zusammenspiel aus der Wärmebereitstellung bei Verbrennung des Faulgases in den BHKWs, den Wärmeverbrauchern, der Umgebungstemperatur im Jahresverlauf mit dem Betrieb von Kompensationseinrichtungen (wie zum Beispiel Heizkessel und Notkühler). Letztlich ist dabei die Menge an überschüssiger Wärme entscheidend, die in die Faulbehälter eingebracht wird. Abweichend von dem konventionellen Betrieb bei konstanten, mesophilen Temperaturen ergeben sich entsprechend den standortspezifischen Randbedingungen charakteristische Temperaturprofile für die einzelnen Kläranlagen (Abbildung 2).

Die mittleren Faulraumtemperaturen über die betrachteten Jahre überschreiten bei allen drei Kläranlagen die 37 °C. Wenngleich in der Regel die Rohschlammaufheizung den größten Wärmeverbraucher darstellt, ist das Temperaturprofil maßgeblich geprägt von der standortspezifischen Ausstattung wie bei-

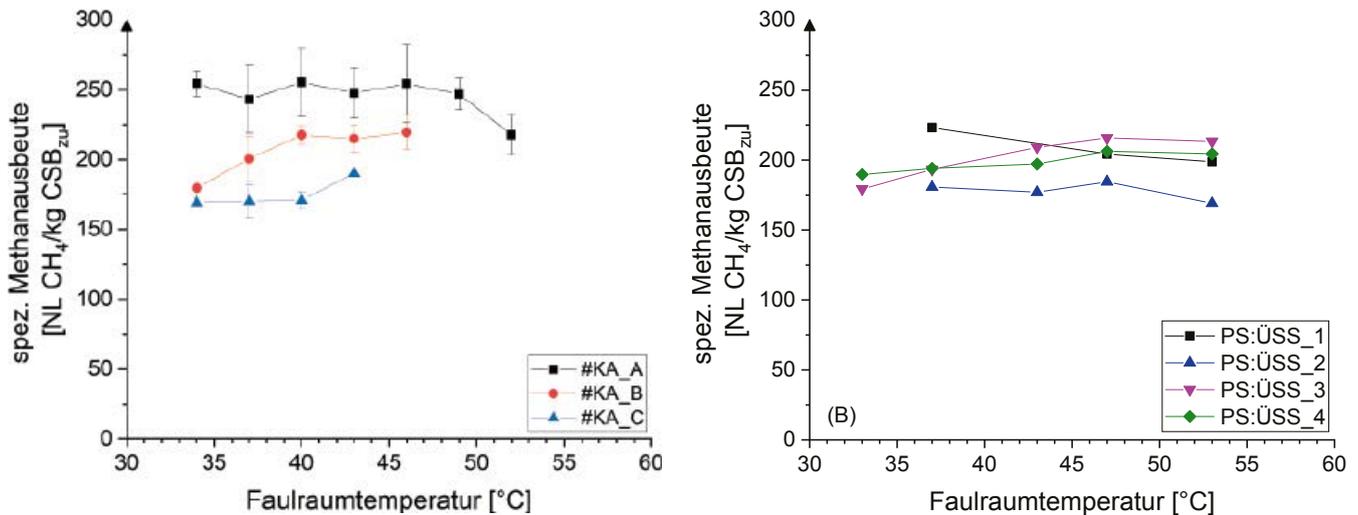


Abb. 3: Gegenüberstellung der spezifischen Methanausbeuten zwischen 33 und 53 °C aus den großtechnischen Betriebsdaten (links) und den halbtechnischen Versuchen (rechts), aufgetragen über die Faulraumtemperatur (verändert nach [15])

spielsweise der Klärschlamm-trocknung und der Co-Vergärung auf der #KA_A sowie der Deammonifikation und der Mikrogastrurbine auf der #KA_C. Die Kläranlage #KA_B hingegen verfügt über keine zusätzlichen Wärmeverbraucher, sodass die Faulraumtemperatur hierbei der Abwassertemperatur folgt und der saisonale Verlauf deutlich zu erkennen ist (Abbildung 2). Entsprechend wird die überschüssige Wärme in den Frühjahrs- und Sommermonaten zur Aufheizung der Faulraumtemperatur eingesetzt, sodass erst mit abkühlenden Lufttemperaturen und dadurch steigendem Wärmebedarf in den Herbst- und Wintermonaten die Faulraumtemperatur bis in das Frühjahr des folgenden Jahres abkühlt.

Zur Aufrechterhaltung des anaeroben Abbauprozesses ist eine wesentliche Voraussetzung, dass die Temperaturänderungen möglichst geringgehalten werden. Die in der Literatur empfohlenen täglichen Temperaturänderungen von 0,5 bis 2,5 K pro Tag werden auch im Fall der Faulrautemperaturen bei den drei Kläranlagen mit Werten kleiner als 1 K pro Tag eingehalten.

3.2 Anaerober Abbau innerhalb meso- und thermophiler Temperaturen

Der anaerobe Abbauprozess wird auf Basis der vorliegenden Daten anhand spezifischer Methanausbeuten, des Methangehalts sowie der Konzentration an organischen Säuren auf unterschiedlichen Temperaturniveaus beurteilt. Aus den großtechnischen und halbtechnischen Betriebsdaten wurden für die einzelnen Temperaturniveaus CSB-Bilanzen aufgestellt. Für diese Zeiträume wurden die spezifischen Methanausbeuten bezogen auf den zugeführten CSB, dargestellt in Abbildung 3, ermittelt.

Für die #KA_A liegen die spezifischen Methanausbeuten zwischen 34 und 49 °C in etwa auf einem Niveau, wobei sich für die Zeiträume mit 52 °C die geringsten spezifischen Methanausbeuten ergaben. Die spezifischen Methanausbeuten der #KA_A sind im Vergleich zu jenen der #KA_B und #KA_C aufgrund der Zugabe von Co-Substraten höher. Die organischen Raumbelastungen schwanken aufgrund der praktizierten Co-Vergärung und der Anzahl an auswertbaren Zeiträumen

zwischen 1,5 bis 1,9 CSB/(m³·d) bei Temperaturen zwischen 34 und 49 °C und betragen 2,2 kg CSB/(m³·d) bei 52 °C.

Bei der #KA_B steigen die spezifischen Methanausbeuten zwischen 34 und 40 °C an und verbleiben dann bei noch höheren Temperaturen auf einem Niveau. Hier liegen bei allen Temperaturniveaus die organischen Raumbelastungen bei rd. 1,5 kg CSB/(m³·d). Auf der #KA_C wiederum zeigen sich konstante spezifische Methanausbeuten bis 40 °C mit organischen Raumbelastungen von jeweils rd. 0,5 kg CSB/(m³·d). Aus den halbtechnischen Versuchen ergibt sich eine Konstanz der spezifischen Methanausbeuten zwischen 33 und 53 °C bei einer organischen Raumbelastung von rd. 1,7 kg CSB/(m³·d).

Die Methangehalte der Kläranlagen liegen für die betrachteten Zeiträume zwischen 63,9 und 65,4 % bei der #KA_A, zwischen 62,9 und 63,6 % bei der #KA_B sowie zwischen 65,0 und 66,2 % bei der #KA_C. Diese Konstanz für die einzelnen Temperaturniveaus ist ebenfalls für die halbtechnischen Versuche zu beobachten, bei denen sich Methangehalte zwischen 63,5 und 64,8 % für die ausgewerteten Zeiträume zeigen. Ein wesentlicher Einfluss der Temperatur auf die Gasqualität konnte somit weder für die großtechnischen noch für die halbtechnischen Anlagen beobachtet werden.

Wesentlicher Indikator für die Prozessstabilität ist neben der spezifischen Methanausbeute und dem Methangehalt die Konzentration an organischen Säuren. Letztere werden auf den einzelnen Kläranlagen mit unterschiedlichen Methoden analysiert (Küvettestests, GC-Analyse und Nordmann-Titration), sodass die absoluten Werte nur bedingt vergleichbar sind. Nichtsdestotrotz ergeben sich Konzentrationen an Essigsäureäquivalenten für alle Temperaturniveaus der drei Kläranlagen von kleiner als 500 mg/L und deuten damit einen stabilen Betrieb an. Aus den halbtechnischen Versuchen zeigt sich, dass die Konzentration an organischen Säuren mit zunehmender Faulraumtemperatur von im Mittel 311 mg/L bei 33 °C auf 488 mg/L bei 53 °C leicht ansteigen (als Essigsäureäquivalente mittels Nordmann-Titration), was sich mit Angaben aus anderen Veröffentlichungen deckt.

Anhand der durchgeführten Auswertungen und ergänzenden, analytischen Untersuchungen zeigt sich, dass ein stabiler Prozess im Temperaturbereich zwischen 33 und 53 °C ohne

Einbußen der Prozessstabilität möglich ist. Temperaturänderung und Raumbelastung scheinen, bei hydraulischen Verweilzeiten von größer als 20 Tagen und Substratmischungen aus Primär- und Überschussschlamm, einen größeren Einfluss auf die Prozessstabilität zu nehmen als das Temperaturniveau selbst. Letztlich ist die Ausprägung der Variation der Faulraumtemperatur maßgeblich von der überschüssigen Wärmemenge und damit von standortspezifischen Randbedingungen (wie Hygienisierung, Schlammtrocknung, thermische Desintegration, Prozesswasserbehandlung mittels Deammonifikation, Kältebedarf etc.) abhängig.

3.3 Auswirkungen auf nachfolgende Verfahrensschritte

Eine ganzheitliche Betrachtung der Temperaturvariation in der Faulung bedarf einer zusätzlichen Betrachtung der Auswirkungen auf das Entwässerungsverhalten in Hinblick auf die weitere Klärschlammbehandlung sowie eine mögliche Rückbelastung durch das Prozesswasser.

Die Temperatur spielt bei der Entwässerung eine doppelte Rolle. Zum einen verbessert sich mit steigender Temperatur des

Faulschlamm während des Entwässerungsprozesses aufgrund der geringeren Viskosität das Entwässerungsverhalten [16]. Zum anderen kann die Faulraumtemperatur aufgrund Veränderungen der Schlammeigenschaften (wie zum Beispiel der Viskosität, Ablösung von exopolymeren Substanzen) ebenfalls Einfluss auf das Entwässerungsverhalten nehmen. Die Faulraumtemperatur hat zudem maßgeblichen Einfluss auf den Zustand von exopolymeren Substanzen, die bei Temperaturen zwischen 40 bis 50 °C denaturieren, wodurch sich die Wasserbindung vermindert [17].

Die Ergebnisse der Entwässerungsversuche sind in Abbildung 4 dargestellt. Der spezifische CST (sCST) erhöht sich fast linear mit steigender Faulraumtemperatur von rd. 60 s/ % bei 33 °C auf rd. 354 s/ % bei 53 °C. Der berechnete Trockenrückstand in den Zentrifugentests wiederum zeigt keinen eindeutigen Trend und schwankt zwischen 13,0 % TR bei 33 °C und 14,9 % TR bei 53 °C. Weitere Entwässerungstests wurden mit denselben Faulschlämmen, nach Zugabe von Polymer mit Dosierungen zwischen 8 und 12 mg WS/g TR, mit einer Laborpresse durchgeführt. Es zeigt sich, dass für alle drei Polymerdosierungen die höchsten TR-Konzentrationen mit dem bei 53 °C ausgefaulten Faulschlamm erzielt wurden. Die Polymerdosierung von 8 mg WS/g TR erzielte bei den Temperaturniveaus 33, 43, 47 und 53 °C sowie mit 10 und 12 mg WS/g TR bei 37 °C jeweils die höchsten TR-Konzentrationen. An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Polymerversuche nur mit einem Typ an Polymer durchgeführt wurden.

Die durchgeführten Analysen bestätigen, dass die Wahl des Wirkprinzips Einfluss auf das Entwässerungsergebnis nimmt. Während der spezifische CST-Wert auch als indirekter Parameter für den Anteil an Feinstpartikeln in dem Faulschlamm eingeordnet werden kann, spielt dies bei der Zentrifugation und der Pressung eine untergeordnete Rolle [17].

Bei einem flexiblen Betrieb der Faulraumtemperatur ist ebenfalls der Einfluss auf die Zusammensetzung des Prozesswassers der Klärschlammwässerung in Hinblick auf die Rückbelastung der Kläranlagen zu berücksichtigen. Erste Analysen der gelösten Stoffe im Faulschlamm der halbtechnischen Versuchsanlagen zeigen einen deutlichen Anstieg des gelösten

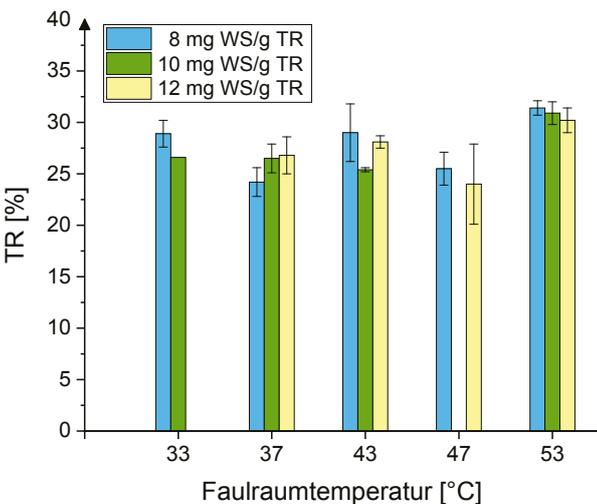
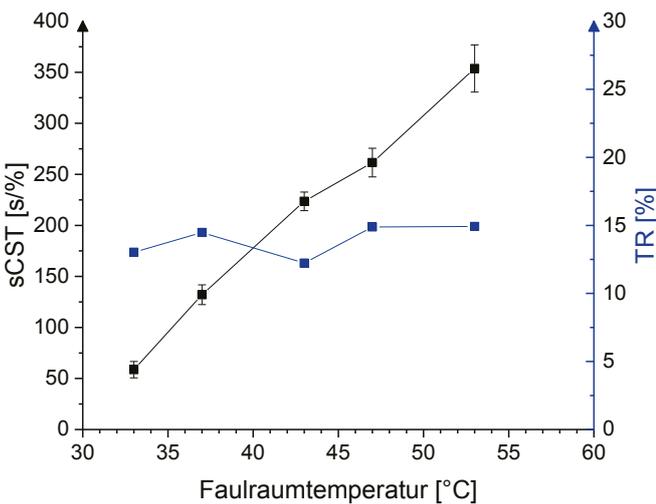


Abb. 4: Ergebnisse der Entwässerungsversuche als sCST und TR nach Zentrifugation (oben) sowie nach Pressung in Laborpresse (unten) für Faulschlämme aus den Laborversuchen zwischen 33 und 53 °C (verändert nach [15])

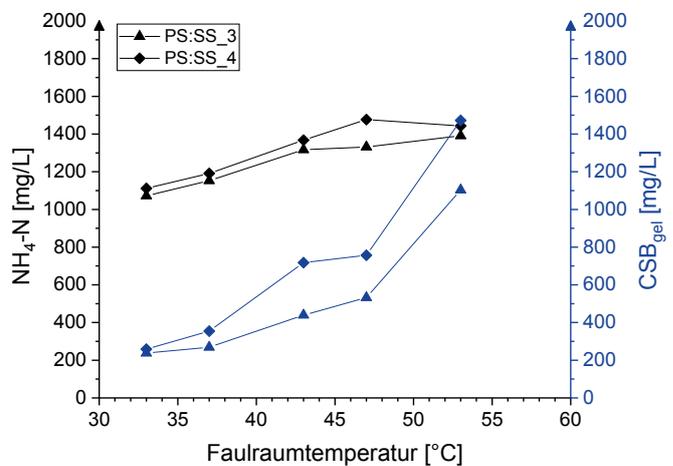


Abb. 5: Konzentration von Ammonium und gelöstem CSB im Schlammwasser für Faulschlämme aus den Laborversuchen zwischen 33 und 53 °C

CSB mit steigender Faulraumtemperatur. Diese kann auf den Anstieg an gelösten Proteinen und organischen Säuren aufgrund schnellerer Hydrolyse [18] sowie den Zerfall der Schlammflocken bei höherer Faulraumtemperatur zurückgeführt werden [19]. Es ist davon auszugehen, dass eine vermehrte Bildung von inertem CSB, wie beispielsweise bei der Thermodruckhydrolyse, in dem Temperaturbereich bis 53 °C keine entscheidende Rolle spielt und daher die höheren Konzentrationen an gelöstem CSB in der biologischen Verfahrensstufe abgebaut werden können.

Gleichzeitig erhöhen sich die Konzentrationen von Ammonium geringfügig aufgrund des weitergehenden Abbaus von Proteinen bei höheren Temperaturen (vgl. Abbildung 3, rechts, für PS:SS_3 und _4). Wenngleich die Konzentrationen an Ammonium noch in einem unkritischen Bereich sind, ist insbesondere die Gefahr von Prozessinstabilitäten bei der Zugabe von proteinhaltigen (Co-)Substraten bei thermophilen Temperaturen aufgrund einer Ammoniakhemmung zu beachten.

4 Fazit und Ausblick

Die Faulung kann durch Variation der Faulraumtemperatur als saisonaler Wärmespeicher betrieben werden und stellen damit einen wichtigen Baustein für ein ganzheitliches Wärmemanagement dar. Aufgrund der Zwischenspeicherung von überschüssiger Wärme über die Erhöhung der Faulraumtemperatur kann das jährliche Wärmedefizit auf ein Minimum reduziert werden.

Unter Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen zeigen die Auswertungen zur Variation der Faulraumtemperatur im Bereich zwischen 33 bis 53 °C sowohl im großtechnischen als auch im halbtechnischen Maßstab den prozessstabilen, anaeroben Abbau und damit das Potenzial der Faulung als Wärmespeicher. Mit Variation der Faulraumtemperatur wird die Statik des Faulbehälters zusätzlich beansprucht, entsprechend ist zwingend der statische Nachweis, insbesondere bei Betonbauwerken, zu führen. Ebenso sind die spezifischen Randbedingungen der Faulbehälter (wie hydraulische Verweilzeit, Raumbelastung etc.) im Einzelfall zu berücksichtigen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens *FLXsynErgy* wird mittels Betriebsdatenauswertungen einschließlich zusätzlichen Beprobungen sowie ergänzenden, halbtechnischen Versuchen die bereits bestehende Datenbasis weiter verdichtet. Dabei liegt der Fokus auf den Fragestellungen, in welchem Temperaturbereich die flexible Faulraumtemperatur sowohl aus energetischen, verfahrenstechnischen als auch ökonomischen sowie ökologischen Aspekte sinnvoll ist. Derzeit werden weitere Untersuchungen für Faulschlämme aus der Großtechnik hinsichtlich dem Entwässerungsverhalten und der Zusammensetzung des Prozesswassers durchgeführt.

Dank

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des Forschungsprojekts „*FLXsynErgy* – Flexible und vollenergetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe: Faulungen und Biogasanlagen als Energieverbraucher, -speicher und -erzeuger“ gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms im Themenfeld „Energetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe“.

Besonderen Dank gilt dem Umweltlabor der Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik an der Universität der Bundeswehr München für die Unterstützung bei den durchgeführten Analysen.

Literatur

- [1] Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV): *Energie in Abwasseranlagen: Handbuch NRW*, Düsseldorf, 2018
- [2] Steiniger, B., Hubert, C., Schaum, C.: Digesters as Heat Storage – Energetic Assessment of Flexible Variation of Digester Temperature, *Chemical Engineering and Technology* 2022, 45 (1), 144–151
- [3] Merkblatt DWA-M 368: *Biologische Stabilisierung von Klärschlamm*, Hefen, 2014
- [4] Metcalf & Eddy Inc.; Tchobanoglous, G.; Burton, F. L.; Tsuchihashi, R.; Stensel, H. D.: *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*, 5. Aufl., International Student Edition, McGraw-Hill, New York, 2014
- [5] Bischofsberger, W.; Rosenwinkel, K.-H.; Dichtl, N.; Seyfried, C. F.; Böhne, B.; Bsdok, J.; Schröter, T.: *Anaerobtechnik*, 2. Aufl., Springer, Berlin, 2005
- [6] Water Environment Federation (WEF): *Design of Water Resource Recovery Facilities*, McGraw-Hill Education, New York, 2018
- [7] Temper, U.: *Methangärung von Klärschlamm und anderen komplexen Substraten bei mesophilen und thermophilen Temperaturen*, Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München, 1983
- [8] Pfeiffer, W.: *Verfahrensvarianten der biologischen Stabilisierung und Entseuchung von Klärschlamm – Leistungsvergleich*, Dissertation, Berichte aus der Siedlungswasserwirtschaft, Heft 87, TU München, 1990
- [9] Rossol, K. K. S.; Meyer, H.: Schlammfäulung bei erhöhten Temperaturen, *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 2005 52 (10), 1120–1125
- [10] de la Rubia, M. A.; Romero, L. I.; Sales, D.; Perez, M.: Temperature conversion (mesophilic to thermophilic) of municipal sludge digestion, *AIChE Journal* 2005, 51 (9), 2581–2586
- [11] de Lemos Chernicharo, C.: *Anaerobic Reactors*, IWA Publishing, London, 2007
- [12] Hubert, C.; Steiniger, B.; Schaum, C.; Michel, M.; Spallek, M.: Variation of the digester temperature in the annual cycle – using the digester as heat storage, *Water Practice and Technology* 2019, 14 (2), 471–481
- [13] Loidl, M.: Temperaturerhöhung im Faulturm – Auswirkungen auf Schlammfäulung und Faulgas, *KA-Betriebs-Info* 2020 (2), 2957–2960
- [14] Arbeitsblatt DWA-A 216: *Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen*, Hefen, 2015
- [15] Steiniger, B.; Hubert, C.; Schaum, C.: Digesters as Heat Storage – Effects of the Digester Temperature on the Process Stability, Quality of Sludge Liquor and the Dewaterability, eingereicht
- [16] Denkert, R.: Sommer-/Winter-Schlammproblematik – Auswirkungen und Strategien, 9. DWA-KlärschlammTage, Potsdam, 2015
- [17] Merkblatt DWA-M 383: *Kennwerte der Klärschlammfäulung*, Hefen, 2019
- [18] Donoso-Bravo, A.; Retamal, C.; Carballa, M.; Ruiz-Filippi, G.; Chamy, R.: Influence of temperature on the hydrolysis, acidogenesis and methanogenesis in mesophilic anaerobic digestion: parameter identification and modeling application, *Water Science and Technology* 2009, 60 (1), 9–17
- [19] Bouskova, A.; Persson, E.; Jansen, J. L. C.; Dohanyos, M.: The effect of operational temperature on dewatering characteristics of digested sludge, *Journal of Residuals Science & Technology* 2006, 3 (1), 43–49

Autoren

Bettina Steiniger, M. Sc., Christian Hubert, M. Sc.,
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schaum
 Universität der Bundeswehr München
 Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik
 Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

E-Mail: bettina.steiniger@unibw.de

Markus Spallek
 Gemeindliche Einrichtungen und Abwasser Holzkirchen

Klärwerk Fellach
 Meßnerstraße 24, 83697 Holzkirchen

Dr. Martin Michel
 Zweckverband zur Abwasserbeseitigung im Raum Ochsenfurt
 Klärwerk Winterhausen
 Heidingsfelder Straße 35, 97286 Winterhausen

Jörg Stanzel
 Abwasserverband Bickenbach,
 Seeheim-Jugenheim
 Berta-Benz-Straße 101, 64404 Bickenbach



Hier werden Sie umfassend informiert: www.gfa-news.de

Infos zu Bannern, Skyscrapern oder Sponsored News auf GFA-News
 unter +49 2242 872-130 | anzeigen@dwa.de | dwa.de/mediadaten



© jarmoluk, pixabay

Das Nachrichtenportal für Wasser und Abwasser

- Schneller Zugriff
- Tagesaktuelle Informationen
- Von Fachleuten für Fachleute
- Aus der Redaktion KA/KW

Servicegesellschaft der DWA



Wasserwirtschaft. Abwasser. Abfall.

