

Christan Schaum, Dorothee Lensch, Robert Lutze, Peter Cornel

# Klärschlammbehandlung der Zukunft

Das Verbundprojekt ESiTI lotet die energetische Optimierung von Kläranlagen aus. Der Fokus liegt auf einer flexiblen Energieerzeugung und dem Ressourcenschutz.



Die angewandten Verfahren der Abwasserbehandlung bedingen, dass Abwasserinhaltsstoffe, die während des Reinigungsprozesses aus dem Abwasser eliminiert, aber nicht in gasförmige Stoffe, z. B. Kohlendioxid oder Stickstoff überführt werden, in Form von Klärschlamm anfallen. Dies gilt auch für die während der Abwasserbehandlung eingesetzten Hilfsstoffe. Für eine zukünftige Klärschlammbehandlung stehen vor allem die im Klärschlamm enthaltenen Ressourcen Phosphor und Energie, respektive organische Substanzen im Fokus /1/.

## Ressource Phosphor

Phosphor ist ein begrenzter, lebensnotwendiger Rohstoff, welcher durch kein anderes Element ersetzt werden kann. Hauptanwendungsgebiet bildet die Düngemittelindustrie bzw. die Landwirtschaft. Phosphor wird während der Abwasserbehandlung durch biologische sowie chemisch-physikalische Verfahren (Fällung) in den Klärschlamm eingebunden, vgl. Bild 1. Aus diesem Grund gibt es diverse Bestrebungen den im Klärschlamm bzw. nach einer Monoklärschlammverbrennung in der Klärschlamm- asche enthaltenen Phosphor zu recyceln, was eine Trennung der Nährstoffe von den Schadstoffen erforderlich macht. Technologien zur Rückgewinnung von Phosphor ste-

hen für verschiedene Einsatzorte auf der Kläranlage zur Verfügung – von der Abwasserbehandlung über die Klärschlammbehandlung bis hin zur Klärschlamm- asche, vgl. z. B. /2, 3, 4/.

## Ressource organische Substanz

Über den chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) kann die im Abwasser/Klärschlamm enthaltene chemisch gebundene Energie bestimmt werden, vgl. /5/. Bild 1 zeigt ein vereinfachtes Flussdiagramm einer Massenbilanz basierend auf den CSB für eine kommunale Abwasserbehandlungsanlage, vgl. /5, 6, 7, 8/. Es wird deutlich, dass allein rd. 50 % der im Rohabwasser enthaltenen chemisch-gebundenen Energie während der biologischen Abwasserbehandlung durch Oxidation zu Kohlendioxid und Wärme umgewandelt wird bzw. über den Ablauf die Kläranlage verlassen. Im Rahmen der konventionellen biologischen Abwasserbehandlung wird der Kohlenstoff in Form von abbaubarer organischer Substanz fast vollständig für die Stickstoffelimination (Denitrifikation) benötigt, weshalb eine Minimierung der „Veratmung“, z. B. durch eine Steigerung der Abtrennung von organischer Substanz in der Vorklärung als Primärschlamm (z. B. durch Erhöhung der Vorklärzeit), limitiert ist.

Die zweite Hälfte der im Rohabwasser enthaltenen chemisch-gebundenen Energie wird in den Klärschlamm transferiert. Durch die Erzeugung von Faulgas bzw. durch eine thermische Verwertung kann diese organische Substanz energetisch nutzbar gemacht werden.

Durch die Erfassung der organischen Substanz über den CSB kann stöchiometrisch direkt das Energiepotenzial ermittelt werden, 1 g CSB entspricht dabei 0,35 NL Methan bzw. 3,5 Wh. Da die aktuell angewandten, empirischen Ansätze, insbesondere im Bereich der Klärschlammbehandlung, über die organische Trockensubstanz ausschließlich für vergleichbare Substanzen/Klärschlämme gültig sind, ist eine Anwendung z. B. für Co-Substrate limitiert. Im Gegensatz dazu steht mit dem CSB ein substratunabhängiger Parameter zur Verfügung; unter der Voraussetzung der Oxidierbarkeit mittels Kaliumdichromat, vgl. /9, 10/.

## Strombedarf und -erzeugung auf Kläranlagen

Energieverbrauch und -erzeugung auf kommunalen Kläranlagen unterliegen in der Regel separat optimierten Prozessen und sind örtlich und zeitlich voneinander getrennt. In Abhängigkeit der Betriebsbedingungen auf der Kläranlage unterliegt der Energieverbrauch sowohl einem Tages-, Wochen- als auch Jahresgang. Die energetische Optimierung der Abwasser- und Klärschlammbehandlung erfolgt allerdings zzt. auf Basis von Mittelwerten, vgl. /11, 12/, wodurch Effekte im Tagesgang nicht berücksichtigt werden können.

Bild 3 zeigt exemplarisch den Strombedarf (Gesamtstromverbrauch einschl. Eigenstromproduktion) und die Eigenstromerzeugung mittels Blockheizkraftwerk einer kommunalen Kläranlage mit einer Ausbaugröße von 45.000 Einwohnerwerten. Der Strombedarf zeigt einen ausgeprägten Tagesgang mit einem Spitzenverbrauch am

Bild 1 Phosphor- und CSB-Bilanz einer kommunalen Kläranlage /2, 5, 6/

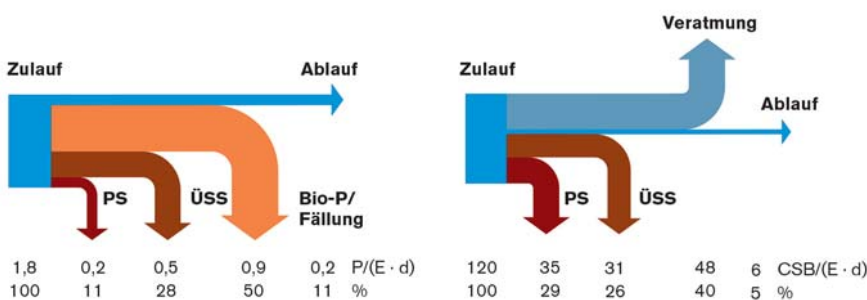




Bild 2 Faulbehälter der Kläranlage Darmstadt-Süd

Foto: IWAR

Vormittag/Mittag und einem Minimum in den Nachtstunden, resultierend aus dem Tagesgang der Zulaufwassermenge bzw. -fracht zur Kläranlage. Des Weiteren zeigt Bild 3 die Leistung des Blockheizkraftwerks im Teil- und Vollastbetrieb. Auf diesem untersuchten Klärwerk besteht die Besonderheit, dass Fremdschlämme von umliegenden kleineren Kläranlagen in der Faulung mitbehandelt werden, wodurch ein hoher Eigenstromversorgungsgrad erzielt werden kann. Der Tagesgang zeigt allerdings eine deutliche Verschiebung zwischen Strombedarf und -erzeugung. Der erzeugte Strom steht daher nicht zur Deckung der Stromspitzen zur Verfügung und wird teilweise in das Stromnetz eingespeist. Ziel ist zukünftig ein annähernd deckungsgleicher Tagesgang von Strombedarf und -erzeugung sowie die Nutzung der Kläranlage im Bereich der Regelenergie für eine negative bzw. positive Minutenreserve zur Stabilisierung des Stromnetzes.

Wenngleich bei Kläranlagen ohne Annahme von Fremdschlämmen der Eigenstromversorgungsgrad bei etwa 50 bis 60 % liegt (50-Perzentil bei 176 untersuchten Kläranlagen: 43,9 % Eigenversorgungsgrad,

vgl. /11/), so bleibt auch dort die Thematik des Tagesgangs in Bezug auf Strombedarf und -erzeugung bestehen. In aller Regel erfolgt eine gleichmäßige Zugabe der Rohschlämme in die Faulung, wodurch eine kontinuierliche Faulgaserzeugung resultiert. Lediglich der Gasspeicher wird für eine Optimierung des Betriebs des Blockheizkraftwerks herangezogen.

### Faulung als Energiespeicher: Verbundprojekt ESiTI

Im Rahmen des Verbundprojektes „Abwasserbehandlungsanlage der Zukunft: Energiespeicher in der Interaktion mit technischer Infrastruktur im Spannungsfeld von Energieerzeugung und -verbrauch (ESiTI)“ soll durch die Vernetzung von Energiever-

kommunale Kläranlage – Ausbaugröße 45.000 EW  
Annahme von Fremdschlämmen zur anaeroben Stabilisierung

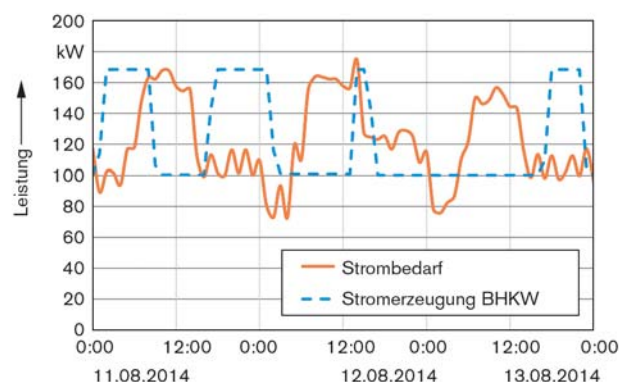
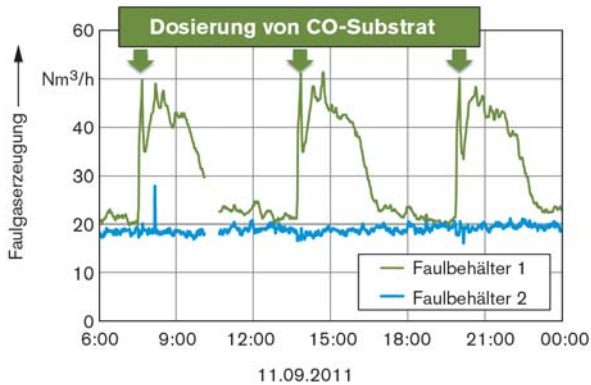


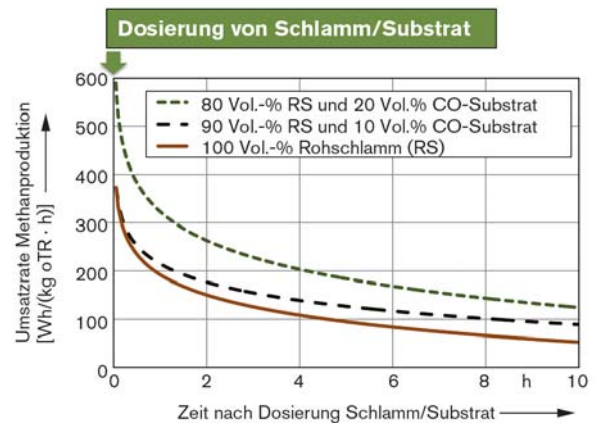
Bild 3  
Strombedarf und  
Stromerzeugung  
mittels BHKW



Ausbaugröße 32.500 EW

- Faulbehälter 1: Dosierung von Rohschlamm, 50 % der anfallenden Menge
- Faulbehälter 2: Dosierung von Rohschlamm, 50 % der anfallenden Menge sowie Co-Substrat, überlagerte Speisereste

Bild 4 Faulgaserzeugung einer kommunalen Kläranlage



mesophile Bedingungen von Rohschlamm und Co-Substrat (überlagerte Speisereste) in Abhängigkeit der Reaktionszeit, Laborversuche (15 l Faulraumvolumen), vgl. /13/

Bild 5 Exemplarische Darstellung der Umsatzrate der Methanproduktion

brauch und -erzeugung die Kläranlage als Energiespeicher untersucht werden, wobei durch Interaktionen mit technischen Infrastruktureinrichtungen, z. B. zum Energieversorgungsunternehmen oder zu Großenergieverbrauchern respektive -erzeugern (Industrie, Müllheizkraftwerk usw.) weitere Potenziale zur effizienten Energienutzung und -erzeugung erschlossen werden (www.esiti.de). Durch die zunächst exemplarische Durchführung der Untersuchungen am Beispiel der Wissenschaftsstadt Darmstadt soll eine hohe Anwenderrelevanz sichergestellt werden. Mit rd. 145.000 Einwohnern als südliches Oberzentrum der Metropolregion Rhein-Main kann die Wissenschaftsstadt Darmstadt als Beispielstadt für zahlreiche Städte dienen. Das Projekt, bestehend aus 11 Verbundpartnern aus Kommune, Industrie und Wissenschaft mit einem Gesamtfördervolumen von 2,7 Millionen Euro bei einer Laufzeit von 3 Jahren, ist dabei eins von 12 Verbundprojekten, die das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Maßnahme „Zukunftsfähige Technologien und Konzepte für eine energieeffiziente und ressourcenschonende Wasserwirtschaft (ERWAS)“ fördert.

Die Fragestellung der Nutzung von Klärschlamm als flexiblen Energielieferanten wird im Rahmen des Verbundprojekts ganzheitlich bearbeitet. Im Fokus stehen dabei die Betrachtung des Systems „Abwasser- und Klärschlammbehandlung sowie umliegender technischer Infrastruktur“, die Lösung der technischen Problemstellung im Bereich der Klärschlammbehandlung mittels Thermodruckhydrolyse, Faulung/Hochlastfaulung sowie thermischer Verwertung, die ökologische und ökonomische Bewertung sowie die Erfassung der gesellschaftlichen Relevanz in Bezug auf Motivation und

Hemmnisse. Gesamtziel des Verbundprojektes ist die Entwicklung eines Planungswerkzeugs auf Basis eines Leitfadens für den Betrieb einer Abwasserbehandlungsanlage der Zukunft in der Interaktion mit Infrastruktureinrichtungen zur Anwendung in der Praxis. Ziel ist die Identifizierung der Kläranlage als Energiesystemdienstleister mit der Klärschlammfaulung als Energieverbraucher, -speicher und -erzeuger.

### Flexibilisierung der Faulgaserzeugung

Bild 4 zeigt exemplarisch die Faulgaserzeugung einer kommunalen Kläranlage mit einer Ausbaugröße von 32.500 Einwohnerwerten. Die Kläranlage verfügt über zwei Faulbehälter, die parallel betrieben werden, wobei der Rohschlamm gleichmäßig aufgeteilt und kontinuierlich zugegeben wird. Zusätzlich erfolgte in Faulbehälter 1 eine chargenweise Zugabe von Co-Substraten (überlagerte Speisereste). Sehr deutlich ist der unmittelbare Anstieg der Faulgaserzeugung nach Co-Substratzugabe zu erkennen, wobei rd. 5 h nach Co-Substratzugabe die Faulgaserzeugung das Niveau ohne Co-Substratzugabe erreicht. Diese Zusammenhänge gilt es, unter Einhaltung der Betriebssicherheit der anaeroben Prozesse, für einen flexiblen Betrieb der Faulung zu nutzen. Dem entsprechend kann der Klärschlamm bzw. das Co-Substrat mit der darin enthaltenen chemisch gebundenen Energie als Energiespeicher fungieren.

Aufbauend auf den großtechnischen Auswertungen der Betriebsdaten erfolgten bereits Untersuchungen zur Identifizierung der Umsatzraten bezüglich der Methanproduktion im Labormaßstab (Faulbehältervolumen: 15 l, Temperatur: 37°C, Aufenthalts-

zeit 20 d, Substrate: Rohschlamm sowie Co-Substrat/überlagerte Speisereste). Bild 5 zeigt exemplarisch die Umsatzraten bezüglich der Methanproduktion während der Faulung von Rohschlamm sowie von zwei Zugabemengen von Co-Substrat. Hierbei wird deutlich, dass die Umsatzrate zum einen von der Zeit nach der Zugabe und zum anderen von der Art der Substratzusammensetzung abhängig ist. Je höher die Co-Substratzugabe desto schneller die Umsatzrate der Methanproduktion. Die Ergebnisse entsprechen damit den großtechnischen Resultaten, vgl. Bild 4. Im Rahmen der weiteren Untersuchungen soll nun geprüft werden, in welchen Grenzen ein flexibilisierter Betrieb der Faulung möglich ist. Ziel ist dabei das vorhandene Wissen so zu nutzen, dass eine Überlagerung der Tagesgänge von Energiebezug und -erzeugung möglich wird, d.h. die Überführung der Umsatzraten zur Methanproduktion in ein Steuerungsmodul.

### Ausblick

Für eine ganzheitliche energetische Optimierung von Kläranlagen wird zukünftig eine dynamische Betrachtung aller Energieströme (Strom, Wärme, Kälte, Arbeit) an Bedeutung gewinnen. Hierbei sind die vorhandenen Technologien, insbesondere die Faulung, für eine flexible Energieerzeugung zu optimieren. Die Sicherstellung der Betriebssicherheit in Bezug auf die gesamte Klärschlammbehandlung insbesondere der anaeroben Abbauprozesse aber auch der eingesetzten Maschinenteknik ist dabei zu gewährleisten. Erste Ergebnisse zeigen, dass Substrate zur Faulung (Rohschlamm, Co-Substrate usw.) mit ihrem chemisch gebundenen Energiepotenzial (erfasst über den CSB) als wichtiger Energiespeicher

fungieren können. In den weiteren Untersuchungen sollen nun im Rahmen des Verbundprojektes ESiTi die Möglichkeiten und Grenzen eines solchen flexibilisierten Betriebs untersucht werden. Ein wichtiger Baustein ist dabei der Betrieb einer halotechnischen Versuchsanlage zur konventionellen Faulung sowie zur Hochlastfaulung zur Identifizierung von zukünftigen Leit- und Grenzwerten. Neben der Fragestellung der Energie gilt es außerdem die Ressource Phosphor durch die Integration von entsprechenden Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm/Klärschlamm- asche zu nutzen.

#### KONTAKT

**Dr.-Ing. Christan Schaum**  
**Dipl.-Wi.-Ing. Dorothee Lensch**  
**Dipl.-Ing. Robert Lutze**  
**Prof. Dr.-Ing. Peter Cornel**  
 Technische Universität Darmstadt  
 Institut IWAR, Fachgebiet Abwassertechnik  
 Franziska-Braun-Straße 7 · 64287 Darmstadt  
 Tel.: 06151/162748 · Fax: 06151/16 3758  
 E-Mail: c.schaum@iwar.tu-darmstadt.de  
 web: www.esiti.de

#### LITERATUR

- /1/ Schaum, C.; Cornel, P. (2013): Wertstoffgewinnung aus Klärschlämmen; DWA WasserWirtschafts-Kurs 0/4 - Klärschlammbehandlung - Techniken, Wertstoffe-Perspektiven, Tagungsband zur Tagung vom 28. - 30. Oktober 2013; Kassel
- /2/ Schaum, C. (2007): Verfahren für eine zukünftige Klärschlammbehandlung: Klärschlammkonditionierung und Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm- asche. In: Schriftenreihe des Instituts IWAR; Nr. 185; Dissertation; Darmstadt
- /3/ Petzet, S. (2013): Phosphorrückgewinnung in der Abwassertechnik: Neue Verfahren für Klärschlamm und Klärschlamm- aschen. In: Schriftenreihe des Instituts IWAR; Nr. 220; Dissertation; Darmstadt
- /4/ Pinnekamp, J.; Baumann, P.; Cornel, P.; Everding, W.; Göttlicher-Schmidle, U.; Heinzmann, B.; Jardin, N.; Londong, J.; Meyer, C.; Mockler, M.; Montag, D.; Müller-Schaper, J.; Petzet, S.; Schaum, C. (2013): Stand und Perspektiven der Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm Teil 1 - 2; 2. Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.1 „Wertstoffrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm“. In: Korrespondenz Abwasser - Abfall; Nr. 10 (Oktober) und Nr. 11 (November); Hennef
- /5/ Cornel, P.; Meda, A.; Bieker, S. (2011): Wastewater as a Source of Energy, Nutrients, and Service Water; Treatise on Water Science; P. Wilderer (Ed.); Elsevier; Oxford, Großbritannien
- /6/ Svardal, K. (2012): Die energieutarke Kläranlage; Wiener Mitteilungen; Nr. 226; Standortbestimmung in der Wassergütwirtschaft, ÖWAV-Seminar; 28. - 29. Februar 2012, Wien, Österreich
- /7/ ATV-DVWK (2000): Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen; Arbeitsblatt A 131; Hennef
- /8/ DWA (2014): Biologische Stabilisierung von Klärschlamm; Merkblatt M 368; Hennef
- /9/ Schaum, C.; Lensch, D.; Cornel, P. (2013): Energy Resource Sewage Sludge: The Relevance of the Heating Value and the Impact of Sludge Treatment Processes; IWA Specialized Conference - Holistic Sludge Management; 06. - 08. Mai 2013; Västerås, Schweden
- /10/ Zeig, C. (2014): Stoffströme der Co-Vergärung in der Abwasserwirtschaft. In: Schriftenreihe des Instituts IWAR; Nr. 226; Dissertation; Darmstadt
- /11/ DWA (2013): Energiecheck und Energieanalyse: Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen; Entwurf Arbeitsblatt A 216; Hennef
- /12/ MURL (1999): Handbuch Energie in Kläranlagen; Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen; Düsseldorf
- /13/ Lensch, D., Schaum, C.; Cornel, P. (2014): Target-oriented Co-digestion - Possibilities to manage the peak in energy demand; IWA Specialist Conference „Global Challenges: Sustainable Wastewater Treatment and Resource Recovery“; 26. - 30. Oktober 2014; Katmandu, Nepal