Abwasserreinigungsanlagen als Flexibilitätsoption innerhalb kommunaler Energienetze

K. Schopf, T. Kienberger

Kommunale Abwasserreinigungsanlagen weisen einen Anteil von rund 20 % am Gesamtstromverbrauch kommunaler Strukturen auf und gehören damit oft zu den größten Stromverbrauchern im Gemeindeverbund. Bei genauerer Betrachtung der Anlagen wird jedoch ersichtlich, dass nicht nur der Verbrauch, sondern auch die Erzeugung von Elektrizität und Wärme vor Ort, hervorzuheben ist. Neben der Strom- und Wärmeproduktion, basierend auf einer Nutzung des im Abwasserreinigungsprozess entstehenden Faulgases, gilt es auch, die Energiegewinnung durch das Verwerten von Klärschlamm zu erwähnen. Eine detailliertere Analyse der Last- und Erzeugungsprofile kann zeigen, ob Lastverschiebungspotentiale vorliegen, welche in Zukunft dazu verwendet werden könnten, dass Kläranlagen als Flexibilitätsoption innerhalb von Energieverbunden eingesetzt werden. Sowohl positive als auch negative Regelleistungen sind bei Erhöhung bzw. Reduktion der Energieerzeugung, der Abschaltung von Anlagenkomponenten, beispielsweise durch eine kurzzeitige Reduktion der Belüftungs- oder Pumpleistungen, sowie der Lasterhöhung, zum Beispiel durch Erhöhung der Pressen- oder Trocknerleistung, anzudenken.

Schlüsselwörter: Abwasserreinigungsanlagen; Massenbilanz; Energiebilanz; Lastverschiebungspotentiale; Lastprofil; Energieerzeugungsprofil

Wastewater treatment plants as flexibility option within municipal energy networks.

Municipal wastewater treatment plants account for a large proportion (about 20 %) of the total energy consumption of a municipality. Beside a high energy demand, the plants also show a significant energy production potential. This is due to an energetic utilisation of digester gas and sewage sludge if there exist suitable aggregates. Taking a deeper look, wastewater treatment plants include energy intensive processes and aggregates for renewable energy production. Therefore, a potential of representing a flexibility option within a municipal energy network exists. Based on an analysis of the mass and energy flows of sewage plants, by using a specially developed model, load and production profiles can be generated to analyse the load shift potentials. The plants can provide negative, as well as positive balancing power.

Keywords: wastewater treatment plants; mass balance; energy balance; load shift potential; load profile; production profile

Eingegangen am 26. Jänner 2017, angenommen am 23. Februar 2017, online publiziert am 8. Mai 2017
© The Author(s) 2017. Dieser Artikel ist auf Springerlink.com mit Open Access verfügbar

1. Einleitung

Die Abwasserbehandlung stellt einen energieintensiven Prozess dar, der für rund 20 % des Energieverbrauchs des Gemeindeapparates verantwortlich ist [1]. Jedoch hinterlässt der Prozess auch energiereiche Reststoffe, wie Faulgas und Klärschlamm, welche erhebliche Bioenergiepotentiale darstellen. Faulgas wird bereits heute in Blockheizkraftwerken (BHKW) zur Deckung des Elektrizitäts- und Wärmebedarfs von Kläranlagen eingesetzt. Klärschlamm ist ein Bioenergieträger der Zukunft, welcher unter anderem einer thermischen Verwertung zugeführt werden kann. Bei energetisch optimaler Einbindung der genannten Potentiale in vorliegende Anlagenkonfigurationen, kann im ersten Schritt systemintern ein höherer Elektrizitäts- und Wärmeeigenversorgungsgrad erreicht werden. Betrachtet man nicht nur die interne Einbindung, sondern erweitert den Fokus auf eine Einbindung in das kommunale Energiesystem, ergeben sich weitere, sogenannte externe Potentiale. Bei optimaler Abstimmung mit Netzinfrastruktur und Energiebedarf können Lastverschiebungspotentiale vorliegen, welche Abwasserbehandlungsanlagen als Flexibilitätsoptionen in kommunalen Netzen etablieren könnten.

Um sowohl die internen als auch externen Potentiale zu ermitteln, ist es zunächst notwendig, die Massen- und Energieströme der

jeweiligen Abwasserbehandlungsanlage zu analysieren, Bioenergiepotentiale zu identifizieren und eine Einbindung dieser über thermische Verwertungsaggregate zu ermöglichen. Auf dieser Basis sind individuelle Last- und Erzeugungsprofile zu erstellen, um in weiterer Folge einen Abgleich mit der vorhandenen Netzstruktur und -nutzung zu ermöglichen. Eine genaue Analyse diverser Energieverbunde wird angestrebt und mit Hilfe eines am Lehrstuhl für Energieverbundtechnik der Montanuniversität Leoben entwickelten modularen Simulationsmodells durchgeführt.

2. Methodik – Ermittlung interner Bioenergiepotentiale und externer Flexibilitätsoptionen kommunaler Abwasserbehandlungsanlagen

Hinsichtlich der internen Bioenergiepotentiale, Faulgas und Klärschlamm, gilt es deren energetische Größenordnung (Nennleistung)

Schopf, Kerstin, Lehrstuhl für Energieverbundtechnik, Montanuniversität Leoben, Franz Josef-Straße 18, 8700 Leoben, Österreich (E-Mail: kerstin.schopf@unileoben.ac.at);
Kienberger, Thomas, Lehrstuhl für Energieverbundtechnik, Montanuniversität Leoben, Franz Josef-Straße 18, 8700 Leoben, Österreich

Abb. 1. Aufbau des modularen Modells zur Ermittlung von Massen- und Energiebilanzen

gen in W, Energieflüsse in Wh/d und Wh/a), sowie deren zeitliches Auftreten zu ermitteln und die Einbindung in einen Energieverbund zu forcieren. Die externen Flexibilitätsoptionen bezüglich der kommunalen Energienetze können auf Basis von Last- und Erzeugungsprofilen und Analysen kommunaler Energieversorgungsstrukturen ermittelt werden. Zudem gilt es die technischen Gegebenheiten der Abwasseranlagen zu analysieren, um die Flexibilität einzelner Anlagenteile zu identifizieren.

2.1 Ermittlung interner Bioenergiepotentiale

Die Bioenergiepotentiale hängen von zahlreichen Faktoren, wie der Kläranlagengröße, der verfahrenstechnischen Ausstattung oder der Abwasserzusammensetzung ab. Zur Ermittlung der tatsächlich vorliegenden Potentiale ist es daher notwendig, eine Massen- und Energiebilanz aufzustellen, welche die relevanten Einflussfaktoren berücksichtigt. Eine Betrachtung einzelner Verfahrensstufen ohne ihre gesamtsystematische Einbindung in die Kläranlage ermöglicht nur eine eingeschränkte Abbildung der Potentiale und bietet keine ausreichende Grundlage für weitere energietechnische Analysen. Daher ist es notwendig das gesamte Energiesystem Abwasserbehandlungsanlage detailliert abzubilden. Bei Betrachtung des aktuellen Wissensstandes, wird ersichtlich, dass hier noch Forschungsbedarf vorliegt. Die Entwicklung eines modularen Modells, welches das gesamte Energiesystem inklusive aller Verfahrensstufen vollständig darstellt, soll hier Fortschritte schaffen. Das modulare Modell ermöglicht Nutzern individuelle Massen- und Energiebilanzen von aeroben und anaeroben Abwasserbehandlungsanlagen verschiedener Größen und mit unterschiedlichen Ausstattungsscharakteristika zu erstellen, um daraus Bioenergiepotentiale abzuleiten. Abbildung 1 zeigt alle in das Modell inkludierbaren Module einer Kläranlage mit anaerober Schlammstabilisierung. Hier gilt zu beachten, dass bei der Betrachtung einer aeroben Stabilisierung die Module Vorklärung und Faulgaskreislauf, sowie die Stoffflüsse Primärschlamm und Faulgas entfallen [2].

2.2 Einbindung der ermittelten internen

Bioenergiepotentiale in den Energieverbund der Kläranlage

Nach Aufstellung der Massen- und Energiebilanzen folgt eine Analyse der dezentralen energetischen Verwertung der internen Bioenergiepotentiale – Faulgas und Klärschlamm. Dezentral bedeutet hier

eine Nutzung direkt am Standort der Kläranlage. Dies stellt eine Alternative zu einer Verwertung in einer zentralen Anlage, wie zum Beispiel einer Mit- oder Monoverbrennungsanlage, dar.

Das im Faulgaskreislauf einer anaeroben Abwasserbehandlungsanlage entstehende Faulgas wird derzeit meist im Rahmen einer internen Nutzung Blockheizkraftwerken zugeführt. Zudem ist eine Verwertung in Heizkesseln und Mikrogasturbinen möglich. Der dezentrale Einsatz bietet Vorteile bezüglich einer teilweisen Eigenbedarfsdeckung von Elektrizität und Wärme, sowie bezüglich geringer Faulgasverluste. Die verwendeten Technologien sind überdies Stand der Technik und können ohne hohen technischen, personellen und sicherheitstechnischen Aufwand energieeffizient betrieben werden [3].

Klärschlamm ist ein Bioenergeträger, welcher unter anderem einer energetischen Verwertung – Verbrennung oder Vergasung – zugeführt werden kann. In Österreich und Deutschland fallen jährlich rund 2,1 Millionen Tonnen (Trockenmasse) Klärschlamm an [4, 5]. Früher diente der Klärschlamm als Dünger für landwirtschaftliche Flächen, jedoch führen aktuelle Entwicklungen zu einer erhöhten Attraktivität der dezentralen energetischen Verwertung:

1. Aufgrund der Ausbringungsverbote beziehungsweise -restriktionen im deutschsprachigen Raum ist eine energetische Verwertung des Klärschlammes anzustreben. Die landwirtschaftliche Ausbringung ist in Österreich durch die Bodenschutzkompetenz der einzelnen Bundesländer geregelt und wird durch die Bodenschutz- und Klärschlammgesetze bzw. Klärschlammverordnungen umgesetzt. In den Bundesländern Tirol, Salzburg und Wien gilt ein generelles Ausbringungsverbot auf landwirtschaftlich genutzten Böden. In anderen Teilen Österreichs ist die Nutzung als Dünger nur bei genauer Einhaltung der Grenzwerte und sonstigen Einschränkungen möglich. In der Schweiz gilt seit 2006 ein generelles Ausbringungsverbot für Klärschlamm und auch in Deutschland liegen Verbote und Restriktionen vor [5, 6].
2. Das Aufkommen an Klärschlamm kann, wenn noch rechtlich möglich, meist nicht mehr vollständig in der lokalen Landwirtschaft genutzt werden, da eine Überdüngung der Böden auftreten kann [7]. Aufgrund des hohen Wassergehaltes von rund 70–90 % übersteigen jedoch die Transportkosten den monetären Düngemittelwert schon ab einer Transportdistanz von 10 km, was lange Transportwege unwirtschaftlich macht. Dies ist übertragbar auf die thermische Verwertung in zentralen Mono- oder

Abb. 2. Systemerweiterung zur energieoptimierten Nutzung interner Potentiale im Energieverbund kommunale Abwasserbehandlungsanlage

Mitverbrennungsanlagen. Liegen lange Distanzen vor, führen hohe Transportkosten zu einer Unwirtschaftlichkeit von zentralen Verwertungsmöglichkeiten [8].

3. Mit Hilfe der anaeroben Vergärung im Faulturm der Abwasserreinigungsanlage wird nicht der gesamte Energieinhalt der Biomasse erschlossen. Nach einer Trocknung auf 90 % Trockengehalt weist der anaerob behandelte Klärschlamm noch einen Energieinhalt von rund 9,5 MJ/kg auf, welcher über thermische Verwertungsverfahren nutzbar gemacht werden kann [9]. Des Weiteren zeigen einige Studien, dass wichtige Nährstoffe wie Phosphor auch nach der Verbrennung oder Vergasung in der Asche vorliegen und pflanzenverfügbar sind bzw. aufbereitet werden können [10, 11].
4. Zudem ist ein hoher Eigenversorgungsgrad von kommunalen Kläranlagen anzustreben. Ersichtlich wird dies bei genauerer Betrachtung der Situation in Österreich und Deutschland. Die rund 12.000 existierenden kommunalen Kläranlagen benötigen circa 4.500 GWh an elektrischer und 1.900 GWh an thermischer Energie und sind mit einem Anteil von um die 20 % die Hauptverbraucher innerhalb des Gemeindeapparates. Abwasserbehandlungsanlagen sind somit für rund 1 % des jeweiligen nationalen Gesamtstrombedarfs verantwortlich [12, 13].

Im Hinblick auf die Ausbringungsverbote und -restriktionen sowie die Entwicklung nachhaltiger, dezentraler und energieeffizienter Systeme gilt es daher, die im Faulgas und Klärschlamm enthaltenen Energiepotentiale effizient in den Energieverbund der Kläranlage einzubinden. Dies wird ebenfalls über das modulare Modell ermöglicht. Auf Basis der erstellten Massen- und Energiebilanz der

Kläranlage können die sich aus der Marktsituation ergebenden Energieverbunde aufgebaut und berechnet werden. Dies erfolgt mittels Integration von Schlammbehandlungs- oder Verwertungsaggregaten, wie Klärschlamm-trocknungsaggregaten, Blockheizkraftwerken oder Aggregaten zur thermischen Klärschlammverwertung. Zur optimalen Einbindung der möglichen Erweiterungsoptionen hinsichtlich Erhöhung der Energieeffizienz und Steigerung des Eigenversorgungsgrades wird ein erweitertes System betrachtet, welches in Abb. 2 dargestellt ist. Es ist zudem ersichtlich, welche potentiellen Energienutzungspfade anlagenintern vorliegen können.

2.3 Einbettung des erweiterten Energieverbundes kommunale Abwasserbehandlungsanlage in kommunale Energienetze

Nach vollständiger Analyse des Energieverbundes kommunale Abwasserbehandlungsanlage kann mit Hilfe des modularen Modells zudem eine Analyse verschiedener Speicher- und Netzeinbindungsoptionen durchgeführt werden. Abbildung 3 zeigt das Gesamtsystem inklusive der für Speicherung und Einspeisung im Fokus stehenden Energieträger.

Das Ziel besteht darin, zu identifizieren inwieweit Bioenergiepotentiale anlagenintern genutzt werden sollen, beziehungsweise wann ein Export in übergeordnete Netzsysteme anzustreben ist. Zudem gilt zu ermitteln, ob die Anlagen über Lastverschiebungspotentiale verfügen, welche zur Bereitstellung von Regelleistung genutzt werden können (siehe Abschn. 3.3). Dafür sind Verbrauchs- und -erzeugungsprofile für Elektrizität, Wärme und Gas der jeweiligen Abwasserbehandlungsanlage auf Basis der Massen- und Energiebilanzen zu erstellen, um einen Abgleich mit dem kommunalen

Abb. 3. Einbettung des Energieverbundes in kommunale Energienetze

Netz vornehmen zu können. Basierend auf diesen Grundlagen kann in weiterer Folge abgeklärt werden, ob Abwasserbehandlungsanlagen potentielle Energiezentralen darstellen. Da in der Literatur nur ein allgemeines VDEW-Standardlastprofil für durchlaufende Gewerbe (G3) zu finden ist, und dieses teilweise stark von realen Lastgängen abweicht, erfolgt zur Entwicklung von Last- und Erzeugungsprofilen eine Dynamisierung des entwickelten Modells.

2.4 Kommunale Abwasserbehandlungsanlagen als Flexibilitätsoption

Die Nutzung sowie Verbreitung erneuerbarer Energieträger nimmt stetig zu. Die steigende Anzahl an Windkraftanlagen, Photovoltaikanlagen, Biomassekraftwerken und anderen dezentralen Energieversorgungssystemen bewirken eine fortschreitende Energiewende. Die fluktuierende Energie, welche hauptsächlich in der Mittel- und Niederspannungsebene eingespeist wird, bedingt eine höhere Flexibilität des Systems zur Reduktion von Residuallasten, sowie zur Bereitstellung von Regenergie, um eine ausreichende Netzstabilität zu gewährleisten [14].

Kommunale Abwasserbehandlungsanlagen liegen in einer großen Anzahl vor, werden durchlaufend betrieben und beinhalten Anlagenkomponenten mit hohem Elektrizitäts- und Wärmebedarf. Zudem weisen anaerobe Kläranlagen Speichermöglichkeiten und Faulgasverwertungsaggregate auf. Diese Faktoren bilden eine gute Grundlage um eine Rolle als Flexibilitätsoption im zukünftigen Energiemarkt anzudenken.

3. Vorläufige Projektergebnisse

Das aktuelle Ergebnis der Studie ist ein statisches Modell zur Ermittlung der Massen- und Energiebilanzen von Energieverbunden. Diese beinhalten diverse Typen von Abwasserbehandlungsanlagen, sowie Faulgas- und Klärschlammverwertungsaggregate. Statisch bedeutet in diesem Zusammenhang, dass ein Zustand des Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt dargestellt wird, und keine zeitlich veränderlichen Variablen berücksichtigt werden. Zudem erfolgten bereits erste Analysen bezüglich des Eigenversorgungsgrades von Energieverbunden, sowie bezüglich vorliegender Lastverschiebungspotentiale.

3.1 Validierungsergebnisse

Um die Einsetzbarkeit des Modells zu überprüfen, fand eine Validierung auf Basis von Literaturwerten und Realdaten von Kläranlagen statt. Beispielsweise wurden Werte einer deutschen Kläranlage der Größenklasse 5 (Anschlusskapazität: 124.500 Einwohnerwerte (EW)) herangezogen. Die Anlage verfügt über einen Faulturm, sowie Blockheizkraftwerke und ein Vergasungsaggregat für Klärschlamm. Da es sich bei dem Vergasungsaggregat um eine diskontinuierlich

betriebene Versuchsanlage handelt, wird dieses aus der Validierung ausgenommen. Validiert werden die Massen- und Energieströme der Anlage. Einige Ergebnisse werden in der nachfolgenden Tab. 1 dargestellt.

3.2 Eigenversorgungsgrade von ausgewählten internen Energieverbunden

Im Zuge der ersten Analysen mittels des vorliegenden Modells wurde der Fokus auf die Optimierung des Elektrizitäts- und Wärmeeigenversorgungsgrades der Kläranlage gelegt. Im ersten Schritt erfolgte die Ermittlung der Kläranlagenkonfiguration. Hierzu wurde mit Hilfe des modularen Modells auf Basis einer Energiebilanz der Eigenversorgungsgrad hinsichtlich Elektrizität und Wärme von diversen aeroben und anaeroben Kläranlagen verglichen. Dabei stellte sich heraus, dass anaerobe Kläranlagen als Basis für weitere Betrachtungen herangezogen werden, da aufgrund der Faulgasproduktion und -nutzung ein höherer Eigenversorgungsgrad erreicht werden kann.

Im Rahmen des nächsten Analyseschrittes ist es essentiell die Klärschlammmentwässerung, -trocknung, und -verwertung genauer zu betrachten. Um einen möglichst hohen Trockengehalt von rund 35 % [15] zu erreichen, sodass in weiterer Folge der Energieverbrauch der Trocknungsanlagen reduziert werden kann, stellt eine Kammerfilterpresse als Entwässerungsaggregat die optimale Lösung dar. Danach erfolgt mit Hilfe eines Niedertemperatur-Band Trockners die Trocknung des Klärschlammes auf Trockengehalte von rund 90 %. Dieser weist hinsichtlich Energieverbräuche die beste Performance auf. Die thermische Verwertung kann anschließend in einem Verbrennungs- oder einem Vergasungsaggregat erfolgen [16]. Hier ist bei Optimierung hinsichtlich eines möglichst hohen Elektrizitäts- und Wärmeeigenversorgungsgrades eine Vergasung anzudenken. Die Tab. 2 zeigt einen Vergleich der Energieverbunde aus anaerober Kläranlage der Größenklasse 5 (Anschlusskapazität > 100.000 EW) mit Faulgasnutzung, Presse, Bandtrockner und Verbrennung bzw. Vergasung von Klärschlamm [17].

3.3 Externe Lastverschiebungspotentiale

Die Kläranlage kann theoretisch sowohl positive, als auch negative Regelleistung zur Verfügung stellen. Generell gilt, dass zum Ausgleich von Leistungsdefiziten im Netz eine Lastreduktion und eine Erhöhung der Erzeugung vorgenommen werden kann (positive Regelleistung). Um Leistungsüberschüsse auszugleichen, können eine Lasterhöhung und eine Reduktion der Erzeugung erfolgen (negative Regelleistung). Die nachfolgende Grafik (Abb. 4) zeigt einige Möglichkeiten zur Lastverschiebung in Kläranlagen.

Erste Analysen zeigen, dass hohe Potentiale bei der Lastreduktion erreichbar sind, wenn Belüftungsanlagen und Pumpen der biologischen Reinigungsstufe rückgenommen oder abgeschaltet werden.

Tab. 1. Validierungsergebnisse System Kläranlage

Massenströme				
	Referenz-anlage [RA]	Modell-ergebnis [M]	Einheit	Abweichung [A] $A = (M-RA)/RA$
Primärschlamm	160,00	146,90	m³/d	- 8 %
Sekundär- und Tertiärschlamm	270,00	266,00	m³/d	- 1 %
Rohschlamm	180,00	171,00	m³/d	- 5 %
Nutzschlamm	64,30	65,80	m³/d	+ 2 %
Nutzschlamm eingedickt	44,80	44,30	m³/d	- 1 %
Nutzschlamm entwässert	6,30	7,10	m³/d	+ 12 % ¹
Faulgas	1.154,30	1.033,80	Nm³/d	- 10 %
Energieströme				
	Referenz-anlage [RA]	Modell-ergebnis [M]	Einheit	Abweichung [A] $A = (M-RA)/RA$
Elektrizitätsbedarf Energieverbund	1.931,90	2.021,50	MWh/a	+ 5 %
Wärmebedarf Energieverbund	4.124,80	3.934,00	MWh/a	- 5 %
Elektrizitätsproduktion BHKW	903,00	826,30	MWh/a	- 8 %
Abweichung zur Referenzanlage	< ± 10 %	< ± 20 %		> ± 20 %

¹ Die etwas höhere Abweichung ist auf Unsicherheiten bezüglich des realen Trockengehaltes zurückzuführen.

Tab. 2. Ergebnisse aus dem Vergleich zweier Energieverbunde – anaerobe Kläranlage, Presse, Bandtrockner und Klärschlammverbrennung bzw. -vergasung

	Klärschlamm-verbrennung	Klärschlamm-vergasung
Elektrische Energie		
Bedarf an elektrischer Energie	6.549 MWh/a	6.602 MWh/a
Produktion an elektrischer Energie	3.230 MWh/a	5.843 MWh/a
Eigenversorgungsgrad	49 %	88 %
Thermische Energie		
Bedarf an thermischer Energie	11.394 MWh/a	11.891 MWh/a
Produktion an thermischer Energie	11.394 MWh/a	11.049 MWh/a
Eigenversorgungsgrad	> 100 %	93 %
Eigenversorgungsgrad	> 80 %	> 50 %

Abb. 4. Möglichkeiten der Lastverschiebung in Abwasserbehandlungsanlagen und deren Energieverbunden

Diese Komponentengruppen sind für rund 60–70 % des Strombedarfes einer Abwasserbehandlungsanlage verantwortlich und weisen bei einer Anlage der Größenklasse 4 (Anschlusskapazität bis 100.000 Einwohnerwerte) insgesamt eine Nennleistung von rund 250 kW auf. Anzudenken sind Rücknahmen und Abschaltungen von einzelnen Belüftern und Pumpen für Zeiträume von fünf Minuten bis 15 Minuten. Hinsichtlich Abschaltedauern von einer oder mehrerer Stunden gilt in weiteren Analysen zu überprüfen, ob die Abwasserreinigung beeinträchtigt wird [18].

Lastverschiebungspotentiale mittels Lasterhöhung sind vor allem über nicht kontinuierlich betriebene Anlagenkomponenten zu generieren. Dazu zählen beispielsweise Entwässerungs- oder Trocknungsaggregate. Bei ausreichender Lagerkapazität für den Klärschlamm könnten diese Aggregate angepasst an den Regelenenergiebedarf zugeschaltet werden.

Anaeroben Kläranlagen mit Faulgasproduktion verfügen zudem über weitere Lastverschiebungspotentiale. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass Faulgas ein exergetisch hochwertiger Energieträger ist, welcher gespeichert und energetisch verwertet werden kann. Durch die Faulgasnutzung, meist in Blockheizkraftwerken, wird eine höhere Flexibilität erzielt als bei aeroben Anlagen. Bei einer anaeroben Anlage der Größenklasse 4 ist eine elektrische Gesamtnennleistung der Faulgasverwertungsaggregate von rund 260 bis 300 kW zu erwarten.

Wird zudem der Klärschlamm dezentral am Anlagenstandort verwertet, können weitere Lastverschiebungspotentiale auftreten. Vor allem das Produktgas, welches bei der Vergasung von Klärschlamm entsteht, bietet Flexibilität in der Strom- und Wärmeproduktion sowie hinsichtlich Speicherung und Einspeisung in kommunale Netze.

Die Qualität und Quantität der Lastverschiebungspotentiale soll anhand der mit dem entwickelten Modell erstellten Last- und Erzeugungsprofile analysiert werden. Weitere Vorhaben werden im Ausblick dargestellt.

4. Ausblick

Im Rahmen des Projektes werden im nächsten Schritt, auf Basis des Modells zur Aufstellung statischer Massen- und Energiebilanzen, Last- und Erzeugungsprofile ausgewählter Kläranlagentypen erstellt. Diese dienen wie bereits erwähnt, einer tiefergehenden Analyse und Kalkulation von Lastverschiebungspotentialen. Des Weiteren steht eine Untersuchung der Auswirkung auf Lastverschiebungspotentiale des Energieverbundes Kläranlage bei Integration von Speichermöglichkeiten und Power-to-Gas im Fokus.

Auf Basis der Ergebnisse wird zudem die Anwendung des Konzeptes der virtuellen Kraftwerke auf Kläranlagen beziehungsweise Kläranlagenverbunde untersucht. Bei einem virtuellen Kraftwerk handelt es sich um eine Zusammenschaltung von dezentralen Stromerzeugungseinheiten, wie zum Beispiel Photovoltaik-, Biogas-, Abwasserbehandlungs-, oder Windenergieanlagen. Dieser Verbund kann theoretisch elektrische Leistung verlässlich bereitstellen und damit dargebotsunabhängige Leistung aus Großkraftwerken ersetzen. Hier liegt der Fokus auf einer Untersuchung des Zusammenschlusses dezentraler kommunaler Anlagen inkl. Kläranlagen, sowie des Zusammenschlusses mehrerer kommunaler Kläranlagen.

Danksagung

Open access funding provided by Montanuniversität Leoben.

Open Access This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made.

Literatur

1. Fricke, K. (2013): Energieeffizienz kommunaler Kläranlagen. Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3855.pdf>. Gesehen 24.01.2017.
2. Bever, J., Stein, A., Teichmann, H. (1995): Weitergehende Abwasserreinigung. München: R. Oldenbourg.
3. Frey, W. (2012): Stand und Trends bei der Faulgasverwertung auf Kläranlagen. TU Wien, Wien. http://www.aabfrey.com/wp-content/uploads/2012/03/TU_Sem_2012_Text.pdf. Gesehen 24.01.2017.
4. DESTATIS – Statistisches Bundesamt Deutschland (2016): Wasserwirtschaft: Klärschlamm entsorgung aus der öffentlichen Abwasserbehandlung. Wiesbaden. <https://www.destatis.de>. Gesehen 24.01.2017.
5. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (2014): ÖWAV-Positionspapier: Klärschlamm als Ressource. Wien. http://www.oewav.at/Page.aspx_param_target_is_159248.v.aspx. Gesehen 24.01.2017.
6. Oliva, J., Bernhardt, A., Reisinger, H., Domenig, M., Krammer, H. J. (2009): Klärschlamm – Materialien zur Abfallwirtschaft. Report, REP-0221, Umweltbundesamt, Klagenfurt-Wien. <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0221.pdf>. Gesehen 24.01.2017.
7. Rehl, T., Müller, J. (2011): Life cycle assessment of biogas digestate processing technologies. Resour. Conserv. Recycl., 56, 92–104.
8. Döhler, H., Schliebner, P. (2006): Verfahren und Wirtschaftlichkeit der Gärrestauffbereitung. In KTBL-Schrift 444: Verwertung von Wirtschafts- und Sekundärrohstoffen in der Landwirtschaft – Nutzen und Risiken. 191–199. 978-3-939371-05-2.
9. Bischofsberger, W., Dichtl, N., Rosenwinkel, K.-H., Seyfried, C. F., Böhne, B. (Hrsg.) (2005): Anaerobtechnik. Berlin: Springer.
10. Kratzeisen, M., Starcevic, N., Martinov, M., Maurer, C., Müller, J. (2010): Applicability of biogas digestate as solid fuel. Fuel 89, 2544–2548.
11. Neumann, J., Binder, S., Apfelbacher, A., Gasson, J. R., Ramírez García, P., Hornung, A. (2014): Production and characterization of a new quality pyrolysis oil, char and syngas from digestate – introducing the TCR process. J. Anal. Appl. Pyrolysis 113, 137–142.
12. Überreiter, E., Lenz, K., Zieritz, I., Weber, K., Eder, I. (2016): Kommunales Abwasser – Österreichischer Bericht 2016. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien. https://www.bmlfuw.gv.at/wasser/wasser-eu-international/europaeische_wasserpolitik/Lagebericht-2016.html. Gesehen 24.01.2016.
13. Wiechmann, B., Dienemann, C., Kabbe, C., Brandt, S., Vogel, I., Roskosch, A. (2013): Klärschlamm entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland. Bundesumweltamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/klaerschlamm entsorgung_in_der_bundesrepublik_deutschland.pdf. Gesehen 24.01.2016.
14. Werth, T. (2016): Netzberechnung mit Erzeugungsprofilen – Grundlagen, Berechnung, Anwendung. Hungen: Springer.
15. DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2013): Arbeitsblatt DWA-A 216 – Energiecheck und Energieanalyse. DWA, Hennef.
16. Obernberger, I., Supancic, K., Polzer, A., Himmel, W., Winter, I. (2007): Untersuchung der Stoffflüsse und sinnvollen Verwertung von sowie Reststoffnutzung aus Klärschlamm in der Steiermark – Endbericht. Am der steiermärkischen Landesregierung Fachabteilung 19D, Graz. http://www.abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/dokumente/10689314_46576/286682dc/KI%C3%A4rschlammstudie%20Steiermark.pdf. Gesehen 24.01.2017.
17. Schmid, B. (2016): Exergetisch hochwertige Nutzung von Klärschlamm. Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben.
18. Reinhofer-Gubisch, M., Pucker, J., Frantes, B., Rezanja, R. (2014): LoadShift: Lastverschiebung in Haushalt, Industrie, Gewerbe und kommunaler Infrastruktur – Potentialanalyse für Smart Grids, Bericht 7h – Lastverschiebung bei kommunalen Kläranlagen und Wasserversorgungssystemen. Bundesministerium für Verkehr Innovation und Technologie, Wien. <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/e2050/publikationen/biblio/loadshift-lastverschiebung-in-haushalt-industrie-gewerbe-und-kommunaler-infrastruktur-potenzialanalyse-fuer-smart-grids.php>. Gesehen 24.01.2017.

Autoren **Kerstin Schopf**

wurde 1988 in Leoben, Österreich, geboren. Sie absolvierte das Bachelorstudium Umweltsystemwissenschaften und anschließend die Masterstudien Umweltsystemwissenschaften mit Auszeichnung an der Karl-Franzens-Universität Graz, Österreich, sowie Industrielle Energietechnik mit Auszeichnung an der Montanuniversität Leoben. Seit 2015 ist sie am Lehrstuhl Energieverbundtechnik der Montanuniversität als wissenschaftliche Projektmitarbeiterin tätig. Ihre Arbeitsschwerpunkte liegen im Bereich kommunaler Energiesysteme. Der Fokus liegt derzeit auf der Einbettung von Abwasserbehandlungsanlagen als dezentrale Energieversorger in kommunale Netzstrukturen.

Thomas Kienberger

wurde 1981 in Judenburg, Österreich, geboren. 2007 absolvierte er das Studium Energietechnik an der Technischen Universität Graz, Österreich, mit Auszeichnung. Zwischen 2006 und 2007 arbeitete er als Entwicklungsingenieur bei der Firma Siemens AG. Von 2007 bis 2010 war er als wissenschaftlicher Assistent am Institut für Wärmetechnik an der TU Graz tätig. In dieser Zeit schloss er seine Doktorarbeit mit dem Titel "Methanierung biogener Synthesegase mit Hinblick auf die direkte Umsetzung höherer Kohlenwasserstoffe" im Rahmen des Projektes "DistributedSNG" ab. Von 2011 bis 2014 war er als Leiter R&D und Prokurist bei der Firma agnion Highterm-Research tätig und fungierte als Lehrbeauftragter an der TU Graz. Seit 2014 ist er Leiter des Lehrstuhls für Energieverbundtechnik an der Montanuniversität Leoben.