

Rahmenbedingungen für die Sektorkopplung von Abwasserreinigung und Klärschlammbehandlung mit der Energiewirtschaft

Hemmnisse, Treiber und Chancen

Axel Dierich (Berlin), Frank Huesker (Kaiserslautern), Till Ansmann (Berlin) und Oliver Gretzschel (Kaiserslautern)

Zusammenfassung

Eine gezielte Steuerung von Kläranlagen ermöglicht die Flexibilisierung von Stromverbrauch und -produktion zum Zweck von Kostenersparnissen und Zusatzeinnahmen an Energiemärkten. Die engere Kopplung von Abwasser- und Energiesektor wird jedoch durch verschiedene Hemmnisse gebremst, wie zum Beispiel einen unvorteilhaften Rechtsrahmen, geringe politische Priorisierung intersektoralen Handelns sowie fehlende Erfahrung. Dennoch wächst die Bereitschaft zur Sektorkopplung mit Aussicht auf eine zukünftige Verbesserung der Rahmenbedingungen. Die Integration umfangreicher sozialwissenschaftlicher Analysen aus zwei vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Forschungsprojekten zu diesem thesenbasierten Diskurs soll praxisrelevante Anregungen für Akteure und Entscheidungsträger geben.

Schlagwörter: Klärschlamm, Energie, Abwasserreinigung, kommunal, Kläranlage, Elektrizität, Stromnetz

DOI: 10.3242/kae2017.08.004

Abstract

Determining Factors for the Sector Linking of Wastewater Treatment and Sewage Sludge Treatment with the Energy Industry Constraints, Drivers and Opportunities

A deliberate control of wastewater treatment plants enables the flexibilisation of energy consumption and production for the purpose of cost savings and additional revenues in energy markets. The close linking of wastewater and energy sectors is, however, limited by various constraints such as, for example, low political prioritisation of inter-sector action as well as lack of experience. Nevertheless, the willingness towards sector linking is growing with the perspective of a future improvement of the determining factors. The integration of comprehensive socio-scientific analyses from two research projects sponsored by the German Federal Ministry for Education and Research, into this topic-based discussion is to give practically relevant stimulation for actors and decision makers.

Key words: sewage sludge, energy, wastewater treatment, municipal, wastewater treatment plant, electricity, energy grid

1 Einleitung

Zur erfolgreichen Umsetzung der Energiewende ist eine flexible Orientierung der Verbraucher und Erzeuger an der fluktuierend erzeugten Strommenge gefragt. Entsprechende Marktmodelle bestehen bereits seit einigen Jahren und in Zukunft werden neue Beteiligungsformen hinzukommen. Kläranlagen, die Faulgas energetisch verwerten, bieten mit einer entsprechenden Bewirtschaftung ihres Faulschlammes ein großes Potenzial für Flexibilisierung. Darüber hinaus verfügen Kläranlagen mit

dem BHKW und weiteren Aggregaten, zum Beispiel der Belüftung, über entsprechende Flexibilitätspotenziale [1–5], die mit sehr geringem Investitionsaufwand aktiviert werden können. Warum fällt jedoch den Kläranlagenbetreibern der Schritt vom verbreiteten und anerkannten Ziel einer weitgehenden Eigenversorgung hin zur innovativen energiewirtschaftlichen Marktbeteiligung so schwer? Je mehr sie auf einen Ausgleich von Energieverbrauch und -produktion im Tagesgang abzielen, des-

 <p>Abwasserreinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit erneuerbarer Energieerzeugung</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Analyse Zusammenspiel von Markt-Netz-Kläranlage ● Entwicklung von Anlagenkonzepten zur Flexibilitätsbereitstellung auf Kläranlagen ● Potenzialanalyse des Bestands sowie innovativer Technologien auf Kläranlagen ● Analyse politisch-rechtlicher Rahmenbedingungen <p>www.erwas-arrivee.de</p>	 <p>Abwasserbehandlungsanlage der Zukunft: Energiespeicher in der Interaktion mit technischer Infrastruktur im Spannungsfeld von Energieerzeugung und -verbrauch</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Flexibilisierung der Energieströme einer Kläranlage ● Klärschlammbehandlung als Energieverbraucher, -speicher und -erzeuger ● Analyse von Hemmnissen und Treibern ● Multikriterielle Strategie-Bewertung <p>www.esiti.de</p>
---	--

Abb. 1: Projektgegenstand und Ziele in arrivee und ESiTI

to besser sind sie mit der erforderlichen Umstellung von einer gas- zu einer stromgeführten Bewirtschaftung der Klärschlamm-schiene vertraut. Umso besser könnten sie auch ihre Flexibilitätspotenziale vermarkten. Was sind also die Hemmnisse? Und welche Treiber fördern die Sektorkopplung?

Für einen energiewirtschaftlich orientierten Ansatz sind die Kläranlagenbetreiber grundsätzlich aufgeschlossen, wie eine Befragung von 170 Praxisakteuren aus Abwasser- und Energiesektor sowie Experten-Interviews und -Workshops gezeigt haben. Die Hemmnisse, die jedoch der konkreten Umsetzung von Maßnahmen der energetischen Flexibilisierung von Kläranlagen entgegenwirken, lassen sich unter drei Stichpunkten gliedern:

- 1) unspezifische abwasserpolitische Zielsetzungen, unzureichender Rechtsrahmen,
- 2) unsichere oder nachteilhafte energiepolitische und -rechtliche Rahmenbedingungen, unzureichende Anreize für Flexibilitätsanbieter,
- 3) Inkompatibilität mit bisheriger Bewirtschaftung, Mangel an technischer und betrieblicher Erfahrung.

Zur Beantwortung der obigen Fragestellung verknüpft der Artikel sozialwissenschaftliche Erkenntnisse der Forschungsprojekte „ESiTI“ und „arrivee“ miteinander (Abbildung 1). Durch eine intensive Einbindung zahlreicher Experten und Praktiker in beiden Projekten ergibt sich eine große Praxisnähe der Argumentation: Durchgeführt wurden ca. 40 explorative und semi-standardisierte Experten-Interviews (arrivee + ESiTI), die oben erwähnte Experten-Befragung (ESiTI), vier Praktiker-Workshops (arrivee + ESiTI) sowie eine umfangreiche Auswertung aktueller Daten und Informationen aus diversen Primärquellen. In beiden Projekten wurden die politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen sowie Akteurs- und Interessenkonstellationen analysiert, so wie sie heute sind und wie sie sich bis 2027 entwickeln könnten.

Nach einer Beschreibung der Anforderungen und Chancen, die sich im Zuge der Energiewende für die Abwasserwirtschaft ergeben sowie entsprechender Verfahrensansätze zur Sektorkopplung (Kapitel 2), geht der Artikel schwerpunktmäßig auf die Hemmnisse bei deren Umsetzung (Kapitel 3) sowie auf treibende Faktoren und Ansätze zu ihrer Überwindung (Kapitel 4) ein. Die Diskussion folgt dabei sechs Hypothesen: drei zu den Hemmnissen und drei zu den Treibern bzw. Handlungsansätzen.

2 Anforderungen und Chancen im Zuge der Energiewende

In Anbetracht des vorherrschenden Ideals einer jahresbilanziell weitgehenden Energieneutralität von Kläranlagen ist es für die Betreiber schwer, sich auf die Steigerung der Flexibilität ihrer Anlagen und damit die Erschließung neuer Verwertungsoptionen im Bereich energetischer Dienstleistungen einzulassen. Hier gilt es, einen Paradigmenwechsel anzustoßen und vom In-selblich „Unabhängigkeit“ auf „Dienlichkeit Netz“ umzuschalten. Dabei können zusätzliche wirtschaftliche Vorteile gezielt genutzt und zugleich ein Beitrag zu einer erfolgreichen Energiewende geleistet werden.

2.1 Verfahrenstechnische Prinzipien für den Kläranlagenbetrieb¹⁾

Wesentlicher Baustein für die Steigerung der Flexibilität im Kläranlagenbetrieb ist eine gezielte Steuerung von Faulgasproduktion und BHKW-Betrieb, die eine Anpassung von Stromproduktion, eigenem Strombedarf und der Stromnetzauslastung ermöglicht. Zugleich kann der Stromverbrauch durch einen flexiblen Betrieb weiterer Aggregate gezielt gesteuert werden – entsprechend vorab definierter Flexibilitätsrestriktionen [6–8]. Damit sollte ein sinnvolles Wärmemanagement einhergehen, um möglichst wenig Energie zu verlieren. Für alle Maßnahmen zur energetischen Flexibilisierung und Effizienzsteigerung gilt jedoch: Die Maßnahmen dürfen keine negativen Auswirkungen auf die Qualität der Abwasserreinigung haben [5, 9, 10].

Erstes Prinzip: Flexibilisierung der Stromproduktion auf Kläranlagen

Der strategische Grundansatz für eine stärkere Sektorkopplung zwischen Abwasser- und Energiewirtschaft ist zwar, dass Kläranlagen in der Lage sind, sich mit Eigenstrom zu versorgen. Im Unterschied zur weit verbreiteten Praxis sollte dies jedoch nicht nach einer gasgeführten Betriebsweise der BHKWs erfolgen, sondern gezielt zu Zeiten geringen Stromdargebots aus Erneuerbaren Energien und entsprechend hoher Börsenpreise.

¹⁾ Im folgenden Abschnitt sollen nur sehr oberflächlich einige ausgewählte technologische und betriebliche Ansätze skizziert werden, die lediglich der Rahmgebung für die Argumentation in diesem Artikel dienen. Für wissenschaftlich fundiertere Diskussionen der beschriebenen technischen und betrieblichen Maßnahmen sei auf einschlägige Fachartikel, zum Beispiel [3, 5, 7] verwiesen.

Zu Zeiten von Produktionsüberschüssen sollte hingegen nach Möglichkeit Netzstrom bezogen werden [11]. Um dies über längere Zeiträume von mehreren Stunden zu ermöglichen, ohne größere Investitionen in Speicher tätigen zu müssen, ist eine steuernde Einflussnahme auf die Faulgaserzeugung notwendig. Dies kann, wie in ESiTI untersucht und nachgewiesen wurde, durch eine variable Beschickung der Faulung und gegebenenfalls zusätzliche stoßweise Zugabe von Co-Substraten erreicht werden [5, 12]. Um noch flexibler agieren zu können, kann Eigenstrom auch mit bezogenem Erdgas oder idealerweise mit im Gasnetz gespeichertem Biomethan bzw. Substitute Natural Gas (SNG) aus Power-to-Gas Anlagen produziert werden [13], insbesondere um zu Hochpreiszeiten auch Spitzenlasten abzudecken.

Zweites Prinzip: Sinnvolle Wärmeverwertung

Durch die stromseitige Orientierung des BHKW-Betriebs wird deren Wärmeproduktion zeitweilig zu einem Nebenprodukt und kann nicht immer sinnvoll für die Schlammwärmung und anderweitigen Wärmebedarf auf der Kläranlage genutzt werden. Um jedoch kein Wärmepotenzial zu verschwenden, gilt es, für Hoch- wie auch Niedertemperaturwärme unterschiedliche Senken und Speicher gezielt zu nutzen oder auch neu zu schaffen (vgl. [14]). Dies können zum Beispiel sein: Schlamm-desintegration/Thermo-Druck-Hydrolyse, Klärschlamm-trocknung/Hydrothermale Carboni-

sierung, Kälteproduktion, Stromproduktion mittels Clausius-Rankine-Cycle (CRC)/Organic Rankine Cycle (ORC), Temperaturvariation in den Faulbehältern, Einspeisung in angrenzende Wärmenetze etc. [15–18]. Wird zu Zeiten geringer Strompreise über einen längeren Zeitraum ausschließlich Netzstrom bezogen, muss der Wärmebedarf durch einen Heizkessel, Langfrist-Wärmespeicher oder externen Wärmebezug (gegebenenfalls von Abwärme benachbarter Anlagen [15]) gedeckt werden.

Drittes Prinzip: Flexibilisierung von Stromverbräuchen auf Kläranlagen

Maßnahmen zur Flexibilisierung des Betriebs der Kläranlagenaggregate wie zum Beispiel der Belüftung, von Rührwerken, der Rücklaufschlamm-pumpe etc. sind anlagenspezifisch zu analysieren und entsprechend zu erschließen. Mithilfe einer Kläranlagensimulation konnte gezeigt werden, dass die Flexibilitäten von Aggregaten zum Teil deutlich über die in [19] aufgeführten Abschaltzeiten hinausgehen können, ohne dass die Reinigungsleistung der Kläranlage negativ beeinträchtigt wird. Die Flexibilisierung des Stromverbrauchs kann darüber hinaus – bei passendem energiewirtschaftlichem Umfeld – auch mit einer Elektrolyse auf der Kläranlage umgesetzt werden. Dadurch wird die Kläranlage zum Power-to-Gas-Anbieter mit dem Vorteil, dabei anfallende Nebenprodukte wie Wärme und Sauerstoff vor Ort verwerten zu können [20, 21].

Wasseranalytik

MACHEREY-NAGEL

Kompaktphotometer PF-12^{Plus}





Das Plus an Flexibilität

- Flexibel – Einsetzbar in allen Bereichen der Wasser- und Abwasseranalytik
- Sicher – Einfache Handhabung für präzise Ergebnisse
- Mobil – Robust und wasserdicht
- Vielseitig – Nephelometrische Trübungsmessung und NTU-Check

2.2 Teilnahmemöglichkeiten für Kläranlagenbetreiber an Energiemärkten

Kläranlagen sind mit umfangreichen Vorhaltekapazitäten ausgestattet, um auf Schwankungen der Abwassermenge und -fracht und somit des Strombedarfs angemessen reagieren zu können. Unter den aktuellen Rahmenbedingungen auf Strommärkten kann bereits die Aktivierung der energetischen Flexibilität von (teilweise redundanten) BHKW, Netzersatzanlagen und weiteren Vorhaltekapazitäten für die Kläranlagenbetreiber betriebswirtschaftlich interessant sein [22]. Dabei müssen sie noch keine Energieverbräuche verschieben oder reduzieren. Sie brauchen sich auch nicht selber Gedanken um die Art der Vermarktung ihrer Flexibilität zu machen, das können entsprechende Direktvermarkter²⁾ übernehmen.

Regelenergiemärkte

Angebotsseitig können Kläranlagen Regelenergieleistungen verschiedener Art anbieten, die der Stabilisierung der Frequenz im Strom-Übertragungsnetz dienen. Ob Minuten-, Sekundär- oder Primärreserveleistung, die Flexibilitätskapazitäten in Stromerzeugung oder -verbrauch werden über den Direktvermarkter – gebündelt mit Regelleistungskapazitäten weiterer Kleinanbieter – an den in der jeweiligen Regelzone verantwortlichen Übertragungsnetzbetreiber vermarktet. Die möglichen Einnahmen sind abhängig von den Geboten und unterliegen demnach Marktschwankungen. Dennoch sind diese Märkte auch für Kläranlagenbetreiber interessant, da sie ein Vielfaches der Preise für regulär eingespeiste Kilowattstunden einbringen.

Kurzfrist-Stromhandel

Soweit es die vertraglichen Regelungen mit dem regionalen Energieversorger zulassen, kann der Kläranlagenbetreiber auch seine Stromnachfrage über Direktvermarkter abwickeln. So zahlt er im Durchschnitt geringere Preise, da er die Vorteile aus Preisschwankungen selbst nutzen kann. Andersherum kann auch die Einspeisung von überschüssigem Strom gewinnbringend sein, wenn er gezielt an Kurzfrist-Strommärkten zu Zeiten hoher Preisniveaus gehandelt wird (zum Beispiel am Day-Ahead-, oder am Intraday-Markt). Die Direktvermarkter entscheiden entsprechend vorheriger Absprachen sowie situationsbezogen, in welcher Höhe sie sich mit den Flexibilitätskapazitäten ihrer virtuellen Kraftwerkspartner an Kurzfristhandels- und Regelenergiemärkten beteiligen.

Zukunft: Handeln von Flexibilität in Verteilnetzen

Mit dem Verteilnetzbetreiber abgestimmtes Lastmanagement wird schon lange praktiziert, allerdings durch bilaterale Kooperationen, insbesondere seitens Stadtwerken. Transparente, lokale Flexibilitätsmärkte in Stromverteilnetzen könnten zukünftig dazu dienen, mehr Verbraucher in Systemdienstleistungen

²⁾ Der Direktvermarkter übernimmt sämtliche administrative und einen Großteil der technischen Aufgaben im Zusammenhang mit der Bereitstellung von Regelenergie, von der Bündelung von Anlagen zu einem virtuellen Kraftwerkspool über die Vertragsgestaltung mit dem Übertragungsnetzbetreiber und die Präqualifikation bis zur technischen Umsetzung und Fernsteuerung der Einzelanlagen. Die Priorität der Betriebssicherheit wird bilateral vertraglich geregelt.

Welche Probleme sehen Sie derzeit im Hinblick auf die Planungssicherheit für Kläranlagenbetreiber?

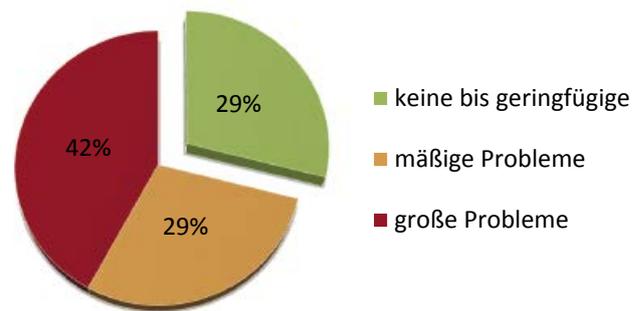


Abb. 2: ESiTI-Expertenbefragung, Frage 8: „Welche Probleme sehen Sie derzeit im Hinblick auf die Planungssicherheit für Kläranlagenbetreiber?“ (Ergebnis aller Antworten)

zur Netzstabilisierung einzubinden. Dass auch Kläranlagen hier einen Beitrag leisten könnten, wurde gezeigt [23]. Eine dynamisierte Preisgestaltung des Strombezugs könnte beispielsweise Anreize zu dessen teilweiser Verschiebung in Zeiten geringer Nachfrage bzw. zur Orientierung der Eigenstromproduktion an der Auslastung des Verteilnetzes setzen. Beide Seiten profitieren: der Kläranlagenbetreiber aufgrund der Preisnachlässe und der Stromversorger, weil er durch einen Ausgleich von Stromproduktion und -nachfrage das Verteilnetz leichter stabilisieren und die eigenen Kosten senken kann.

3 Hemmnisse für die Sektorkopplung

Aufgrund des innovativen Charakters der dargestellten energetischen Flexibilitätsoptionen in Abwasserreinigung und Klärschlammbehandlung existiert bislang noch kein innovationsfreundlicher Rahmen für die engere Sektorkopplung. Hemmnisse und treibende Faktoren wurden in den Forschungsprojekten mittels einer Konstellationsanalyse und der Entwicklung von Szenarien systematisch untersucht und dokumentiert. Entlang von drei Hypothesen wird im Folgenden auf die als zentral identifizierten Herausforderungen und im darauffolgenden Kapitel auf entsprechende Treiber und Ansätze zu deren Überwindung eingegangen.

- 1) Die abwasserpolitischen Zielsetzungen und rechtlichen Rahmenbedingungen sind für eine energetische Flexibilisierung zu unspezifisch oder gar hinderlich. Derzeit wird intersektorales Handeln der Abwasserwirtschaft nicht ausreichend gefördert.

So verursachte eine lange Zeit bestehende Ungewissheit über die zukünftigen politisch-rechtlichen Rahmenbedingungen für Abwasserbehandlung und Klärschlammbehandlung eine allgemeine Unsicherheit und damit ein tendenzielles Abwarten in der Abwasserbranche: In der oben genannten Befragung von 170 vornehmlich siedlungswasserwirtschaftlichen Akteuren sehen über zwei Drittel aller Befragten mäßige oder große Probleme hinsichtlich der Planungssicherheit für Kläranlagenbetreiber (Abbildung 2). Unter den befragten 64 auf Kläranlagen Tätigen waren es sogar über 80 %.

Die Befragten nennen vielfache Gründe, die vor allem regulatorischer und politischer Art sind. An erster Stelle steht die

„Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) hemmt den Trend zur Eigenversorgung von KA.“

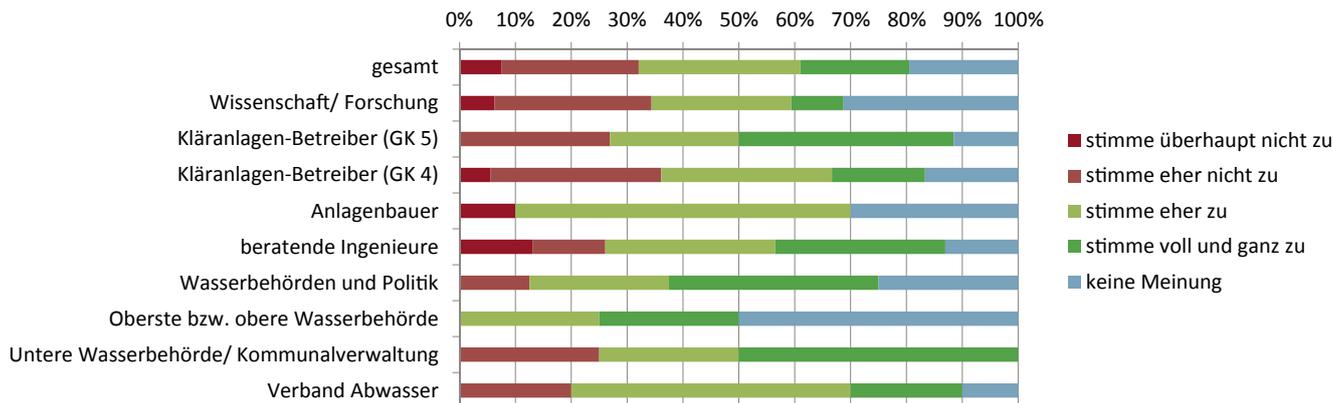


Abb. 3: ESiTI-Expertenbefragung, Frage 9: „Wie ist Ihre persönliche Meinung hinsichtlich der Aussage ‚Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) hemmt den Trend zur Eigenversorgung von Kläranlagen‘?“

Sorge vor zukünftigen Engpässen bei der Mono-Klärschlammverbrennung, dementsprechenden Kostensteigerungen und Entsorgungsproblemen sowie die Herausforderung der Phosphorrückgewinnung. Diesbezüglich wird an zweiter Stelle die Unklarheit der zukünftigen Rahmenbedingungen für die stoffliche und thermische Verwertung infolge der langen Verzögerung der Novellierung der Klärschlammverordnung als Planungshemmnis genannt. An dritter Stelle steht die Unsicherheit, wie viel Energie sie zukünftig für zusätzliche Reinigungsstufen und weitergehende Phosphorelimination benötigen werden. Nach Aussagen in Experten-Interviews halte dies die Kläranlagenbetreiber von einer ambitionierteren Ausnutzung ihrer Flexibilitätspotenziale ab.

Eine weitere politisch-rechtliche Hürde konkret für Energiemarkt-Aktivitäten der Kläranlagenbetreiber ist die Frage der Zulässigkeit. Die kommunalen Abwasser-Unternehmen können zwar energiewirtschaftliche Einnahmen in gewissem Ausmaß so verbuchen, dass sie abwassertarifsenkend wirken. Dies schaffen aber eher die mutigen Pioniere, für die Mehrzahl der Betreiber fehlt eine klare gesetzliche Regelung. Insbesondere diejenigen, die in Form eines Eigenbetriebs oder einer Anstalt öffentlichen Rechts (AöR) agieren, sind gehemmt, Aufgaben jenseits der Abwasserreinigung wahrzunehmen. Doch auch privatrechtlich organisierte Betriebe müssen sich hinsichtlich einer solchen Erweiterung der geschäftlichen Tätigkeitsbereiche mit ihrem jeweiligen kommunalen Auftraggeber abstimmen. Um Aktivitäten auf Energiemärkten sowie die Erstellung stimmiger Gesamtkonzepte für eine Flexibilisierung zu vereinfachen, wären Klarstellungen in Gesetzen (beispielsweise in den Kommunalabgabengesetzen), Verordnungen und Satzungen hilfreich. Dies ist jedoch abhängig von einer allgemein positiven Einstellung der Kommunalpolitik gegenüber der Sektorkopplung am jeweiligen Standort.

Ein Nachteil für die energetische Flexibilisierung des Klärwerksbetriebs im Allgemeinen (hier vor allem der Belüftung) bzw. der Schlammbehandlung im Besonderen ist, dass auch bei Spitzenbelastungen der Kläranlage die jeweils zulässigen Einleitwerte in keiner Probenahme überschritten werden dürfen. Kläranlagenbetreiber müssen daher unter allen Umständen (auch zu Zeiten von Stromknappheit) auf jede Belastungsspitze reagieren, mit der Folge von Lastspitzen auch im Strombezug. Diese Voraussetzungen stellen für die Direktvermarkter grundsätzlich kein Problem dar. Sie können aber energiewirt-

schaftlich und auch betriebswirtschaftlich kontraproduktiv sein.

- 2) Die aktuelle Energiepolitik ist zu dynamisch und komplex für eine verbreitete Energiemarktintegration der Abwasserwirtschaft. Eigenverbrauch und Stromspeicherung werden energierechtlich benachteiligt und Geschäftsmodelle für Flexibilitätsanbieter unzureichend angereizt.

Obwohl es keine expliziten Verbote einer energiewirtschaftlichen Beteiligung von Kläranlagen gibt, wurde in allen arrivee-



MECANA

A Metawater Company

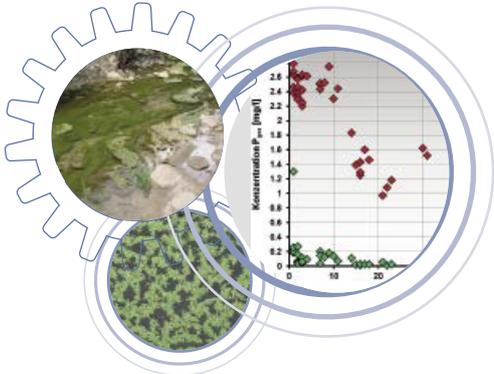


Phosphorelimination mit Tuchfiltern

Im Zuge der EU-Wasserrahmenrichtlinie sind für bestimmte Vorfluter sehr niedrige P-Ablaufwerte gefordert.

Flockungsfiltration mit Mecana Tuchfiltern ist ein zuverlässiger und effizienter Prozess zur weitestgehenden Phosphor-Elimination.

Ablaufwerte bis unter 0.1 mg/l P_{ges} sind möglich.



Mecana Polstoffiltration
effizient, wirtschaftlich und robust!

Mecana Umwelttechnik GmbH
CH-8864 Reichenburg | T +41 55 464 12 00

www.optifibermedia.com
www.mecana.ch | info@mecana.ch

Interviews betont, dass die aktuelle Dynamik der Energiewendepolitik – unter anderem mit regelmäßigen Novellierungen wichtiger Gesetzesgrundlagen wie dem EEG – die Betreiber verunsichert. Diese können in der Regel kein energierechtlich geschultes Personal einstellen.

In der Wahrnehmung vieler abwasserwirtschaftlicher Akteure haben sich in den vergangenen Jahren die rechtlichen Rahmenbedingungen für dezentrale Anbieter von Flexibilität sogar verschlechtert: Das EEG stellt in ihren Augen ein regelrechtes Hemmnis für den Trend zur Eigenversorgung von Kläranlagen dar, wie der deutlichen Zustimmung auf die entsprechende Frage in der Expertenbefragung zu entnehmen ist (Abbildung 3).

Wesentliche Ursachen dessen sind in dem Wegfall der KWKG-Förderung von Eigenstrom für Anlagen über 100 kW, der stetig sinkenden EEG-Vergütung und der zugleich steigenden EEG-Umlage auf nicht selbst verbrauchten Strom zu sehen. Für neue und modernisierte Anlagen gelten darüber hinaus erschwerte Rahmenbedingungen (bis zu 40 % EEG-Umlage auch auf Eigenstrom, Vergütung nur noch über Ausschreibungen). Dies wird laut Interviews als ungerecht empfunden, obwohl es der solidarischen Finanzierung der Stromnetze dienen soll. Tatsächlich ist die Einspeisung von Strom durch Kläranlagen aufgrund der zugleich sinkenden Marktpreise für Strombezug heutzutage häufig nicht wirtschaftlich, da die Gestehungskosten höher ausfallen als die möglichen Einnahmen. Dies kann die Wirtschaftlichkeit von BHKW, also der wichtigsten Grundlage für die energetische Flexibilisierung von Kläranlagen, in Frage stellen: Selbst das Bundeswirtschaftsministerium sieht im Weißbuch „Ein Strommarkt für die Energiewende“ einen „Teil der bestehenden KWK-Anlagen wegen der gesunkenen Strompreise“ von der Stilllegung bedroht und fordert eine entsprechende befristete Förderung [24, S. 77].

Weitere Zugangshürden für die Teilnahme an Energiemärkten sind die folgenden:

- Netzentgelte, die spitzentnahmeabhängig berechnet werden, sodass auch eine Entnahme zum Zweck negativer Regelleistung unter Umständen zu einem erhöhten Netzentgelt führen kann.
- Vollversorgungsverträge mit den Energieversorgern, da der Kunde in dem Rahmen keine Verfügungsgewalt über die eigene Energiebilanz hat und insofern nicht von Einsparungen oder Zuverdienstmöglichkeiten an Kurzfrist-Handelsmärkten profitieren kann. Dazu wären ein Fahrplanbezug vom Energieversorger, gepaart mit einem Bilanzkreismanagement durch einen Direktvermarkter, notwendig [25]. Eine solche Vertragsanpassung wird jedoch von den Interviewten als aufwändig empfunden.
- Bislang fehlende Markttransparenz für Kleinanbieter bezüglich Netzdienstleistungen für Verteilnetze (Verbrauchsmanagement), trotz entsprechender gesetzlicher Rahmenbedingungen. In ESiTI interviewte Energieversorger und Netzbetreiber waren zudem (noch) nicht an einem Lastmanagement mit Kläranlagen interessiert, da a) ihre Netze gut ausgebaut seien oder/und b) sie über ausreichend Puffertechnologien verfügten, wie zum Beispiel eigene Kraftwerke zum Ausgleich eines Spannungsabfalls oder regelbare Ortsnetztrafos zum Ausgleich von Spannungszunahme.

3) Der gedankliche und konzeptionelle Schritt von der umfassenden Eigenversorgung in der Jahresbilanz zur

energiewirtschaftlich orientierten Flexibilisierung im Tagesgang ist groß, entsprechendes Erfahrungswissen noch wenig ausgeprägt.

Wie oben beschrieben, ist die gasgeführte Fahrweise von BHKW auf Kläranlagen weit verbreitet, als Folge der üblicherweise kontinuierlichen Beschickung der Faulung und damit auch eines kontinuierlichen Faulgasanfalls [5]. Einige Kläranlagenbetreiber versuchen jedoch, im Rahmen eines betriebsinternen Lastmanagements die eigene Stromproduktion zeitlich mit dem Strombedarf der Kläranlage abzustimmen. Dies kann entweder durch eine gezielte Beschickung der Faulung, oder einen ausreichend dimensionierten Gasspeicher sowie gegebenenfalls die bedarfsweise Zugabe von Co-Substraten erfolgen. Mit dieser Modifikation der Betriebsweise vollziehen sie den entscheidenden Schritt von der reinen Klärschlammbehandlung hin zu dessen Bewirtschaftung im Sinne einer Flexibilisierung. Das Motiv dafür ist allerdings in der Regel, Energiekosten zu sparen. Die Bedürfnisse der Energiewirtschaft werden dabei nur in wenigen Fällen berücksichtigt. Grundsätzlich kommt in den empirischen Erhebungen zum Ausdruck, dass die Abwasserwirtschaft vorsichtig ist, was intersektorales Handeln angeht.

In den vergangenen Jahren stagnierten die Preise für Minutenreserveleistung aufgrund einer Verschiebung ihrer Netzausgleichsfunktion in Kurzfrist-Handelsmärkte sowie für Sekundärreserveleistung aufgrund einer zunehmenden Dominanz durch kosteneffiziente Power-to-Heat-Anlagen [26]. Die Minutenreserve wurde vor kurzem als lukratives Einstiegsmodell beworben, auf das einige Kläranlagenbetreiber gehofft haben. Dass die Gewinnmöglichkeiten derzeit (weit) hinter den ursprünglichen Erwartungen bleiben, fördert ebenfalls die Zurückhaltung. Verbreitet wurde auf den Workshops dennoch die Einschätzung geäußert, dass die Regelenenergiemarktteilnahme für Kläranlagenbetreiber ein guter Einstieg in die Energiewirtschaft sein kann.

Davon abgesehen, spielen technische Grenzen eine wichtige Rolle: Ob zum Zweck des internen Lastmanagements oder einer Vermarktung von Flexibilität, sind die Möglichkeiten zur Flexibilisierung der Faulgasproduktion auf die vorhandene Kläranlagentechnik und Speicherkapazitäten begrenzt. Denn größere investive Maßnahmen zur Hebung der Flexibilitätspotenziale wären gegenüber Eigentümerkommunen oder den Gebührenzahlern nur durch konkrete Einsparungen oder zusätz-

Fachwissen hinsichtlich Energiemärkten (Regelenenergiemarkt, Day-Ahead-Markt, Intraday-Markt)

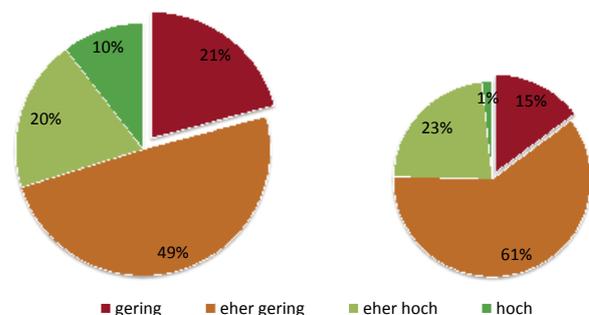


Abb. 4: ESiTI-Expertenbefragung, Frage 16: „Bitte schätzen Sie Ihr Fachwissen hinsichtlich Energiemärkten (Regelenenergiemarkt, Day-Ahead-Markt, Intraday-Markt) ein“, links gesamt, rechts nur Kläranlagenbetreiber

Wie werden Sie selber Kläranlagen im Jahr 2030 wahrnehmen?

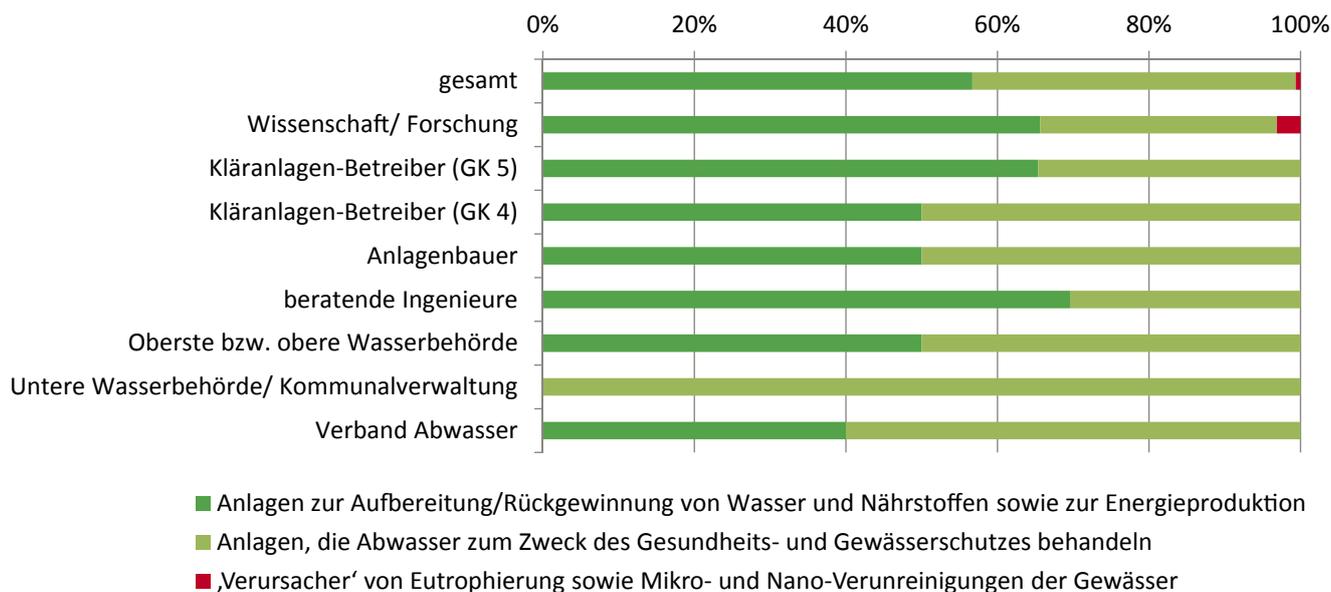


Abb. 5: ESiTI-Expertenbefragung, Frage 12: „Und wie sehen Sie Kläranlagen in 2030?“

liche Erlösmöglichkeiten, sprich Abwassertarifenkungen, zu begründen. Da aber die betriebswirtschaftlichen Potenziale aus Energiedienstleistungen im Voraus nur ungenau zu beziffern sind, sind technische Erweiterungen mit dem alleinigen Ziel einer gesteigerten Flexibilität für Marktaktivitäten derzeit nur schwer darstellbar.

Weiterhin haben die Expertenbefragung und Interviews folgende betriebsinterne Hemmnisse aufgezeigt:

- Die Steuerungseinheit, die für die Vermarktung der Flexibilität notwendig ist, wird mit einer gewissen Skepsis betrachtet. Zwar amortisieren sich ihre Kosten schnell. Aber es wird eine unsachgemäße Einflussnahme von außen auf Steuerungsparameter der Kläranlage befürchtet. Tatsächlich wird der Betrieb der Kläranlage kaum erschwert, da die Fremdsteuerung durch den Direktvermarkter innerhalb vorab definierter Korridore erfolgt (Maß an Flexibilität mit entsprechendem Sicherheitspuffer und Veto-Option).
- Ebenso befürchten die Betreiber erhöhte Wartungskosten für häufiger in Teillast gefahrene BHKW sowie einen stärkeren Verschleiß der flexibel gefahrenen Klärwerksaggregate. Zumindest letzterer wird sich allerdings durch das häufigere An- und Abfahren nur geringfügig erhöhen, wenn klare Regelungen für den Flex-Betrieb eingehalten werden, wie sie in arrivee für eine Pilotanlage entwickelt wurden.
- Schließlich sind tatsächliche Potenziale und Aufwand einer Teilnahme an den oben genannten Strommärkten kaum bekannt. So gibt nur eine Minderheit von 30 % aller Befragten an, dass sie über „eher hohes“ oder „hohes“ Fachwissen hinsichtlich der Energiemärkte verfügen (Abbildung 4). Unter dem Kläranlagen-Fachpersonal sind es noch weniger: Nur ein einziger gibt „hohes“ Fachwissen an und 23 % „eher hohes“.

4 Treibende Faktoren und Ansätze zur Überwindung der Hemmnisse

Im Rahmen der folgenden drei Hypothesen werden die wichtigsten Treiber und mögliche Ansätze einer engeren Sektor-

kopplung diskutiert. Allgemein positiv ist, dass Energieeffizienz und Eigenstromversorgung heute in der Abwasserwirtschaft im Prinzip verinnerlicht sind. Darüber hinaus sehen sich Kläranlagenbetreiber zunehmend auch als energiewirtschaftliche Akteure: Nach ihrem Bild von der Kläranlage der Zukunft gefragt, sehen sie neben der Aufbereitung und Rückgewinnung von Wasser und Nährstoffen mehrheitlich auch die Energieproduktion als ihre zukünftige Aufgabe (Abbildung 5 und [11]).

4) Argumente und Ansätze für eine flexible Fahrweise finden zunehmend Eingang in Planung und Praxis von Kläranlagen.

Die folgenden Argumente sprechen gegen eine Strategie der bilanziell maximierten Eigenversorgung und zugleich für die Flexibilisierung zum Zweck der stärkeren Orientierung an den Strommärkten:

- Energetische Gesamteffizienz: Nach Experten-Aussagen in ESiTI ist die Eigenstromproduktion im Vergleich mit dem

AQUADATA

Regelungen auf Kläranlagen
- Konzepte - Software - Ausrüstung -

Nitrifikation Denitrifikation Phosphorelimination Schlammbehandlung Energiemanagement Sonderanwendungen	AQUADATA Abwassertechnik GmbH Spatenstieg 1a 38118 Braunschweig Tel.: +49 (0) 5 31 / 886 9042-0 Fax: +49 (0) 5 31 / 50 09 07 E-Mail: info@aquadata.de Internet: www.aquadata.de
--	--

„Gewässerschutz hat Vorrang, aber im Interesse der Glättung von Lastspitzen sollten auch wirkungsbezogene Grenzwerte für den Kläranlagenablauf gelten.“

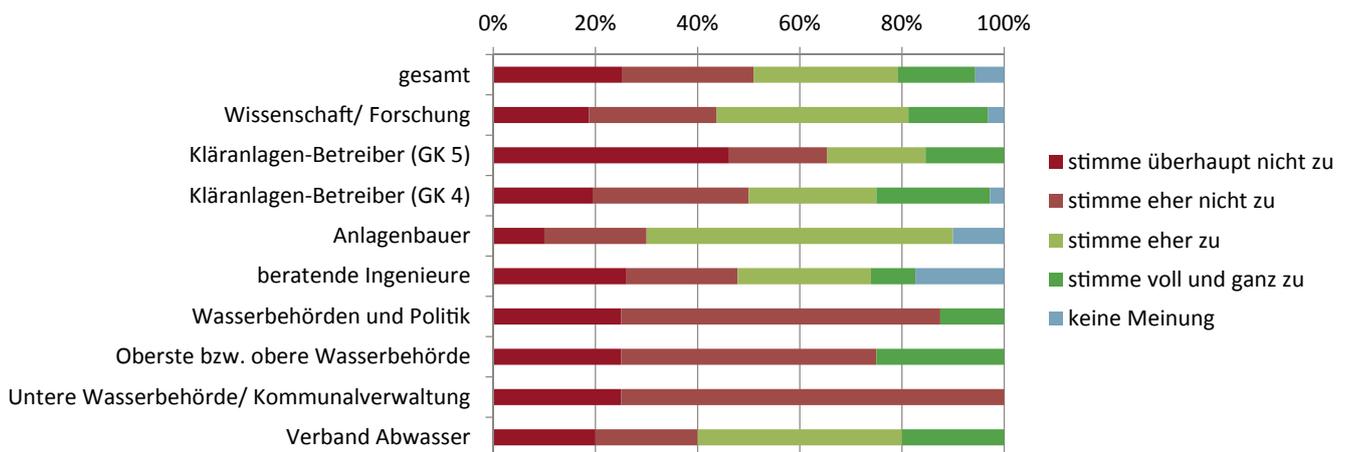


Abb. 6: ESITI-Expertenbefragung, Frage 9: „Wie ist Ihre persönliche Meinung hinsichtlich der Aussage ‚Gewässerschutz hat Vorrang, aber im Interesse der Glättung von Lastspitzen sollten auch wirkungsbezogene Grenzwerte für den Kläranlagenablauf gelten?‘“

Fremdbezug nur dann effizienter, wenn sie die emissionsärmere Lösung zur Produktion der benötigten Kilowattstunde darstellt. In einigen Fällen jedoch würde ein zentrales Kraftwerk, das in einem günstigen Betriebspunkt fahre, weniger Emissionen verursachen als viele dezentrale Anlagen. Dies gelte aber nicht, wenn a) die Wärme aus den BHKW vergleichsweise effizient genutzt wird und b) Faulgas bedarfsgerecht produziert, gespeichert oder anderweitig verwertet werden kann (zum Beispiel mittels Aufbereitung und Einspeisung ins Erdgasnetz).

- Betriebswirtschaftliche Grenzen einer gesteigerten Eigenversorgung: Etwa 60 % Eigenversorgungsgrad können Kläranlagen mit geringem Aufwand aus dem im Abwasser enthaltenen Energiepotenzial erzielen, wie auf den in den Projekten beteiligten Pilotanlagen gezeigt werden konnte. Eine Erzielung von bis zu 100 % Eigenversorgung wird zwar von Einzelanlagen erreicht, ist in der Regel aber an die Vorhaltung sowie den Einkauf von verschiedenen Reserven und Ressourcen gekoppelt, wie zum Beispiel die umfangreiche Co-Vergärung von biogenen Abfallstoffen. Für diese fallen jedoch Speicherkosten an; zudem werden sie stark nachgefragt, sodass ihr Bezug immer teurer wird.
- Kosteneinsparungen durch preisorientierten Strombezug: Ist ein hoher Eigenversorgungsgrad dennoch für die Kläranlage vorteilhaft, so wäre es in dessen Rahmen gegebenenfalls betriebswirtschaftlich und in vielen Fällen auch ökologisch sinnvoller, die BHKW teilweise variabel zu fahren und Faulgas gezielt für lastintensive Zeiten zu speichern. So ließe sich der Strombezug zu Zeiten hoher Energiepreise weitestgehend vermeiden und damit gegebenenfalls sogar eine Einstufung in eine niedrigere Netznutzungsentgeltstufe erzielen.

Einzelne Kläranlagenbetreiber in Deutschland haben damit begonnen, Maßnahmen zur energiewirtschaftlichen Flexibilisierung in ihrem Kläranlagenbetrieb umzusetzen, am Regelenergiemarkt teilzunehmen und damit auch in begrenztem Umfang Einnahmen zu erzielen. Aktuelle Versuche zur Einbindung der Pilotanlage Radevormwald in ein virtuelles Kraftwerk zeigen, dass auch der flexible Betrieb der Belüftung erfolgreich umgesetzt werden kann, ohne dass die Reinigungsleistung der Kläranlage leidet. Solche vielversprechenden Ansätze können dazu

beitragen, Hemmnisse und Bedenken auf Betreiberseite abzubauen [10, 27]. Die Erfahrungen, die diese Pioniere dabei sammeln, werden Einfluss auf weitere Kläranlagenbetreiber haben.

Eine Reform der Grenzwert-Regelungen für den Kläranlagenablauf könnte eine Stromnetz- und -marktdienliche Abflachung von Lastspitzen vereinfachen. So wurde in arrivee-Experten-Workshops und -Interviews das Ersetzen der Momentanwerte durch strengere Jahresmittelwerte bei aller Skepsis wohlwollend erwogen, auch weil sie die energiewirtschaftliche Fahrweise der Kläranlage erleichtern würden, ohne die Reinigungsleistung im Ergebnis zu mindern (siehe zum Beispiel [28]). Dies muss selbstverständlich im Einzelfall je nach Beschaffenheit des Vorfluters und nachgelagerter Gewässer, sowie gegebenenfalls aktueller Wassertemperatur, Wasserqualität, Pegel, Vorbelastung etc. geprüft und spezifisch geregelt werden, um negative Auswirkungen auf Gewässerqualität und Ökosysteme zu vermeiden.

Die Teilnehmer der Befragung jedoch sahen dies mehrheitlich skeptisch (Abbildung 6): Der Aussage „Gewässerschutz hat Vorrang, aber im Interesse der Glättung von Lastspitzen sollten auch wirkungsbezogene Grenzwerte für den Kläranlagenablauf gelten“ stimmten 43 % „voll und ganz“ oder „eher“ zu, 51 % lehnten diese Aussage ab. Bei den Vertretern von Kläranlagen der Größenklasse 5 war die Ablehnung besonders deutlich, da 47 % von ihnen die Option „stimme überhaupt nicht zu“ wählten.

5) Die Energiemarktintegration von Kläranlagen hat Zeit und kann schrittweise erfolgen.

Der strategische Vorteil der Abwasserwirtschaft ist es, Zeit für die Energiemarktintegration zu haben – so auch die erhobene Wahrnehmung der Akteure in Interviews und Workshops. Dies gelte ähnlich wie für alle anderen Akteure, die energiewirtschaftliche Potenziale als Resultat ihrer Kerntätigkeit nebenbei aufbauen. Im Unterschied zu Investoren im Biogasbereich können Kläranlagenbetreiber also abwarten, wie sich die Märkte für Flexibilitätsanbieter in den kommenden Jahren entwickeln.

Interviewte Stromhändler empfehlen, dass die Kläranlagen die vorhandene Zeit nutzen, um folgende Schritte zu üben, und damit die Eintrittsschwelle zu senken (Abbildung 7):



Abb. 7: Schritte der Energiemarktintegration für Kläranlagenbetreiber

1. „Üben“ im Pool durch (negative) Regelenergiebereitstellung über virtuelles Kraftwerk, Erfahrung sammeln über Pilotprojekte
2. Aufgebaute Fähigkeiten der Optimierung des Eigenversorgungsgrades auf den Kurzfrist-Stromhandelsmärkten platzieren, gegebenenfalls Einbeziehen von Flexibilitäten im Verbrauch
3. Geschäftsmodellentwicklung in allen Märkten, insbesondere auch als Anbieter energiewirtschaftlicher Flexibilität in Stromverteilnetzen

Hierbei kann der Kläranlagenbetreiber das neue intersektorale Handeln erlernen und erproben sowie technische Lösungsoptionen, wie sie in beiden Forschungsprojekten entwickelt wurden, testen.

Die Rahmenbedingungen für solche energiewirtschaftlichen Aktivitäten werden sich in absehbarer Zukunft verbessern:

- Entsprechend dem neuen Strommarktgesetz sollen für Lastspitzen, die durch Regelleistung oder Lastflexibilität entstehen, keine erhöhten, sondern besondere Netzentgelte gezahlt werden. Für kleinere Flexibilitätsanbieter wie Kläranlagen wären laut Interviews entnahmeunabhängige Grundpreismodelle ohnehin vorteilhafter.
- Die avisierte zeitliche Dynamisierung von Netzentgelten, aber auch von EEG-Umlage oder Stromsteuer könnten wichtige Steuerungsinstrumente sein, um dezentrale Flexibilitätsanbieter wie Kläranlagen im Energiemarkt zu fördern. Laut Interviewpartnern aus der Abwasserwirtschaft müssten jedoch für die Betätigung von Kläranlagenbetreibern auf Stromverteilnetzebene zuvor technische und rechtliche Voraussetzungen ihrer Smartgrid-Beteiligung, also bezüglich der Digitalisierung der Stromnetze, geschaffen werden [6].
- Die Eigenstromproduktion auf Kläranlagen wird bzw. wurde nach EEG und KWKG pauschal und somit in energiewirtschaftlich unabgestimmter Weise subventioniert. Der Wegfall der KWKG-Förderung sowie die abnehmende Wirtschaftlichkeit der EEG-Förderung könnten – abgesehen von den in These 2 beschriebenen Herausforderungen – eine Umorientierung zu energiemarkt-induzierten bzw. -konformen Betriebsstrategien von Kläranlagen-BHKW fördern.

6) Kläranlagenpersonal ist hervorragend für die Sektorkopplung qualifiziert. Diese stellt jedoch Gewohnheiten in Frage und kostet Zeit und Geld für Personalschulung und Akzeptanzförderung

Beim Betrieb der Kläranlage sowie der Einhaltung der Qualitätsparameter steht das Fachpersonal im Mittelpunkt. Gerade Kläranlagenpersonal bietet im Allgemeinen hohes Potenzial an Erfahrung und Fachwissen für den Umgang auch mit innovati-

ven Effizienz-Technologien und flexiblen Betriebsarten und somit die passende Qualifizierung zur Umsetzung von Maßnahmen der stärkeren Ausrichtung auf energiewirtschaftliche Potenziale. Allerdings müssen nicht nur die (technische und ökonomische) Betriebsführung, sondern auch alle weiteren Angestellten die neue Denk- und Herangehensweise mittragen, damit die Maßnahmen erfolgreich umgesetzt werden können.

Insofern dies nicht der Fall ist (zum Beispiel weil Prozesse komplizierter oder überwachungs- und steuerungsintensiver werden), bedarf es nicht nur der entsprechenden fachlichen Einarbeitung, sondern auch einer aktiven Überzeugungsarbeit. Verschiedene Experten äußerten sich bezüglich der Akzeptanz in Interviews skeptisch: Gerade Entscheidungsträger und Personal im Abwasserbereich tendierten zu der Ansicht, dass die Anlagentechnologie, die sich jahrzehntelang bewährt hat, auch unter geänderten Rahmenbedingungen weiter zuverlässig funktionieren werde. Tendenziell würden daher Innovationen erst einmal kritisch betrachtet oder abgelehnt. Dies hat sich allerdings in der Expertenbefragung nicht ganz bewahrheitet: Nach den Ergebnissen (insbesondere von Frage 12, Abbildung 5) zu urteilen, bewies gerade das befragte operative Personal allgemeine Innovationsfreundlichkeit. Es betrachtet Kläranlagen mit deutlicher Mehrheit als „Anlagen zur Aufbereitung und Rückgewinnung von Wasser und Nährstoffen sowie zur Energieproduktion“; unter den Akteuren der Managementebene hingegen wählten nur 40 % diese Antwort. Insofern scheint das operative Kläranlagenpersonal als wichtiger Treiber fungieren zu können, wenn es entsprechend in den Prozess eingebunden wird.

5 Fazit und Ausblick

Bislang hat die energiewirtschaftliche Beteiligung der Abwasserwirtschaft noch den Charakter von „good will“: Zwar lassen sich bereits heute mit einer Flexibilisierung von Energieproduktion und -verbrauch sowie energiewirtschaftlichen Dienstleistungen Kosten sparen und zusätzliche Einnahmen erwirtschaften, sie werden aber weder in besonderem Maß gefördert, noch (von der Mehrheit der Akteure) gefordert. Dies ist unter dem Gesichtspunkt zu betrachten, dass derzeit Strommärkte und -netze noch von den konventionellen Kraftwerken dominiert werden. Noch stehen sie zur Verfügung, um durch Redispatch, Regelleistung und Kapazitätsreserven die volatile Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien mit der Stromnachfrage abzugleichen. Doch mit steigendem Anteil der erneuerbaren Energien sind ihre Kapazitäten bereits heute rückläufig. Durch ernsthafte Klimaschutzmaßnahmen wie die Besteuerung von Emissionen („CO₂-Steuer“) oder die oben genannte Dynamisierung von EEG-Umlage und Stromsteuer könnten Kohle- und auch Gaskraftwerke in Zukunft schnell unwirtschaftlich werden. Dann wäre die Kommunalwirtschaft, und mit ihr die Abwasserwirtschaft, umso stärker gefragt, ihren Anteil zur Stabilisierung der Stromnetze zu leisten. Und so erwarten interviewte Akteure, dass energiewirtschaftliche Flexibilität ökonomisch noch attraktiver wird. Sie könne gar zum Grundrepertoire eines wirtschaftlichen Betriebs auch von Kläranlagen werden, so wie es heute die Energieeffizienz geworden sei. Wird der politisch-rechtliche Rahmen entsprechend gestaltet, dürfte die schrittweise, aber gewinnbringende Ausnutzung dieses Trends für die Kläranlagen überschaubaren Aufwand bedeuten. Dazu ein interviewter Stromhändler:

„Es ist eben eine schwierige Übergangszeit für die dezentralen Flexibilitäten. Aber da sind ja die Kläranlagen eigentlich in einer

ganz guten Position, denn ihre, sagen wir mal, Grundberechtigung nehmen sie ja aus einem ganz anderen Bereich.“

Dank

Die Forschungsprojekte arrivee und ESiTI wurden von April 2014 bis März 2017 bzw. Mai 2014 bis April 2017 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Förderprogramms „Zukunftsfähige Technologien und Konzepte für eine Energieeffiziente und Ressourcenschonende Wasserwirtschaft – ERWAS“ gefördert.

Literatur

- [1] C. Schaum, D. Lensch, E. Zhukova, P. Cornel: *Kläranlagen als ein Baustein einer zukünftigen Energieinfrastruktur*, 48. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, Reihe „Gewässerschutz – Wasser – Abwasser“, Bd. 236, Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V., 2015
- [2] M. Schäfer, O. Gretzschel, T. G. Schmitt, H. Knerr: *Wastewater Treatment Plants as System Service Provider for Renewable Energy Storage and Control Energy in Virtual Power Plants – A Potential Analysis*, *Energy Procedia* 2015, 73, 87–93
- [3] F. Hüesker, T. Charles, T. Kornrumpf, M. Schäfer, T. G. Schmitt: *Kläranlagen als Flexibilitätsoptionen im Energiemarkt*, *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 2016, 63 (4), 299–304
- [4] M. Schäfer, O. Gretzschel, T. G. Schmitt, Y. Taudien: *Flexibilitätspotenziale von Kläranlagen am Energiemarkt*, *wwt – Wasserwirtschaft Wassertechnik* 2017 (3), 8–12
- [5] C. Schaum, A. Dornburg: *Flexibilisierung von Kläranlagen als Energiedienstleister*, 50. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, Reihe „Gewässerschutz – Wasser – Abwasser“, Bd. 245, Gesellschaft zur Förderung d. Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V., 2017
- [6] D. Salomon, M. Schäfer, F. Hüesker: *Kläranlagen als Flexibilitätsoptionen in Stromverteilnetzen. Was ist technisch machbar, ökonomisch sinnvoll und politisch zu steuern?*, Konferenzbeitrag, 4. Konferenz „Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien“, 31. Januar/1. Februar 2017, Berlin
- [7] O. Gretzschel, M. Schäfer, V. Honeck, A. Dornburg: *Wasserwirtschaftliche Anlagen als Flexibilitätsoptionen im Stromnetz, Zwischenergebnisse aus Projekten der BMBF-Fördermaßnahme ERWAS*, *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 2016, 63 (8), 670–678
- [8] M. Schäfer, I. Hobus, T. G. Schmitt: *Energetic flexibility on wastewater treatment plants*, *Water Science & Technology*, zur Veröffentlichung eingereicht, online: <http://wst.iwaponline.com/content/early/2017/05/25/wst.2017.308>
- [9] C. Schaum: *Abwasserbehandlung der Zukunft: Gesundheits-, Gewässer- und Ressourcenschutz*, Schriftenreihe IWAR, Bd. 233, Darmstadt, 2016
- [10] T. G. Schmitt, M. Schäfer, O. Gretzschel, A. Bidlingmaier, B. Hanke, I. Hobus, V. Honeck, T. Kornrumpf, P. Pyro, D. Salomon, M. Zdrallek: *Kläranlagen als Flexibilitätsoption im Stromnetz – Ergebnisse aus dem Verbundprojekt arrivee*, *wwt – Wasserwirtschaft Wassertechnik*, 2017 (5), 8–14
- [11] C. Schaum, R. Lutze, J. Rühl, T. Ansmann, A. Dierich: *Bausteine einer zukünftigen Kläranlage: Abwasserbehandlung und Energiesystemdienstleistung*, ERWAS-DACH-Seminar, Augsburg, 13. September 2016
- [12] R. Lutze, C. Schaum, P. Cornel: *Demand-driven energy supply on municipal WWTPs using an (anaerobic) membrane digester*, WEF Conference „Residuals and Biosolids 2016“, Milwaukee, USA, 4.–6. April 2016
- [13] M. Schäfer, O. Gretzschel: *Potential of Wastewater Treatment Plants for Long-Term-Storage Options via Power-to-Gas*, 11th International Renewable Energy Storage Conference (IRES), Düsseldorf, 2017
- [14] R. Mitsdoerffer: *Innovative Wärme- und Kältekonzepte auf Kläranlagen*, DWA-EnergieTag, Augsburg, 12. September 2016
- [15] *Verfahren und Trends in der Thermischen Klärschlammbehandlung – Teil 2*, Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.4 „Neue Technologien zur Schlammbehandlung“, *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 2016 63 (8), 691–696
- [16] *Wärme- und Kältekonzepte auf Kläranlagen*, Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KEK-10.4 „Wärme- und Kältekonzepte auf Kläranlagen“, *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 8/2016, 63 (8), 704–713
- [17] C. Beier: *Flex KWK – Strom-Wärme-Kopplung neu denken*, in: *EnergieAgentur.NRW GmbH (Hrsg.): Flexibilität: Eine wichtige Säule der Energiewende. Flexible Lösungen aus und für Nordrhein-Westfalen*, S. 21–22, Düsseldorf, 2016
- [18] G. C. Becker, A. Kruse: *Phosphat-Dünger und Kohle aus Klärschlamm. Über die hydrothermale Carbonisierung gelingt es, Phosphat als Struvit, einem zugelassenen Dünger, aus Klärschlamm zu gewinnen*, in: M. Klemm, R. Glowacki, M. Nelles (Hrsg.): *Hydrothermale Prozesse*, Leipzig, 2015, S. 44–46, https://www.dbfz.de/fileadmin/HTC/img/layout_IF_HTP_web.pdf, zuletzt geprüft am 4. Juli 2017
- [19] E. A. Müller, E. Graf, B. Kobel, A. Humi, R. Wenger, U. Frei, C. Christen et al.: *Potenzial der Schweizer Infrastrukturanlagen zur Lastverschiebung*, Vortrag, Bundesamt für Energie, Bern, 2013
- [20] *Wasserstoffbasierte Energiekonzepte*, Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KEK-10.1 „Wasserstoffbasierte Energiekonzepte“, *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 2016, 63 (8), 679–683
- [21] O. Gretzschel, M. Schäfer, T. G. Schmitt, I. Hobus: *Innovative Anlagenkonzepte für den Strommarkt der Zukunft*, ERWAS-DACH-Seminar in Verbindung mit DWA-EnergieTag, ERWAS, Augsburg, 2016, http://erwas-arrivee.de/userspace/EXT/arrivee/Dokumente/160913_DWA_DACH_Seminar_TU_KL_Gretzschel_Vortrag.pdf
- [22] U. Welteke-Fabrizius: *Zur veränderten Ökonomie von flexibler KWK in kommunaler Hand. Betriebsweise, Ertragspotenziale und Wirtschaftlichkeit von Blockheizkraftwerken nach KWK-Gesetz 2016*, *Solarzeitalter* 3/2016, 32–36
- [23] T. Kornrumpf, J. Meese, M. Zdrallek, N. Neusel-Lange, M. Roch: *Economic Dispatch of Flexibility Options for Grid Services on Distribution Level*, in: PSCC (Hrsg.): *Proceedings of the 19th Power Systems Computation Conference (PSCC 2016)*, http://erwas-arrivee.de/userspace/EXT/arrivee/Dokumente/160624_Kornrumpf_PSCC_2016_P214_final.pdf
- [24] *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): Ein Strommarkt für die Energiewende. Ergebnisrapport des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (Weißbuch)*, Berlin, 2015, S. 77
- [25] A. Keil: *Abwasseranlagen in Virtuellen Kraftwerken. Nutzung von Flexibilität zur Preisoptimierung in Handels- und Regelenergiemärkten*, DWA-Landesverbandstagung Nord-Ost 2015, Magdeburg, S. 189–202
- [26] C. Wöstmann, J. Ecke: *Der Markt für negative Sekundärregelleistung: Nischenmarkt oder Hoffnungsträger?*, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen Online Sommer Special* 2015, S. 11–13
- [27] I. Hobus, P. Pyro, Y. Taudien, M. Schäfer, O. Gretzschel: *Dynamische Simulation von Regelenergie- und Speicherkonzepten auf Abwasserreinigungsanlagen*, in: MSR in abwassertechnischen Anlagen, Konferenzbeitrag; 30./31. Mai 2017, Wiesbaden
- [28] D. Gengnagel: *Kläranlagen im Energiemarkt der Zukunft: Szenarien zu politischen Rahmenbedingungen. Schlüsselfaktor Abwasserreinigungsstandards*, Vortrag beim 2. arrivee-Expertenworkshop, Berlin, 6. Oktober 2016, http://erwas-arrivee.de/userspace/EXT/arrivee/Dokumente/161117_Expertenworkshop_Berlin/Gengnagel_Standards_2016.pdf

Autoren

Dipl.-Pol. Axel Dierich, Dr. Till Ansmann
inter 3 Institut für Ressourcenmanagement
Otto-Suhr-Allee 59, 10585 Berlin

E-Mail: dierich@inter3.de

Dr. Frank Hüesker, Dipl.-Ing. Oliver Gretzschel
TU Kaiserslautern
Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft
Paul-Ehrlich-Straße 14, 67663 Kaiserslautern

