

Michael Sievers und Hinnerk Bormann

Energiewende in der Abwasserbehandlung

Chancen und Herausforderungen

Die Energiewende in der kommunalen Abwasserbehandlung in Bezug auf die Elektroenergie ist technisch derzeit nur für sehr große Kläranlagen oder Kläranlagenverbünde im Zusammengehen mit thermischer Klärschlammverwertung möglich. Abwasser ist jedoch aufgrund seiner organischen Bestandteile ein Energieträger für chemisch gebundene Energie. Eine mit Abwasser betriebene bio-elektrochemische Brennstoffzelle wird vorgestellt, die neue Möglichkeiten für die energetische Nutzung von Abwasser aufzeigt.

1. Einleitung

Sauberes Trinkwasser und die zugehörige Sanitärversorgung sind ein Grundrecht (UN Resolution UN 64/292), welches in Europa und insbesondere in Deutschland mit technisch anspruchsvollen Infrastruktursystemen gesichert wird. Diese Systeme verbrauchen in Deutschland pro Jahr zusammen 6,6 TWh elektrische Energie, wobei 4,2 TWh auf die Abwasserbehandlung und 2,4 TWh auf die Wasserversorgung entfallen.

Der Klimawandel und die gebotene Senkung von CO₂-Emissionen erfordern eine Weiterentwicklung dieser Infrastrukturen hin zu energieeffizienteren Systemen. Es wird geschätzt, dass durch Energiesparmaßnahmen und Effizienzsteigerung für diese Systeme ein Einsparpotenzial von ca. 25 % des aktuellen Stromverbrauches vorhanden ist. Um diese Potenziale zu nutzen, hat die Bundesregierung über das BMBF die Fördermaßnahme „Zukunftsfähige Technologien und Konzepte für eine energieeffiziente und ressourcenschonende Wasserwirtschaft (ERWAS)“ im Forschungsschwerpunkt Nachhaltiges Wassermanagement (NaWaM) ins Leben gerufen [1]. Wesentliche Herausforderung dabei ist, neue Konzepte für energieeffiziente Systeme so weiter zu entwickeln, dass die gebotene Sicherheit für die Wasserversorgung und Abwasserbehandlung weiterhin eingehalten wird.

Abwasser ist auf Grund seiner organischen Bestandteile auch ein Energieträger

für chemisch gebundene Energie. Die Nutzbarkeit dieser Energie ist unterschiedlich ausgeprägt. Zum Beispiel ist die Energieumwandlung in Strom, Wärme und den Kraftstoff Methan für organisch hochbelastete Abwässer mittels anaerober Abwasserbehandlung und nachgeschalteter Gasverwertung aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten bereits vielfach technisch umgesetzt worden, wohingegen die Behandlung organisch schwach belasteter Abwasser in Verbindung mit einer Nährstoffelimination wie z. B. in der kommunalen Abwasserbehandlung bisher keinen Beitrag zur Energieproduktion liefert bzw. liefern kann. Erschwerend kommt hinzu, dass zukünftig zusätzliche energieverbrauchende Maßnahmen erforderlich sein werden wie z. B. die Entfernung von Spurenstoffen zum Schutz der Gewässer oder die Phosphorrückgewinnung zur Schonung der Ressourcen.

Die Abwasserwirtschaft steht deshalb vor einer großen Herausforderung, die nur mit erheblichem Aufwand für Forschung und Entwicklung angenommen werden kann. Positiv zu sehen sind die vielen Möglichkeiten, die bestehen, weil der Energiegehalt auch von schwach belasteten Abwässern erheblich ist und weil nutzbare Energie aus Klärschlamm (Methan, Wärme, Strom) produziert wird. Darüber hinaus sind tages- und jahreszeitliche Anpassungen sowohl im Verbrauch als auch in der Erzeugung nutzbarer Energie möglich.

2. Energiebilanz einer kommunalen Abwasserbehandlungsanlage

Eine Energiebilanz berücksichtigt den chemisch gebundenen Energiestrom, den elektrischen Energiestrom und den Wärmeenergiestrom. Energieströme werden üblicherweise in Arbeit pro Zeiteinheit, d. h. in kWh pro h angegeben, so dass sich eine Leistungsbilanz ergibt.

Der Bilanzraum ist die Abwasserbehandlungsanlage. Die von außen zugeführte Energie umfasst die chemisch gebundene Energie im Rohabwasser sowie die benötigte elektrische Energie und Wärmeenergie. Die Möglichkeit zur Abgabe von Wärme an externe Verbraucher ist standortabhängig und in der Regel begrenzt. Diese Energieform, wozu auch die Abwasserwärme mit Nutzung über Wärmepumpen gehört, wird deshalb nicht berücksichtigt. Ebenfalls nicht berücksichtigt wird der von außen zugeführte rohabwasserfremde Energiestrom wie z. B. die Zugabe von Fremdschlamm, Co-Substrat etc. in die Faulung, da diese Energieströme nicht mit dem Rohabwasser im Zusammenhang stehen.

Die aus der Anlage abgeführte Energie beinhaltet die chemisch gebundene Energie des gereinigten Abwassers, des abgegebenen Klärschlammes sowie die an die Umgebung abgegebene Wärme.

Die chemisch gebundene Energie eines Massenstroms ergibt sich aus dessen Masse für den Chemischen Sauerstoffbedarf

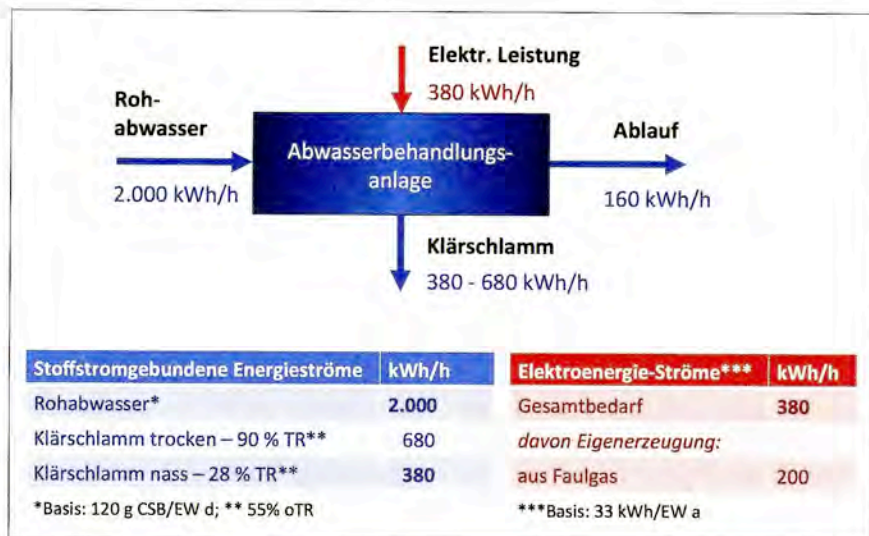


Bild 1: Beispielhafte Energieströme im Jahresmittel für eine 100.000 EW Abwasserbehandlungsanlage (Quelle: CUTEC)

(CSB) und der frei werdenden Reaktionsenthalpie bei der Oxidation des CSB mit Sauerstoff.

Die mittlere Jahresenergiebilanz für eine 100.000 EW Modellanlage ist in **Bild 1** beispielhaft aufgezeigt.

Der chemisch gebundene Energiestrom des zufließenden Rohabwassers beträgt ca. 2 MWh/h. Für den Betrieb der Abwasserbehandlungsanlage werden ca. 210 kWh/h an Elektro-Energie aufgewendet, hauptsächlich für die Belüftung. Dabei ist zu beachten, dass ein Großteil der Energie für die Entfernung von Stickstoffverbindungen benötigt wird und Stickstoffverbindungen keine chemisch gebundene Energie enthalten.

Die chemisch gebundene Energie des Rohabwassers wird während der Abwasserbehandlung zu ca. 55 % in den Primär- und Überschussschlamm überführt und zu ca. 35-40 % über die aeroben Prozesse in CO₂ umgewandelt. Der Rest von ca. 8 % verbleibt im gereinigten Abwasser.

Sofern eine Schlammfäulung auf der Kläranlage vorhanden ist, wird ein Teil der im Schlamm gebundenen Energie in Methan (35 bis 40 %) überführt und der andere Teil nach einer mechanischen Schlammwässerung der thermischen oder landwirtschaftlichen Verwertung zugeführt. Der nutzbare Energiestrom dieser abzugebenden Schlammmenge hängt vom Entwässerungsgrad ab und beträgt 50 bis 550 kWh/h für 28 bis 90 % TR bei einem oTR Gehalt von 55 % oTR.

Der niedrige energetische Nutzen von 50 kW für einen Schlamm mit 28 % TR ist

auf die für die Trocknung erforderliche Verdampfungsenthalpie zurückzuführen. Die Verdampfungsenthalpie ist zu berücksichtigen, weil bei der thermischen Verwertung das Wasser üblicherweise als Wasserdampf an die Umgebung abgeführt und damit nicht genutzt wird. Die chemisch gebundene Energiemenge des entwässerten Faulschlammes reduziert sich somit um die erforderliche Verdampfungsenthalpie.

Die mittlere Energiebilanz für die Modellkläranlage zeigt, dass mit konventioneller Technik ca. 55 % als Eigenstrom aus Klärgas erzeugt werden können. D. h., es bleibt ein Rest von ca. 180 kW übrig, der als externe elektrische Leistung benötigt wird, um das Abwasser zu reinigen.

Folgende Randbedingungen sind bei der Betrachtung der mittleren Energiebilanz u. a. zu beachten.

Der elektrische Energieverbrauch einer Kläranlage hängt insbesondere von den verwendeten Verfahren und von der Kläranlagengröße ab. Der DWA-Leistungsvergleich 2011 zeigt für Deutschland beispielsweise, dass der spezifische Stromverbrauch pro Einwohner und Jahr (Medianwerte) von 54,1 kWh/EW.a für die Größenklasse 1 (GK1 = bis 999 Einwohnerwerte, EW) abnimmt auf 34,1 und 32,9 kWh/EW.a für die Größenklassen 4 und 5 (GK4: 10.000-100.000EW, GK5: mehr als 100.000 EW). Dabei verbrauchen die Kläranlagen der Klassen GK4 und GK5 mehr als 90 % der insgesamt in Deutschland für die Abwasserreinigung benötigten Energie [2].

Der Wärmebedarf liegt in der vergleichbaren Größenordnung wie der Strombedarf und ist zum größten Teil durch die Schlammfäulung verursacht, da diese auf Grund der Betriebstemperatur von ca. 37 °C (mesophil) und teilweise bei 55 °C (thermophil) Wärmeverluste an die Umgebung erzeugt. Der Wärmebedarf unterliegt jahreszeitlichen Schwankungen und wird durch Größe, Form, Isolierung der Faulbehälter, aber auch durch Wärmerückgewinnungsverfahren beeinflusst. Beispielsweise wird die bei einer Stromerzeugung aus Klärgas entstehende Wärme im Sommer kaum benötigt.

3. Möglichkeiten zur Verbesserung der Energiebilanz

Um die auf die Elektroenergie bezogene Energiewende in der Abwasserbehandlung einzuleiten, ist die beschriebene Lücke von 180 kW elektrisch über Maßnahmen zur verbesserten Energienutzung (Senkung des elektrischen Energieverbrauches) und -wandlung (Erhöhung der direkt nutzbaren Energie wie Strom, Kraftstoff, Wärme) mehr als auszugleichen.

Ein großes Potenzial liegt dabei im Bereich der Energieumwandlung, weil der Senkung des Elektroenergie-Verbrauches auf Grund der erforderlichen Betriebssicherheit Grenzen gesetzt sind, denn die Hauptaufgabe eines Klärwerks, das Reinigen des Abwassers, darf nicht gefährdet werden. Eine Ausnahme bildet die Deammonifikation, die als neue Verfahrenstechnik einen größeren Beitrag zur Senkung des Elektro-Energieverbrauches liefern kann, weil hierbei weniger Energie für die Belüftung erforderlich ist.

Die Tatsache einer negativen Elektro-Energiebilanz – trotz des hohen Energiegehaltes im Rohabwasser – verdeutlicht, dass ein Bedarf an effizienteren oder neuen Verfahrenskombinationen zur Energieumwandlung für gering belastetes Abwasser besteht.

Das Hauptaugenmerk bei der Entwicklung, Umsetzung und Anwendung effizienterer bzw. neuer Verfahrenstechniken zur Umwandlung der im Abwasser gebundenen Energie in nutzbare Energieträger lag in der Vergangenheit im Bereich der Klärschlammbehandlung. Verfahrenstechniken zur Energieumwandlung aus gering belastetem Abwasser sind nicht vorhanden und wurden bisher auch nicht gezielt entwickelt. Dies hat sich mit der

neuen Fördermaßnahme des BMBF „Zukunftsfähige Technologien und Konzepte für eine energieeffiziente und ressourcenschonende Wasserwirtschaft (ERWAS)“ geändert. Im Rahmen von ERWAS werden drei Verbundvorhaben BioMethanol, KESTro und BioBZ, gefördert, die eine Entwicklung von Techniken zur direkten Energieumwandlung aus Abwasser mittels biologischer Brennstoffzelle bzw. Elektrolyse zum Ziel haben [3].

Es ist zu beachten, dass diese Techniken noch ganz am Anfang ihrer Entwicklung stehen. Da es sich um einen in der Abwassertechnik kaum bekannten Technologieansatz handelt, soll der Ansatz der bio-elektrochemischen Brennstoffzelle im Beitrag vorgestellt werden, nicht zuletzt auch deshalb, weil mit diesem Ansatz das Ziel einer Energiewende potenziell machbar erscheint, ohne die Hauptaufgabe, die sichere Abwasserreinigung, zu gefährden.

3.1 Nutzbare Energie aus Klärschlamm

Die am weitesten fortgeschrittenen Ansätze zur Erhöhung der nutzbaren Energie aus Klärschlamm sind die Desintegrationsverfahren. Mittels Desintegrationsverfahren wird versucht, mit möglichst geringem Energieaufwand den Schlamm teilweise aufzuschließen, um mehr Methan zu gewinnen. Häufig steht bei Desintegrationsverfahren auf Grund der gestiegenen Kosten für die Klärschlammabgabe allerdings nicht die Energiebilanz im Fokus, sondern die Reduzierung der Klärschlammmenge, so dass die Energiebilanz auch bei Desintegrationsverfahren negativ sein kann.

Zu den Desintegrationsverfahren gehören allgemein mechanische, chemische, enzymatische und thermische Verfahren sowie Kombinationen hiervon. Thermische Hydrolyseverfahren haben im Vergleich zu anderen Verfahren den Vorteil, dass sie auf einen Teil der Abwär-

me zurückgreifen können, die für die Kläranlage oft nicht nutzbar ist. Ein weiterer Vorteil von thermischen Hydrolyseverfahren liegt in der möglichen Verbesserung der Entwässerbarkeit des Schlammes. Dadurch wird in der nachfolgenden thermischen Verwertung überproportional weniger Verdampfungswärme benötigt, so dass die durch die verbesserte Faulung erzeugte Absenkung des unteren Heizwertes des Faulschlammes kompensiert wird.

Das Potenzial zur Erhöhung des Eigenstromanteils kann für Desintegrationsverfahren mit ca. 10 % der bisherigen Eigenstrommenge abgeschätzt werden, auch weil ein Teil des zusätzlich produzierten Stroms für den Betrieb der Desintegrationsanlage aufgewendet werden muss. Für die o. g. 100.000 EW Modellanlage wären das ca. 13 kW elektrisch, so dass im Mittel immer noch ca. 165 kW Elektroenergie extern zugeführt werden müssen.

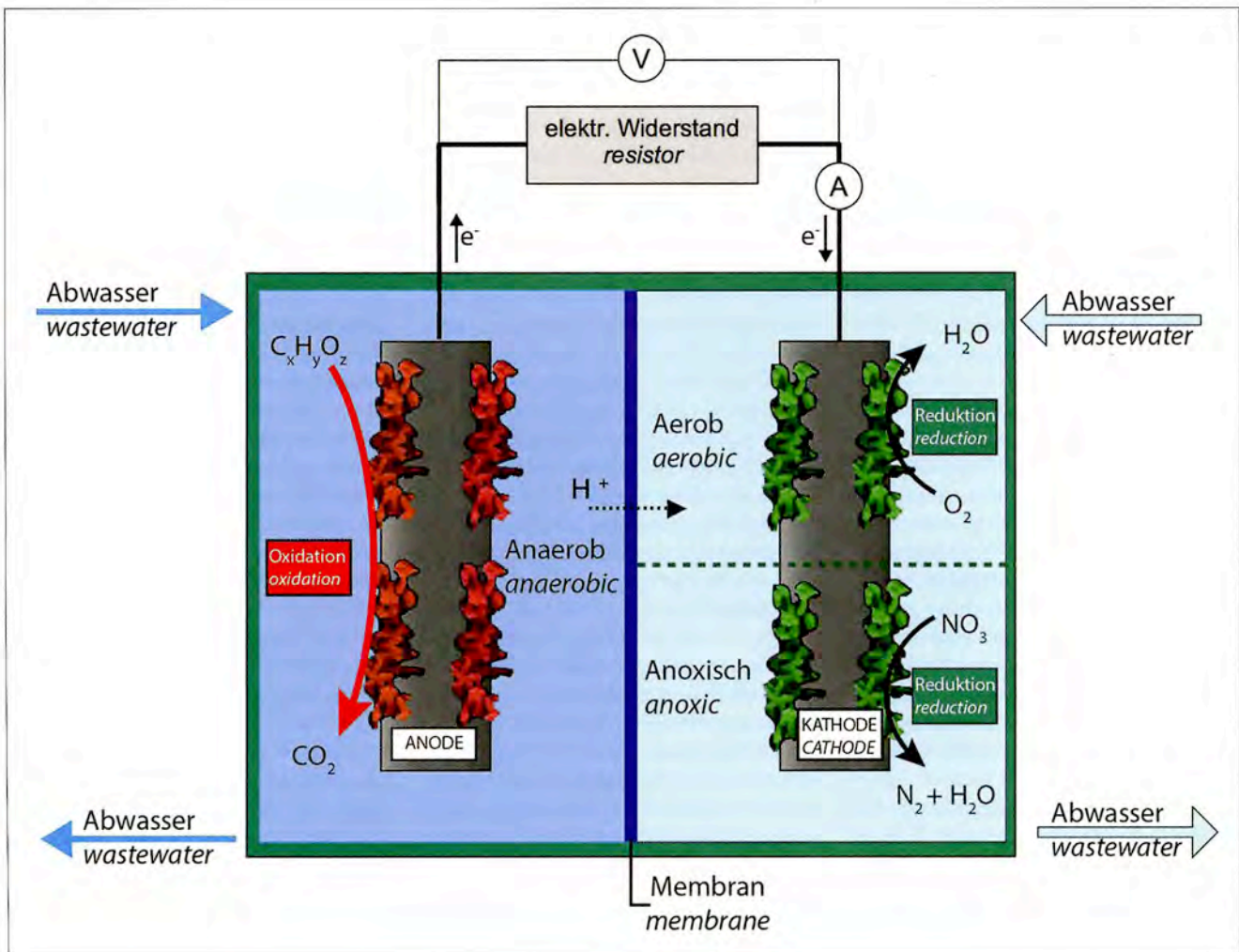


Bild 2: Funktionsprinzip einer bio-elektrochemischen Brennstoffzelle (Quelle: CUTEC)

Ein ergänzender möglicher Ansatz zur Erhöhung der Eigenstromproduktion aus Faulgas ist die Erhöhung der Schlammmenge. Beispielsweise kann eine Erhöhung des Primärschlammanteils durch eine Verbesserung der Vorklärung erzielt werden. Allerdings ist dabei zu prüfen, inwieweit die zusätzliche Entnahme von Organika die Denitrifikation nicht gefährdet.

Von Bedeutung ist ferner folgende Tatsache: Im Zusammenhang mit Desintegrationsverfahren wird häufig übersehen, dass auf Grund der zusätzlichen Faulgaserzeugung auch mehr Abwärme anfällt, die z. B. auch für eine Teiltrocknung des Schlammes genutzt werden könnte. Im Rahmen einer institutseigenen Machbarkeitsstudie für das EURAWASSER Klärwerk in Goslar wurde aufgezeigt, dass mittels Überschusswärme aus dem Einsatz einer thermischen Hydrolyse mittlere Trocknungsgrade von ca. 60-65 % TS (Trockensubstanz) ermöglicht werden. Die mittlere Jahresbilanz in Bild 1 verbessert sich dadurch erheblich, weil der nutzbare Energieinhalt des Schlammes ansteigt. Als Folge verbessert sich die Energiebilanz bei der Verwertung des Schlammes in der nachfolgenden Verbrennung oder sonstigen thermischen Verwertung deutlich, so dass bei einer Gesamtbetrachtung des Systems „Kläranlage-Verbrennungsanlage“ die Energiewende bezüglich Elektroenergie bereits heute schon erreicht werden kann.

Da jedoch nur wenige große Kläranlagen die Möglichkeit eines solchen Verbundsystems haben, liegen weitere erhebliche Herausforderungen vor uns, eine flächendeckende Energiewende herbeizuführen.

3.2 Nutzbare Energie aus Abwasser

Nachfolgend wird der Technologieansatz einer direkten Stromerzeugung aus schwach belasteten Abwässern mittels einer bio-elektrochemischen Brennstoffzelle vorgestellt. Die Technik beinhaltet analog zu den chemischen Brennstoffzellen paarweise angeordnete Kammern, die Elektroden enthalten. Auf Grund der unterschiedlichen Redox-Potentiale in den Elektrodenkammern werden in einer Kammer Elektronen abgegeben (Anode) und in der anderen Kammer Elektronen aufgenommen (Kathode). Im Unterschied zu den chemischen Brennstoffzellen fungieren lebende Mikroorganismen als Katalysatoren, d. h. der (Bio)Katalysator erneuert sich ständig und verbraucht sich im

Gegensatz zu chemischen Katalysatoren nicht. Die Mikroorganismen sind dabei als Biofilm auf der Elektrodenoberfläche angesiedelt.

Bild 2 zeigt das Funktionsprinzip einer beispielhaften bio-elektrochemischen Brennstoffzelle (Bio-BZ). Das Rohabwasser fließt durch die Anodenkammer. Dabei werden die gelösten organischen Abwasserinhaltsstoffe von den Mikroorganismen unter anaeroben Bedingungen teilweise abgebaut. Anders als bei Anaerob-Prozessen werden die Verbindungen nicht bis zum Methan umgewandelt, sondern die Mikroorganismen geben die Elektronen vorher an die Anode ab. Die Elektronen wandern dann über einen elektrischen Leiter und Verbraucher an die Kathode. In der Kathodenkammer wird ein Elektronenakzeptor reduziert. Als Elektronenakzeptoren stehen beispielsweise Sauerstoff und Nitrat zur Verfügung, wobei Sauerstoff zu Wasser und Nitrat zu Stickstoff reduziert werden. Die hierfür erforderlichen Wasserstoff-Ionen wandern über eine semipermeable Membran aus der Anodenkammer in die Kathodenkammer. Wesentliches Kriterium für das Funktionieren des Gesamtsystems ist eine ausreichende Redoxpotenzial-Differenz zwischen Anode und Kathode. Damit wird deutlich, dass beide Elektrodenkammern mit unterschiedlichen Abwasserströmen beschickt werden müssen. Das Gesamtsystem ist somit auch vergleichbar mit einem aeroben oder anoxischen Prozess, auch wenn die Anodenkammer anaerob betrieben wird.

Weiterhin ist zu beachten, dass (Ammonium-)Stickstoff und Phosphate kaum eliminiert werden, so dass eine Kombination mit anderen Verfahren wie z. B. Nitrifikation, Deammonifikation oder Belebtschlammverfahren erfolgen muss.

Ergänzend sei angemerkt, dass es unterschiedliche Bauprinzipien für bio-elektrochemische Brennstoffzellen gibt wie z. B. Einkammersysteme mit einer sogenannten Luftkathode [4]. Welches das geeignetste Prinzip ist, muss erst noch herausgefunden werden. Entwicklungsbedarf für eine Anwendung der BioBZ ist in technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Hinsicht vorhanden. Hierzu gehören das Scale-up (konstruktiv, strömungstechnisch, elektrochemisch, biologisch und verfahrenstechnisch), das Elektrodenstack-Design (Materialverbrauch, Elektroden-/Dichtungsmaterial, Werkzeug) sowie die Systemintegration (Gesamtsystem

BioBZ, Stromspeicherung, -wandlung) und die sinnvolle Integration auf der Kläranlage (prozess-, anlagentechnisch).

Bisherige Untersuchungen an einer BioBZ im Labormaßstab an unserem Institut zeigten jedoch, dass

- sich kommunales Abwasser mit einer BioBZ bis auf CSB Werte von ca. 60 mg/L reinigen lässt,
- das Stromgewinnungspotenzial von der biologischen Abbaubarkeit der gelösten Organik abhängt, d. h., der leicht abbaubare CSB ermöglicht eine deutlich höhere Stromproduktion als der biologisch schwerer abbaubare CSB,
- die Stromproduktion mit der Zeit zunimmt und über mehrere Monate stabil betrieben werden kann,
- ein schnelles Anfahrverhalten bei kurzzeitigen Unterbrechungen (mehrere Tage) in der Substratzufuhr vorliegt,
- es wichtig ist, eine möglichst hohe elektrodenflächenspezifische Stromproduktion zu erreichen, damit die Gesamtelektrodenfläche und die Herstellkosten reduziert werden können (Anhaltswert: nicht unter ca. 300 bis 400 mW/m²), wobei die Relation zwischen flächenspezifischer Leistung und flächenspezifischen Kosten Verschiebungen aufweisen können,
- wichtige Kriterien zur Verfahrenstechnik, zum Scale-up, zur Herstellung und zum Betrieb noch zu definieren und überprüfen sind.

Das Potenzial der BioBZ als Beitrag zur Energiewende wird deutlich, wenn man die bisher erzielte Energie-Umwandlungseffizienz für leicht abbaubares Substrat von 40 % [4] sowie die Annahme eines Teilabbaus von 25 % des CSB im Rohabwasser zugrunde legt. Für die oben beschriebene Modellanlage besteht demnach ein Leistungspotenzial von 200 kW elektrisch, was die benötigten ca. 165 kW für eine Energieautarkie der Abwasseranlage überschreitet. Damit könnte die Energiewende in der kommunalen Abwassertechnik eingeleitet werden, so dass die Einbindung von Abwasseranlagen in dezentrale Energiemanagement-Netzwerke zukünftig eine große Bedeutung haben wird. Voraussetzung hierfür sind allerdings entsprechende F+E Aktivitäten, die breiter und vielfältiger angelegt sein müssen als die Begonnenen.

Bei dem genannten Leistungspotenzial von 200 kW ist allerdings zu beachten, dass sich durch den CSB-Abbau auch die Menge des produzierten Schlammes redu-

ziert, so dass kleinere Faulgasmengen zu erwarten sind. Auf der anderen Seite ist gleichzeitig eine Einsparung an Belüftungsenergie zu erwarten. Ferner ist zu beachten, dass sich durch den CSB-Abbau in der BioBZ auch die für eine Denitrifikation erforderliche Menge an Organik reduziert. Hier sind gegebenenfalls Ansätze für eine gleichzeitige Denitrifikation in der BioBZ gefragt.

Da alle die genannten Einflüsse quantitativ noch nicht beschrieben werden können, müssen sie erarbeitet werden. Die Erarbeitung von einigen der notwendigen Kennzahlen ist eine der Aufgaben des BMBF-Verbundvorhabens BioBZ [5], bei dem neben der CUTEC auch Forschergruppen der TU Braunschweig, der TU Clausthal und der Forschungsstelle des DVGW am KIT Karlsruhe beteiligt sind. Die Entwicklung der Pilotanlage gemeinsam mit der Fa. Eisenhuth sowie der Betrieb dieser Anlage auf dem Goslarer Klärwerk des Projektpartners EURA-WASSER soll die erforderlichen Informationen liefern.

4. Fazit und Ausblick

Eine Energiewende in der kommunalen Abwasserbehandlung in Bezug auf die Elektroenergie ist technisch derzeit nur für sehr große Kläranlagen oder Kläranlagenverbünde im Kontext mit einer thermischen Klärschlammverwertung möglich, sofern die überschüssige Wärmeenergie aus der Faulgasverstromung des Klärwerks für eine Teiltrocknung des Schlammes genutzt werden kann. Die

bei der Verbrennung des getrockneten Schlammes entstehende Wärmeenergie würde dann eine höhere Stromausbeute liefern als die auf dem Klärwerk benötigte Fremdenergie.

Für andere Kläranlagen ist die Energiewende noch nicht darstellbar. Neue Technologieansätze und ein entsprechender F+E Aufwand sind deshalb gefragt. Ein im Beitrag vorgestellter Ansatz ist die bio-elektrochemische Brennstoffzelle. Dieser Ansatz könnte bei erfolgreicher Entwicklung eine flächendeckende Energiewende in der kommunalen Abwasserbehandlung einleiten. Allerdings befinden sich die Entwicklungen noch ganz am Anfang, weshalb große Herausforderungen auf uns zukommen. Erste Entwicklungen in Bezug auf Pilotuntersuchungen und Bewertung dieser Technologie werden deshalb vom BMBF im Rahmen der Fördermaßnahme ERWAS im BMBF-Rahmenprogramm Forschung für nachhaltige Entwicklungen (FONA) – Nachhaltiges Wassermanagement (NAWAM) finanziell unterstützt.

Literatur

- [1] www.bmbf.nawam-erwas.de
- [2] http://de.dwa.de/tl_files/_media/content/PDFs/Abteilung_WAW/mj/Leistungsvergleich_2012_LOW.pdf.
- [3] Informationen zu den einzelnen Projekten unter <http://www.bmbf.nawam-erwas.de/de/erwasnet>
- [4] Rabaey K., Angenent L., Schröder U., Keller J. (2010): Bioelectrochemical Systems: From Extracellular Electron Transfer to Biotechnological Application. IWA Publishing, London, UK, S. 286ff und S. 207ff
- [5] www.bio-bz.de

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Michael Sievers


Leiter Abt. Abwasserverfahrenstechnik
CUTEC Institut an der TU Clausthal
E-Mail: michael.sievers@cutec.de

Dipl.-Ing. Hinnerk Bormann

CUTEC Institut an der TU Clausthal
Leibnizstraße 21
D- 38678 Clausthal-Zellerfeld
E-Mail: hinnerk.bormann@cutec.de

 Zusatzservice für Abonnenten von „Springer für Professionals | Energie + Umwelt“

Zum Thema

 Suche

finden Sie unter www.springerprofessional.de 42 Beiträge, davon 28 im Fachgebiet Energie + Umwelt

Stand: Dezember 2014

Medium

- Interview (1)
- Zeitschriftenartikel (17)
- Buchkapitel (24)

Sprache

- Deutsch (42)

Von der Redaktion empfohlen

Hölle, J., Stahl, M.: Gewässerschutz und Energieeinsparung bei der Abwasserreinigung in: Wasser und Abfall, Ausgabe 10/2013, Springer Vieweg, Wiesbaden 2013, S. 28-32, www.springerprofessional.de/4721462